



**HAL**  
open science

# Étude des effets des techniques d'aménagement sur la réhabilitation des formations végétales contractées dans le degré carré de Niamey (Sud-Ouest du Niger)

A. Boubacar Na-Allah

## ► To cite this version:

A. Boubacar Na-Allah. Étude des effets des techniques d'aménagement sur la réhabilitation des formations végétales contractées dans le degré carré de Niamey (Sud-Ouest du Niger). Géophysique [physics.geo-ph]. Université Abdou Moumouni, Niamey; École Doctorale des lettres, Arts, Sciences de l'Homme et de la Société (ED LASHS) Laboratoire d'Étude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens (LERTESS), 2022. Français. NNT: . tel-04692475

**HAL Id: tel-04692475**

**<https://hal.science/tel-04692475v1>**

Submitted on 10 Sep 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain



RÉPUBLIQUE DU NIGER  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
**UNIVERSITÉ ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY**  
École Doctorale des lettres, Arts, Sciences de l'Homme et de la Société (ED LASHS)  
Laboratoire d'Étude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens (LERTESS)

## THÈSE DE DOCTORAT EN GEOGRAPHIE

présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR** de L'UNIVERSITÉ ABDOU MOUMOUNI de NIAMEY

Spécialité : **Géographie physique / Biogéographie, Hydrologie et Aménagement**

réalisée par :

**M. Abdoulaye BOUBACAR NA-ALLAH**

# *Étude des effets des techniques d'aménagement sur la réhabilitation des formations végétales contractées dans le degré carré de Niamey (Sud-Ouest du Niger)*

sous la direction de

**Pr. Ibrahim BOUZOU MOUSSA**

soutenue publiquement le 07 novembre 2022 à Niamey,  
devant le jury composé de :

<b>M. Maman WAZIRI MATO</b> , Professeur titulaire, Université Abdou Moumouni de Niamey,	<b>Président</b>
<b>M. Ibrahim BOUZOU MOUSSA</b> , Professeur titulaire, Université Abdou Moumouni de Niamey,	<b>Directeur</b>
<b>M. Boubou ALDIOUMA SY</b> , Professeur Titulaire, Université Gaston Berger de Saint-Louis, Senegal,	<b>Rapporteur</b>
<b>M. Franck GIAZZI</b> , Maitre de Conférences, Université Grenoble-Alpes, France,	<b>Rapporteur</b>
<b>M. Ibrahim MAMADOU</b> , Maitre de Conférences, Université André Salifou de Zinder,	<b>Examineur</b>



## Dédicaces

---

*À ma défunte épouse, repose en paix*

*À mon défunt oncle, repose en paix*

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé .....	vii
Abstract .....	viii
Liste des sigles, acronymes et abréviations.....	ix
Remerciements .....	x
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1. Le cadre théorique de l'étude .....</b>	<b>5</b>
1.1. Contexte et justification .....	5
1.2. La revue de la littérature.....	7
1.2.1. Les causes de la dégradation environnementale .....	7
1.2.2. Les conséquences de la dégradation des sols sur l'hydrologie de l'Ouest du Niger.....	10
1.2.3. La mise en place de la politique de récupération des terres dégradées au Niger .....	11
1.2.4. La description de quelques techniques de conservation des eaux et des sols (CES) et leurs effets .....	12
1.2.5. Les effets des techniques de CES sur le ruissellement, l'infiltration et l'humidité du sol .....	18
1.2.6. Les effets sur la régénération du couvert végétal.....	20
1.2.7. Les limites des techniques de CES/DRS.....	21
1.3. La problématique de l'étude.....	23
1.4. Les questions de recherche.....	23
1.5. Les hypothèses de recherche .....	24
1.6. Les objectifs de l'étude .....	25
1.7. Les difficultés rencontrées .....	25
<b>Chapitre 2. La présentation de la zone d'étude et du protocole d'aménagement.....</b>	<b>27</b>
2.1. Le contexte géologique et géomorphologique .....	27
2.1.1. La présentation succincte de la géologie de l'Ouest du Niger .....	27
2.1.2. Les unités paysagères .....	28
2.1.2.1. Le revers du plateau et son talus .....	29
2.1.2.2. Le glacis .....	30
2.1.2.3. Les bas-fonds.....	30
2.2. Le contexte hydrologique.....	31



2.3. Le contexte climatique .....	32
2.3.1. La variabilité de la pluie.....	33
2.3.2. Les conséquences de la variabilité de la pluie .....	35
2.4. La dynamique démographique et ses conséquences sur l’environnement.....	36
2.5. La présentation du site expérimental de Tondi Kiboro .....	41
2.5.1. La justification du choix de site de Tondi Kiboro.....	41
2.5.2. Le choix des surfaces expérimentales (bandes dégradées) .....	42
2.5.3. La description des bandes dégradées .....	42
2.5.3.1. La caractérisation des surfaces dégradées sur le plateau à brousse tigrée.....	42
2.5.3.2. La caractérisation des surfaces dégradées sur le haut glacis .....	44
2.5.3.3. La pertinence du choix des surfaces dégradées.....	46
2.6. La présentation du protocole d’aménagement .....	47
2.6.1. La description des techniques d’aménagement étudiées.....	48
2.6.1.1. La technique de sous-solage (SL) .....	48
2.6.1.2. De la collecte des graines à l’ensemencement des parcelles.....	50
2.6.1.3. La technique de branchage .....	52
2.6.1.4. L’association du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B).....	53
2.6.2. La description des surfaces aménagées et témoin .....	53
2.6.2.1. Les surfaces aménagées par la technique de sous-solage .....	53
2.6.2.2. Les parcelles aménagées par la technique de branchage.....	55
2.6.2.3. Les parcelles aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage .....	55
2.6.2.4. Les parcelles témoins .....	57
<b>Chapitre 3. Le matériel et méthodes de mesures des paramètres étudiés .....</b>	<b>60</b>
3.1. Les mesures du ruissellement.....	60
3.1.1. La description des outils de mesure du ruissellement .....	60
3.1.1.1. Les parcelles expérimentales de ruissellement.....	60
3.1.1.2. La station hydrométrique .....	64
3.1.1.3. Le dispositif de mesure de la pluie sur le site d’étude .....	64
3.1.1.4. Le fonctionnement du dispositif expérimental de mesures .....	65
3.1.2. Les mesures du ruissellement et de l’érosion sur parcelles expérimentales .....	66
3.1.3. Le suivi du ruissellement et de l’érosion à l’échelle du BV.....	66
3.1.4. Les mesures de la pluie .....	68

3.1.5. Le relevé des états de surface et levé topographique .....	68
3.1.6. L'acquisition des images par drone à très haute résolution (IHR).....	69
3.1.7. L'analyse des mesures du ruissellement et de l'érosion .....	70
3.1.7.1. La détermination de la lame ruisselée .....	70
3.1.7.2. Le calcul du coefficient de ruissellement .....	71
3.1.7.3. La méthode de détermination des pertes en terre .....	71
3.2. Les mesures de l'humidité du sol .....	72
3.2.1. Les généralités sur les méthodes de mesure.....	72
3.2.1. Le protocole de mesures gravimétriques.....	73
3.2.2. La méthode de traitement des échantillons prélevés.....	74
3.2.3. La mesure de l'humidité du sol par sondage neutronique.....	75
3.2.3.1. Les caractéristiques des sondes à neutrons utilisées .....	75
3.2.3.2. Les tubes d'accès neutronique : installation et fonctionnement.....	77
3.2.4. Le suivi de l'humidité du sol dans les parcelles.....	79
3.2.5. Les avantages et les limites des méthodes utilisées .....	80
3.2.6. Les méthodes d'analyse des données d'humidité .....	81
3.2.6.1. La détermination de la teneur en eau du sol à partir de la méthode par mesure gravimétrique .....	81
3.2.6.2. La détermination de la teneur en eau du sol à partir de la méthode neutronique..	81
3.3. Le suivi de la végétation.....	82
3.3.1. Le choix des placettes .....	82
3.3.2. Le principe de mesure de la végétation herbacée.....	83
3.3.3. Le principe de mesure de la végétation ligneuse.....	84
3.3.4. Le suivi de la végétation sur le plan vertical.....	86
3.3.5. Le suivi de la végétation sur le plan horizontal.....	87
3.3.6. La méthode de traitement et d'analyse des données collectées .....	89
3.3.6.1. La détermination des variables floristiques.....	89
3.3.6.2. L'analyse de la strate herbacée.....	90
3.3.6.3. La détermination des paramètres dendrométriques.....	90
3.3.6.4. Les critères d'analyse de l'évolution de la végétation .....	92
3.3.6.5. L'évaluation du taux de régénération.....	92
3.3.6.6. Le calcul des indices de diversité floristique .....	93

<b>Chapitre 4. L'analyse des effets des techniques d'aménagement sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant et de la parcelle .....</b>	<b>97</b>
4.1. L'analyse de la pluviométrie des années d'observation.....	97
4.2. L'occupation du sol à l'échelle du site et caractéristique du bassin versant TK-IBM.....	98
4.3. Les effets des techniques d'aménagement sur le ruissellement à l'échelle du BV .....	101
4.4. Les effets des techniques d'aménagement sur le ruissellement à l'échelle de la parcelle élémentaire .....	103
4.4.1. L'analyse comparée du coefficient de ruissellement par technique d'aménagement .	111
4.4.1.1. L'évolution du coefficient de ruissellement par technique d'aménagement appliquée sur le revers du plateau .....	111
4.4.1.2. L'évolution du coefficient de ruissellement par technique d'aménagement appliquée sur le haut glacis .....	119
4.5. La corrélation entre le ruissellement et l'érosion .....	125
4.6. Analyse de l'évolution des pertes en terres par évènement pluvieux.....	125
<b>Chapitre 5. Les effets des techniques d'aménagement sur l'humidité du sol.....</b>	<b>128</b>
5.1. La comparaison de la teneur en eau du sol mesurée par la méthode gravimétrique .....	128
5.2. L'analyse de l'évolution de la teneur en eau volumique mesurée par la sonde à neutrons .	131
5.2.1. L'effet de la technique du branchage sur la teneur en eau volumique.....	131
5.2.2. L'effet de la technique du sous-solage simple sur la teneur en eau volumique.....	133
5.2.3. L'effet de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la teneur en eau volumique.....	137
5.2.4. L'analyse de la teneur en eau du sol sur les surfaces témoins .....	140
5.3. L'intercomparaison de la teneur en eau à l'échelle de l'évènement pluvieux .....	143
5.4. L'analyse de l'évolution mensuelle de la teneur en eau volumique du sol.....	145
5.4.1. L'effet de la technique du branchage sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau .....	146
5.4.2. L'effet de la technique du sous-solage simple sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau .....	148
5.4.3. L'effet de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau.....	153
5.4.4. La dynamique mensuelle de la teneur en eau sur les surfaces témoins.....	156
<b>Chapitre 6. L'analyse des effets des techniques d'aménagement sur la restauration du couvert végétal.....</b>	<b>160</b>
6.1. L'évolution de la diversité floristique .....	160

6.2. La synthèse de la composition floristique .....	163
6.3. L'étude comparative de la fréquence des espèces végétales .....	166
6.4. L'analyse de la diversité floristique et de la régénération de la végétation .....	173
6.4.1. L'analyse de la diversité floristique par parcelle .....	173
6.4.2. L'analyse de la régénération de la végétation par parcelle .....	178
6.4.2.1. L'analyse de l'effet des techniques d'aménagement sur la densité .....	178
6.4.2.1.1. L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la densité.....	178
6.4.2.1.2. L'influence de la technique du branchage sur la densité .....	180
6.4.2.1.3. L'influence de la technique du sous-solage sur la densité .....	181
6.4.2.1.4. La synthèse des résultats .....	182
6.4.2.2. L'évaluation de la survie et de la mortalité de la végétation poussée .....	183
6.4.2.3. L'analyse des facteurs influençant la régénération de la végétation .....	189
6.4.2.4. L'étude du développement de la végétation sur le plan vertical .....	192
6.4.2.4.1. L'influence de la technique du sous-solage simple sur la croissance verticale de la végétation.....	192
6.4.2.4.2. L'influence de la technique du branchage sur la croissance verticale de la végétation .....	195
6.4.2.4.3. L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la croissance verticale de la végétation .....	196
6.4.2.5. L'étude du développement de la végétation sur le plan horizontal.....	201
6.4.2.5.1. L'influence de la technique du sous-solage simple sur la croissance horizontale de la végétation.....	201
6.4.2.5.2. L'influence de la technique du branchage sur la croissance horizontale de la végétation .....	204
6.4.2.5.3. L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la croissance horizontale de la végétation.....	205
Conclusion générale .....	210
Références bibliographiques .....	214
Liste des tableaux .....	229
Liste des figures .....	230
Annexes .....	i
Liste des publications.....	xiv

## Résumé

Le Sahel est une des régions les plus vulnérables au monde en raison de la variabilité climatique et de la pression démographique, qui entraînent la dégradation des terres et une baisse de la productivité et de l'équilibre des écosystèmes. Au Niger, pour faire face à cette situation, des techniques de gestion des eaux et de conservation des sols ont été mises en œuvre pour récupérer les terres dégradées. Les avantages de ces techniques en matière de récupération des terres et de l'économie de l'eau ont été mis en évidence, mais les études, qui prennent en compte la récupération des écosystèmes en respectant leur organisation naturelle, sont rares.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'efficacité des techniques d'aménagement (sous-solage, ensemencement, branchage) sur la réhabilitation de la brousse tigrée en s'inspirant de son mode de fonctionnement naturel. L'approche utilisée consiste à sous-soler manuellement le sol à environ 15 cm de profondeur. Des graines des espèces ligneuses sont semées et de petites branches sont éparpillées sur les parcelles de 150 m<sup>2</sup>, et 500 m<sup>2</sup> respectivement, sur le revers du plateau et sur le haut glacis. Un dispositif expérimental a été placé pour le suivi du comportement hydrologique (tubes d'accès à la sonde à neutrons, parcelles de ruissellement, station hydrométrique) et de l'évolution de la végétation (relevés floristiques, mesure dendrométrique et prise des photos).

Les résultats des mesures montrent que la technique de sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B) reste la plus efficace pour réduire le ruissellement, augmenter l'humidité du sol et favoriser la croissance de la végétation. Les hauteurs d'eau mesurées, en 2016, avant l'aménagement du bassin versant TK-IBM sont supérieures par rapport aux hauteurs d'eau après l'aménagement, en 2017 où elles sont légèrement inférieures. De plus, une réduction significative de 5 % du coefficient de ruissellement a été observée à l'échelle des parcelles de ruissellement aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage entre 2016 et 2018. La teneur minimale en eau du sol est passée de 18 % en juillet à plus de 40 % en août-septembre (0 à 20 cm de profondeur). Le front d'infiltration était plus profond dans les parcelles SL-E-B (+ 90 cm) indiquant que le sous-solage manuel effectué à 15 cm seulement a multiplié par plus de 10 fois la profondeur d'infiltration de l'eau dans le sol. Suite à cela, une significative croissance de la végétation a été observée. La densité à l'échelle des parcelles de 150 m<sup>2</sup> a été multipliée par plus de 100 fois entre juillet 2016 et septembre 2016. La taille des individus a été multipliée par environ 10 fois, passant de 27 cm en 2016 à 267 cm en 2020 pour *Guiera senegalensis*, et de 7 cm en 2016 à 55 cm en 2020 pour *Combretum micranthum*. Le taux de couverture de la végétation en bande dans la parcelle SL-E-B III a passé de moins de 2 % en 2016 à plus de 77 % en 2020. Ces résultats montrent que la brousse tigrée a été réhabilitée tout en respectant sa structure, bien que cela nécessite un suivi continu pendant au moins trois années consécutives.

**Mots clés :** Dégradation des terres, techniques d'aménagement, gestion des eaux et sols, réhabilitation de la brousse tigrée, Sahel

## **Abstract**

Sahel Region is one of the most vulnerable in the world due to climate variability and demographic pressure, which lead to land degradation and a decline in productivity and balance of ecosystems. In Niger, to deal with this situation, water management and soil conservation techniques have been implemented to restore degraded land. The advantages of these techniques in terms of land recovery and water saving have been highlighted, but studies that take into account the ecosystems' restoration while respecting their natural organization are scarce.

This thesis aims to evaluate the effectiveness of management techniques (subsoiling, seeding, branching) on the rehabilitation of the tiger bush by drawing inspiration from its natural operation mode. The approach used is to manually subsoil the soil to about 15 cm deep. Seeds of ligneous species are sown and small branches are scattered over plots of 150 m<sup>2</sup> and 500 m<sup>2</sup> respectively, on the reverse side of the plateau and on the high glaciais. An experimental device was placed to monitor hydrological behaviour (neutron probe access tubes, runoff plots, hydrometric station) and the evolution of vegetation (floristic surveys, dendrometric measurement and taking photos).

Measurements results show that the subsoiling-seeding-branching (SL-E-B) technique remains the most effective in reducing runoff, increasing soil moisture and promoting vegetation growth. The water levels are measured, in 2016, before the TK-IBM watershed management are slightly lower than 2017. In addition, a significant reduction of 5% in the runoff coefficient was observed at the scale of runoff plots managed by subsoiling-seeding-branching between 2016 and 2018. The minimum soil water content decreased from 18% in July to more than 40% in August-September (0 to 20 cm deep). The infiltration front was deeper in the SL-E-B plots (+ 90 cm) indicating that the manual subsoiling carried out at only 15 cm increased by more than 10 times the depth of water infiltration in the soil. Following this, significant vegetation growth was observed. The density at the scale of the 150 m<sup>2</sup> plots was multiplied by more than 100 times between July 2016 and September 2016. The size of the individuals was multiplied by nearly 9 times on average, going from 27 cm in 2016 to 267 cm in 2020 for *Guiera senegalensis*, and from 7 cm in 2016 to 55 cm in 2020 for *Combretum micranthum*. The coverage rate of strip vegetation in the SL-E-B III plot increased from less than 2% in 2016 to more than 77% in 2020. These results show that the tiger bush has been rehabilitated while respecting its structure, although that this requires continuous monitoring for at least three consecutive years.

**Keywords :** Land degradation, Management techniques, water and soil management, rehabilitation of the tiger bush, Sahel

## Liste des sigles, acronymes et abréviations

AMMA - CATCH	Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine ; couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique
CR	Comptage réduit
FIT	Front Inter Tropical
G	Croûte gravillonnaire
GPS	Global Positioning System
GMV	Grande Muraille Verte
HAPEX-Sahel	Hydrological and atmospheric pilot experiment-SAHEL
INS	Institut National de la Statistique
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRI	Institut des radios isotopes
ISP	Indice Standardisé de Pluie
JEAI-SAPALOTE	Jeune Équipe Associée à l'IRD, SAVane PARc à LOng Terme
MOA	Mousson Ouest Africaine
ONG	Organisation Non Gouvernementale
PASP	Projet Agro-Sylvo-Pastoral
PDAAT	Projet de Développement Agroforestier et d'Aménagement
PDRT	Projet Développement Rural de Tahoua (PDRT)
PIK	Projet Intégré de Keita
RUI	Croûte de ruissellement
SL	Sous-solage
SL-E-B	Sous-solage Ensemencement Branchage
ST	Croûte structurale
TK	Tondi Kiboro
TK-IBM	Station hydrométrique installé sur le site de Tondi Kiboro baptisée au nom du Pr. Bouzou Moussa Ibrahim
W	Teneur en eau pondérale
ZCIT	Zone de Convergence Inter-Tropicale
$\theta$	Teneur en eau volumique
ZCIT	Zone de Convergence Inter-Tropicale

## **Remerciements**

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers AMMA-CATCH qui m'a permis de financer entièrement les campagnes de collecte de données nécessaires à la réalisation de cette thèse, qui a été préparée et présentée au sein du Laboratoire d'Étude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens (LERTESS) de l'Université Abdou Moumouni de Niamey.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, le Professeur BOUZOU MOUSSA Ibrahim, qui est à l'origine de l'idée de cette thèse et qui m'a accordé sa confiance en acceptant de superviser ce travail. Tout au long de cette recherche, il a été d'une grande patience et disponibilité, il m'a soutenu moralement et m'a prodigué de précieux conseils. Il m'a également enseigné la rigueur scientifique, la démarche méthodologique et l'analyse critique. Je suis reconnaissant envers lui, car c'est grâce à son soutien que j'en suis arrivé là. En un mot, je tiens à lui exprimer toute ma gratitude.

Je remercie également les membres du jury, M. Maman WAZIRI MATO qui m'a fait honneur de présider le jury, ainsi que M. Boubou ALDIOUMA SY et M. Franck GIAZZI qui ont effectué le rapportage, et M. Ibrahim MAMADOU, examinateur de cette thèse. Je leur suis reconnaissant d'avoir apporté des commentaires pertinents qui n'ont aucun doute sur l'amélioration de ce travail de recherche.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Monsieur Malam Abdou Moussa, maître de conférences à l'Université André Salifou de Zinder, qui m'a sélectionné en 2011 pour effectuer un stage de technicien hydrologue de trois mois sur le site de Banizoumbou (Tondi Kiboro). Ce choix m'a permis d'intégrer l'équipe de recherche dirigée par le Professeur BOUZOU MOUSSA Ibrahim. Je n'oublierai jamais les conseils, l'humanité et la collaboration scientifique de Monsieur Malam Abdou Moussa. Il a toujours répondu à mes appels pour m'expliquer les démarches méthodologiques et les manipulations de logiciels que je n'avais pas bien compris. Je respecte sa voyance, ses opinions scientifiques et son regard très critique sur la pertinence des sujets, la méthodologie et les résultats.



Je voudrais également remercier le Dr INGATAN WARZAGAN Aghali, le collaborateur scientifique de longue date qui a énormément contribué à la réalisation de cette thèse. Monsieur Aghali a été mon observateur de terrain, m'a aidé dans toutes les étapes de la recherche, de l'installation du dispositif expérimental de mesure à la collecte et au traitement des données, en passant par la correction des chapitres. Il m'a soutenu, encouragé et conseillé tout au long de cette expérience scientifique fructueuse. Je lui suis reconnaissant.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à M. FARAN MAIGA Oumarou, Maître-assistant retraité du département de géographie, pour sa rigueur scientifique et son soutien moral et financier.

Je remercie également M. BOUDA Ibrahim, une personne très dynamique sur le terrain, ainsi que M. MAIFADA TANKARI Moussa, mon collaborateur sérieux, M. BOUREIMA Abdoul Wahab, M. MAHAMADOU Iliassou et tous ceux qui m'ont aidé à collecter les données sur le terrain. Votre aide a été précieuse malgré les risques encourus pendant l'essuyage des fûts remplis de cadavres de crapauds et lors du relevé de la végétation où se cachent souvent des scorpions et des serpents.

Je suis très reconnaissant envers BABALÉ CHAIBOU MAMAN Roufai pour avoir mis à ma disposition le drone pendant deux campagnes successives. Merci beaucoup, cher collègue, ces images m'ont été d'une grande utilité.

Je tiens à remercier tous les enseignants-chercheurs et le personnel administratif du département de géographie, en particulier M. MAHAMADOU Bahari (MC), M. MAMAN Issifou (MA), M. IBRAHIM Sani, M. BABOUSSOUNA Awal et tous les occupants du laboratoire de géomorphologie, notamment Dr SOULEY Saley, Dr IDRISSA Gado, Dr ALOU Adam, Dr BABA Abdoulaye, M. ABDOUL KADER Moustapha et M. Achirou. Votre temps et votre sociabilité m'ont été très utiles pendant nos discussions enrichissantes et les dépannages liés à l'utilisation de logiciels de cartographie, de bureautique et autres.

Je remercie le personnel de l'IRI (UAM), en particulier M. BOUBACAR Tankano (PAT) et M. BAWA Alio (technicien) pour avoir fourni la sonde à neutrons.

Je remercie également le personnel de l'IRD Niamey, en particulier Monsieur Mainassara pour la formation sur l'utilisation d'Hydras3 et pour toutes les solutions informatiques, ainsi que Aliko pour

les mesures de la topographie, Abassa et Kone pour le suivi des pluviographes, et feu Abdoulaye Oumarou pour l'installation des tubes de mesure neutronique (paix à son âme). Je n'oublie pas les autres, tels qu'Issoufou, Issa (les chauffeurs dynamiques), M. Bachir Bodo, Issa et Farida (les deux rigoureux en comptabilité).

Je remercie également mes parents pour leurs bénédictions et encouragements, ainsi que mon frère Lawali Bizo Na-Allah pour son soutien financier.

Je rends hommage à ma défunte épouse Balkissa, qui nous a quitté alors que notre fils Ousmane n'avait que 5 mois et c'est au début de cette thèse. Mes pensées vont également à ma femme Hamsatou et à sa fille Saadatou, qui m'ont soutenu au cours des années de cette thèse. Je suis reconnaissant envers elles.

Enfin, que tous ceux qui m'ont aidé, et que j'ai oublié de citer le nom, qu'ils trouvent ici mes sincères remerciements.

Merci à tous et toutes. !

## **Introduction générale**

La région sahélienne est l'une des plus vulnérables au monde en raison de la variabilité climatique et de la pression démographique, entraînant une dégradation des terres et une diminution de la productivité et de l'équilibre des écosystèmes. Avec ce rythme, les pressions sur la terre et l'eau pour la production alimentaire vont augmenter dans les décennies à venir. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2016), le changement climatique a un impact significatif en Afrique subsaharienne, où 90 % de la production alimentaire provient de l'agriculture pluviale qui est fortement dépendante de la variabilité du système de mousson en Afrique de l'Ouest. Dans cette région d'Afrique, diverses études ont montré des occurrences plus élevées de faux départs et d'arrêt précoces des saisons des pluies (Bambara et al., 2019 ; Halidou et al., 2021), ainsi que des périodes de sécheresse plus persistantes par rapport aux années 1950 et 1960 (Froidurot & Diedhiou, 2017), et, dans le même temps, la probabilité d'inondations augmentait (Mahamadou et al., 2018). Toutefois, des tendances positives significatives dans les précipitations annuelles totales ont été mises en évidence depuis les années 1990 (Le Barbé & Lebel, 1997 ; Ali & Lebel, 2009 ; Vischel et al., 2015). Tout ceci montre qu'au Sahel, la question des précipitations est de première importance.

À l'instar du Sahel, le Sud-ouest du Niger subissait les effets de la variabilité climatique depuis les années 1970. Il faut ajouter à cela, les effets de la forte pression humaine sur les ressources naturelles. La majorité de la population rurale active étant occupée par l'agriculture pluviale. La forte dépendance de ce secteur aux épisodes de sécheresses a entraîné une baisse considérable de la production agrosylvopastorale à travers la baisse de la production vivrière, du nombre d'animaux et des revenus agricoles et la disparition de certaines espèces d'arbustes de valeur (Alhassane et al., 2013 ; Moussa et al., 2022). Et cette forte pression a accéléré le processus de dégradation des terres. Les changements d'usages des sols décrits dans cette zone par plusieurs études se traduisent par l'augmentation du ruissellement et la baisse de la fertilité des terres (Bouzou Moussa et al., 2011 ; Mamadou, 2012 ; Souley Yero, 2012). En plus, le défrichement sur les plateaux latéritiques conduit à la disparition progressive de la brousse naturelle. Les bandes boisées se dégradent de plus en plus au profit des espaces nus encroûtés. Cela entraîne l'augmentation du ruissellement avec comme conséquence l'accélération surtout de la dynamique hydroérosive. En effet, sur ces espaces

fortement encroûtés l'infiltration est très limitée. Ceci fait que la réserve de l'eau stockée dans le sol ne permet pas le développement du couvert végétal. Sans oublier, le fait que l'endurcissement des sols en surface rend complexes les processus de germination des graines.

Ainsi, les pays du Sahel et la communauté internationale se sont mobilisés pour lutter contre ce fléau (dégradation des terres). Ce sont de nombreux projets de lutte contre la désertification qui ont été mis en route. Dans l'Ouest du Niger, le cas du Projet de protection intégré des ressources Agro-Sylvo-Pastorale (P.A.S.P) dans la région de Tillabéri (1986-1999) et le Projet de Développement Agroforestier et d'Aménagement des Terroirs (PDAAT) dans la région de Dosso peuvent être cités comme exemple (PASP, 2003 ; Torrekens et al., 1997). Ils ont été initiés au Niger pour gérer et conserver durablement les ressources naturelles tout en améliorant les conditions de vie des populations rurales. L'objectif de ces programmes est la diffusion des techniques de conservation et de restauration de terres dégradées (demi-lune, banquette, tranchée, etc.) en se basant sur la participation massive des paysans. D'importants succès ont été enregistrés à la suite de la mise en application de ces techniques. C'est le cas des résultats du projet de développement intégré de Keita dans la région de Tahoua (Malagnoux, 2004) et le Programme de Lutte contre l'Ensablement du fleuve Niger (PLCE/ABN) couvrant le Niger, le Mali et le Burkina Faso ayant permis de récupérer plusieurs milliers d'hectares. Après plus de deux décennies d'application, Larwanou & Saadou, (2012) ont détecté quelques cas de reverdissement dans la bande sahélienne du Niger (Maradi, Tahoua et Tillabéri).

Mais malgré les succès enregistrés lors de la réalisation de ces techniques d'aménagement et de récupération des terres dégradées sur le plan du développement de la végétation, des inquiétudes ont été soulevées quant à leur impact durable sur le fonctionnement hydrologique et biologique de la brousse tigrée en ce qui concerne les plateaux latéritiques dans l'Ouest du Niger. En effet, la brousse tigrée est un écosystème caractérisé par l'interaction entre les bandes nues qui servent d'impluvium pour arroser supplémentaires (plus la pluie directe) les bandes boisées (Ambouta, 1984). La réalisation des ouvrages à l'intérieur de ces bandes nues entraîne une diminution de cette quantité supplémentaire d'eau en provoquant le dysfonctionnement du système de la brousse tigrée (Galle et al., 1997 ; Ichaou, 2004b). En plus de cela, la structure de la brousse créée par les ouvrages en demi-lune, banquettes et tranchées ne reflètent pas la structure typique (naturelle) de brousse

tigrée (Torrekens et al., 1997). D'où l'idée d'aménager cet écosystème (brousse tigrée) en respectant sa structure initiale (bande nue et bande boisée). Notre étude s'inscrit dans cette démarche et a pour objectif principal d'évaluer l'efficacité des techniques d'aménagement (sous-solage, ensemencement, branchage) sur la réhabilitation de la brousse tigrée en s'inspirant de son mode de fonctionnement naturel.

La thèse se structure en six (6) chapitres. Le premier chapitre (1) décrit le cadre théorique de l'étude sur la base d'une revue de la littérature circonscrite dans un contexte international, régional et national. Cela a permis de baliser la problématique de l'étude et de décliner les objectifs de cette recherche.

Le deuxième chapitre (2) présente la zone d'étude dans ses contextes géologique, géomorphologique, écologique, climatique et démographique. Après avoir présenté les conséquences de ces derniers, le site d'étude est décrit. Puis, est déclinée la justification du choix des surfaces aménagées, c'est-à-dire les bandes boisées dégradées sur le revers du plateau latéritique à brousse tigrée et les surfaces dénudées sur le haut glacis encroûté. Les techniques choisies pour l'aménagement de ces bandes dégradées ont été aussi décrites de façon détaillée à savoir les techniques du sous-solage, de l'ensemencement et du branchage ainsi que leur association. La dernière partie de chapitre II est consacrée à la présentation du protocole d'aménagement appliqué sur le terrain.

Le troisième chapitre (3) décrit quant à lui les matériels et méthodes des mesures effectuées pour évaluer l'efficacité des techniques (sous-solage, ensemencement et branchage) appliquées pour la réhabilitation des formations végétales dégradées (brousse tigrée et steppe arbustive). De prime abord sont présentés les méthodes et les outils de mesures du ruissellement à l'échelle du bassin versant et à celle de la parcelle expérimentale de type Wischmeier de 1 m<sup>2</sup>. Puis, sont déclinées les méthodes de mesures de l'humidité du sol à l'échelle ponctuelle. Enfin, ce chapitre méthodologique se termine par la présentation des méthodes de mesure de la végétation dans les parcelles aménagées et leurs témoins.

Enfin, les quatrième (4), cinquième (5) et sixième (6) chapitres présentent les résultats expérimentaux obtenus de la réhabilitation de la brousse tigrée et de la steppe arbustive. De façon

détaillée précisément, le chapitre 4 présente les effets des techniques du sous-solage, du branchage et du sous-solage-ensemencement-branchage sur le ruissellement à l'échelle du bassin et celle de la parcelle. Le chapitre 5 expose les effets de ces techniques sur l'humidité du sol à l'échelle locale. Le chapitre 6 présente les résultats des effets de ces techniques appliquées sur la restauration de la végétation herbacée et ligneuse. Les résultats présentés dans ces chapitres sont en même temps expliqués et discutés, c'est-à-dire au fur et à mesure.

La conclusion générale reprend les principaux résultats et annonce les perspectives de recherche.

## Chapitre 1. Le cadre théorique de l'étude

---

*Ce chapitre expose les processus de dégradation du couvert végétal et leurs conséquences sur le fonctionnement hydrologique et biologique de la brousse tigrée du Sud-Ouest nigérien. Il discute de l'efficacité et des limites de quelques techniques de CES-DRS couramment réalisées sur les plateaux latéritiques et sur les glacis encroûtés de cette région. À la fin du chapitre, les questions, les hypothèses, les objectifs de la recherche ainsi que les difficultés rencontrées sont présentés.*

---

### 1.1. Contexte et justification

La zone sahélienne fait partie des régions d'Afrique ayant récemment subi de forts changements environnementaux. En effet, entre 1960 et 1990, le Sahel a connu une phase de sécheresse sévère jamais égalée sur le plan de la durée (Dai et al., 2004). Parallèlement, le Sahel a enregistré une forte croissance de sa population qui a été multipliée par quatre entre 1950 et 2005 (Ozer et al., 2010 ; Guengant, 2011). La conjonction de ces deux facteurs a engendré une profonde restructuration de l'espace rural. On assiste ainsi à la disparition de la végétation qui est une forme de dégradation remarquablement perceptible et dont les conséquences sont la détérioration physico-chimique des sols suivie de leur encroûtement (Peugeot, 1995 ; Leblanc et al., 2008 ; Bouzou Moussa et al., 2009 ; Bouzou Moussa et al., 2011 ; Malam Abdou et al., 2015) entraînant l'augmentation du ruissellement (Mahe, Leduc, et al., 2003 ; Mahe, et al., 2005 ; Amogu et al., 2010 ; Descroix et al., 2013 ; Sighomnou et al., 2013 ; Amogu et al., 2015 ; Mamadou et al., 2015).

Dans l'Ouest nigérien, cette dégradation environnementale se manifeste particulièrement au niveau de la brousse tigrée sur les plateaux, dont les fonctionnements hydrologique et écologique ont été décrits par plusieurs auteurs (Ambouta, 1984 ; Seghieri et al., 1994 ; Seghieri, 1996). Mais, cette description a été faite au moment où cet écosystème se « portait bien ». Il a été rapporté que son équilibre fonctionnel était assuré simplement par la pluviométrie annuelle, et cela, jusqu'au courant des années 1950. La brousse tigrée se caractérise par une alternance des bandes nues encroûtées et des bandes couvertes de végétation (Faran Maïga, 2000 ; Ambouta, 1984). Les eaux collectées sur les bandes nues se déversent supplémentaires sur les bandes boisées. Cet apport d'eau supplémentaire maintient une intense dynamique des bandes de végétation avec des sols présentant

une forte capacité d'infiltration. À travers cette interaction dynamique, l'écosystème de la brousse tigrée se présente comme un ouvrage naturel capable de s'autoréguler (D'Herbes et al., 1997 ; Ambouta, 1984).

Outre cette fonction, écosystémique, la brousse tigrée est un joyau paysager par sa beauté liée à l'alternance des bandes boisées et nues. C'est aussi la dernière habitation de la population de girafes en Afrique de l'Ouest.

Cependant, la brousse tigrée a subi, depuis le début des années 1970, les effets des sécheresses répétitives et des ponctions anthropiques qui ont provoqué le processus de sa dégradation. Cela a conduit à une diminution considérable des bandes boisées et une augmentation des bandes nues (Leblanc et al., 2007 ; Souley Yero, 2012). Ceci a pour corolaire le déversement du ruissellement sur les unités sises en aval (glacis), car n'étant plus totalement absorbé par la végétation du plateau. Dès lors, la brousse tigrée a cessé de fonctionner comme un ouvrage naturel. Cette dégradation environnementale a été aussi observée sur les piémonts encroûtés, une sous unité du haut glacis où abrite la steppe arbustive, mais aussi les champs des paysans. Ces derniers ont par conséquent abandonné ces espaces et ont fortement augmenté la pression sur les champs situés en aval. Tout ceci s'est manifesté par la diminution ou la disparition quasi complète de la jachère (Loireau, 1998 ; Loireau et al., 2007).

L'état de dégradation de ces formations végétales a été largement médiatisé à l'échelle nationale et internationale. Ce constat a stimulé, durant les années 80 et 90, une prolifération des programmes d'aménagement antiérosif avec pour objectif « d'inverser la tendance ». Il s'agit notamment des projets : PASP<sup>1</sup> Tillabéri, 1986 ; PDAAT<sup>2</sup> Dosso, 1990 ; PMAE<sup>3</sup>, 2008. Ces programmes sont basés sur la mise en œuvre des ouvrages de CES/DRS (Conservation des Eaux et des Sols/Défense et Restauration des Sols) notamment les demi-lunes, les banquettes, le scarifiage, les zaï, les tranchées nardi, les cordons pierreux et bien d'autres. À la suite de cette déferlante d'essais d'ouvrages de réhabilitation des terres, des cas de reverdissements ont été néanmoins observés au Niger (Larwanou & Saadou, 2012). Nonobstant ces cas de réussite, il a été souligné tout

---

<sup>1</sup> *PASP : Projet Agro-Sylvo Pastoral.*

<sup>2</sup> *PDAAT : Projet de Développement Agroforestier et d'Aménagement des Terroirs.*

<sup>3</sup> *Programme de Mesures Anti-Erosives.*



récemment, la persistance de dégradation de la végétation, et plus particulièrement celle de la brousse tigrée dans le Fakara (Dardel, 2014). Ce constat a été fait malgré tous les ouvrages réalisés à l'ouest du Niger et leur effet supposé positif sur le développement du couvert végétal. Il a été aussi signalé le problème d'approche technique d'aménagement, notamment celui de la brousse tigrée. Il s'agit de la crainte de perturber le lien dynamique entre les zones couvertes de végétation et les bandes nues à travers la réalisation des ouvrages mécaniques (Galle et al., 1997 ; Seghieri, 1996 ; Seghieri et al., 1994 ; Seghieri & Galle, 1999). De ce fait, l'aménagement de la brousse tigrée s'est avéré problématique surtout si le respect de son fonctionnement hydrologique n'est pas assuré. En effet, les bandes de sols nus sont le plus souvent aménagées même si ce sont ces dernières qui alimentent en eau de ruissellement les bandes boisées au sein desquelles une bonne partie de l'eau s'infiltré massivement. C'est dans ce sens que certaines études soulignent que les interventions supposées être bénéfiques peuvent éventuellement avoir des incidences négatives sur le fonctionnement de cet écosystème (Galle et al., 1997 ; Ichaou, 2004).

## **1.2. La revue de la littérature**

### **1.2.1. Les causes de la dégradation environnementale**

La dégradation des écosystèmes se définit comme étant la diminution persistante de la capacité des écosystèmes à fournir des services comme les aliments, l'eau potable, la régulation des écoulements, du climat (<http://www.greenfacts.org/>).

Les conséquences de l'évolution du climat et de la démographie sont à l'origine de la dégradation des écosystèmes sahéliens en général, et du Sud-Ouest nigérien en particulier (Boudet, 1972 ; Richard, 1990). Les conséquences du dessèchement du climat (années 70 et 80) se sont manifestées par la baisse du nombre d'événements pluvieux (Barbé & Lebel, 1997) et par le déplacement vers le sud des isohyètes (Bied-Charreton, 2007). D'autres évoquent même une diminution de la durée de la saison pluvieuse (Balme et al., 2005 ; Descroix et al., 2016) et d'autres constatent un déficit pluviométrique de l'ordre de 50 à 60 % soit une diminution de 200 mm (Dai et al., 2004 ; Ozer, 2010 ; Ozer et al., 2016 ; Thierry et al., 2018). Tout ceci a abouti à la mort de la végétation, et donc à sa diminution (taux de couverture). Cela est à l'origine de la dégradation des sols entraînant la perturbation du fonctionnement hydrique des écosystèmes à l'exemple de celui de la brousse tigrée. Ce système de végétation organisé en bande boisée et bande nue a été mis en place pendant les plus

longues années humides (1760 à 1850) grâce à la colonisation des sols nus par le couvert végétal de façon progressive au Sahel (Sherratt, 2015). De façon spécifique, la brousse tigrée est le type de formation végétale présent sur les revers des plateaux dans l'Ouest du Niger. Cette formation végétale s'étant entre le 14<sup>ème</sup> et 15<sup>ème</sup> parallèle (Ambouta, 1984), plus précisément entre les isohyètes 400 et 750 mm d'après D'Herbes et al. (1997) ; Gavaud (1965). La brousse tigrée est une forme de végétation qui semble bien s'organiser avec des bandes boisées alternées par les bandes nues. Les bandes boisées sont plus ou moins parallèles avec les courbes de niveau et la bordure du plateau (Courault et al., 1990). Ces bandes boisées sont des fourrés caractérisés par un couvert ligneux constitué de *Guiera senegalensis*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Acacia ataxacantha*, *Boscia angustifolia*, *Boscia senegalensis*. Sous le couvert ligneux se trouve un couvert herbacé constitué principalement de *Pennisetum pedicellatum*, *Eragrostis tremula*, *Schoenefeldia gracilis* et *Zornia glochidiata*.

Cette organisation des bandes boisées et bandes nues confère à la brousse tigrée un fonctionnement particulier bien décrit en détail par plusieurs auteurs (Ambouta, 1984 ; Seghieri et al., 1996 ; D'Herbès et al., 1997 ; Galle et al., 1999). En résumé, la brousse tigrée est un système qui fonctionne normalement grâce à l'interaction entre les bandes boisées et les bandes nues. Ces dernières servent d'impluvium aux bandes boisées. Cela signifie que toutes les eaux du ruissellement produites sur les bandes nues sont absorbées, en principe, dans les bandes boisées.

Ce fonctionnement particulier s'explique par l'adaptation naturelle de la végétation à des contraintes locales à savoir l'insuffisance de la pluviométrie, la géomorphologie (plateau latéritique à sol peu profond et pauvre) et les ponctions anthropiques (Ambouta, 1984). Et il semble que ce système soit en bon état jusqu'aux années 1950, la pluviométrie annuelle assurait sa stabilité (Faran Maïga, 2000). Cela montre qu'il s'agit d'un système résilient qui a su s'adapter aux agressivités du climat et de l'homme.

L'augmentation ou la diminution des précipitations entraîne des changements du taux de couverture végétale, de la largeur ou de la longueur des bandes boisées, de la diversité floristique, mais sans qu'en réalité, que les systèmes de formation végétale dans les zones semi-arides, à l'exemple de la brousse tigrée, ne subissent des changements profonds, notamment la modification de leur structure (Rodríguez-Iturbe, 2003). Cependant, les sécheresses des années 1970 et la persistance du déficit pluviométrique et la pression démographique ont entraîné une forte évolution

du système de la brousse tigrée qui laisse observer, aujourd'hui, sur le terrain, une structure des bandes boisées souvent découpée (cf. [figure 6](#)). Mais aussi avec la tendance imminente à la disparition de la brousse tigrée et à l'encroûtement des surfaces du sol (Abdourhamane Touré Amadou et al., 2010)

Par ailleurs, l'inquiétude des écologues s'affiche quant à l'aménagement des bandes nues de la brousse tigrée, ici on peut citer les études de Galle et al. (1997), par crainte de diminuer l'apport supplémentaire en eau du ruissellement aux bandes boisées. Or, la plupart des ouvrages antiérosifs réalisés dans les bandes nues interceptent et stockent de grosses quantités d'eau. En outre, la structure en quinconce de ces ouvrages donne lieu à une structure autre que la structure de la brousse tigrée. Cela étant dit, même si tout le système est perturbé, il n'est pas du tout pertinent d'aménager les bandes nues, mais, plutôt, les surfaces boisées en dégradation de sorte que le résultat d'aménagement refléterait la structure d'origine de la brousse tigrée.

Le Floc'h & Aronson (1995) rapportent, dans ce sens, que ce sont surtout les capacités de résilience des écosystèmes sahéliens qui sont les plus durement touchés.

En outre, le problème démographique se pose avec acuité partout au Sahel plus particulièrement en Afrique de l'Ouest, où la population en majorité rurale a plus que doublé entre 1960 et 2005, passant de 70 à 155 millions d'habitants (Christophe et al., 2007) ; Courtin & Guengant, 2011). En 2019, elle est estimée à 391 millions d'habitants (ONU, 2019). Durant la même période, on assiste à un doublement des besoins alimentaires, en terres cultivables et en bois énergie (Christophe et al., 2007). Cela entraîne corrélativement la dégradation des ressources naturelles (sols, végétation...).

À l'ouest du Niger, par exemple, le défrichement s'est accéléré de telle sorte qu'il a occasionné la mise en culture des terres marginales situées sur les plateaux latéritiques à brousse tigrée (D'Herbès et al., 1997 ; Leduc & Loireau, 1997 ; Loireau, 1998 ; Seguis et al., 2003 ; Loireau et al., 2007). Dans le même contexte, Loireau (1998) a évoqué le raccourcissement des jachères et la mise en culture ayant provoqué de profonds changements dans l'occupation du sol (Souley Yero, 2012). Ce qui a même conduit à la régression des espèces végétales herbacées et ligneuses (Atta et al., 2010). En somme, retenons que les facteurs (physique et anthropique) décrits ci-dessus ont entraîné l'érosion et la perte de la fertilité des sols.

La dégradation des sols représente un phénomène qui exprime la fragilité du milieu et des sols qui s'y trouve (Richard, 1990). Elle se manifeste principalement par l'encroûtement de la surface du sol. L'encroûtement du sol se définit comme étant un processus de l'érosion du sol. Il est provoqué par, l'effet des gouttes de pluie sur la surface du sol (effet splash), le ruissellement et le vent (arrachement, transport et dépôt), la température (dessiccation) et l'homme. Plusieurs auteurs (Casenave & Valentin, 1989 ; Ambouta, 1994) ont, en effet, décrit les processus à l'origine de la formation des types de croûtes au Sahel. Les types de croûtes rencontrées, de façon générale au Sahel, sont les croûtes structurales (ST), les croûtes de décantation (DÉC.), les croûtes de ruissellement (RUI), les croûtes gravillonnaires (GRAV), les croûtes de dessiccation (DES) et les croûtes d'érosion (ERO).

### **1.2.2. Les conséquences de la dégradation des sols sur l'hydrologie de l'Ouest du Niger**

Depuis, pratiquement, plus de deux décennies, les recherches scientifiques évoquent des modifications du comportement hydrologique (hydrodynamique) des bassins versants de l'Ouest du Niger situés dans le domaine sédimentaire du bassin des Iullemeden (Desconnets, 1994 ; Leduc et al., 1996 ; Leduc & Karbo, 1996 ; Leduc & Lenoir, 1995 ; Peugeot, 1995). Ces modifications sont liées à la variabilité climatique et au changement d'usage des sols qui restent la cause la plus déterminante de l'augmentation des écoulements (Descroix et al., 2015 ; Mahe et al., 2003, 2005). D'après Descroix et al. (2011), le phénomène d'augmentation des écoulements est paradoxalement intervenu à un moment où les effets négatifs de la variabilité climatique ont été plus intenses (décalages du début et fin de la saison pluvieuse, mauvaise répartition spatio-temporelle de la pluie et baisse du cumul pluviométrique annuel). Mais, il se trouve qu'au moment où sévissait cette variabilité climatique, on a assisté aussi à de mauvaises pratiques d'utilisation des terres et l'extension des surfaces cultivées provoquant et accélérant la formation des états de surface très ruisselants. De ce fait, on a assisté à une augmentation spectaculaire des écoulements et du nombre des mares qui a eu pour effet la remontée de la nappe phréatique en zone sédimentaire endoréique. Les études de Leblanc et al. (2008) et Favreau et al. (2009) ont qualifié ces phénomènes de « paradoxe du Sahel » et de « paradoxe de Niamey ». Le premier paradoxe s'explique par l'augmentation des écoulements et la remontée de la nappe phréatique en zone endoréique ainsi que la modification des régimes de cours d'eau (crues) en zone exoréique pendant la période de la

dégradation climatique. Quant au deuxième paradoxe, il se manifeste, en zone endoréique, par une augmentation du nombre des mares et un rehaussement du niveau de la nappe phréatique, alors qu'en zone exoréique, on assiste à une intensification des crues et des inondations. Ainsi, Mahe et al. (2005) ont rapporté que, pour une diminution de pluie de 20 à 25 %, une augmentation des écoulements allant de 35 à 108 % entraînant parfois des inondations. Cependant, même s'il y'a eu augmentation des ressources en eau liée à l'accumulation de l'eau dans des dépressions endoréiques. Ceci est le résultat d'un fait très négatif, notamment la diminution de la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol directement lié à la disparition du couvert végétal (surtout sur les plateaux), et donc à la désertification (Descroix et al., 2015). Les conséquences de cette dernière ont poussé les paysans, les ONG, les projets et les services étatiques à la recherche des solutions en faisant recours aux techniques de récupération des sols.

### **1.2.3. La mise en place de la politique de récupération des terres dégradées au Niger**

C'est dans un contexte de dégradation des formations végétales sahéliennes (Richard, 1990) que des programmes de réhabilitation des sols et du couvert végétal ont vu le jour au Sahel, particulièrement au Niger.

En ce qui concerne l'aménagement de la brousse tigrée et de la steppe arbustive dégradées plus précisément, Ambouta (1984) a fait une proposition des méthodes de lutte plus ou moins passives à savoir la mise en défens des zones dégradées des plateaux latéritiques. Il faut noter néanmoins que cette proposition n'a guère été efficace du moment où l'on a assisté à une forte dégradation pluviométrique depuis 1950 jusqu'aux années 1990 (Barbé & Lebel (1997)). En effet, le déficit hydrique n'a pas pu permettre le maintien de la stabilité des écosystèmes, notamment la brousse tigrée. En plus de cela, compte tenu de l'ampleur de la dégradation généralisée du milieu, les efforts de protection de quelques forêts à l'exemple de la réserve de Tamou, de Kouré et du parc national du W semblent avoir l'effet d'une « goutte d'eau dans la mer » et sont donc limités. Il faut aussi tenir compte du fait que la mise en défens des forêts est diversement appréciée et fait face, le plus souvent, à une forte opposition de la population riveraine (Verdeaux, 1999 ; Djogbenou et al., 2011 ; Razafindrabe, 2015 ; Zürcher-Gasser et al., 2016). À cela s'ajoutent les effets de la forte pression démographique (Loireau, 1998) qui contribuent fortement à la disparition du couvert végétal. Et compte tenu de la limite de ces méthodes de lutte dites passives (la mise en défens),

l'État du Niger avec l'appui de ses partenaires a décidé de financer activement la réalisation des projets de Gestion et de Conservation des Eaux et des Sols (Butare et al., 2004). C'est ainsi que plusieurs plans d'action de lutte contre la désertification ont été élaborés pour donner suite aux recommandations de la conférence de Rio de Janeiro en 1992 (CNEEDD-Niger, 2000). Et tout récemment une stratégie nationale et un plan national d'adaptation face aux changements climatiques dans le secteur agricole ont été mis en place (Lona et al., 2020). Ainsi, la restauration des terres dégradées a été résolument initiée au Niger juste après le débat national sur la désertification qui a eu lieu à Maradi en 1984 (Conseil National de Développement du Niger, 1984). Des techniques d'aménagement (CES) ont été ainsi diffusées dans toutes les régions du pays. La mise en application de ces dernières a été faite en fonction des unités géomorphologiques et de la pente.

Au Niger, une panoplie de techniques d'aménagement avec des formes géométriques et dimensions variables a été testée afin de réhabiliter les terres dégradées.

#### **1.2.4. La description de quelques techniques de conservation des eaux et des sols (CES) et leurs effets**

Dans ce sous-point, quatre types de techniques de gestion des eaux et des sols sont décrites. Il s'agit des demi-lunes et des banquettes, développées à des fins pastorales ou forestières et, donc, couramment rencontrées sur les plateaux latéritiques à brousse tigrée, mais aussi sur les glacis encroûtés et, du sous-solage et du paillage, généralement appliqués dans le cadre agronomique.

##### **❖ La demi-lune**

La demi-lune est une technique qui consiste à creuser un trou, à la forme d'un demi-cercle, dans des milieux où la terre dégradée est compacte (PASP, 2003 ; GIZ, 2012 ; Deutsche-GIZ, 2015). Avec un écartement régulier, les demi-lunes sont disposées en quinconce afin d'intercepter l'essentiel des eaux de ruissellement en provenance de l'impluvium situé en amont (Moustapha, 2010). Les lignes de ce type d'ouvrage réalisé suivant les courbes de niveau sont perpendiculaires à la pente (figure 1).

Cette technique a été introduite au Niger dans le nord Tahoua en 1974 par la mission catholique

(Bouzou Moussa, 1997). Elle a été ensuite vulgarisée dans d'autres régions du pays plus précisément à l'ouest du pays. Cependant, les normes de réalisation surtout de dimensionnement, de type des sols et du choix de l'unité géomorphologique ne sont forcément pas respectées. C'est dans ce contexte que Bouzou Moussa (communication personnelle) a constaté que les dimensions des demi-lunes sont presque identiques dans la région de Tahoua que dans le Sud-ouest du pays alors que la pluviométrie varie respectivement de 300 à 550 mm/an. Ce qui ne garantit, donc, pas les conditions d'une efficacité durable de cette technique. En effet, la capacité de stockage de l'eau des demi-lunes peut être rapidement dépassée dans les régions où il pleut plus de 550 mm par an. L'interception du trop-plein (dépendant de la quantité précipitée), quoique censée être absorbée par l'ouvrage en aval, peut s'échapper surtout quand il s'agit d'une grande pluie. Ce qui peut provoquer la dégradation rapide de l'ouvrage. Cette situation nécessite un suivi régulier ou une mise en défens des ouvrages pendant les premières années de réalisation (Descroix et al., 2012).

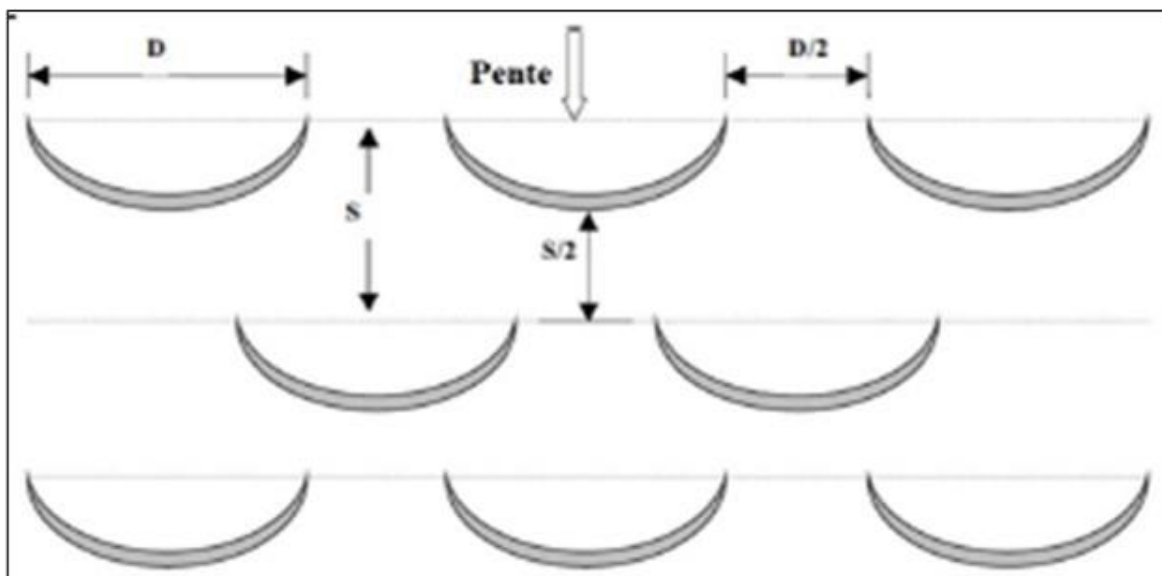


Figure 1. Le dessin technique de la technologie de la demi-lune. Source (RECA, 2014).

Les dimensions ( $D$ ) varient en fonction de la pluviométrie, environ 0,5 à 5 m de rayon dans les zones où il pleut 100 à 300 mm et 5 à 30 m de rayon si la pluviométrie atteint 300 à 500 mm.  $S$  est la surface inter-ouvrage obéissant au même principe et qui vaut le diamètre de la demi-lune divisée par deux ( $D/2$ ).

La demi-lune est remarquablement efficace en matière d'interception et de rétention de volume considérable d'eau de ruissellement. Ces volumes sont lentement infiltrés du coup l'évaporation est élevée. Ils provoquent une progression plus profonde de l'humidité du sol (Zoure, 2019).

## ❖ La banquette

La banquette est une technique qui consiste à creuser un fossé, dans des milieux généralement constitués de la terre compacte (Moustapha, 2010 ; Ingatan Warzagan et al., 2019). Le matériel (déblai) est ensuite déversé en aval tout au long du fossé pour constituer le bourrelet. Les banquettes sont disposées en quinconce et perpendiculairement au sens de la pente générale (figure 2).

La technique de la banquette a été largement appliquée, en région méditerranéenne. Sa largeur est d'environ 60 cm et sa longueur avoisine 100 m (Youssef, 2007). La construction de celle-ci se fait à l'aide des tracteurs. Au Niger, la réalisation de cette technique des banquettes se fait en revanche de façon manuelle à l'aide des outils légers tels que la pioche et la pelle. Ces ouvrages sont donc de petites dimensions par rapport à celles rencontrées en milieu méditerranéen. En effet, la profondeur du fossé est d'environ 30 cm et 1 m de largeur avec une longueur de 30 à 50 m (Bouzou Moussa, 1988).

Soumana et al. (2011) et Ingatan Warzagan et al. (2019) ont démontré l'efficacité de la banquette sur l'humidité à l'échelle ponctuelle. Elles peuvent stocker plus de la moitié de la quantité précipitée durant chaque événement pluvieux par rapport au témoin non aménagé qui laisse échapper presque la totalité de l'eau précipitée. De ce fait, elles favorisent la pénétration de l'eau dans le sol tout en augmentant le front d'infiltration ainsi que la teneur en eau. Mais dès la fin de la saison pluvieuse, l'humidité diminue drastiquement en surface. Néanmoins, la recharge du sol en termes d'humidité (réserve hydrique) emmagasinée par ouvrage est restituée pendant toute l'année (Soumana et al., 2011 ; Youssef, 2007).

En règle générale, les techniques d'aménagement antiérosif réalisées sur les plateaux sont conçues de telle sorte qu'elles imitent la disposition naturelle du système brousse tigrée des plateaux. En effet, il s'agit de concevoir un dispositif d'aménagement dans lequel, les plages nues représentant les bandes non aménagées (impluvium) alternent avec les plages aménagées représentant, quant à elles, les bandes aménagées comme l'indique la figure 3. L'objectif de ce type de disposition étant d'approcher le fonctionnement naturellement réel de la brousse tigrée (Soumana et al., 2011).



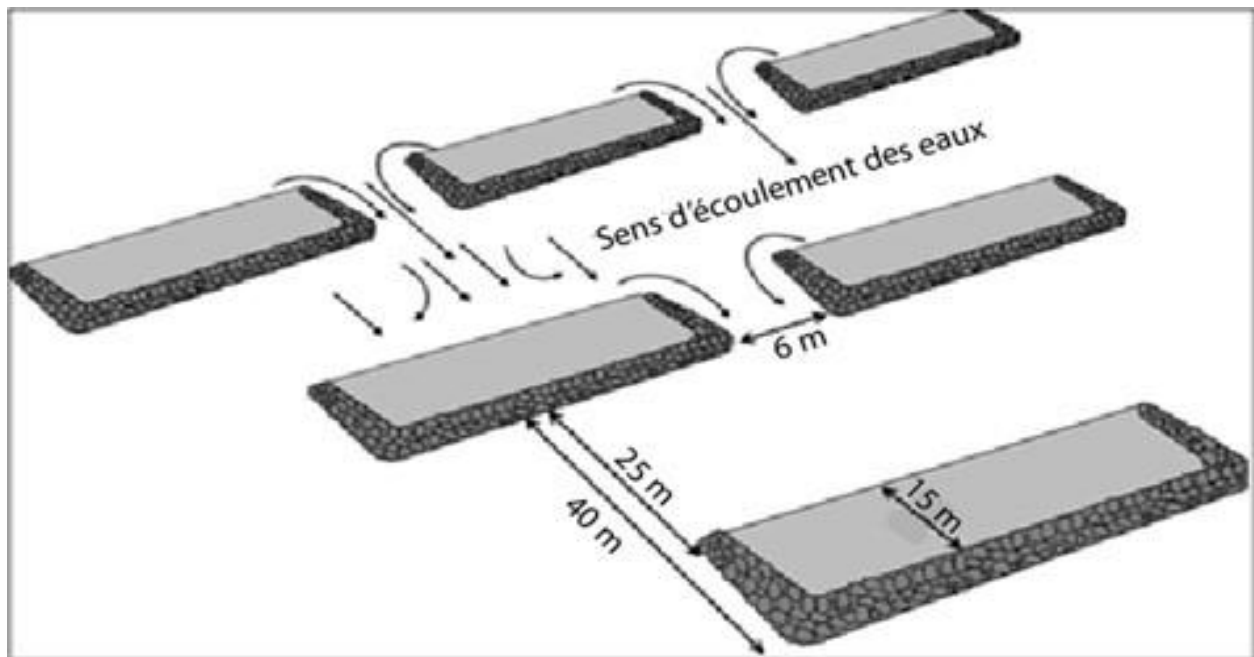


Figure 2. Le dessin technique de la technologie de la banquette. Source : (Fiche technique du RECA, 2016).

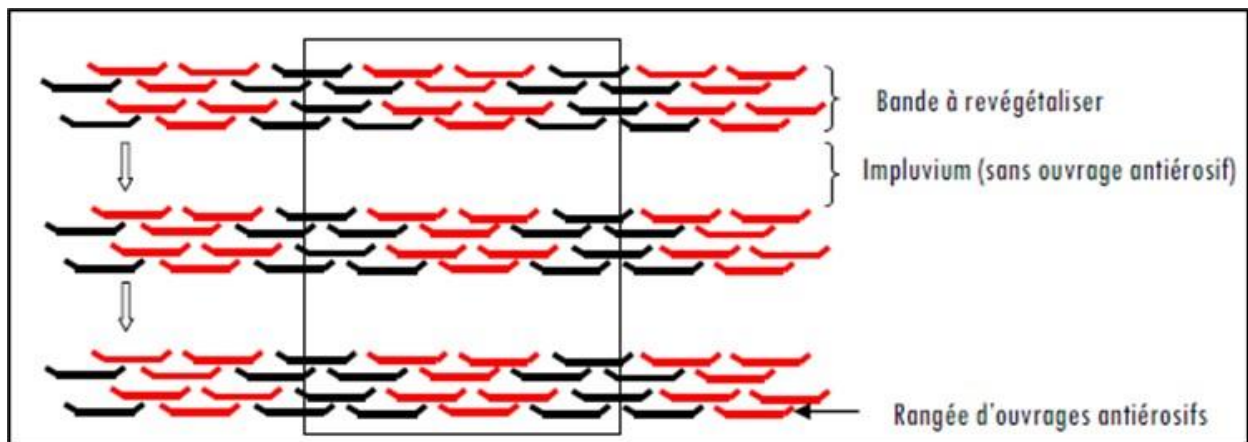


Figure 3. Le dessin technique de la disposition des ouvrages réalisés sur les plateaux latéritiques à brousse tigrée. Source : Soumaya et al. (2011). Les bandes aménagées représentent les bandes à revégétaliser alors que les bandes nues représentent les impluviums.

En ce qui concerne la commune rurale de Dantiandou (secteur d'étude) les aménagements ont commencé à être réalisés sur les plateaux latéritiques à brousse tigrée à partir des années 2000 (tableau 1).

Tableau 1. Les quelques premiers sites aménagés dans la commune de Dantiandou.

Commune	Village	Années	Projets/ONG	Superficie (Ha)	Type d'aménagement
Dantchandou	Tchida	2006 à 2016	PAC1, PAC2, PAC3	250	Demi-lune et microbassins
	Komakoukou	2012	État	60	Banquette
	Campa zarma	2012	État	50	Banquette

Source : Direction départementale de l'environnement de Kollo

Outre ces techniques, on rencontre effectivement d'autres qui sont parfois réalisées sur le plateau latéritique ou sur le glaucis encroûté. Il s'agit fréquemment des cordons pierreux, des zaï, des tranchées nardi, de scarifiage. Les techniques dites biologiques sont appliquées dans le but d'améliorer la fertilisation des sols en zone de culture.

#### ❖ Le paillage/branchage

Le paillage (ou branchage) constitue une des techniques biologiques les plus répandues au Niger. C'est un mode traditionnel de gestion des terres agricoles chez le paysan nigérien (Biielders et al., 2004). La technique du paillage consiste à épandre, sur la surface du sol, les résidus de culture de l'activité agricole précédente (mil, sorgho, haricot...) ou de résidus des végétaux, notamment des herbes ou des arbustes (Reijntjes & Waters-Bayer, 1995 ; Léonard & Rajot, 1998). Selon Roose (2015) l'épandage consiste à couvrir partiellement la surface du champ ou de la parcelle d'une mince couche (de 1 à 2 cm) de quantité de paille ou de branchettes. Généralement, l'application de cette technique est conditionnée par la disponibilité du type de matériau (la paille ou les branchettes) présent autour de la parcelle (Reijntjes & Waters-Bayer, 1995 ; Reij, 1996 ; Kumar & Goh, 1999). Parfois, la paille et les branchettes sont utilisées concomitamment pour la fertilisation des sols. Le paillage et le branchage représentent, donc, la même technique.

Le rôle primordial de la technique de branchage reste la lutte contre l'érosion hydrique et éolienne. La technique du branchage est utilisée pour atténuer la mobilisation des sédiments et favoriser leur piégeage. Les branchettes se constituent alors en obstacles au ruissellement, et de façon performante, si elles sont alignées perpendiculairement à la pente (Biielders et al., 2004). Mais, malgré son rôle efficace dans la gestion des eaux et des sols, cette technique est peu expérimentée dans le cadre de la réhabilitation des formations végétales. Par ailleurs, le recours au ramassage du bois mort ou de la paille est peu recommandé puisqu'il entraîne un déséquilibre au niveau du sol

(Roose, 1985). Mais compte tenu de sa contribution dans l'amélioration de la teneur en eau du sol, sa combinaison (technique du branchage) avec la technique de sous-solage superficiel peut renforcer encore plus ce gain en termes d'efficacité.

### ❖ Le sous-solage

L'opération du sous-solage consiste à ameublir ou à fissurer le sol tout en le fragmentant. Ainsi, il améliore la porosité, la structure et la percolation de l'eau en profondeur dans le sol afin de faciliter le développement des racines (Weill et al., 2015). L'objectif du sous-solage est de réduire le ruissellement afin de favoriser l'infiltration (Armand, 2009).

Le sous-solage est effectué à des profondeurs du sol allant de 40 à 80 cm (Daouze & Roger-Estrade, 2017 ; Labreuche, 2008). Après l'opération de travail du sol, les résidus de culture restent toujours visibles en surface. Ce qui confère à cette technique tout son caractère biologique.

Par ailleurs, la profondeur du travail de sol effectué entraîne une importante aération ou l'ouverture des pores du sol (Labreuche et al., 2007) favorisant le réchauffement rapide du sol, ce qui peut accélérer le phénomène de l'évaporation d'eau du sol (Weill et al., 2015). D'où la nécessité de prendre en compte cela quant à son application surtout en milieux semi-arides comme le Sahel où les effets d'ensoleillement et du vent jouent un rôle important dans le processus de dégradation des sols (Nahal, 2004). Pirot et al. (1997) pensent qu'on gagnerait assez de bénéfice de la gestion du sol en évitant de trop remanier le sol en profondeur. Dans ce cas, le recours aux techniques lourdes, par exemple le sous-solage, à l'aide du tracteur pour l'aménagement des sols sahéliens dégradés, d'ailleurs peu couverts et pauvres en matière organique, est tout simplement onéreux. En revanche, des études ont montré que le simple travail superficiel du sol peut améliorer significativement l'infiltrabilité des sols dégradés au Sahel, car celle-ci est réduite par la simple présence de l'encroûtement superficiel du sol (Ambouta, 1994 ; Ambouta & Christian, 1996 ; Vandervaere, 1995).

Toutefois, Malam Abdou et al. (2015) ont étudié les avantages et les inconvénients de la technique de travail superficiel du sol à l'occurrence du sarclage. Ils ont démontré que la conductivité hydraulique des sols sableux cultivés, à état de surface culturale, décroît en fonction du cumul de pluies enregistrées après le sarclage (travail de sol effectué avec îler qui un léger outil aratoire qui travaille le sol à une profondeur d'environ 10 cm). En effet, les macrospores créées par l'opération

de sarclage se colmatent au fur et à mesure que le cumul de pluies augmente. Ainsi, après un cumul de pluies de 70 mm, la conductivité hydraulique décroît de 120 mm/h à 20 mm/h. Cette diminution de la conductivité hydraulique par accumulation des quantités de pluie tombées a provoqué la modification de l'état de surface culturale à macropores à un état de surface culturale à micropores. Par ailleurs, le sarclage a l'avantage de créer des états de surface culturale favorisant une conductivité hydraulique de façon homogène sur l'ensemble du champ même si cette conductivité s'observe mieux pendant, seulement, les premières pluies après le travail du sol. Ce qui constitue une mesure de régénération des sols pour une bonne production agricole.

Toutes ces techniques décrites ci-dessus ont bien été documentées, c'est-à-dire depuis le protocole de leur réalisation jusqu'à la description des impacts sur la restauration du couvert végétal (Hien, 1995 ; Bouzou Moussa, 1997 ; Roose & De Noni, 1998 ; Vlaar, 1992 ; Roose, 2002 ; Ousseini, 2002 ; Bouzou Moussa & Dan Lamso, 2004 ; Youssef, 2007 ; Roose et al., 2012 ; Roose, 2015). Partant de cela, les effets de ces techniques sur certains paramètres hydrologiques méritent d'être passés en revue.

#### **1.2.5. Les effets des techniques de CES sur le ruissellement, l'infiltration et l'humidité du sol**

Les techniques de CES sont parfaitement connues au Sahel pour leur efficacité sur la réduction du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration (Roose, 2015 ; Roose & De Noni, 1998). Selon Albergel et al. (1995) ; M'Hiri et al. (1995) et Ousseini, (2002) l'efficacité des techniques de CES est plus bénéfique lorsque la démarche d'aménagement est holistique, exigeant une intervention plus complexe tenant compte des spécificités des différentes unités géomorphologiques, notamment le sommet de plateau, le talus, le glacis et le bas-fond. C'est ainsi qu'au Niger, Ousseini (2002) recommande une typologie d'aménagement adapté en fonction des unités paysagées intégrant la dynamique globale des versants et, donc, le contrôle efficace des eaux du ruissellement et de l'érosion du sol, capable d'écarter les pics des crues à l'échelle du bassin. En effet, la technique de tranchée nardi accompagné du scarifiage est plus efficace sur les plateaux avec une réduction de ruissellement de 50 à 75 % alors que sur le glacis sableux encroûté ce sont les cordons de pierres et les zaï qui ont la meilleure efficacité avec une réduction de ruissellement de 90 % (Ousseini, 2002). Tout récemment, une étude conduite par Ingatan Warzagan et al. (2019) a montré

l'importance de l'augmentation des dimensions des surfaces aménagées dans la réduction du coefficient de ruissellement à l'échelle du bassin versant. L'aménagement en banquette d'environ 10 % de la superficie du bassin versant peut entraîner une réduction de coefficient de ruissellement de 43 à 10 % soit une réduction de 33 %.

Au Burkina Faso, Hien (1995) a analysé le comportement hydrodynamique des aménagements en CES à l'échelle locale. Il explique ce comportement selon trois niveaux : l'amont de la diguette (1 m du fossé), l'aval de la diguette (à environ 2 m en aval du fossé) et dans l'espace inter-diguette. L'analyse des données a pris en compte l'intensité de pluies, l'état de surface, le taux de couverture végétale ou le paillage effectué. Ainsi, le ruissellement demeure plus élevé dans l'espace inter-diguette qui est encroûté et nu ( $K_r = 70\%$ ) et moins élevé en aval de la diguette ( $K_r = 40\%$ ). La « partie amont » de la diguette constitue la zone d'accumulation du ruissellement et la forte réserve en stock hydrique du sol. Quant à Vlaar (1992), il affirme que ces diguettes peuvent réduire le ruissellement de 20 à 1 % de la précipitation et réduire également l'érosion de 10 à 0,5 t/ha.

Armand (2009) a montré le rôle du sous-solage profond dans la réduction du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration. Dans le même sens, Weill et *al.* (2015) affirment que cette technique d'aménagement améliore la porosité, la structure et la percolation de l'eau en profondeur dans le sol afin de faciliter le développement des racines (Zouré et al., 2017). Cependant, cette technique de travail du sol est rarement pratiquée au Sahel étant donné que la structure des sols est peu développée (Biielders et al., 2004).

Biielders et al. (2004) ont étudié le rôle de la technique de branchage dans la lutte contre l'érosion (hydrique et éolienne). D'après ces auteurs, cette technique est utilisée pour atténuer la mobilisation des sédiments et favoriser leur piégeage. Les branchettes se constituent alors en obstacles au ruissellement, et de façon plus efficace, si elles sont alignées perpendiculairement à la pente. Mais, malgré ses effets positifs dans la gestion des eaux et des sols, cette technique est peu étudiée en termes de réhabilitation des formations végétales, car le recours au ramassage des bois morts ou de la paille est peu recommandé puisqu'il peut entraîner un déséquilibre au niveau du sol (Roose, 1985). En revanche, la combinaison de cette technique avec d'autres (labour, sous-solage, par exemple) peut renforcer davantage ce gain en matière d'efficacité. En outre, l'efficacité des techniques biologiques sur les propriétés hydriques du sol a été étudiée par Léonard & Rajot (1998). Ils ont testé 0,7 kilo de paille de *Ctenium elegans* égrené et 0,3 kilo de branchettes de *Guiera*

*senegalensis* sur une surface d'un mètre carré, soit une couverture du sol de 90 %. Le résultat obtenu montre que l'effet du branchage a été positif sur la teneur en eau. Cela signifie une réduction du ruissellement et donc une augmentation de l'infiltration sur les parcelles paillées. De plus, le matériau utilisé (paille ou branchettes) protège la surface du sol contre l'énergie des gouttes de pluie. Le branchage attire aussi les termites qui perforent le sol d'où l'amélioration de la porosité et de l'infiltration (Biielders et al., 2004 ; Léonard & Rajot, 1998). La technique de branchage augmente également la durée de conservation de l'humidité (effets durables, temporel et spatial) grâce à la canopée, à l'ombrage très rapproché qu'elle procure au sol (Roose, 2015). Torrekens et al. (1997) ont aussi rapporté que la technique de branchage (technique sans labour) provoque un dépôt de sable éolien à texture fine qui favorise l'infiltration de l'eau et le maintien de l'humidité du sol. Ces stocks d'humidité dans le sol favorisent ainsi la germination et la croissance de la végétation (Grouzis, 1992).

### **1.2.6. Les effets sur la régénération du couvert végétal**

Les techniques de Conservation des Eaux et des Sols (CES) et de Régénération des Sols (DRS) ont montré leur efficacité dans la reconstitution des sols dégradés et la restauration de la diversité floristique (Larwanou & Saadou, 2012 ; Yameogo, 2006). Par exemple, Torrekens et al. (1997) ont étudié l'impact des demi-lunes et des banquettes sur l'évolution de la végétation des plateaux latéritiques dans la région de Dosso (Ouest du Niger). Un tiers des aménagements a été semé avec des plantes locales telles que *Guiera senegalensis* J. F. Gmel., *piliostigma reticulatum* (DC.) Hochst, *Combretum micranthum* G. Don et *Acacia senegal* (L.) Willd. Les villageois ont tenté de semer des graines de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del, mais l'opération s'est soldée par un échec. Malgré cela, la productivité végétale (biomasse ligneuse et herbacée) du plateau aménagé a fortement augmenté. Cependant, Torrekens et al. (1997) ont souligné que ces résultats obtenus sur une petite échelle d'aménagements de plateau et sur une période de trois ans d'observations ne permettaient pas de tirer des conclusions applicables.

D'autres études ont montré que les techniques d'aménagement ont conduit à une augmentation significative de la couverture végétale, ce qui a conduit à l'hypothèse d'un reverdissement du Sahel (Dia et al., 2010 ; Fensholt et al., 2012 ; Fensholt, 2013 ; Dardel, 2014). Par exemple, le projet Keita dans la région de Tahoua au Niger, qui a mobilisé d'importants moyens (tracteurs, fonds...),

a permis d'illustrer les effets positifs des techniques de CES-DRS. Au Mali, les bonnes pratiques de CES-DRS ont bénéficié à la réussite de projets similaires dans la région du Gourma.

Au Niger, le reverdissement a été attribué à des pratiques telles que la régénération naturelle assistée (RNA), la mise en défens des anciennes zones de culture (jachères) et la protection des zones de formations végétales dégradées, telles que le plateau du parc national du W et le plateau Kouré (Renard et al., 1993 ; Larwanou et al., 2006 ; Dardel, 2014).

Malgré ces résultats positifs, les techniques de CES-DRS ont été confrontées à des insuffisances lors de leur application sur le terrain. Des études ont montré que l'adoption des pratiques de CES-DRS par les populations locales était souvent limitée en raison de facteurs socio-économiques et culturels, tels que le manque de ressources, le manque d'information et la résistance au changement (Abdul-Rahaman et al., 2000)

### **1.2.7. Les limites des techniques de CES/DRS**

Sur le plan social, Bouzou Moussa (1997), ayant étudié les aménagements mécaniques et biologiques réalisés dans la région de Tahoua, a démontré des incohérences dans les approches technique et sociale, notamment le manque d'entretien des ouvrages et la faible participation des paysans. Le savoir-faire des paysans et le contexte socioculturel ont été initialement ignorés par les techniciens des ONG lors de la mise en application des projets de CES (Bouzou Moussa & Yamba, 2008). Ce qui peut, au moins en partie, justifier les échecs constatés. Ces mêmes auteurs ont aussi rapporté que certains paramètres écosystémiques, géomorphologiques, pédologiques, et même socioéconomiques n'ont pas été pris en compte dans leur intégralité ou parfois négligés dans l'exécution des projets d'aménagement. En fait, ce qui importe en ce moment, c'était de trouver les palliatifs aux problèmes de la dégradation des terres. Raison pour laquelle, les résultats obtenus n'ont toujours pas été à la hauteur des attentes des techniciens à cause du non-respect des principes d'exécution et des spécificités de certains écosystèmes à l'instar de la brousse tigrée.

Par ailleurs, l'appropriation par les paysans de ces techniques de CES n'est pas encore au rendez-vous dans la plupart des cas. Ainsi, même quand certains paysans ont essayé de répliquer et de s'approprier les techniques d'aménagement, ils les abandonnent assez précipitamment après avoir constaté leur inadaptation au niveau des terroirs et leur inefficacité en ce qui concerne la

récupération des terres dans des milieux globalement dégradés (Ousseini, 2002). En outre, Guéro et Dan Lamso (2006) rapportent que l'appropriation des ouvrages a été plus sentie dans les zones où les projets ont utilisé des moyens légers (outils aratoires comme la pioche). Tandis qu'elle a été limitée là où de gros moyens mécaniques ont été utilisés (tracteurs). Selon Biolders et al. (2004), pour que les techniques de CES/DRS soient acceptées par les paysans, il faut qu'elles leur apportent des bénéfices immédiats, par exemple la réduction de l'érosion, la restauration de la fertilité des sols, dans les champs ou des sous-produits forestiers. Or, on sait que les effets de ces techniques de CES ne sont généralement remarquables que sur le long terme.

Sur le plan technique, Roose et al. (2010) ont rapporté qu'un écartement d'autant plus grand est nécessaire entre les ouvrages pour apporter beaucoup d'eau à l'arbuste. Zoure (2019) ajoute que cet écartement important, entre les demi-lunes ou Zai, a donné de très bonnes performances hydrologiques et agronomiques dans un contexte de changement climatique. Cependant, dans d'autres études (Roose & De Noni, 1998 ; Roose et al., 2008) l'écartement systématique entre les ouvrages antiérosifs a été critiqué. Il a été rapporté que cet écartement ne respecte pas parfois la structure de la brousse tigrée, notamment la disposition entre les bandes nues qui collectent les eaux de ruissellement et les bandes boisées qui infiltrent les eaux (communication personnelle avec Biolders en 2016). D'après lui, les jeunes plants dispersés ou tassés, dans les fossés et/ou sur les ados d'ouvrages, génèrent trop peu de biomasse et d'activité biologique. Torrekens et al. (1997) font le même constat dans le cas de la réalisation des aménagements en demi-lunes ou des banquettes couronnées de succès (développement important du couvert végétal). Ils ont expliqué que la mosaïque de la végétation créée (structure d'écosystème), ne reflète pas la mosaïque réelle de la brousse tigrée. Quant à Dardel (2014), elle a critiqué le rapport entre le taux du couvert végétal obtenu à l'échelle de l'ouvrage (par exemple demi-lune, banquette...) rapporté au taux de la dégradation de la végétation à l'échelle du bassin ou du terroir.

Par ailleurs, d'autres études (Hien, 1995 ; Blamah, 2004) ont proposé la réduction de l'espace interouvrage. Mais cette proposition risque de réduire la superficie de l'impluvium qui est censée collecter beaucoup d'eau au profit des cuvettes et des plantes déjà poussées (Ichaou, 2004 ; Soumana et al., 2011). Dans le même ordre d'idées, Galle et al. (1997) pensent que le fonctionnement de la brousse tigrée, si l'on ne prend garde, risque d'être perturbé par la réalisation des ouvrages (tels que les aménagements antiérosifs) qui modifient inéluctablement les liens



dynamiques entre la bande nue et la bande boisée. D'après ces auteurs, le ruissellement produit sur la bande nue constitue un facteur essentiel pour le maintien de la bande boisée en bon état. Dans ce cas, la bande nue ne constitue pas un espace totalement perdu qu'il faut systématiquement aménager (Ichaou, 2004), car l'intervention (aménagement) peut entraîner la diminution en termes d'apport d'eau nécessaire aux bandes boisées. Et par conséquent, les interventions en matière d'aménagements non mesurés peuvent affecter le fonctionnement hydrique normal de la brousse tigrée.

### **1.3. La problématique de l'étude**

Il ressort de la revue de la littérature que le recours aux techniques de réhabilitation des formations végétales dégradées est plus que nécessaire. Mais, pour le cas de la brousse tigrée, les approches divergent même si toutes s'accordent sur la nécessité de n'intervenir que dans les bandes nues. Aussi, de récents travaux sur le même site, conduits par Ingatan Warzagan (2020), ont montré l'impérieuse nécessité de changer d'approche. En effet, les banquettes et le sous-solage, même s'ils permettent de réduire les écoulements, n'entraînent pas la reconstitution de la brousse tigrée. La végétation ne se développe que le long des fossés. Ceci est observable sur tous les sites aménagés par les projets. Il est donc fondamental d'envisager une approche innovante d'aménagement de la brousse tigrée tout en respectant sa structure et son fonctionnement considérés comme étant initialement bien équilibrés. Même si la littérature scientifique a auparavant évoqué cette question, elle n'a cependant pas fait l'objet d'une étude approfondie.

Dans le même temps, étant donné que l'absorption totale des eaux de ruissellement lâchées par les bandes boisées du plateau latéritique n'est plus assurée par celles-ci, il est également indispensable d'aménager les parties encroûtées du haut glacis sur lesquelles ces eaux s'organisent et ravinent les sols des champs des cultures pluviales.

### **1.4. Les questions de recherche**

- ✚ La question principale : La brousse tigrée dégradée, peut-elle être réhabilitée par les techniques d'aménagement s'inspirant de son mode de fonctionnement initial ?

La réhabilitation s'entend comme la restauration, ou l'action de rétablir la brousse tigrée dans son état ancien.

Les questions secondaires sont :

- ✓ l'association ou non des techniques d'aménagement, peut-elle être efficace pour réhabiliter les formations végétales du plateau et du haut glacis ?
- ✓ les conditions d'infiltration du sol nécessaires à la restauration du couvert végétal, peuvent-elles être améliorées grâce à la mise en œuvre de ces techniques d'aménagement ?
- ✓ quelle est leur efficacité en termes de réduction du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de la parcelle et celle du bassin versant ?

### **1.5. Les hypothèses de recherche**

- ✚ L'hypothèse centrale : l'application des techniques d'aménagement s'inspirant de la structure de la brousse tigrée permet de la réhabiliter dans son mode de fonctionnement naturel.

Les hypothèses secondaires sont :

- ✓ l'association de la technique de sous-solage-ensemencement-branchage est efficace pour une régénération durable des formations végétales contractées du plateau et du haut glacis ;
- ✓ la mise en œuvre de ces techniques d'aménagement permet d'améliorer les conditions d'infiltration nécessaires au développement du couvert végétal à l'échelle des bandes aménagées ;
- ✓ ces techniques d'aménagement jouent un rôle conséquent dans la réduction du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de la parcelle et celle du bassin versant.

## 1.6. Les objectifs de l'étude

- ✚ Objectif général : Ce travail de thèse consiste à évaluer l'efficacité des techniques d'aménagement (sous-solage, ensemencement, branchage) sur la réhabilitation de la brousse tigrée en s'inspirant de son mode de fonctionnement naturel.

### Les objectifs spécifiques visent à :

- ✓ étudier les effets de ces techniques d'aménagement (sous-solage, ensemencement, branchage) sur la régénération des surfaces dégradées à l'échelle des unités géodynamiques (plateau latéritique et haut glacis) ;
- ✓ évaluer les effets de ces techniques d'aménagement sur l'amélioration des conditions d'infiltration à l'échelle locale (ponctuelle) ;
- ✓ quantifier les effets sur la réduction du ruissellement et de l'érosion en relation avec la régénération du couvert végétal.

## 1.7. Les difficultés rencontrées

Elles sont principalement liées aux pannes des appareils. Par exemple, pendant la campagne hydrologique de 2017, nous avons constaté quelques dysfonctionnements du Thalimèdes (appareil qui mesure la variation des hauteurs d'eau dans le lit de ravine). Pendant certaines pluies, l'appareil n'archive aucune donnée ou enregistre de faibles hauteurs d'eau même s'il s'agit d'une grande pluie et intense. En 2018, nous avons tenté de prévoir cela en téléchargeant progressivement les données. Mais hélas, le problème a persisté. En 2019, après observation minutieuse du fonctionnement de l'appareil sur le terrain pendant qu'il pleuvait, nous avons émis quelques hypothèses :

- le dysfonctionnement du Thalimèdes peut être expliqué par son ancienneté, car mis en service depuis 2005 ;
- la difficulté de faire la part des choses entre le moment où l'appareil n'a rien enregistré (au cours d'une pluie donnée) à cause d'un problème technique et le moment où l'impact de l'aménagement

a été significatif.

Face à cette situation, la majeure partie des données enregistrées par le Thalimèdes n'a pas été présentée dans les résultats. Mais l'exploitation de quelques données a été possible grâce à la comparaison du fonctionnement du Thalimèdes de la TK-IBM avec un autre installé à la station TK-amont Nord, qui se situe à moins de 1 km (cf. annexe 7).

Outre cela, les deux sondes à neutron utilisées dans le cadre de ce travail sont également tombées en panne en 2018. Nous avons dû suspendre les mesures neutroniques puisqu'elles n'ont pas pu être réparées à temps. Mais, en termes d'alternative, nous avons opté pour les mesures d'humidité gravimétriques dans la partie superficielle du sol (de 2018 à 2019).

## **Conclusion**

Ce chapitre a présenté le cadre théorique de notre étude sur la dégradation du couvert végétal et ses impacts sur le fonctionnement hydrologique et biologique de la brousse tigrée du Sud-Ouest nigérien. Il a été examiné les causes de la dégradation environnementale, les conséquences sur l'hydrologie de l'Ouest du Niger et la mise en place de la politique de récupération des terres dégradées au Niger. Nous avons également évoqué l'efficacité et les limites des techniques de conservation des eaux et des sols (CES) pour lutter contre la dégradation des sols, en particulier sur les plateaux latéritiques et sur les glacis encroûtés de cette région.

À la fin de ce chapitre, nous avons présenté la problématique de recherche, les questions, les hypothèses et les objectifs que nous cherchons à atteindre dans cette étude à travers ce sujet innovant sur les politiques de réhabilitation des écosystèmes (à l'instar de la brousse tigrée). Nous avons également mentionné les difficultés que nous avons rencontrées pour atteindre ces objectifs.

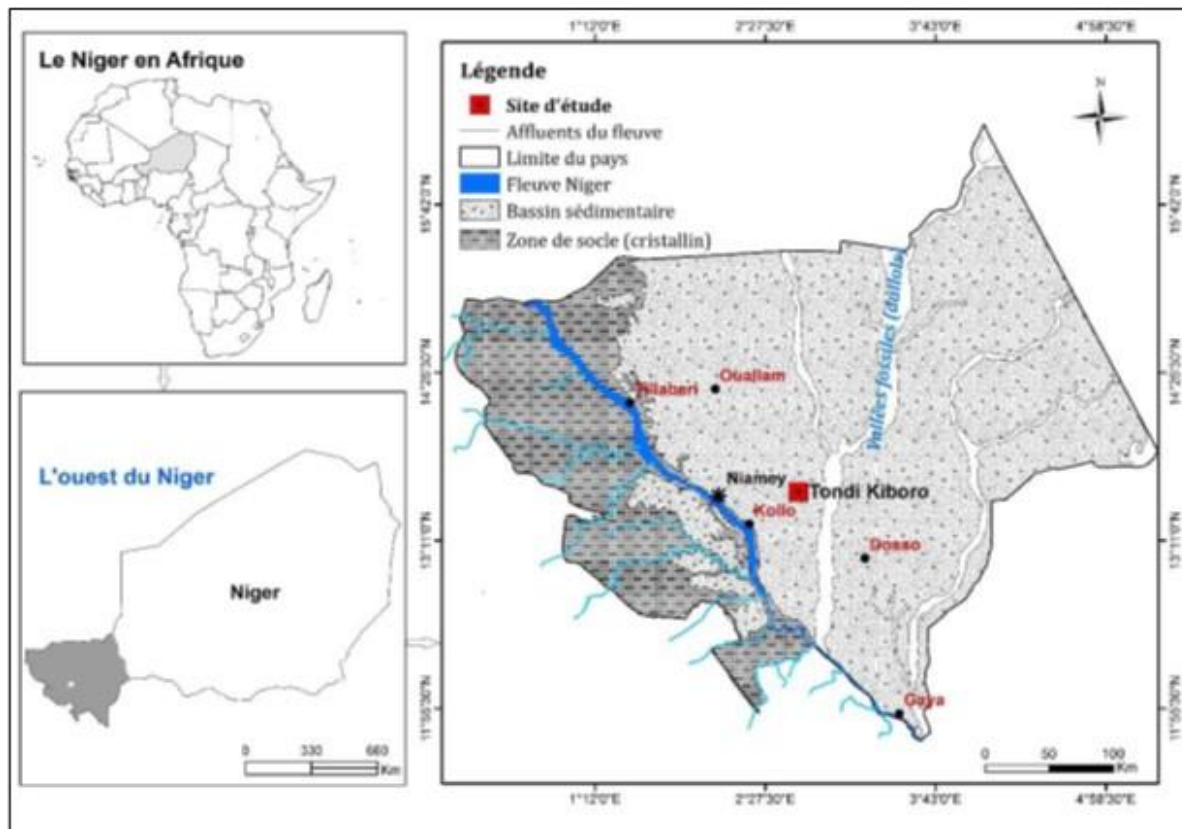
## Chapitre 2. La présentation de la zone d'étude et du protocole d'aménagement

*Ce chapitre décrit les caractéristiques générales des contextes géologique, pédologique, climatique et des formations végétales de la zone d'étude. Il expose aussi le contexte démographique et ses conséquences sur l'environnement et la dégradation des formations végétales. Ensuite, il présente et justifie les choix du site d'étude, des surfaces dégradées aménagées et le protocole d'aménagements appliqué, notamment les trois techniques expérimentées à savoir le sous-solage, l'ensemencement et le branchage.*

### 2.1. Le contexte géologique et géomorphologique

#### 2.1.1. La présentation succincte de la géologie de l'Ouest du Niger

La géologie de l'Ouest du Niger est constituée de deux grands ensembles qui sont le socle cristallin situé sur la rive droite et le bassin sédimentaire situé sur la rive gauche du fleuve Niger (figure 4).



Comme illustré par la carte ci-dessus, notre zone d'étude se situe en bordure ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden. Ce bassin est limité au nord par les massifs montagneux de l'Air, de l'Adar de Iforas et du Hoggar, au sud par le socle cristallin du Nigeria, à l'Est par le socle du Damagaram Mounio et le bassin du Tchad et à l'Ouest par le socle du Liptako Gourma du Burkina Faso. Le bassin sédimentaire a été mis en place au début de l'ère tertiaire et s'est comblé par des dépôts silico-clastiques. Son évolution est marquée par l'alternance des dépôts marins et continentaux mis en place pendant les sept périodes de transgression marine intercalées par des épisodes continentaux (Laouali Idi et al., 2021). Greigert et al. (1966) ont identifié trois principales séries dans les formations d'origines continentales (constituées des sédiments détritiques à argilo-gréseux). Il s'agit de la série sidérolithique de l'Adar Doutchi (Ct<sup>1</sup>), la série argilo-sableuse à lignites (Ct<sup>2</sup>) et la série des grès argileux du moyen Niger (Ct<sup>3</sup>).

### 2.1.2. Les unités paysagères

Le paysage de la zone d'étude est dominé principalement par la succession de quatre unités morpho-pédologiques : le revers du plateau latéritique, les talus d'éboulis, les glacis et les bas-fonds (figure 5).

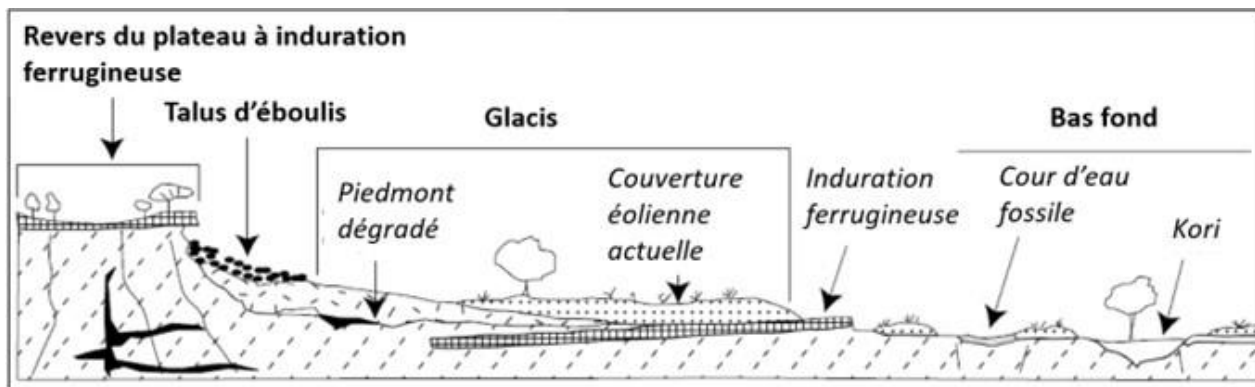


Figure 5. Les unités géomorphologiques du bassin sédimentaire dans le secteur du site d'étude (Tondi Kiboro) d'après Malam Abdou, 2014 (modifié).

Les unités géomorphologiques illustrées ci-dessus se distinguent par des types de formation végétale spécifique qui les occupent, mais également par des types de sols.

### 2.1.2.1. Le revers du plateau et son talus

Le revers du plateau culmine à environ 265 m d'altitude. Il constitue le plus haut niveau des différentes unités (Massuel, 2005) comme le montre la figure 6. Il est formé de grès argileux du moyen Niger composé, essentiellement, de grès fins ou moyens et des argiles kaolinites perforées par de nombreuses tubulures d'anciens conduits racinaires ou reliques d'anciens terriers (Dubois & Lang, 1981). Les plateaux latéritiques sont des unités à faible pente de l'ordre de 1,3 % (Massuel, 2005). Ils couvrent une bonne partie de la surface totale de la zone d'étude, soit en moyenne 28 % du bassin de Dantiandou, à titre d'exemple. À la surface du sol, on trouve principalement des affleurements de la cuirasse ferrugineuse (Gavaud, 1965).

Les sols des revers du plateau sont pauvres. Ils sont peu évolués, peu épais (35 à 60 cm) et très peu développés, mais très riches en argile (15 à 45 %) d'après Ambouta (1984). Ce sont des lithosols (Courault et al., 1990), ce qui explique leur sensibilité très élevée à la dégradation dès qu'ils ne sont pas protégés par la végétation. Cela se traduit par une forte érosion hydrique, éolienne et un encroûtement accéléré du sol (Ambouta, 1994). En revanche, les sols sont très développés au cœur des bandes boisées de la brousse tigrée (Galle et al., 1999 ; Seghieri et al., 1996).

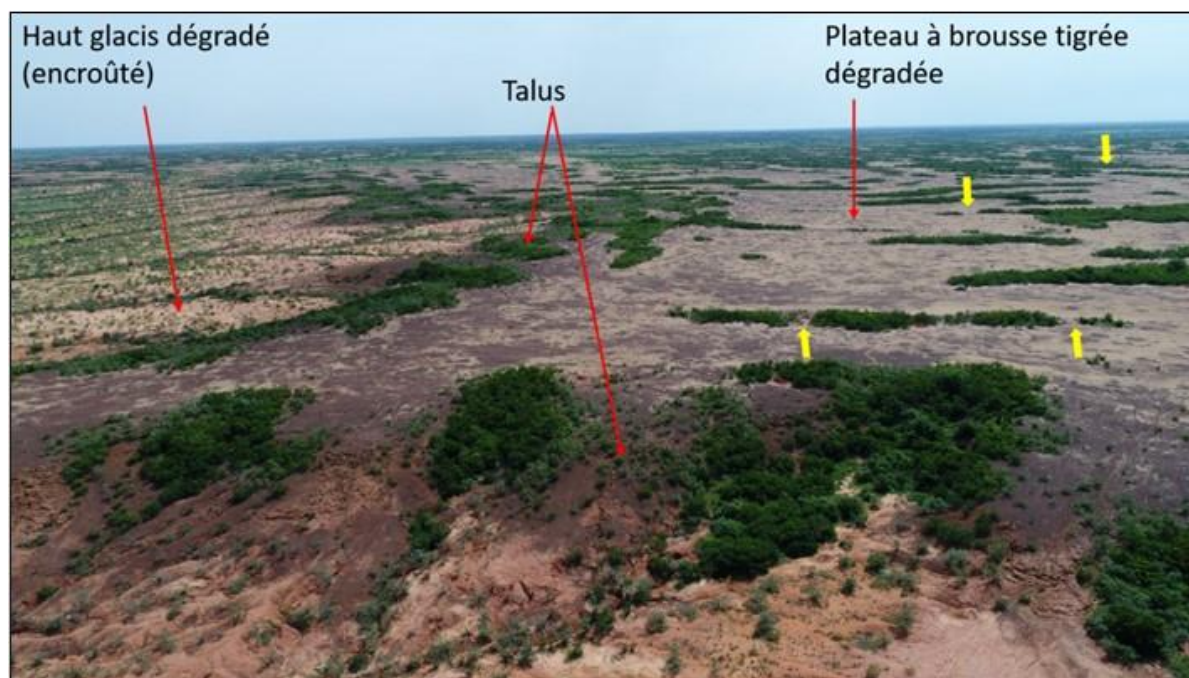


Figure 6. L'illustration des unités géomorphologiques et l'organisation de la végétation.

**N. B.** Les flèches jaunes indiquent les quelques endroits où les bandes boisées sont découpées, résultats de la dégradation de la brousse tigrée sur le revers du plateau latéritique.

L'observation de cette figure ci-dessus montre qu'au pied du plateau se trouve le talus. C'est une unité géomorphologique avec pente abrupte, environ 35 % (Courault et al., 1990). En outre, elle est couverte à la surface avec une couche de gravillon sombre. Le type de formation végétale présente sur cette unité est la broussaille.

Aucun aménagement n'a été réalisé sur cette unité qui est la zone de transition entre le plateau et le haut glacis.

#### **2.1.2.2. Le glacis**

Le glacis est situé à la base du revers du plateau. Il est principalement occupé par des dépôts de sables éoliens (Desconnets, 1994). Il s'agit d'une unité à pente relativement importante, soit environ 3,5 % (Ambouta, 1994). Le glacis peut être subdivisé en deux parties. La partie inférieure où les dépôts éoliens sont couverts par une végétation plus ou moins dense autour des cônes de déjection, des mares et des ravines. Parfois, c'est une végétation mise en place pendant les longues périodes de jachère ou de pratiques agricoles. La partie supérieure du glacis ou piémont dégradé est constitué d'un massif essentiellement sableux et encroûté. Les parties superficielles de cette sous-unité sont essentiellement modelées par les eaux de ruissellement (écoulement concentré). Sur cette partie, la végétation est moins dense. C'est la partie du glacis qui nous intéresse dans le cadre de ce travail. En fait, elle représente la partie la plus dégradée et abandonnée par les paysans. Le type de végétation qu'on y rencontre est la steppe arbustive (Saadou, 1990 ; Yamba, 1993). Les espèces arborées les plus abondantes sont : *Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigrican*, *Guiera senegalensis*, *Acacia ataxacanta*, etc. Le tapis herbacé est dense, il comprend des espèces comme : *Schoenefeldia gracilis*, *Eragrostis tremula*, *Zornia glochidiata*, *Andropogon gayanus*, *Ctenium elegans* (Ambouta, 1984).

#### **2.1.2.3. Les bas-fonds**

Les bas-fonds sont des unités les plus basses dans le paysage de l'Ouest du Niger. Ce sont des koris qui forment un grand réseau organisé autour du grand système du kori Dantiandou. Du fait des transports liquides et solides, les bas-fonds sont dominés par des accumulations sableuses fines avec, le plus souvent, d'importantes proportions d'argiles (Massuel, 2005). Ils regorgent des sols



très fertiles et cultivables. Il s'y concentre les activités humaines, notamment l'élevage, l'agriculture et le maraichage.

La végétation est constituée des combrétacées et présente moins de discontinuité par rapport à celle observée sur les autres unités géomorphologiques. Il faut enfin signaler qu'aucun aménagement n'a été réalisé sur cette unité.

## **2.2. Le contexte hydrologique**

Le ruissellement représente le mouvement des eaux de pluie à la surface du sol. C'est un phénomène observable à l'échelle parcellaire ou du bassin versant. La possibilité de ruissellement des eaux de pluie à la surface du sol n'est possible que lorsque le sol est incapable d'absorber l'eau qu'il reçoit (Malam Abdou, 2014). D'après Hewlett (1961), le ruissellement apparaît quand le sol est saturé, c'est-à-dire au moment où tous les pores du sol sont remplis.

Le ruissellement peut aussi se produire lorsqu'il y a la présence d'obstacles naturels à sa circulation verticale (présence de croûte, par exemple) ou lorsque l'intensité de pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol (Horton, 1933). Dans ce cas, le développement d'une mince croûte d'érosion superficielle limite l'infiltration. Ce qui provoque le ruissellement comme l'ont rapporté plusieurs études au Sahel nigérien (Bouzou Moussa et al., 2020 ; Mahe et al., 2003 ; Peugeot, 1995 ; Bouzou Moussa, 1988) plus particulièrement, dans la zone sédimentaire où se situe notre zone d'étude. Ce fonctionnement général de l'hydrologie, dans notre zone d'étude, est résumé dans la figure 7.

Par ailleurs, la présence des sols dégradés (pellicule, dure en surface) et le caractère de forte intensité de pluie entraînent de forts taux de ruissellement. Ce qui amplifie le phénomène de dégradation des terres par décapage. De ce fait, l'importance de l'étude du ruissellement sous les conditions naturelles, par application de la méthode classique de mesure sur une parcelle expérimentale de type Wischmeier afin d'observer et de comprendre la réaction des sols sahéliens dégradés aménagés, n'est plus à démontrer.

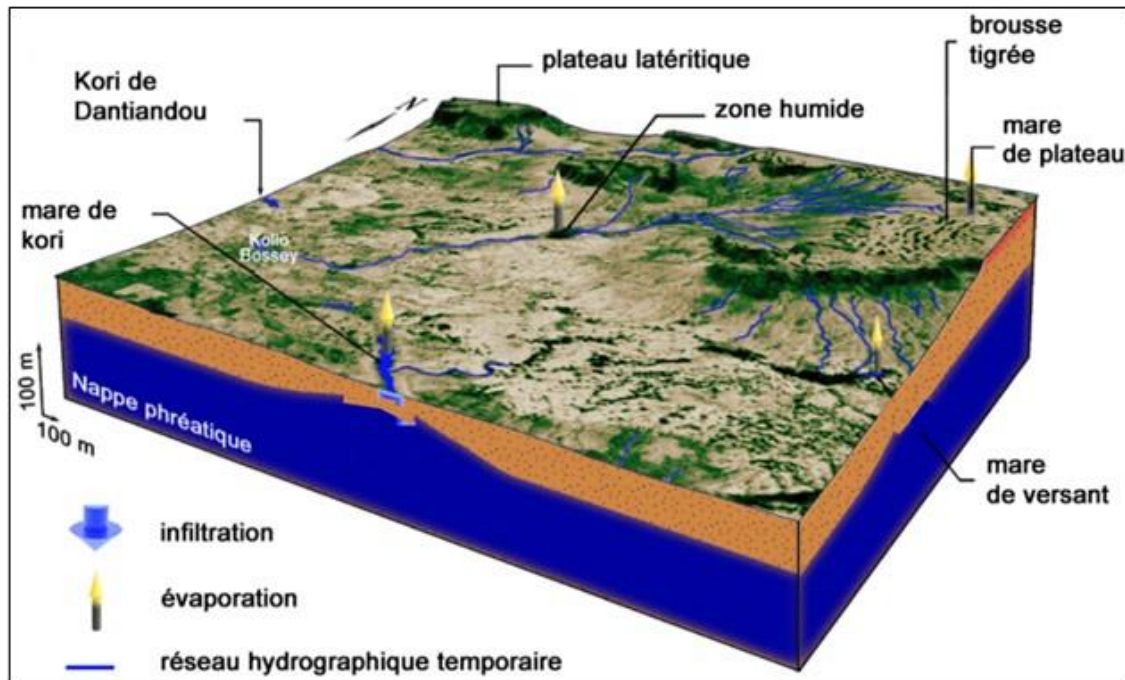


Figure 7. La distribution du système hydrologique dans le secteur de Dantiandou (zone d'étude).  
Source : Massuel, 2005.

### 2.3. Le contexte climatique

Le climat au Sahel est régi par le mécanisme de la mousson ouest-africaine (MOA) d'après Flaounas, 2010 ; Hourdin et al., 2010. La mousson doit son existence par le mécanisme qui résulte de l'interaction opposant les zones des masses d'air continentale (basse pression) et océanique (haute pression). Cette interaction provoque des différences de température, de pression et de vent (Fontaine et al., 2012 ; Janicot et al., 2012 ; Redelsperger et al., 2006). Durant l'été, cet échange de température et d'air apporte, de façon générale, des masses d'air chargées en humidité vers les hautes pressions continentales, particulièrement vers les pays du Sahel. En effet, les masses d'air océaniques (zone des hautes pressions) chargées en humidité se dirigent vers les basses pressions (au-dessus du continent) : c'est la zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Ce mouvement général alimente cette zone (ZCIT) en énergies et provoque la remontée du Front inter-tropical (FIT). Cette remontée du FIT correspond au début de la saison pluvieuse accompagnée des précipitations, généralement, en mai dans la bande du Sahel central (Stern et al., 1981). La saison de pluie s'installe véritablement dans notre secteur d'étude (Ouest du Niger) à partir de juin-juillet. Ensuite, cette percée de mousson va se heurter avec celle d'harmattan (alizé du nord qui est chaud

et sec) qui devient fort à partir d'octobre. Ce dernier (harmattan) va faire basculer la mousson beaucoup plus au sud. Cela correspond à la fin de la saison pluvieuse et au début de la saison sèche. Cette dernière suit son cours d'octobre à mars (alternance des saisons).

En fait, même si dans la réalité ce mécanisme est régulier et confère à la zone sahélienne un régime pluviométrique à cycle saisonnier bien marqué et stable. Il n'en demeure pas moins que le cours des saisons pluvieuses est souvent irrégulier, c'est-à-dire ponctué des années excédentaires et des années sèches.

### **2.3.1. La variabilité de la pluie**

La variabilité de la mousson ouest-africaine entraîne une permanente succession d'épisodes secs et humides au Sahel (Ali & Lebel, 2009). Cette variabilité est liée aux facteurs propres à l'atmosphère et à ses interactions avec les océans et la biosphère continentale (Fontaine et al., 2012). Ces interactions ont entraîné une migration de ZCIT vers le nord. Au fait, cette migration de la ZCIT a une influence sur la pluviométrie qui connaît une variabilité importante depuis fort longtemps (1900) et plus particulièrement ces dernières décennies (depuis 1970). Parmi les facteurs signalant cette forte variabilité de la pluviométrie dans notre zone d'étude, il y a les sécheresses des années 1910-1915, 1968-1995 (Ali & Lebel, 2009), la diminution du nombre de jours de pluie au cours des saisons pluvieuses (Panthou, 2013), l'intensification pluviométrique et des inondations (Lebel et al., 2019, 2018 ; Mahamadou et al., 2018 ; Taylor et al., 2017). Une autre facette de cette variabilité climatique est la fréquence des tempêtes extrêmes au Sahel qui a triplé depuis 1982 (Taylor et al., 2017).

Le dernier épisode sec, marquant la forte variabilité de la pluviométrie, a non seulement duré longtemps, mais aussi a marqué la mémoire de toute la population au Sahel et particulièrement celle de l'Ouest nigérien (notre zone d'étude). La figure 8 montre la variabilité de la pluviométrie dans le degré carré de Niamey (Ouest du Niger).

Les indices pluviométriques calculés (figure 8) illustrent l'instabilité et la variabilité pluviométrique dans l'Ouest nigérien où se trouve notre zone d'étude. Ils caractérisent les anomalies positives et négatives traduisant respectivement les excédents et les déficits

pluviométriques de 1905 à 2020 à la station Niamey-aéroport. La moyenne interannuelle au cours de cette période est de 554 mm/an.

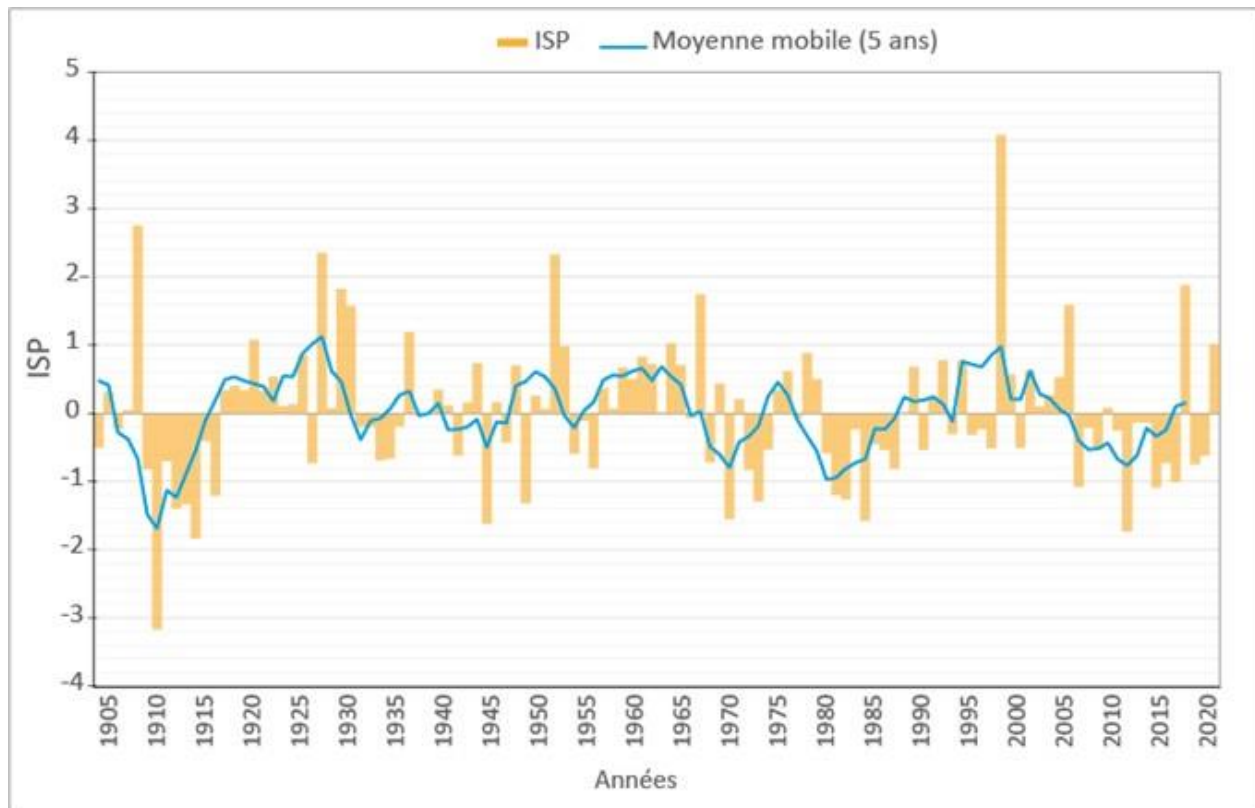


Figure 8. L'évolution de l'indice standardisé des précipitations (ISP) et de la moyenne mobile à Niamey.  $ISP = (P_i - P_{moy}) / \text{écart-type}$  :  $i$  = indice de l'année,  $P_{moy}$  = pluie moyenne (1905-2020) = 554 mm et écart-type = 148,8 mm. Source des données AGRHYMET.

L'analyse de la figure 8 montre une variabilité des indices pluviométriques sur quatre grandes périodes comme l'illustre la moyenne mobile au pas de temps de 5 ans. Les périodes allant de 1905 à 1916 et de 1980 à 1989 sont caractérisées globalement par des anomalies négatives, ce qui traduit des séquences sèches. Alors que les périodes de 1917 à 1979 et de 1990 à nos jours (2020) sont caractérisées par des anomalies globalement positives, c'est-à-dire des séquences humides. Ce constat permet d'affirmer que l'Ouest du Niger, à l'instar des autres régions sahéliennes, est marqué par une alternance des périodes humides et des périodes sèches au cours de la période.

### 2.3.2. Les conséquences de la variabilité de la pluie

Au Sahel, les précipitations moyennes ont diminué de 25 à 40 % entre 1931-1960 et 1968-1997 d'après (Sharon Nicholson, 2000). Au cours de cette période de déficit, l'évaporation de l'eau devient plus forte ainsi que l'assèchement considérable de l'eau contenue dans les premiers centimètres, voire même en profondeur du sol. La figure 9 montre l'évolution de l'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne au cours d'un épisode pluviométrique sec (1977-1989) et humide (1990-2004) à Niamey.

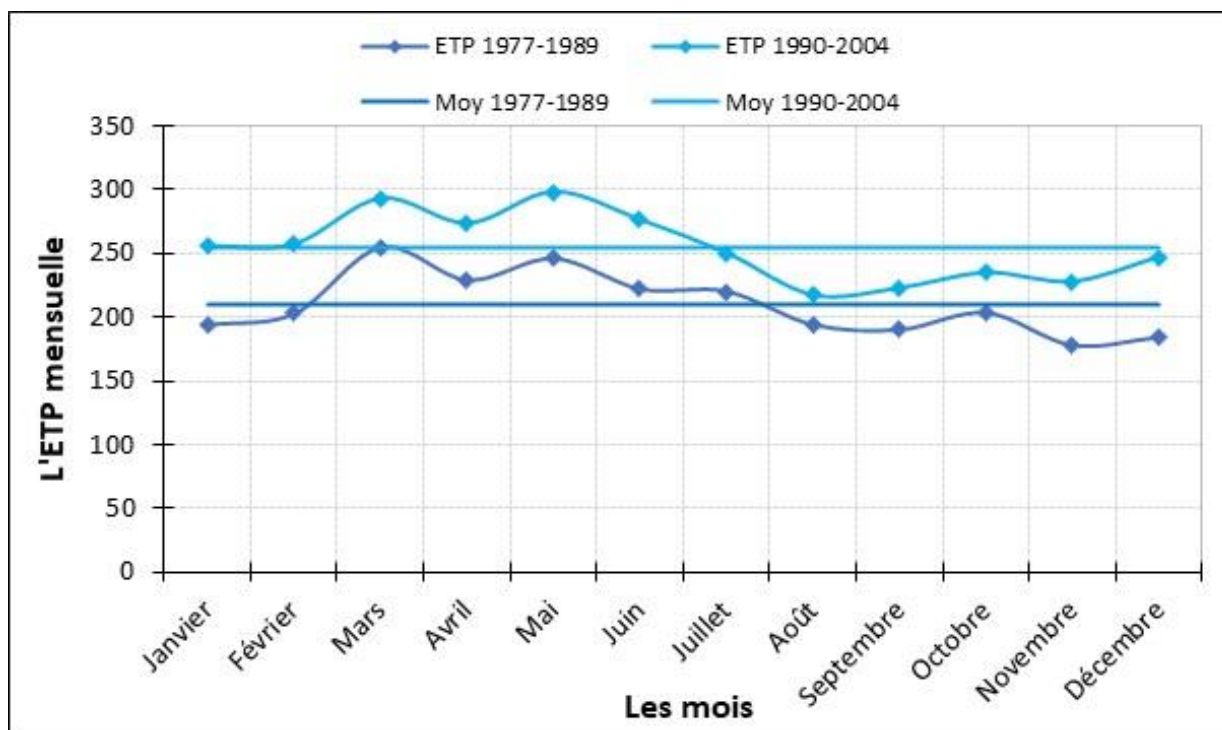


Figure 9. L'évolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à Niamey au cours des périodes 1977-1989 et 1990-2004.

L'examen de la figure 9 montre que les plus fortes valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle sont enregistrées pendant les mois les plus torrides de l'année (mars, avril et mai) tandis que les valeurs faibles correspondent au mois pluvieux de l'année (juillet, août et septembre). Alors qu'à l'échelle interannuelle, l'ETP est globalement plus élevée pendant la période relativement humide de 1990-2004, soit 3054 mm/an (8 mm/jour) par rapport à la période sèche de 1977-1989 où elle est moins élevée, soit 2520 mm/an (7 mm/jour). Ce qui est énorme comme perte en eau étant donné que les compensations sont faibles au cours de cette période sèche (1977-1989). En

effet, la moyenne annuelle des précipitations est de 500 mm de 1977 à 1989 contre 600 mm/an de 1990 à 2004. Cette moyenne élevée de la pluviométrie (au-dessus de la moyenne de 554 mm/an) est le résultat du phénomène de l'intensification pluviométrique au Sahel. Depuis les années 90, des événements pluvieux de grande quantité et de fortes intensités sont enregistrés (Vischel et al., 2015).

La relative augmentation de l'évapotranspiration potentielle pendant la période 1990-2004 (jusqu'aujourd'hui) témoigne d'une forte activité biologique, c'est-à-dire l'augmentation du signal de la végétation (NDVI), au point où on parle d'un possible reverdissement du Sahel (Giannini et al., 2008 ; Sharon E. Nicholson, 2013 ; Olsson et al., 2005) notamment dans les régions du Gourma au Burkina Faso (+12 %) et du Fakara au Niger (27 %) d'après Marega et al. (2021). Par contre, pour le cas de la commune de Dantiandou, c'est au contraire une régression de la couverture végétale (-35 %) qui a été observée entre 1999 à 2010 (Marega et al., 2021), malgré la relative amélioration de la pluviométrie au début des années 2000.

Et étant donné que nous sommes dans un contexte de variabilité des précipitations avec récurrence des années déficitaires, la forte évapotranspiration peut accentuer le phénomène de dégradation en puisant le stock d'eau disponible dans le sol sans être compensée à temps. Les formations végétales telles, la brousse tigrée, la broussaille et la steppe arbustive se désintègrent de façon progressive. En effet, plusieurs auteurs ont fait cas de cette forte dégradation des écosystèmes des espèces animales et végétales, avec comme conséquences leur régression (Gonzalez et al., 2012 ; Ozer et al., 2010). En outre, beaucoup d'espèces ligneuses sont menacées de disparition de leurs habitats naturels à cause d'une surexploitation liée aux nombreux produits et services qu'ils procurent (bois, alimentation et pharmacopée) aux populations.

#### **2.4. La dynamique démographique et ses conséquences sur l'environnement**

La commune rurale de Dantiandou dans laquelle se trouve notre site d'étude Tondi Kiboro est rattachée administrativement au département de Kollo, région de Tillabéri (Niger). Les caractéristiques démographiques de cette commune sont presque les mêmes que celles de toutes les autres communes du Niger. Il s'agit d'un pays avec le taux de croissance démographique parmi les plus élevés du monde entier (figure 10).

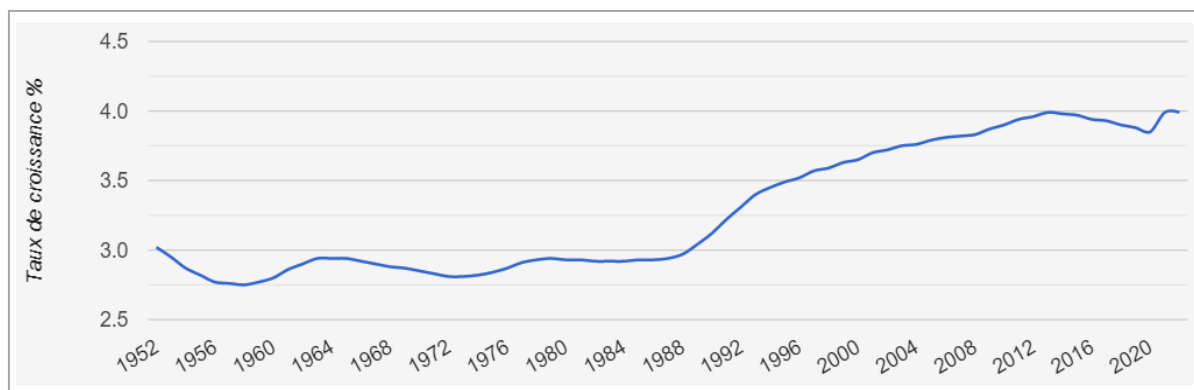


Figure 10. L'évolution du taux de croissance démographique au Niger d'après le département des affaires économiques et sociales des Nations unies.

La figure 10 illustre une augmentation importante de la population du Niger, avec un taux de croissance moyen d'environ 2,9 % entre 1950 et 1988, qui a augmenté pour atteindre environ 3,9 % en 2012. À l'échelle du pays, la population totale a rapidement augmenté de 7 439 281 habitants en 1988 à environ 23 761 125 habitants en 2020.

La commune rurale de Dantiandou suit la même tendance. Sa population totale a augmenté de façon significative, passant de 7 919 habitants en 1977 à 18 661 en 1988, 24 948 en 2001, et 36 772 en 2012, d'après les résultats des recensements généraux de la population et de l'habitat de l'INS-Niger. Selon le Recensement Administratif de 2020, la population totale de la commune est récemment estimée à 46 086 habitants. La figure 11 présente l'évolution de la densité de la population au niveau communal.

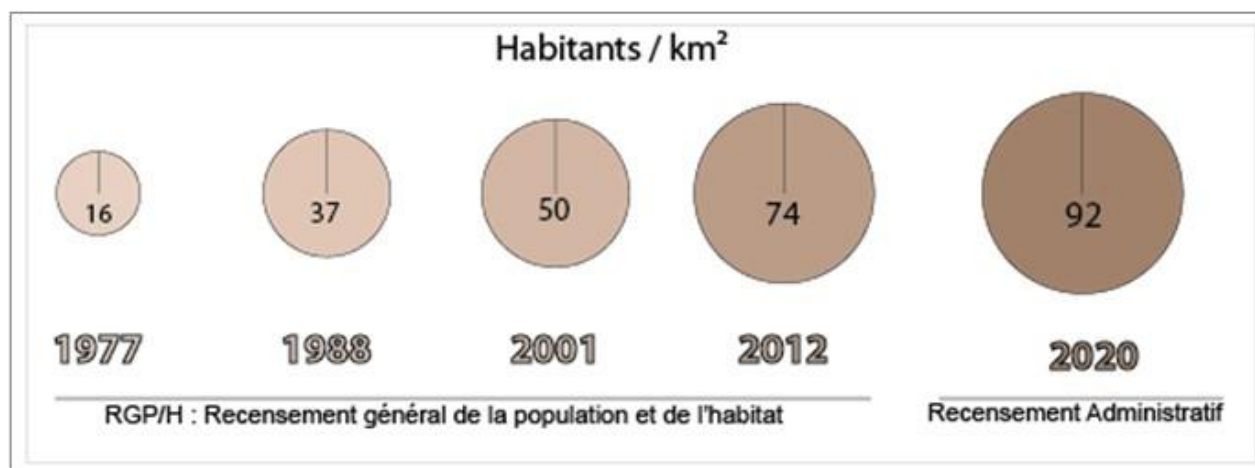


Figure 11. L'évolution de la densité de la population dans la commune rurale de Dantiandou.



La figure 11 montre clairement que la densité de population dans la commune rurale de Dantiandou a fortement augmenté. En seulement 43 ans, de 1977 à 2020, la densité de population a été multipliée par près de six (6) fois pour atteindre une moyenne de 54 habitants par km<sup>2</sup>. Cela est beaucoup plus élevé que la densité de population à l'échelle nationale du Niger, qui est de 19 habitants par km<sup>2</sup> (<https://perspective.usherbrooke.ca>).

Cette croissance rapide de la population a des conséquences sur les ressources naturelles telles que la végétation, l'eau et les terres. Plus la densité de population augmente, plus les pressions sur ces ressources deviennent fortes, ce qui impacte les paysans (agriculteurs et éleveurs) qui doivent s'adapter face aux risques climatiques et répondre aux besoins alimentaires croissants. Malheureusement, il a été révélé que plus de 50 % de la superficie a été perdue entre 1958 et 1997 pour satisfaire les besoins en espaces agricoles et en bois de chauffe (Lona et al., 2019 ; Lona et al., 2020).

Dans la commune de Dantiandou, les activités principales sont les cultures vivrières (mil, sorgho, niébé), quelques pratiques d'irrigation et l'élevage. Cependant, pour répondre à la demande en nourriture pour les hommes et les animaux, même les terres marginales sont utilisées, comme le montre la figure 12.



*Figure 12. L'exploitation des terres marginales (brousse tigrée) pour le bois de chauffe et la mise en culture.*

La demande croissante en bois de chauffe des grandes villes comme Niamey a rendu l'exploitation du bois de plus en plus lucrative, malgré la disponibilité de gaz dans le pays depuis 2011. Au lieu de moderniser l'agriculture, les agriculteurs et les éleveurs augmentent les surfaces cultivées et



pastorales, acceptant ainsi des problèmes écologiques. Entre 1950 et 1992, 87 % des versants sableux ont été défrichés et mis en culture, et 59 % de la végétation des plateaux a été déboisée dans le secteur de Dantiandou, entraînant une baisse des rendements agricoles et du fourrage dû à la dégradation des terres défrichées et à la variabilité climatique.

La figure 13 montre la pression exercée par les activités humaines (agriculture, déboisement) sur les ressources végétales et les sols de certains plateaux à Dantiandou (Marega et al., 2021). Cette pression a entraîné des changements importants dans l'occupation du sol dans la commune. Entre 1973 et 2000, la commune de Dantiandou a connu des zones de stabilité, des zones de progression végétalisées et des zones nues. Cependant, entre 2000 et 2010, on a assisté à une diminution spectaculaire des surfaces végétalisées, qui correspond à une augmentation des surfaces nues, sans végétation, due à la diminution de la couverture végétale des plateaux. À l'échelle du bassin versant, Bouzou Moussa et al. (2011) ont montré que la brousse tigrée sur le plateau et les jachères sur le glacis ont régressé respectivement de 4 % et 3 % dans le sous-bassin versant de Sama Dey.

Cela a entraîné un changement radical de son comportement hydrogéomorphologique ayant conduit à une forte augmentation du ruissellement des eaux (diminution de l'infiltration). Ce qui est à la base d'un profond changement de la structure de la brousse tigrée à l'exemple de celle du plateau de Tondi Kiboro

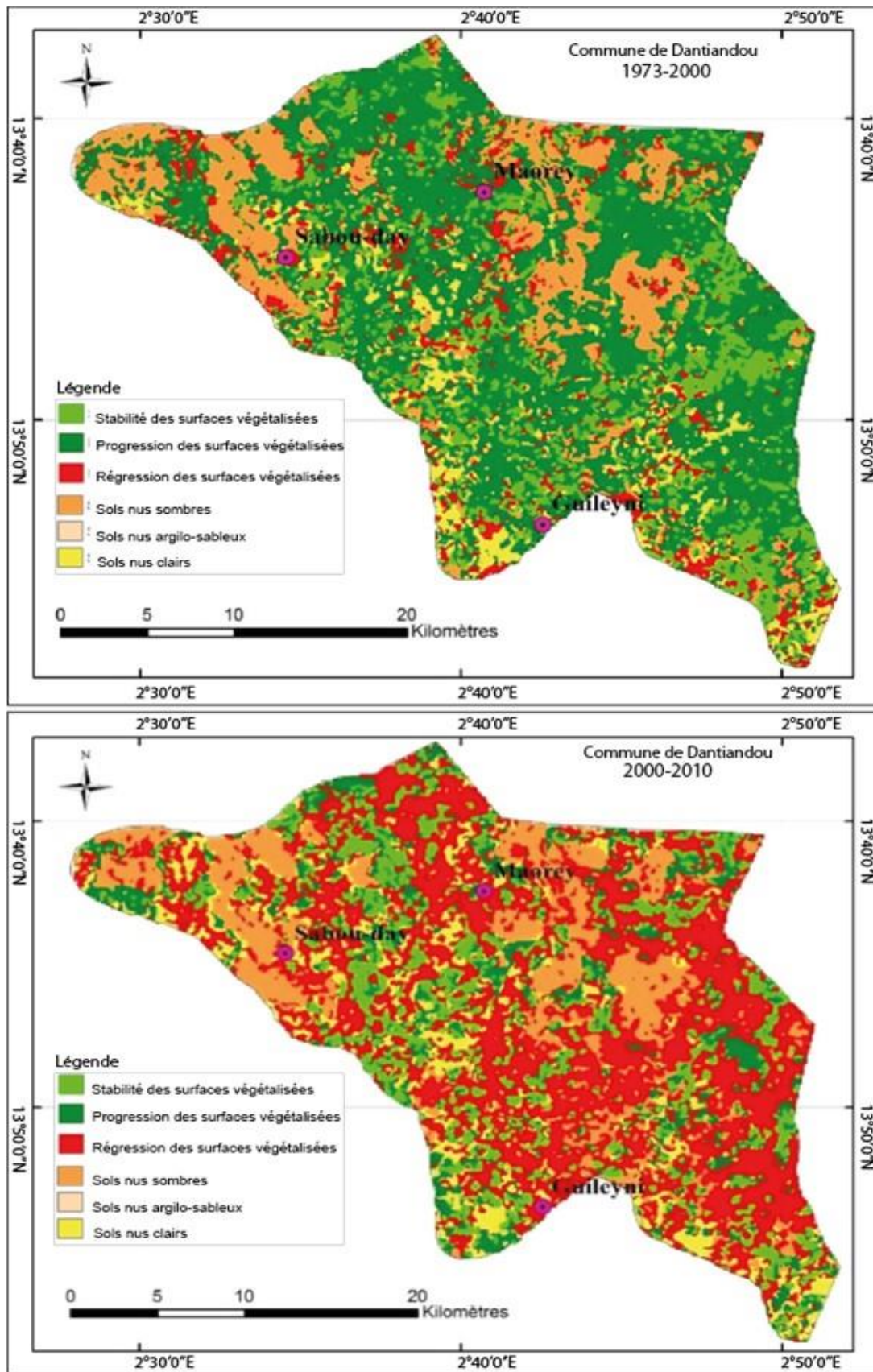


Figure 13. La spatialisation des changements d'occupation du sol sur la période 1973-2000 (en haut) et la période 2000/01-2010. Marega et al. 2021, modifiée.

## 2.5. La présentation du site expérimental de Tondi Kiboro

Le site expérimental de Tondi Kiboro (que l'on nomme TK) se trouve à 70 km à l'est de Niamey (figure 14).

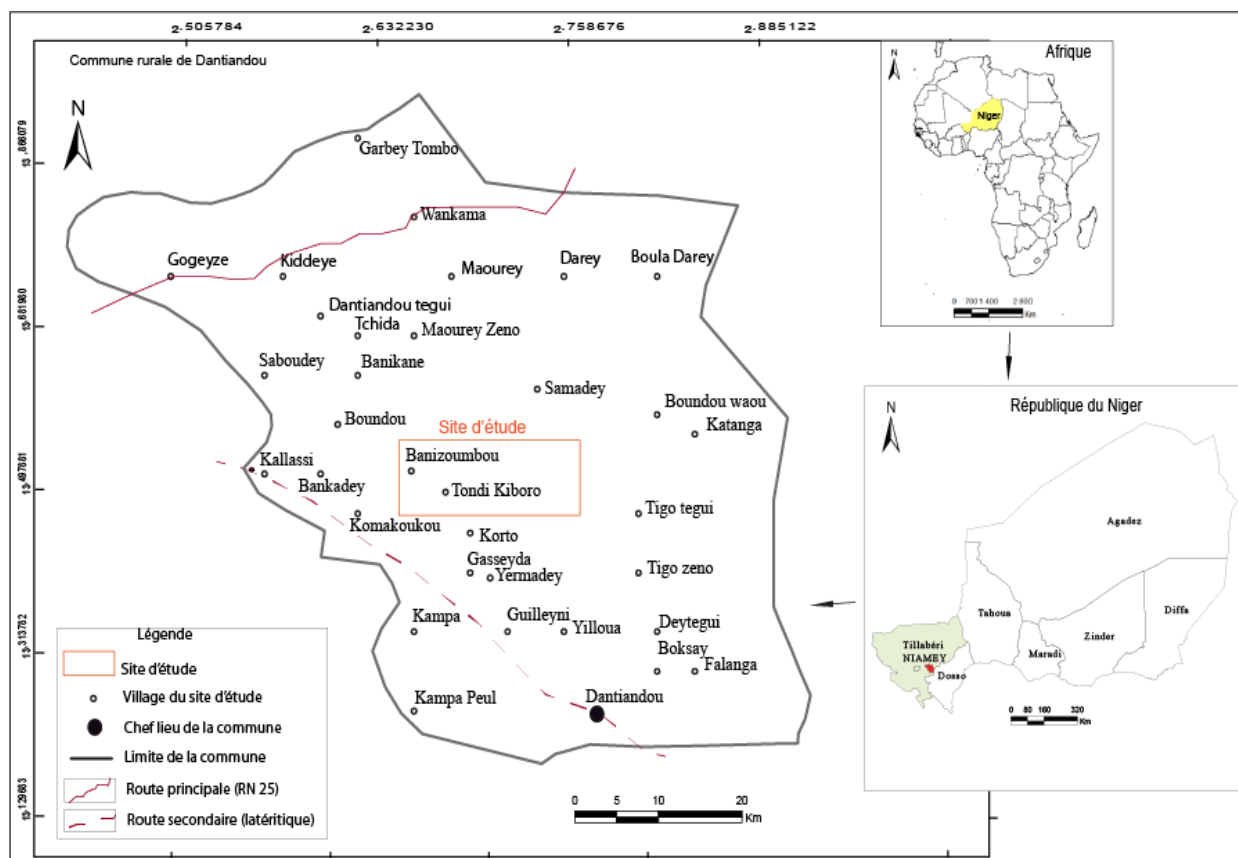


Figure 14. Le site d'étude.

La figure 14 montre la situation géographique de la zone d'étude et du site de Tondi Kiboro où s'est déroulé le suivi expérimental des techniques d'aménagement choisies pour cette étude.

### 2.5.1. La justification du choix de site de Tondi Kiboro

Le site de Tondi Kiboro (TK) demeure l'un des sites expérimentaux où le matériel de mesure de la dégradation environnementale est disponible de façon permanente. Celui-ci a été équipé durant le passage successif de plusieurs programmes de recherche, notamment HAPEX, AMMA-CATCH et JEAI-SAPALOTE. Ceci fait qu'il hérite d'un dispositif expérimental riche en matériels de

mesure parmi lesquels on peut citer les pluviomètres, les pluviographes pour le suivi pluviométrique et les stations hydrométriques et parcelles élémentaires pour le suivi hydrologique.

### **2.5.2. Le choix des surfaces expérimentales (bandes dégradées)**

Les surfaces expérimentales ont été choisies sur deux types d'unités géodynamiques présentant des caractéristiques bien distinctes. Il s'agit premièrement du revers du plateau constitué essentiellement des sols latéritiques (unité 1). Le revers du plateau représente aussi le domaine de la brousse tigrée où existent des bandes de végétation fortement dégradées. Ce sont ces dernières qui ont été échantillonnées comme surfaces expérimentales sur le plateau. Deuxièmement, il s'agit de la partie amont du glacis (unité 2) situé au pied du plateau appelé piémont dégradé ou haut glacis.

### **2.5.3. La description des bandes dégradées**

Comme nous l'avons souligné plus haut, deux types des sols dégradés ont été choisis en fonction des unités géodynamiques. Il s'agit, à titre de rappel, des surfaces dégradées de la brousse tigrée (elles sont localisées sur le plateau latéritique) et les surfaces encroûtées qui sont situées sur le haut glacis dégradé. Ces dernières sont décrites de façon respective dans le sous point ci-dessous.

#### **2.5.3.1. La caractérisation des surfaces dégradées sur le plateau à brousse tigrée**

Les surfaces étudiées sur le plateau à brousse tigrée (BT) ont été choisies, en juin-juillet 2016, à l'extrémité des bandes boisées dégradées ou en dégradation (figure 15). Les bandes boisées en dégradation sont, concrètement, des surfaces dégradées de la brousse tigrée (SDBT). Ces dernières naissent quand les bandes boisées régulières subissent les effets des sécheresses et des actions humaines (défrichage). Les SDBT se trouvent présentement dans des états avancés de dégradation. Ce qui est à l'origine de la formation des sols fortement dégradés (surfaces nues) sur lesquels presque rien ne pousse durant toute la saison pluvieuse.

La Figure 15 montre qualitativement quelques différents niveaux d'états de dégradation des bandes boisées de la brousse tigrée que nous avons pu identifier sur le plateau.

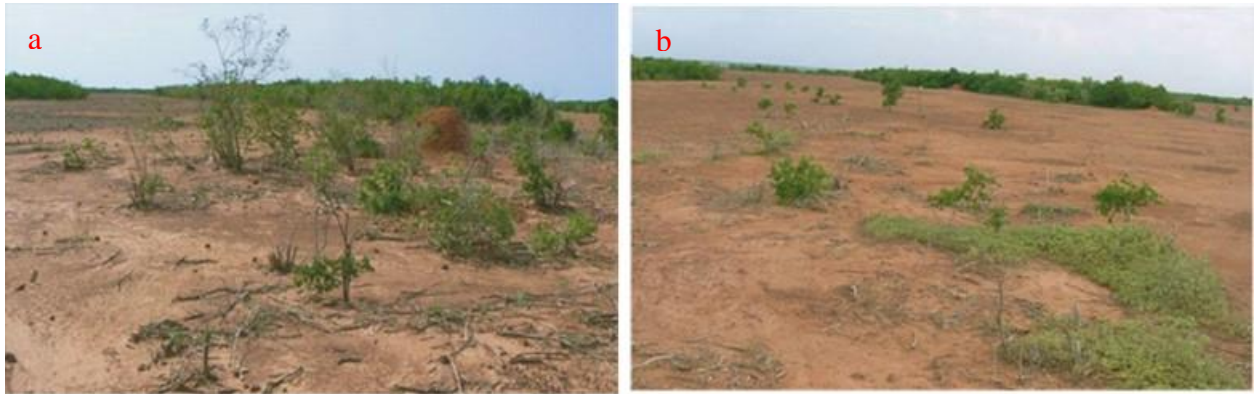


Figure 15. Les quelques exemples des bandes boisées dégradées, à gauche (a) et à droite (b) respectivement les états moyens et très dégradés de la brousse tigrée.

La Figure 15 montre que les surfaces dégradées de la brousse tigrée peuvent être classées en plusieurs niveaux de dégradation, allant d'un état intermédiaire à très dégradé, en fonction de leur densité et de leur couverture végétale. Les bandes moyennement dégradées ont un nombre moyen d'arbustes vivants, tandis que les bandes très dégradées ont un nombre d'arbustes vivants encore plus faible. Les espèces végétales les plus communes dans ces bandes sont *Combretum micranthum* G. Don et *Guiera senegalensis* JF Gmel. Pendant la saison pluvieuse, il y a un couvert herbacé maigre composé principalement de *Sida cordifolia* L., tandis que pendant la saison sèche, les bandes sont presque nues. Dans les deux cas, l'érosion hydrique et éolienne ont un impact important sur la dégradation du sol.

Les états de surface (Eds) caractéristiques de ces surfaces dégradées sont révélateurs du niveau de dégradation avancée. Malgré la faible couverture végétale, il y a la présence de croûtes structurales, d'érosion, gravillonnaires et de ruissellement sous celle-ci. Une autre caractéristique de ces surfaces dégradées est la présence abondante de petites branches et de bois morts, parfois sous forme d'arbustes morts.

Nous avons sélectionné et délimité un total de 11 parcelles expérimentales sur les surfaces dégradées de la brousse tigrée du plateau latéritique de TK en nous basant sur des critères tels que le sol dénudé, les états de surface ruisselants et l'état de dégradation. Les caractéristiques et les dimensions de huit des surfaces délimitées pour le suivi expérimental sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Les caractéristiques de 8 parcelles délimitées sur les bandes dégradées du revers de plateau latéritique.

N° de la parcelle	Sup (m <sup>2</sup> )	Espèce présente (1_2)	Nombre d'individus	Nombre de souches	Eds	État de dégradation
1	150	1_2	8_1	24	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Moyen
2	150	1	8	18	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Moyen
3	150	1_2	8_2	34	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Moyen
4	150	1_2	3_3	13	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Fort (ou élevé)
5	150	1_2	2_2	17	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Fort (ou élevé)
6	150	1_2	4_2	21	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Fort (ou élevé)
7	150	1	13	19	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Moyen
8	150	1	8	24	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Moyen
	Moyenne		8	21	St, Ero, G, V, Lit, Dec, Rui	Moyen

Espèce 1 = *Combretum micranthum* ; Espèce 2 = *Guiera senegalensis*

À l'état dégradé, plus de 90 % de la strate ligneuse appartiennent à *Combretum micranthum* contre 10 % pour *Guiera senegalensis*. Alors qu'à l'état non dégradé, les parts relatives qu'occupent ces espèces sont de 63 % et 13 % de façon respective d'après Galle et al. (1997).

### 2.5.3.2. La caractérisation des surfaces dégradées sur le haut glacis

Les surfaces dégradées sont situées sur le haut glacis encroûté, c'est-à-dire une sous-unité du glacis constitué de sable de couleur rouge et d'une steppe arbustive en dégradation avancée. Quelques arbustes rabougris et épars dont les racines sont partiellement à découvert habitent cette zone. Entre ces arbustes dégarnis, le sol reste nu et encroûté même pendant la saison pluvieuse, comme on peut le voir sur la Figure 16. Les principaux états de surface (Eds) trouvés sur ces surfaces sont les croûtes ERO, ST et G.





Figure 16. Une bande dégradée du haut glacis en début de saison pluvieuse datant de 2013 (en haut), et la même bande à la fin de la saison pluvieuse, en 2019 (en bas).

Cette figure montre que même après une période de sept ans, l'état de la végétation et de la surface du sol reste également le même.

C'est pourquoi nous avons choisi ces surfaces pour notre aménagement. En tout, nous avons délimité et suivi quatre parcelles sur le haut glacis. Les caractéristiques de ces parcelles sont présentées dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3. Les caractéristiques des surfaces délimitées sur le piémont encroûté du haut glacis.

N° de la surface délimitée	Espèce présente (1 _ 2)	Nombre d'individus	Nombre de souches	Eds	État de dégradation
1	0 _ 4	11	0	ERO, St	Fort (ou élevé)
2	2 _ 8	10	2	ERO, St	Moyen
3	1 _ 4	5	0	ERO, St	Fort (ou élevé)
4	0 _ 7	7	0	ERO, St	Moyen

Espèce 1 = *Combretum micranthum* ; Espèce 2 = *Guiera senegalensis*

### **2.5.3.3. La pertinence du choix des surfaces dégradées**

Sur le revers du plateau, le choix des SDBT s'appuie sur leur état de dégradation de sol, de comportement hydrique (capacité médiocre d'infiltration), de disponibilité de branches (brindilles), et de quelques pieds d'arbustes vivants. Ces surfaces dégradées (SDBT) ont, de ce fait, été choisies là où il faut (bande en dégradation) et au moment où elles ont perdu leur capacité de se régénérer naturellement. De ce fait, le choix a été fait avant que les SDBT ne se transforment pas en bande nue. Et que, seule une intervention humaine (aménagement) peut amorcer leur processus de régénération. En plus de cela, les sols de nos surfaces expérimentales (SDBT) sont moins durs et faciles à travailler (aménager) même avec des outils archaïques comme la houe, la pioche, etc. (communication personnelle des paysans de la zone). D'après eux, les racines de la végétation ayant vécu à ces endroits ont contribué à la perforation du sol latéritique dur, pour l'infiltration de l'eau dans le sol et la germination des graines.

Sur le haut glacis, le choix des parcelles expérimentales s'est également basé sur leur l'état de dégradation du sol, mais aussi du lien étroit qui existe entre cette unité et le revers du plateau. En effet, la fuite du ruissellement venant du plateau dégradé, franchis le talus, avant de s'organiser en écoulement concentré dans les ravines du haut glacis (piedmont). La dynamique hydroérosive provoquée par ces écoulements comporte des conséquences négatives sur les champs des paysans situés sis en aval (Souley Yero, 2012). Il est, donc, tout à fait opportun et important d'intervenir également sur cette sous-unité afin d'étudier la problématique de la réhabilitation de façon holistique, une approche vivement recommandée par M'Hiri et al. (1995) ; Dia et al., (2010) et Niang et al., (2014). Ce sont toutes ces raisons qui expliquent le choix de ces surfaces sur le haut glacis et le revers du plateau à brousse tigrée, mais aussi à l'échelle du bassin versant.

#### **❖ À l'échelle du bassin versant**

Des surfaces dégradées ont également été choisies à l'échelle du bassin versant afin d'étudier l'impact des techniques d'aménagement du point de vue hydrologique. Le bassin versant (BV) TK-IBM est localisé sur le site d'étude à Tondi Kiboro dans la figure 17. La superficie de ce BV est de 2,30 hectares. Au niveau de revers du plateau, c'est une surface dégradée d'une superficie de 787 m<sup>2</sup> qui a été délimitée en 2016. Alors que, sur le haut glacis encroûté, ce sont deux surfaces



dégradées qui ont été délimitées. L'une est située sur la berge gauche du versant et l'autre sur la berge droite du versant du BV-TK-IBM. Elles couvrent chacune une superficie de 446 m<sup>2</sup>.

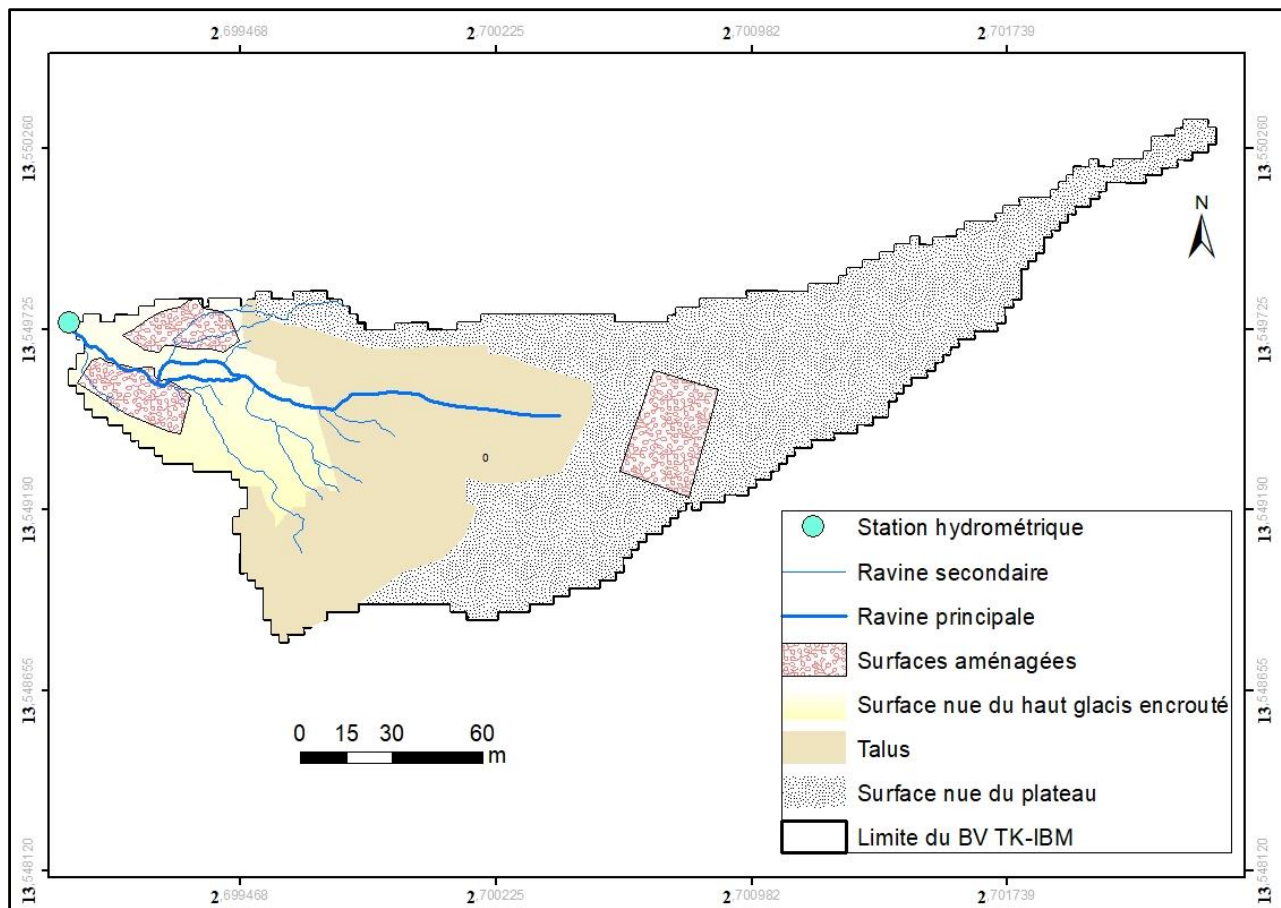


Figure 17. La présentation des surfaces délimitées et aménagées dans le bassin versant TK-IBM.

La surface dégradée délimitée sur le revers du plateau et les deux autres sur le haut glacis représentent les surfaces expérimentales. Nous avons, par la suite, mis en place un protocole d'aménagement approprié à ces surfaces dégradées dans un contexte d'écosystèmes sahéliens fragiles.

## 2.6. La présentation du protocole d'aménagement

Le protocole d'aménagement consiste à décrire les techniques diverses d'aménagement choisi. Ainsi, plusieurs techniques d'aménagement ont été appliquées et étudiées dans le cadre du présent travail. Des parcelles ont été délimitées et suivies selon un protocole d'aménagement bien précis.

### **2.6.1. La description des techniques d'aménagement étudiées**

Quatre types d'aménagement<sup>4</sup> ont été choisis pour cette étude. Il s'agit de la technique de sous-solage, de la technique de branchage et de l'association des techniques, notamment le sous-solage-ensemencement-branchage. Il faut, toutefois, noter que l'ensemencement est une technique appliquée uniquement en association avec d'autres types d'aménagement. À ce titre, la technique d'ensemencement fera aussi l'objet d'une description.

#### **2.6.1.1. La technique de sous-solage (SL)**

Communément, le sous-solage est une technique qui consiste à travailler le sol sans retournement ni mélange des horizons. Il est effectué à des profondeurs du sol allant de 0 à 40 cm, voire 80 cm par l'utilisation des outils lourds (machines), notamment les tracteurs parfois inaccessibles aux paysans (Daouze & Roger-Estrade, 2017 ; Labreuche, 2008).

Dans notre cas, la technique de sous-solage a été réalisée de façon manuelle en utilisant la pioche qui constitue un outil léger (facile à manier à la main) et accessible aux populations locales. La technique de sous-solage manuel ou simple consiste à casser la croûte superficielle dure à la surface du sol à l'aide de la pioche. Préalablement, en servant du pic de la pioche, on a perforé la surface encroûtée du sol jusqu'à environ 15 cm de profondeur. Par la suite, les mottes de terre qui apparaissent lors de cette opération sont ameublies à l'aide de la partie large de la pioche pour préparer l'étape d'ensemencement de la parcelle.

Durant la réalisation du sous-solage, on évite d'endommager tous les arbustes présents dans la parcelle et les morceaux de bois morts déjà disponibles doivent être laissés sur place, car ils sont supposés jouer un rôle charnier sur le plan de la récupération du sol. Mais, malgré la présence de ces branchettes, la parcelle est considérée comme aménagée exclusivement par la technique de sous-solage simple (SL). La figure 18 illustre la procédure de réalisation de la technique du sous-solage simple sur les bandes de végétation dégradée du plateau latéritique et sur les surfaces encroûtées du glacis. Techniquement, trois parcelles de 150 m<sup>2</sup> peuvent être entièrement sous-

---

<sup>4</sup> Tout au long de ce document, l'emploi du terme aménagement renvoie tantôt à la réalisation du sous-solage manuel, tantôt à l'éparpillement de branchettes (branchage) et/ou de graines (ensemencement) et tantôt le tout c'est-à-dire l'association de ces trois techniques.

solées manuellement par quatre individus pendant au moins une journée de travail (entre 8 à 16 heures).



Figure 18. La réalisation de la technique du sous-solage des surfaces dégradées du plateau (en haut) et du haut glacis (en bas).

En outre, les outils utilisés, pour la délimitation de ces parcelles et la réalisation du sous-solage manuel des sols, sont présentés dans la figure 19.



Figure 19. Les outils de réalisation du sous-solage.

Après la réalisation du sous-solage, les parcelles ont subi un ensemencement avec des graines des essences végétales collectées localement.

### 2.6.1.2. De la collecte des graines à l'ensemencement des parcelles

Comme il y a peu d'arbustes sur les surfaces dégradées, il y a très peu de graines produites pour régénérer la végétation. C'est pourquoi la technique d'aménagement par ensemencement est nécessaire pour compléter ce manque. Les graines ont été collectées dans des endroits environnants à la parcelle (bandes boisées régulières) et dans des endroits dépressionnaires (bas-fonds) où la végétation est en bon état. Deux campagnes de collecte des graines ont été effectuées en janvier 2016 et février 2017, exclusivement pour des espèces locales telles que *Guiera senegalensis* JF Gmel et *Combretum micranthum* g. Don, qui sont les plus courantes sur les plateaux latéritiques et les glacis de l'ouest-nigérien. Les graines ont été supprimées par ramassage à la surface du sol ou par cueillette. Le mode de collecte se fait par ramassage à la surface du sol appelé du « tout-venant », mais aussi par la cueillette (figure 20). Toutes les graines sont collectées sans distinction. Le matériel (graines) collecté a été stocké dans des sacs. Ces graines n'ont subi aucun traitement, mais ont été stockées dans une chambre construite sur le site d'étude.



Figure 20. La collecte de graines d'espèces végétales au début de la saison sèche. La photo à gauche expose le mode de cueillette des graines, alors que sur les deux photos, au milieu et à droite, on voit respectivement les graines de *Combretum micranthum* et de *Guiera senegalensis*.

Les graines de *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum* ont été choisies pour l'aménagement car ce sont des espèces qui poussent bien sur les sols superficiels des plateaux latéritiques et sont également utilisées par les populations locales pour la médecine traditionnelle et l'artisanat. Le choix d'utiliser des espèces locales contribue à la préservation de la biodiversité dans une zone



sahélienne fragile, c'est-à-dire en prenant en compte les objectifs de l'agroécologie (Niang et al., 2014).

Pour la technique d'ensemencement, les graines ont été dispersées manuellement de manière uniforme sur l'ensemble des parcelles aménagées. Environ  $1,92 * 10^6$  et  $1,38 * 10^6$  de graines de *Gierra senegalensis* et de *Combretum micranthum* ont été semées sur les parcelles, en utilisant la formule 1 pour déterminer la quantité de graines nécessaires.

$$\text{Quantité des graines} = \frac{\text{Poids total de graines ensemencées} * 100}{\text{Poids moyen de 100 graines}} \quad \text{Formule 1}$$

100 est le nombre de graines comptées une à une (figure 21). En effet, pour 47 sachets de graines pesés, le poids respectif moyen de 100 graines est de 2,6 et 2,1 grammes pour *Gierra senegalensis* et *Combretum micranthum* (tableau 4).

Tableau 4. Poids moyen de 100 graines de *Gierra senegalensis* et *Combretum micranthum*.

	Nombre de sachets pesés	Poids moyen/sachets (gramme)	Nombre total de graines ensemencées
<i>Guiera senegalensis</i>	47	2,6	1 920 000
<i>Combretum micranthum</i>	47	2,1	1 380 000



Figure 21. Une séance de comptage de graines.

Nous expérimentons la restauration de surfaces dégradées sur le revers du plateau et sur le haut glacis en ajoutant des graines. Nous n'avons pas trié les graines selon leur qualité car ce n'est pas le point central de cette expérimentation. Nous nous intéressons plutôt à des indicateurs qualitatifs tels que la date de semis, les jours pluvieux, la date d'apparition des premières racines et la date d'apparition des premières pousses.

Après l'ensemencement, nous éparpillons également des branches sur la parcelle aménagée pour améliorer les conditions hydriques du sol et favoriser le développement des jeunes plantes issues de la germination des graines.

### **2.6.1.3. La technique de branchage**

La technique de branchage est un mode traditionnel de gestion des terres agricoles que nous avons utilisé dans cette étude. Nous avons choisi la zone de sénescence des bandes boisées de la brousse tigrée comme zone de prélèvement de branches car elle contient une quantité considérable de bois mort. La quantité de branches ramassées a été pesée, en utilisant une balance 20 kg de capacité, avant d'être éparpillée sur la parcelle, contribuant ainsi à augmenter la quantité de branches disponibles naturellement sur la parcelle (figure 22). Le ramassage de branchettes a été fait tout en évitant de tout collecter.



*Figure 22. Le pesage des branchettes mortes (à gauche) et leur épandage à l'échelle de la parcelle sous-solée (à droite).*

#### **2.6.1.4. L'association du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B)**

C'est une combinaison simultanée de ces trois techniques décrites ci-haut à savoir le sous-solage, l'ensemencement et le branchage. Et il est important de signaler qu'il s'agit d'une stratégie d'aménagement pratiquée assez souvent dans le pays pour rendre plus efficaces les aménagements. C'est dans cette optique que ces trois techniques (sous-solage, ensemencement et branchage) ont été combinées et testées.

#### **2.6.2. La description des surfaces aménagées et témoin**

On dispose de trois types de surfaces expérimentales à savoir les parcelles exclusivement aménagées par le sous-solage, par le branchage et par combinaison de sous-solage-ensemencement-branchage. À côté de celles-ci, des surfaces témoins ont été installées (délimitées). Toutes les parcelles (aménagées et témoins) ont été délimitées en utilisant des piquets repères en bois ou en pierre marquée par la peinture, sauf sur le glacis où une parcelle a été clôturée (SL-E-B 5) avec du grillage. Leurs coordonnées géographiques ont été relevées à l'aide d'un GPS de type Garmin. Les parcelles aménagées et leurs témoins ont une superficie d'environ 150 m<sup>2</sup> (15/10 m) sur le revers du plateau. Par contre, sur le glacis encroûté, la superficie des parcelles est d'environ 500-600 m<sup>2</sup>.

##### **2.6.2.1. Les surfaces aménagées par la technique de sous-solage**

Le tableau 5 synthétise le protocole d'installation de surfaces aménagées de 150 m<sup>2</sup> par l'application exclusive de sous-solage simple (SL) sur le revers du plateau. Le dispositif d'aménagement est composé de trois surfaces de sous-solage (SL I, SL II et SL III). Ces trois surfaces ont été sous-solées (installées) le 09 juillet 2016. Mais, étant donné que notre protocole de recherche vise à étudier l'efficacité de sous-solage par l'effet du remaniement des surfaces (parcelle), la parcelle SL I a été sous-solée une seule fois depuis son installation en 2016. Tandis qu'au niveau les parcelles SL II et SL III, le sous-solage a été repris (remaniement) respectivement une fois en 2017 et deux fois en 2017 et 2018. L'objectif d'application de ce protocole est de

comparer la durabilité de l'impact du sous-solage en fonction du remaniement (reprise du sous-solage) ou sans remaniement<sup>5</sup> du sol de chaque parcelle.

Tableau 5. Les différentes parcelles de sous-solage simple et les dates de reprise du sous-solage (remaniement).

Parcelles d'expérimentation	Superficie (m <sup>2</sup> )	Dates du sous-solage et de reprise du sous-solage		
		09 juillet 2016	10 juillet 2017	18 juillet 2018
SL I	150	*	×	×
SL II	150	*	*	×
SL III	150	*	*	*

Les signes \* et × signifient respectivement le nombre de fois que la parcelle est aménagée et l'absence de remaniement.

La date du 09 juillet 2016 correspond à la date de l'installation des trois parcelles alors que les dates du 10 et 18 juillet correspondent aux dates de reprise du sous-solage des parcelles.

Sur le glaciis encroûté, une seule parcelle de 446 m<sup>2</sup> a été délimitée et aménagée exclusivement par la technique du sous-solage le 28 juillet 2017 (parcelle SL-E-B 4). La figure 23 illustre l'état des parcelles sous-solées situées juste après l'aménagement sur le plateau latéritique et sur le haut glaciis encroûté.



Figure 23. L'illustration des parcelles aménagées exclusivement par sous-solage sur plateau latéritique (à gauche) et sur le haut glaciis encroûté (à droite).

La parcelle SL-E-B 4 est située sur la rive droite du BV TK-IBM.

<sup>5</sup> L'expression « sans de remaniement » signifie que la **parcelle non remaniée** a été uniquement sous-solée en 2016, cependant, le sous-solage n'a pas été repris en 2017 et en 2018.



### 2.6.2.2. Les parcelles aménagées par la technique de branchage

L'aménagement par la technique de branchage a été effectué en mai 2017. Au total deux parcelles ont été aménagées par branchages uniquement. La figure 24 montre l'exemple d'une parcelle aménagée par la technique de branchages sur le plateau. Sur les deux parcelles branchage I et II, environ 150 et 200 kg de branchettes supplémentaires ont été éparpillées de façon respective.



Figure 24. La parcelle de branchage II aménagée sur le revers du plateau uniquement par la technique de branchage.

Signalons que sur le haut glacis aucune parcelle n'a été uniquement aménagée par la technique de branchage.

### 2.6.2.3. Les parcelles aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage

Sur le plateau latéritique, le dispositif est composé de trois parcelles de 150 m<sup>2</sup> chacune. La même procédure de réaménagement des parcelles a été ici aussi respectée. Le tableau 6 présente cela.

Tableau 6. Les différentes parcelles expérimentales SL-E-B et les dates de leur réaménagement.

Parcelles d'expérimentation	Superficie (m <sup>2</sup> )	Dates d'aménagement et de reprise du sous-solage		
		10 juillet 2016	10 juillet 2017	18 juillet 2018
SL-E-B I	150	*	×	×
SBEB II	150	*	*	×
SL-E-B III	150	*	*	*

Les signes \* et × signifient respectivement le nombre de fois que la parcelle est aménagée et l'absence de réaménagement.

La parcelle SL-E-B I est aménagée une fois en 2016, la parcelle SL-E-B II deux fois (en 2016 et 2017) et, enfin, la parcelle SL-E-B III a été sous-solée trois fois (2016, 2017 et 2018). Mais, à la différence des parcelles aménagées uniquement par sous-solage (SL), à ce niveau, l'aménagement des surfaces SL-E-B est suivi immédiatement de l'ensemencement et de branchage (figure 25). En effet, chacune des trois parcelles à savoir SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III a reçu une dose de 6 kg de graines de *Combretum micranthum* et de *Gierra senegalensis*, soit 18 kg de graines de combrétacées. En plus de cela, chaque parcelle a reçu environ 200 kg de branchettes (+ environ 65 kg déjà disponibles sur la parcelle), soit environ 265 kg.

Il faut, cependant, noter que les opérations d'ensemencement et de branchage ont été appliquées une seule fois pendant la durée de l'expérimentation.



*Figure 25. L'illustration d'une parcelle aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.*

Par ailleurs, le dispositif installé sur le glacis est constitué de deux parcelles SL-E-B. La première parcelle (figure 26) a été aménagée le 28 juillet 2017 alors que la deuxième a fait l'objet d'un réaménagement le 23 juillet 2017. Cette dernière a, en effet, été aménagée par sous-solage simple et clôturée avec du grillage depuis 2013. Mais, après trois ans de suivi régulier, il a été constaté un

réencroûtement de la surface du sol de cette parcelle (Boubacar Na-Allah et al. 2017). C'est ce qui a justifié l'opération de réaménagement de cette parcelle par sous-solage et branchage.



*Figure 26. Les parcelles aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis encroûté. En haut, la parcelle SL-E-B 4 (non clôturée) et en bas, la parcelle SL-E-B 5 (clôturée).*

La parcelle SL-E-B 4 est placée sur la rive gauche du BV TK-IBM. Par ailleurs, l'ensemble de ces surfaces dégradées aménagées à l'échelle du BV TK-IBM couvre environ 9 %, soit 6 % occupé de l'aménagement par association (SL-E-B) et 3 % par, uniquement, le sous-solage de la surface totale dudit BV aménagé.

#### **2.6.2.4. Les parcelles témoins**

Ce sont au total quatre parcelles qui ont été choisies comme parcelles témoins. Sur le plateau, deux parcelles ont été déterminées en 2016 et une autre en 2017. Au niveau du haut glacis, c'est une seule parcelle qui a été déterminée depuis 2016. La figure 27 illustre deux parcelles témoins choisies et situées sur les deux unités géodynamiques (plateau et glacis).





Figure 27. Les parcelles témoins sur le haut glacis encroûté (a) et sur le revers du plateau (b).

Comme on peut l'observer sur cette figure, les parcelles témoins sont des surfaces dégradées ou en dégradation sur le revers du plateau à brousse tigrée et sur le haut glacis à broussaille. Elles représentent les situations de références de l'état des surfaces dégradées étudiées. Elles n'ont subi aucune opération d'aménagement. Elles sont donc intactes et témoignent de l'état de la dégradation de la brousse tigrée et de la broussaille. Cet état se manifeste par la présence de la végétation rabougrie (le plus souvent avec « pied déchaussé ») et un sol dégradé encroûté en surface.

La plupart des surfaces aménagées suivies durant toute la durée de l'expérimentation ont été installées en juillet 2016. Seul un petit nombre de parcelles a été installé en mai et en juin 2017 et 2018 sur le plateau, avant le démarrage effectif de la saison pluvieuse. Il s'agit de trois (3) parcelles de type SL-E-B, et trois (3) autres de type SL. Elles ont subi le même type de traitement que les surfaces suivies et décrites ci-haut. Mais, ce sont des surfaces de répétition du protocole de recherche appliquée sur le plateau.

Pour évaluer les performances de notre démarche de réhabilitation de la brousse tigrée et de la steppe arbustive, nous avons mis en place un dispositif de mesure de trois paramètres physiques essentiels à savoir le ruissellement-érosion, l'humidité du sol et la régénération de la végétation.

## **Conclusion**

Du point de vue géologique, la zone d'étude se situe dans le bassin sédimentaire des Iullemeden caractérisé par son endoréisme à cause des dépôts sableux importants. Sa géomorphologie est constituée de trois principaux ensembles à savoir les plateaux latéritiques (occupés par la brousse tigrée), les glacis (steppe arborée) et les bas-fonds où les arbres sont plus grands. Le climat est typiquement sahélien et est soumis à la forte variabilité de la mousson ouest-africaine. Le dernier grand évènement connu de cette variation climatique au Sahel est la sécheresse des années 1970 et

1980. En plus, il y a aussi la recrudescence des forts évènements pluvieux causant une augmentation du ruissellement et de graves inondations dans les habitations (villages et villes) et surtout dans les champs. Par ailleurs, la population connaît une croissance démographique avec des densités humaines élevées (+ 50 habitants/km<sup>2</sup>). D'où la forte pression sur les ressources naturelles, notamment le sol, la végétation et l'eau. De ce fait, le fonctionnement naturel des écosystèmes est perturbé sous la double pression humaine (défrichement) et climatique. C'est l'exemple spécifique des formations végétales dégradées dans la commune rurale de Dantiandou en l'occurrence sur les plateaux latéritiques (brousse tigrée) et le haut glacis du village de Tondi Kiboro (steppe arbustive). Les surfaces délimitées pour l'expérimentation sont les bouts des surfaces dégradées de la brousse tigrée et les surfaces nues et encroûtées du haut glacis. Ces surfaces sont aménagées par les trois techniques à savoir le sous-solage simple, le branchage simple et la combinaison du sous-solage-ensemencement-branchage.

Le cadre méthodologique appliqué pour suivre et évaluer l'efficacité de ces techniques dans la réhabilitation de la brousse tigrée et de la steppe arbustive est décrit dans le chapitre suivant.

## Chapitre 3. Le matériel et méthodes de mesures des paramètres étudiés

---

*Ce chapitre décrit les matériels et méthodes de mesures du ruissellement, de l'infiltration et de la végétation. Il dresse une description détaillée du dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion notamment les parcelles expérimentales, puis la station hydrométrique du bassin versant TK-IBM pour le suivi des écoulements. Ensuite, il expose le protocole de mesure d'humidité du sol par la sonde à neutrons et par mesure gravimétrique. Ce chapitre décrit également l'approche adoptée pour mesurer l'impact des différents types d'aménagements sur la régénération des sols dégradés du plateau à brousse tigrée et du haut glacis. Les paramètres mesurés sont la composition floristique, la densité, la hauteur et le taux de couvert végétal dans les parcelles aménagées et le témoin.*

---

### 3.1. Les mesures du ruissellement

#### 3.1.1. La description des outils de mesure du ruissellement

Les outils de mesure du ruissellement sont constitués des parcelles expérimentales et d'une station hydrométrique.

##### 3.1.1.1. Les parcelles expérimentales de ruissellement

Des parcelles expérimentales<sup>6</sup> de type Wischmeier d'une superficie d'un mètre carré (1 m<sup>2</sup>) ont été installées dans les surfaces aménagées afin de suivre l'évolution du ruissellement. Elles sont orientées parallèlement à la pente générale du terrain. Les bordures de ces parcelles aménagées et témoins ont été délimitées artificiellement par des murets construits à l'aide de ciment (figure 28). Ces murets érigés en bordure, de 10 cm de hauteur, sont également fixés dans le sol à 10 cm de profondeur. Chacune de ces parcelles élémentaires de ruissellement est équipée d'une goulotte qui collecte les eaux de ruissellement évacuées par un partiteur en PVC pour être récupérées par un demi-tonneau installé en aval. Ce demi-tonneau (d'une capacité de 100 litres) est hermétiquement

---

<sup>6</sup> Pour éviter de confondre le terme de parcelle, notamment les parcelles témoin ou aménagée (150 m<sup>2</sup>) et parcelles expérimentales du ruissellement (de 1 m<sup>2</sup>), nous désignons désormais ces dernières par le terme de parcelle élémentaire du ruissellement ou parcelle de ruissellement tout court.

fermé avec un plastique afin d'éviter toute pénétration directe des eaux de pluie. C'est un système de mesure hydrologique inspiré des travaux de Fournier (1954).

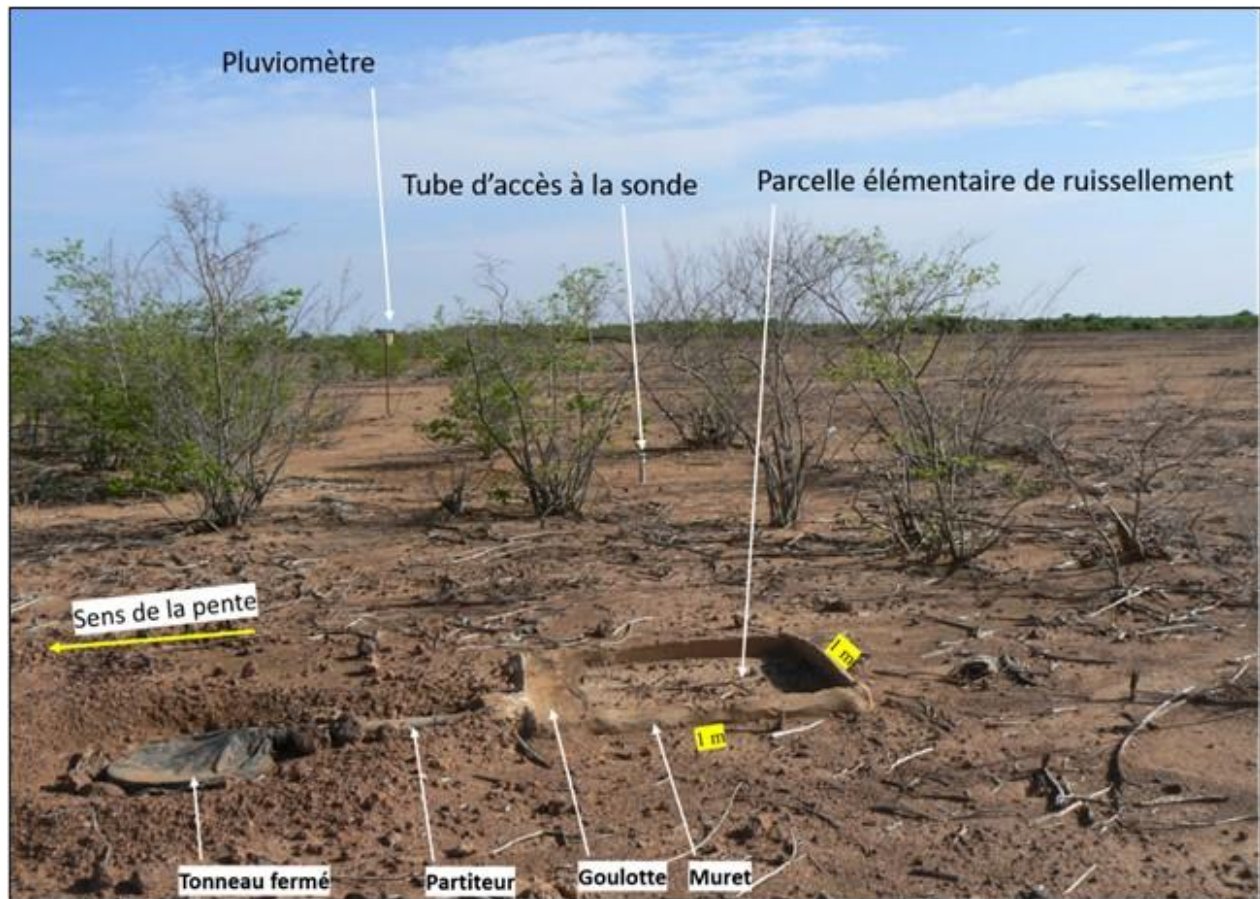


Figure 28. La représentation d'une parcelle de ruissellement de 1 m<sup>2</sup>, et du dispositif de mesure hydroclimatique, installée dans la parcelle SL I sur le revers du plateau.

L'observation de cette figure montre les parcelles élémentaires de ruissellement (de 1 m sur 1 m) placées à l'intérieur des surfaces témoins ou aménagées (cf. § 2.6.2).

Notons que c'est la même technique d'aménagement appliquée dans les surfaces aménagées de 150 m<sup>2</sup> qui a été appliquée dans les parcelles élémentaires de 1 m<sup>2</sup>.

Le choix de cette échelle d'observation de 1 m<sup>2</sup> se justifie, d'une part, par la forte aptitude des plateaux latéritiques au ruissellement et, d'autre part, par la difficulté de la mise en place d'équipement pour recueillir les eaux collectées. En effet, la présence d'une cuirasse dure sur le revers du plateau rend complexe, voire impossible le creusement des fosses au-delà de 60 cm. Cela voudrait dire que l'installation de grandes parcelles élémentaires de taille conventionnelle (10 ou

100 m<sup>2</sup>), serait difficile et coûteuse. Partant de cela, nous avons opté à l'installation des parcelles élémentaires des dimensions réduites, autrement dit ayant une capacité de production de ruissellement moindre par rapport aux parcelles de grande taille (100 m<sup>2</sup>). De surcroît, leur installation est facile et de moindre coût.

Ce dispositif expérimental de mesure de ruissellement est identique que ce soit sur le revers de plateau ou sur le haut glacis. Mais la capacité des tonneaux installés sur le haut glacis est de 200 litres.

Globalement, seize (16) parcelles élémentaires (P) ont été installées, soit onze (11) parcelles sur le plateau et cinq (5) parcelles sur le haut glacis. Le tableau 7 présente l'ensemble des parcelles élémentaires de ruissellement.

*Tableau 7. La présentation des parcelles de ruissellement par technique d'aménagement. Chaque parcelle du ruissellement fait partie intégrante d'une surface suivie (aménagée ou témoin).*

	Plateau				Glacis		
<b>Technique d'aménagement</b>	<b>SL</b>	<b>SL-E-B</b>	<b>Branchage</b>	<b>Témoin</b>	<b>SL</b>	<b>SL-E-B</b>	<b>Témoin</b>
<b>Code Pr</b>	P1, P5 & P8	P2, P4 & P7	P11 & P12	P3, P6 & P13	P16	P9, P10 & P14	P15

*Pr = parcelle élémentaire de ruissellement. Les techniques d'aménagement font référence aux parcelles aménagées par sous-solage (SL), par sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B), par branchage ([cf. § 2.6.1](#)).*

Leur emplacement est choisi sur la base du critère de représentativité en matière d'homogénéité d'état de surface et de pente. En outre, nous présentons la localisation géographique de tout le dispositif de mesure hydroclimatique constitué des parcelles élémentaires du ruissellement, des tubes d'accès à la sonde à neutrons, des pluviomètres à lecture directe et d'un pluviographe (figure 29).



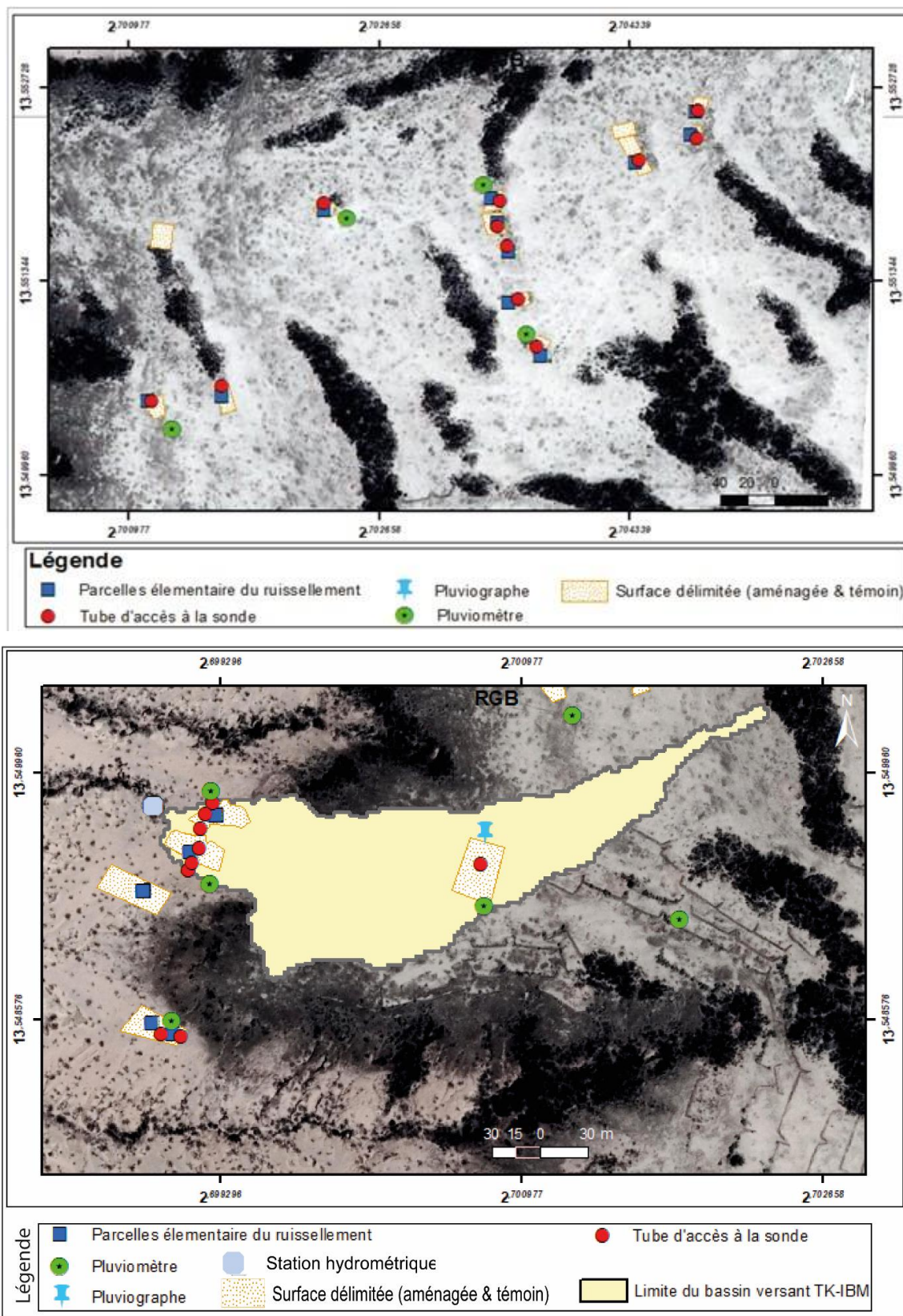


Figure 29. La présentation générale du dispositif de mesure hydroclimatique. Le dispositif de mesure installé sur le revers du plateau (en haut) et à l'échelle du BV TK-IBM (en bas).

### 3.1.1.2. La station hydrométrique

La station hydrométrique a été installée à l'aval du bassin versant TK-IBM (figure 30). Cette station a été utilisée pour mesurer la variation des cotes d'eau à l'exutoire du BV.



Figure 30. La station hydrométrique installée à l'exutoire du bassin versant TK-IBM.

La station TK-IBM a été installée en 2016. Elle est équipée d'une section de mesure de 70 cm, d'une échelle limnimétrique et d'un Thalimèdes à flotteur de marque OTT (limnigraphe). Ce dernier permet d'obtenir la variation des niveaux d'eau de façon automatique pendant chaque minute. La variation des niveaux d'eau a été suivie pendant la situation avant-aménagement, en 2016 et la situation après-aménagement (2017 à 2021).

En plus du limnigraphe automatique, l'échelle limnimétrique installée permet de lire manuellement la variation des hauteurs d'eau à un pas de temps donné.

### 3.1.1.3. Le dispositif de mesure de la pluie sur le site d'étude

Le matériel de mesure de la pluie est composé de neuf pluviomètres à lecture directe et un pluviographe à auget basculeur avec enregistrement automatique (mémoire) installé sur le revers

du plateau. Les pluviomètres sont installés à côté des parcelles du ruissellement (figure 31), mais aussi repartis à l'échelle du bassin versant. Ces outils sont utilisés pour mesurer précisément la quantité de pluie tombée. Cette dernière permet ultérieurement de connaître les lames ruisselées et d'apprécier la variation des niveau d'eau à l'échelle du BV.



Figure 31. Les outils de mesure de la pluie : pluviographe, à gauche (a) et pluviomètre à lecture directe, à droite (b) installés sur le site d'étude.

#### **3.1.1.4. Le fonctionnement du dispositif expérimental de mesures**

##### **❖ Le fonctionnement des parcelles de ruissellement**

Les observations de terrain ont permis d'assurer un fonctionnement satisfaisant de l'ensemble du dispositif de mesures installé sur le site d'étude. Cependant, on peut noter quelques dysfonctionnements des parcelles de ruissellement en 2016, notamment les débordements de celles-ci pouvant s'expliquer par les événements pluvieux forts, intenses et de quantité considérable ( $> 40 \text{ mm}$ ).

##### **❖ Le fonctionnement de la station hydrométrique**

La station hydrométrique a connu un dysfonctionnement lié, d'une part, au flotteur qui se bloque pendant l'écoulement, ce qui peut rendre les valeurs des cotes enregistrées biaisées et, d'autre part, au problème technique de l'enregistrement des données par l'appareil (Thalimèdes). À cela, s'ajoutent parfois les retards accusés pendant le curage de la station hydrométrique après chaque pluie. Il s'agit d'un suivi qui nécessite régulièrement la présence du releveur sur le terrain. Une



station hydrométrique doit toujours être curée immédiatement après chaque pluie afin de ramener le flotteur à un niveau zéro, puis régler le limnigraphe au niveau. Au cas échéant, le flotteur peut être bloqué à une cote donnée pendant plusieurs heures. Les cotes enregistrées pendant cette période peuvent être assimilées à celles liées aux écoulements, ce qui constitue une erreur de plus. Outre cela, l'état vétuste de ce thalimède en service depuis 2005 pourrait être aussi la cause de certains dysfonctionnements.

Pour toutes ces raisons, nous n'utilisons, dans ce travail, que les quelques données événementielles où la station a pu fonctionner correctement.

### **3.1.2. Les mesures du ruissellement et de l'érosion sur parcelles expérimentales**

Le protocole de mesure du ruissellement consiste tout d'abord à constater l'état de la parcelle élémentaire après chaque événement pluvieux. Cela passe avant tout par l'inspection de l'état du tonneau pour savoir s'il est fermé ou ouvert. Par la suite, l'ouverture est engagée avec tout le grand soin possible afin d'éviter tout apport extérieur (eau et sédiment). Puis, la hauteur d'eau recueillie dans le tonneau est mesurée par l'utilisation d'un mètre ruban. Ensuite, deux échantillons sont prélevés par parcelle expérimentale après chaque pluie afin de déterminer la concentration de la charge sédimentaire (érosion). Mais, avant le prélèvement, on agite le volume d'eau dans le tonneau pour prélever un échantillon homogène en termes des particules décapées et en suspension dans l'eau (MES). Ces échantillons sont transvasés dans des bidons (de 1 litre) numérotés qui sont ensuite acheminés au laboratoire pour traitement. La numérotation permet aisément de les identifier pendant le traitement. Tout ceci est noté sur une fiche d'observation terrain (annexe 1.1).

Le tonneau est par la suite vidé et curé manuellement. Pour cette opération, on associe souvent les paysans moyennant une rémunération forfaitaire. L'opération de vidange se termine par un essuyage propre du fut pour la prochaine pluie. Il est enfin refermé hermétiquement à l'aide d'un plastique et d'un caoutchouc.

### **3.1.3. Le suivi du ruissellement et de l'érosion à l'échelle du BV**

Les mesures du ruissellement et de l'érosion à l'échelle du bassin versant TK-IBM ont été faites selon deux états. L'état 1, qui correspond à l'état témoin, sans aménagement du bassin versant, en 2016. L'état 2, qui correspond à l'année où le bassin versant a été aménagé à partir de 2017. Durant

cette période de mesure, trois types de données ont été collectées à savoir, le jaugeage, les cotes (hauteurs d'eau) et le transport des matières en suspension (MES).

Les cotes d'eau sont obtenues après chaque pluie par le limnigraphe automatique (Thalimèdes). Les mesures de MES réalisées à l'exutoire du BV ont été conduites lors de l'écoulement et, ce durant toute la saison pluvieuse. Le principe de mesure consiste à utiliser deux (2) perches et deux (2) bidons numérotés pour prélever des échantillons dans la section d'écoulement de la ravine en se positionnant sur une passerelle comme l'indique la figure 32. L'une des perches est plongée au fond du lit de la ravine pour mesurer les particules charriées (charge de fond), alors que la deuxième est tenue suspendue à une hauteur choisie dans le courant d'eau. Ces deux opérations s'effectuent concomitamment pendant 30 secondes et sont répétées après chaque 2 à 5 minutes. La première mesure s'effectue au moment où la cote d'eau lue sur l'échelle limnimétrique atteint 15 cm, de telle sorte que la perche puisse être totalement submergée.



Figure 32. L'illustration de la méthode de prélèvement des échantillons d'eau pour la mesure des matières en suspension (MES) à la station de jaugeage du bassin versant TK-IBM.

Des jaugeages ont été également effectués sur cette station. Mais, les données de ces jaugeages au moulinet n'ont pas été exploitées à cause de l'inadaptation du moulinet utilisé pour le jaugeage de petites ravines à écoulement temporaire uniquement pendant l'évènement pluvieux. Et aussi à cause du nombre des mesures de jaugeages effectués, jugé insuffisant pour pouvoir construire une courbe de tarage de la station hydrométrique.

### 3.1.4. Les mesures de la pluie

La mesure du ruissellement et cette de MES sont immédiatement suivie du relevé des hauteurs d'eau enregistrée par les pluviomètres. Le relevé se fait par lecture directe (de façon) minutieuse de la quantité de pluie enregistrée par le pluviomètre. Quant au pluviographe, il est relevé mensuellement par une équipe des techniciens de l'IRD.

### 3.1.5. Le relevé des états de surface et levé topographique

Un relevé initial des états de surface (Eds) a été effectué dans les parcelles élémentaires de 1 m<sup>2</sup> de superficie durant les saisons 2016 et 2018. Cette caractérisation des Eds a été couplée au levé de la microtopographie pour déterminer la pente de chaque parcelle (figure 33).



Figure 33. Les outils utilisés pour les mesures de la microtopographie (a, b & c) et des états de surface (d).

Avec a, b, c et d indiquant respectivement le chantier de niveau, le trépied, la mire graduée et la grille posée dans la parcelle élémentaire du ruissellement.

La figure 33 illustre le matériel utilisé pour la caractérisation des Eds et le levé de la microtopographie. Il est composé d'une grille d'un mètre carré (d), d'une barre en bois, d'un trépied (c), d'un niveau de chantier de modèle Wild NK 10 et d'une mire graduée (b). La grille est subdivisée en 100 petits carrés de 10 cm<sup>2</sup> chacun. Elle s'étend entièrement sur la surface d'une parcelle élémentaire du ruissellement de 1 m<sup>2</sup>.

La réalisation de relevés des états de surface consiste, à pointer un petit bâton (en bois) au milieu de chacun des carrés de la grille, à observer et à identifier le type d'état de surface présent dans celui-ci. Subséquemment, la mire est positionnée au même endroit (c'est-à-dire dans chaque carré de la grille) pour la lecture de la microtopographie à l'aide d'un niveau. Toutes ces informations sont notées sur une fiche d'observation d'état de surface présentée en annexes 1.2, 1.3 et 1.4. Ces deux mesures qui s'effectuent de façon concomitante et répétée sur l'ensemble de la grille jusqu'à couvrir toute la parcelle concernée. Au total, 10 transects sont effectués, soient 100 observations à l'échelle de la surface d'une parcelle élémentaire du ruissellement.

Il faut souligner que la caractérisation des états de surface a été effectuée préalablement à l'aménagement des parcelles de ruissellement. Mais en 2019, ces deux relevés ont toutefois été repris dans le but de suivre l'évolution des états de surface.

À l'échelle du BV, le relevé topographique couplé aux observations sur le terrain a permis, en 2016, de délimiter le contour du bassin versant TK-IBM. L'acquisition des images à très haute résolution (IHR) en 2019 a aussi permis de valider les limites de ce BV.

### **3.1.6. L'acquisition des images par drone à très haute résolution (IHR)**

Deux missions de terrain ont été organisées en 2019 dans l'objectif non seulement de réaliser une cartographie d'occupation du sol sur le site d'étude, mais aussi de produire un modèle numérique de terrain permettant de stabiliser la délimitation du BV sur la base des observations terrain. Les IHR ont été obtenues par l'utilisation d'un drone de modèle Phantom 4 sur lequel est embarquée une caméra 4K 60 P 20 mégas pixels. Le drone a survolé le site d'étude sur une altitude moyenne de 38,5 m tout en garantissant des chevauchements entre les images (figure 34). Grâce à l'utilisation de ce drone, 1278 images ont été capturées sur une zone couvrant une superficie de 0,42 km<sup>2</sup>. Ces images ont été ensuite traitées avec le logiciel Agisoft PhotoScan dont la procédure adoptée est décrite dans le rapport du traitement dans l'**annexe 2**. Ce traitement a permis d'obtenir

une orthophoto de 9,60 mm/pixel de résolution moyenne au sol et un modèle numérique de terrain (MNT).

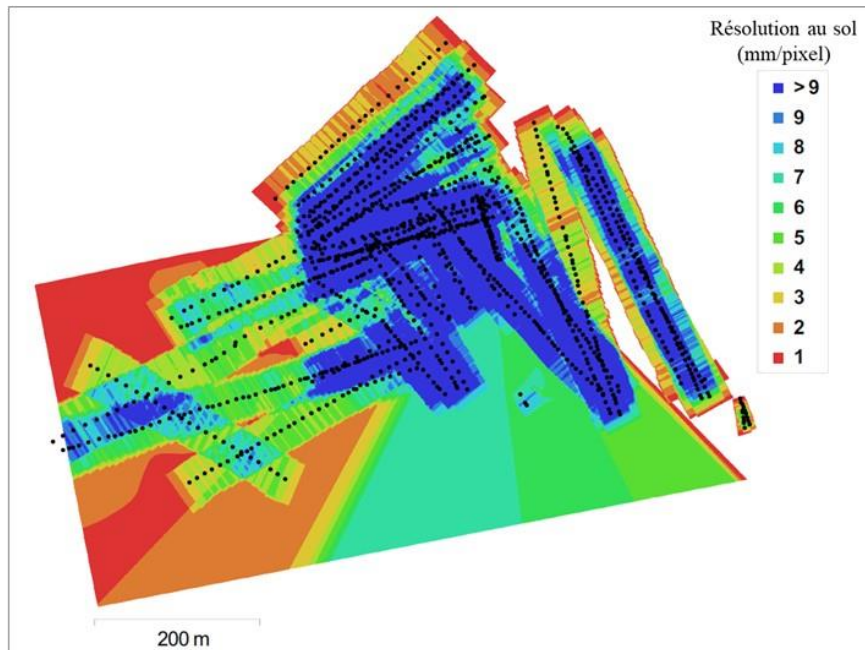


Figure 34. Le rapport de prétraitement (mosaïque) des images de drones prises sur le terrain. Chaque point noir sur cette carte indique une image et le chevauchement avec les autres images.

### 3.1.7. L'analyse des mesures du ruissellement et de l'érosion

Le dépouillement des données de ruissellement mesurées sur parcelles expérimentales et des données pluviométriques a permis de déterminer les lames ruisselées et les coefficients de ruissellement. De ce fait, nous avons fait une caractérisation de l'évolution des données pluviométriques journalières, mensuelles et annuelles au cours de la période d'étude (2016 - 2021). Dans le calcul du coefficient de ruissellement moyen annuel, nous avons tenu compte de toute la pluviométrie annuelle y compris les événements pluvieux qui n'ont pas généré de ruissellement.

#### 3.1.7.1. La détermination de la lame ruisselée

La détermination de la lame ruisselée s'obtient en faisant le rapport entre le volume ruisselé ( $V_r$ ) à l'échelle de la parcelle élémentaire et la surface de celle-ci ( $S$ ). Les lames ruisselées, exprimées en mm sont ainsi obtenues par l'application de la formule suivante :



$$Lr = \frac{Vr}{S}$$

*Formule 2*

### **3.1.7.2. Le calcul du coefficient de ruissellement**

Le coefficient de ruissellement a été calculé par événement pluvieux et par année. Une analyse comparative de ce coefficient de ruissellement a été ensuite effectuée entre les parcelles aménagées par différentes techniques d'aménagement et avec les témoins. La formule ci-après permet de le déterminer :

$$Kr = Lr_i/P_i$$

*Formule 3*

Où  $Lr$  est la lame ruisselée à l'échelle de la parcelle pendant une pluie  $i$ .

$P$  représente la hauteur de la pluie enregistrée au cours de l'évènement pluvieux  $i$  concerné. Le coefficient de ruissellement est par la suite exprimé en pourcentage.

### **3.1.7.3. La méthode de détermination des pertes en terre**

Les pertes en terres mesurées sur parcelles expérimentales sont en effet le résultat cumulé des deux processus distincts : érosion pluviale et érosion par ruissellement. La méthode de traitement des données de pertes en terre s'inspire du principe de Fournier (1954).

Le traitement des échantillons pour déterminer les pertes en terre consiste, avant tout, à agiter sérieusement l'échantillon pour que les particules se répartissent de façon homogène dans l'eau, puis on prélève une quantité à analyser par bidon. Ainsi, un volume d'eau de 100 ml, soit 100 grammes, a été défini et prélevé par échantillon. Ce volume est séché à l'aide de l'étuve réglée à 105° pendant 24 heures. Le poids de l'échantillon obtenu après le séchage permet de déterminer le poids des particules qui correspond à la concentration de la charge sédimentaire. La formule ci-après est appliquée pour obtenir cette concentration :

$$\text{Concentration (C)} = \text{Poids 1} - \text{Poids 2}$$

*Formule 4*

C représente ainsi les pertes en terre exprimées (en g) en considérant les 100 ml puis rapportées au litre, soit la formule :

$$C \text{ (g)} * \frac{1000 \text{ (ml)}}{100 \text{ (ml)}}$$

Formule 5

Étant donné que deux échantillons sont prélevés par parcelle élémentaire, l'érosion ou perte en terre (E) exprimée en g/m<sup>2</sup> s'obtient en tenant compte de la concentration moyenne ( $\bar{C}$ ). Elle est ainsi obtenue en faisant le produit de la concentration (C) par le volume ruisselé (Vr) sur la parcelle, soit la formule :

$$E = \bar{C} * Vr$$

Formule 6

Outre ces mesures, nous avons aussi effectué des mesures de l'évolution de l'humidité du sol.

### **3.2. Les mesures de l'humidité du sol**

#### **3.2.1. Les généralités sur les méthodes de mesure**

L'humidité du sol est une variable clé du processus d'interaction sol-plante-atmosphère. Elle intervient dans les échanges entre l'eau et l'énergie du soleil qui interagissent dans le fonctionnement et la phénologie des plantes (de Rosnay & Baup, 2004). L'intérêt de l'étude de l'humidité du sol réside dans son rôle déterminant sur le développement de la végétation. Ceci est particulièrement plus important en zone sahélienne où l'eau constitue un facteur limitant du fait du climat semi-aride de cette zone. L'évaporation et certains paramètres physiques du sol sont déterminants dans la mesure de l'humidité du sol. En effet, la disponibilité de l'eau en quantité suffisante dans le sol pour le développement des plantes est parfois limitée à cause de l'encroûtement superficiel du sol, mais aussi de la durée d'ensoleillement pouvant provoquer une forte évaporation.

Des techniques d'aménagement simples de collecte des eaux de ruissellement (paillage, sous-solage, demi-lune et d'autres) sont parfois utilisées afin de faire face à cette situation. Elles permettent de collecter et de conserver l'eau à l'endroit où elle tombe et de provoquer le plus possible une rétention de l'humidité du sol (Justine et al., 2004).

C'est ainsi que des méthodes de détermination de l'humidité du sol ont été développées à savoir les méthodes directe et indirecte. La méthode directe se base sur le prélèvement d'échantillons de sol remanié ou non remanié. Ce prélèvement d'échantillons se fait sur le terrain et est souvent suivi

des mesures gravimétriques. C'est un procédé standard de suivi de l'humidité du sol qui est aussi utilisée pour étalonner les mesures d'humidité obtenues par la sonde à neutron, qui est une méthode de mesure indirecte (Delalande et al., 2017). Celle-ci a été utilisée pour la collecte des données à cause de sa disponibilité et son accessibilité. En effet, la sonde utilisée dans le cadre de ce travail a été prêtée auprès de l'Institut de Radio-Isotopes (IRI) de l'Université Abdou Moumouni de Niamey.

La méthode neutronique a été couplée avec celle de prélèvement d'échantillons de sol au cylindre (mesures gravimétriques).

### 3.2.1. Le protocole de mesures gravimétriques

Comme son nom l'indique, cette méthode consiste à prélever l'échantillon du sol en se servant du cylindre (Figure 35).



*Figure 35. Les outils de mesure de l'humidité du sol. À droite (c), le prélèvement d'un échantillon avec l'utilisation d'une truelle, d'une pioche, d'un GPS, d'un mètre ruban, d'un sachet plastique, d'un becher et d'un marqueur. Au milieu (b), un cylindre enfoncé dans le sol. À gauche (a), un trou de 50 cm qui a servi de prélèvement d'échantillon à chaque 10 cm.*

Le principe est relativement simple. Il s'agit d'enfoncer le cylindre tranchant à l'aide du bout de bois ou d'un marteau. Ensuite, il faut creuser autour du cylindre tout en passant la truelle en dessous de celui-ci. En le soulevant, nous veillons à ne pas perdre de sol. Puis, enlevez l'excès de terre avec une truelle en arasant la terre dépassant l'extrémité inférieure du cylindre afin de prélever rigoureusement le volume (déjà connu) interne du cylindre. L'échantillon recueilli est enfin pesé, séché et repesé (méthode par gravimétrie) afin de déterminer la teneur en eau en fonction de la masse ou du volume.

Le protocole consiste, d'abord, à prélever les échantillons du sol non remanié dans des endroits choisis de façon aléatoire dans les différentes parcelles aménagées et leurs témoins. Ici, les prélèvements se font en surface entre [0 à 5 cm]. Il s'agit d'un suivi temporel qui a été réalisé en prélevant régulièrement les échantillons du sol après chaque évènement pluvieux ( $P_0$ )<sup>7</sup>, puis après chaque deux jours ( $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ )<sup>8</sup> jusqu'à la prochaine pluie. Il faut ajouter que ces prélèvements respectant le pas de temps de deux jours se font entre sept heures et neuves heures du matin au moment où les températures sont basses. Les campagnes de mesure d'humidité superficielle ont été conduites pendant 2 années, en 2018 et en 2019. L'objectif de ces mesures vise à suivre l'évolution de l'humidité dans la partie superficielle du sol.

Les échantillons de sol prélevés (à l'état humide) sont immédiatement pesés sur le terrain à l'aide d'une balance dont la sensibilité et la capacité sont respectivement de l'ordre de 0,1 gramme (g) et de 4000 g. Cette balance est alimentée par une batterie de 50 ampères et un convertisseur (transformateur) de 300 watts.

Le volume du sol prélevé correspond au volume du cylindre utilisé, soit 100 cm<sup>3</sup> (5 cm de hauteur et 5 cm de diamètre).

Puis, le prélèvement s'effectue en profondeur du sol [de 10 à 50 cm sur le plateau] et jusqu'à 90 cm sur le haut glacis. Ainsi, à chaque 10 cm, un échantillon est prélevé. Ces mesures ont été effectuées afin d'étalonner les mesures neutroniques. Les prélèvements se font à une distance de 1,5 m des tubes d'accès à la sonde à neutron dans les parcelles aménagées et témoins. Et il faut noter que c'est seulement en 2018, pendant les mois de juin, juillet et août, qu'ont été réalisées ces mesures d'étalonnage.

Après le pesage, les échantillons prélevés ont été transférés au laboratoire pour le traitement.

### **3.2.2. La méthode de traitement des échantillons prélevés**

La méthode de traitement consiste à transporter les échantillons de sol remanié et non remanié puis les sécher dans l'étuve réglée à 105 °C au maximum pendant 24 h (Figure 36). Notons que ces

---

<sup>7</sup>  $P_0$  = Prélèvement d'échantillon de sol effectué après pluie.

<sup>8</sup>  $P_1$  = Prélèvement d'échantillon de sol non remanié effectué 2 jours après pluie ;

$P_2$  = Prélèvement d'échantillon de sol non remanié effectué 4 jours après pluie ;

$P_3$  = Prélèvement d'échantillon de sol non remanié effectué 6 jours après pluie ;

$P_n$  = Nombre de fois où un prélèvement d'échantillon de sol non remanié a été effectué après pluie.

échantillons sont d'abord pesés sur le terrain avec une balance avant de les acheminer au laboratoire pour le traitement. Les données sont par la suite saisies dans le tableur Excel qui permet de déterminer l'humidité pondérale et l'humide volumique.



*Figure 36. Le séchage des échantillons à l'étuve.*

### **3.2.3. La mesure de l'humidité du sol par sondage neutronique**

Les mesures d'humidité du sol par sondage neutronique ont été faites à l'échelle locale, c'est-à-dire autour des tubes d'accès à la sonde installés dans les parcelles aménagées et témoins.

#### **3.2.3.1. Les caractéristiques des sondes à neutrons utilisées**

Deux types de sondes à neutrons ont été utilisés dans le cadre de ce travail. Il s'agit de la sonde du type CPN® 503 DR emprunté à l'Institut de Radio-Isotopes (IRI) et de la sonde du type I. H. III-503 1NK disponible au département de géographie de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines (FLSH) de l'Université de Niamey. Le premier modèle de la sonde est plus pratique à l'utilisation

et moins lourde pour le transporter sur le terrain. Néanmoins, l'utilisation de cette sonde se fait par alternance entre deux équipes qui opéraient sur le terrain. Pour cette raison d'indisponibilité de la sonde à tout moment des mesures, vous avons utilisé la deuxième sonde (modèle I. H. III-503 1NK) différente de la précédente.

La première sonde est constituée de deux parties, son blindage et son système électronique de comptage. Le blindage contient une source radioactive scellée qui émet des neutrons rapides, un détecteur de neutrons lents et un préamplificateur. La source radioactive contient le mélange de particules alpha ( $\alpha$ ) et la poudre de béryllium. Le fonctionnement de la sonde à neutrons s'explique par ce mélange et cette poudre. En effet, quand les particules alpha bombardent les noyaux du béryllium, il se produit une réaction chimique (nucléaire) par choc élastique entraînant ainsi la dispersion et le ralentissement des neutrons rapides par phénomène de collision. Entrant en collision avec les atomes d'hydrogène de l'eau et avec certains composants du sol (matière organique), les neutrons rapides perdent leur énergie et deviennent lents presque à un état énergétique voisin de celui des atomes du milieu ambiant notamment à l'énergie des neutrons thermiques. En fait, l'hydrogène est un bon ralentisseur des neutrons rapides. De ce fait, l'eau à cause de son contenu d'hydrogène est également un bon ralentisseur (Agence Internationale de l'Énergie Atomique, 2003). Donc, plus un sol est humide, plus grande sera la quantité de neutrons ralentis autour de la source de sonde à neutrons. C'est le résultat de l'interaction (par impulsion électronique) entre la dispersion des neutrons rapides par collision et le nombre de neutrons ralentis qui permet de déterminer indirectement l'humidité du sol au voisinage de la sonde.

Le système électronique de comptage comprend un amplificateur, une source de haute tension, un compteur d'impulsion, un microprocesseur et un dispositif d'alimentation par batterie rechargeable, en ce qui concerne la sonde CPN<sup>®</sup> 503 DR et par batterie non rechargeable.

En ce qui concerne le modèle I. H. III, le rôle de microprocesseur est de convertir chaque impulsion détectée en comptages bruts exprimés en coups par minute (cpm) ou par seconde (cps). Celle-ci est aussi équipée d'un système de blindage conçu pour protéger les utilisateurs contre la radioactive (nuisible pour la santé) déclenché par l'émetteur alpha ( $\alpha$ ) lorsqu'elle est en service. C'est pourquoi, dès que nous démarrons la sonde, nous nous en éloignons d'environ trois mètres de distance même quand la source est introduite plus en profondeur dans le sol. Cette mesure de sécurité a été respectée afin de se conformer aux principes d'utilisation de la sonde à neutrons.

La figure 37 ci-après montre les deux modèles de la sonde à neutrons utilisés dans ce travail.



Figure 37. L'illustration de deux modèles de la sonde à neutrons utilisés sur le terrain.

Les mesures d'humidité doivent obligatoirement l'installation des tubes d'accès à la sonde à neutrons.

### 3.2.3.2. Les tubes d'accès neutronique : installation et fonctionnement

Des tubes d'accès à la sonde à neutrons ont été installés en juin 2016 (figure 38). L'installation de ces tubes a été faite par l'utilisation d'une tarière motorisée de marque australienne (Drillmite Sand Auger, Dormer Engineering). Cette tarière permet de creuser des trous d'un diamètre légèrement supérieur (environ 10 mm) à celui des tubes d'accès (en PVC). Au cours du creusage, le sol est légèrement ou pas perturbé autour des parois du forage (trou). Malgré les conditions d'un sol

pierreux (sol latéritique dur de plateau), l'opération du forage s'est avérée moins pénible du fait que ce sont les anciennes bandes de végétation, mais actuellement dégradées ou en dégradation. Le sol de celles-ci est moins dur que sur les bandes nues, ce qui facilite l'installation des tubes. Les deux extrémités de chaque tube sont fermées en utilisant des bouchons et de la colle. Pour la partie aérienne du tube, on utilise de bouchons amovibles (boîtes de cannette) pour éviter toute pénétration d'eau.

La profondeur de ces forages peut atteindre jusqu'à 1 mètre à partir du niveau 0 m de la surface du sol. Chaque tube d'accès mesure une longueur totale de 1,3 m, et la longueur de 1 m du tube est installée dans les profils du sol (en profondeur) et 0,3 m au-dessus de la surface du sol (limite supérieure).

Après l'installation du tube, le vide entre la paroi du forage et le tube est bien comblé avec du sol extrait lors du creusage (forage). Après cette fermeture des vides, du ciment a été coulé tout autour du tube (dans un rayon d'environ 30 cm autour du tube) pour éviter l'infiltration préférentielle des eaux de pluie.

Au total, 20 tubes d'accès ont été installés dans les parcelles aménagées (SL, SLEB & branchage) et témoins soit 12 tubes sur le plateau et 8 tubes sur le piémont encroûté du glacis (tableau 8). Pour la situation géographique de ces tubes, se référer à la [figure 29](#) citée plus haut. Sur le plateau, chaque tube a été placé plus ou moins au milieu de la parcelle, soit donc, un seul tube par parcelle. Par contre sur le glacis, au moins 2 tubes ont été placés par parcelle dont le 1<sup>er</sup> est positionné en amont et le 2<sup>e</sup> positionné en aval. L'alignement de ces tubes est perpendiculaire au sens de la pente. Le fonctionnement des tubes d'accès neutronique a été jugé bon, dans l'ensemble, du moment où il n'y'a pas eu de souci majeur pendant toute la durée du suivi. Cependant, il faut signaler que 6 des tubes ont été cassés en 2018, soit par des animaux, soit des actes de vandalisme.





Figure 38. L'installation des tubes d'accès à la sonde à neutrons. À gauche, les tubes en PVC utilisés, à droite (b), la mise en exécution de l'installation des tubes avec une tarière motorisée.

Le tableau 8 récapitule tous les tubes d'accès à la sonde à neutrons qui ont été installés par technique d'aménagement et par parcelle témoin et en fonction des unités géodynamiques (plateau et haut glacis encroûté).

Tableau 8. La présentation des tubes d'accès par technique d'aménagement. Chaque tube est représenté dans la surface délimitée, suivie (aménagée ou témoin).

	Plateau				Glacis		
Technique d'aménagement	SL	SL-E-B	Branchage	Témoin	SL	SL-E-B	Témoin
Code du tube d'accès à la sonde (T)	T7, T10, T14	T8, T11, T13, T20	T15, T16	T9, T12, T17	T4, T5	T2, T3, T18, T19	T1, T6

### 3.2.4. Le suivi de l'humidité du sol dans les parcelles

Nous avons utilisé une sonde à neutron pour mesurer la teneur en eau du sol. Cette dernière a été mesurée tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 90 cm sur le plateau et 190 cm sur le haut glacis. Nous avons suivi la teneur en eau pendant trois campagnes hydrologiques, en 2016, 2017 et 2018, en prenant des mesures pendant les saisons pluvieuse et sèche. Pendant la saison de pluie, nous avons pris des mesures après chaque pluie et 5 jours après la pluie, tandis qu'en saison sèche (d'octobre à mai), nous avons pris des mesures mensuelles. Il est important de noter que sur le haut glacis, nous avons d'abord effectué des mesures en 2016 avant et après l'aménagement des parcelles en 2017 et 2018.

### 3.2.5. Les avantages et les limites des méthodes utilisées

Deux méthodes sont utilisées pour mesurer l'humidité du sol, mais elles ont toutes deux des avantages et des limites. Le défi est de mesurer l'humidité avec une grande précision et exactitude, malgré le problème de représentativité de l'échantillon de sol amélioré par l'hétérogénéité locale et l'incertitude liée à la procédure d'échantillonnage.

Nous avons identifié les avantages de chacune des méthodes. La méthode au cylindre est rapide et précise, permettant de prélever des échantillons intacts de sol en place, même lorsque le sol est humide ou submergé. Elle permet également d'étudier la densité apparente du sol avec une grande certitude. En revanche, elle a des limites, notamment pour les prélèvements en profondeur et sur des sols secs.

La méthode neutronique, quant à elle, permet des mesures rapides, nombreuses et répétées sans perturbation du sol, avec plus de précision et de simplicité. Elle est également non destructrice et ergonomique, avec des batteries rechargeables. Cependant, elle a des limites, notamment en termes de volume prélevé et de coûts financiers et humains élevés. En fait, l'influence de la sonde se limite tout autour de la source neutronique (figure 39).

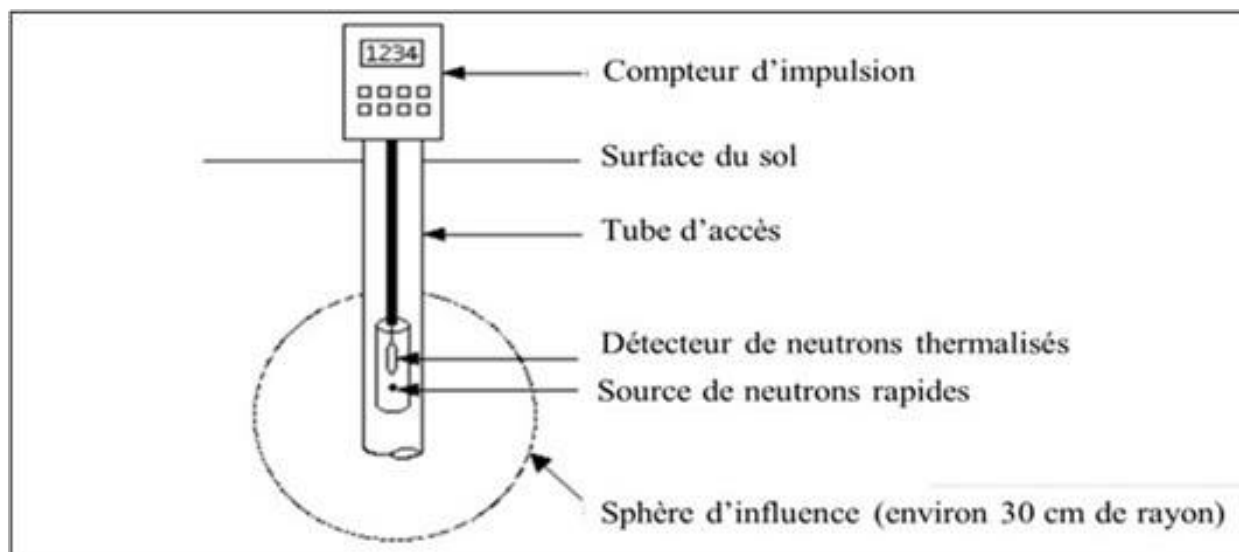


Figure 39. Le schéma d'une sonde à neutrons en place dans un sol. Source : Luiz Antonio Pereira dos Santos, 1984.

### 3.2.6. Les méthodes d'analyse des données d'humidité

La mesure de teneur en eau est d'une haute importance pour comprendre le fonctionnement hydrique du sol. En effet, la teneur en eau permet de déterminer le front d'infiltration et l'eau utile à la plante.

#### 3.2.6.1. La détermination de la teneur en eau du sol à partir de la méthode par mesure gravimétrique

La teneur en eau pondérale de chaque échantillon de sol prélevé a été déterminée par le biais de la formule suivante :

$$W = \frac{Msh - Mss}{Mss} \quad \text{Formule 7}$$

Avec  $W$  la teneur en eau pondérale,  $Msh$  la masse du sol humide et  $Mss$  la masse de sol sec.

La teneur en eau volumique est, quant à elle, déterminée par l'application de la formule 5 :

$$\theta = \frac{Msh - Mss}{100} \quad \text{Formule 8}$$

Avec  $\theta$  la teneur en eau volumique,  $Msh$  la masse du sol humide et  $Mss$  la masse de sol sec et  $D_a$  la densité apparente. Le nombre 100 est le volume de l'échantillon prélevé qui vaut le volume du cylindre utilisé.

#### 3.2.6.2. La détermination de la teneur en eau du sol à partir de la méthode neutronique

Nous avons utilisé deux formules pour transformer les comptages réduits en humidité volumique. Ces deux formules d'étalonnage ont été définies sur le même type de sol et sur le même site d'étude. La première a été élaborée par Galle (1991) sur le glacis, et la seconde par Ingatan Warzagan (2020) sur le revers du plateau aménagé. La droite d'étalonnage est indiquée comme suit :

$$\theta = a CR + b \quad \text{Formule 9}$$

Avec  $\theta$  comme l'humidité volumique ;  $a$ , la pente et  $b$ , l'intercepte (tableau 9).

Tableau 9. Les droites d'étalonnage utilisées pour transformer les comptages réduits (CR) en humidité volumique ( $\theta$ ).

Étalonnage	Horizon (cm)	Pente (a)	Intercepte (b)
Galle (1991)	10	0,66	- 0,002
	20-60	0,66	- 0,017
	60-190	0,66	- 0,031
<i>Ingatan Warzagan</i> (2020)	10	0,96	- 0,10
	20	0,61	- 0,06
	30	0,71	- 0,13
	40 & +	0,78	- 0,19

L'objectif de la détermination de l'humidité du sol était d'évaluer la croissance des plantes.

### 3.3. Le suivi de la végétation

Un suivi de la végétation a été effectué dans des parcelles aménagées et leurs témoins.

#### 3.3.1. Le choix des placettes

Nous avons mis en place un dispositif pour suivre régulièrement la végétation sur le site d'étude pendant 3 à 4 saisons pluvieuses. Ce dispositif est constitué de 20 parcelles sélectionnées en fonction de la représentativité de leur type de sol et de l'état des bandes boisées situées sur le plateau à brousse tigrée et sur le haut glacis du site de Tondi Kiboro. 16 parcelles ont été placées sur le revers du plateau et 4 autres sur le haut glacis sableux, car elles représentent les surfaces aménagées décrites précédemment (cf. § 2.6.2).

Pour étudier la végétation herbacée, nous avons utilisé des placettes de 6,25 m<sup>2</sup> selon la méthode des points quadrats, qui ont été placées de manière homogène dans chaque parcelle. Ces points ont été croisés perpendiculairement pour former des transects de visée à l'échelle de la parcelle (voir figure 40, à gauche), chaque transect de visé 2,5 mètres. Pour la végétation ligneuse, la superficie totale de chaque parcelle a été utilisée comme placette d'observation (voir figure 40, à droite). Pour

plus d'informations sur la répartition géographique des placettes par unité géodynamique (cf. [figure 29](#), plus haut).



Figure 40. Le choix des placettes pour la mesure de la végétation. À gauche (a), une parcelle de 150 m<sup>2</sup> de superficie servant à mesurer la végétation ligneuse. À droite (b), une sous-placette de 6,25 m<sup>2</sup> déterminée à l'intérieur de la placette précédente destinée à effectuer le relevé des herbacées.

### 3.3.2. Le principe de mesure de la végétation herbacée

L'approche méthodologique qui a permis de réaliser l'inventaire des espèces herbacées s'est basée sur l'utilisation de points quadrats alignés développée par DAGET et al. (1974). En effet, l'inventaire floristique a été fait sur des transects à chaque 10 centimètres. Un bois aiguillé dirigé perpendiculairement au transect (mètre ruban) est utilisé pour effectuer la visée. À chaque point de lecture, c'est-à-dire chaque 10 cm, tous les contacts<sup>9</sup> ou présences<sup>10</sup> sont notés. Dans ce sens, il est important de notifier que chaque espèce est notée une seule fois. Elle est, par contre, comptée autant de fois qu'on la rencontre sur le long de transect de lecture. Environ 25 lectures sont effectuées sur chacun des transects soit au total 50 observations par sous-placette et 100 observations à l'échelle d'une placette (parcelle de 150 m<sup>2</sup>).

Chaque année, nous retournons au même endroit de la parcelle et à peu près à la même période (mi-septembre) pour effectuer le relevé. Les coordonnées géographiques que nous avons prises dès la première année nous permettent d'identifier l'emplacement exact du transect pour chaque relevé. Après chaque relevé sur une parcelle donnée, nous parcourons l'ensemble de la parcelle pour identifier et recenser toutes les espèces qui n'ont pas été échantillonnées lors de la lecture des points quadrats.

<sup>9</sup> C'est l'intersection des parties d'une espèce donnée (feuille, tige et inflorescence) avec le transect de visée.

<sup>10</sup> C'est l'observation d'une espèce donnée dans une parcelle expérimentale.

Nous avons identifié les espèces herbacées sur place avec l'aide de techniciens de l'INRAN et des paysans. Le lexique des plantes du Niger (Peyre de Fabrègues, 1977) est l'outil le plus utilisé pour identifier les noms des espèces végétales, ce qui nous a grandement facilité la tâche.

À la fin de chaque relevé, nous estimons et notons le pourcentage de recouvrement du sol par la végétation. En 2018, soit trois ans après la mise en place de l'aménagement des parcelles, nous avons effectué un suivi de la biomasse. Pour ce faire, nous avons utilisé une grille d'un mètre carré et avons coupé tout le tapis herbacé à l'intérieur de celle-ci pour mesurer la biomasse. Au total, huit (8) parcelles expérimentales, réparties par type d'aménagement et témoin, ont été concernées par cette mesure.

### **3.3.3. Le principe de mesure de la végétation ligneuse**

Dans un premier temps, un dénombrement des arbustes a été réalisé dans toutes les zones étudiées, incluant les parcelles SL I, SL II et SL-III, SL-EB I, SL-EB II et SL-EB III, ainsi que branchage I et II, SL-EB 5 et SL-EB 4, SL 4 et les 4 parcelles témoins. Cette étape visait à déterminer le nombre total d'individus par parcelle et a été réalisée en mi-juillet 2016 (cf. § 2.6.2), juste après la réalisation d'aménagements des parcelles. Puis, un deuxième dénombrement a été effectué en septembre 2016, au moment où les jeunes pousses sont à leur maximum végétatif. Cette étape consistait à compter individuellement chaque individu par espèce présente dans la parcelle pour déterminer le nombre total d'individu. Il convient de noter que ce deuxième dénombrement portait uniquement sur les jeunes individus poussés suite à l'opération d'ensemencement.

Ces mêmes dénombrements ont été réalisés en juillet et en septembre des années 2017, 2018 et 2019. Le dénombrement de juillet avait pour objectif de déterminer le taux de survie et de mortalité des jeunes pousses par espèce, tandis que celui de septembre visait à détecter de nouvelles pousses pour évaluer le taux de régénération dans les parcelles. Pour réaliser ces dénombrements, des ficelles ont été tendues entre des piquets en bois pour créer un maillage de petites parcelles de 1 m<sup>2</sup> dans les surfaces étudiées (figure 41).



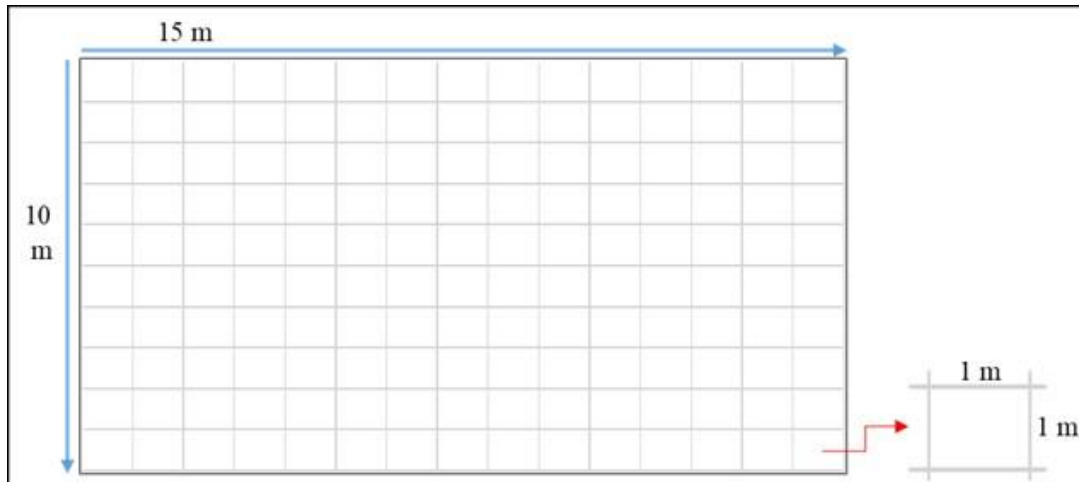


Figure 41. Le croquis du maillage des parcelles de 150 m<sup>2</sup> (15/10 m) afin de faciliter le comptage des jeunes individus par espèce et des nouvelles recrues. Le comptage se fait de manière progressive dans les placettes de 1 m<sup>2</sup> jusqu'à couvrir la totalité de la parcelle.

Par ailleurs, après l'aménagement et l'ensemencement dans les placettes, des observations ont été effectuées pour suivre, de façon qualitative, l'évolution de la germination des espèces telles que *Guiera senegalensis* J. F. Gmel. et *Combretum micranthum* G. Don. En effet, dès le début du démarrage de la saison des pluies (juste après les premières pluies enregistrées après ensemencement), nous détersons quelques graines (figure 42) avec pour objectif de remarquer leur niveau en termes de processus de germination. Ainsi, des notes sont prises en fonction des dates d'apparition des radicules et des levées.



Figure 42. L'illustration de l'état de germination des graines de *Combretum micranthum* et de *Guiera senegalensis*. Les radicules de *Guiera senegalensis* sont aperçues à gauche et celles de *Combretum micranthum* à droite.



Afin de mieux caractériser la végétation ligneuse, des mesures dendrométriques ont été effectuées dans toutes les parcelles suivies.

### 3.3.4. Le suivi de la végétation sur le plan vertical

Pour suivre la croissance en hauteur ou en taille des plantes, on utilise une méthode simple : on estime la taille de chaque individu en utilisant un mètre ruban (voir figure 43). Ce suivi a répété chaque année de 2017 à 2019 voire 2021. Pour mesurer la hauteur de chaque plante, on place le mètre ruban près de la plus longue tige, à l'extrémité de la dernière feuille de la tige, c'est-à-dire au niveau de l'apex, en lisant la hauteur au ras du sol. On a mesuré la croissance de toutes les jeunes pousses et de la végétation existantes en 2016, qui sert de référence pour les années suivantes.



Figure 43. La mise en exécution du principe de mesure de la croissance verticale (hauteur) d'un jeune arbuste : exemple de mesure pour *Combretum micranthum* (A) et pour *Guiera senegalensis* (B).

### 3.3.5. Le suivi de la végétation sur le plan horizontal

Pour suivre la croissance horizontale d'un arbuste, nous mesurons la taille de son houppier, c'est-à-dire la partie de l'arbuste qui se trouve au-dessus du tronc. L'objectif est de mesurer la surface du sol couverte par l'arbuste. Pour se faire, on utilise un mètre ruban pour mesurer les diamètres maximum et minimum. Le diamètre maximum est la longueur le long de la couronne de l'arbuste, tandis que le diamètre minimum est la largeur de la couronne (figure 44). Cela permet de déterminer la surface de la couronne, sur mesure la longueur et la largeur de la partie aérienne de l'arbuste. En ce qui concerne les jeunes individus, la méthode de mesure de la croissance horizontale de la végétation ne peut pas être appliquée à tous les individus présents. Ainsi, un grand nombre d'individus de différents diamètres et hauteurs sont mesurés pour obtenir des moyennes fiables de mesures de la végétation pour chaque année et chaque parcelle.

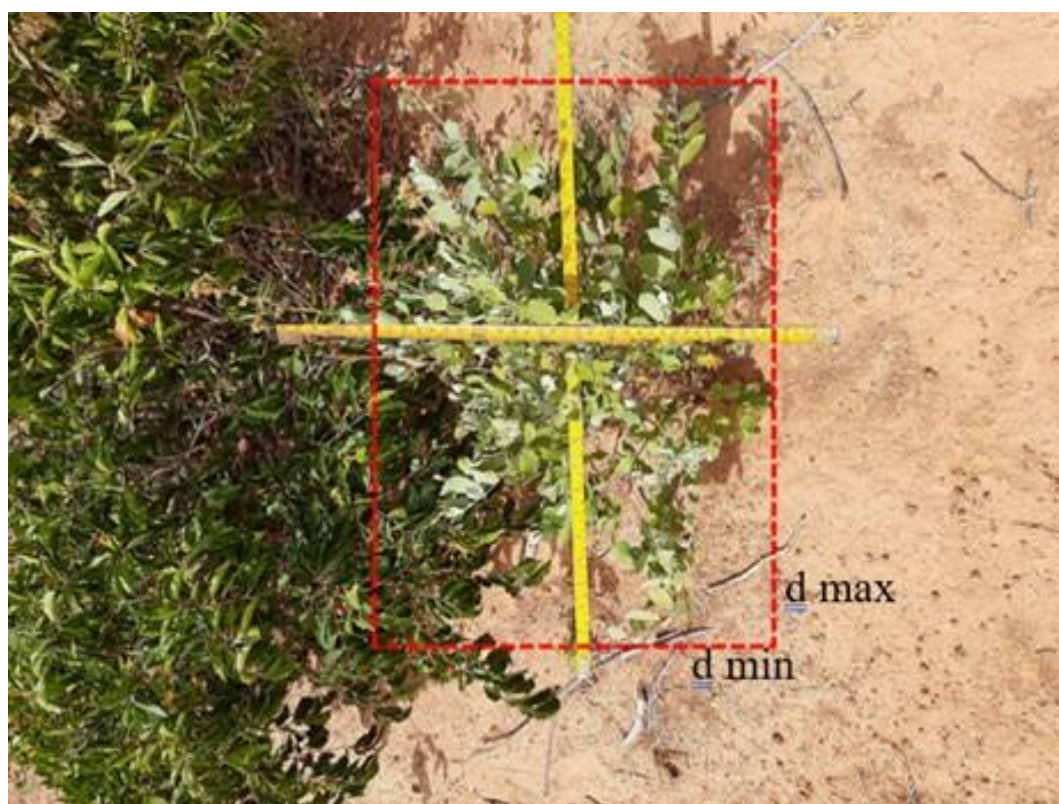


Figure 44. La mesure de la croissance horizontale d'un jeune arbuste.

Le suivi de ces paramètres a permis de visualiser et de spatialiser et de visualiser l'évolution de la végétation à l'échelle de la parcelle et du bassin versant (TK-IBM) entre 2016 et 2019. Des images



de haute résolution ont été utilisées pour cette spatialisation (cartographie), y compris des photos prises à l'aide de smartphones et d'un drone en 2019, ainsi qu'une image de Google Earth.

Les photos prises à l'aide du smartphone et du drone ont été prises à différentes dates au cours de la saison et utilisent deux techniques de prise de vue : la prise de vue horizontale en mode frontal et la prise de vue verticale (figure 45). L'utilisation de ces deux techniques permet de mettre en évidence la croissance de la végétation dans les dimensions verticales et horizontales.



Figure 45. Les techniques de prise de vue en modes vertical (en haut) et horizontal (en bas).

Le protocole de suivi consiste à capturer des images de l'état initial des surfaces dégradées, avant même l'aménagement des parcelles, pour suivre la croissance de la végétation dans les surfaces dégradées délimitées. Par la suite, les captures d'images sont poursuivies après l'aménagement des

surfaces dégradées, ainsi qu'au contrôle (parcelle témoin). Les opérations de capture d'images ont été poursuivies et répétées presque aux endroits exacts et à des moments similaires. Cependant, les moments spécifiques pour la capture d'image n'ont pas été définis. Néanmoins, des séquences de photos ont été prises régulièrement après chaque événement pluvieux tout au long de la saison des pluies. Pendant la saison sèche, seules quelques séquences ont été prises, en fonction de notre présence sur le terrain. Les photos ont été prises, en général, durant les mois d'octobre, avril et mai.

Une séquence de captures d'images signifie une série d'images des parcelles suivies depuis la revers du plateau jusqu'au haut glacis ou vice versa.

De plus, un drone Phantom 4 a été utilisé pour caractériser la croissance horizontale de la végétation dans les parcelles et à l'échelle du BV TK-IBM. Deux captures d'images ont été réalisées en juin 2019 et septembre 2019 à l'aide du drone. Ces images de drones ont également été utilisées pour produire une orthophoto de haute résolution. Cette image a été utilisée dans la procédure de délimitation du BV et la construction d'un MNT.

### **3.3.6. La méthode de traitement et d'analyse des données collectées**

Les données du relevé de végétation ont été traitées et analysées à l'aide du logiciel Excel. Dans un premier temps, les données ont été regroupées par dates de relevés (année), technique d'aménagement, placettes aménagées et témoins, ainsi que par unité géomorphologique (plateau et haut glacis). La cartographie de la végétation dans les surfaces développées a été réalisée à l'aide de logiciels Arc Gis, Agisoft Photoscan et Surfer. Les figures (carte ou certaines photos) produites ont été maquillées avec le logiciel Adobe Illustrator, version 2020.

#### **3.3.6.1. La détermination des variables floristiques**

Une analyse quantitative des relevés floristiques a été réalisée en se basant sur la liste des différentes espèces inventoriées dans différentes parcelles aménagées et non aménagées. Cette liste établie, d'abord, par parcelle a permis de faire une classification par espèces et par familles et d'établir la composition floristique. Ainsi, plusieurs paramètres permettant d'évaluer l'impact des différentes techniques d'aménagement sur l'évolution de la végétation dans les parcelles suivies ont été calculés. Il s'agit de la fréquence, de la densité, de la survie-mortalité. La strate herbacée a

été analysée séparément de la strate ligneuse. Ceci pour déterminer précisément les impacts des différentes techniques d'aménagement étudiées dans l'expérimentation.

### 3.3.6.2. L'analyse de la strate herbacée

L'établissement des listes floristique a permis de calculer les fréquences des espèces dans une parcelle donnée.

#### ❖ Fréquence spécifique

Par fréquence spécifique (FSi), on entend le nombre de points de lecture où une espèce *i* est relevée lors d'un comptage sur un transect donné. Elle s'obtient par la formule ci-dessous :

$$FSi = \frac{ni}{N} \quad \text{Formule 10}$$

*ni*, est le nombre de fois où l'espèce *i* a été observée et, *N* est le nombre total de points de lecture à l'échelle d'une parcelle.

La fréquence exprimée au pour-cent (%) exprime le recouvrement spécifique. Elle est calculée par la formule suivante (source si elle existe) :

$$FSi (\%) = \frac{ni \times 100}{N} \quad \text{Formule 11}$$

### 3.3.6.3. La détermination des paramètres dendrométriques

#### ❖ Densité des ligneux

Le nombre d'individus par espèces recensé par relevé sur chaque parcelle par an représente la densité. Cette dernière notée *Di* est déterminée par la formule suivante :

$$Di = \frac{n}{S} \quad \text{Formule 12}$$

*n*, représente l'effectif total d'individus par espèce, et *S* représente la surface totale de la parcelle échantillonnée. En outre, la *di1* (densité initiale 1 = la situation avant aménagement des parcelles)

et di2 (densité initiale 2 = 1<sup>er</sup> relevé exhaustif des ligneux après aménagement des parcelles) sont calculées également. Le rapport entre la di2 et di1 permet de déterminer l'évolution de la densité.

#### ❖ Hauteur moyenne des individus

La hauteur moyenne ( $H_{moy}$ ) représente la hauteur mesurée de tous les individus inventoriés dans une parcelle suivie à une date donnée. La hauteur maximale représente la hauteur la plus élevée à la date du relevé alors que la hauteur minimale représente la hauteur la plus faible.

$$H_{moy} = \frac{\sum hi}{Ni} \quad \text{Formule 13}$$

$h$  correspond à la hauteur de l'individu d'une espèce  $i$  et  $N$ , le nombre total des individus de cette espèce.

#### ❖ Diamètre à la base des ligneux

Il s'agit du diamètre moyen ( $d$ ) à la base de chaque individu par espèce calculée par la formule suivante :

$$d = \frac{\sum di}{Ni} \quad \text{Formule 14}$$

$d$  étant le diamètre de l'individu d'une espèce  $i$  et  $N$ , le nombre total des individus de l'espèce.

#### ❖ Détermination du taux de couvert végétal

Le taux brut de couvert végétal a été estimé en projetant au sol la surface de la couronne de l'arbuste (individu). Exprimé en m<sup>2</sup>, ce taux est calculé par la formule ci-dessous.

$$\text{Couvert ligneux} = L (dmax) \times \ell (dmin) \quad \text{Formule 15}$$

Où,  $L$  = diamètre maximum et  $\ell$  = diamètre minimum de la couronne de l'arbuste mesuré sur le terrain.

Le taux de couverture à l'échelle de la parcelle est obtenu en faisant la somme des taux bruts de couvert végétal sur la superficie totale de la parcelle (Tcv).

$$\text{Taux de couvert végétal} = \frac{\text{Somme de couvert brut}}{\text{superficie de la parcelle}}$$

Formule 16

### 3.3.6.4. Les critères d'analyse de l'évolution de la végétation

À l'échelle parcellaire, l'analyse a été faite selon 3 critères classés dans le tableau 10.

Tableau 10. Critères d'analyse de l'évolution de la végétation dans les parcelles suivies.

Situation /	Période	Objectif d'analyse
Avant aménagement	[Juillet] 2016	État initial
Après aménagement	[Mi-juillet] 2016 à 2019	Individus/espèce, taux de couvert végétal (Eds, ect.)
	[Mi-septembre] (2016, 2017, 2018 et 2019).	L'évolution de surface couverte et surface nue.
Intersaison pluvieuse (en mai et en juin)	De [juillet] 2017 à juillet 2019	Réponse de la végétation des parcelles aménagées et témoins au stock hydrique.

Par ailleurs, en 2016, à l'échelle du BV, aucun aménagement n'a été effectué. Il s'agit là de l'état 1 du BV, c'est-à-dire à sa situation initiale sans aménagement. Cependant, en 2017, le BV a été aménagé. Les relevés seront dans ce cas comparés pendant la situation avant aménagement et après la situation après aménagement.

### 3.3.6.5. L'évaluation du taux de régénération

À l'échelle d'une parcelle considérée, la survie est obtenue en faisant le rapport entre le nombre d'individus relevés à partir de l'inventaire en septembre 2016 et le nombre d'individus survécus lors des inventaires de juillet 2017, 2018, 2019 et 2020. Ainsi, le taux de survie et de mortalité principalement de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* ont été évaluées par parcelle suivie et par année. Ces taux sont obtenus par le rapport ci-après :



$$Ts = S/s * 100$$

Formule 17

Où grand S est le taux de survie initial considéré à 100 % à la situation de départ en 2016 et petit s le taux de survie durant les prochaines années (2017, 2018, 2019, etc.).

À partir du taux de survie, le taux de mortalité est déduit en faisant la différence entre s et S.

### 3.3.6.6. Le calcul des indices de diversité floristique

L'objectif du calcul de diversité à l'échelle des parcelles est de mesurer l'efficacité de la régénération des surfaces boisées dégradées aménagées dans le sens de la diversité en fonction des techniques d'aménagement testées. La diversité floristique peut être définie comme la mesure de la composition en nombre d'espèces et de leur abondance relative. La diversité et la répartition des individus ont été analysées à l'échelle des parcelles aménagées. En effet, nous avons calculé l'indice H' de Shannon & Weaver (1964), l'indice D de Simpson (1949) et l'indice de Hill in Jacques & Hily (2003).

- **L'indice de Shannon**

Le choix de l'indice de se justifie par le fait qu'il considère à la fois l'abondance des espèces et les espèces relativement rares dans la parcelle, exprimant ainsi la diversité dans une parcelle donnée. L'indice de Shannon est basé sur le concept d'entropie, qui fait référence à l'imprévisibilité de l'identification de l'individu suivant. Il s'écrit de la façon suivante :

$$H' = -\sum \left( \left( \frac{ni}{N} \right) \times \log_2 \left( \frac{ni}{N} \right) \right) \quad \text{Formule 18}$$

Avec : H' indice de Shannon

ni : nombre d'individus d'une espèce donnée, i allant de 1 à S (nombre total d'espèces). N : nombre total d'individus d'une espèce.

H' est minimal (= 0) si tous les individus du peuplement appartiennent à une seule et même espèce, H' est également minimal si, dans un peuplement, chaque espèce est représentée par un individu unique, excepté une espèce qui est représentée par tous les autres individus. L'indice est maximal quand tous les individus sont répartis d'une façon égale sur toutes les espèces (Frontier, 1983).

L'indice de Shannon est généralement accompagné de l'indice d'équitabilité de Pielou (1993, 2015), appelé également indice d'équirépartition de Blondel (1979). Cet indice représente le rapport de H' à l'indice maximal théorique dans le peuplement (H max). Variant de 0 à 1, il a sa valeur maximale quand les espèces ont des abondances identiques dans la parcelle et minimal lorsqu'une seule espèce domine toute la parcelle. Il est insensible à la richesse spécifique et utile pour comparer les dominances potentielles entre parcelles suivies ou entre dates d'échantillonnage. Il s'écrit comme suit :

$$H_{max} = \text{Log}_2 N \quad \text{Formule 19}$$

Le rapport de l'indice calculé sur l'indice maximal est de :

$$R = \frac{H' \text{ calculé}}{H_{max}} \quad \text{Formule 20}$$

R est compris entre 0 et 1.

- **L'indice de Simpson**

L'indice de Simpson évalue également la diversité dans une parcelle, mais en étant plus sensible aux espèces très abondantes dans la parcelle. Il s'écrit comme suit :

$$D = \frac{\sum Ni(Ni - 1)}{N(N - 1)} \quad \text{Formule 211}$$

D : indice de Simpson

Ni : nombre d'individus d'une espèce donnée.

N : nombre total d'individus.

Cet indice obtient une valeur de 0 pour indiquer le maximum de diversité, et une valeur de 1 pour indiquer le minimum de diversité. Dans le but d'obtenir des valeurs facilement lisibles, nous présentons l'indice de diversité de Simpson par 1-D. Cela signifie que le maximum de diversité est représenté par la valeur 1 et le minimum de diversité par la valeur 0 (Schlaepfer et al., 2002). Il faut noter que cet indice de diversité donne plus de poids aux espèces abondantes qu'aux espèces

rarement rencontrées. Le fait d'ajouter des espèces rares à un échantillon ne modifie pratiquement pas la valeur de l'indice de diversité de Simpson.

- **L'indice de Hill**

Il s'agit d'une mesure de l'abondance proportionnelle, permettant d'associer les indices de Shannon Weaver et de Simpson :

$$Hill = (1/\lambda)/e^{H'} \qquad \text{Formule 222}$$

$1/\lambda$  : est l'inverse de l'indice de Simpson,

$e^{H'}$  : est l'exponentielle de l'indice de Shannon-Weaver.

Les deux indices ( $1/\lambda$  et  $e^{H'}$ ) autorisent de façon respective la mesure du nombre effectif d'individus abondants et l'effectif d'individus des espèces à peine rencontrées.

De façon globale, l'indice de diversité de Hill présente une vue encore plus précise de la diversité observée. Plus il s'approche de la valeur 1, et plus la diversité est faible. Mais, pour faciliter son interprétation, nous avons utilisé l'indice 1 moins Hill ( $1 - Hill$ ). Par conséquent, les diversités maximales et minimales sont respectivement représentées par la valeur 1 et 0.

## **Conclusion**

Un dispositif expérimental de mesure du ruissellement, de l'humidité du sol et de la végétation a été mis en place, sur le revers du plateau et sur le haut glacis encroûté, à l'échelle ponctuelle et du BV pour suivre et évaluer l'efficacité des trois techniques d'aménagement appliquées. À l'échelle du bassin versant, une station hydrométrique a été installée pour évaluer l'efficacité des aménagements sur la réduction des écoulements. En outre, des parcelles expérimentales de mesure du ruissellement ont été installées à l'échelle de la parcelle de type Wischmeier de 1 m<sup>2</sup> pour mesurer l'effet des aménagements sur la réduction du ruissellement et de l'érosion (MES). À l'échelle ponctuelle, la méthode de sondage neutronique étalonnée grâce aux mesures gravimétriques a été utilisée pour suivre l'évolution de l'humidité du sol. Cela va nous permettre d'évaluer l'efficacité du sous-solage simple, du branchage simple et du sous-solage-ensemencement-branchage sur l'amélioration des conditions hydriques du sol. Par la suite, des

mesures de la végétation ont été effectuées afin d'évaluer l'effet de ces trois techniques sur la croissance de la végétation.

Enfin, pour chaque paramètre mesuré (végétation, ruissellement et humidité du sol), la méthode d'analyse des données a été présentée de façon succincte afin d'explicitier les résultats présentés dans le cadre de travail.

## Chapitre 4. L'analyse des effets des techniques d'aménagement sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant et de la parcelle

---

*Ce chapitre présente les résultats des mesures de ruissellement effectuées à l'échelle du bassin versant et celle de la parcelle élémentaire. Après une présentation de l'évolution de la pluviométrie, durant la période de l'expérimentation, suit la caractérisation de l'occupation du sol du site d'étude. Par la suite, il expose la relation entre la pluie et la lame ruisselée, la comparaison des effets des techniques d'aménagement sur la variation du coefficient du ruissellement, et enfin, l'analyse des pertes en terre.*

---

### 4.1. L'analyse de la pluviométrie des années d'observation

Les données récoltées avec les pluviomètres et les pluviographes installés sur le site d'étude ont permis de caractériser l'évolution de la pluviométrie durant la période d'observation comme l'indique le tableau 11. Ce tableau présente un résumé des caractéristiques de la pluviométrie de 2016 à 2020.

*Tableau 11. Quelques caractéristiques de la pluviométrie durant la période d'observation (2016-2020) sur le site d'étude.*

<b>Variables/Années</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Cumul saisonnier (mm)</b>	583	365	429	439	628	489
<b>Nombre de jours des pluies</b>	33	28	28	34	28	30
Nombre d'averses $\geq 10$ mm	17	17	17	17	19	17
Nombre d'averses $\geq 30$ mm	5	4	6	7	7	6
Nombre d'averses $\geq 50$ mm	2	1	1	0	3	1

L'analyse du tableau ci-dessus montre que la dernière année d'observation (2020) est excédentaire avec un cumul de 628 mm. Par contre, les années 2016, 2017, 2018 et 2019 sont déficitaires par rapport à la moyenne sur les 5 années d'observations et à la moyenne sur 30 ans de suivi (soit 560 mm) sur le site d'étude. En revanche, le nombre de jours des pluies et le nombre d'averses  $\geq 10$  et 30 mm respectivement sont presque similaires durant la période intense de collecte des données (2016 à 2018).

#### 4.2. L'occupation du sol à l'échelle du site et caractéristique du bassin versant TK-IBM

À l'aide des images de haute résolution, l'étude cartographique réalisée a permis de ressortir l'occupation du sol sur le site d'étude. La méthode de traitement de celles-ci (images) se base sur l'orthophoto avec le logiciel Agisoft PhotoScan. Le but est de mettre en évidence le rôle déterminant que jouent les états de surface dans le comportement hydrologique à l'échelle de la parcelle et celle du bassin versant. La figure 46 donne la situation générale d'occupation du sol sur le site d'étude.

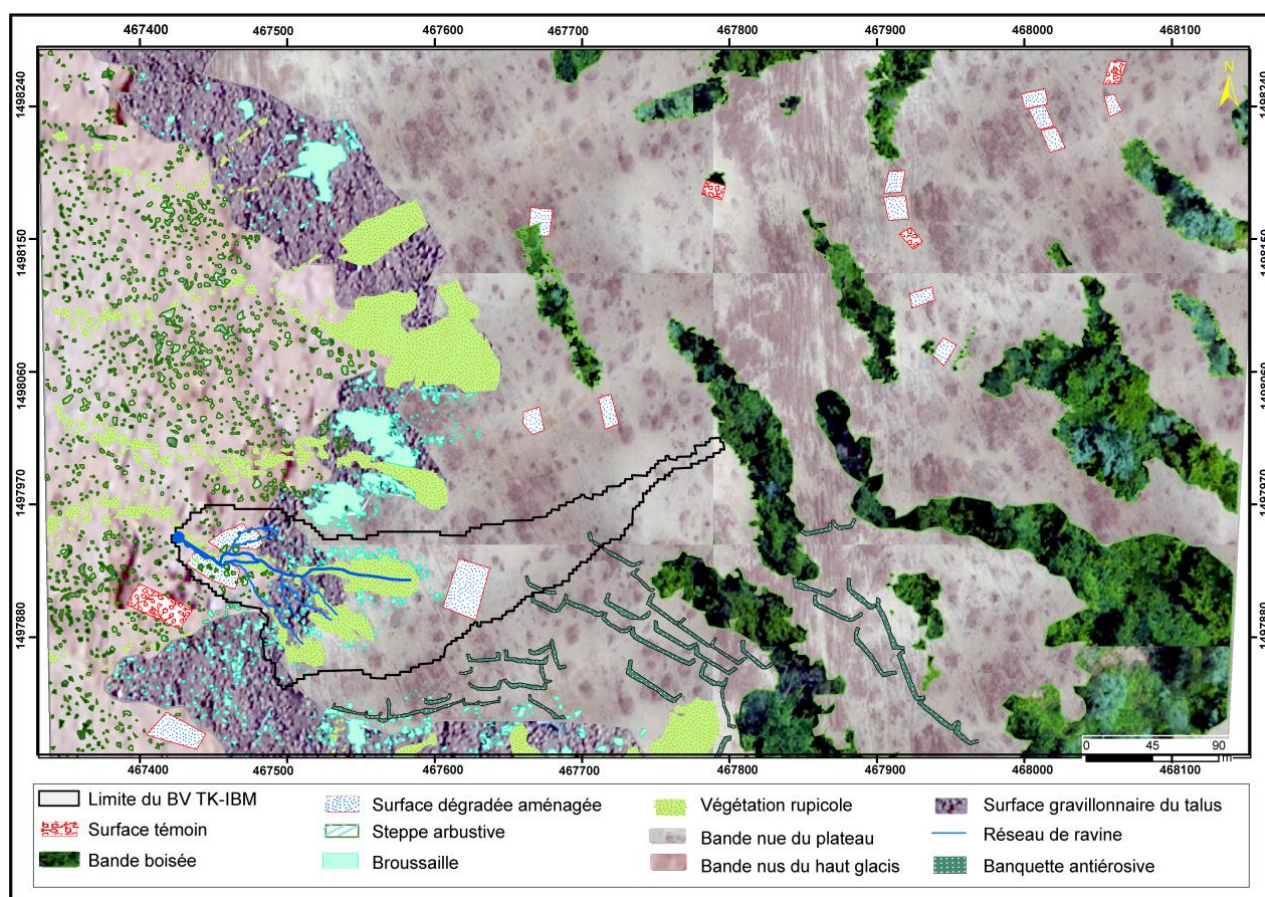


Figure 46. L'occupation du sol sur le site d'étude (Tondi Kiboro).

L'observation de la figure 46 montre une importante proportion des surfaces nues productrices du ruissellement que ce soit sur le plateau, sur le talus ou sur le haut glacis encroûté. Cette situation est la résultante de la dégradation des bandes de végétation liée concomitamment aux effets des sécheresses successives et à la pression démographique (Souley Yero, 2012 ; Ozer et al., 2016 ; Lebel et al., 2018). En effet, la multiplication des surfaces nues engendre l'augmentation du ruissellement, un phénomène favorable à l'érosion du sol, mais aussi à la dégradation progressive

de la végétation. Les principales classes d'occupation du sol, témoignant de cette situation, en 2019, sont résumées dans la figure 47.

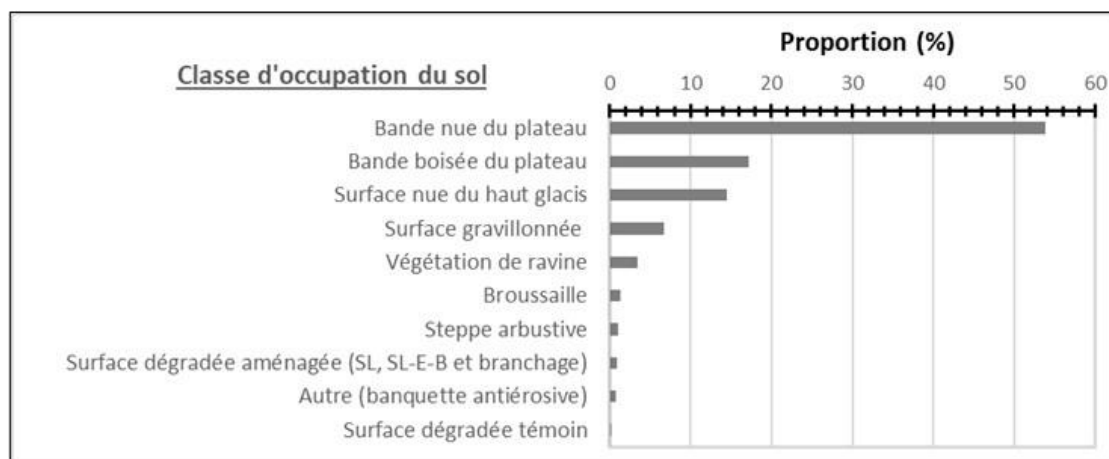


Figure 47. Les proportions des classes d'occupation du sol par rapport à la superficie totale du site d'étude.

En effet, la dégradation des bandes boisées du plateau très nettement visible sur le terrain se manifeste, non seulement, par l'entrecouplement favorisé parfois par la présence des termitières et des chenaux de transit des eaux de ruissellement, mais aussi, par la présence des dépôts sableux très importants en amont des bandes boisées dégradées comme l'indique la figure 48. Les dépôts sableux qui se développent aux alentours des bandes boisées constituent des obstacles à l'alimentation de celles-ci en apports supplémentaires d'eau du ruissellement venant de l'amont (bande nue) conformément au sens de la pente. Ce qui entraîne leur dégradation et la mise en place des proportions énormes de surfaces dénudées sur lesquelles se développent les états de surfaces tels que la croûte structurale favorable au ruissellement.

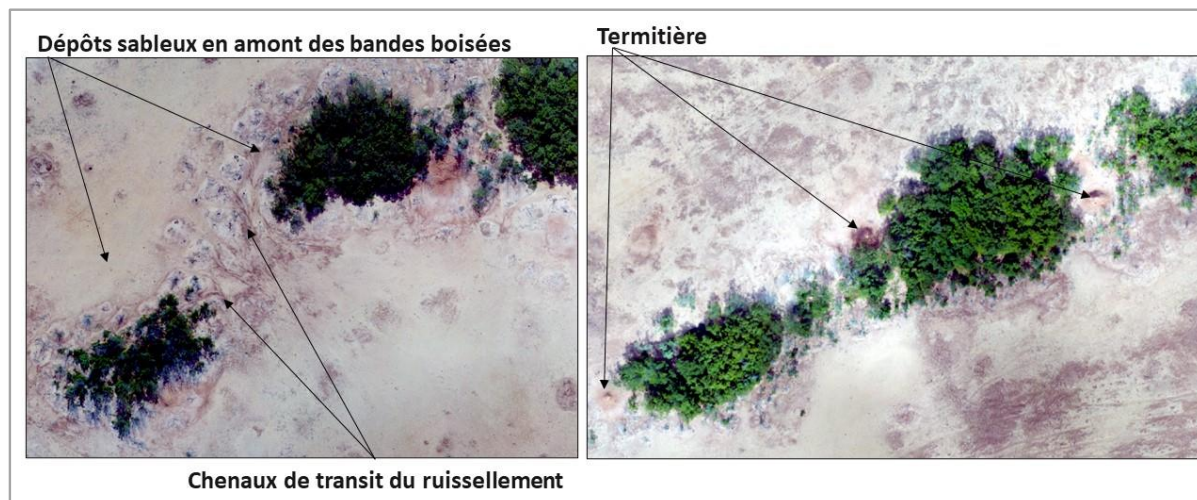


Figure 48. L'illustration de quelques obstacles entravant l'alimentation en eau des bandes boisées de la brousse tigrée et, par conséquent, leur dégradation.



Les dépôts sableux visibles en amont des surfaces dégradées provoquent le contournement des énormes quantités d'eau de ruissellement destinées à l'alimentation et au maintien de la dynamique de la végétation (Galle et al., 1997). Ces quantités d'eau entraînent un ruissellement élevé et des pertes en terres considérables sur les unités en aval. En plus, la configuration du paysage et de la géomorphologie du secteur d'étude comme représenté par le modèle numérique de terrain (figure 49) est favorable à cette dynamique hydrologique, c'est-à-dire le transit d'énormes quantités d'eau des parties en amont vers celles en aval.

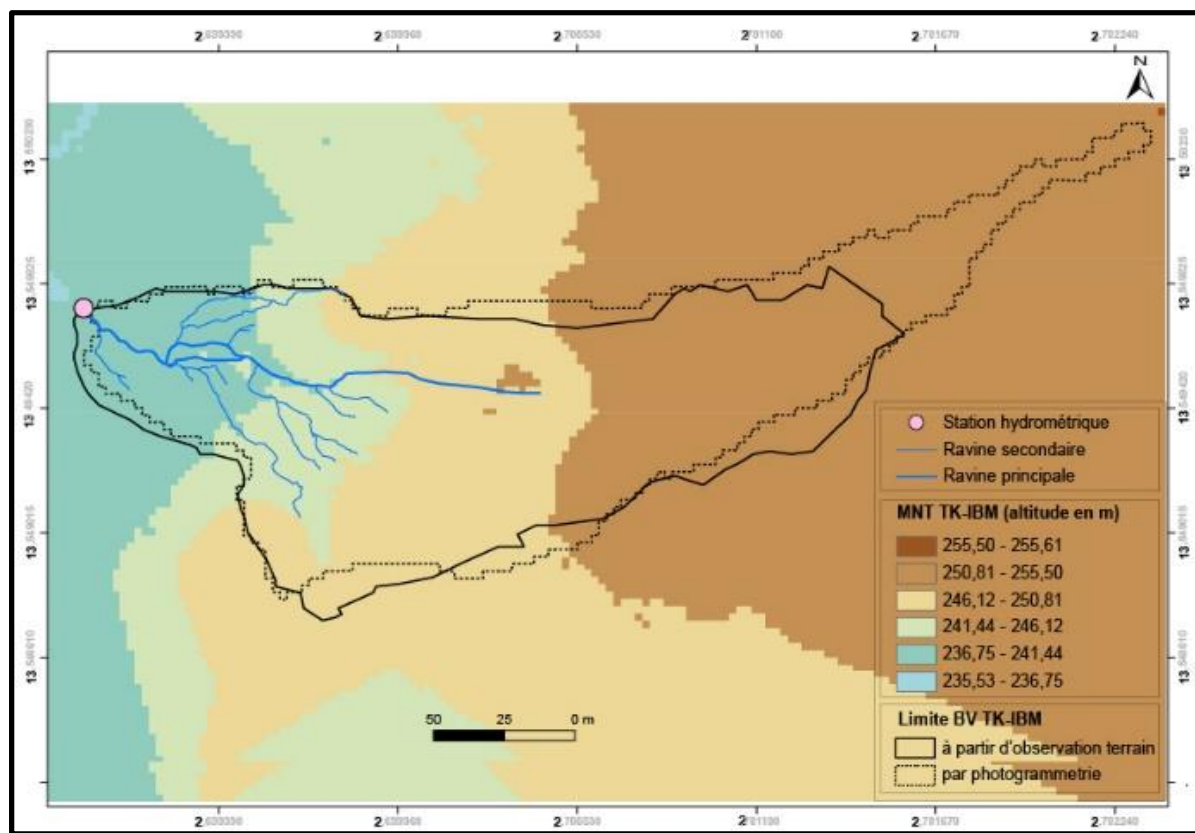


Figure 49. Du modèle numérique de terrain à la délimitation du BV TK-IBM.

La figure 49 montre le résultat de l'application des deux techniques pour la délimitation du BV TK-IBM. Ainsi, une limite provisoire a d'abord été obtenue à travers les simples observations de la configuration du terrain (relevé points GPS). Cette limite a été obtenue par l'utilisation de MapSource, Excel et ArcGIS. Puis, une limite définitive a été obtenue par la méthode photogrammétrique. En effet, 1278 images drones ont été traitées avec le logiciel Agisoft PhotoScan. Cela nous a permis d'obtenir un modèle numérique de terrain de 0,43 m de résolution spatiale. Ce MNT a ensuite été transféré dans le logiciel ArcGIS 10.8 pour délimiter précisément le BV TK-IBM dont la procédure de traitement est décrite dans l'annexe 3. Ce modèle numérique de terrain montre la configuration topographique de ce BV. Les ruissellements drainés sur les surfaces les plus élevées (revers du plateau) se concentrent dans les ravines secondaires puis dans la ravine principale.

La section suivante analyse, de façon détaillée, les effets des différentes techniques d'aménagement sur la réduction du ruissellement à l'échelle de la parcelle élémentaire et celle du BV.

### **4.3. Les effets des techniques d'aménagement sur le ruissellement à l'échelle du BV**

Les effets des techniques d'aménagement à l'échelle du bassin versant ont été évalués de façon globale, c'est-à-dire sans distinction des effets de telle ou telle technique. Ainsi, l'application des techniques du sous-solage et de son association avec l'ensemencement et le branchage ont été comparées pendant la situation avant et celle après aménagement du bassin versant TK-IBM. L'année 2016 correspond à la situation avant aménagement ou témoin et l'année 2017 représente la situation après aménagement. La comparaison a pris en compte les pluies de hauteurs et d'intensités similaires, de même que la situation de début (juin), du milieu (août) et de la fin de la saison pluvieuse. Les résultats utilisés pour établir cette comparaison représentent les cotes d'eau automatiquement enregistrées par le Thalimèdes, faute d'utiliser les débits. Rappelons que les débits n'ont pas pu être déterminés à cause des défaillances techniques relevées lors des différentes campagnes des mesures hydrométriques (cf. § 1.7). Ainsi, pour étudier l'impact hydrologique des différentes techniques d'aménagement à l'échelle du bassin versant, sont comparées les cotes d'eau enregistrées de façon automatique avant et après réalisation de ces aménagements. Il faut par ailleurs noter que les résultats de la comparaison du fonctionnement de la station hydrométrique TK-IBM et la station TK amont sont présentés dans l'annexe 7.

La figure 50 montre, dans ce sens, les fluctuations des cotes (hauteurs) d'eau mesurées à l'aide du Thalimèdes installé à l'exutoire du bassin versant TK IBM. D'après l'analyse de cette figure, on constate une différence assez significative dans l'évolution des cotes d'eau (cm) mesurées durant les périodes avant (2016) et après aménagement (2017), notamment du point de vue de la forme des histogrammes. C'est le cas illustratif de la pluie de 24 mm du 16 août 2016. Cette pluie de la situation avant aménagement a provoqué un pic de 11 cm (figure 50 a). Alors que la pluie de 23 mm (129 mm/h) le 07 août 2017, de la situation après aménagement, n'a provoqué qu'un pic de 7 cm (figure 50 b). Ces deux cas de figure montrent que les pics sont plus ou moins aplatis après aménagement, mais plus pointus avant aménagement. Cette différence a été observée bien que l'intensité de la pluie du 07 août 2017 soit plus importante que celle du 16 août 2016. Cela traduit, donc, une légère diminution des écoulements après aménagement en 2017. Cette diminution résulte

de l'effet combiné des techniques de SL et de combinaison du SL-E-B en 2017.

Le deuxième cas illustratif est celui de la pluie du 20 septembre 2017. L'intensité (19 mm/h) et la hauteur de cette pluie (28 mm) enregistrées également après aménagement du bassin versant sont plus élevées par rapport à la pluie du 13 septembre 2016 (22 mm, mais avec 9 mm/h). Pourtant, le pic de cette dernière pluie est plus élevé (13 cm) que le pic de la pluie de 28 mm, soit 12 cm, voire respectivement la figure 50 c et figure 50 d. Ces résultats montrent que l'aménagement par SL et l'association du SL-E-B a eu un effet sur la réponse à l'exutoire du bassin versant TK-IBM, notamment sur la diminution des écoulements. Ces derniers sont plus élevés avant aménagement et moins élevés après aménagement du bassin versant.

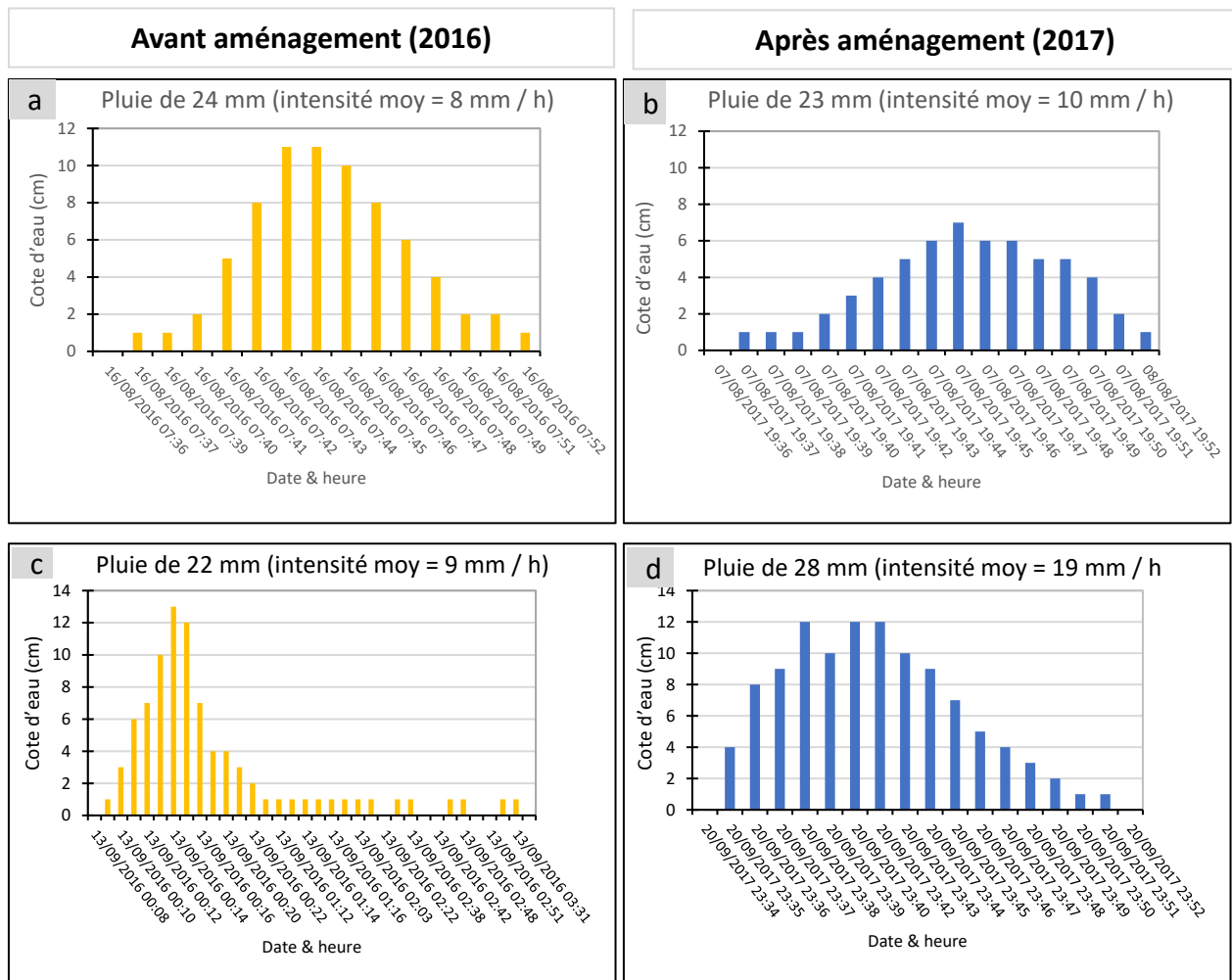


Figure 50. La variation des hauteurs d'eau enregistrées avant et après aménagement.

Des résultats similaires ont été obtenus par Ingatan Warzagan (2020). Il a comparé la technique du sous-solage motorisé avec la technique de banquette. Mais les résultats issus de cette comparaison ont démontré que la technique de banquette est plus efficace en termes de durabilité par rapport à la technique du sous-solage dans la diminution du Kr % à l'exutoire du bassin versant. En fait, les effets bénéfiques de la technique du sous-solage des sols sableux dégradé s'amenuisent avec le temps et les quantités de pluies reçues (Malam Abdou, 2016 ; Boubacar Na-Allah et al., 2017). D'où l'apparition du phénomène du réencroûtement observable à l'échelle des parcelles.

#### **4.4. Les effets des techniques d'aménagement sur le ruissellement à l'échelle de la parcelle élémentaire**

L'ensemble des mesures du ruissellement effectuées de 2016, 2017, 2018, 2019 et 2021 sont présentées dans le tableau 12.

*Tableau 12. Le nombre total de mesures de ruissellement effectuées et utilisées à l'échelle des parcelles élémentaires.*

Année	Nombre total d'évènements pluvieux	Nombre d'évènements pluvieux	
		Rejetés	Retenus
2016	15	1	14
2017	14	1	13
2018	15	0	15
2019	15	6	9
2021	13	7	6

Parmi ces mesures d'autres n'ont pas été prises en compte parce qu'elles sont peu fiables dans l'analyse des résultats à cause de quelques données des parcelles annulées surtout en 2019 et en 2021. En fait, l'utilisation des résultats lors d'évènements pluvieux où quelques données de parcelles sont annulées ne donne pas lieu de faire des comparaisons fiables. Il s'agit le plus souvent des données issues des fortes pluies, en général supérieures à 60 mm. Celles-ci ont engendré le débordement rapide des tonneaux utilisés. À titre d'exemple, le 17 juillet 2016, il est tombé une pluie de 60 mm en moyenne avec une intensité maximale de 153 mm/h. Cette pluie de forte intensité a entraîné le remplissage et le débordement des futs avec comme conséquence des dégâts sur les installations (figure 51).



Figure 51. La perturbation du fonctionnement des parcelles de ruissellement causée par la pluie du 17 juillet 2016.

Dans ce cas de figure, l'ensemble des données de cet évènement pluvieux sont rejetées. En fait, dans la réalité, l'augmentation de la lame ruisselée sur les parcelles expérimentales de ruissellement s'explique par la hauteur de la pluie (Bouzou Moussa et al., 2020 ; Malam Abdou, 2014). Mais dans certains cas, cela s'explique par les équipements de mesure (tonneaux ou futs) installés sur le plateau latéritique qui est une unité géomorphologique avec des pentes faibles (Massuel, 2005). Et cela donne aux eaux de ruissellement l'aptitude à s'organiser rapidement en flaques d'eau. Ce qui entraîne la perturbation du fonctionnement de notre dispositif de mesure du ruissellement.

### ➤ La relation pluie-lame ruisselée par technique d'aménagement

Les figures 52 et 53 représentent la relation entre les pluies tombées et les lames ruisselées. L'observation de la figure 52 montre que la dispersion des nuages de points est plus ou moins homogène sur les trois parcelles témoins (P3, P6 et P11) durant les trois ans de mesure (2016, 2017 et 2018). Il en est de même pour les parcelles du haut glacis encroûté. Les lames ruisselées par pluie sont presque identiques pour les parcelles témoins, dans la mesure où certains nuages de points de la P6 (témoin II) se superposent avec ceux de la P3 (témoin I). Dans certains cas, on peut observer une dispersion des nuages de points, mais moins marquée.

Par contre, une certaine hétérogénéité s'observe entre les nuages des points représentant les lames ruisselées sur les parcelles aménagées notamment P1 (SL I), P2 (SL-E-B I) et P11 & P12 (branchage I et II) de 2016 à 2018 (figure 53).

Cette situation se présente du fait que ces parcelles ont été aménagées avec différentes techniques

(cf. § 2,5). En effet, les points communs entre les parcelles aménagées demeurent le sous-solage ou le branchage et parfois la reprise d'une deuxième fois du remaniement de sol. Cependant, l'aménagement qui est le dominateur commun entre les parcelles aménagées n'est forcément pas synonyme du comportement hydrique identique des parcelles. L'hétérogénéité des données est parfois liée à la différence des quantités précipitées. Pendant les pluies de quantités moindres, le ruissellement a tendance à être faible. Mais lors des grosses pluies, il devient très élevé. Ce qui montre cette bonne relation entre la quantité de pluie tombée et la lame ruisselée. Malam Abdou (2014), a observé que cette relation peut s'expliquer jusqu'à 80 %.

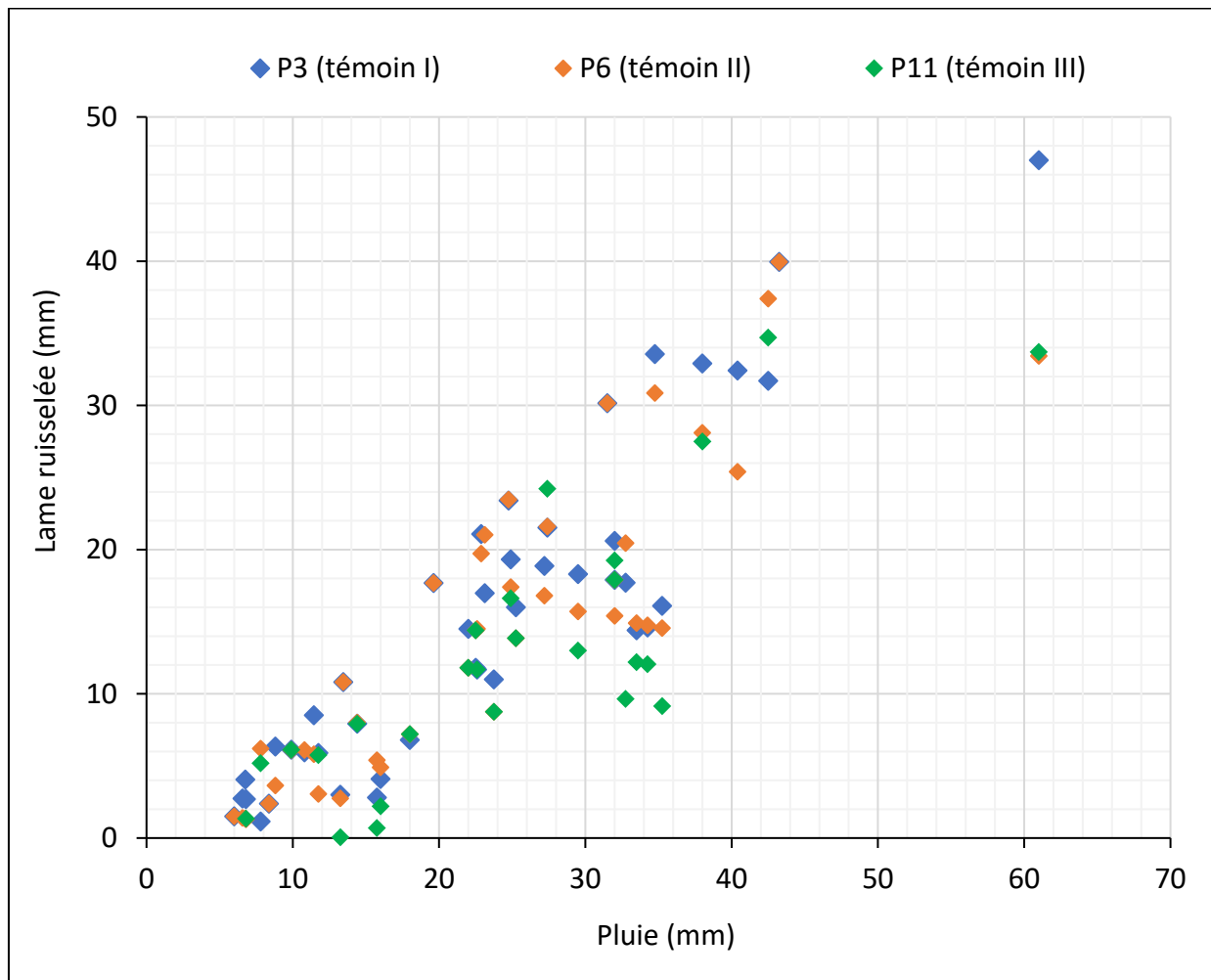


Figure 52. La relation des lames ruisselées dans les parcelles P3 (témoin I), P6 (témoin II) et P13 (témoin III).

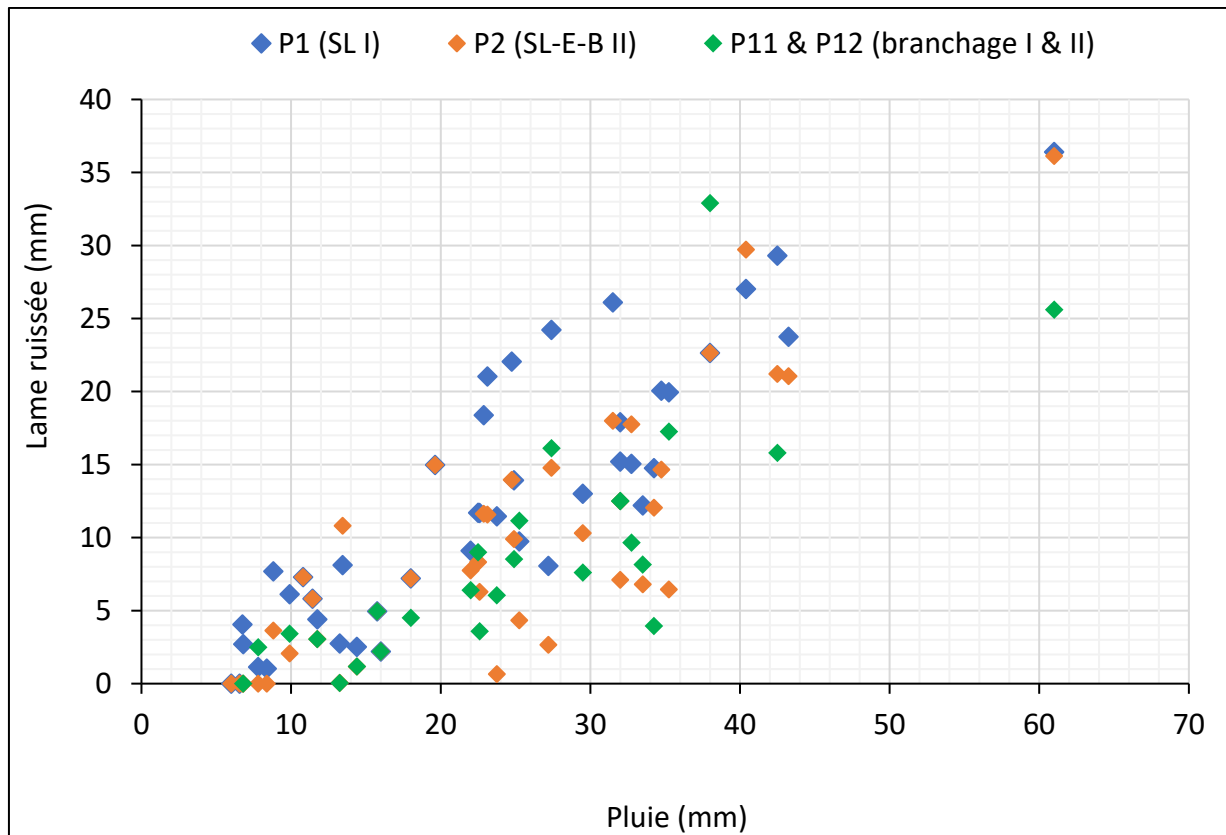


Figure 53. La relation des lames ruisselée dans les parcelles aménagées P1 (SL I), P2 (SL-E-B I), P11 (branchage I) et P12 (branchage II) de 2016 à 2018.

### ➤ Le test d'homogénéité des données

Le résultat sur la relation entre la pluie et la lame ruisselée est corroboré par celui du test statistique de Wilcoxon appliqué aux lames ruisselées obtenues sur les parcelles du ruissellement. Ce test s'applique à deux séries d'une variable quantitative (échantillons) mesurée sur des parcelles identiques (ici lame ruisselée), c'est-à-dire des parcelles possédant des traits communs. En l'occurrence, il mesure l'homogénéité du ruissellement entre les parcelles aménagées et les parcelles témoins. L'interprétation de ce test se fait en admettant deux hypothèses : l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) stipule que les deux échantillons observent la même loi de distribution, quant à l'hypothèse alternative ( $H_a$ ), les deux échantillons sont différents. D'après  $H_0$ , si les ruissellements générés par évènement pluvieux sur deux parcelles identiques observent la même loi de distribution avec un niveau de significativité seuil supérieur à 0,05,  $H_0$  doit être acceptée. À contrario, si la deuxième hypothèse ( $H_a$ ) mentionne que les ruissellements sont différents et ne découlent pas de



la même loi de distribution à un niveau de seuil de significativité inférieur à 0,05, H0 doit être rejetée, car elle est vraie seulement à un seuil inférieur à 5 %. Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 13. À noter que ce test a été fait sur la base des parcelles comparables (qui présentent les mêmes caractéristiques). De ce fait, sur le haut glacis, il n'y a que P9 (SL-E-B 5) et P17 (SL-E-B 4) qui ont été comparées, car P16 (témoin 4) et P18 (SL 4) ne possèdent des parcelles de répétition.

L'analyse du résultat du test de Wilcoxon montre que les deux séries des lames ruisselées dans le couple de parcelles témoins, ici les couples P3 & P6, P6 & P13, sont identiques, sauf pour le couple P3 & P13. Ce test montre également une homogénéité entre les couples des parcelles (P8 & P5, P2 & P4, P2 & P7, P4 & P7, P11 & P12), excepté les couples P1 & P5, P1 & P8. Cela montre que les techniques d'aménagement appliquées (sous-solage, ensemencement et branchage ou leur association) sont l'un des facteurs explicatifs du comportement hydrique des parcelles expérimentales. En ce qui concerne l'hétérogénéité observée au niveau des parcelles P1, P5 et P8 (aménagées uniquement par la technique du sous-solage), elle s'explique par les facteurs tels que la pente, les états de surface élémentaire et la reprise du sous-solage (cf. § 2.6). Cela montre que les parcelles aménagées par sous-solage simple et celles dont le remaniement du sol a été repris plusieurs fois peuvent ne pas se comporter de la même façon du point de vue hydrique. Ainsi, la parcelle P1 (sous-solée une seule fois en 2016) se comporte différemment de la parcelle P8 (remaniée à trois reprises). Cela est valable pour le cas du couple des parcelles P2 & P7 aménagées par association du sous-solage-ensemencement-branchage en 2016. En fait, le sous-solage effectué en 2016 n'a pas été repris en 2017 et 2018 dans la P2. Par contre, il a été repris trois fois (2016, 2017 et 2018) dans la P7. Néanmoins, le comportement hydrique dans ces parcelles est identique.

Cela s'explique par l'intervention d'autres facteurs qui décrivent cette différence de comportement du point de vue hydrologique (Zoure, 2019). Ces facteurs sont les changements des états de surface combinés avec l'influence du rôle des branchages (termites), l'ensemencement (développement du couvert végétal) et surtout la forte intensité des pluies au début de l'averse (Panthou, 2013). Casenave (1991) et Casenave & Valentin (1989, 1994) ont montré le rôle prépondérant des états de surfaces comme la clef qui explique l'hydrologie au Sahel. Ainsi, la figure 54 présente les différents états de surface relevés en 2018 dans les parcelles expérimentales du revers du plateau.

Tableau 13. Le résultat du test de Wilcoxon appliqué aux lames ruisselées par parcelle ayant des traits communs, ici aménagement et sans aménagement (témoins) durant les années 2016, 2017 et 2018.

Unité	Mesure 1	Mesure 2	P-value	Résultat
Plateau	P3 (témoin I)	P6 Témoin II	0,32	Accepté
Plateau	P3 (témoin I)	P13 (témoin III)	0,01	Rejeté
Plateau	P6 (témoin II)	P13 (témoin III)	0,38	Accepté
Plateau	P1 (SL I)	P5 (SL II)	0,05	Rejeté
Plateau	P1 (SL I)	P8 (SL III)	0,51	Rejeté
Plateau	P8 (SL III)	P5 (SL II)	0,84	Accepté
Plateau	P2 (SL-E-B I)	P4 (SL-E-B II)	0,28	Accepté
Plateau	P2 (SL-E-B I)	P7 (SL-E-B III)	0,71	Accepté
Plateau	P4 (SL-E-B II)	P7 (SL-E-B III)	0,71	Accepté
Plateau	P11 (branchage I)	P12 (branchage II)	0,69	Accepté
Glacis	P9	P17	0,50	Accepté

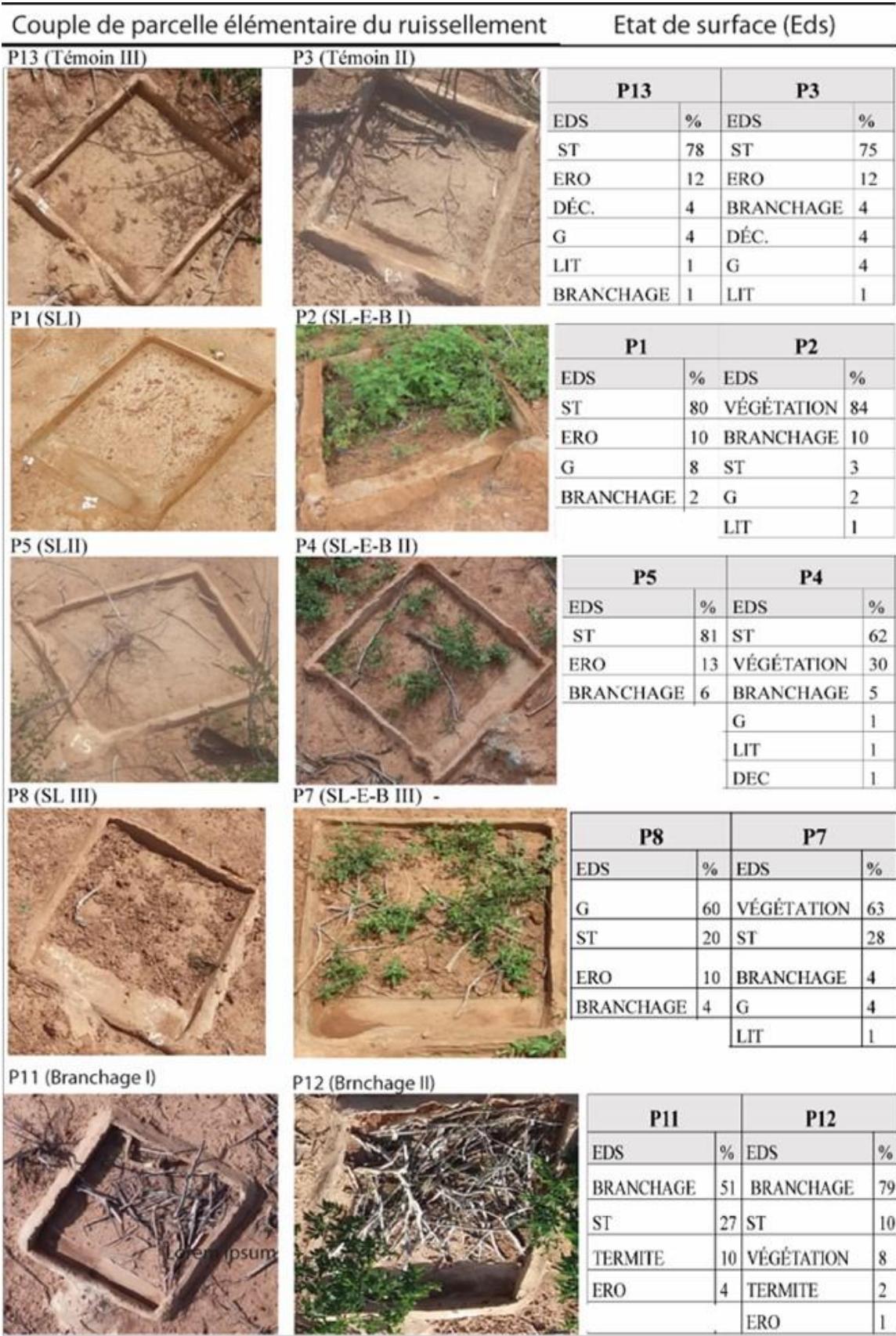


Figure 54. Les types d'états de surface et leur proportion (%) dans les parcelles élémentaires.

L'observation de la figure 54 montre quelques parcelles expérimentales aménagées et témoins et les proportions des états de surface dans des tableaux respectifs.

D'après les relevés réalisés en septembre 2018, on remarque une prédominance de la croûte structurale (ST) dans les parcelles témoins (P3 et P13) avec une proportion de 78 % suivies de la croûte d'érosion (ERO = 12 %), de la croûte de décantation (DÉC. = 4 %) et de la croûte gravillonnaire (G = 4 %). Il faut noter que ces organisations pelliculaires superficielles (OPS) forment des surfaces élémentaires productrices de ruissellement comme l'a rapporté Malam Abdou et al. (2016).

Quant aux parcelles aménagées en 2016, les états de surface ont été modifiés du fait des techniques d'aménagement appliqué comme l'illustre la figure 55. Ceci peut jouer un rôle important sur la limitation du ruissellement, mais toujours en fonction du cumul de pluviométrie (Malam Abdou, 2016) et surtout du développement de la végétation (figure 55). En effet, dans les parcelles traitées par l'association des techniques du sous-solage-ensemencement-branchages, on note comme principaux états de surfaces relevés en 2018 : la végétation (V), la croûte structurale (ST), quelques brindilles de bois, la croûte gravillonnaire (G), et la litière (Lit). Albergel et al. (1986) ont démontré l'importance de tenir compte des changements qui interviennent avant et après la repousse de la végétation dans les surfaces aménagées pouvant conduire à des modifications des états de surface, et donc du comportement hydrologique.



Figure 55. L'impact de l'aménagement sur la modification des états de surface des parcelles expérimentales de ruissellement, cas de la parcelle P7 (SL-E-B III). À gauche, c'est la situation de



*la parcelle juste après aménagement par sous-solage-ensemencement-branchage en 2016 et à droite, c'est la situation de la même parcelle après trois ans (en 2019).*

#### **4.4.1. L'analyse comparée du coefficient de ruissellement par technique d'aménagement**

Rappelons que les parcelles élémentaires du ruissellement de 1 m<sup>2</sup> sont installées dans les parcelles aménagées d'échelle plus petite (150 m<sup>2</sup> voire plus). De ce fait, dans l'analyse des résultats du ruissellement, nous considérons à titre indicatif que le même comportement hydrologique observé à l'échelle élémentaire d'un mètre carré reste extrapolable à l'échelle des parcelles de plus grandes dimensions (par exemple 150 m<sup>2</sup>).

##### **4.4.1.1. L'évolution du coefficient de ruissellement par technique d'aménagement appliquée sur le revers du plateau**

###### **➤ La technique du sous-solage simple**

La figure 56 montre l'évolution du coefficient de ruissellement dans les parcelles élémentaires aménagées uniquement par la technique du sous-solage, le cas des parcelles P1 (SL I), P5 (SL II) et P8 (SL III).

L'analyse de cette figure indique une tendance à la hausse du coefficient de ruissellement (Kr) annuel (passant de 42 % en 2016 à 53 % en 2018) dans les parcelles élémentaires remaniées une seule et unique fois en 2016, soit une augmentation de 11 %. Cette hausse du ruissellement se constate également dans la parcelle élémentaire remaniée deux fois en 2016 et 2017. Les Kr dans cette dernière passent de 40 % en 2016 à 46 % en 2018, soit une augmentation de 4 %. En revanche, dans cette parcelle (P5), le kr fluctue de 40 % en 2016 à 35 % en 2017, soit une diminution de l'ordre de 5 % du fait que le remaniement a été réeffectué successivement pendant ces deux années (2016 et 2017).

Cependant, dans la parcelle élémentaire remaniée à trois reprises (P8) en 2016, 2017 et 2018, la figure traduit une tendance à la baisse du coefficient du ruissellement. Dans cette parcelle (P8\_SL III), le Kr varie de 42 % en 2016 à 40 % en 2018, soit une diminution moins significative estimée à 2 %, malgré les opérations annuelles de reprises du sous-solage.

Des résultats similaires ont été obtenus par Malam Abdou (2016) dans le contexte des sols sahéliens dégradés cultivés par sarclage ou par la charrue à traction animale. Il démontre que ces sols sont très susceptibles au ruissellement après un cumul de pluie de plus de 60 mm. En outre, ces sols cultivés (champs de mil) peuvent parfois produire du ruissellement plus que la jachère et à peu près comme le sol encroûté (croûte ERO).

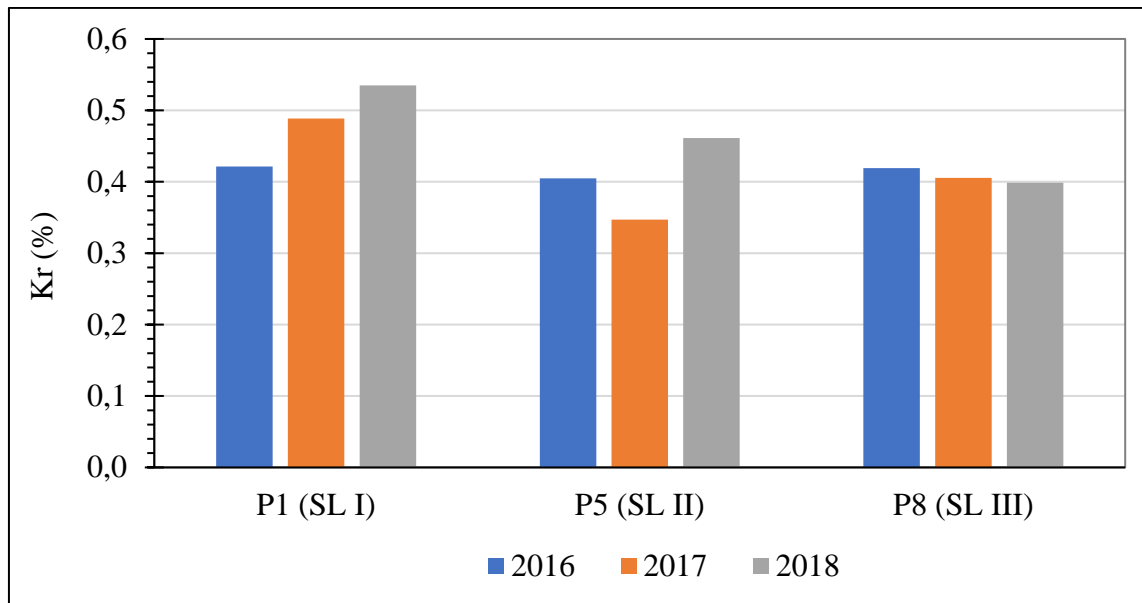


Figure 56. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple sur le revers du plateau.

### ➤ La technique du sous-solage-ensemencement-branchage

La figure 57 présente l'évolution du coefficient de ruissellement dans les parcelles expérimentales aménagées par l'association du sous-solage-ensemencement-branchage à savoir la P2 (SL-E-B I), P4 (SL-E-B II) et P7 (SL-E-B III).

L'analyse de cette figure montre une tendance à l'augmentation du coefficient de ruissellement annuel dans la parcelle P2 (SL-E-B I). Le coefficient de ruissellement dans cette parcelle passe de 31 % en 2016 à 39 % en 2018, soit une augmentation de 8 %. Presque la même tendance s'observe dans la parcelle SL-E-B II (P4) avec un coefficient de ruissellement qui passe de 31 % en 2016 à 35 % en 2018. Mais dans cette parcelle (P4), le Kr annuel diminue significativement de 1 %, de 2016 à 2017. Cette différence de comportement hydrologique entre ces deux parcelles aménagées

par la même technique (SL-E-B) s'explique par la reprise du sous-solage. En effet, la parcelle SL-E-B I a été remaniée une seule fois en 2016, alors que la parcelle SL-E-B II a été remaniée à deux reprises en 2016 et en 2017. Cela traduit l'importance de la reprise du sous-solage dans la réhabilitation du comportement hydrique des sols dans les parcelles aménagées par la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage.

Ceci est corroboré par le comportement hydrologique observé dans la parcelle SL-E-B III (P7). Dans cette dernière, l'évolution montre que le coefficient du ruissellement passe de 31 % en 2016 à 26 % en 2018, soit une tendance à la diminution estimée à 5 %. Mais cette évolution s'est marquée avec une légère augmentation de 2016 (31 %) à 2017 (32 %). Dans tous les cas de figure, la diminution de coefficient du ruissellement dans les parcelles aménagées par la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage a été plus significative dans la parcelle SL-E-B III (P7).

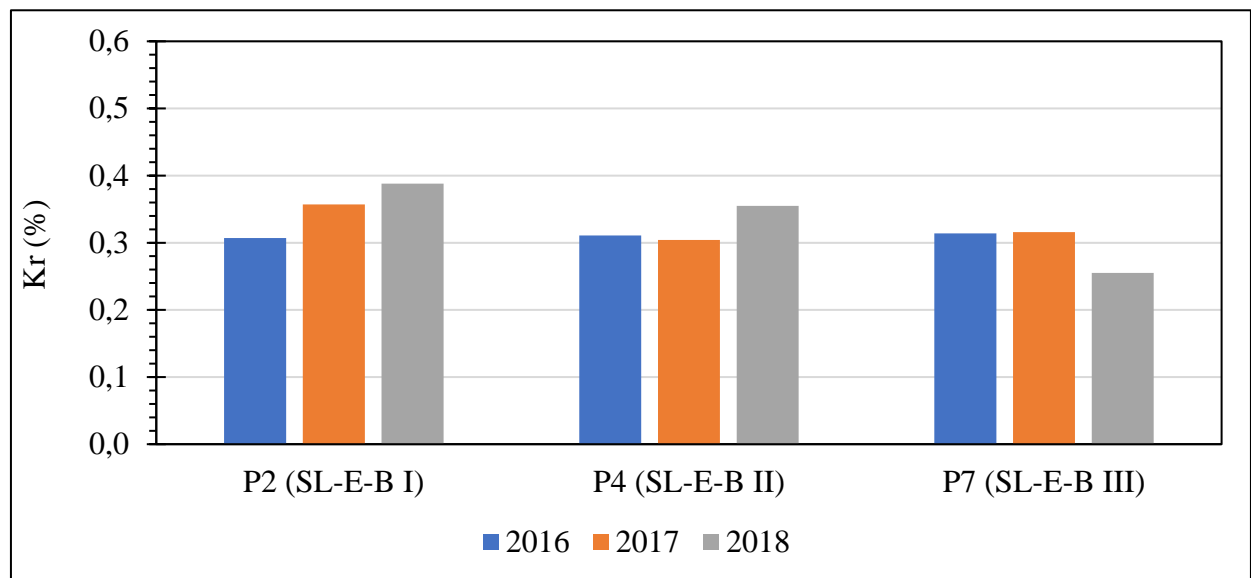


Figure 57. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par association du sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.

### ➤ La technique du branchage

La figure 58 met en évidence l'évolution de coefficient du ruissellement dans les parcelles expérimentales aménagées par la technique de branchage à savoir la P11 et la P12. Dans ces parcelles, la tendance générale de l'évolution du coefficient de ruissellement est à la baisse. Ainsi,



le kr a évolué de 34 % en 2017 à 28 % en 2018 dans la P11, soit une baisse de 6 %. Il passe de 50 % en 2017 à 23 % en 2018, soit une baisse de 28 %. Ce qui représente la baisse la plus significative du coefficient de ruissellement. La différence de comportement hydrologique observée à l'échelle de ces deux parcelles s'explique par les quantités de branches éparpillées, soit  $\approx 1$  kg sur la P11 et  $\approx 1,4$  kg sur la P12 (cf. figures 54 P11 & P12). Le taux de couverture dans ces deux parcelles sont estimés à 50 % dans la P11 et à 90 % dans la P12. Des résultats similaires ont été obtenus par Léonard & Rajot (1998) sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup> couvert à 90 % par la paille (chaume de mil et d'herbacée). Cette technique a permis d'augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol à 56 %, et par conséquent la baisse du ruissellement à l'échelle de la parcelle.

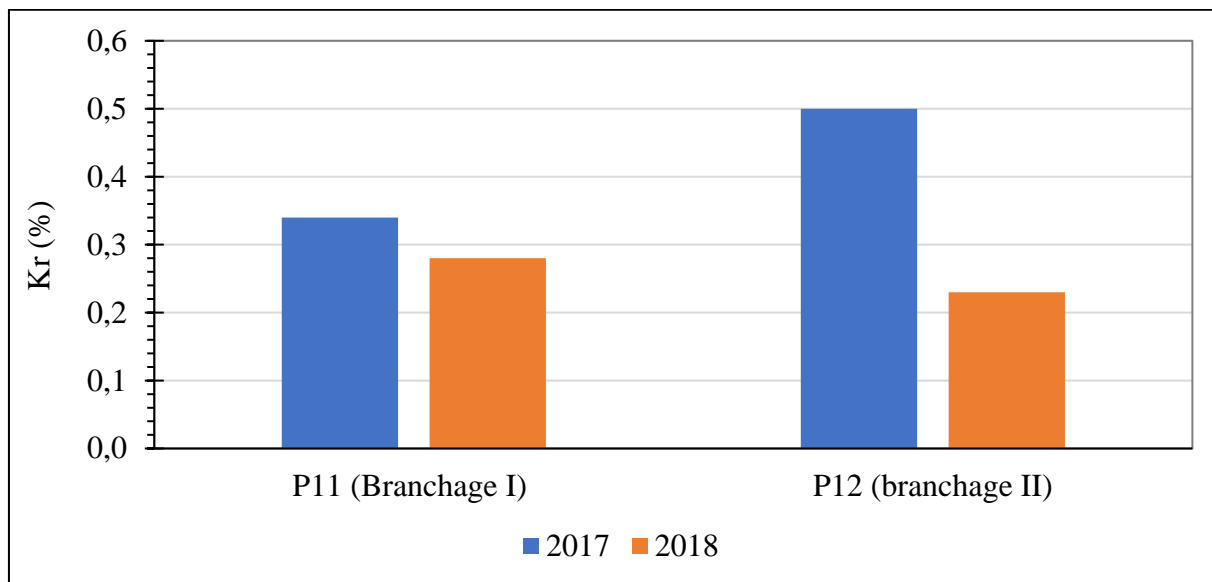


Figure 58. L'évolution de coefficient du ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du branchage.

### ➤ Les résultats obtenus dans les parcelles témoins

La figure 59 illustre la variation des coefficients de ruissellement dans les parcelles élémentaires témoins. À titre d'exemple dans la parcelle témoin I (P3), le kr évolue de 52 % en 2016 à 53 % en 2018, et de 53 % en 2016 à 57 % en 2018 dans la parcelle témoin II (P6), soit des augmentations respectives de 1 % et 4 % (en moyenne 2 %). Ce résultat montre que, malgré la différence du cumul pluviométrique annuel qui est de 583 mm en 2016 et de 429 mm en 2018, le kr maintient une

tendance générale à la hausse. Ce qui témoigne d'un phénomène de dégradation progressive des sols.

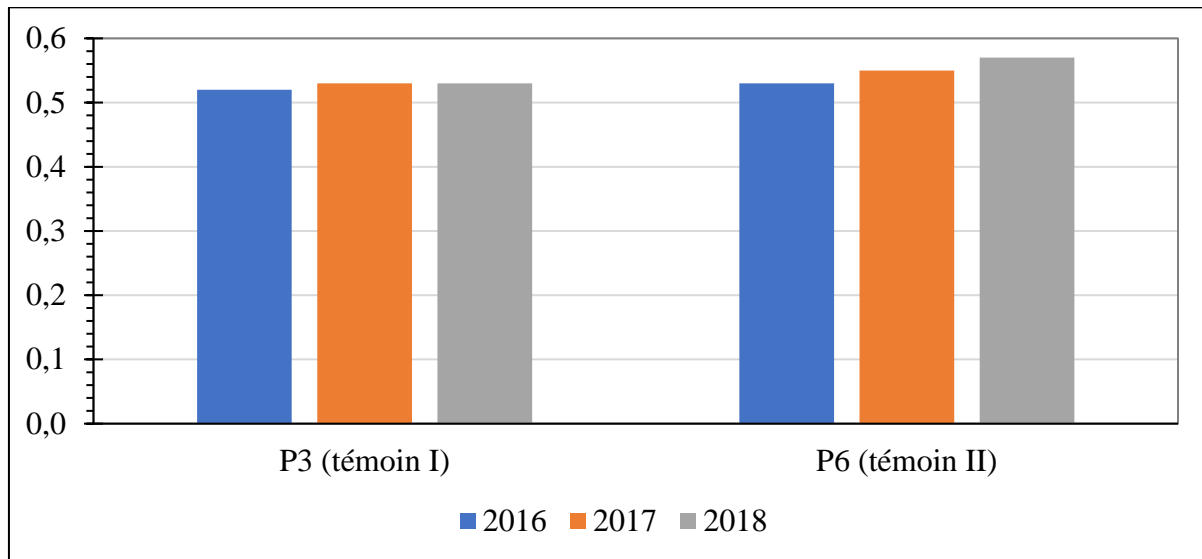


Figure 59. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles témoins installées sur le revers du plateau.

L'observation de la figure 59 montre que le coefficient de ruissellement varie faiblement sur les parcelles élémentaires témoins par rapport à ce qui été observé dans les parcelles aménagées par les techniques de SL, SL-E-B et branchage. Dans ces dernières, le coefficient de ruissellement fluctue en diminuant, parfois, en fonction des techniques appliquées et des opérations de réaménagement (cf. figures 56, 57, 58 & 59).

### ➤ Synthèse des résultats et comparaison avec le témoin

Sur la période des trois années d'observation, la valeur la plus élevée du coefficient de ruissellement moyen a été enregistrée dans les parcelles élémentaires témoins (non aménagée) contre des valeurs relativement faibles en fonction des parcelles élémentaires aménagées (figure 60). Cette figure montre que le coefficient de ruissellement moyen dans les parcelles élémentaires témoins est de l'ordre de 52 % contre 48 % dans la SL I, 41 % dans la SL III, 35 % dans la SL-E-B I, 34 % dans le branchage et seulement 29 % dans la SL-E-B III. Ce dernier résultat traduit la baisse du ruissellement la plus significative dans la parcelle aménagée par association du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B III). Cela s'explique par le remaniement à trois

reprises en 2016, 2017 et 2018. En revanche, dans la parcelle SL III aménagée par la technique du sous-solage simple, le coefficient de ruissellement moyen reste relativement élevé malgré le fait qu'elle a été remaniée à trois reprises durant la même période indiquée (2016 à 2018). Ce résultat montre que la technique du sous-solage simple est moins efficace dans la restauration des bandes dégradées de la brousse tigrée. Et cela même, dans le cas où le sol est remanié à plusieurs reprises. En outre, la comparaison de coefficient du ruissellement annuel (48 %) dans la parcelle SL I (remaniée une fois en 2016) avec celui dans la parcelle témoin (52 %) montre que la différence de la réponse hydrologique de ces deux parcelles n'est que de 4 %. Alors que nous avons un Kr (28 %) plus petit dans la SL-E-B III. Cela s'explique, en effet, par la mise en place d'une couche apparemment plus dure que celle qui était en place antérieurement (figure 61 a), c'est-à-dire avant aménagement. La pédogénèse de cette nouvelle couche dure est favorisée par l'effet du compactage du sol sous l'effet des phénomènes érosifs à savoir l'énergie des gouttes de pluie (figure 61 c, d et e) et certainement par le vent. Anschutz & Codazzi (2004) ont déjà démontré que ce phénomène se traduit par la disparition rapide des mottes de terre très souvent sous l'effet des gouttes de pluie.

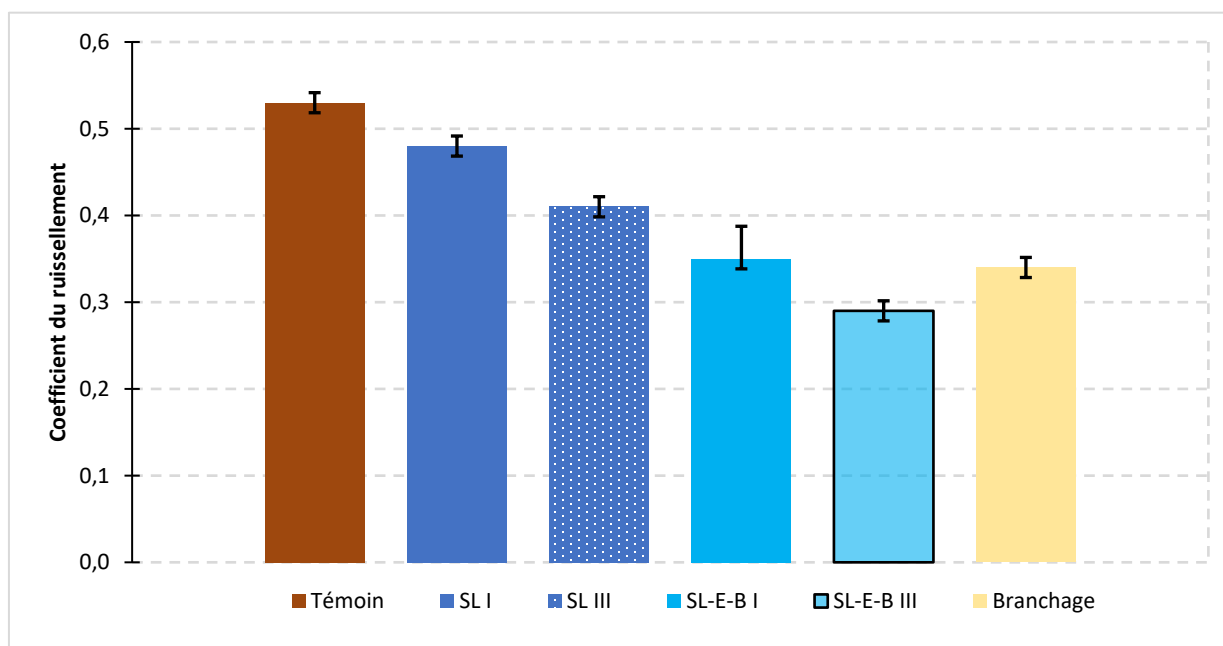


Figure 60. La comparaison du coefficient de ruissellement annuel moyen dans les parcelles témoins et aménagées sur le revers du plateau. Les barres en noir représentent les écarts-types débiaisés. Il faut noter que témoin = kr moyen dans P3 & P6 et branchage = kr moyen dans la P11 & P12.



Figure 61. Le processus de remodelage des mottes de terre sous l'effet de la pluie conduisant au re-encroûtement du sol des parcelles sous-solées (SL).

Avec a, l'état de la surface du sol avant l'intervention, b juste après sous-solage, c après la 1<sup>ère</sup> pluie postérieure au sous-solage, d est la situation au début de la saison de pluie (juillet 2019) et e la situation à la fin de la saison pluvieuse en septembre 2019.

### ➤ L'analyse de l'évolution du Kr évènementiel en fonction de la reprise du sous-solage

La figure 62 montre que le ruissellement est important avant la reprise du remaniement du sol dans les parcelles P7 (SL-E-B III) et P8 (SL III). Avant cette reprise, le Kr est pratiquement supérieur à 70 % pendant les évènements pluvieux  $\leq$  à 30 mm. Cependant, après le remaniement du sol, les évènements pluvieux d'une hauteur de 14, 22, 8 et 10 mm, respectivement le 18, 22 juillet, le 02, 04 août 2017 n'ont pas pu provoquer le ruissellement. Ces résultats montrent que l'impact du remaniement du sol sur la réduction du ruissellement a été significatif dans les parcelles P7 et P8 remaniées.

Par ailleurs, les parcelles P1 (SL I) et P2 (SL-E-B I) ont ruisselé pendant les mêmes évènements pluvieux comme le montre la figure 63. À titre démonstratif, les kr enregistrés dans la parcelle SL I (P1), respectivement au cours de ces évènements pluvieux sont de l'ordre de 18 %, 41 %, 15 % et 62 %. En revanche, on constate que toutes les parcelles (P8, P7, P1 et P2) ont ruisselé le 07 août 2017 à cause de l'effet combiné de l'humidité initiale du sol et de la quantité de pluie (23 mm), mais aussi de son intensité (11 mm/h). Cela s'est en fait produit après un cumul total de pluie de 77 mm. Et avec le dépassement de ce cumul, les coefficients du ruissellement sont devenus forts, jusqu'à dépasser parfois le seuil de 60 %.

Peugeot (1995) et Malam Abdou (2016) ont obtenu des résultats comparables sur des sols sableux cultivés au niveau du même site d'étude. Ce qui signifie qu'en termes de restauration de la biodiversité des surfaces dégradées de la brousse tigrée, il est nécessaire d'entretenir régulièrement

les sites aménagés. Cet entretien peut se faire en remaniant le sol au moins une fois pendant trois années successives. Cela permet, en effet, une bonne régulation des écoulements à l'échelle de la parcelle.

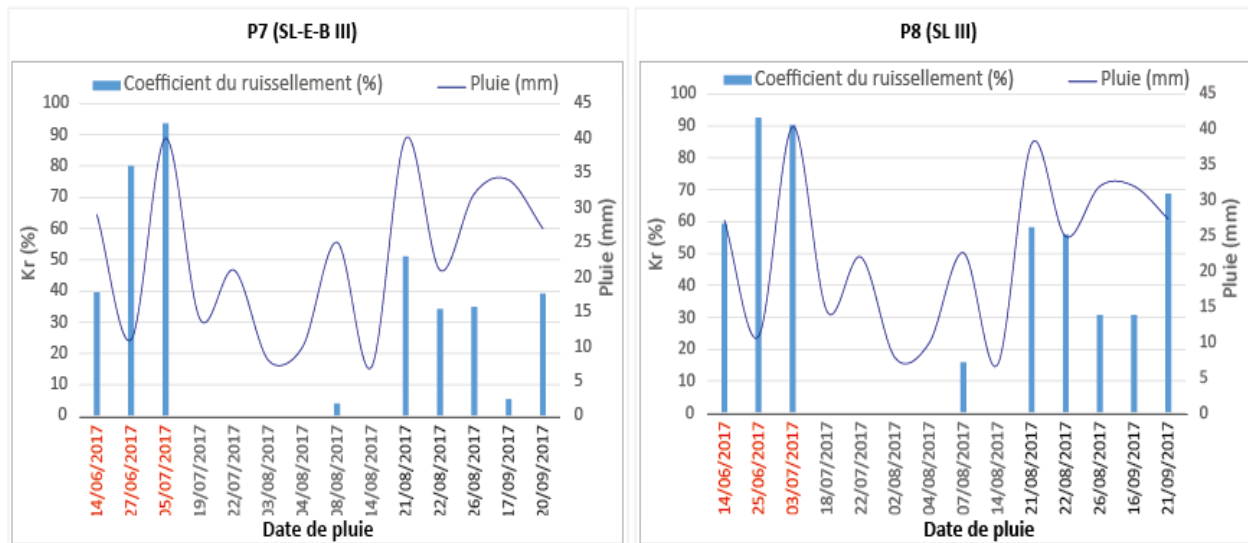


Figure 62. L'évolution du coefficient de ruissellement, après reprise du remaniement du sol intervenu le 10 juillet 2017, dans les parcelles SL III (P8) et SL-E-B III (P7). Les dates colorées (en rouge) indiquent la période avant remaniement du sol.

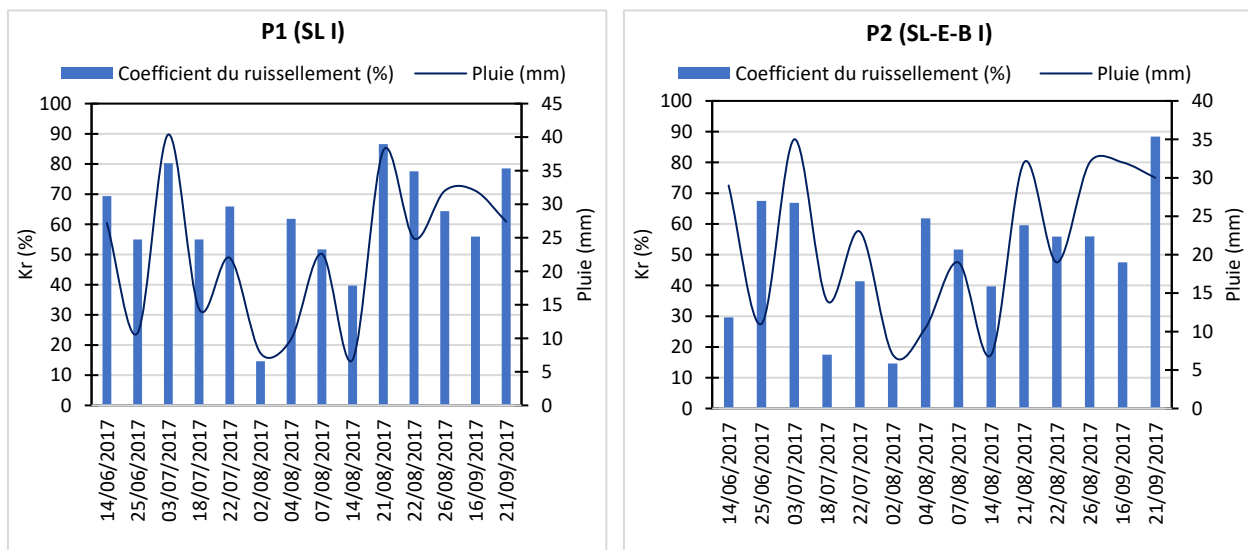


Figure 63. L'évolution du coefficient de ruissellement dans les parcelles SL I (P1) et SL-E-B I (P2), aménagées depuis 2016.

La diminution du ruissellement à l'échelle des surfaces dégradées aménagée par l'association des techniques du sous-solage-ensemencement-branchage est illustrée de façon qualitative dans la parcelle SL-E-B III (P7) comparée à la parcelle témoin I non aménagée (figure 64).

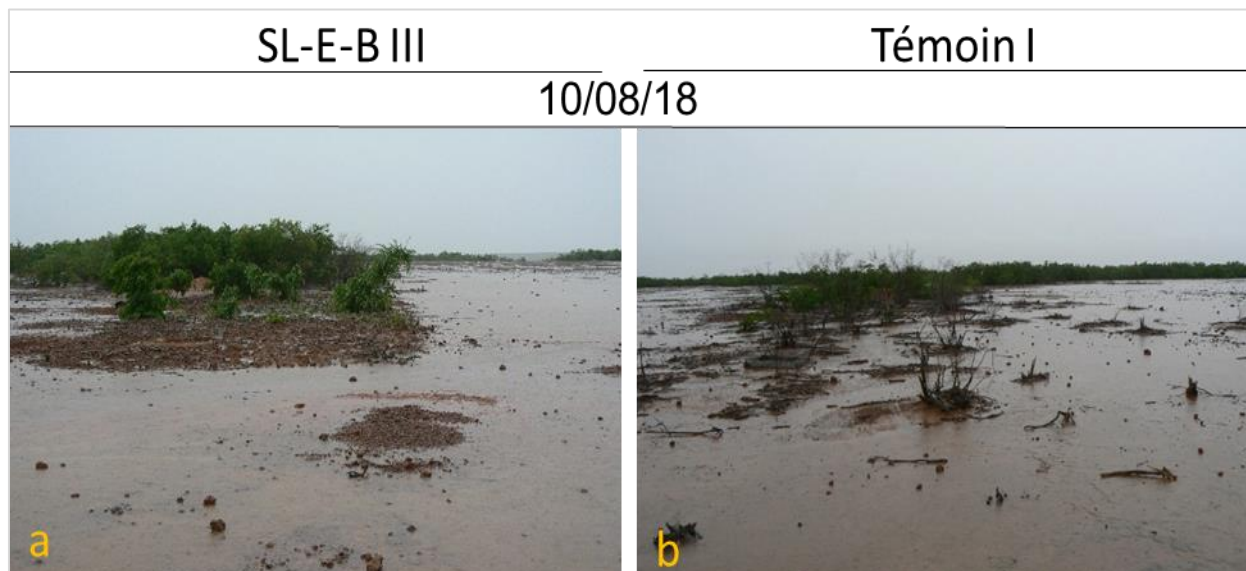


Figure 64. L'impact du remaniement du sol sur le ruissellement sur la surface témoin I (P3) à droite (a) et sur la surface SL-E-B III (P7) aménagée et remaniée à gauche (b).

Les photos dans la figure ci-dessus ont été prises pendant qu'il pleuvait le 10 août 2018. Elles montrent que le ruissellement est omniprésent sur la surface de la parcelle témoin I (P3) non aménagée. Par contre, dans la parcelle SL-E-B III, aménagée avec reprise du sous-solage le 10 juillet 2017, on voit que le ruissellement est presque absent.

#### 4.4.1.2. L'évolution du coefficient de ruissellement par technique d'aménagement appliquée sur le haut glacis

##### ➔ La technique du sous-solage simple

La figure 65 présente l'évolution du coefficient de ruissellement dans la parcelle SL 4 aménagée par la technique du sous-solage simple sur le haut glacis encroûté.

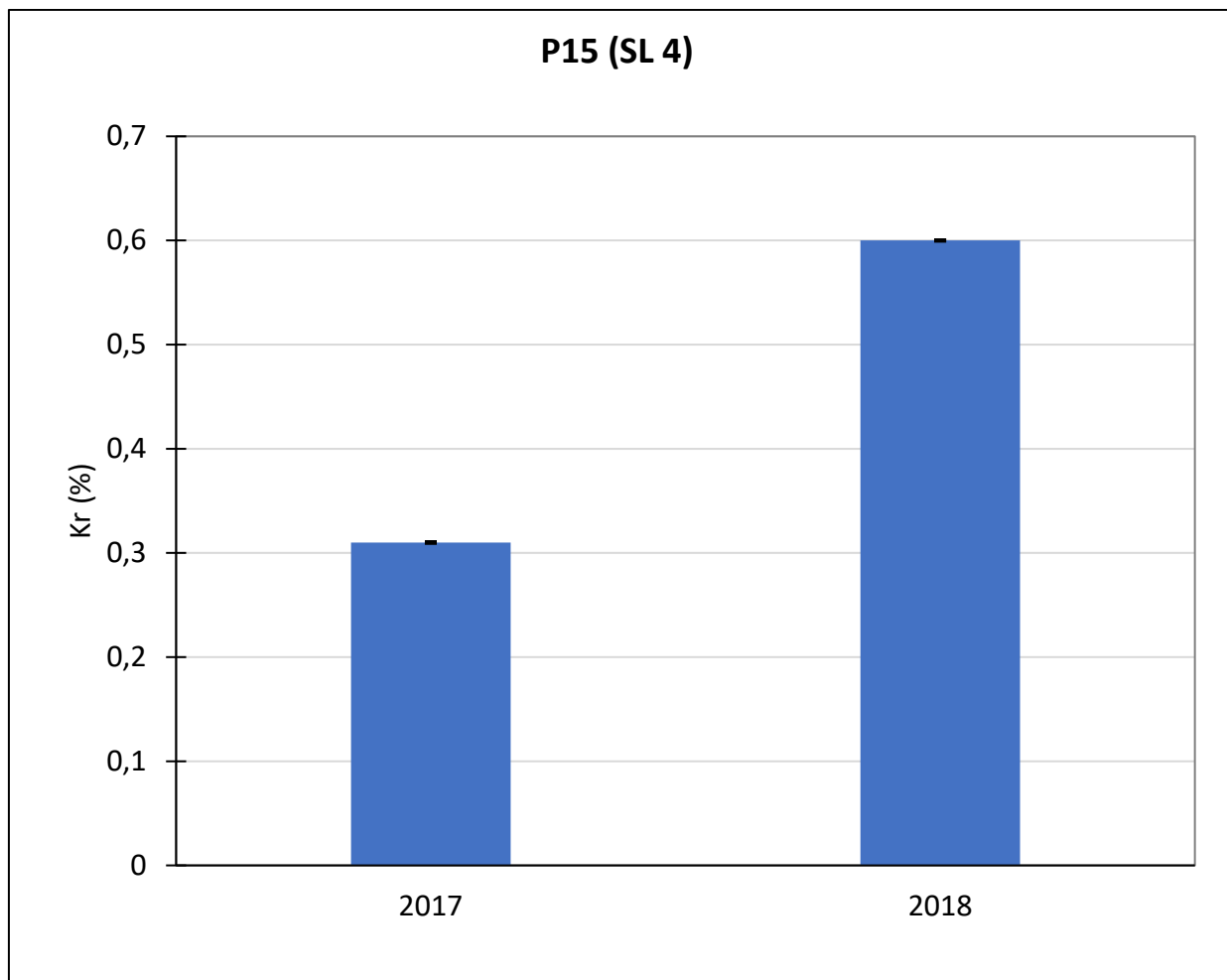


Figure 65. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple sur le haut glacis.

La figure 65 indique une tendance à la hausse du coefficient de ruissellement moyen à l'échelle de la saison. Ainsi, le coefficient de ruissellement passe de 30 % en 2017 à 60 % en 2018. En effet, la parcelle P15 a été sous-solée en 2017, mais le remaniement n'a pas été repris en 2018. Cela explique le doublement du coefficient de ruissellement. D'après ces résultats, sur les sols sableux dégradés encroûtés du haut glacis encroûté, les effets bénéfiques du sous-solage sont éphémères à cause du processus du re-encroûtement rapide.

La figure 66 illustre ce phénomène de réencroûtement de la surface du sol dans la parcelle SL 4 (P15) d'une superficie de 446 m<sup>2</sup> aménagée en 2017.



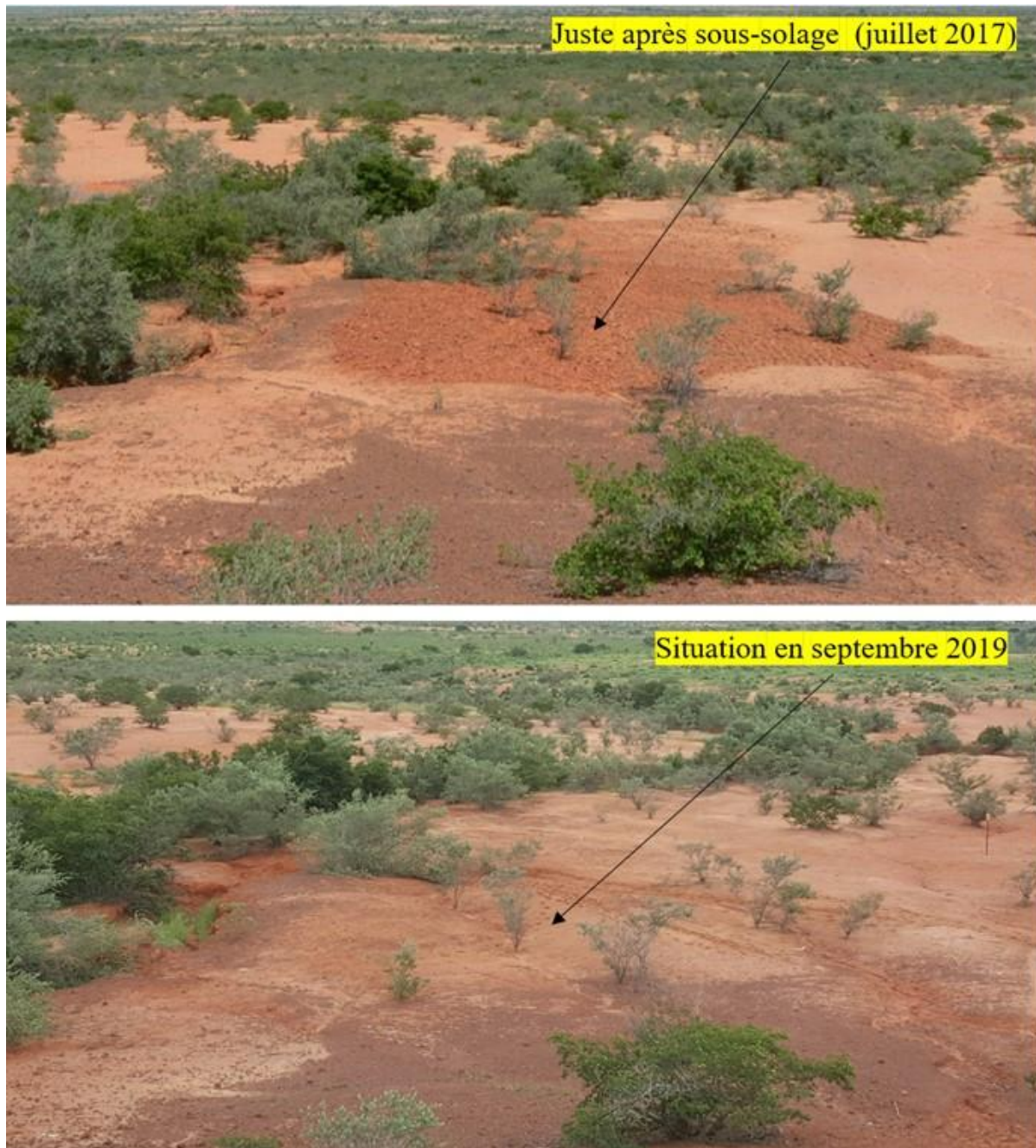


Figure 66. L'illustration du réencroûtement de la parcelle aménagée par la technique du sous-solage simple installée sur la rive gauche du BV TK-IBM. En haut, c'est la situation en 2017, juste après aménagement de la parcelle. En bas, c'est la situation trois ans après, en 2019.

### ➤ La technique du sous-solage-ensemencement-branchage

Les résultats de l'effet de l'association du sous-solage-ensemencement-branchage sont présentés dans la figure 67.

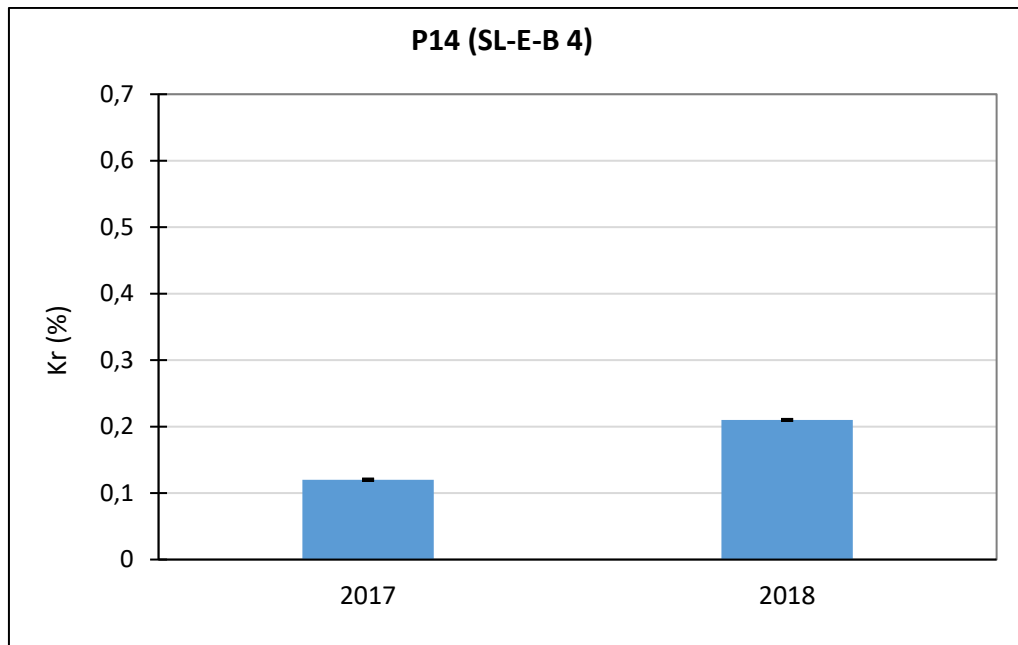


Figure 67. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis.

La figure 67 montre clairement une tendance à l'augmentation du Kr. Le coefficient de ruissellement moyen dans la parcelle SL-E-B 4 a presque doublé en passant de 12 % en 2017 à 21 % en 2018, soit une augmentation de 9 %. Cette augmentation est moins significative par rapport à ce qui a été observé plus haut (cf. [figure 65](#)). Cela se justifie par l'effet bénéfique de la combinaison des techniques à savoir le sous-solage, l'ensemencement et le branchage. En fait, les branchettes éparpillées attirent l'activité des termites qui contribuent à perforer le sol et à le travailler. Le résultat de ces actions entraîne la restauration de la microporosité des sols dégradés (Kaiser et al., 2017). En effet, la technique de branchage contribue à booster l'activité des micro-organismes (comme les termites) et l'installation des meilleures conditions d'infiltration de l'eau dans le sol (Léonard & Rajot, 1998). Et par le biais de l'ensemencement, la régénération rapide de la végétation herbacée (voire ligneuse) raffermi cette dynamique (diminution des écoulements).

La technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage a entraîné, à l'échelle de la parcelle, une baisse des écoulements même si elle est éphémère. Mais elle reste plus significative par rapport à ce qui se passe sur la parcelle aménagée par sous-solage simple, y compris sur la parcelle non aménagée (témoin).

### ➤ Les résultats obtenus sur le témoin

La figure 68 présente l'évolution du coefficient de ruissellement moyen annuel dans la parcelle témoin 4 (P16) installée sur le haut glacis encroûté.

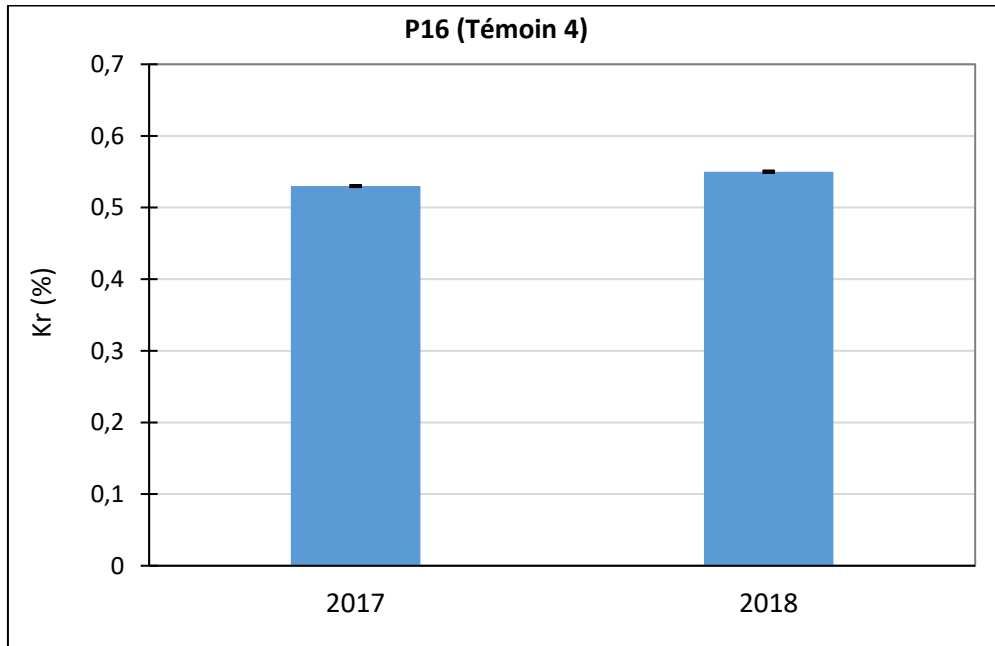


Figure 68. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans la parcelle témoin installée sur le haut glacis.

L'observation de la figure 68 montre que la variation de coefficient du ruissellement annuel est faible dans la parcelle témoin 4 (P16). Ce dernier évolue de 53 % en 2016 à 55 % en 2016. Bouzou Moussa et al. (2020) ont obtenu des résultats sur des parcelles de 10 m<sup>2</sup> qui sont proches de notre. Ils ont démontré que le kr reste constant durant les trois principaux mois de la saison pluvieuse, c'est-à-dire de juin à août. Les résultats de la présente étude confirment également cela, notamment en comparant le comportement hydrologique observé sur cette parcelle témoin par rapport à celui des parcelles aménagées.

### ➤ Synthèse des résultats et comparaison avec le témoin

La figure 68 montre la comparaison du coefficient de ruissellement sur les parcelles élémentaires aménagées par la technique du sous-solage simple (P15) et la technique d'association du sous-ensemencement-branchage (P15) par rapport à la parcelle témoin (P16).

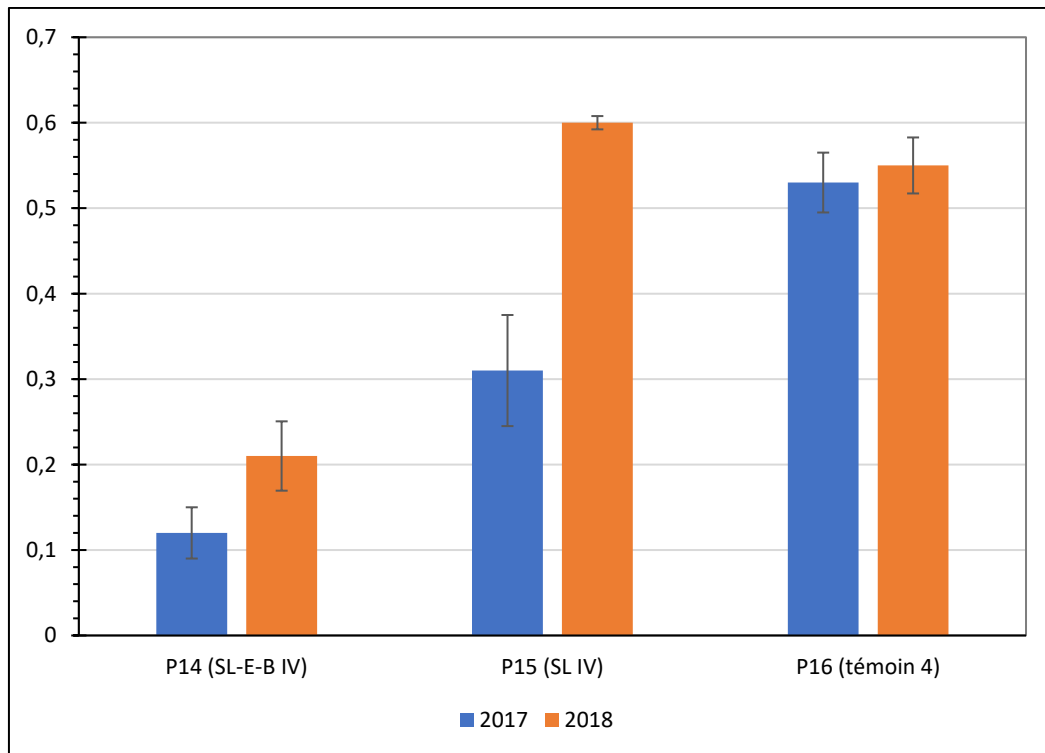


Figure 69. La comparaison du coefficient de ruissellement annuel moyen dans la parcelle témoin et les parcelles aménagées sur le haut glacis. Les barres en noir représentent les écarts-types débiaisés.

L'analyse de cette figure démontre que le coefficient de ruissellement le plus élevé a été enregistré dans la parcelle témoin (P16) en 2017, soit 53 %. Le plus faible a, par contre, été observé dans la parcelle SL-E-B 4, soit 12 %. Cette parcelle a été aménagée par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage. En revanche, l'évolution en 2018 montre que le coefficient de ruissellement le plus élevé a été enregistré dans la parcelle SL 4 (P15), soit 60 % contre 55 % dans la parcelle témoin (P16) et seulement 21 % dans la parcelle SL-E-B 4 (P14). Cette situation s'explique par le processus du réencroûtement expliqué ci-haut (cf. figure 61 et figure 66). Ces résultats montrent que la technique du sous-solage simple est moins efficace par rapport à la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage. Cependant, le comportement hydrologique observé sur la parcelle aménagée par cette combinaison de technique montre une dynamique qui tend vers la hausse du ruissellement. Cette situation entraîne, le plus souvent, des pertes en terres considérables observables à l'échelle de la parcelle.

#### 4.5. La corrélation entre le ruissellement et l'érosion

En règle générale, les forts taux du ruissellement des eaux de pluie entraînent le plus souvent des pertes en terre considérables (Rajot et al., 2009 ; Valentin, 1994).

Ainsi, la figure 70, illustre la corrélation entre les coefficients du ruissellement annuel moyen et les pertes en terre (en g/m<sup>2</sup>) estimées sur les parcelles expérimentales de 1 m<sup>2</sup> installées sur le revers du plateau.

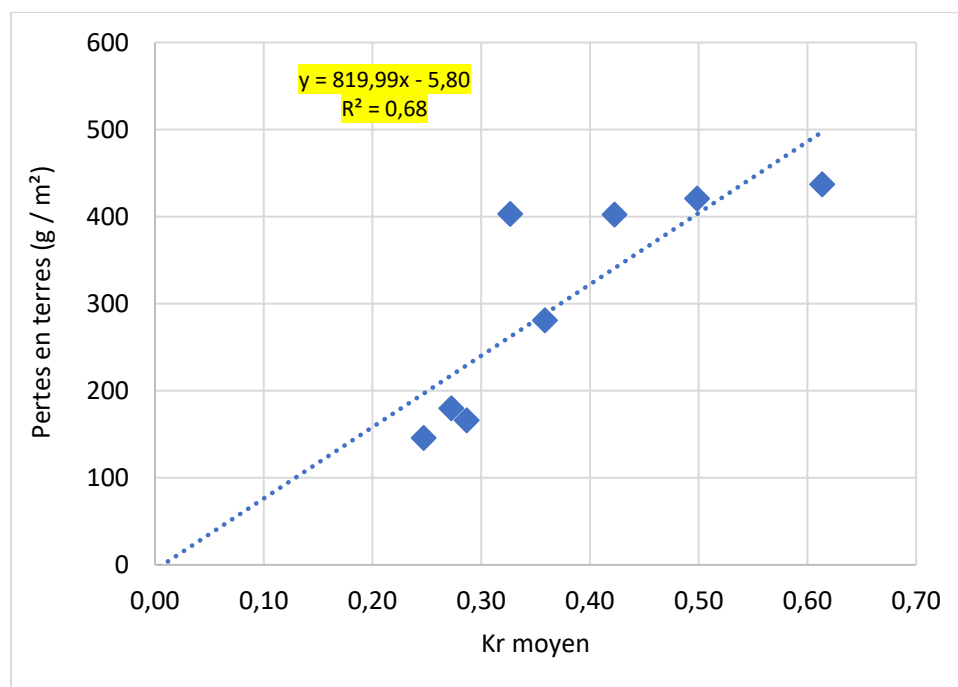


Figure 70. La relation lame ruisselée (%) et érosion (g/m<sup>2</sup>) à l'échelle des parcelles de 1 m<sup>2</sup> en 2017. Les résultats utilisés sont ceux des parcelles SL I (P1), SL II (P5), SL III (P8), SL-E-B I (P2), SL-E-B II (P4), SL-E-B III (P7), branchage (moy P11 & P12) et témoin (moy P3 & P6).

Cette figure montre que les coefficients de ruissellement expliquent jusqu'à 68 % les pertes en terre à l'échelle des parcelles élémentaires. En outre, d'autres facteurs interviennent comme le changement perpétuel des états de surfaces à l'état naturel ou avec l'intervention humaine (remaniement du sol).

#### 4.6. Analyse de l'évolution des pertes en terres par évènement pluvieux

Les données collectées en 2017 ont été utilisées pour analyser l'évolution des pertes en terres (figure 71).

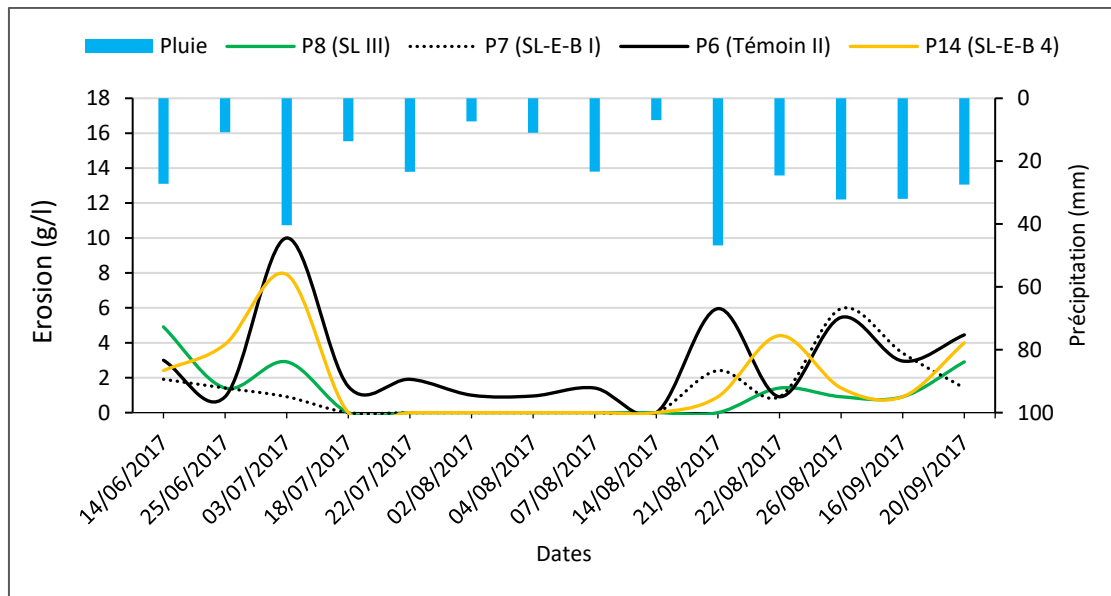


Figure 71. L'évolution des pertes en terre (en g/l) en fonction des pluies dans quelques parcelles du ruissellement suivies en 2017.

Cette figure montre que les évènements pluvieux majeurs provoquent, le plus souvent, d'énormes pertes en terre. En effet, l'érosion hydrique devient extrêmement efficace durant les évènements pluvieux intenses. Les 40 mm précipités le 3 juillet 2017 ont entraîné des pertes estimées de 10 g/l (112 g/m<sup>2</sup>), 3 g/l (106 g/m<sup>2</sup>), et 1 g/l (34 g/m<sup>2</sup>) respectivement, dans les parcelles P6 (témoin II), P8 (SL III) et P7 (SL-E-B I) installées sur le revers du plateau. Ces résultats montrent que les pertes en terres les plus considérables ont été enregistrées dans la parcelle témoin (P6). Cela s'explique par la prédominance des états de surfaces plus ruisselants dans la parcelle témoin (Eds érosion = 87 % sur la P3, voire figure 54). Cependant, les plus faibles pertes en terre s'observent sur la parcelle SL-E-B I (P7). Les coefficients du ruissellement moins élevés, mais avec un taux de couvert végétal significatif estimé à près de 63 % (cf. figure 54).

C'est la même dynamique qu'on observe aussi dans la parcelle SL-E-B 4 (P14) installée sur le haut glacis avec de faibles quantités de pertes en terres estimées à 8 g/l (67 g/m<sup>2</sup>).

En outre, après les opérations du remaniement du sol, les pertes en terre deviennent extrêmement faibles (presque inexistante) du fait que le ruissellement diminue drastiquement même pendant les évènements pluvieux  $\leq 20$  mm. Par exemple, le 22 juillet 2017, les pertes en terre sont estimées à 2 g/l (56 g/m<sup>2</sup>) dans le témoin (P6). Pourtant les parcelles aménagées (SL-E-B I, SL III) n'ont



même pas ruisselé à plus forte raison provoquées des pertes en terres. Cela s'explique par une forte infiltration des eaux de pluie à l'échelle des parcelles remaniées. Alors que l'on constate des pertes en terre dans la parcelle témoin (P6), même si elles restent faibles, du fait de l'état dégradé des sols combinés à un faible couvert végétal.

Les travaux de Descroix et al. (2012) ont démontré le rôle de la croûte d'érosion sur la genèse des coefficients de ruissellement élevés estimés à 60 % et qui ont entraîné des pertes en terres d'environ 5500 g/m<sup>2</sup> par des mesures effectuées sur des parcelles de 10 m<sup>2</sup>. Ces pertes en terres sont presque similaires par rapport aux pertes en terres que nous avons observées sur les parcelles témoins de 1 m<sup>2</sup> (514 g/m<sup>2</sup>) situées sur le revers du plateau.

## **Conclusion**

La mise en place du dispositif de mesure expérimentale du ruissellement a permis de mettre en évidence l'efficacité de trois techniques d'aménagement à savoir le sous-solage, le branchage et l'association du sous-solage-ensemencement-branchage.

À l'échelle du bassin versant, l'application de ces techniques a montré que les cotes d'eau (écoulements) sont plus faibles après aménagement par rapport à la situation avant aménagement, où elles sont plus élevées (figure 44).

À l'échelle de la parcelle expérimentale, le coefficient de ruissellement est plus élevé sur les parcelles témoins avec état de surface dégradé et encroûté (cf. figures 68 et 69). Pour ce qui est des résultats obtenus sur les parcelles aménagées, la technique la moins efficace reste le sous-solage simple à cause du caractère éphémère de ses effets. Par contre, la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage demeure la plus efficace avec de faibles coefficients de ruissellement au cas où le remaniement est répété pendant trois années successives. Il en est de même que la technique du branchage qui favorise l'activité de la microfaune, et de ce fait moins de ruissellement, c'est-à-dire des meilleures conditions d'infiltration de l'eau dans le sol.

Le chapitre suivant analyse les effets de ces techniques à l'échelle locale (dans les tubes d'accès à la sonde à neutrons).



## Chapitre 5. Les effets des techniques d'aménagement sur l'humidité du sol

---

*Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'analyse de l'humidité du sol dans les surfaces aménagées. Nous commencerons par examiner l'évolution de la teneur en eau du sol en surface et en profondeur, ce qui nous permettra de mettre en lumière les effets des trois techniques d'aménagement à savoir le branchage, le sous-solage et l'association du sous-solage-ensemencement-branchage sur les fluctuations événementielles et mensuelles de l'humidité du sol.*

---

### 5.1. La comparaison de la teneur en eau du sol mesurée par la méthode gravimétrique

Le suivi de l'humidité de la couche superficielle du sol (de 0 à 5 cm de profondeur) a été réalisé après la pluie et tous les deux jours pendant la saison des pluies, sur les parcelles aménagées ainsi que leurs témoins ((cf. § 3.2.1). Ce suivi a permis de comprendre comment l'humidité de la surface du sol évolue au fil du temps. Pour caractériser l'humidité du sol, nous avons utilisé la formule 7, décrite dans la section 3.2.6.1, qui nous permet de calculer la teneur en eau volumique du sol.

#### ➤ L'analyse de quelques résultats issus des parcelles sur le revers du plateau

Les résultats obtenus par rapport au suivi de l'humidité dans la couche superficielle du sol sont résumés dans la figure 72. Il s'agit des résultats des parcelles considérées comme représentatives des techniques d'aménagement appliquées sur le revers du plateau.

La lecture de la figure 72 montre que la teneur en eau volumique superficielle du sol ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) évolue dynamiquement selon les événements pluvieux et les jours sans pluie, et surtout en fonction des parcelles par techniques d'aménagement appliquées. Globalement, nous constatons que la teneur en eau volumique du sol reste plus significative dans la parcelle SL-E-B III par rapport à la parcelle témoin I, et même par rapport aux autres parcelles aménagées (SL III et branchage). Par exemple, la teneur en eau volumique du sol la plus significative, après une pluie de 44 mm tombée le 28 août 2019, est de  $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  dans la parcelle SL-E-B III, de  $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  dans la parcelle branchage et de  $0,27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  dans la parcelle SL contre seulement  $0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  dans la parcelle témoin.

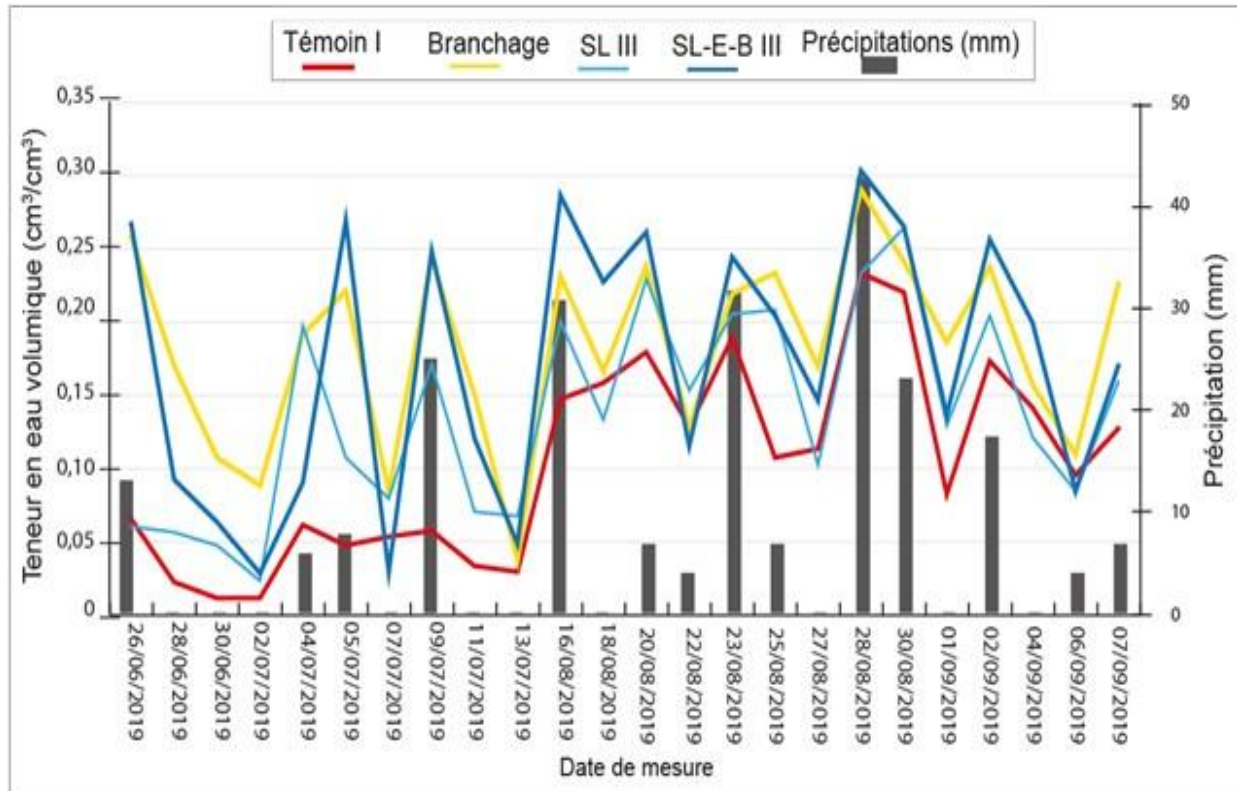


Figure 72. La comparaison de l'évolution de la teneur en eau volumique en surface (0 à 5 cm) sur le revers du plateau.

Le taux d'humidité élevé que l'on peut observer sur la figure après chaque pluie dans la parcelle SL-E-B III s'explique par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le remaniement du sol (sous-solage) effectué pendant trois années consécutives (2016, 2017 et 2018) a permis d'améliorer la porosité du sol, ce qui a augmenté sa perméabilité superficielle. En outre, le développement de la végétation a également renforcé cet effet. La combinaison de ces deux facteurs a eu un impact sur certaines propriétés du sol, notamment sa capacité à absorber l'eau en profondeur, ce qui a favorisé un développement significatif de la végétation existante.

L'analyse des courbes montre que la teneur en eau des couches superficielles du sol dans les parcelles aménagées (travaillées par sous-solage ou épandage de branches) reste significativement plus élevée que dans la parcelle témoin non travaillée.

Gaufre-Demonbynes & Charreau (1961) ont fait la même remarque sur des sols ameublés en profondeur par rapport aux sols non ameublés (témoins). D'après les résultats de leurs recherches,

l'ameublissement du sol contribue à diminuer le déficit d'humidité des couches supérieures du sol et cela facilite le développement de la végétation.

Et c'est la même tendance qui se dégage sur le haut glacis encroûté aménagé.

### ➤ L'analyse des résultats issus des parcelles sur le haut glacis

La figure 73 compare et montre l'évolution de la teneur en eau volumique du sol dans les parcelles SL 4, SL-E-B 4 (aménagées en 2017) et la parcelle témoin pendant la saison pluvieuse 2019.

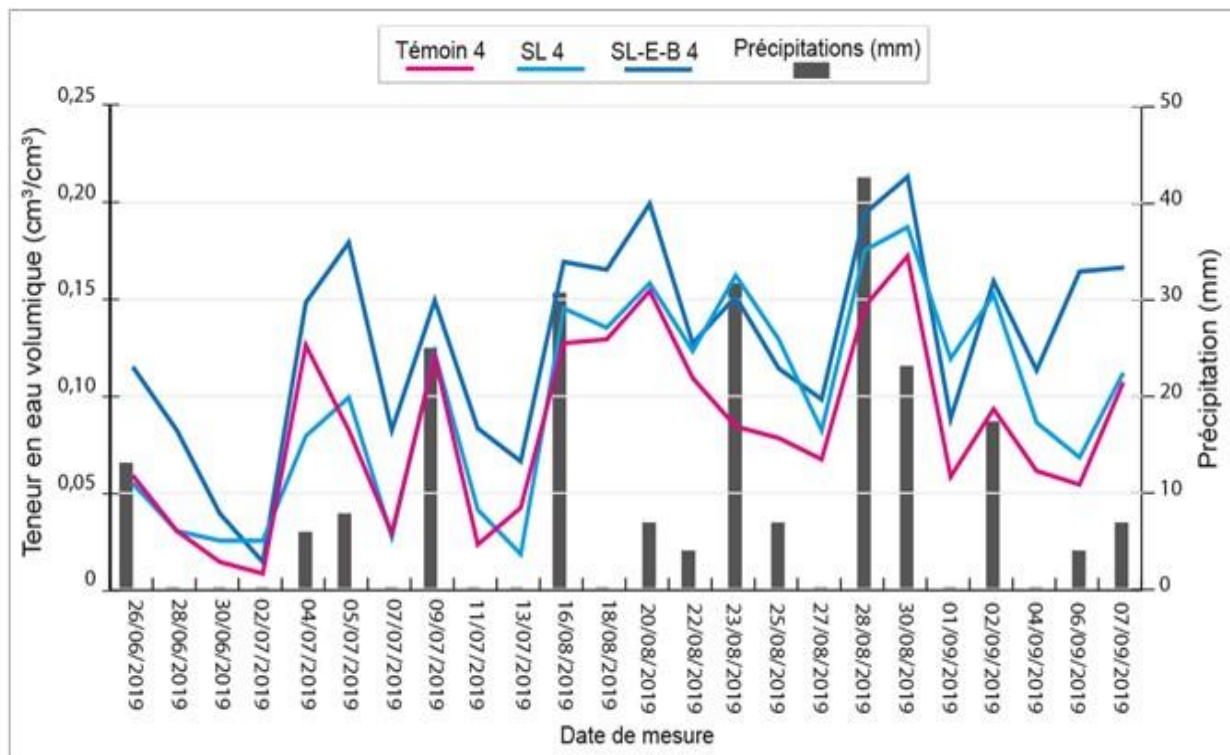


Figure 73. La comparaison de l'évolution de la teneur en eau volumique en surface (0 à 5 cm) sur le haut glacis.

L'analyse de la figure 73 montre que l'humidité volumique du sol dans la parcelle témoin reste la moins élevée par rapport aux parcelles SL 4 et SL-E-B 4 respectivement aménagées par sous-solage simple et par combinaison du sous-solage-ensemencement-branchage. Cette dernière est la technique qui a plus d'effet sur l'augmentation de l'humidité dans les couches superficielles du sol au niveau du haut glacis. Cela reste en harmonie avec ce qui a été observé sur le revers du plateau.

## **5.2. L'analyse de l'évolution de la teneur en eau volumique mesurée par la sonde à neutrons**

Les résultats de l'évolution de la teneur en eau du sol ont été obtenus grâce au suivi avec la sonde à neutrons effectué après chaque évènement pluvieux et chaque 5 jours (cf. § 3.2.4). Les résultats de trois techniques d'aménagement appliquées (SL, SL-E-B et branchage) concernent les trois campagnes hydrologiques de 2016, 2017 et 2018.

L'application de la formule 8 (cf. § 3.2.6.2) a permis d'effectuer les analyses sur l'évolution des profils d'humidité, dans les couches en profondeur du sol, dans les tubes d'accès installés dans les différentes parcelles aménagées.

### **5.2.1. L'effet de la technique du branchage sur la teneur en eau volumique**

Il convient de préciser que les résultats concernant l'effet du branchage sur l'infiltration ne portent que sur la deuxième saison hydrologique de 2017, car l'installation des parcelles (branchages) et des tubes d'accès a été retardée, prévenant la collecte de données en 2016. Nous ne présentons ici que la dynamique de la teneur en eau des deux tubes en 2017. La figure 74 montre les résultats de l'effet de la technique du branchage sur le revers du plateau.

En examinant la figure 74, on peut constater que la teneur en eau maximale est d'environ 42 % dans le tube 16 (correspondant à la parcelle de branchage I) et 39 % dans le tube 15 (parcelle de branchage II). Ces teneurs en eau du sol maximales ont été enregistrées en juillet et en août 2017, c'est-à-dire durant les mois les plus pluvieux de la saison des pluies. Les teneurs en eau minimales du sol ont été obtenues en septembre 2017, avec 16 % dans le tube 15 et 18 % dans le tube 16. De plus, la variation de la teneur en eau est également visible dans les profils de sol situés plus en profondeur. Les fronts d'infiltration se limitent respectivement à 40 cm pour le tube 15 et à 60 cm pour le tube 16.

Selon ces résultats, l'effet de la technique de branchage est relativement significatif, compte tenu des faibles quantités de branchettes dispersées sur les parcelles, soit en moyenne 1,2 kg/m<sup>2</sup>. Ces quelques branchettes ont augmenté l'infiltration de l'eau dans le sol jusqu'à environ 50 cm de profondeur. Il s'agit là de résultats importants, car avec peu de moyens investis (quelques branches dispersées), la teneur en eau volumique a été significativement améliorée, principalement en

surface du sol (environ 40 %). Ces résultats soulignent l'efficacité de la technique de branchage dans la restauration des propriétés hydrodynamiques des sols dégradés des bandes boisées de la brousse tigrée, étant donné que la technique est simple et peu coûteuse.

D'autres études ont confirmé que le branchage ou le paillage peut améliorer grandement les conditions hydriques des sols cultivés (Léonard & Rajot, 1998). Dans cette perspective, Ambouta (1984) recommande fortement son utilisation pour restaurer la brousse tigrée dégradée. Cependant, l'adoption de cette technique à de larges zones dégradées présente des défis, notamment la disponibilité de bois et le risque de déstabilisation des sols. En outre, Anschütz & Codazzi (2004) ont démontré que, sur des sols très dégradés qui durcissent pendant la saison sèche, le travail du sol est nécessaire pour créer de véritables conditions d'infiltration de l'eau dans le sol.

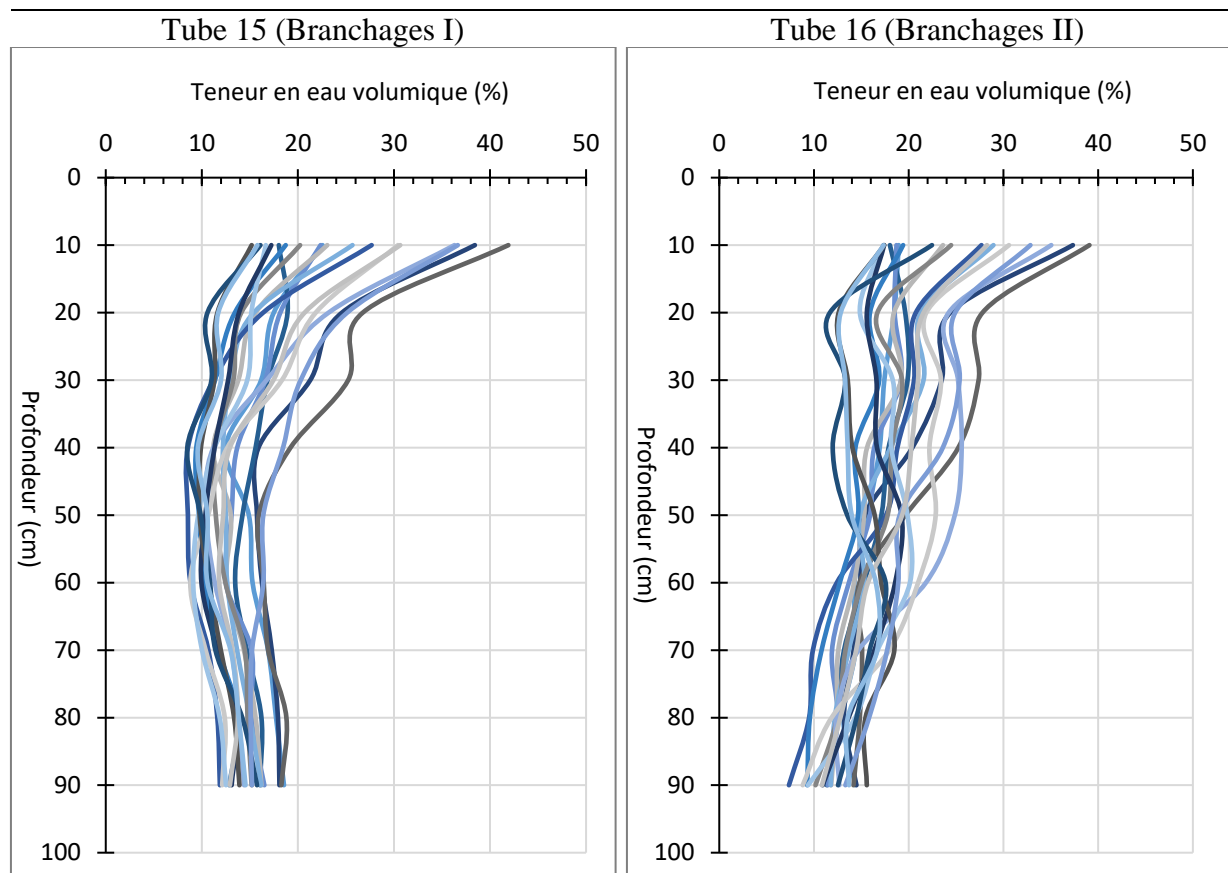


Figure 74. La teneur en eau et du front d'infiltration dans les tubes 15 (à gauche) et 16 (à droite) aménagés par la technique du branchage en 2017.

## 5.2.2. L'effet de la technique du sous-solage simple sur la teneur en eau volumique

### ➤ Analyse des résultats issus des parcelles aménagées sur le revers du plateau

Dans les régions semi-arides, notamment dans notre zone d'étude, les sols sont souvent dégradés et durcis, ce qui limite leur capacité à absorber rapidement l'eau de pluie, et produisent ainsi une grande quantité d'eau de pluie (Anschütz & Codazzi, 2004). Cela conduit à une infiltration limitée de l'eau dans le sol, ce qui peut empêcher les plantes de puiser suffisamment d'eau pour leur croissance et leur développement. La technique du sous-solage, qui consiste à briser la partie superficielle et durcie du sol, est l'une des solutions permettant d'augmenter la perméabilité du sol et de favoriser ainsi une meilleure infiltration de l'eau dans le sol. Cette technique est particulièrement pertinente dans notre région d'étude en raison de l'état de dégradation des sols qui y prévaut. L'effet de la technique du sous-solage simple réalisé sur le revers du plateau est remarquable dans la figure 75.

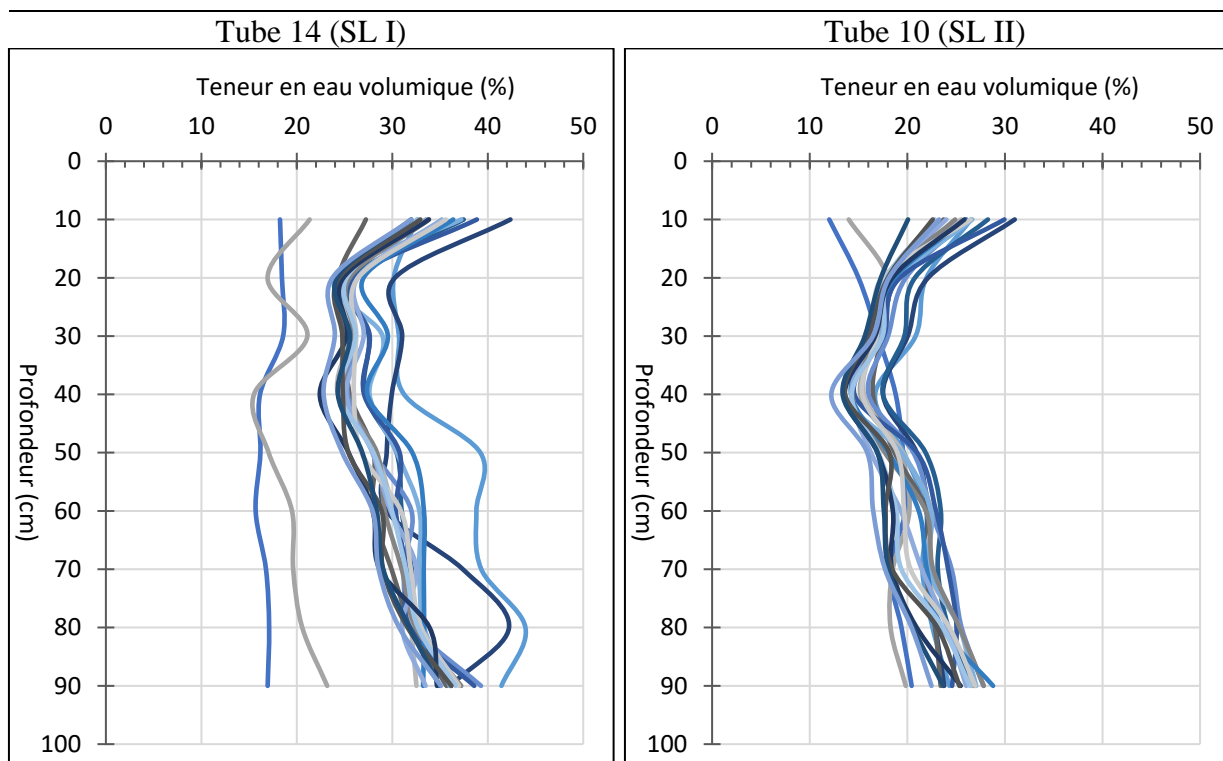


Figure 75. La teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 14 (à gauche) et le tube 10 (à droite) pendant la saison pluvieuse de 2016.

La figure 75 montre que la teneur en eau volumique maximale en surface du sol (0 à 10 cm) provoquée par la technique du sous-solage simple a atteint 42 % dans les tubes 14 (SL I) et 32 % dans le tube 10 (SL II) pendant la saison pluvieuse en 2016. Les effets de cette technique sont remarquables pendant les grands évènements pluvieux. À titre d'exemple, la teneur en eau mesurée le 14 juillet 2016 est de 22 % dans le tube 14 et 14 % dans le tube 10. Ces teneurs en eau évoluent respectivement à 32 et 26 % dans le tube 14 et tube 10 lors d'une pluie de 60 mm le 19 juillet 2016, soit des augmentations respectives de 10 % et de 12 %. Cela représente, en effet, une évolution considérable de la teneur en eau volumique du sol jusqu'en profondeur du sol (> 90 cm). Le sous-solage manuel du sol effectué à 15 cm de profondeur seulement a entraîné une augmentation de l'infiltration de l'eau à des profondeurs 6 fois supérieures. Ainsi, le front d'infiltration de l'eau dans le sol dépasse largement la profondeur mesurée dans le tube 14 (> 90 cm). Dans la parcelle SL II, il ne dépasse guère 30 cm de profondeur. Malgré cela, on constate que les teneurs en eau du sol sont relativement élevées (42 % dans le tube 14 et 28 % dans le tube 10) même en profondeurs du sol, dans tous ces deux tubes, c'est-à-dire jusqu'à environ 80 cm. Cette forte augmentation de la teneur en eau du sol lors des évènements pluvieux importants s'explique par l'effet de remaniement du sol (sous-solage) effectué en 2016, mais aussi l'effet du système racinaire préexistant (arbustes existants sur les parcelles aménagées).

Quant aux teneurs en eau volumiques minimales, elles représentent 18 % dans le tube 14 (SL I) et 12 % dans le tube 10 (SL II).

Pailleurs, il faut noter que le remaniement du sol de la parcelle SL II (tube 10) a été repris en 2017. La figure 76 montre l'évolution des profils de la teneur dans le tube 10 (parcelle SL II dont le remaniement a été repris) et dans le tube 14 (parcelle SL I sans reprise du remaniement) pendant la saison pluvieuse 2017.

L'analyse du résultat montre que la teneur en eau maximale en surface est plus élevée dans le tube 10 ( $\approx 40\%$ ) par rapport au tube 14 ( $\approx 34\%$ ). Il en est de même que pour les profils de teneur en eau du sol en profondeur, soit environ 35 % dans le tube 10 (sol remanié une 2<sup>ème</sup> fois) et 30 % dans le tube 14. La non reprise du remaniement du sol dans ce dernier (tube 14, parcelle SL I) s'est, donc, traduit par une diminution de la teneur en eau volumique. Cela s'explique par l'effet d'un re-



encroûtement superficiel amorcé dans la parcelle SL I, même si par ailleurs le cumul de pluie en 2017 (365 mm) est inférieur à celui de 2016 (583 mm).

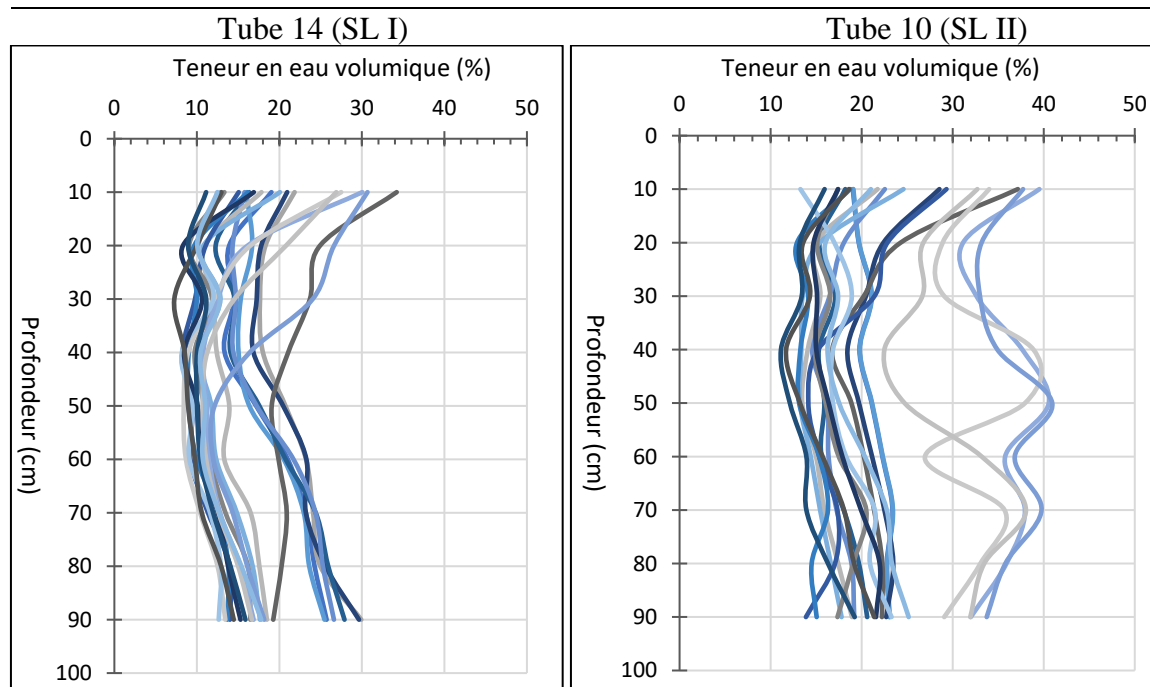


Figure 76. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 14 (à gauche) et le tube 10 (à droite) pendant la saison pluvieuse 2017.

#### ➤ Analyse des résultats issus des parcelles aménagées sur le haut glacis

La figure 77 illustre l'effet de la technique du sous-solage simple sur le haut glacis encroûté. Les résultats montrent qu'elle a eu un effet léger sur la dynamique de la teneur en eau. Avant l'aménagement de la parcelle en 2016, la teneur en eau maximale moyenne en surface (0 à 10 cm) dans les tubes 4 et 5 (SL 4) n'était que de 18 %. Cependant, après l'aménagement en 2017, cette teneur en eau maximale atteint environ 20 % à la même profondeur (SL 4). De plus, on observe une nette amélioration de la teneur en eau du sol jusqu'à environ 160 cm de profondeur en 2017, alors que le front d'infiltration se limitait à 70 cm de profondeur en 2016. Toutefois, les profils de teneur en eau du sol restent presque constants au-delà de 70 cm de profondeur tout au long de la saison des pluies 2017, malgré l'aménagement en sous-solage.

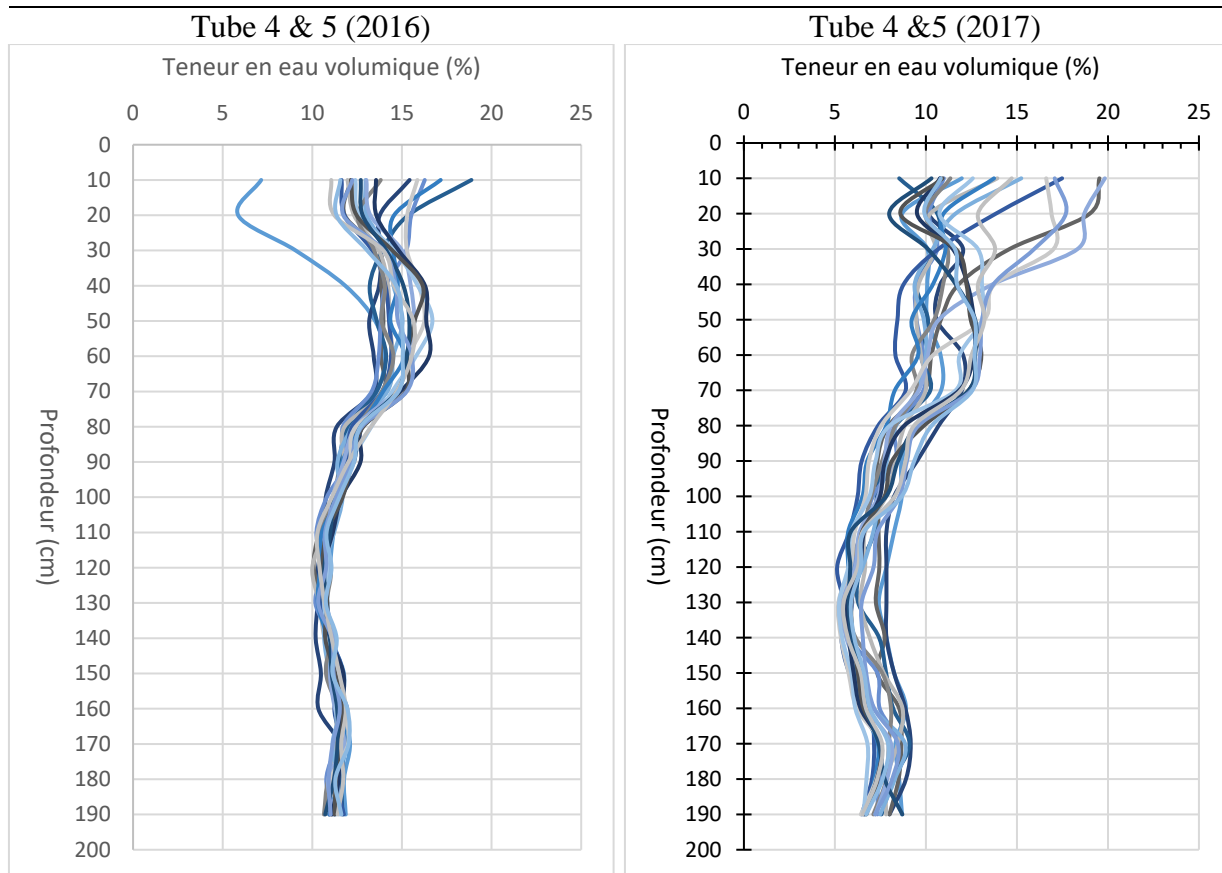


Figure 77. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans les tubes 4 et 5 en 2016 (année témoin, à gauche) et en 2017 (après aménagement, à droite).

En résumé, les résultats ont démontré que la technique du sous-solage simple a amélioré temporairement la teneur en eau du sol sur la parcelle SL 4 du haut glacis et sur la SL I du revers du plateau, qui n'ont été sous-solées respectivement qu'en 2017 et 2016.

Cependant, des études ont montré que l'impact du sous-solage est moins durable sans mesures d'accompagnement d'après Hien (1995). Et, même si le travail du sol est répété, juste après qu'un sol ait absorbé une quantité de pluie d'environ 70 mm (Malam Abdou, 2016), la partie superficielle du sol peut se réencroûter. Ce qui rend la reprise du sous-solage insuffisant pour restaurer les fonctions du sol. Par conséquent, le sous-solage doit être associé à d'autres techniques, comme le branchage, pour une restauration efficace des fonctions du sol.

### 5.2.3. L'effet de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la teneur en eau volumique

#### ➤ Analyse des résultats issus des parcelles aménagées sur le revers du plateau

La combinaison des techniques du branchage et d'ensemencement est une des alternatives pour rendre plus durables les effets bénéfiques de la technique du sous-solage.

Les figures 78 et 79 illustrent l'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur l'évolution de la teneur en eau volumique de 2016 à 2017 dans le tube 13, et le tube 11 installé respectivement, dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B II.

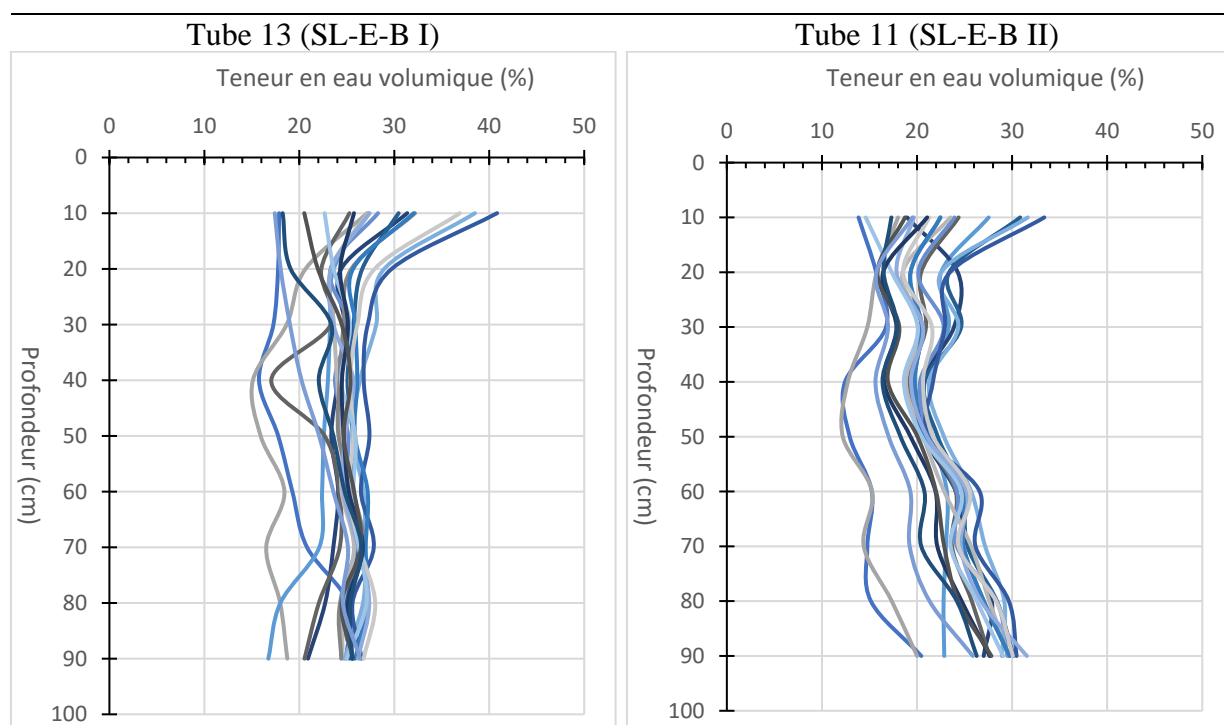


Figure 78. La teneur en eau et le front d'infiltration dans le tube 13 (à gauche) et le tube 11 (à droite) pendant la saison pluvieuse 2016.

En examinant la figure 78, on peut voir que la teneur en eau volumique maximale en surface du sol (0-10 cm) est de 41 % dans le tube 13 (SL-EB I) et de 34 % dans le tube 11, enregistré en août, au milieu de la saison des pluies. La teneur en eau dans le tube 11 a augmenté de 10 %, passant de 18 % le 14 juillet à 28 % le 19 juillet, lors d'une pluie de 60 mm. Cette augmentation est remarquable et résulte de l'effet combiné de la technique de sous-solage-ensemencement-

branchage. Cette technique a également eu un effet bénéfique en profondeur, au-delà de 90 cm, car le front d'infiltration dans les parcelles aménagées par cette combinaison de techniques a dépassé la limite à partir de laquelle les mesures ont été effectuées. Le remaniement associé au branchage (et à l'ensemencement) a également multiplié par plus de 6 la profondeur sur laquelle le remaniement a été effectué, tout comme le sous-solage simple. Les teneurs en eau minimales du sol sont de 18 % pour le tube 13 et 14 % pour le tube 11. En outre, l'analyse de l'évolution de la teneur en eau du sol en 2017 montre une diminution depuis les parties superficielles jusqu'à en profondeur du sol dans le tube 13, comme le montre la figure 79.

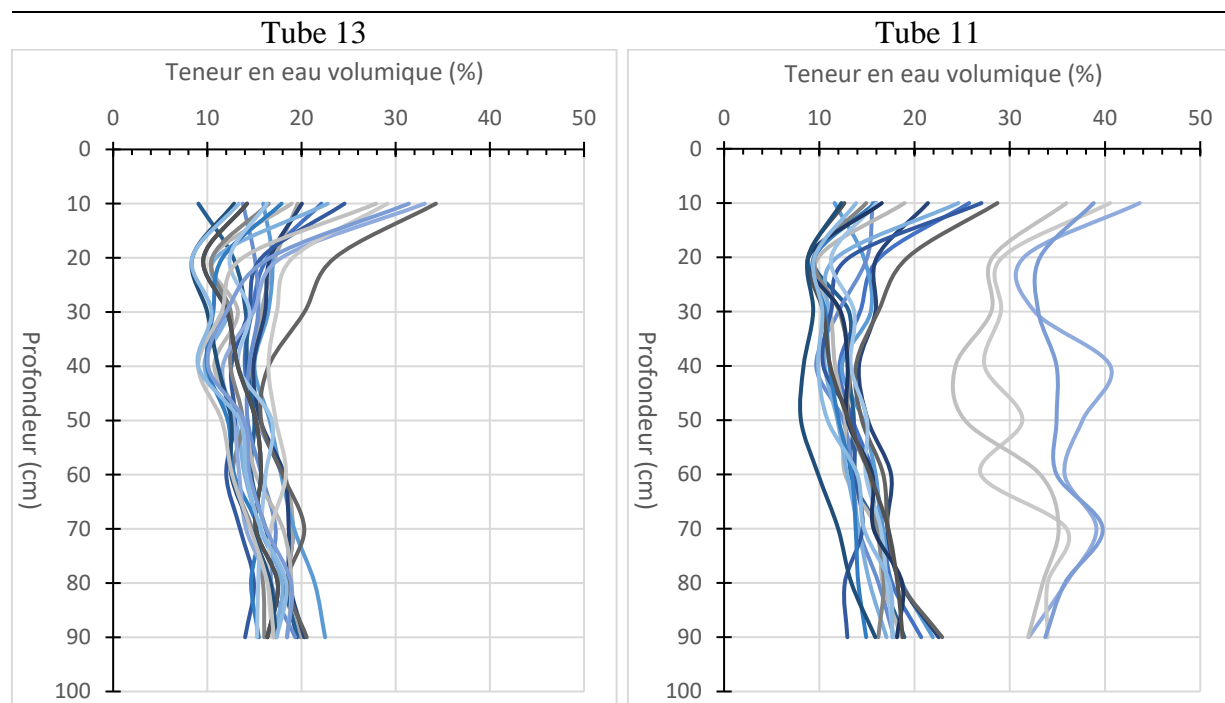


Figure 79. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 13 (à gauche) et le tube 11 (à droite) pendant la saison pluvieuse 2017.

En 2017, la quantité d'eau dans le sol a diminué dans le tube 13, passant de 41 % en 2016 à 35 % en surface, ce qui représente une baisse de 6 %. La baisse s'est également produite en profondeur où le front d'infiltration est remonté de 40 cm. Cette diminution générale de la teneur en eau du sol dans le tube 13 peut s'expliquer par le fait que le remaniement du sol n'a pas été repris cette année-là, entraînant le réencroûtement du sol, qui diminue la perméabilité et la teneur en eau du sol. Cela montre que l'efficacité de la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage diminue en l'absence de mesures d'accompagnement telles que la reprise du remaniement du sol.

En revanche, la teneur en eau du sol a augmenté dans le tube 11 dans la parcelle SL-E-B II, où le remaniement du sol a été repris en 2017, passant de 34 % en 2016 à 45 % en surface, soit une augmentation de 10 %. Cela montre que la répétition de la technique de remaniement du sol combinée à l'ensemencement et au branchage a conduit à une forte augmentation de la teneur en eau du sol. Cette augmentation s'est également produite en profondeur, le front d'infiltration dépassant la profondeur de 90 cm.

En ce qui concerne la teneur en eau minimale, elle a diminué dans les deux tubes, passant de 18 % et de 14 % dans le tube 11 à  $\approx 10\%$  en 2017, avec une baisse plus importante dans le tube 13 (non remanié) que dans le tube 11 (remanié).

➤ **Analyse des résultats issus des parcelles sur le haut glacis**

La figure 80 montre l'évolution de la teneur en eau du sol provoquée par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage dans la parcelle SL-E-B 4 installées sur le haut glacis.

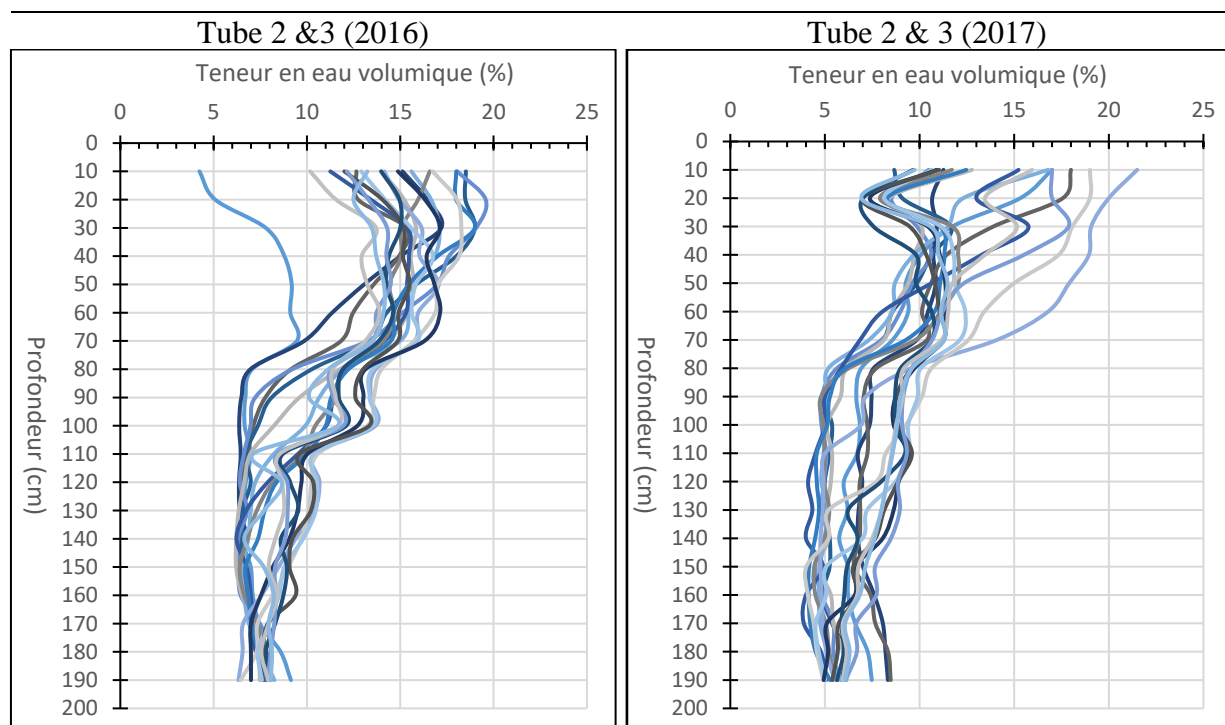


Figure 80. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans les tubes 2 et 3 (SL-E-B 4) en 2016 (année témoin, à gauche) et en 2017 (après aménagement, à droite).

La figure 80 montre que l'utilisation de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage n'a eu qu'un faible impact sur la teneur en eau du sol dans la parcelle SL-E-B 4, de 2016 à 2017. La quantité maximale d'eau dans le sol en surface a augmenté de 18 % en 2016 à 23 % en 2017, soit une amélioration de 5 %. Cette amélioration est perceptible jusqu'à une profondeur d'environ 70 cm. Cependant, les profils de teneur en eau du sol mesurés en 2017 (après l'aménagement de la parcelle) sont inférieurs à ceux mesurés en 2016 (avant l'aménagement) au-delà de cette profondeur (de 80 à 190 cm), probablement en raison de la pluviométrie plus faible en 2017 (365 mm) par rapport à 2016 (583 mm). La pénétration verticale de l'eau dans le sol est tout de même importante dans ce tube (SL-E-B 4) en raison de la présence de pieds de végétation avoisinant les ravines, en plus du remaniement du sol effectué.

En outre, nous avons constaté une légère augmentation de la teneur minimale en eau, passant de 4 % en 2016 à environ 16 % en 2017. Cette augmentation est significative en termes d'impact sur la végétation existante.

#### **5.2.4. L'analyse de la teneur en eau du sol sur les surfaces témoins**

##### **❖ Évolution de la teneur en eau du sol dans le tube témoin sur le revers du plateau**

La figure 81 présente l'évolution de la teneur en eau du sol, de 2016 à 2017, dans le tube 12 installé dans la parcelle témoin I.

La figure 81 montre que la teneur en eau du sol est très faible, surtout en profondeur, par rapport aux parcelles aménagées par sous-solage, branchage et combinaison du sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau. Dans le tube 12 (témoin I), la teneur en eau maximale en surface (10 cm) est de 30 % en 2016 et de 28 % en 2017, soit donc une diminution de 2 %. Cette faible dynamique de la teneur en eau du sol se manifeste aussi par le front d'infiltration qui ne dépasse pas 50 cm en 2016 et 30 cm en 2017. Ces faibles teneurs en eau du sol sur la surface témoin entraînent la dégradation progressive de la végétation et du sol.

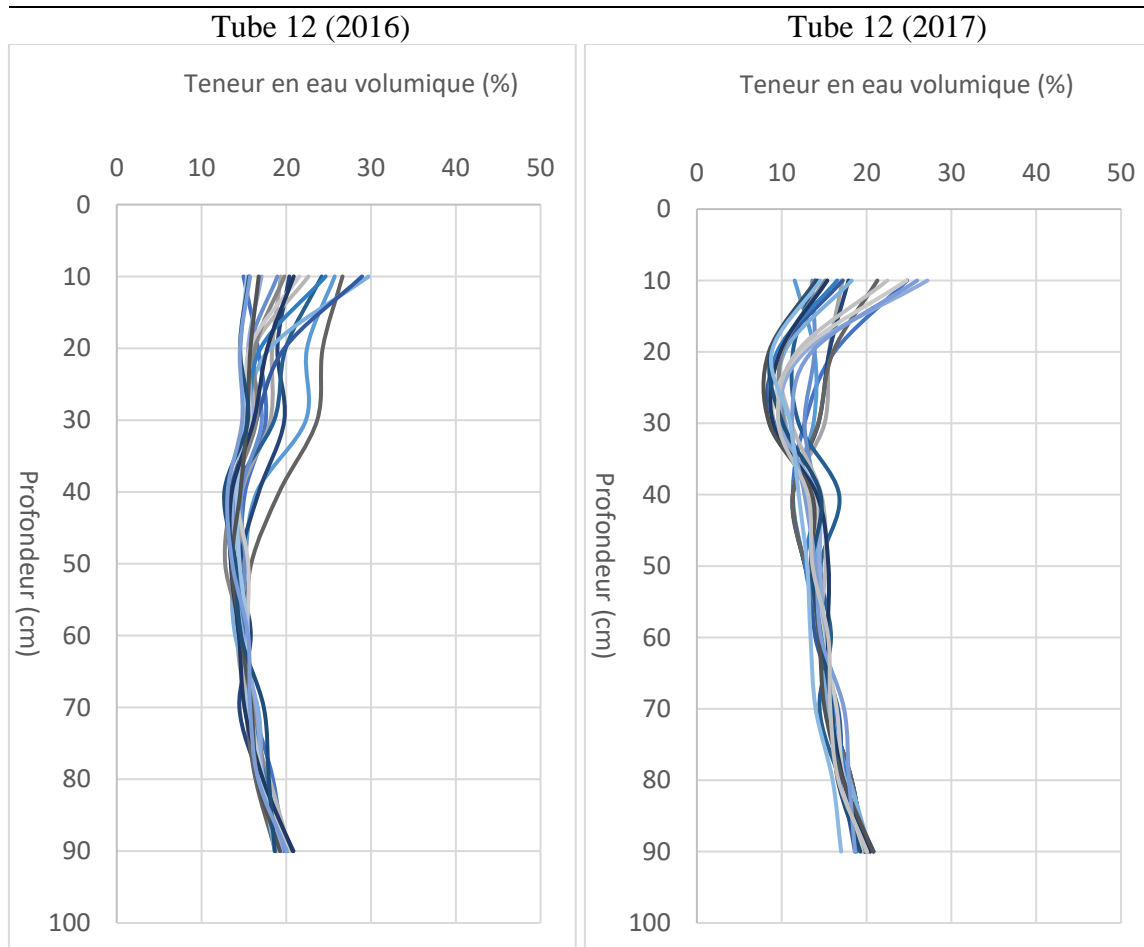


Figure 81. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 12 (témoin 1) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) et 2017 (à droite).

Ces résultats sur la dynamique de l'infiltration des sols dégradés sur les bandes boisées qui sont en dégradation sont similaires à ceux obtenus par plusieurs études antérieures sur le même site (Galle et al., 1997 ; Ingatan Warzagan, 2020 ; Vandervaere, 1995), qui ont montré que l'humidité du sol reste constante en profondeur au-delà de 50 cm, sur le sol nu (bande nue) où l'humidité ne dépasse pas 25 %. Ainsi, le fonctionnement hydrique des bandes boisées en dégradation tend progressivement et inévitablement vers le fonctionnement type des bandes nues de la brousse tigrée décrit par ces auteurs, comme observé dans le tube 12.

#### ❖ Évolution de la teneur en eau du sol dans un tube témoin sur le haut glacis

La figure 82 illustre l'évolution de la teneur en eau du sol dans le tube 1 installé dans la parcelle témoin 4 sur le glacis encroûté et dégradé (cf. figure 27).



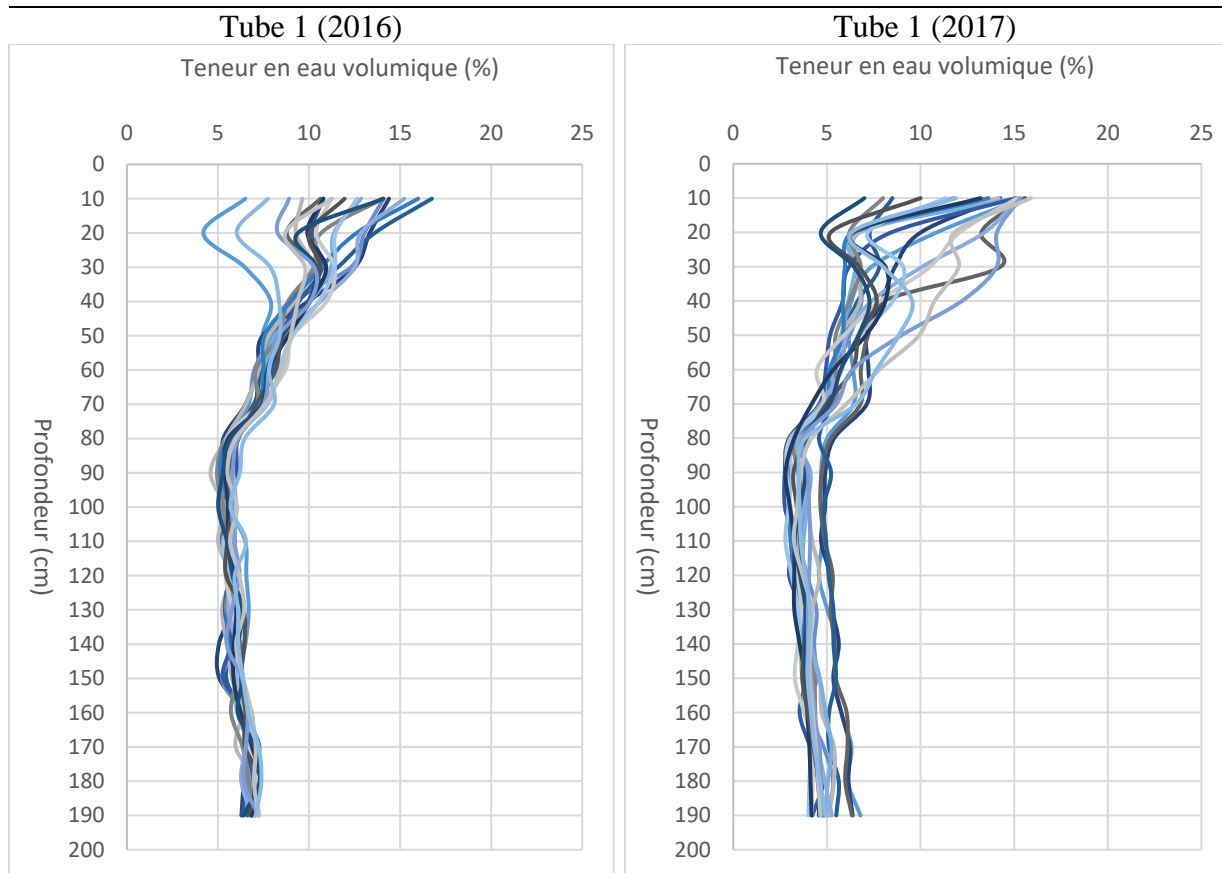


Figure 82. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 1 (témoin 4) pendant les saisons pluvieuses de 2016 (à gauche) et de 2017 (à droite).

La figure 82 montre que dans la parcelle témoin 4, les teneurs en eau volumique du sol sont faibles à toutes les profondeurs, de la surface à 190 cm. Les profils de teneur en eau dans le tube 1, de la parcelle témoin 4, de 2016 à 2017 confirment cette observation. En effet, la teneur en eau maximale du sol diminue légèrement de 17 % en 2016 à 16 % en 2017. En revanche, dans les parcelles aménagées SL 4 et SL-E-B 4, les teneurs en eau maximales du sol en 2017 sont respectivement de 20 % et 23 %, montrant l'effet bénéfique des techniques de sous-solage, d'ensemencement et de branchage sur l'augmentation de la teneur en eau du sol.

En outre, les fronts d'infiltration dans les parcelles témoins sont proches de la surface du sol, à environ 50 cm en 2016 et 60 cm en 2017. Cela suggère que la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est faible en profondeur, en particulier lors des fortes pluies.

### 5.3. L'intercomparaison de la teneur en eau à l'échelle de l'évènement pluvieux

La quantité d'eau dans le sol est fortement influencée par les précipitations, en fonction de la technique d'aménagement appliquée. Pour le prouver, nous avons comparé deux situations : celle du 15 septembre 2017 qui correspond à un sol plus ou moins sec, avant les précipitations, et celle du 16 septembre 2017 qui correspond à un sol humide après une pluie de 32 mm. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans la figure 83.

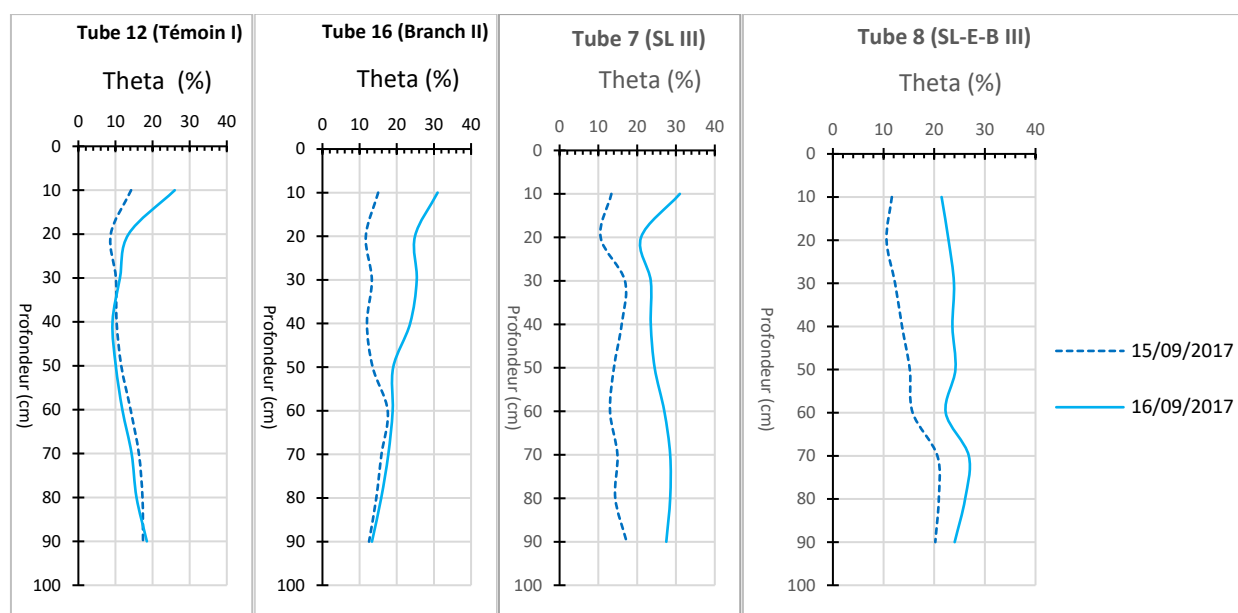


Figure 83. La comparaison de la teneur en eau volumique avant (15/09/2017) et après la pluie (16/09/2017).

La figure 83 illustre l'évolution des profils de teneur en eau du sol mesuré après la pluie de 32 mm du 16 septembre 2017 et avant la pluie, le 15 septembre 2017. Cette figure montre de façon claire que l'influence de la pluie est moins significative dans la parcelle témoin par rapport aux parcelles aménagées. Ainsi, l'effet de la pluie du 16 septembre a provoqué une évolution de la teneur en eau volumique à environ 30 cm de profondeur du sol dans le tube 12 (témoin I). En fait, les résultats montrent que la quantité d'eau dans le sol a augmenté de 12 % le 15 septembre à 26 % le 16 septembre, ce qui représente une augmentation de 14 %. Toutefois, cette augmentation est moins significative à une profondeur plus grande, où la teneur en eau reste presque la même ou diminue légèrement. Cela suggère que les averses ont une influence limitée sur la teneur en eau du sol dans les bandes boisées dégradées non aménagées, comme c'est le cas dans le tube 12 (parcelle

témoin I). Cependant, dans les parcelles aménagées, l'influence des averses est très manifeste. Par exemple, la teneur en eau volumique évolue de 16 à 31 % dans le tube 16 (branchage II), soit une augmentation de 15 % en surface (0 à 10 cm). Mais l'influence de cette forte augmentation se limite à 50 cm de profondeur.

Dans le tube 7 (SL III) et le tube 8 (SL-E-B III), l'influence de cette pluie du 16 septembre dépasse très largement les profondeurs auxquelles les mesures de teneur en eau ont été effectuées (> 90 cm). En outre, en surface du sol, par exemple, la teneur en eau volumique évolue de 12 à 31 % dans le tube 14, soit une augmentation de 19 % ; et de 12 % à 22 % dans le tube 8 (SL-E-B III), soit une augmentation de 10 %. En plus de l'effet de la pluie, cette considérable augmentation de la teneur en eau du sol dans ces tubes (SL III et SL-E-B III) s'explique par l'influence de la reprise du remaniement du sol effectué depuis le 10 juillet 2017 dans les parcelles SL III et SL-E-B III. En effet, la figure 84 illustre l'effet combiné de la reprise du remaniement du sol (le 10 juillet) et d'un évènement pluvieux à hauteur de 15 mm sur la l'évolution de la teneur en eau volumique du sol dans les tubes 7 (SL-E-B III) et tube 8 (SL III). La reprise du sous-solage a été effectuée le 10 juillet 2017. En outre, juste après le remaniement du sol, des mesures des profils de teneur en eau ont également été effectuées.

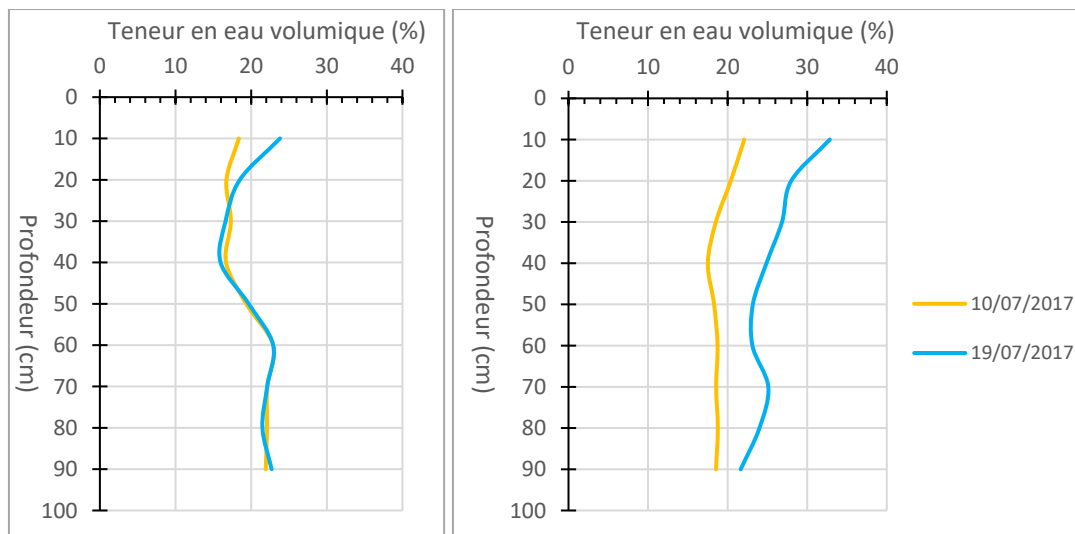


Figure 84. L'influence de la reprise du remaniement du sol et d'un évènement pluvieux de 15 mm sur l'évolution de la teneur en eau volumique dans le tube 7 (SL III) à gauche et dans le tube 8 (SL III) à droite.

L'analyse de la figure 84 montre que la pluie de 15 mm a eu un impact significatif sur l'évolution de la teneur en eau du sol de la surface du sol jusqu'en profondeur. Mais cette pénétration de la teneur en eau du sol jusqu'en profondeur a, en effet, été facilitée par l'effet de la reprise du remaniement du sol. À titre illustratif, dans le tube 8 (SL-E-B III), la teneur en eau passe de 23 % le 10 juillet à 34 % le 19 juillet, soit une augmentation de 11 %. En revanche, l'effet de cette pluie a été moins significatif dans le tube 8 par rapport au tube 7 (SL III). Dans ce dernier, la teneur croit de 18 % le 10 juillet à 24 % le 19 %, soit une augmentation de 6 % seulement. Ce résultat traduit que le remaniement du sol reste plus efficace dans les parcelles aménagées par l'association du sous-solage-ensemencement-branchage que dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple remaniées à plusieurs reprises.

À présent, nous synthétisons les résultats présentés ci-haut en changeant l'échelle temporelle.

#### **5.4. L'analyse de l'évolution mensuelle de la teneur en eau volumique du sol**

Nous avons examiné l'évolution de la teneur en eau du sol chaque mois pendant la saison des pluies (mai, juillet, août, septembre et octobre). Nous avons choisi ces mois, car le mois de mai marque le début de la saison des pluies, et le mois d'octobre marque sa fin. En utilisant cette échelle de temps, nous avons pu observer comment les différentes techniques d'aménagement affectent l'humidité du sol au début, au milieu et à la fin de la saison des pluies (qui se termine en octobre). Cette méthode de simplification nous a permis de mieux comprendre l'effet de chaque technique d'aménagement sur l'humidité du sol de 2016 à 2017, et de 2017 à 2018 pour la technique du branchage.

Il convient de noter que Balme et al. (2005) ont montré que la saison hydrologique commence généralement en juin et se termine en septembre, tandis que selon Stern et al. (1981), le début de la saison des pluies au Sahel peut être indiqué à partir de mai.

La teneur en eau mensuelle représente la moyenne de tous les profils évènementiels de teneurs en eau mesurées durant le mois de la saison pluvieuse.

Mais pendant les mois de la saison sèche (octobre à avril), c'est une seule mesure qui est effectuée (cf. § 3.2.4) du fait de la faible variation de la teneur en eau du sol.

### 5.4.1. L'effet de la technique du branchage sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau

La figure 85 illustre comment la teneur en eau du sol a évolué de manière mensuelle dans le tube 16 de la parcelle de branchage I, entre 2017 (première année de l'aménagement) et 2018 (deuxième année de l'aménagement). Cependant, il est important de rappeler que les mesures ont été interrompues en juillet 2018 en raison d'une panne de la sonde à neutrons. En analysant la figure n° 85, on peut observer que la teneur en eau du sol évolue très peu dans les tubes 15 et 16 (branchage I et II) pendant la saison pluvieuse de juillet à septembre. Mais elle est relativement importante en surface (0 à 40 cm de profondeur). En outre, cette teneur en eau du sol augmente légèrement de 28 % en juillet à 32 % en août, pour redescendre à 30 % en septembre 2017 à la fin de la saison des pluies. Cependant, la teneur en eau diminue donc de façon significative, passant de 30 % en septembre à 15 % en novembre 2017, correspondant au début de la saison sèche. Cette forte variation est due à l'évaporation de l'eau de la surface du sol ainsi qu'à la microporosité créée par la microfaune.

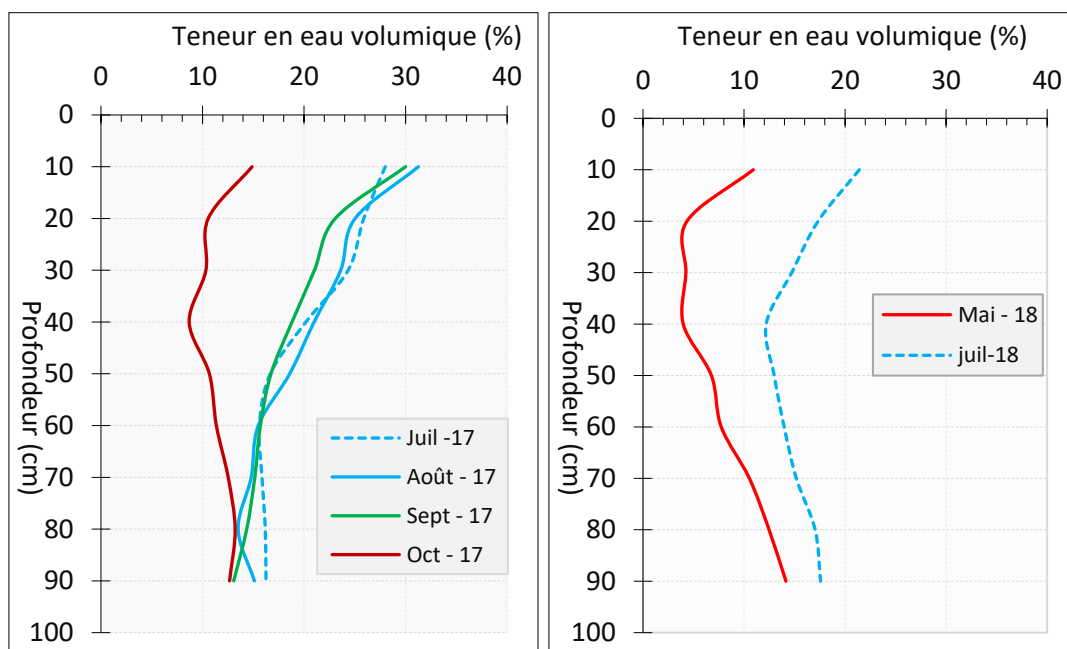


Figure 85. La dynamique mensuelle de la teneur en eau du sol moyenne dans du tube 15 (branchage I) et tube 16 (branchage II) pendant les saisons pluvieuses de 2017 (à gauche) et de 2018 (à droite).

En observant la teneur en eau du sol dans les tubes de branchage, nous avons remarqué une diminution de la quantité d'eau disponible en surface et en profondeur du sol. Cette diminution est perceptible dès la première année de l'application du branchage en 2017, où la teneur en eau en surface était de 28 % en juillet et a diminué à 22 % en juillet 2018, malgré un cumul de pluie plus important en 2018 (189 mm) qu'en 2017 (164 mm). Cette baisse de la teneur en eau se manifeste également en profondeur, mais à un degré moindre. En effet, les mesures ont révélé que les galeries créées par les termites renforcées par les branchettes éparpillées ont permis de maintenir des teneurs en eau plus élevées dans le sol en 2017, surtout en surface. Cependant, en 2018, l'efficacité de la technique du branchage a diminué et cela est probablement dû à une modification de l'activité biologique des termites (figure 86).



*Figure 86. Les galeries créées par les termites dans les parcelles aménagées pouvant influencer l'infiltration de l'eau dans le sol.*

## 5.4.2. L'effet de la technique du sous-solage simple sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau

### ➔ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau

Les résultats de l'influence de la technique du sous-solage simple sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique sont présentés dans les figures 87 et 88. Ces figures présentent les évolutions des teneurs en eau du sol, dans le tube 14 installé dans la parcelle SL I remaniée uniquement en 2016 et, dans le tube 7 installé dans la parcelle SL III remaniée en 2016, 2017 et 2018. Seuls seront présentés, ici, les résultats de l'évolution de la teneur en du sol aux échelles saisonnières 2016 et 2017.

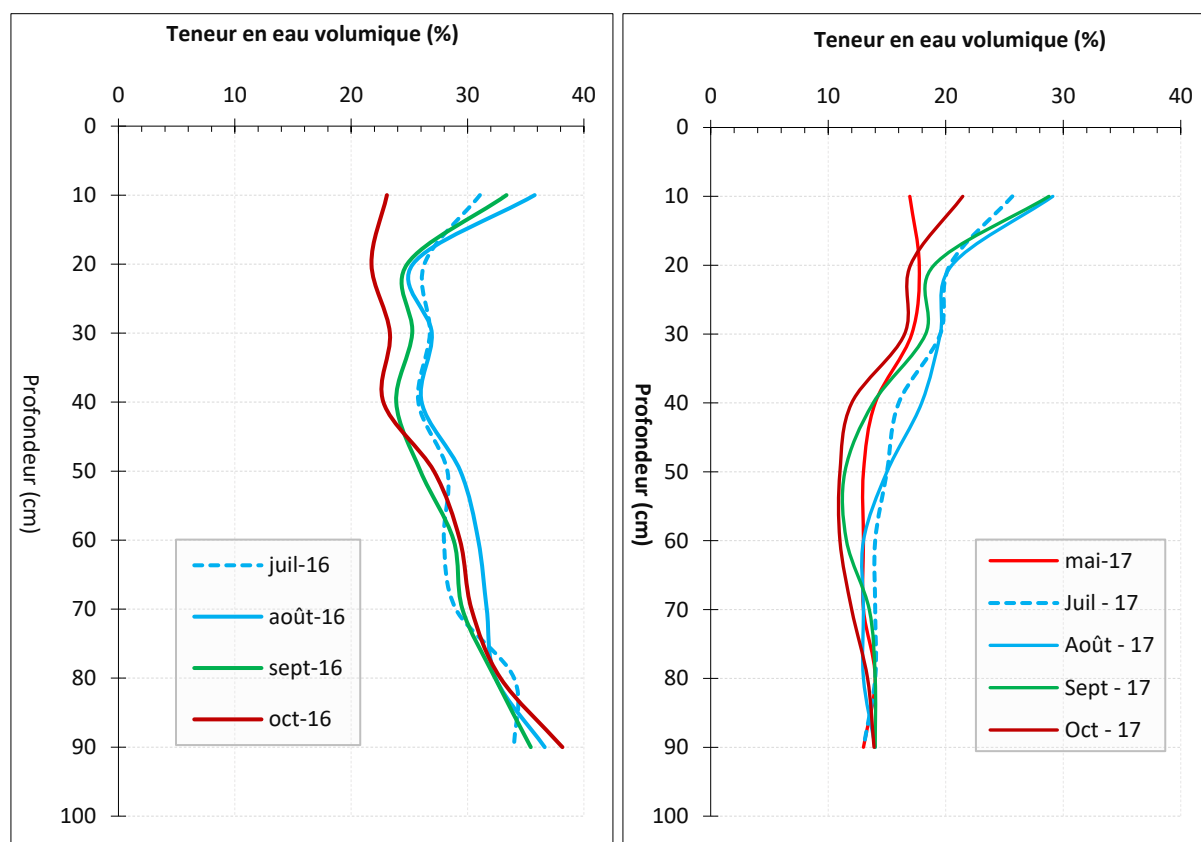


Figure 87. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 14 (SL I) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) et 2017 (à droite).

La figure 87 montre que lors de la première année de sous-solage pendant la saison des pluies en 2016, les teneurs en eau du sol sont élevés, avec des valeurs supérieures à 30 % à la surface du sol,



dans le tube 14 (SL I) à une profondeur de 0 à 10 cm. Toutefois, ces niveaux d'eau ont diminué, passant de 33 % en septembre à 23 % en octobre 2016, soit une perte de 10 % d'eau en raison du début de la saison sèche.

En comparant les résultats de la deuxième saison pluvieuse en 2017 avec la première année du sous-solage de la parcelle SL I (tube 14), on constate que les teneurs en eau du sol sont plus faibles en surface (0 à 10 cm), avec environ 26 % en juillet, 29 % en août et septembre, ce qui est inférieur à 30 %. En octobre 2017, la teneur en eau du sol a diminué de 7 % par rapport à septembre, passant de 29 % à 22 %. Cette diminution de la teneur en eau est moins importante que celle constatée en octobre 2016 (10 %). La dégradation progressive des conditions d'infiltration de l'eau en surface du sol a conduit à une forte diminution de la teneur en eau en profondeur. Par exemple, à 50 cm de profondeur, la teneur en eau du sol est passée de 28 % en juillet 2016 à 14 % en juillet 2017, soit une diminution d'environ 14 %. Ce qui traduit une réduction temporelle de l'efficacité de la technique du sous-solage simple comme en témoignent les teneurs en eau du sol plus élevées au niveau de tous les profils hydriques mesurés en 2016 (première année du sous-solage) par rapport aux teneurs mesurées en 2017 (deuxième année du sous-solage).

Ingatan Warzagan (2020) a également constaté la baisse de l'efficacité de la technique du sous-solage profond du sol (jusqu'à 40 cm), entre sa première année de réalisation où il était plus efficace, par rapport à sa deuxième année de réalisation où il est devenu moins efficace.

Cependant, l'intercomparaison des résultats du tube 14 (SL I) avec ceux du tube 7 (SL III) montre une dynamique des teneurs en eau du sol avec le maintien de l'efficacité de la technique du sous-solage simple sur l'augmentation de la teneur en eau durant les deux ans du suivi (figure 88).

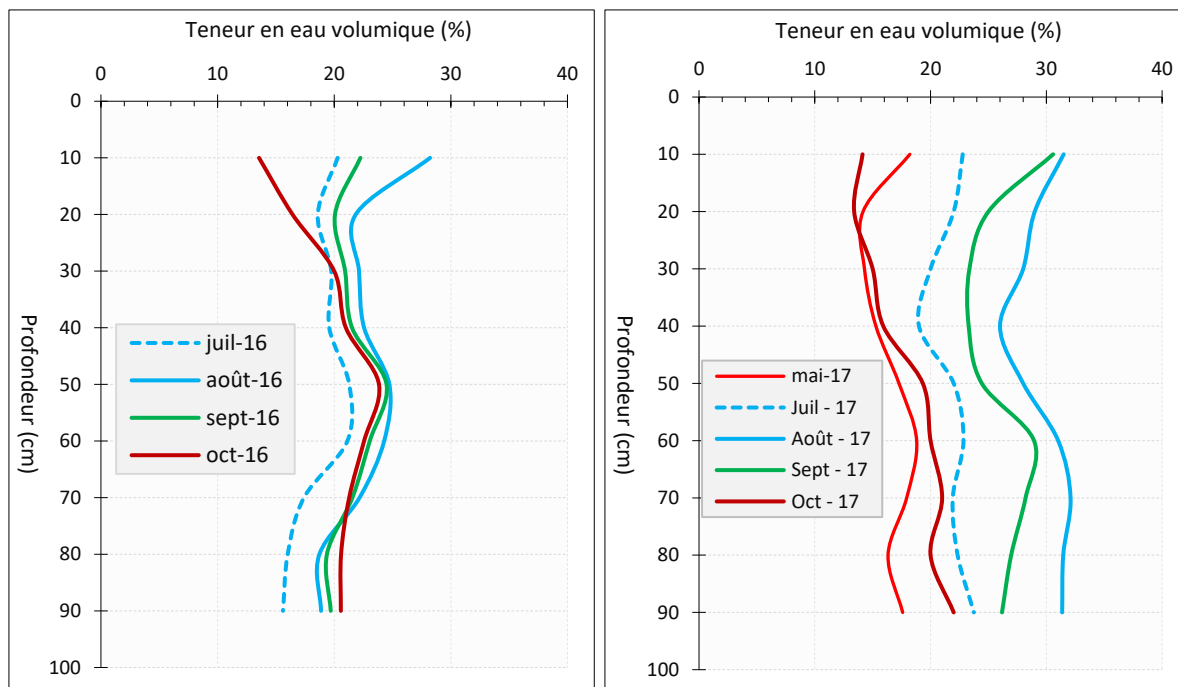


Figure 88. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 7 (SL III) pendant les saisons pluvieuses de 2016 (à gauche) et de 2017 (à droite).

La figure ci-dessus montre que les teneurs en eau du sol du tube 7 (SL III) sont de l'ordre de 20 % en juillet, 28 % en août et 22 % en septembre dans le profil du sol de 0 à 10 cm de profondeur pendant la saison pluvieuse 2016 (première année du sous-solage). En fin de la saison pluvieuse 2016, la teneur en eau du sol passe de 22 % en septembre à 14 % en octobre, soit un dessèchement estimé à 8 %.

Les teneurs en eau du sol sont estimées en surface à 23 % en juillet, 24 % en août, 31 % en septembre 2017 dans le tube 7 (SL III) remanié pour une seconde fois. Ces valeurs de teneur en eau du sol mesurées en surface du sol en 2017 comparées à celles de 2016 montrent une légère augmentation, par exemple, en août, la teneur en eau est de 22 % en 2016 contre 24 % en 2017. Cette augmentation de la teneur en eau se constate même en profondeur du sol. À 50 cm de profondeur, la teneur en eau du sol est de 21 % en juillet 2016 contre 23 % en juillet 2017, soit une légère augmentation de 2 %.

L'intercomparaison de l'évolution de la teneur en eau pendant les saisons pluvieuses de 2016 à 2017 montre qu'elle tend vers la diminution dans le tube 14 (SL I) remanié une seule fois (voir

figure 87). Par contre, dans le tube 7 (SL III) remanié en 2016 et 2017, la teneur en eau du sol tend vers l'augmentation (figure 88). Ce qui montre que la reprise du sous-solage (remaniement du sol) avec une seule fréquence par an durant deux ou trois années peut contribuer à maintenir l'efficacité de la technique du sous-solage simple avec des teneurs en eau élevées sur le revers du plateau.

➔ **Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis**

La dynamique mensuelle de la moyenne de la teneur en eau du sol dans les tubes 4 et 5 (SL 4) installés sur le haut glacis encroûté est présentée dans la figure 89. La teneur en eau volumique a été mesurée pendant la situation avant aménagement des tubes en 2016 et après aménagement en 2017.

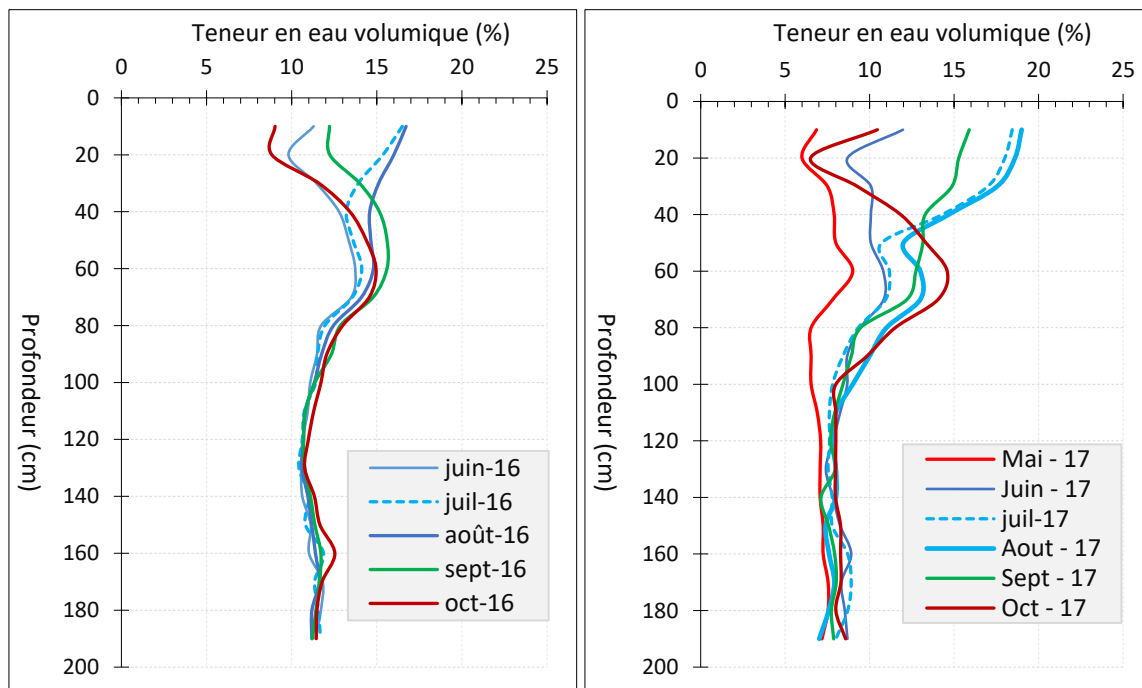


Figure 89. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique moyenne dans le tube 4 et 5 (SL 4) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) avant sous-solage et 2017 (à droite) après sous-solage.

L'interprétation de la figure 89 montre que les teneurs en eau volumiques mensuelles moyennes sont plus faibles avant le sous-solage en 2016 par rapport aux teneurs en eau après sous-solage en 2017. À titre d'exemple, la teneur en eau du sol en surface (0 à 15 cm) croit de 11 % en juin à  $\approx$  17 % en août et en septembre 2016. À la fin de la saison pluvieuse en octobre 2016, la teneur en

eau descend à 9 %. Cette dernière évolue à son plus bas niveau à 7 % en mai, et augmente à 12 % dès juin 2017.

La dynamique après aménagement en 2017 montre que la teneur en eau augmente à 18 % en juillet, puis à 19 % en août. Par la suite, la teneur en eau décroît à 16 % en septembre et à 11 % en octobre. Cette dynamique en 2017 montre que la teneur en eau mensuelle est plus élevée après aménagement par sous-solage par rapport à la dynamique de 2016, sans aménagement. La technique de sous-solage simple a permis d'améliorer la teneur en eau du sol jusqu'à environ 100 cm de profondeur. En 2016, la zone d'infiltration était limitée à 60 cm, tandis qu'en 2017, elle s'est étendue jusqu'à 100 cm après l'aménagement. Cependant, au-delà de cette profondeur, la teneur en eau du sol reste faible pendant toute la saison des pluies, ainsi qu'au début (octobre) et à la fin (mai) de la saison sèche.

Abu-Hamdeh (2003), Gasser (2012) et Raper & Bergtold (2007) ont rapporté que le sous-solage du sol a des effets positifs sur l'amélioration des propriétés hydrique du sol. Mais les teneurs en volumique restent plus importantes en surface du sol (partie du sol ameublie) par rapport à la profondeur du sol (Ingatan Warzagan, 2020).

En revanche, les observations que nous avons faites montrent que le sous-solage des sols (15 cm de profondeur) des bandes boisées en dégradation permet d'améliorer les teneurs en eau volumiques à des profondeurs six fois plus élevées (soit 90 cm). Sur le haut glacis, la dynamique de la teneur en eau a été modifiée au-delà de 110 cm de profondeur. Cela s'explique par le fait que les sols des surfaces boisées dégradées ont déjà été colonisés par une végétation dense dont les racines ont préalablement remué le sol. Par conséquent, le sous-solage est bénéfique, car il permet de remuer davantage le sol.

D'autres résultats ont démontré que les effets bénéfiques de la mise en œuvre du labour des sols sableux (presque similaire au sous-solage) restent éphémères (Lamachère & Serpantié, 1991). En plus, le sous-solage simple appliqué uniquement sur des surfaces boisées dégradées à sol argilo-limoneux ne crée pas des conditions permanentes d'amélioration de la teneur en eau du sol durant toute la saison pluvieuse. Après quelques pluies, le sol se colmate en surface et l'infiltration diminue (Boubacar Na-Allah et al., 2017 ; Lamachère & Serpantié, 1991 ; Malam Abdou et al., 2016).

### 5.4.3. L'effet de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la dynamique mensuelle de la teneur en eau

#### ➔ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau

Les figures 90 et 91 montrent l'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur l'évolution mensuelle de la teneur en eau du sol dans le tube 13 installé dans la parcelle SL-E-B I remaniée une seule fois en 2016 et dans le tube 8 installé dans la parcelle SL-E-B III remaniée à trois reprises en 2016, 2017 et 2018. Nous présentons uniquement les résultats sur l'évolution de la teneur en eau de 2016 à 2017.

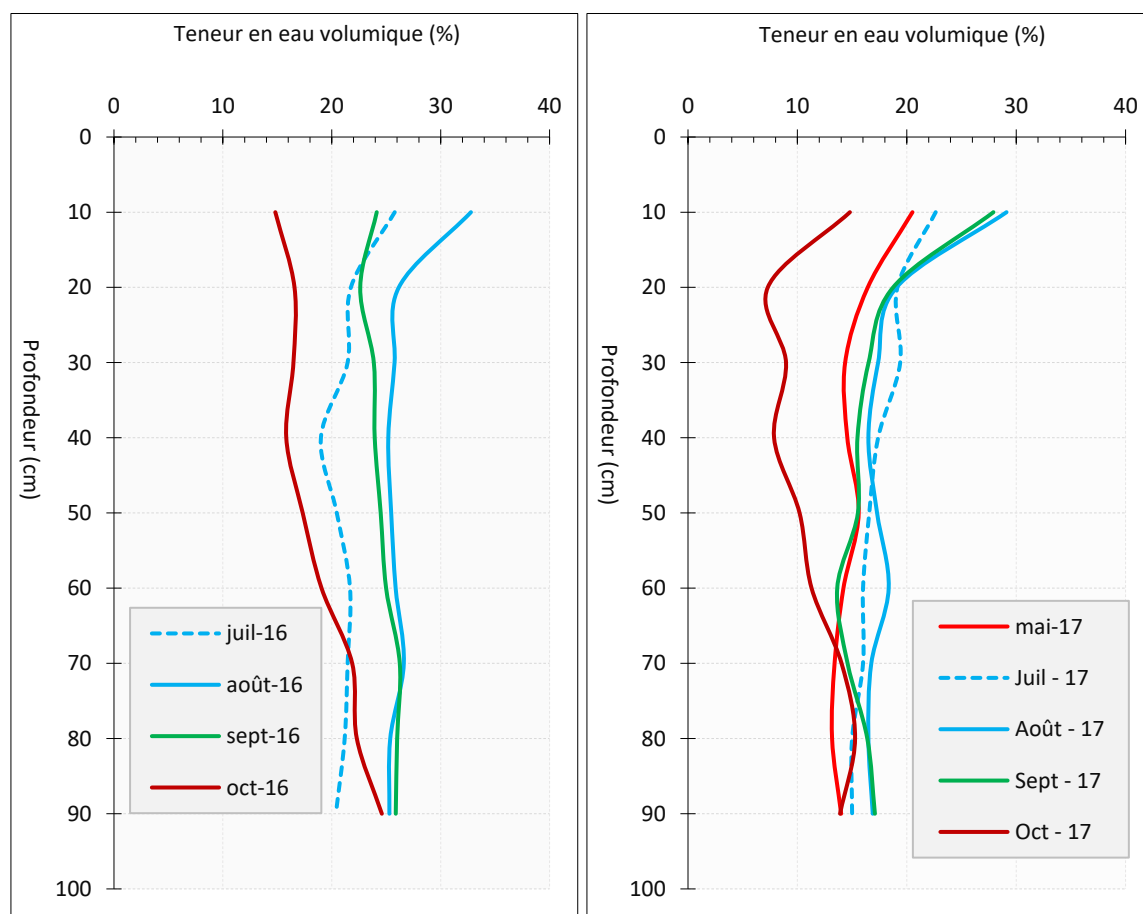


Figure 90. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 13 (SL-E-B I) de 2016 (à gauche) à 2018 (à droite).

La figure 90 montre que l'aménagement de la parcelle SL-E-B I a entraîné une amélioration de la teneur en eau du sol dans le tube 13. En juillet 2016, la teneur en eau à la surface du sol (0 à 10 cm)

a augmenté de 26 %, passant à 33 % en août, puis diminuant à 24 % en septembre et à 14 % en octobre, début de la saison sèche 2016. La dynamique de la teneur en eau du sol est forte même en profondeur étant donné que le front d'infiltration dépasse les 90 cm de profondeur.

La diminution de la teneur en eau à l'échelle saisonnière entre la valeur maximale enregistrée en août (33 %) et la valeur minimale enregistrée en octobre est de l'ordre de 19 %.

En 2017, soit la deuxième année après l'aménagement du tube 13, la teneur en eau du sol a globalement tendance à réduire de la surface du sol jusqu'en profondeur. Par exemple, en août 2017 (milieu de la saison), la teneur en eau de la surface du sol (0 à 10 cm) était de 25 %, contre 33 % en août 2016. Cependant, au début de la saison sèche en octobre, la teneur en eau est presque similaire en surface du sol (0 à 10 cm) par rapport à celle de l'année précédente. En revanche, les teneurs en eau de tous les profils mesurés en fonction de la profondeur du sol (de 20 à 90 cm), au cours de la saison pluvieuse 2017 (deuxième année de l'aménagement) sont inférieures à celles mesurées au cours de la saison 2016 (première année de l'aménagement). Ce résultat montre une diminution de l'influence de cette technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage un an après son application.

En revanche, le profil hydrique du tube 8 dans la parcelle SL-E-B III montre une amélioration de la teneur en eau du sol entre 2016 et 2017 grâce à la technique d'aménagement du sous-solage-ensemencement-branchage. Cette parcelle a été réaménagée en 2017 en effectuant uniquement le sous-solage. Cela a entraîné une augmentation de la teneur en eau du sol en surface de 6 % (27 % en 2016 contre 33 % en 2017) en juillet et de 10 % (22 % en 2016 contre 32 % en 2017) en septembre. Cette augmentation de la teneur en eau est également ressentie en profondeur du sol. Ces résultats sont illustrés dans la figure 91. En effet, tous les profils mesurés en juillet, août et septembre montrent des teneurs en eau supérieures à 22 % de 40 à 90 cm de profondeur en 2017 alors qu'en 2016, les teneurs en eau de ces profils sont inférieures à 20 %. Ce résultat montre clairement un maintien de l'efficacité de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage durant la première (2016) et la deuxième année (2017).

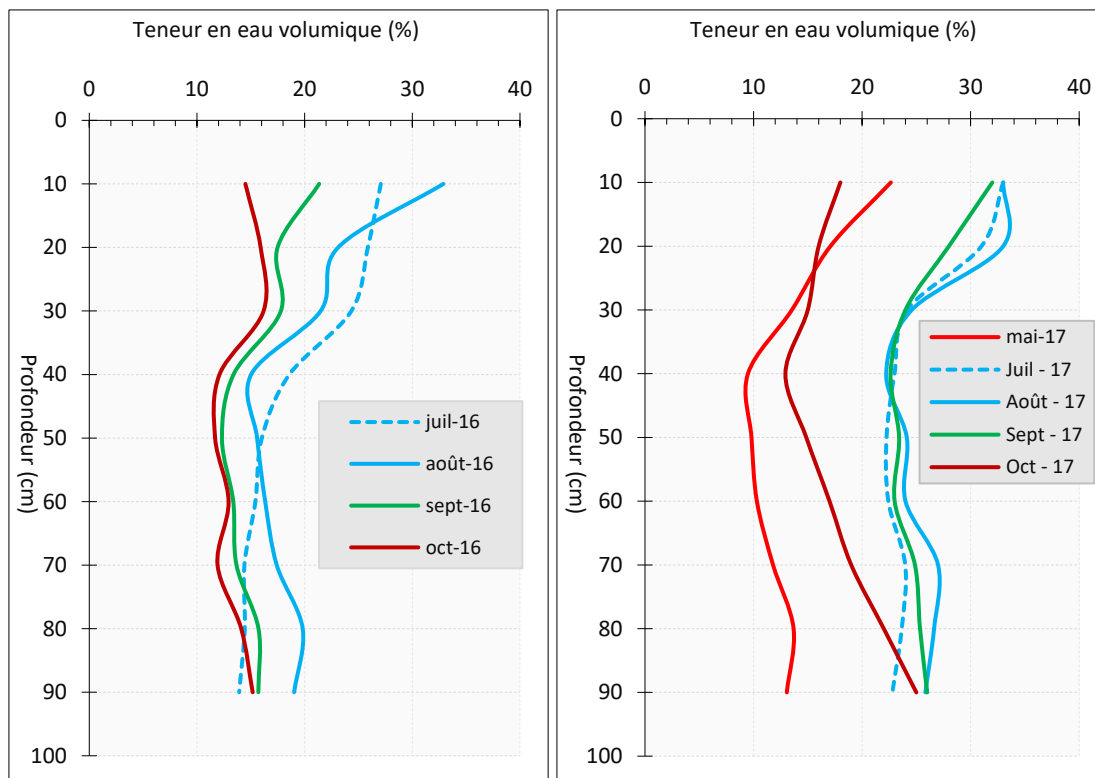


Figure 91. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 13 (SL-E-B III) de 2016 (à gauche) à 2017 (à droite).

### ➔ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis

La figure 92 montre l'évolution de la teneur en eau mensuelle du sol de 2016 (année témoin sans aménagement) à 2017 (après aménagement) dans les tubes 2 et 3 installés dans la parcelle SL-E-B 4. Les teneurs en eau mensuelles représentent les moyennes obtenues dans ces tubes (2 et 3).

L'analyse de la figure 92 montre que les teneurs en eau volumiques mensuelles moyennes sont plus faibles avant le sous-solage en 2016 par rapport aux teneurs en eau après sous-solage en 2017. Ainsi, la teneur en eau du sol en surface (0 à 15 cm) croit de 11 % en juin à 16 % en juillet, à 15 % en août et à 13 % en septembre 2016. À la fin de la saison pluvieuse, la teneur en eau descend à 7 % en octobre. Elle commence à augmenter à 9 % en mai et à 12 % dès juin 2017.

La dynamique après aménagement montre que la teneur en eau mensuelle augmente à 16 % en juillet, à 18 % en août et 20 % en septembre 2017. Puis, la teneur en eau mensuelle diminue à  $\approx$  10 % en octobre. Même si la dynamique de la teneur en eau mensuelle reste faible après



aménagement, elle montre cependant une nette amélioration des teneurs en eau du sol par rapport à la dynamique de 2016, avant aménagement (année témoin). Cette amélioration de la teneur en eau du sol se remarque plus nettement entre 0 à 60 cm de profondeur. Au-delà de cette profondeur, la dynamique de la teneur en eau demeure faible entre la situation avant aménagement en 2016 par rapport à la situation après aménagement en 2017

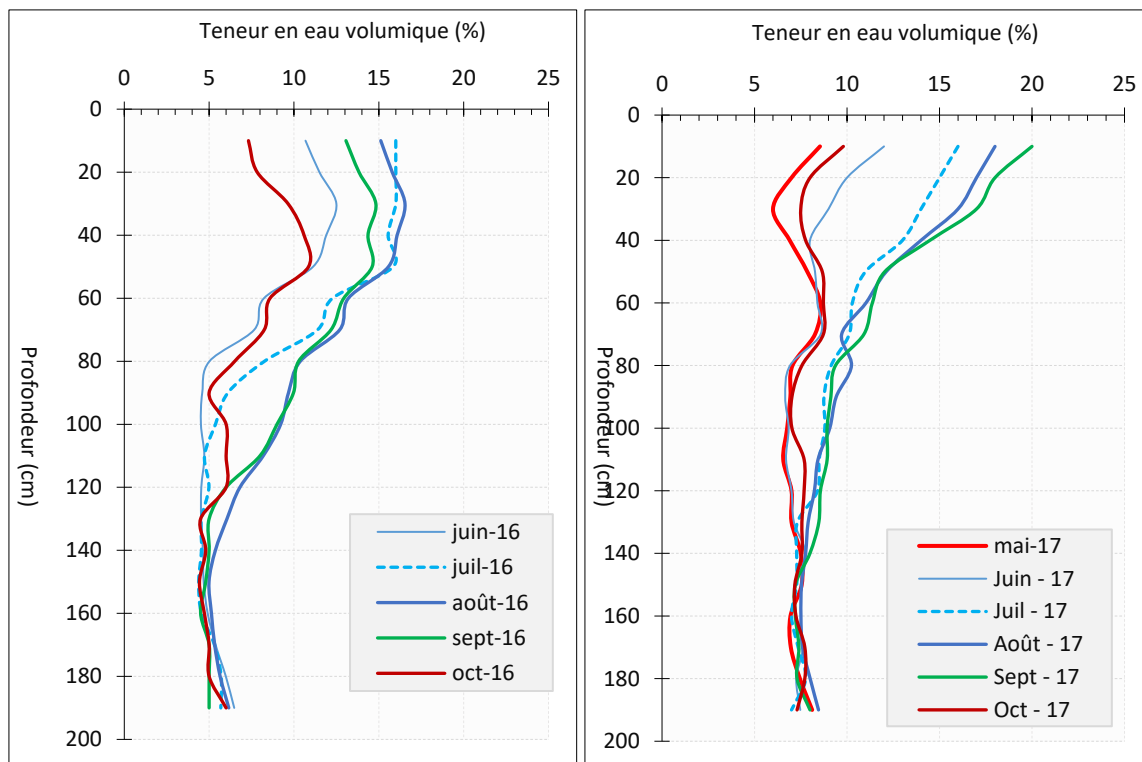


Figure 92. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique moyenne dans le tube 2 et 3 (SL-E-B 4) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) avant sous-solage et 2017 (à droite) après sous-solage.

#### 5.4.4. La dynamique mensuelle de la teneur en eau sur les surfaces témoins

##### ❖ Sur le revers du plateau

La figure 93 illustre l'évolution de la teneur en eau volumique mensuelle dans le tube 12 installé dans la parcelle témoin I. À titre de rappel, ces parcelles témoins ont été décrites comme des surfaces en dégradation ou tout simplement surfaces dégradées (cf. § 2.5.2.4).

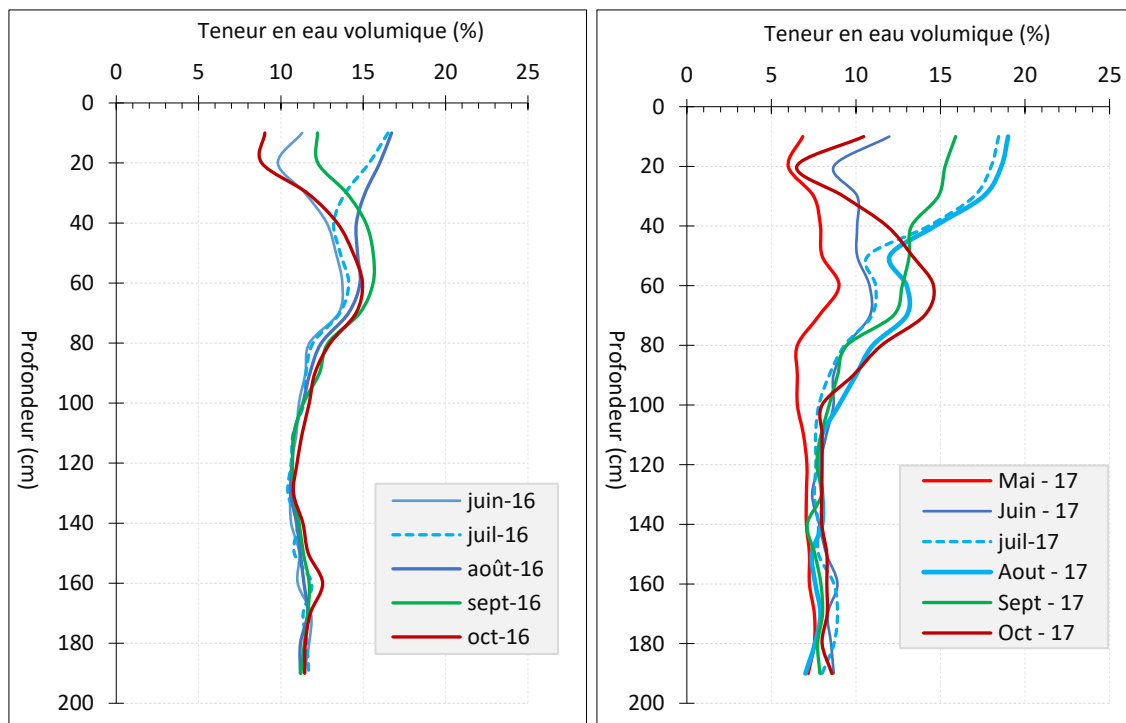


Figure 93. La dynamique mensuelle de la teneur en eau du sol dans le tube 12 installé dans la parcelle témoin I sur le revers du plateau de 2016 (à gauche) à 2017 (à droite).

L'analyse de la figure 93 montre que la teneur en eau volumique mensuelle est faible à la surface du sol entre 0 à 10 cm de profondeur. Ainsi, elle évolue de 22 % en juillet, à 24 % en août, à 18 % en septembre et à 11 % en octobre 2016.

En mai 2017, la teneur en eau volumique mensuelle en surface est de 13 %. Elle augmente à 21 % en juillet, à 23 % en août, à 20 % en septembre et à 14 % en octobre. Ces résultats montrent une faible dynamique de la teneur en eau volumique mensuelle pendant la saison pluvieuse de 2016 et celle de 2017. La teneur en eau mensuelle maximale en surface a été enregistrée en août 2016, soit 24 %. Mais il faut noter que les teneurs en eau maximales mensuelles sont plus élevées dans les tubes installés dans les parcelles aménagées en 2016, soit 34 % dans le tube 14 (SL I), 28 % dans le tube 7 (SL III), 33 % dans le tube 13 (SL-E-B I) et 33 % dans le tube 8 (SL-E-B III). Il en est de même dans le tube 15 et tube 16 installés dans les parcelles branchages en 2017, soit 32 % contre seulement 23 % dans le tube 12 en 2017.

Cette faible dynamique de la teneur en eau dans le tube 12 (témoin) se limite d'ailleurs en surface du sol entre 0 à 30 cm de profondeur au cours des deux saisons pluvieuses. Au-delà de cette

profondeur, l'évolution de la teneur en eau reste extrêmement faible même pendant les mois les plus pluvieux de l'année en août 2016 et 2017. À titre de comparaison, avec les parcelles aménagées, la teneur en eau du sol à 50 cm de profondeur est de 15 % en août 2016 dans le tube 12 (témoin) contre 28 % dans le tube 14 (SL I) et 20 % dans le tube 13 (SL-E-B I).

#### ❖ Évolution de la teneur en eau mensuelle dans le témoin sur le haut glacis

La figure 94 illustre l'évolution de la teneur en eau volumique dans le tube témoin 1 installé dans la parcelle témoin 4 sur le haut glacis.

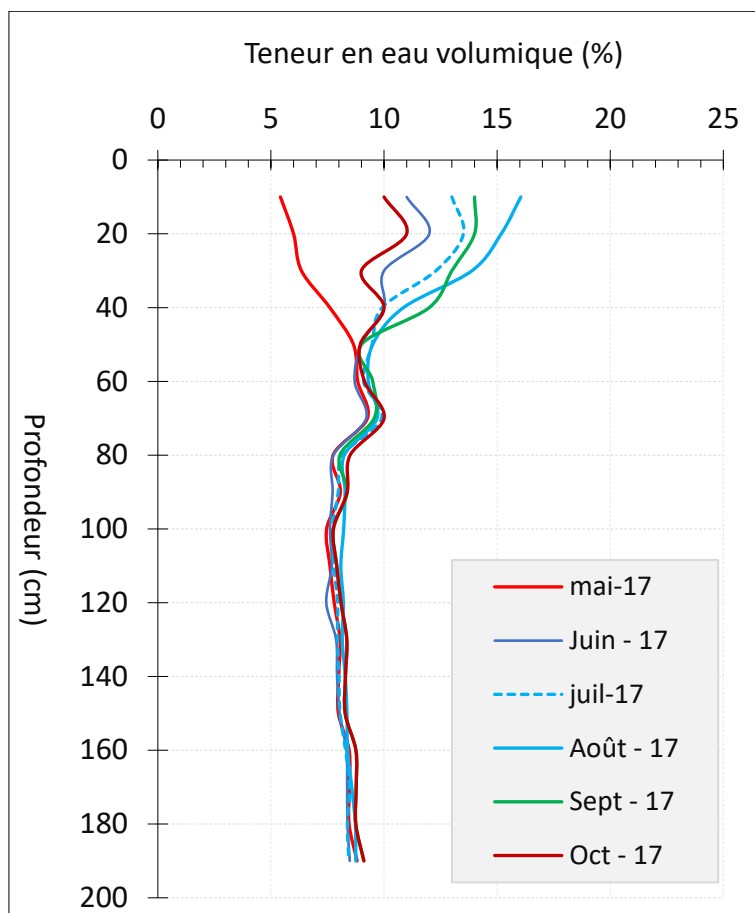


Figure 94. La dynamique mensuelle de la teneur en eau du sol dans le tube 1 installé dans la parcelle témoin 4 sur le haut glacis encroûté.

L'observation de la figure 94 montre une faible dynamique de la teneur en eau du sol dans le tube 1 installé dans la parcelle témoin 4 sur le haut glacis. Au début de la saison pluvieuse, en surface du

sol (0 à 15 cm) la teneur en eau évolue de 6 % en mai à 11 % en juin, à 13 % en juillet et à 16 % en août 2017 qui correspond à la teneur en eau maximale. À la fin de la saison pluvieuse, la teneur en eau diminue à 14 % en septembre et à 10 % en octobre 2017. Cette évolution de la teneur en eau du sol montre une dynamique relativement faible par rapport aux tubes 4 et 5 (SL 4) et aux tubes 2 et 3 (SL-E-B) installés dans les parcelles aménagées sur le haut glacis.

En outre, le front d'infiltration dans la parcelle témoin se limite à environ 60 cm de profondeur contre 140 cm de profondeur dans les tubes 2 et 3 aménagés.

Ce résultat montre en effet l'intérêt bénéfique du sous-solage du sol qui consiste à remanier le sol pour améliorer les conditions d'infiltration de l'eau dans le sol. Et cette opération permet d'augmenter les teneurs en eau de la surface du sol jusqu'en profondeur. L'amélioration des conditions hydriques du sol en surface peut faciliter les conditions germinatives des graines des espèces végétales. En plus, en profondeur du sol, les espèces végétales existantes profitent de l'augmentation de l'humidité du sol pour redémarrer leur productivité végétale.

## **Conclusion**

Les résultats présentés dans ce chapitre ont mis en évidence les effets de trois techniques expérimentées à savoir le branchage, le sous-solage et l'association du sous-solage-ensemencement-branchage sur l'amélioration des conditions hydriques du sol. En ce sens que, le sous-solage manuel (remaniement) réalisé à environ 15 cm de profondeur ouvre grandement les pores du sol en surface pour augmenter l'humidité du sol à des profondeurs 6 à 7 fois supérieures. En outre, les mesures effectuées à l'échelle événementielle à la surface du sol (0 à 10 cm) ont permis de réaffirmer l'éphémère effet de la technique du sous-solage. Mais la combinaison de cette technique avec celle du branchage et d'ensemencement ainsi que les reprises du remaniement du sol au moins une fois pendant trois années successives a favorisé la durabilité des effets de cette technique à des profondeurs élevées (+ de 90 cm sur le revers du plateau et sur le haut glacis).

Le chapitre suivant aborde l'analyse des effets de ces techniques sur la croissance de la végétation.

## Chapitre 6. L'analyse des effets des techniques d'aménagement sur la restauration du couvert végétal

*Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence l'effet des techniques du sous-solage simple, du branchage et de l'association du sous-solage-ensemencement-branchage sur la régénération du couvert végétal. La démarche choisie consiste à faire la comparaison de l'efficacité de chacune de ces techniques en s'appuyant sur des paramètres tels que la composition floristique, la fréquence, et la croissance des espèces végétales (la densité, le développement vertical et horizontal, la survie et la mortalité) à l'échelle des parcelles aménagées.*

### 6.1. L'évolution de la diversité floristique

Pour rappel, nous avons suivi l'évolution de la végétation des parcelles aménagées et des témoins de 2016 à 2018. Nous avons analysé la composition floristique au cours de cette période en fonction des techniques d'aménagement et des unités géomorphologiques.

#### ➤ Dans les parcelles aménagées sur le revers de plateau

Les résultats de l'évolution de la composition floristique sont présentés dans la figure 95.

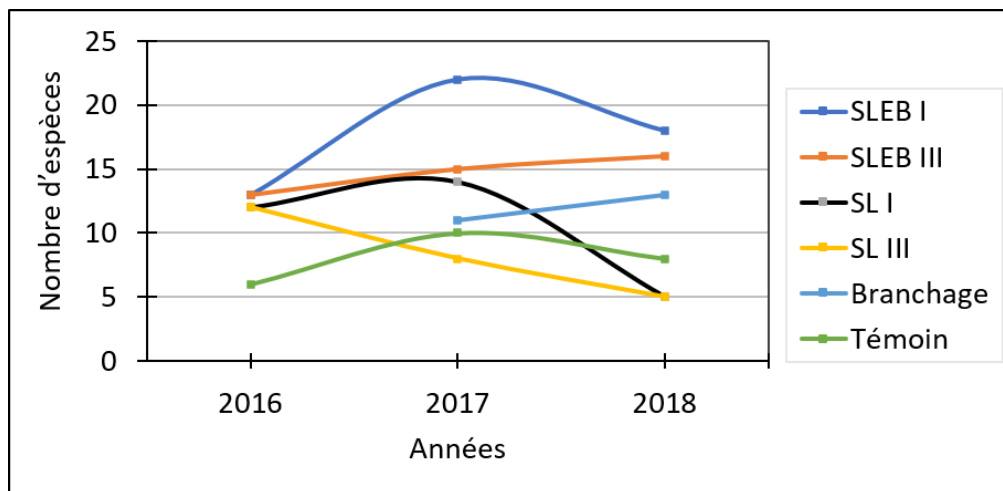


Figure 95. L'évolution de la composition floristique dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau.

La figure 95 montre que la parcelle SL-E-B I a eu le plus grand nombre d'espèces herbacées en 2016, 2017 et 2018, avec 13, 22 et 18 espèces respectivement. Cela suggère qu'il y a eu une augmentation du nombre d'espèces en 2017, en raison de l'absence de la reprise du sous-solage (la parcelle n'a pas été remaniée cette année-là). Cependant, cette augmentation a diminué à partir de 2018, deux ans après la réalisation du sous-solage, c'est-à-dire au moment où les effets de cet aménagement s'amenuisent. La parcelle SL I, qui n'a pas non plus été remaniée en 2017 et 2018, a eu une évolution similaire de la composition floristique à la parcelle SL-E-B I, avec 8, 15 et 5 espèces respectivement en 2016, 2017 et 2018.

Dans les parcelles re-sous-solées en 2017 et 2018, deux techniques ont été utilisées : la combinaison de sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B III) et uniquement le sous-solage (SL III). Entre 2016 et 2017, le nombre d'espèces herbacées a augmenté respectivement de 13 à 16 et de 12 à 8 dans ces deux parcelles. Dans la première parcelle (SL-E-B III), le nombre d'espèces reste stable à 16 en 2018, tandis que, dans la seconde (SL III), il y a eu une forte diminution avec seulement 5 espèces, ce qui indique une tendance à la baisse linéaire.

Dans la parcelle traitée par la technique de branchage, le nombre d'espèces a légèrement augmenté entre 2017 et 2018, passant de 11 à 13.

Cependant, dans la parcelle témoin, 6, 10 et 8 espèces ont été recensées respectivement en 2016, 2017 et 2018. Ces résultats démontrent qu'en 2016, le nombre d'espèces dans la parcelle était inférieur à celui des parcelles aménagées par l'association (SL-E-B I et SL-E-B III) ou uniquement par le sous-solage (SL I et SL III). Par ailleurs, en 2017 et 2018, sauf dans la parcelle branchage, on a observé une diminution du nombre d'espèces dans les parcelles aménagées par la technique de sous-solage simple (SL), que l'aménagement ait été repris ou non dans les parcelles SL I et SL III. Cela est dû en partie à un durcissement du sol dans les parcelles aménagées uniquement par le sous-solage, car l'effet de cette technique n'est que temporaire (cf. figure 61). De plus, cette diminution peut être due aux effets négatifs de la reprise du sous-solage, qui peut entraîner la mort des espèces herbacées qui étaient poussées. En effet, lors de la reprise du sous-solage, certaines plantes herbacées peuvent être déracinées, ce qui peut les faire flétrir, voire disparaître, entraînant ainsi une diminution de la composition floristique.

Pour le cas des ligneux en 2016, la composition floristique n'est constituée que de 3 espèces à savoir *Guiera senegalensis*, *Combretum micranthum* et *Acacia ataxacantha*. En 2017 et 2018, le nombre d'espèces d'arbustes est resté stable. Cependant, en 2019, en plus de *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*, nous avons noté la présence d'*Acacia nilotica*, de *Piliostigma reticulatum* et de *Ziziphus mauritiana*.

D'une manière globale, on constate une amélioration de la composition floristique des surfaces dégradées aménagée sur le revers du plateau à brousse tigrée.

➤ **Dans les parcelles aménagées sur le haut glacis**

Sur le haut glacis, le suivi de la végétation s'est déroulé, de 2017 à 2018, dans la parcelle SL-E-B 5 (clôturée à l'aide d'un grillage), la parcelle SL-E-B 4, la parcelle SL 4 et la parcelle témoin 4. Les résultats sont présentés dans la figure 96.

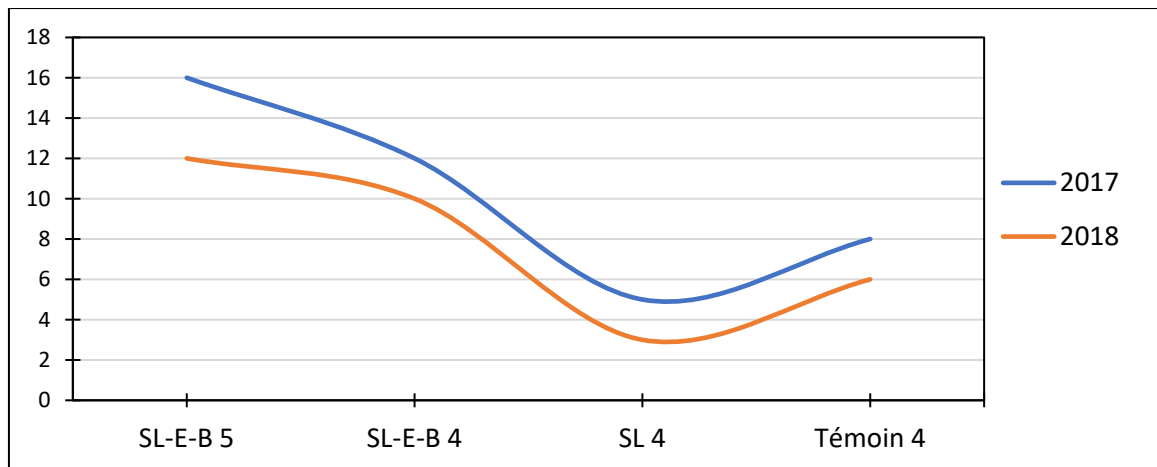


Figure 96. L'évolution de la composition floristique dans les parcelles de suivi installées sur le haut glacis.

La figure 96 illustre clairement que les parcelles SL-E-B 5 (clôturée) et SL-E-B 4 ont montré une augmentation significative de la composition floristique en raison de l'aménagement par sous-solage-ensemencement-branchage. Pour comparer les résultats du nombre d'espèces et son évolution par parcelles aménagées et témoin, il a été constaté que 16 et 12 espèces ont été enregistrées dans les parcelles SL-E-B 5 et SL-E-B 4 lors de la première année d'aménagement en 2017. En 2018, ces chiffres ont diminué, respectivement dans les parcelles citées ci-dessus, à 12 et



10 espèces herbacées. En revanche, la parcelle SL 4 aménagée uniquement par la technique de sous-solage a montré le plus faible nombre d'espèces, soit 5 espèces en 2017 et 3 espèces en 2018. En comparaison, dans la parcelle, témoin 4, il y avait 8 espèces relevées en 2017 et 6 espèces en 2018.

En général, on constate une diminution du nombre d'espèces dans les parcelles aménagées. Cependant, cette diminution est plus marquée dans la parcelle qui a été aménagée uniquement par sous-solage.

Pour ce qui est de la végétation ligneuse sur le haut glacis, elle est essentiellement composée de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* dans les parcelles aménagées par association (SL-E-B 4 et SL-E-B 5) et uniquement par le sous-solage (SL 4). À cela s'ajoute la présence d'*Acacia nilotica* dans la parcelle SL-E-B 4. Toutain (1977) a, quant à lui, identifié *Balanites aegyptiaca* et *Ziziphus mauritiana* sur un haut glacis dégradé sous-solé (sans préciser la profondeur du travail du sol effectué).

Dans l'ensemble, la technique de sous-solage-ensemencement-branchage est la plus efficace pour restaurer la composition floristique de la végétation dans les parcelles aménagées, que ce soit sur le haut glacis encroûté ou sur le revers de plateau.

## **6.2. La synthèse de la composition floristique**

La composition floristique (herbacées et ligneux) est globalement présentée dans les tableaux 14 et 15.

L'analyse du tableau 14 montre que la famille des graminées représente de loin la famille la plus représentative en termes du nombre d'espèces herbacées. En effet, 38 %, soit 17 espèces recensées, appartiennent à la famille des graminées. Quant aux familles de convolvulacées et de lamiacées, elles représentent chacune 7 % du poids des espèces recensées, soit 3 espèces respectivement. Les familles des commelinacées, des malvacées, des papilionacées et des cucurbitacées ne représentent que 5 %, soit 5 espèces par famille. Les espèces dont le poids par famille est le moins important ne représentent que 2 % chacune. Il s'agit des liliacées, des rubiacées, des sterculiacées, des asclépiadacées, des amaranthacées, des euphorbiacées, des tiliacées, des acanthacées, des

molluginacées et des caesalpiniacées. Chacune de ces familles est représentée par, uniquement, une seule espèce identifiée. Le tableau ci-après donne en détail la répartition des espèces par familles.

Tableau 14. Le spectre de familles des espèces herbacées recensées sur les parcelles étudiées.

N°	Espèces	Familles et sa part relative en %	
1	<i>Aristida longiflora</i> Schunn. et Thonn.		
2	<i>Aristida mutabilis</i> Trin. et Rupr.		
3	<i>Aristida stipoides</i> Lam.		
4	<i>Andropogon gayanus</i> Kunth		
5	<i>Brachiaria villosa</i> (Trin.) Stapf		
6	<i>Brachiaria xantholeuca</i> (Hack. ex Schinz.) Stapf.		
7	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.		
8	<i>Cenchrus prieuri</i> (Kunth) Maire.		
9	<i>Chloris pilosa</i> Schum. et Thonn.	Graminée <sup>2</sup>	38
10	<i>Ctenium elegans</i> Kunth.		
11	<i>Digitaria gayana</i> (Kunth) Stapf ex A. Chev.		
12	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.		
13	<i>Eragrotis tremula</i> Hochst. Ex Steud		
14	<i>Panicum laetum</i> Kunth.		
15	<i>Pennisetum pedicellatum</i> Trin.		
16	<i>Panicum subalbidum</i> Kunth.		
17	<i>Tragus</i> spp.		
18	<i>Ipomoea coscosperma</i> Hochst. Ex Choisy in DC.		
19	<i>Jacquemontia tamnifolia</i> (L.) Griseb.	Convolvulacée <sup>2</sup>	7
20	<i>Evolvulus alsinoides</i> (L.) L.		
21	<i>Hyptis spicigera</i> Lam.		
22	<i>Leucas martinicensis</i> (Jacq.) Ait. f.	Lamiacée <sup>2</sup>	7
23	<i>Imperata cylindrica</i> (L.) P.		
24	<i>Commelina benghalensis</i> L.	Commelinacée <sup>2</sup>	5
25	<i>Commelina forskalea</i> Vahl.		
26	<i>Sida cordifolia</i> L.	Malvacée <sup>2</sup>	5
27	<i>Hibiscus asper</i> L.		
28	<i>Sesbania leptocarpa</i> DC.	Papilionacée <sup>2</sup>	5
29	<i>Zornia glochidiata</i> Reich. Ex DC.		
30	<i>Citrillus colocynthis</i> (L.) Schrad.	Cucurbitacée	5
31	<i>Cucumis melo</i> L.		

32	<i>Cyperus amabilis</i> Vahl.		
33	<i>Fimbristylis hispidula</i> (Vahl) R. W. Haines	Cypéracée <sup>2</sup>	5
34	<i>Dipcadi ssp.</i>	Liliacée	2
35	<i>Mitracarpus scaber</i> DC.	Rubiacée <sup>2</sup>	2
36	<i>Waltheria indica</i> L.	Sterculiacée <sup>2</sup>	2
37	<i>Pergularia tomentosa</i> l. Et p. <i>Daemia</i> (forsk.) Chiov.	Asclépiadacée	2
38	<i>Aerva javanica</i> (Burm. f.) Juss. Ex Schult.	Amarantacée	2
39	<i>Phyllanthus pentandrus</i> Schum. Thonn.	Euphorbiacée	2
40	<i>Corchorus tridens</i> L. et <i>C. Trilocularis</i> L	Tiliacée	2
41	<i>Monechma ciliatum</i> (Jacq.) Milne-Redh	Acanthacées	2
42	<i>Mollugo nudicaulis</i> Lam.	Molluginacée	2
43	<i>Cassia mimosoïdes</i> L.	Caesalpiniacée <sup>2</sup>	2
Total	43	18	100

Le symbole (<sup>2</sup>) en exposant signifie que la famille ou l'espèce se trouve à la fois sur le revers du plateau et sur le haut glacis.

Tableau 15. Le spectre de familles des espèces ligneuses recensées sur les parcelles étudiées.

N°	Espèces	Familles et sa part relative en %	
1	<i>Guiera senegalensis</i> J.F Gmel	Combrétacée	96,2
2	<i>Combretum micranthum</i> g. Don		
3	<i>Piliostigma reticulatum</i> (DC) Hochst),	Caesalpiniacée®	2,6
4	<i>Acacia nilotica</i> (L) Willd	Rubiacée®	0,8
5	<i>Acacia ataxacantha</i> DC	Mimosacée	0,2
6	<i>Ziziphus mauritiana</i> Lam.	Rhamnacée	0,2
Total			100

Noter que la marque® signifie que cette famille est présente dans les espèces herbacées.

L'analyse des résultats présentés dans le tableau 15 montre qu'au total 5 familles, appartenant à 6 espèces ligneuses, ont été identifiées sur le revers du plateau et sur le haut glacis. Parmi celles-ci, la famille des combrétacées domine largement (plus de 96 %) les parcelles suivies. Ensuite viennent les familles des caesalpiniacées, des rubiacées, des mimosacées et des rhamnacées qui représentent 4 % restantes.

La synthèse des résultats issus des relevés a permis de notifier la présence d'un total de 49 espèces végétales (herbacées et ligneuses comprises) appartenant à 21 familles identifiées sur les parcelles aménagées par différentes techniques (SL, SL-E-B et branchage) installées sur le revers du plateau

et le haut glacis. Ailleurs, dans le même contexte que notre zone d'étude, en région Sahel burkinabé, Samandougou et al. (2010) ont démontré que la combinaison du sous-solage et des cordons pierreux permettent une amélioration de la diversité floristique dans les parcelles aménagées par rapport aux témoins (non aménagé). Ils ont aussi démontré que la composition de certaines espèces a été favorisée (*Panicum laetum*, *Cassia obtusifolia*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Alysicarpus ovalifolius*). Alors que, chez d'autres espèces, cette composition a été défavorisée (*Schoenefeldia gracilis*, *Eragrostis tremulla*, *Cenchrus biflorus*, *Borreria radiata*).

Nous signalons par ailleurs que les recommandations sur les règles de citations<sup>11</sup> des plantes sont uniquement appliquées dans les tableaux 1 et 2 (« (1905) II. Règles internationales pour la Nomenclature botanique, principalement des plantes vasculaires », 2014 ; Turland et al., 2018)

Outre la connaissance de la composition floristique des ligneux et herbacées, sont évaluées les fréquences des espèces dans les parcelles de suivis.

### **6.3. L'étude comparative de la fréquence des espèces végétales**

L'analyse de la fréquence des espèces végétales a porté sur les parcelles en tenant compte de la technique d'aménagement appliquée sur deux des unités de la toposéquence du site d'étude à savoir le haut glacis et le revers du plateau. La fréquence d'une espèce dans une parcelle nous indique à quelle fréquence elle apparaît et quelle est son importance relative dans cette parcelle.

#### **Sur le revers de plateau**

La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées recensées sont présentés dans les tableaux 16, 17 et 18. Ces tableaux comparent les résultats obtenus dans les parcelles aménagées avec ceux du témoin.

---

<sup>11</sup> C'est-à-dire que la citation d'une espèce donnée est accompagnée par une indication abrégée du nom de l'auteur primitif. Mais tout au long de la suite de ce document (dans le texte, les figures et les tableaux), nous choisissons de citer uniquement les noms des espèces végétales sans l'indication du nom de l'auteur pour des raisons de lisibilité du texte.

Tableau 16. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées (%) dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau en 2016.

Parcelle /Espèce	Moy SL-E-B I, II, III	Moy SL I, II, III	Témoin	Degré de présence
<i>Commelina benghalensis</i>	45	34	48	100
<i>Digitaria horizontalis</i>	6	1	3	100
<i>Cassia mimosoides</i>	4	11	-	67
<i>Jacquemontia tamnifolia</i>	14	1	-	67
<i>Aristida mutabilis</i>	16	1	13	100
<i>Fimbristylis hispidula</i>	2	0	-	33
<i>Cucumis melo</i>	2	0	-	33
<i>Sida cordifolia</i>	1	0	-	33
<i>Aristida longiflora</i>	1	0	-	33
<i>Brachiaria villosa</i>	1	0	-	33
<i>Mollugo nudicaulis</i>	0	1	8	67
<i>Monechma ciliatum</i>	0	1	20	67
<i>Citrillus colocynthis</i>	0	1	-	33
<i>Cyperus amabilis</i>	0	1	-	33
<i>Dipcadi</i>	0	17	-	33
<i>Ipomoea coscinosperma</i>	0	0	10	33
<i>Sesbania leptocarpa</i>	7	0	-	33
<i>Sida cordifolia</i>	1	0	-	33
<i>Waltheria indica</i>	0	30	-	33
<i>Zornia glochidiata</i>	-	1	-	33

– désigne absence de l'espèce dans la parcelle

Tableau 17. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées en pourcentage (%) dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau en 2017.

Parcelle/ Espèce	Moy SL-E-B I	Moy SL-E- B II & SL-E- B III	Moy SL I	Moy SL II & SL III	Branchage	Moy Témoin	Degré de présence
<i>Commelina benghalensis</i>	36	44	70	34	53	58	100
<i>Aristida stipoides</i>	21	20	3	3	8	-	83
<i>Ctenium elegans</i>	12	-	-	-	-	-	17
<i>Pennisetum pedicellatum</i>	9	8	-	-	3	6	67
<i>Corchorus tridens</i>	3	-	-	-	-	-	17
<i>Monechma ciliatum</i>	2	5	3	-	2	6	83

<i>Tragus</i>	2	-	9	-	13		50
<i>Andropogon gayanus</i>	1	3	-	-	-		33
<i>Sida cordifolia</i>	1	3	-	3	2	12	83
<i>Sesbania leptocarpa</i>	1	-	-	-	-	-	17
<i>Cassia mimosoïdes</i>	1	1	6	3	-	-	67
<i>Cenchrus biflorus</i>	1	-	-	3	-	-	33
<i>Commelina forskalea</i>	1	-	-	-	-	-	17
<i>Cucumis melo</i>	1	1	-	-	-	-	33
<i>Fimbristylis hispidula</i>	1	-	-	-	3	-	33
<i>Hyptis spicigera</i>	1	-	-	-	-	-	17
<i>Jacquemontia tamnifolia</i>	1	4	-	3	-	-	50
<i>Mitracarpus scaber</i>	1	-	-	-	-	6	33
<i>Mollugo nudicaulis</i>	1	1	3	30	2	6	83
<i>Phyllanthus pentandrus</i>	1	-	-	3	-	-	33
<i>Waltheria indica</i>	1	-	-	-	-	-	17
<i>Zornia glochidiata</i>	1	-	-	-	2	-	33
<i>Aerva javanica</i>	-	1	-	-	-	-	17
<i>Aristida longiflora</i>	-	-	-	3	10	-	33
<i>Aristida mutabilis</i>	-	-	-	-	-	6	17
<i>Cenchrus prieuri</i>	-	-	-	3	-	-	17
<i>Chloris pilosa</i>	-	-	-	3	-	-	17
<i>Dipcadi</i>	-	-	3	-	-	-	17
<i>Eragrotis tremula</i>	-	1	-	3	2	-	50
<i>Evolvulus alsinoides</i>	-	1	-	-	-	-	17
<i>Hibiscus asper</i>	-	-	-	3	-	-	17
<i>Ipomoea coscinosperma</i>	-	1	-	3	-	-	33
<i>Leucas martinicensis</i>	-	6	-	-	-	-	17
<i>Panicum laetum</i>	-	-	3	-	-	-	17

– désigne absence de l'espèce dans la parcelle

Tableau 18. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées en pourcentage (%) dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau en 2018.

Parcelle/ Espèce	SL-E-B I	SL-E-B II	SL-E-B III	SL I	SL II	SL III	Branchage	Témoin	Degré de présence
<i>Commelina benghalensis</i>	52	40	-	16	57	71	43	58	88
<i>Sida cordifolia</i>	10	1	1	-	-	-	1	18	63
<i>Aristida longiflora</i>	6	-	14	-	-	-	13	-	38
<i>Brachiaria 2antholeuca</i>	6	-	-	-	-	-	-	-	13
<i>Aristida mutabilis</i>	4	-	-	-	-	8	8	6	50
<i>Monechma ciliatum</i>	4	13	-	33	-	3	1	6	75
<i>Brachiaria villosa</i>	3	-	-	-	-	-	-	-	13
<i>Eragrotis tremula,</i>	3	5	-	-	-	5	-	-	38
<i>Commelina forskalea</i>	2	-	-	-	-	-	-	-	13
<i>Fimbristylis hispidula</i>	2	-	-	-	-	-	3	-	25
<i>Ipomoea coscinosperma</i>	1	2	-	-	-	-	1	-	38
<i>Jacquemontia tamnifolia</i>	1	5	3	-	-	-	-	-	38
<i>Mitracarpus scaber</i>	1	-	-	-	-	-	-	6	25
<i>Mollugo nudicaulis</i>	1	2	41	17	43	-	9	-	75
<i>Pennisetum pedicellatum</i>	1	-	6	-	-	-	8	6	50
<i>Pergularia tomentosa</i>	1	2	-	-	-	-	1	-	38
<i>Zornia glochidiata</i>	1	-	12	-	-	-	-	-	25
<i>Andropogon gayanus</i>	1	-	-	-	-	-	-	-	13
<i>Aristida stipoides</i>	-	16	-	-	-	-	8	-	25
<i>Aerva javanica</i>	-	2	1	-	-	-	-	-	25
<i>Cassia mimosoïdes</i>	-	1	1	-	-	-	-	-	25
<i>Cucumis melo</i>	-	2	1	17	-	-	-	-	38
<i>Evolvulus alsinoides</i>	-	2	1	-	-	-	1	-	38
<i>Leucas martinicensis</i>	-	7	-	-	-	-	-	-	13
<i>Aristida pallida</i>	-	-	2	-	-	-	-	-	13
<i>Imperata cylindrica</i>	-	-	2	-	-	-	-	-	13
<i>Chrozophora brocchiana</i>	-	-	8	-	-	-	-	-	13
<i>Ipomoea coscinosperma</i>	-	-	5	-	-	-	-	-	13
<i>Panicum subalbidum</i>	-	-	2	-	-	-	-	-	13
<i>Dipcadi</i>	-	-	-	17	-	-	-	-	13
<i>Brachiaria xantholeuca</i>	-	-	-	-	-	13	-	-	13
<i>Tragus</i>	-	-	-	-	-	-	3	-	13

– désigne absence de l'espèce dans la parcelle.



Il ressort de l'analyse des tableaux 16, 17 et 18 ci-dessus que, de 2016 à 2018, l'espèce la plus fréquente avec un degré de présence le plus élevé (100 %) demeure *Commelina benghalensis*. Elle est suivie par des espèces dont le degré de présence est supérieur à 50 %. Il s'agit des espèces telles que *Digitaria horizontalis*, *Cassia mimosoïdes*, *Jacquemontia tamnifolia*, *Aristida mutabilis*, *Mollugo nudicaulis* et *Monechma ciliatum*. Néanmoins, ces espèces ont de faibles fréquences dans les parcelles aménagées, y compris dans la parcelle témoin. À titre d'exemple, en 2016, dans les parcelles SL-E-B I, SL I et témoin, les fréquences de *Commelina benghalensis* sont respectivement de 45, 34 et 48 %. Contre, 55 % globalement partagés entre les 11 espèces dans la parcelle SL-E-B I. Et 66 % partagés entre les 11 espèces dans la parcelle SL I et 52 % répartis entre les 5 espèces rencontrées dans la parcelle témoin. On observe la même tendance de répartition des fréquences jusqu'en 2018. Parmi ces espèces, on peut citer quelques-unes dont les fréquences sont faibles. Il s'agit de *Dipcadi*, *Hibiscus asper*, *Panicum laetum*, *Sida cordifolia*, *Cucumis melo*, *Aristida longiflora*, *Brachiaria villosa*, *Ipomoea coscosperma*, *Pergularia tomentosa*, *Areva javanica*, *Zornia glochidiata*, etc.

En ce qui concerne les ligneux existants avant l'application des techniques d'aménagement, la fréquence de *Combretum micranthum* est plus élevée avec 97 % et seulement 3 % pour *Guiera senegalensis* sur le revers de plateau (figure 97). Cependant, l'application des techniques d'aménagement à partir de mi-juillet 2016 a entraîné un renversement de tendance en faveur de *Guiera senegalensis*, en particulier avec l'apparition de jeunes pousses en septembre. Dans les parcelles SL-E-B I, II et III, la fréquence de *Guiera senegalensis* a augmenté de 75, 83, 94 à 99 %, tandis que celle de *Combretum micranthum* a diminué à 97, 25, 17, 6 et 1 % respectivement pour les campagnes de mesure de 2016 à 2019.

Les parcelles aménagées uniquement par la technique de sous-solage, nommées SL I, II et III, présentent une fréquence stable tout au long de la période de suivi. Cela signifie que la fréquence des espèces reste la même que celle enregistrée en juin-début-juillet 2016, c'est-à-dire avant l'aménagement. Ceci est dû à l'absence de régénération des jeunes pousses dans ces parcelles. En conséquence, la fréquence de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* ne change pas dans les parcelles SL I, II et III, ni dans la parcelle témoin (figure 97). En revanche, dans les parcelles aménagées avec la technique de sous-solage-ensemencement-branchage (SL-EB I, II et

III), la fréquence de *Guiera senegalensis* a augmenté de 2016 à 2019, tandis que celle de *Combretum micranthum* diminue pendant cette même période. Au fait, ce résultat s'explique par le faible taux de régénération dans les surfaces aménagées par sous-solage simple, et même dans des surfaces dégradées témoins (voir § 6.4.1, ci-dessous).

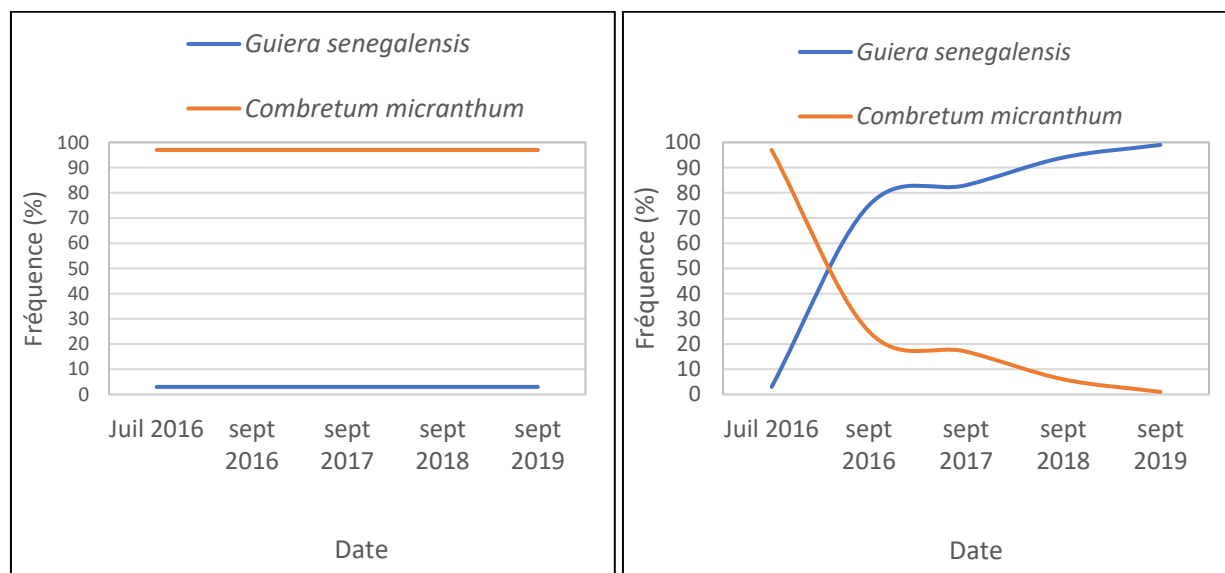


Figure 97. L'évolution de la fréquence moyenne des ligneux dans les parcelles SL I, SL II et SL III (à gauche) et dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III (à droite).

### ➤ Sur le haut glacis

Les fréquences des espèces herbacées recensées par année de mesure et par parcelle sont présentées dans les tableaux 19 et 20.

Tableau 19. La fréquence et degré de présence des espèces herbacées (en %) dans les parcelles du haut glacis en 2017.

Parcelle/ Espèce	SL-E-B 5	SL-E-B 4	SL 4	Témoin	Degré de présence
<i>Andropogon gayanus</i>	63	71	-	-	50
<i>Zornia glochidiata</i>	14	17	-	15	74
<i>Monechma ciliatum</i>	5	3	-	4	75
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	2	1	-	-	50
<i>Eragrotis tremula</i>	2	1	-	-	50
<i>Leucas martinicensis</i>	2	1	-	-	50
<i>Jacquemontia tamnifolia</i>	2	1	-	-	50

Waltheria indica	2	1	-	-	50
Ipomoea coscinosperma	1	1	20	-	75
Digitaria horizontalis	1	1	-	4	75
Fimbristylis hispidula	1	1	-	-	50
Commelina forskalaei	1	1	-	-	50
Indigofera astragalina	1	-	-	-	25
Pennisetum typhoides	1	-	20	-	50
Cenchrus biflorus	1	-	20	-	50
Tephrosia purpurea	1	-	20	-	50
Aristida longiflora	-	-	-	4	25
Cassia mimosoïdes	-	-	-	4	25
Sida cordifolia	-	-	-	61	25
Indigofera astragalina	-	-	20	-	25
Mitracarpus scaber	-	-	-	4	25
Digitaria gayana	-	-	-	4	25

– désigne absence de l'espèce dans la parcelle

Tableau 20. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées (en %) dans les parcelles du haut glacis en 2018.

Parcelle/ Espèce	SL-E-B 5	SL-E-B 4	SL	Témoin	Degré de présence
<i>Aristida mutabilis</i>	35	59	34	-	75
<i>Andropogon gayanus</i>	43	18	-	-	50
<i>Pennisetum pedicellatum</i>	8	2	-	-	50
<i>Zornia glochidiata,</i>	4	5	33	11	100
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	3	-	-	-	25
<i>Cucumis melo</i>	1	-	-	-	25
<i>Ipomoea coscinosperma,</i>	1	-	-	-	25
<i>Digitaria horizontalis</i>	1	-	-	4	50
<i>Ceratotheca sesamoides</i>	1	-	-	-	25
<i>Ctenium elegans</i>	1	1	-	-	50
<i>Indigofera astragalina</i>	1	-	-	-	25
<i>Leucas martinicensis</i>	1	1	-	-	50
<i>Monechma ciliatum</i>	-	5	-	-	25
<i>Mitacarpus scaber</i>	-	3	-	4	50
<i>Cenchrus biflorus</i>	-	2	-	-	25
<i>Eragrotis tremula</i>	-	2	-	-	25

<i>Waltheria indica</i>	-	2	33	-	50
<i>Aristida longiflora</i>	-	-	-	40	25
<i>Cassia mimosoides</i>	-	-	-	22	25
<i>Sida cordifolia</i>	-	-	-	19	25

– désigne absence de l'espèce dans la parcelle.

D'après l'analyse des tableaux ci-dessus, *Zornia glochidiata*, avec une faible fréquence, représente l'espèce qui possède le degré de présence le plus élevé (environ 100 %) dans les toutes les parcelles installées sur le haut glacis. Il en est de même pour les espèces telles qu'*Andropogon gayanus*, *Aristida mutabilis* et *Aristida longiflora*. Leur degré de présence est aussi élevé que celui de *Zornia glochidiata*. Aussi, leurs fréquences sont élevées dans les parcelles SL-E-B 5 et SL-E-B 4 par rapport à celles de SL 4 et à la parcelle témoin 4 où ces fréquences sont moins élevées.

Par contre, les espèces dont les fréquences sont plus faibles sont : *Cassia mimosoides*, *Digitaria horizontalis*, *Ipomoea coscinosperma*, *Mitracarpus scaber*, *Digitaria gayana*.

Pour la fréquence des espèces ligneuses, *Guiera senegalensis* est de loin l'espèce la plus fréquente (avec 77 %) que *Combretum micranthum* (environ 23 %), de 2017 à 2018.

#### **6.4. L'analyse de la diversité floristique et de la régénération de la végétation**

Nous analysons d'abord la diversité floristique sur le revers de plateau puis sur le haut glacis.

##### **6.4.1. L'analyse de la diversité floristique par parcelle**

Les résultats de l'étude sur la diversité de chaque parcelle sur le revers de plateau sont présentés dans le tableau 21. Les indices synthétiques de Shannon Weaver, Simpson et Hill ont été utilisés pour cela. Ces indices nous ont permis d'évaluer la diversité des espèces végétales dans les parcelles aménagées en utilisant des informations sur l'abondance et la distribution de ces espèces dans les parcelles. L'indice de Shannon est plus sensible aux espèces relativement rares, tandis que l'indice de Simpson est plus sensible aux espèces abondantes. En combinant les indices de Shannon et de Simpson, l'indice de Hill mesure l'abondance proportionnelle des espèces.

Tableau 21. L'indice de diversité dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau.

Année	Parcelle	Indices de : Shannon Weaver, Simpson et Hill		
		Shannon Weaver	Simpson	Hill
		(H max en bit)		
2016	SL-E-B I	1,79	0,51	0,66
	SL-E-B III	2,08	0,72	0,56
	SL I	1,53	0,51	0,57
	SL III	0,92	0,44	0,28
	Témoin	1,54	0,51	0,56
2017	SL-E-B I	2,87	0,78	0,75
	SL-E-B III	1,89	0,66	0,55
	SL I	1,72	0,51	0,98
	SL III	0,96	0,47	0,27
	Branchage	2,32	0,68	0,70
	Témoin	2,04	0,58	0,69
2018	SL-E-B I	2,35	0,66	0,72
	SL-E-B III	2,53	0,74	0,69
	SL I	1,39	0,83	0,49
	SL III	1,34	0,45	0,52
	Branchage	2,39	0,73	0,66
	Témoin	1,69	0,53	0,61

L'analyse du tableau 21 montre que d'après l'indice du Shannon, en 2016 et en 2018, la diversité maximale a été plus élevée dans la parcelle SL-E-B III avec H 2,08 bit en 2016 et 2,53 bit en 2018. Mais cette diversité est moins élevée en 2017 avec H 1,89 bit. Ce résultat traduit un maintien de la diversité floristique (herbacée et ligneux) dans la parcelle SL-E-B III. La comparaison de ces résultats obtenus dans cette dernière avec ceux de la parcelle SL-E-B I montre que la diversité reste moins élevée en 2016 (H 1,79 bit et R 0,50) et en 2018 (H 2,35 ; R 0,66) dans la parcelle SL-E-B I. Néanmoins, elle reste plus élevée en 2017 avec un indice H 2,87 bit. Ces valeurs élevées de H' (indice du Shannon) dans ces parcelles peuvent s'expliquer par la forte dominance d'une espèce unique en termes de sa forte fréquence dans des parcelles à l'exemple de *Commelina benghalensis* (cf. tableaux 16, 17 et 18).

Dans les parcelles SL I et SL III, la diversité demeure moins élevée de 2016 à 2018 par rapport aux parcelles SL-E-B I et SL-E-B III. À titre d'exemple, dans la parcelle SL I, l'indice H est à 1,79 bit

en 2016, 1,72 bit en 2017 et 1,39 bit en 2018. Dans la parcelle SL III, les valeurs de l'indice H traduisent la même tendance que ce qui est observé dans la parcelle SL I (tableau 21).

La diversité dans la parcelle de branchage en 2017 et 2018 était plus élevée qu'elle ne l'était dans les parcelles uniquement sous-solées (SL I et SL III), avec des indices de diversité de 2,32 bit et 2,39 bits. Cependant, la diversité dans la parcelle de branchage était inférieure à celle dans les parcelles aménagées par l'association de sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B I et SL-E-B III).

En comparant les résultats obtenus dans la parcelle témoin avec ceux des parcelles aménagées par sous-solage uniquement (SL) ou par association (SL-E-B) de 2017 à 2018, il y a une augmentation de la diversité floristique dans certaines parcelles et une diminution dans d'autres, notamment dans la parcelle SL I. Par exemple, la diversité floristique est de 1,54 bit dans la parcelle témoin contre 1,79 bit dans la parcelle SL-E-B I et 1,53 bit dans la parcelle SL I en 2016. Cependant, en 2017 et 2018, la diversité floristique dans la parcelle SL I est moins importante que dans la parcelle témoin, avec, respectivement, 1,72 et 1,39 bit, contre 2,04 et 1,69 bit dans la parcelle témoin. Cette observation indique que l'application de la technique de sous-solage uniquement est moins efficace pour réhabiliter la diversité floristique des surfaces dégradées de la brousse tigrée. Bien que l'on constate une légère augmentation de la diversité floristique dans la parcelle SL III de 2016 à 2018, elle reste inférieure à celle de la parcelle témoin en 2016 et 2017. Cela est dû au fait que la parcelle SL III était dans un état de dégradation plus avancée que la parcelle témoin (au départ) et que l'aménagement par la technique du sous-solage uniquement n'a pas permis de corriger cette situation. La régénération des parcelles aménagées uniquement par sous-solage est lente et peu efficace sur des surfaces très dégradées, avec un sol appauvri et une faible productivité végétale.

Les résultats obtenus à partir de l'indice de Simpson confirment les précédents. Selon cet indice, les parcelles les plus riches en diversité floristique sont la parcelle SL-E-B III en 2016, SL-E-B I en 2017 et SL I en 2018, dont les indices sont respectivement de 0,72, 0,78 et 0,83 suivi de la SL-E-B I avec 0,54. Alors que, les parcelles pauvres en diversité floristique sont les parcelles SL-E-B I avec 0,51 en 2016 et SL III avec 0,47 en 2017 et 0,45 en 2018. Cependant, ces résultats montrent une fluctuation de la diversité floristique d'une année à l'autre, indépendamment de la technique d'aménagement. D'où cette diversité floristique plus importante dans la parcelle SL I par rapport

aux parcelles SL-E-B I et III en 2018 qui sont pourtant aménagées par association de techniques (cf. § 2,6.) et qui étaient plus riches en diversité floristique en 2016. Cet état de fait est aussi intrinsèquement lié à la méthode statistique de calcul de l'indice de Simpson qui est très sensible à la forte fréquence (abondance) d'une espèce et au détriment des espèces dont les fréquences sont faibles.

L'indice de Hill est un outil qui nous permet de mieux comprendre la diversité des espèces végétales en déterminant leur abondance proportionnelle. En utilisant les indices de Shannon et de Simpson, il peut nous donner une idée plus précise de la diversité d'une parcelle. Le tableau 21 nous montre que la parcelle SL-E-B I était la plus diversifiée de 2016 à 2018, sauf en 2017 où la parcelle SL I avait un indice de 0,98. La parcelle SL-E-B I contenait le plus grand nombre d'espèces (cf. figure 95), ce qui explique ses indices de Hill élevés de 0,66 en 2016, 0,75 en 2017 et 0,72 en 2018. La deuxième parcelle la plus diversifiée était la parcelle de branchage avec un indice de Hill de 0,70 en 2017 et 0,66 en 2018.

Il faut aussi noter que, d'après l'indice de Hill, les parcelles SL-E-B III (0,55) en 2017, SL III en 2017 (0,27) et en 2018 (0,52) et SL I (0,49) en 2018 sont moins diversifiées que la parcelle témoin (0,69) en 2017 et (0,61) en 2018. Cela s'explique en partie par le fait que ces parcelles ont été remaniées deux fois, en 2017 et 2018, ce qui a eu un impact négatif sur le sol (cf. figure 110, ci-bas). De plus, la fréquence des espèces végétales dans la parcelle témoin a subi très peu de modifications en raison de la pluviométrie et de la production de graines, ce qui a permis une meilleure répartition et une variation minimale de la fréquence des espèces végétales. En revanche, dans les parcelles sous-solées et remaniées, même si le sous-solage peut améliorer les conditions d'infiltration (cf. figures 75 & 76), si le sol est pauvre et que la production de graines est faible à l'échelle de la parcelle, cela peut entraîner une stagnation ou une diminution de la diversité floristique. En outre, le réencroûtement du sol et la limitation hydrique peuvent se manifester très tôt (après quelques pluies ou un an), ce qui peut également affecter la diversité floristique.

Les résultats de l'évaluation de la diversité floristique dans les parcelles du haut glacis sont présentés dans le tableau 22. D'après l'analyse, les parcelles aménagées par association de sous-solage-ensemencement-branchage, en particulier la parcelle SL-E-B 5 et la parcelle SL-E-B 4, ont une diversité floristique plus riche que la parcelle aménagée par sous-solage simple, ainsi que la



parcelle témoin. En 2017, les indices de Shannon (H'), Simpson et Hill (2,41, 0,70 et 0,70) ont montré que la diversité est plus élevée dans la parcelle SL-E-B 5 que dans la parcelle témoin (0,90, 0,27 et 0,44). Cette même tendance se manifeste dans la parcelle SL-E-B 4 et la parcelle SL 4, en particulier en 2017 et en 2018. Seule la parcelle SL 4 en 2017 présente une diversité floristique plus importante (2,32 bit) que la parcelle SL-E-B 4 (1,63 bit). Cela est probablement dû à une meilleure répartition des fréquences des espèces dans cette parcelle. Cependant, l'indice de Hill indique que la parcelle SL 4 (0,51) est en réalité moins diversifiée que les parcelles SL-E-B 5 (0,62) et SL-E-B 4 (0,70).

Tableau 22. L'indice de diversité obtenu dans les parcelles étudiées du haut glaciais.

Année	Parcelle	Indice de :		
		Shannon (H' en bit)	Simpson	Hill
2017	SL-E-B 5	2,41	0,70	0,70
	SL-E-B 4	1,63	0,49	0,62
	SL 4	2,32	0,80	0,51
	Témoin	0,90	0,27	0,44
2018	SL-E-B 5	2,29	0,75	0,60
	SL-E-B 4	1,56	0,43	0,63
	SL	1,58	0,67	0,39
	Témoin	1,37	0,42	0,56

Il faut noter que la diversité des espèces d'arbustes est presque uniforme sur le revers du plateau ou sur le haut glaciais, étant composée principalement de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum*.

Des études ont démontré que la combinaison de la technique de la demi-lune avec le sous-solage permet d'augmenter la diversité floristique sur les sites dégradés, en comparaison avec la technique du sous-solage simple ou des cordons pierreux. En effet, la combinaison des techniques a permis d'obtenir une augmentation de la diversité floristique avec 13 espèces, alors que le sous-solage simple a donné 8 espèces et les cordons pierreux seulement 12, avec une efficacité moindre (Ganaba, 2005). Cela souligne l'importance de combiner différentes techniques pour restaurer la diversité floristique des sites dégradés.

Le sous-point suivant porte sur l'évaluation de la croissance des jeunes et des arbustes existants dans les parcelles aménagées.

#### **6.4.2. L'analyse de la régénération de la végétation par parcelle**

Dans ce sous-point, nous présentons les résultats de notre suivi de l'inventaire des espèces ligneuses dans les parcelles aménagées et leurs témoins. Nous avons mesuré la croissance des arbustes en termes de densité, de croissance verticale et horizontale, de survie, de mortalité, de houppier et de physionomie de la végétation. Nous avons examiné la croissance des jeunes pousses et des arbustes adultes de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* sur une période de six saisons pluvieuses, de 2016 à 2021. Nous avons choisi ces espèces, car elles sont prépondérantes dans la zone d'étude. Nous avons semé les graines de ces deux espèces dans les parcelles expérimentales situées sur le plateau et le haut glacis.

Il convient de noter que des espèces telles qu'*Acacia nilotica*, *Acacia ataxacantha*, *Piliostigma reticulatum* et *Ziziphus mauritiana* poussent spontanément dans les parcelles aménagées. Elles peuvent apparaître pendant une saison pluvieuse et disparaître avant la saison suivante. Bien que nous ayons noté leur présence, il n'est pas pertinent de les inclure dans notre analyse statistique de la régénération de la végétation dans les parcelles.

##### **6.4.2.1. L'analyse de l'effet des techniques d'aménagement sur la densité**

La densité représente le nombre moyen d'individus de toutes les espèces présentes dans chaque parcelle, exprimée par mètre carré de superficie (chaque parcelle sur le revers du plateau a une superficie de 150 m<sup>2</sup>, cf. § 2.6.2).

###### **6.4.2.1.1. L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la densité**

###### **✚ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau**

La figure 98 présente l'importance et l'évolution de la densité dans les trois parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III).

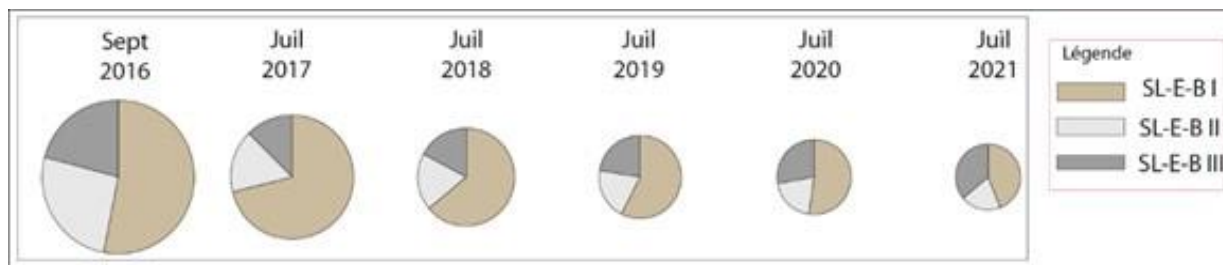


Figure 98. L'évolution de la densité (individu/m<sup>2</sup>) dans les parcelles aménagées par le sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.

D'après la figure 98, l'utilisation de la technique d'aménagement par association du sous-solage-ensemencement-branchage a permis d'obtenir des densités élevées dans les parcelles SL-E-B I (2187 individus, soit une densité de 14,6), SL-E-B II (1065 individus, soit une densité de 7,1) et SL-E-B III (855 individus, soit une densité de 5,7). Dans la parcelle SL-E-B I, l'espèce *Guiera senegalensis* représente 85 % des individus (1851) et *Combretum micranthum* 15 % (327).

Au fil du temps, la densité diminue naturellement en raison de la compétition entre individus ou espèces (Balandier et al., 2006). La figure 98 montre que la densité dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III a diminué respectivement de 14,6 à 2,2, de 7,1 à 1 et de 5,7 à 1,8 de 2016 à 2021. Cela correspond à une division de la densité par 7 fois dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B II et seulement 3 fois dans la parcelle SL-E-B III en l'espace de 5 ans. Cette diminution de densité est moins importante dans la parcelle SL-E-B III, car elle a été remaniée trois fois, contre deux fois dans la parcelle SL-E-B II et une fois dans la parcelle SL-E-B I. Ainsi, l'utilisation de la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage pour restaurer la densité est plus efficace lorsqu'elle est répétée pendant au moins trois ans consécutifs.

#### ✚ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis

La figure 99 montre l'évolution de la densité dans la parcelle SL-E-B 4 aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis.

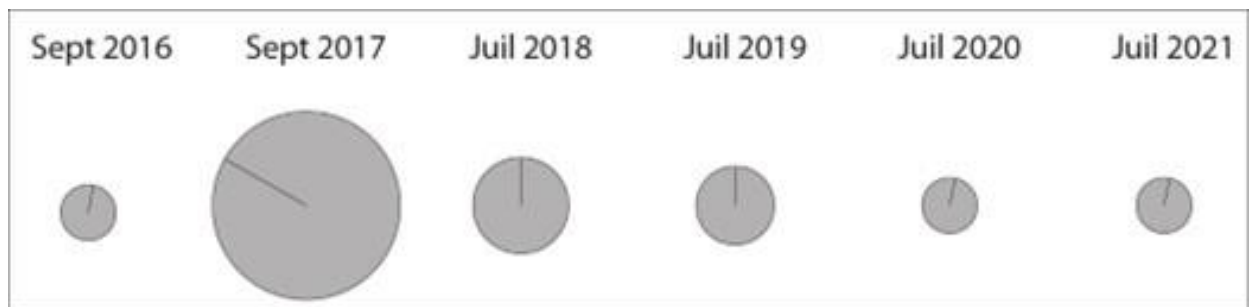


Figure 99. L'évolution de la densité (individu/m<sup>2</sup>) dans les parcelles aménagées par le sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis.

La figure 99 montre une forte augmentation de la densité dans la parcelle SL-E-B 4 en 2017 par rapport à 2016. Cette augmentation est due à l'aménagement par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage, qui a favorisé la croissance de jeunes pousses de *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*. La densité a augmenté de manière significative, passant de 9 individus sur 446 m<sup>2</sup> en 2016 à plus de 100 pieds sur 446 m<sup>2</sup> en 2017. Cependant, la densité a commencé à diminuer dès 2018, revenant presque à la situation initiale en 2020, soit 5 ans plus tard.

#### 6.4.2.1.2. L'influence de la technique du branchage sur la densité

La figure 100 montre l'évolution de la densité dans les parcelles aménagées par la technique du branchage. Il s'agit de la densité moyenne dans les parcelles branchage I et branchage II.

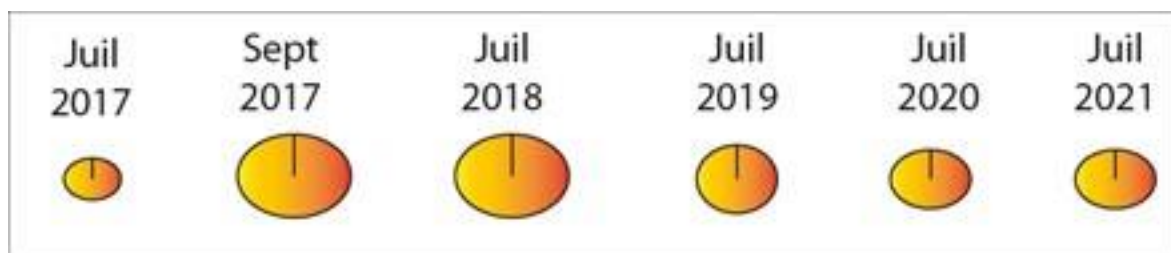


Figure 100. L'évolution de la densité (individu/m<sup>2</sup>) dans les parcelles aménagées par la technique du branchage sur le revers du plateau.

D'après la figure ci-dessus, l'utilisation de la technique du branchage simple a eu un léger impact sur la densité des plantes. En effet, la densité moyenne dans les parcelles aménagées par branchage a augmenté de 8 individus en moyenne pour chaque 150 m<sup>2</sup> en 2017 à 30 individus en moyenne pour chaque 150 m<sup>2</sup> en 2018, ce qui correspond à une multiplication de la densité par 4. Cependant, la densité a été presque divisée par 2 en 2021, permettant 15 individus pour chaque 150 m<sup>2</sup>. Il est

important de souligner que, malgré cette diminution, la densité est toujours deux fois plus élevée qu'à l'état initial en juillet 2017, ce qui montre que la technique du branchage simple a une influence significative sur la densité des plantes.

### 6.4.2.1.3. L'influence de la technique du sous-solage sur la densité

#### ✚ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau

Les parcelles aménagées uniquement avec la technique du sous-solage (SL I, SL II et SL III) n'ont pas eu d'effet sur la densité, ce qui signifie qu'il n'y avait presque pas de changement observé pendant les 5 ans d'observation (2016 à 2021), comme indiqué dans la figure 101. Cela montre qu'il n'y avait pas de nouvelles pousses dans ces parcelles. Dans la parcelle SL II (cf. [figure 113](#), ci-dessous), on a assisté à une diminution de la densité de 0,05 (8 individus) en 2016 à 0,02 (3 individus) en 2018, ce qui correspond à la disparition de 5 arbustes existants.

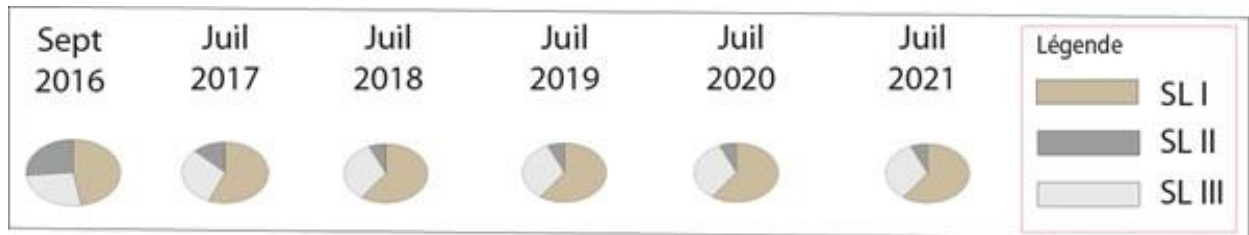


Figure 101. L'évolution de la densité (individu/m<sup>2</sup>) dans les parcelles aménagées par sous-solage sur le revers du plateau.

L'évolution de la densité dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple reste semblable à ce qui a été observé sur le haut glacis.

#### ✚ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis

L'évolution de la densité dans la parcelle SL installée sur le haut glacis se présente dans la figure 102.

L'observation de cette figure montre que la technique du sous-solage simple n'a pas provoqué de changement de densité sur le haut glacis plus précisément dans les parcelles SL 4 (aménagée par sous-solage simple en 2017). En effet, la densité de 0,01 (soit 5 individus/446 m<sup>2</sup>) relevée en septembre 2016 reste la même qu'en juillet 2021.



Figure 102. L'évolution de la densité (individu/m<sup>2</sup>) dans les parcelles aménagées par le sous-solage sur le haut glacis.

#### 6.4.2.1.4. La synthèse des résultats

La figure 103 compare et montre l'évolution de la densité dans le témoin (non aménagée) par rapport aux parcelles aménagées par les techniques du sous-solage simple, du branchage et du sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau. La comparaison a été faite en tenant compte de la densité initiale 1 (di1)<sup>12</sup> et de la densité initiale 2 (di2)<sup>13</sup> avec aménagement (de septembre 2016 à juillet 2021).

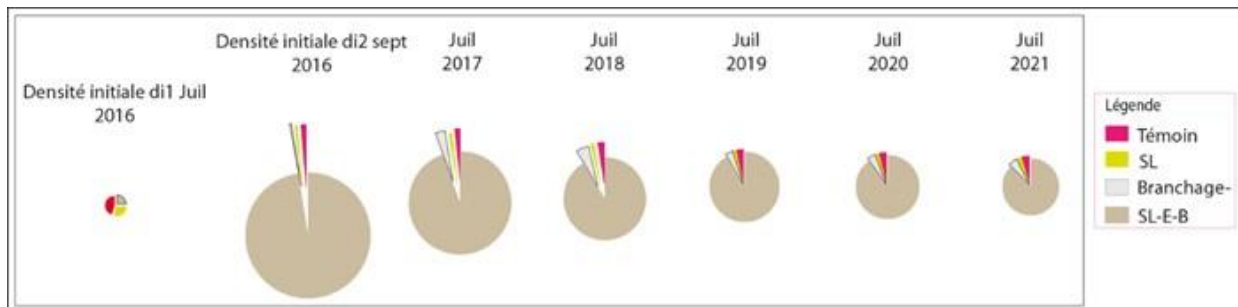


Figure 103. L'évolution de la densité (individu/m<sup>2</sup>) moyenne dans le témoin et les parcelles aménagées sur le revers du plateau.

La figure 103 montre trois situations différentes. La première situation correspond à la situation de départ en juillet 2016, représentée par la densité moyenne dans les parcelles témoins (témoin I et témoin II), soit environ 8 ou 13 individus par 150 m<sup>2</sup> (cf. [tableau 2](#)). La deuxième situation correspond à une augmentation rapide de la densité due aux aménagements effectués en septembre 2016, qui ont multiplié la densité par plus de 100 fois. La troisième situation décrit l'évolution de

<sup>12</sup> La situation initiale di1 représente la densité initiale des parcelles en juillet 2016 au moment où la parcelle n'a pas été aménagée.

<sup>13</sup> Alors que la situation initiale di2 représente, quant à elle, la densité en septembre 2016 qui correspond au résultat du 1<sup>er</sup> relevé des espèces ligneuses après aménagement des parcelles.

la densité de septembre 2016 à juillet 2021, en comparant les différentes techniques d'aménagement.

En analysant la figure 103, il est clair que l'augmentation rapide de la densité a été obtenue par la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B, cf. figure 98). Cette technique a multiplié la densité par plus de 100 fois en septembre 2016 (situation di2). Dans les parcelles où cette technique a été appliquée (SL-E-B I, II et III), la densité moyenne atteignait 9 individus/m<sup>2</sup> (soit 1300 individus pour 150 m<sup>2</sup>), contre, seulement, 0,2 pour les parcelles aménagées avec la technique du branchage (I et II) et 0,05 pour les parcelles aménagées par sous-solage simple (SL I, II et III) ainsi que pour les parcelles témoins. Ceci montre que la technique SL-E-B est la plus performante pour la régénération de la densité sur le revers du plateau. En revanche, la technique du sous-solage simple s'avère la moins performante. En 2021, la densité a été estimée à environ 2 individus/m<sup>2</sup> (soit environ 250 individus pour 150 m<sup>2</sup>) grâce à la technique SL-E-B, soit une performance supérieure à celle des autres techniques. Cette tendance se manifeste également sur le haut glacis, où la technique SL-E-B s'est révélée plus efficace malgré une forte diminution de la densité, comme le montre la figure 104.

La remarquable diminution de la densité est surtout liée à la mortalité des jeunes régénérations à la suite de l'aménagement des parcelles

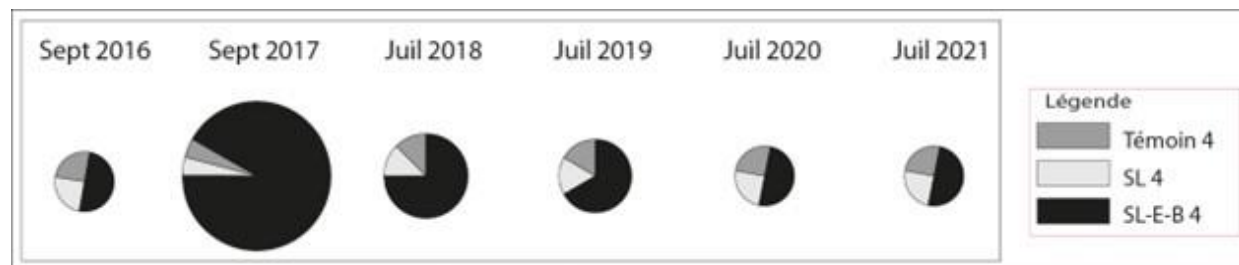


Figure 104. L'évolution de la densité moyenne dans le témoin et les parcelles aménagées sur le haut glacis.

#### 6.4.2.2. L'évaluation de la survie et de la mortalité de la végétation poussée

Entre 2016 et 2021, le suivi de la végétation à travers un inventaire répétitif (effectué à l'échelle saisonnière) des espèces ligneuses ensemencées a permis d'évaluer la survie et la mortalité des individus de deux espèces prépondérantes à savoir *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*. Dans notre contexte, on parle ainsi de la survie des individus poussés par espèce (régénération),



quand ceux-ci développent des stratégies leur permettant de s'adapter vis-à-vis du stress hydrique jusqu'à la prochaine saison de pluies. Pour rappel, un premier inventaire des jeunes pousses ligneuses a été réalisé en mi-septembre 2016 (cf. § 3.3.3). Ainsi, on suppose que cette situation de départ correspond à la régénération ligneuse initiale estimée à 100 % (le nombre d'individus total initial de chacune des espèces présentes). En nous basant sur celle-ci, nous avons évalué l'évolution du taux de survie des jeunes pousses par espèce végétale en fonction des techniques d'aménagement.

Il faut, par ailleurs, noter que l'analyse du taux de survie ne prendra pas en compte la parcelle témoin I, mais aussi les parcelles SL I, SL II et SL III. Dans ces parcelles, aucune jeune pousse n'a été enregistrée en 2016 de même que pendant les années suivantes. Et cela, malgré le fait que ces dernières ont été remaniées respectivement une fois en 2016 (SL I, deux fois en 2016 et 2017 (SL II) et trois en 2016, 2017 et 2018 (SL III). Cela sera aussi le même cas sur le haut glacis dans les parcelles SL 4 et témoin 4 où aucune jeune pousse n'a été relevée.

Par conséquent, il n'est pas pertinent d'effectuer la comparaison des résultats de l'évolution de la survie-mortalité dans ces parcelles.

#### ❖ **Le taux de survie dans les parcelles SL-E-B sur le revers du plateau**

La figure 105 illustre l'évolution du taux de survie dans les parcelles aménagées par association du sous-solage-ensemencement-branchage. Le taux de survie de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* sont présentés de façon séparée pour une bonne lisibilité.

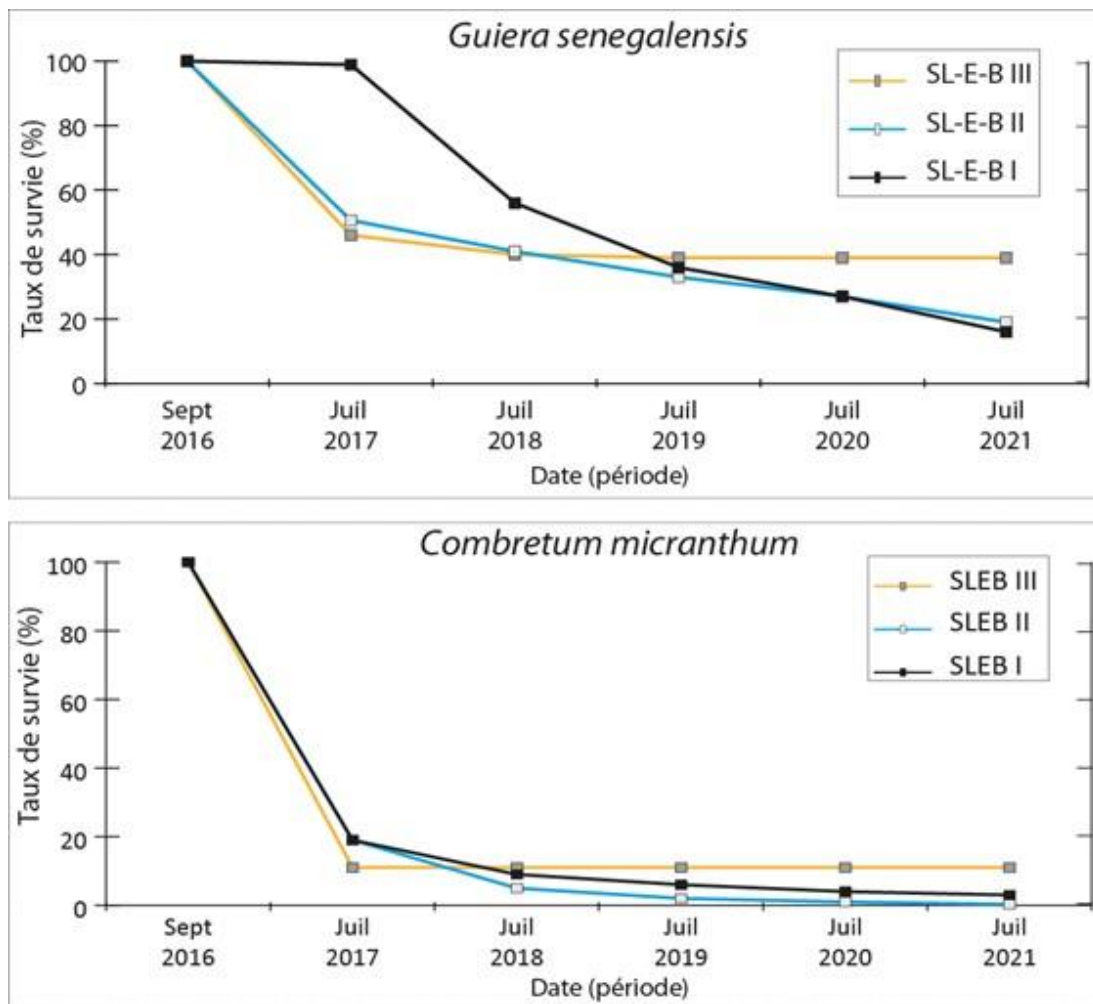


Figure 105. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour *Guiera senegalensis* (en haut) et pour *Combretum micranthum* (en bas) dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III sur le revers de plateau.

L'analyse de la figure 105 montre que, malgré l'utilisation de la technique la plus performante, il y a une forte tendance à la diminution du taux de survie des espèces dans toutes les parcelles SL-E-B. Par exemple, le taux de survie de *Guiera senegalensis* a passé de 100 % en 2016 à 18 % dans la parcelle SL-E-B I, 20 % dans la parcelle SL-E-B II et 40 % dans la parcelle SL-E-B III en 2021. Cela représente des taux de mortalité correspondant respectivement à 82 %, 80 % et 60 %. Pour *Combretum micranthum*, le taux de survie est passé de 100 % en 2016 à 0 % dans la parcelle SL-E-B II, 2 % dans la parcelle SL-EB I et 10 % dans la parcelle SL-E-B III en 2021, ce qui représente des taux respectifs de mortalité de 100 %, 98 % et 90 %. La forte compétition pour les ressources explique en grande partie ces taux de mortalité élevés.

Balandier et al. (2006) ont expliqué que la demande combinée d'individus pour une ressource peut dépasser les capacités du sol à répondre à cette demande, ce qui conduit à une forte réduction de la survie et de la croissance des plantes dans certaines parcelles.

Dans le cas qui nous concerne, les parcelles qui ont été remaniées moins de fois sont celles qui ont eu moins de ressources en eau disponibles, ce qui a conduit à un taux de mortalité plus élevé.

Dans la parcelle SL-E-B III, qui a été remaniée trois fois entre 2016 et 2018, le taux de survie de *Guiera senegalensis* s'est stabilisé à partir de 2018, ce qui montre une régénération réussie trois ans après l'aménagement. Le taux de survie de *Combretum micranthum* est resté fixe dès 2017 dans cette parcelle. En revanche, dans les deux autres parcelles (SL-E-B I et SL-E-B II), le taux de mortalité continue d'augmenter, ce qui explique la baisse continue du taux de survie dans ces parcelles.

#### ❖ Le taux de survie dans les parcelles branchages sur le revers du plateau

Sont présentés dans la figure 106, les taux de survie de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum*. Il s'agit des taux de survie moyens obtenus dans les parcelles branchages I et branchage II.

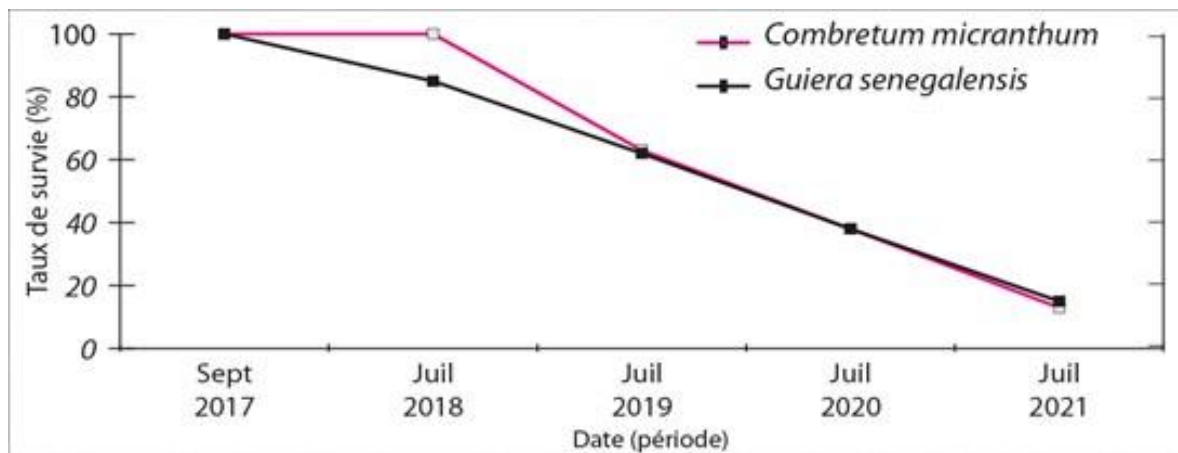


Figure 106. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour *Guiera senegalensis* et pour *Combretum micranthum* dans les parcelles aménagées par branchage sur le revers de plateau.

L'observation de la figure 106 montre un faible taux de survie des deux espèces végétales. Ainsi, le taux de survie diminue de 100 % en 2017 à  $\approx 17$  % en 2021 pour *Guiera senegalensis* et même

pour *Combretum micranthum*, soit un taux de mortalité élevé ( $\approx 83\%$  en l'espace de 5 ans). Ce résultat montre une relative performance de la technique de branchage pour ce qui est du maintien du taux de régénération à long terme.

#### ❖ Le taux de survie dans le témoin sur le revers du plateau

Le taux de survie le plus faible a été enregistré dans la surface témoin II (bande dégradée) tel qu'illustré dans la figure 107.

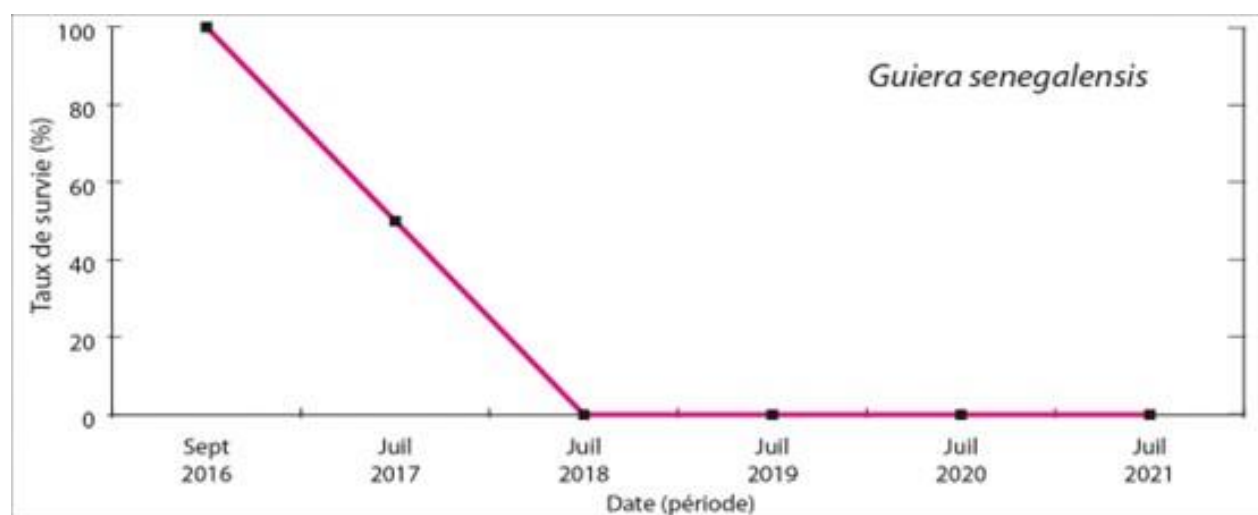


Figure 107. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour *Guiera senegalensis* dans la parcelle témoin II.

NB. Aucun jeune individu pour *Combretum micranthum* n'a été recensé en 2016, d'où la représentation prenant en compte seulement les jeunes pousses de *Guiera senegalensis* dans la figure ci-dessus.

En examinant cette figure, on constate que le taux de survie des jeunes pousses de *Guiera senegalensis* est passé de 100 % en 2016 à 0 % dès 2018, ce qui correspond à un taux de mortalité de 100 %. Il est important de noter que cela concerne seulement 5 individus recensés en 2016. Ce taux de mortalité est le plus élevé par rapport aux autres parcelles aménagées par branchage et association du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B).

Cependant, dans l'ensemble, les techniques de branchage et SL-E-B ont montré une relative performance sur la survie des jeunes pousses. Même si certains taux de mortalité sont élevés, comme dans les parcelles SL-E-B I et II pour *Combretum micranthum* (cf. figure 93), la durée de

survie reste significative, environ  $4 \pm 5$  ans dans la parcelle SL-E-B III pour *Guiera senegalensis* et même pour *Combretum micranthum*. De plus, la survie moyenne reste également significative, soit 30 % pour *Guiera senegalensis* et 8 % pour *Combretum micranthum*.

❖ **Le taux de survie dans les parcelles SL-E-B sur le haut glacis**

La figure 108 présente les résultats de l'évolution du taux de survie de *Guiera senegalensis* dans les parcelles SL-E-B 4 sur le haut glacis.

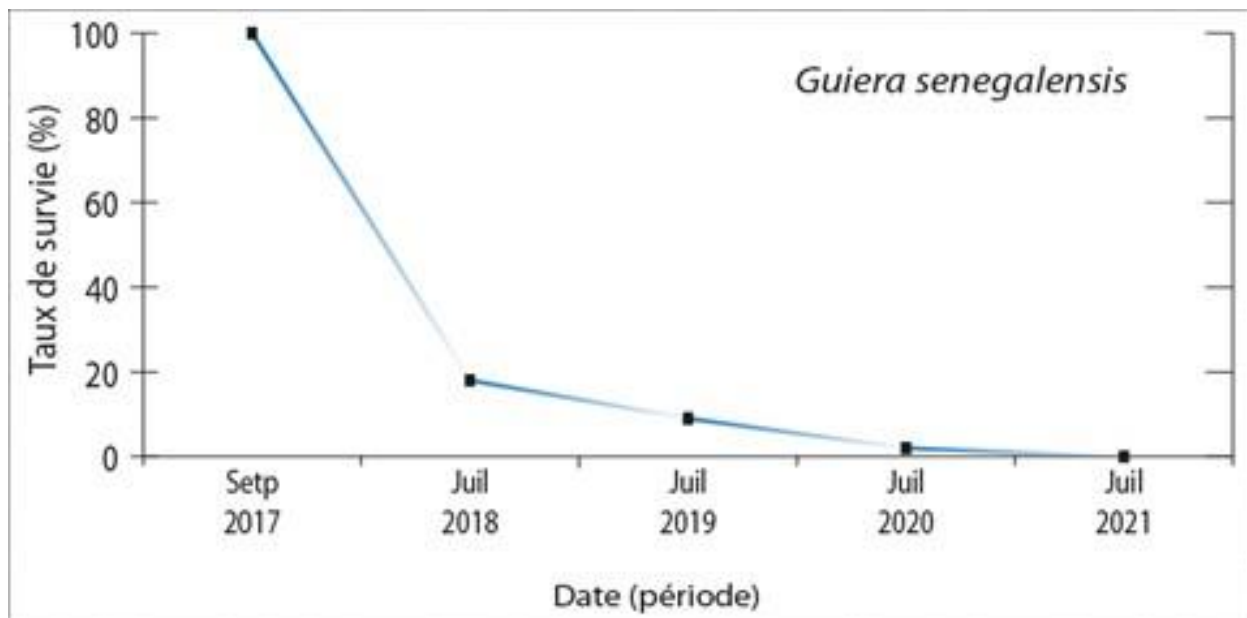


Figure 108. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour *Guiera senegalensis* dans la parcelle SL-E-B 4 sur le haut glacis.

La figure 108 indique que le taux de survie de *Guiera senegalensis* diminue rapidement de 100 % en 2017 à 18 % en 2018, ce qui correspond à un taux de mortalité de plus de 80 %. En 2021, le taux de survie est tombé à 0 %, ce qui signifie que tous les individus sont morts en cinq (5) ans. Ces résultats ont démontré que la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage ne fonctionne pas bien pour restaurer la steppe arbustive dégradée sur le haut glacis. En effet, bien que *Guiera senegalensis* ait la capacité germinative la plus forte, l'effet du sous-solage sur la survie reste limité dans le temps, comme le montrent les faibles taux de survie.

Dans le sous-point suivant, nous examinons les autres facteurs qui interviennent.

### 6.4.2.3. L'analyse des facteurs influençant la régénération de la végétation

Comme nous l'avons vu précédemment, lorsque les taux de régénération de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* sont élevés, ils sont affectés par une mortalité importante. Ainsi, nous allons examiner certains facteurs qui ont un impact sur ces taux de régénération, qu'ils soient positifs ou négatifs. Ces facteurs incluent la date d'ensemencement, la quantité totale de pluie et les moments de germination et de levée (figure 109).

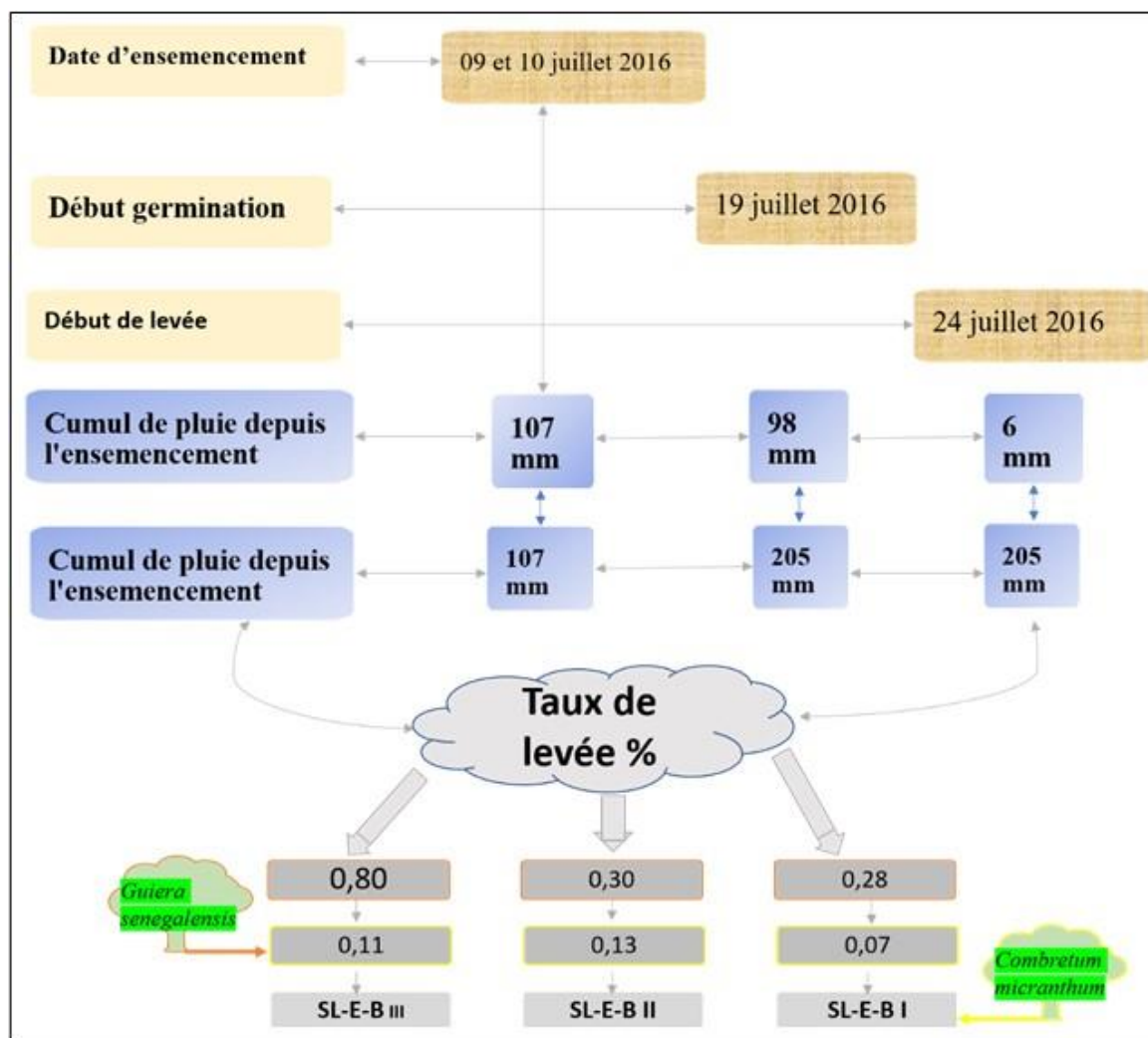


Figure 109. Les facteurs influençant le cycle de germination des graines ensemencées pour *Guiera senegalensis* et pour *Combretum micranthum* en 2016 (schéma de Flore, 2008, modifié).

La figure 109 montre que, malgré la grande quantité de graines semées dans les parcelles aménagées en 2016 pour *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*, les taux de levée sont



très faibles. En moyenne, seulement 1 sur 100 graines semées à germé et levé. Les taux de levée pour *Guiera senegalensis* sont de 0,80 % dans la parcelle SL-E-B I, 0,30 % dans la parcelle SL-E-B II et 0,28 % dans la parcelle SL-E-B III. Pour *Combretum micranthum*, les taux de levée sont encore plus faibles, soit 0,11 %, 0,13 % et 0,07 % respectivement dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III. Ces faibles taux de levée peuvent s'expliquer par le retard pris dans l'ensemencement des parcelles. En ce moment 107 mm de pluies sont déjà enregistrés. En plus de cela, il y a aussi de l'érosion (hydrique ou éolienne) qui peut emporter toutes les graines non enfouies dans le sol. Mais aussi, l'effet des petits cumuls journaliers de pluie de 4 à 8 mm enregistrés le 10 et le 12 juillet (tableau 24). En effet, ces pluies fines entraînent, parfois, le pourrissement de la graine. Du fait que leur quantité peut être insuffisante pour conduire tout le processus de germination<sup>14</sup> à son terme. Ensuite, il y a les effets négatifs des opérations de la reprise du sous-solage (remaniement) des sols pendant lesquelles le risque d'endommager la structure racinaire des plantes est très élevé et le pâturage (figure 110). Ces facteurs influencent négativement la régénération de jeunes pousses qui sont broutées par les animaux.



*Figure 110. Les impacts négatifs de remaniement du sol et du pâturage sur le taux de régénération du couvert végétal dans les parcelles aménagées. À gauche, un pied de jeune pousse ligneuse déracinée lors de l'opération du remaniement du sol dans la parcelle SL-E-B III le 18 juillet 2018. À droite, des animaux (ânes) qui broutent la végétation poussée dans la parcelle SL-E-B I.*

Parmi les facteurs qui influencent négativement le taux de régénération sur les parcelles aménagées, nous avons compté aussi la forte activité des termites. En effet, d'après nos observations, quand les

---

<sup>14</sup> Noter que l'étude de phénomène du processus de germination des graines ne relève pas de notre champ disciplinaire. C'est ce qui explique pourquoi, nous nous sommes appesantis sur des critères qualitatifs pour apprécier le processus de germination sans porter un choix sur la qualité des graines.



termite sont trop nombreux, ils détruisent les graines en les mangeant (figure 111). Ce qui peut impacter indirectement sur le taux de la levée. En revanche, Mando (1997) et Paul & Michel (1997) ont montré que l'activité termitière est déterminante dans la création des conditions favorables au développement des plantes.



Figure 111. Les termites en activité sur les branchettes utilisées pour l'aménagement de la parcelle et leur rôle dans le processus de germination des graines ensemencées. À gauche, les termites sur les branchettes recouvrant la surface du sol. À droite, un termite qui ronge une graine

Les premières germinations et levées ont été produites entre le 19 et le 24 juillet, malgré les facteurs qui peuvent réduire le taux de levées. La régénération des parcelles SL-E-B I, II et III a commencé lorsque le sol a reçu environ 98 mm de pluie. Les taux de levées moyens ont été de 0,50 % pour *Guiera senegalensis* et de 0,10 % pour *Combretum micranthum*, bien que faibles. Lorsque ces taux sont rapportés à l'échelle de la superficie des parcelles de 150 m<sup>2</sup>, ils représentent des taux de régénération remarquablement significatifs, en accord avec les densités élevées reçues dans les parcelles en 2016 (cf. [commentaire figure 98](#)).

Ces taux de régénération significatifs ont été obtenus grâce à une distribution relativement homogène des jours de pluie entre la date d'ensemencement et la date de début de germination (figure 111). En effet, les cinq événements pluvieux enregistrés depuis l'ensemencement se sont produits sur une période de trois jours en moyenne (tableau 23), ce qui a favorisé la germination des graines. Cette distribution des pluies a également entraîné une forte dynamique de l'humidité du sol en profondeur, favorisant la croissance de la végétation.

Tableau 23. La répartition de jour de pluie avant et depuis la date de l'ensemencement en 2016.

Jours à événement pluvieux	Depuis l'ensemencement					Total
	10 juillet	12 juillet	17 juillet	19 juillet	23 juillet	
Quantité de pluie tombée (mm)	4	8	62	24	6	104

Cette bonne distribution des pluies provoque une forte dynamique de l'humidité du sol en profondeur. Cela entraîne la croissance de la végétation.

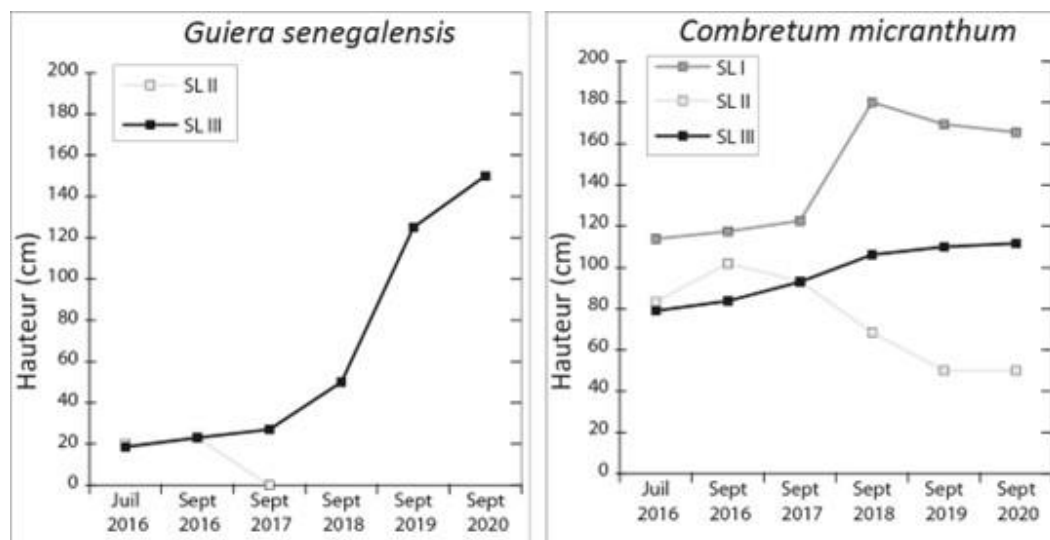
#### 6.4.2.4. L'étude du développement de la végétation sur le plan vertical

En considérant la hauteur des arbustes existants et des jeunes pousses, nous avons pu étudier les effets des techniques d'aménagement sur la croissance verticale de la végétation (cf. § 3.3.4). Nous avons observé que dans les parcelles témoins situées sur un plateau ou un haut glacis, la croissance verticale de la végétation est difficilement perceptible (voir annexe 5).

##### 6.4.2.4.1. L'influence de la technique du sous-solage simple sur la croissance verticale de la végétation

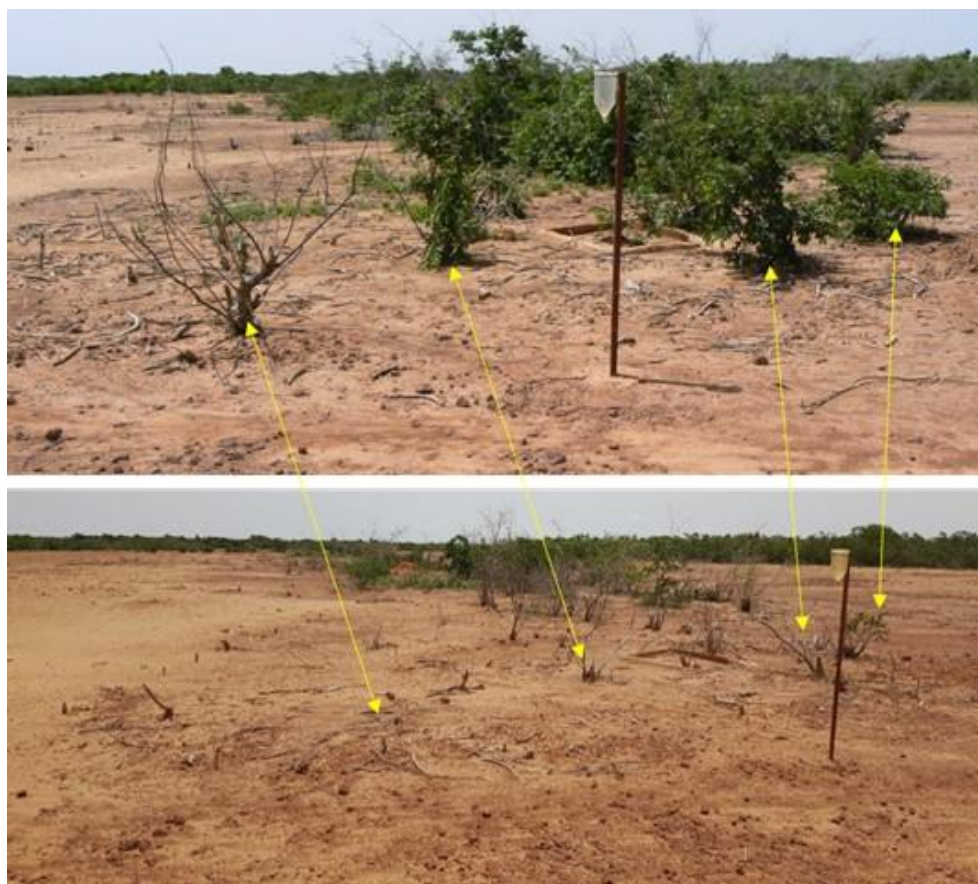
###### ❖ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau

La figure 112 présente l'impact de la technique du sous-solage simple sur la croissance de la hauteur des individus déjà existants dans les parcelles SL I, SL II et SL III.



*NB. Rappelons qu'aucun jeune arbuste n'a été compté dans les parcelles SL I, SL II et SL III. En outre, aucun adulte de Guiera senegalensis n'est présent dans la parcelle SL III.*

En observant la figure 112, nous pouvons voir que la parcelle SL III a connu la plus forte croissance verticale de *Guiera senegalensis*. La hauteur moyenne de cette espèce est passée de 19 cm en 2016 à 150 cm en 2020, soit une multiplication de la croissance verticale par plus de 8 fois grâce à la technique du sous-solage simple effectuée à trois reprises en 2016, 2017 et 2018. En revanche, dans la parcelle SL II, la hauteur moyenne est passée de 20 cm à 0 cm en 2017. Les remaniements du sol ont eu un effet positif sur la croissance de *Combretum micranthum*. Dans la parcelle SL II, la hauteur moyenne est passée de 114 cm en 2016 à 180 cm en 2018, tandis que, dans la parcelle SL III, elle est passée de 79 cm en 2016 à 112 cm en 2020. Cependant, dans la parcelle SL I, la croissance verticale de *Combretum micranthum* a commencé à diminuer à partir de 2018. Cette tendance est également constatée dans la parcelle SL II, où la hauteur moyenne a été divisée par 1,7 entre 2016 (83 cm) et 2020 (50 cm) comme on peut le voir dans la figure ci-dessous.



*Figure 113. L'aperçu de la dégradation de la végétation dans la parcelle SL II (remaniée deux fois en 2016 et 2017). La situation de départ en septembre 2016 est indiquée en haut, et en bas c'est*

*l'état de la végétation dans la même parcelle en 2019. Les flèches indiquent la dégradation sur quelques individus.*

La diminution de la hauteur moyenne peut s'expliquer par la dégradation des conditions hydriques sur les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple remaniée une fois, à savoir la parcelle SL I (cf. [figure 87](#)). Cette dégradation des conditions hydriques combinée aux effets négatifs lors du remaniement du sol (outils aratoires, cf. [figure 19](#)) a même provoqué la disparition de certains individus de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum*, comme illustré dans la figure 113, ci-dessus.

#### ❖ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis

La figure 114 présente l'évolution de la croissance du *Guiera senegalensis* dans la parcelle SL 4 sur le haut glacis du côté de la berge droite du BV TK-IBM. La présentation du résultat sur la technique du sous-solage sur la croissance verticale de la végétation ne concerne que les arbustes existants du *Guiera senegalensis* qui est présent dans la parcelle.

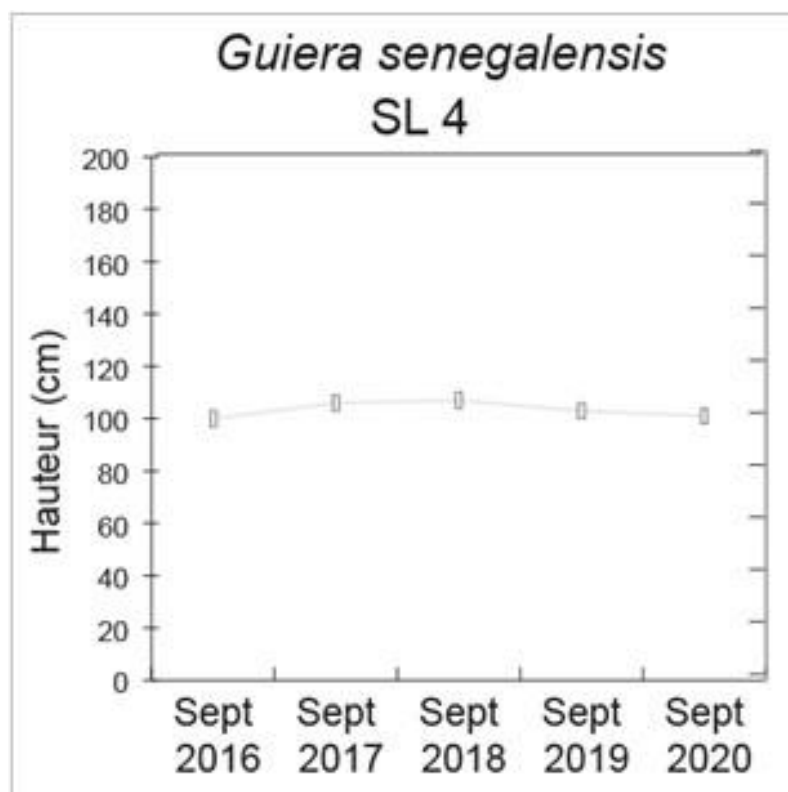


Figure 114. Le développement vertical des arbustes existants pour *Guiera senegalensis* dans la parcelle SL 4 sur le haut glacis.

En étudiant la figure 114, nous constatons que l'utilisation de la technique de sous-solage simple n'a pas eu un impact significatif sur la croissance en hauteur du *Guiera senegalensis* dans la parcelle SL 4. Cela est confirmé par la courbe qui montre que la hauteur moyenne est passée de 100 cm en 2016 (avant l'aménagement) à 107 cm en 2018 et à 101 cm en 2020 (après l'aménagement).

En comparant les résultats obtenus dans les parcelles aménagées du haut glacis avec ceux de la parcelle témoin, nous constatons que la croissance en hauteur du *Guiera senegalensis* est presque similaire à celle obtenue dans la parcelle SL 4 (figure 68 a). De plus, dans les parcelles, témoin 4 et SL 4, il n'y a pas de jeune pousse de *Guiera senegalensis* ou de *Combretum micranthum*, ce qui indique une absence notable de régénération de la croissance de la végétation, et en particulier en hauteur. En revanche, dans les parcelles aménagées en utilisant la technique de sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B), une légère augmentation de la croissance en hauteur de *Guiera senegalensis* et de *Combretum micranthum* a été constatée dans les parcelles SL-E-B 4 et SL-E-B 5.

Les résultats ci-dessus démontrent que l'utilisation de la technique de sous-solage simple, sans reprises, est inefficace pour améliorer la croissance en hauteur des espèces végétales, quelle que soit l'unité géomorphologique (revers du plateau et haut glacis). Cependant, si des reprises sont effectuées au moins une fois par an pendant trois années successives, les effets de la technique du sous-solage simple deviennent significativement importants sur la croissance en hauteur de la végétation, comme cela a été observé dans la parcelle SL III sur le revers du plateau.

#### **6.4.2.4.2. L'influence de la technique du branchage sur la croissance verticale de la végétation**

La figure 115 résume les résultats du suivi de la croissance verticale (hauteurs moyennes en cm) des individus existants et des jeunes pousses dans les parcelles aménagées avec la technique de branchage. Seuls les résultats de *Combretum micranthum* sont présentés pour les arbustes existants, car *Guiera senegalensis* n'est pas présent dans les deux parcelles traitées avec cette technique.



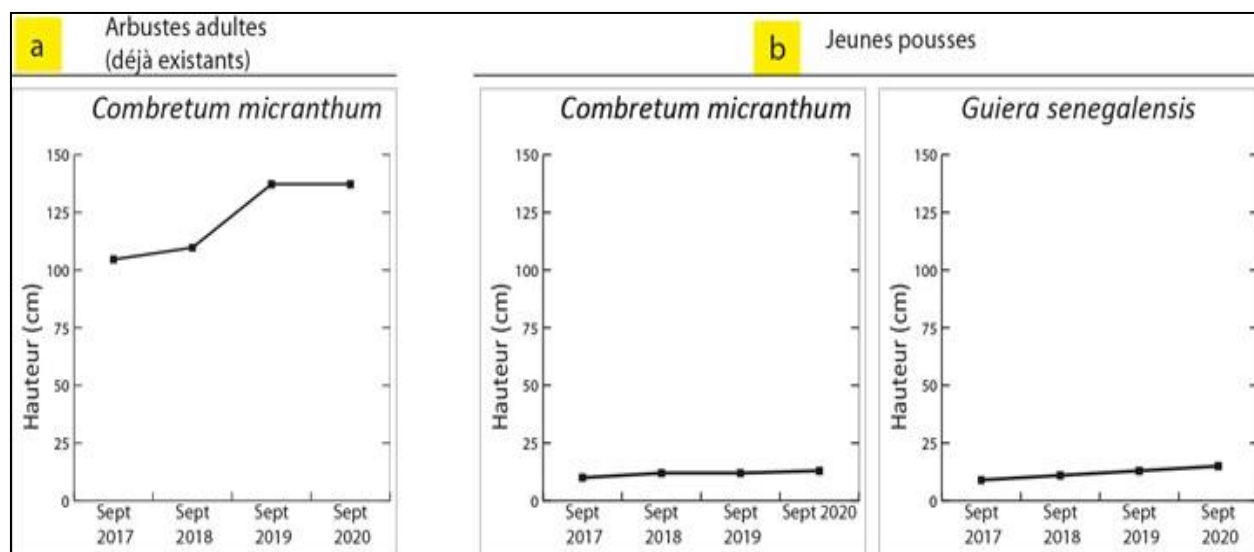


Figure 115. Le développement vertical des arbustes existants et jeunes pousses pour *Combretum micranthum* dans les parcelles branchage (hauteur moyenne parcelle branchage I et II) sur le revers de plateau.

En étudiant la figure 115, nous avons pu constater que la technique du branchage a eu une influence relativement faible sur le développement vertical des arbustes adultes et des jeunes pousses. En effet, pour l'espèce *Combretum micranthum*, les arbustes adultes ont connu une augmentation moyenne de hauteur de 32 cm sur une période de quatre ans, passant de 105 cm en 2017 à 137 cm en 2020. Pour les jeunes pousses, la hauteur moyenne a augmenté de seulement 4 cm, passant d'environ 10 cm en 2017 à 14 cm en 2020.

#### 6.4.2.4.3. L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la croissance verticale de la végétation

##### ❖ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau

La figure 116 illustre l'impact positif de la technique de la combinaison du sous-solage-ensemencement-branchage sur la croissance verticale des individus existants (adultes) et des jeunes pousses dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B III.

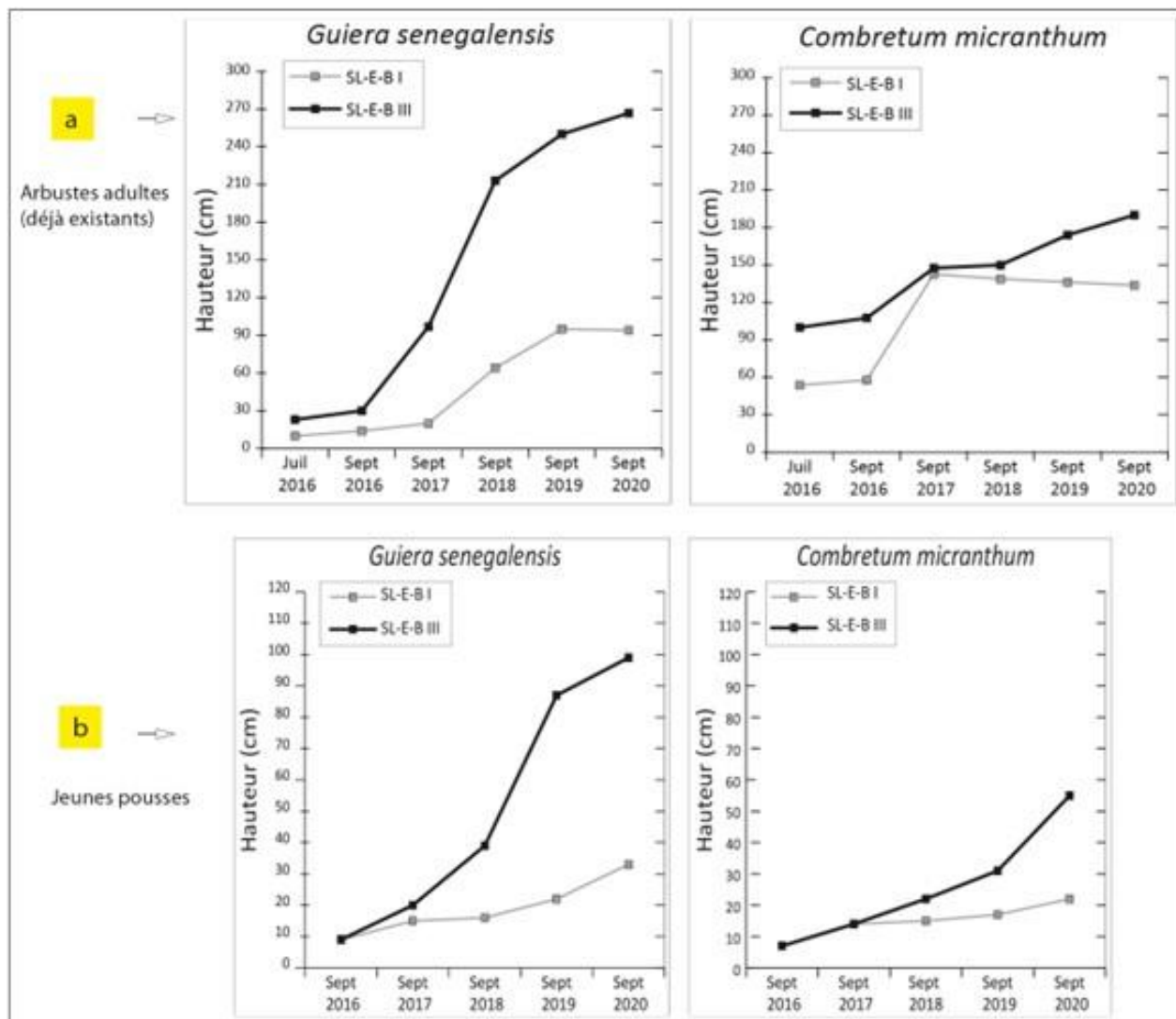


Figure 116. La croissance verticale des arbustes existants (a, en haut) et jeunes pousses (b, en bas) pour *Guiera senegalensis* et pour *Combretum micranthum* dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B III sur le revers de plateau.

La figure 116 montre que la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage a eu un effet positif sur le développement vertical des arbustes existants et des jeunes pousses (voir figure 116 a et b). Par exemple, pour *Guiera senegalensis* dans la parcelle SL-E-B III, la hauteur moyenne des arbustes existants a augmenté de 27 cm à 267 cm et celle des jeunes pousses d'environ 10 cm à près de 100 cm entre 2016 et 2020. Cela représente une multiplication de la hauteur par près de 10 fois dans cette parcelle, la plus importante croissance verticale enregistrée. Pour *Combretum micranthum*, la croissance de la hauteur a été moins importante que pour *Guiera senegalensis*, mais la hauteur moyenne des jeunes pousses a été multipliée par près de 8 fois et



celle des arbustes existants par près de 2 fois entre 2016 et 2020, soit respectivement de 7 à 55 cm et 100 à 190 cm.

En comparant les résultats des parcelles SL-E-B I et SL-E-B III, nous avons remarqué que la croissance verticale de la végétation (à la fois des jeunes pousses et des arbustes existants) était plus importante dans la parcelle SL-E-B III. Dans la parcelle SL-E-B I, la hauteur moyenne des arbustes existants a augmenté de 10 cm à 91 cm pour *Guiera senegalensis* et de 54 cm à 134 cm pour *Combretum micranthum* de 2016 à 2020, soit des hausses respectives de 9 et 2 fois. La hauteur des jeunes pousses a été multipliée par 4 fois pour *Guiera senegalensis*, passant de 9 cm à 33 cm de 2016 à 2020. Pour *Combretum micranthum*, la hauteur des jeunes pousses a été multipliée par 3 fois, soit de 7 cm à 22 cm entre 2016 et 2020.

Dans les deux parcelles, la technique d'association de sous-solage-ensemencement-branchage a montré des résultats significatifs sur la croissance verticale de la végétation, qu'il s'agisse des jeunes pousses ou des arbustes existants pour les deux espèces. Cependant, les résultats étaient plus remarquables lorsque le sous-solage est combiné avec ensemencement et branchage et était répété au moins trois fois pendant trois ans, comme cela a été le cas dans la parcelle SL-E-B III, où le développement vertical de la végétation était plus important que dans toutes les autres parcelles aménagées sur le revers du plateau (voir figure 117).

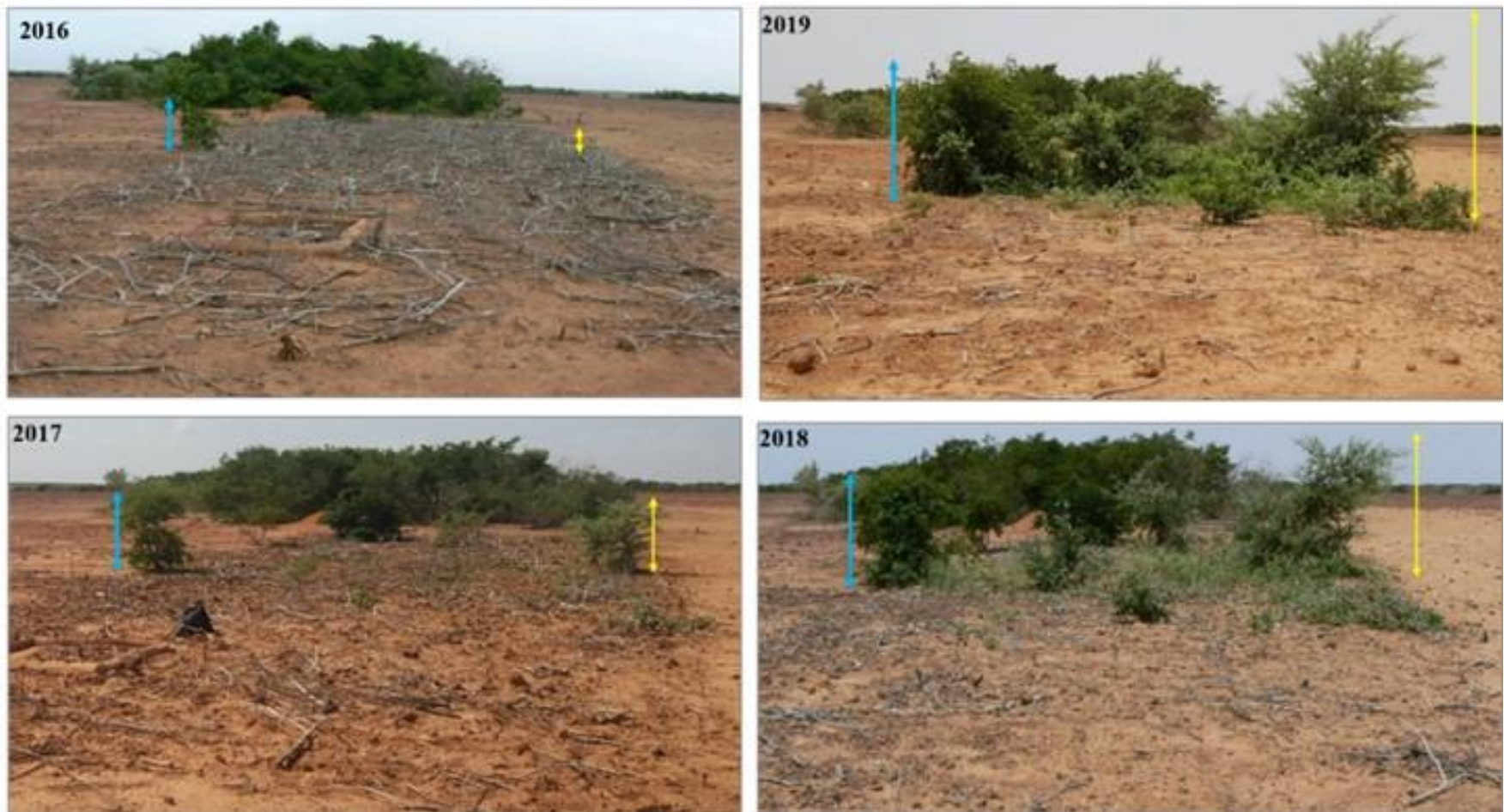


Figure 117. La croissance verticale des arbustes existants et des jeunes pousses dans la parcelle SL-E-B III. Les flèches en double sens indiquent le gain en croissance verticale, le bleu pour *Combretum micranthum* et le jaune pour *Guiera senegalensis*.

Cette figure montre qu'en l'espace de 4 ans seulement, la croissance verticale de la végétation est comparable à la hauteur des arbustes dans la bande boisée adjacente à la parcelle. Ce qui prouve bien l'efficacité de cette technique.

❖ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis

L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis est présentée dans la figure 118.

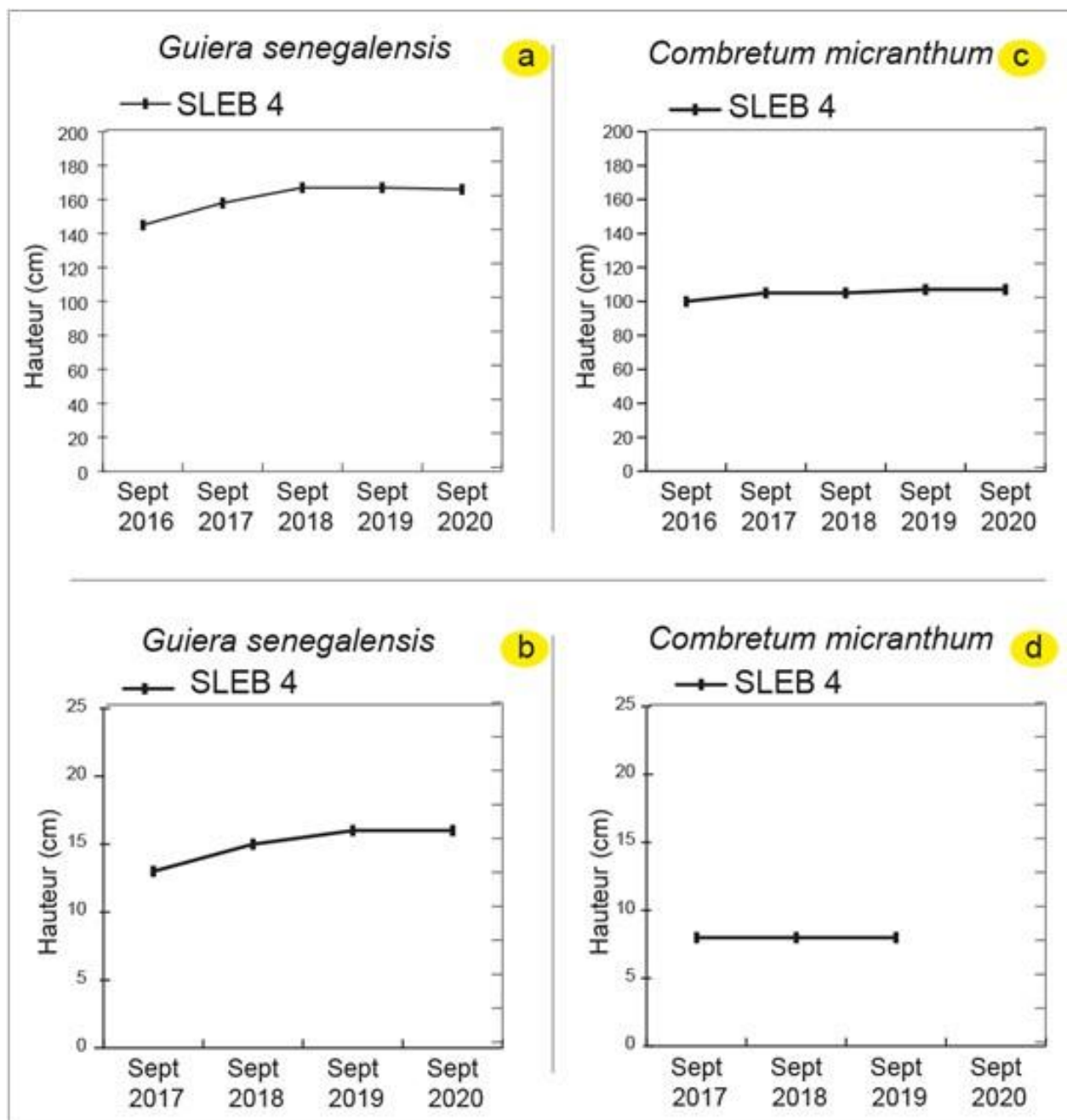


Figure 118. La croissance verticale des arbustes existants (a & c, en haut) et jeunes pousses (b & d, en bas) pour *Guiera senegalensis* et pour *Combretum micranthum* dans la parcelle SL-E-B 4 sur le haut glacis.

En analysant la figure 118, on peut constater que la technique du sous-solage-ensemencement-branchage a eu une influence faible sur la croissance verticale de la végétation en général. Cependant, les arbustes existants du *Guiera senegalensis* dans la parcelle SL-E-B 4 ont connu la plus grande croissance verticale, passant de 145 cm en 2016 (avant l'aménagement) à 166 cm en 2020, soit une multiplication de la hauteur par 1,14 seulement. Les arbustes existants du *Combretum micranthum* ont montré la plus faible croissance de la hauteur, ce qui est difficilement visible dans la figure 118 (c). Cette même tendance s'applique également aux jeunes arbustes du *Guiera senegalensis* et du *Combretum micranthum* (figure 118 b & d).

En résumé, la technique du sous-solage-ensemencement-branchage s'est montrée plus efficace sur la croissance verticale de la végétation sur le revers du plateau dans les parcelles remaniées à plusieurs reprises (SL-E-B III). Mais, elle a été moins performante dans les parcelles ménagées par la technique du branchage et celles remaniées une seule fois (SL-E-B I et SL-E-B 4) que ce soit sur le revers du plateau ou sur le haut glacis.

Malgré cela, l'application de ces techniques a conduit à une augmentation du taux de couverture végétale dans les parcelles aménagées.

#### **6.4.2.5. L'étude du développement de la végétation sur le plan horizontal**

La croissance de la végétation sur le plan horizontal a été étudiée en effectuant des mesures in situ et par méthode cartographique de la végétation présente dans les parcelles. Ces mesures ont été effectuées avant d'aménager les parcelles (2016), puis après aménagement pendant chaque mois de septembre des années 2016, 2017, 2018 et 2019 (cf. § 3.3.5).

##### **6.4.2.5.1. L'influence de la technique du sous-solage simple sur la croissance horizontale de la végétation**

###### **❖ Le résultat issu des parcelles aménagées sur le revers du plateau**

La figure 119 illustre l'impact de la technique du sous-solage simple sur la croissance horizontale de la végétation dans les parcelles SL I et SL III.

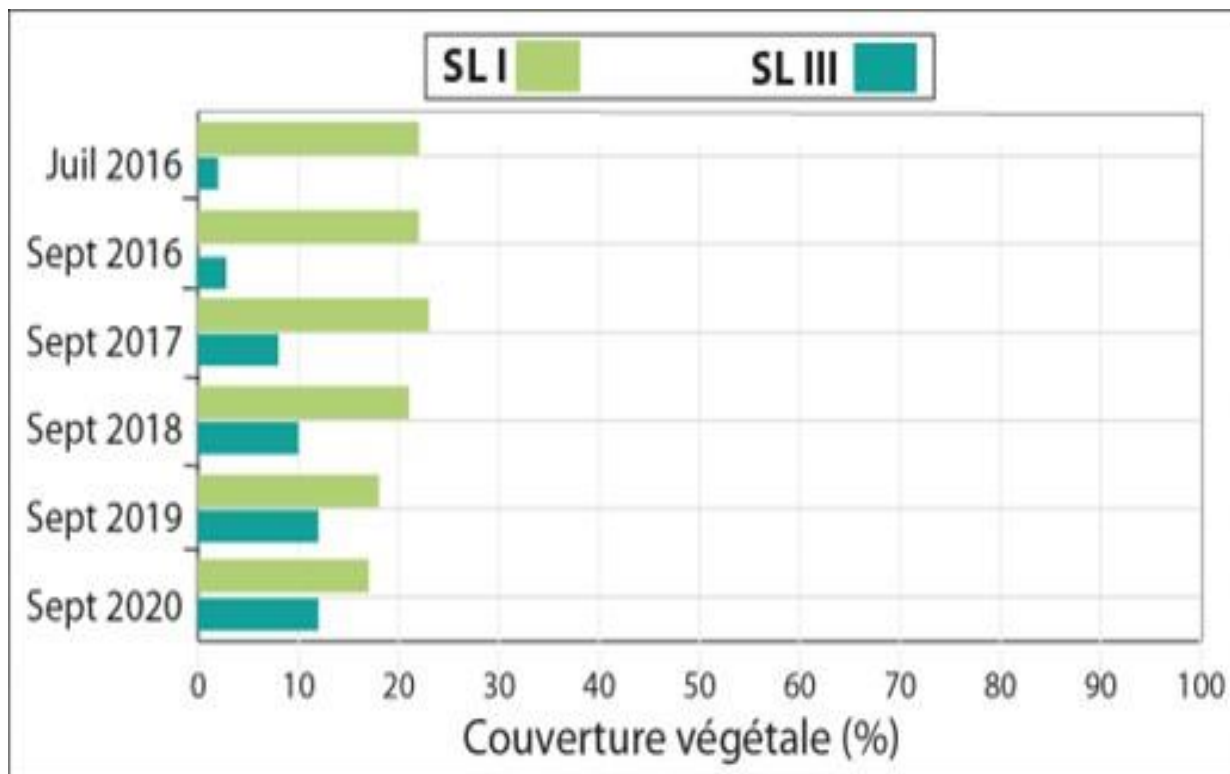


Figure 119. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple sur le revers du plateau.

La figure 119 illustre que la couverture végétale dans la parcelle SL I a augmenté de seulement 1 % entre 2016 et 2017, passant de 22 % à 23 %. À partir de 2018, la couverture végétale a commencé à diminuer, atteignant une baisse de 17 % en 2020, soit une diminution élevée de 5 %. Cela peut s'expliquer par la dégradation des conditions hydriques sur la parcelle SL I (cf. [figure\\_87](#)). De plus, il est important de noter que la pluviométrie a été insuffisante en 2017, 2018 et 2019 sur le site (cf. [tableau 11](#)).

En revanche, dans la parcelle SL III, malgré la baisse de pluie, la couverture végétale a augmenté par rapport à celle de la parcelle SL I. La couverture végétale dans la parcelle SL III a été multipliée par près de quatre fois, passant de seulement 3 % en 2016 à 12 % en 2020. Cela s'explique par les avantages du sous-solage du sol effectué dans la parcelle SL III, en particulier les remaniements qui ont eu lieu en 2016, 2017 et 2018. Comme nous l'avons montré précédemment dans la [figure 83](#) ces opérations ont permis une augmentation plus importante de l'eau dans le sol, ce qui a entraîné le développement significatif de la végétation sur le plan horizontal.



→ **Le résultat issu des parcelles aménagées sur le haut glacis**

Cependant, sur le haut glacis sous-solé, l'influence de cette technique a eu peu d'effet sur la croissance de la végétation sur le plan horizontal comme l'illustre la figure 120.

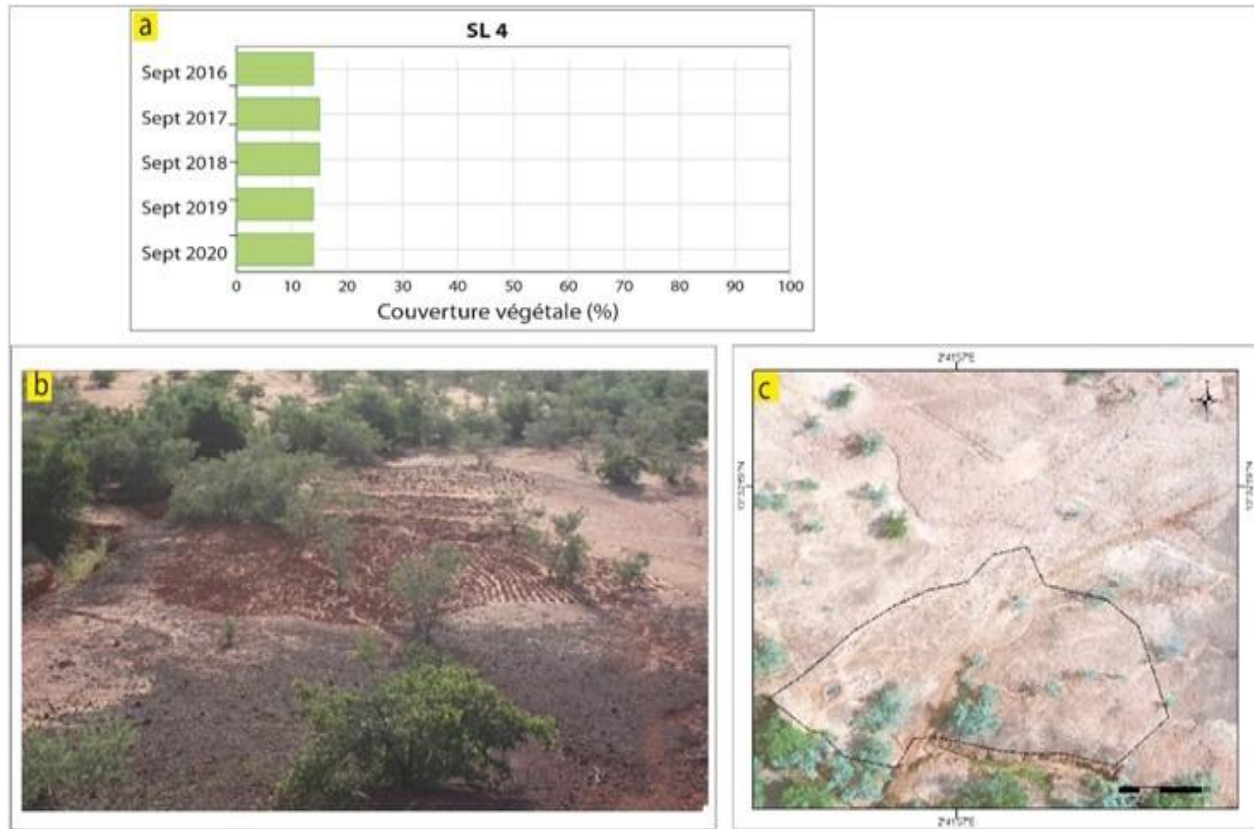


Figure 120. L'évolution horizontale de la végétation dans la parcelle SL 4 aménagée par la technique du sous-solage simple sur le haut glacis.

La figure 120 montre que la croissance de la couverture végétale a été lente malgré l'aménagement en sous-solage de la parcelle SL 4 sur le haut glacis. En effet, le taux de couverture végétale n'a presque pas évolué entre 2016 et 2019 (passant de 14 % à 15 % en 2017 et 2018). Cette légère augmentation a été provoquée par la mise en place du sous-solage en 2017. Ce résultat quantitatif est également confirmé qualitativement par la figure 107 b & c, qui montrent qu'il n'y a pas eu de changement dans la couverture végétale de septembre 2016 à septembre 2019.

#### 6.4.2.5.2. L'influence de la technique du branchage sur la croissance horizontale de la végétation

La figure 121 présente l'évolution de la croissance horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du branchage simple. Les résultats dans cette figure représentent la moyenne de la croissance dans les parcelles branchages I et II.

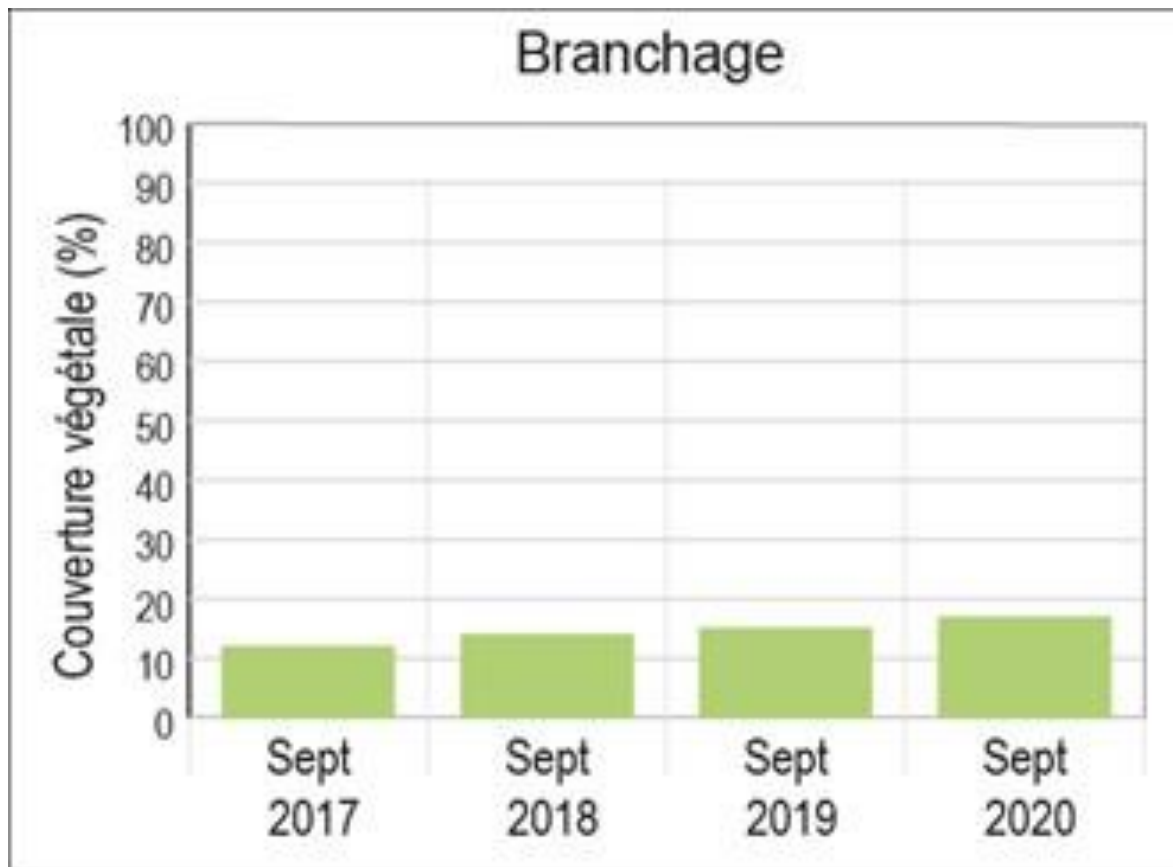


Figure 121. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du branchage simple sur le revers du plateau.

En examinant la figure 121, on peut constater que la couverture végétale des parcelles traitées avec la technique du branchage a augmenté de seulement 12 % en 2016 à 17 % en 2020, soit une augmentation de 4 %. En d'autres termes, le taux de couverture végétale a augmenté de 1,4 fois en 4 ans. Bien que cette technique entraîne une croissance horizontale relativement significative, elle reste lente en raison de l'état dégradé des bandes boisées.



### 6.4.2.5.3. L'influence de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur la croissance horizontale de la végétation

#### ➤ Analyse des résultats issus des parcelles aménagées sur le revers du plateau

Nous présentons et comparons dans la figure 122 l'évolution de la croissance horizontale de la végétation dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B III aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage.

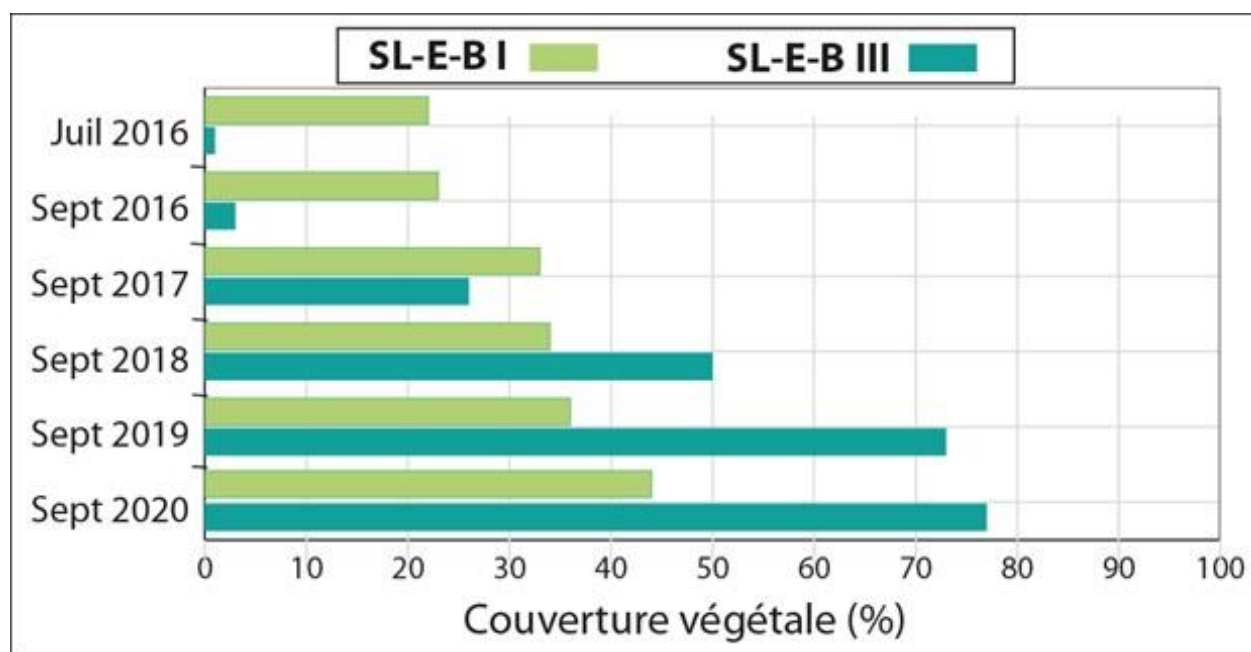


Figure 122. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.

La figure 122 montre une forte augmentation de la couverture végétale dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B III. Dans la parcelle SL-E-B I, le taux de couverture végétale a doublé, passant de 22 % en juillet 2016 à 44 % en 2020. Dans la parcelle SL-E-B III, le taux a augmenté de plus de 70 fois, passant d'un taux de couverture végétale d'environ 2 % en septembre 2016 à un taux de plus de 77 % en 2020. La figure 123 illustre qualitativement cette remarquable évolution de la couverture végétale.

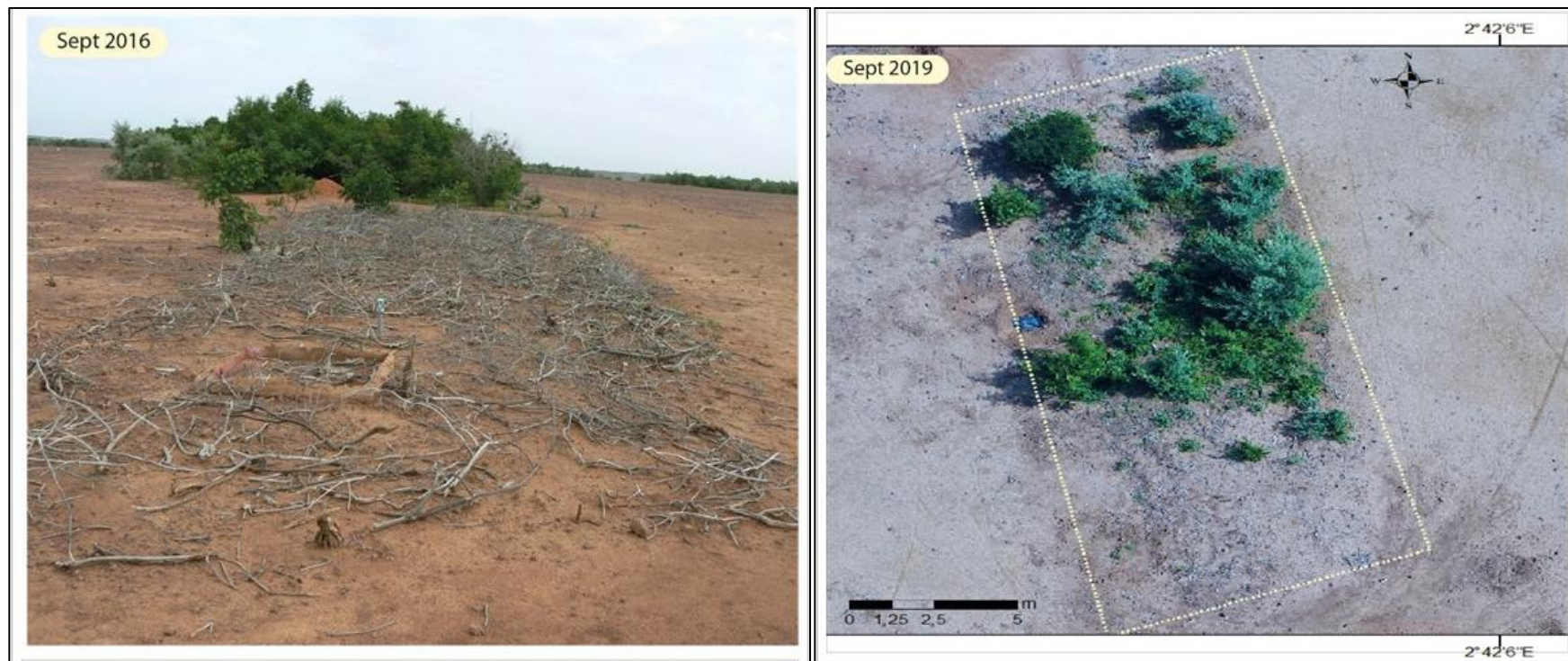


Figure 123. L'évolution qualitative du taux du couvert végétal de 2016 (en haut) à 2019 (en bas) dans la parcelle SL-E-B III aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.

En observant la figure 123, on peut voir une évolution importante de la végétation. Cette croissance rapide du couvert végétal est principalement due à la croissance des arbustes dans la parcelle SL-E-B III en seulement 4 ans. De plus, la croissance de la végétation dans cette parcelle reflète la structure de la végétation typique de la brousse tigrée, étant donné que la végétation s'est développée en bande boisée large.

En utilisant également la technique de SL-E-B, il a été constaté une augmentation positive du taux de couverture végétale sur le haut glacis.

Ce résultat important est dû au fait que les espèces choisies sont locales et qu'en ce sens, elles sont parfaitement adaptées aux conditions du milieu. Niang et al. (2014) ont également fait une recommandation dans ce sens pour tous les projets de réhabilitation de la végétation se trouvant dans la zone de la Grande Muraille Verte (GMV).

#### ➤ Analyse des résultats issus des parcelles aménagées du haut glacis

L'évolution de croissance horizontale dans la parcelle SL-E-B 4 aménagée par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis se résume dans la figure 111.

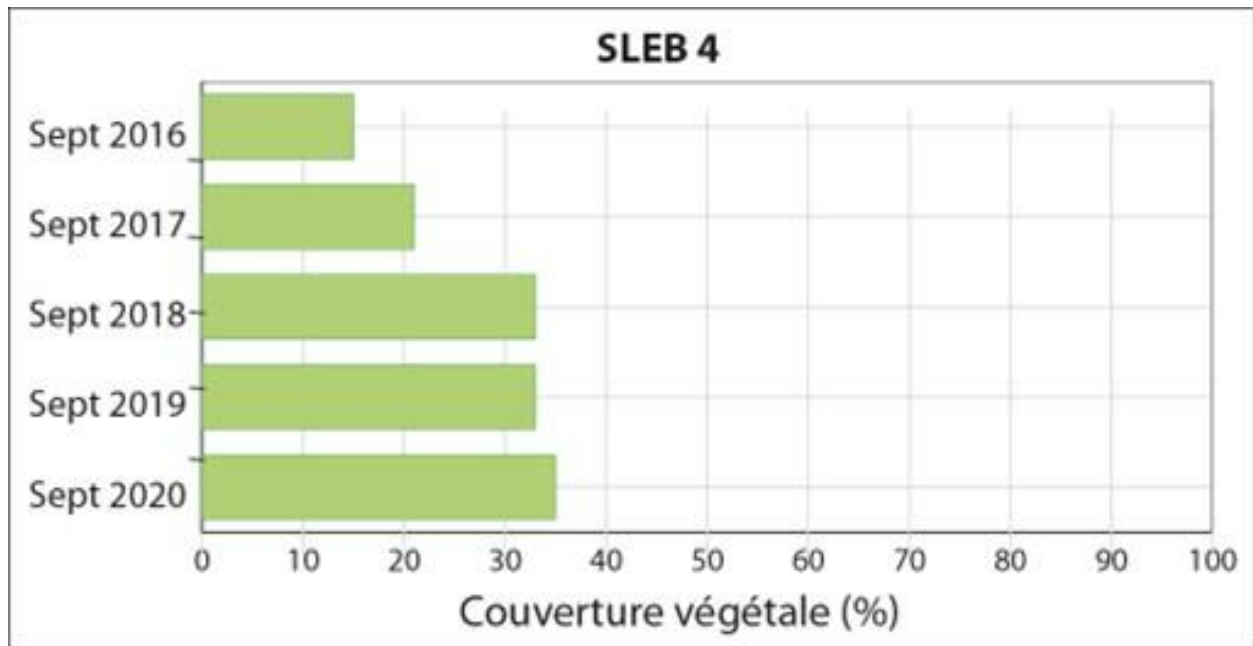


Figure 124. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis.

En examinant la figure 124, nous constatons une amélioration significative du taux de couverture végétale dans la parcelle SL-E-B 4. En effet, le taux de couverture végétale a augmenté d'environ 20 % au cours des 5 années qui suivent l'aménagement de la parcelle par la technique combinée de sous-solage-ensemencement-branchage, passant de 15 % en 2016 à environ 35 % en 2020.

La figure 125 confirme qualitativement cette amélioration, montrant une régénération de la végétation, en particulier de la couverture herbacée, depuis l'aménagement de la parcelle en 2017.



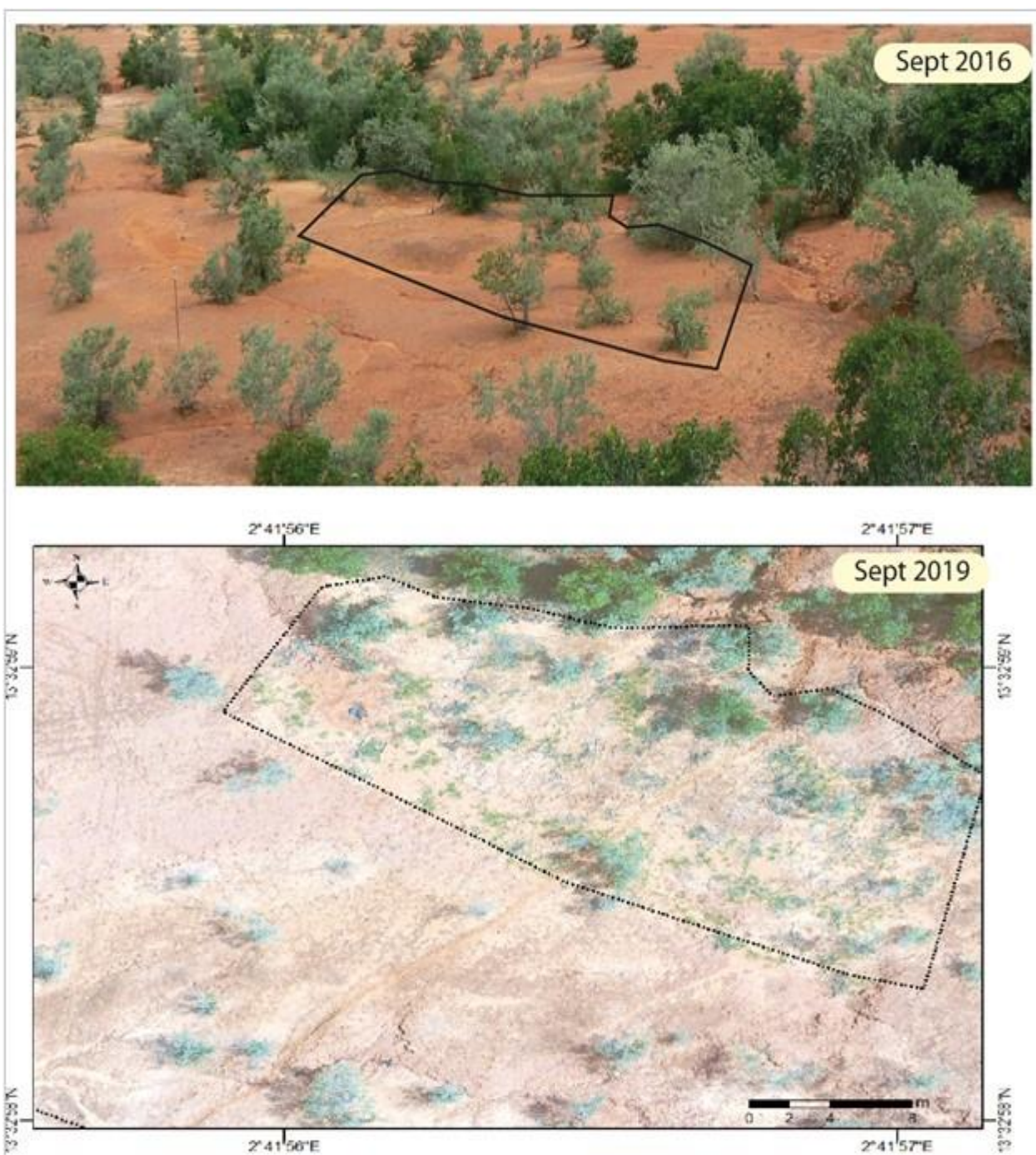


Figure 125. L'évolution qualitative du taux du couvert végétal dans la parcelle SL-E-B 4 aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis.

### Conclusion

La méthode utilisée, pour évaluer l'efficacité de trois techniques d'aménagement de parcelles sur la croissance de la végétation, consiste à faire un suivi sur une période de quatre (4) ans. Les

techniques testées étaient le sous-solage simple, le branchage simple et une combinaison de sous-solage-ensemencement-branchage. Les résultats démontrent que ces techniques ont un impact relatif sur la régénération du couvert végétal dans les parcelles aménagées.

Le sous-solage simple s'est avéré être la technique la moins efficace pour la régénération de la végétation, que ce soit sur le revers du plateau ou sur le haut glacis. La diversité floristique (cf. [figure 95](#) & [tableau 21](#)), la densité et la couverture végétale (cf. [figure 103](#), [figure 102](#), [figure 119](#) & [figure 120](#)) étaient toutes plus faibles dans les parcelles soumises à cette technique (SL I et SL III). Le branchage simple a permis une régénération plus lente de la végétation sur le revers du plateau (cf. [figure 121](#)). La technique de sous-solage-ensemencement-branchage a été la plus efficace pour augmenter la superficie couverte par la végétation (cf. [figure 123](#)). Cette technique a entraîné une régénération considérable de *Guiera senegalensis*, de *Combretum micranthum* et de plusieurs espèces herbacées, ce qui a permis l'installation d'une végétation plus dense dans la parcelle SL-E-B III (cf. [figure 95](#)), reflétant la structure de la brousse tigrée. Cette parcelle a été remaniée à trois reprises pendant trois années successives (2016, 2017 et 2018). Toutefois, les croissances horizontale et verticale de la végétation ont été moins importantes dans la parcelle SL-E-B I qui a reçu le même type de traitement que la parcelle SL-E-B III. Cependant, la parcelle SL-E-B I a été remaniée une seule fois en 2016. Tout de même, la croissance de la densité dans cette parcelle est significative même 5 ans après aménagement, soit  $\approx 2$  individus/m<sup>2</sup> en 2021 contre seulement 0,09 individus/m<sup>2</sup> en 2016, avant aménagement (cf. [figure 103](#)).

## Conclusion générale

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité de techniques d'aménagement (sous-solage, ensemencement, branchage et leur combinaison) pour la réhabilitation de la brousse tigrée, en s'inspirant de son mode de fonctionnement naturel. Nous avons examiné les effets de ces techniques sur la régénération des zones dégradées, l'amélioration de l'infiltration locale et la réduction du ruissellement et de l'érosion en relation avec la régénération de la végétation.

Les résultats ont démontré que l'application des techniques d'aménagement a un impact sur la réhabilitation des bandes boisées dégradées sans perturber le mode de fonctionnement naturel de la brousse tigrée. Les parcelles aménagées ont été installées sur le revers du plateau et sur le haut glacis. Le sous-solage a été réalisé manuellement.

À l'échelle du bassin versant, le thalimède installé pour mesurer la variation des hauteurs d'eau pendant les écoulements a permis de suivre le comportement hydrologique avant (année témoin) et après aménagement (cf. [chapitre 4](#)). Ainsi, l'aménagement du bassin versant TK-IBM en 2017 par la technique du sous-solage simple (berge droite) et la technique du sous-solage-ensemencement-branchage (berge gauche et une bande boisée dégradée sur le revers du plateau) a permis de réduire les écoulements par rapport à l'année 2016 (sans aménagement). D'après l'analyse de la variation des hauteurs d'eau enregistrées par le thalimède, les résultats obtenus montrent une baisse des hauteurs d'eau (écoulement) au cours de quatre événements pluvieux comparables (cf. [figure 50](#)). Mais au niveau de cette échelle, nos résultats ne nous ont pas permis de mettre en évidence l'effet de chaque technique sur la réduction du ruissellement.

À l'échelle de la parcelle expérimentale de type Wischmeier, les trois années de suivi ont démontré le rôle conséquent de trois techniques étudiées sur la diminution du ruissellement à savoir le sous-solage simple, le branchage simple et le sous-solage-ensemencement-branchage. Ce rôle est assuré par la capacité qu'offrent le sous-solage et le branchage au sol en modifiant ses propriétés hydrauliques (ouverture des pores). Mais cette modification des propriétés hydrauliques est éphémère. En appliquant ces techniques d'aménagement sans accompagnement (reprise de l'aménagement), les résultats sont moins significatifs. La réduction du ruissellement est plus significative dans les parcelles sous-solées une fois par an et reprises chaque année de façon successive. Cela permet au sol d'absorber une grande quantité d'eau, d'où la réduction du

coefficient du ruissellement ( $k_r$ ). Ainsi, sur le revers du plateau, le ruissellement est réduit entre 2016 et 2018 de 2 %, et de 5 % respectivement pour la technique du sous-solage simple et la technique du sous-solage-ensemencement-branchage. En outre, l'érosion du sol a connu une diminution du fait des états de surfaces radicalement changés dans les surfaces aménagées (l'état de surface de végétation occupe 63 % des parcelles). Alors que, dans les surfaces témoins, c'est la croûte d'érosion qui domine (87 %). Ceci confirme notre hypothèse selon laquelle les techniques d'aménagement jouent un rôle conséquent dans la réduction du ruissellement, et par conséquent l'augmentation de l'infiltration.

À l'échelle ponctuelle, les effets de ces trois techniques ont été évalués à travers des suivis événementiels et mensuels de l'humidité du sol dans des tubes d'accès à la sonde à neutrons (cf. [chapitre 5](#)). L'analyse des résultats a démontré que la technique du sous-solage-ensemencement-branchage est la plus efficace pour ce qui est de l'augmentation de l'humidité du sol. En effet, la variation de la teneur en eau volumique reste faible sur les bandes dégradées (témoin) durant toute la durée de la saison pluvieuse (de 15 % en juillet à 30 % en août-septembre). Mais dans les bandes dégradées aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage (bande boisée en dégradation sur le plateau à brousse tigrée et surface nues sur le haut glacis), la teneur en eau volumique a connu une nette augmentation de la surface du sol jusqu'en profondeur (à + de 90 cm), surtout grâce aux opérations de reprise du remaniement du sol (de 18 % en juillet à 41 % en août-septembre). Ces résultats ont permis de vérifier notre hypothèse sur l'amélioration des conditions d'infiltration de l'eau dans le sol profitable au développement de la végétation.

Le suivi régulier de la végétation effectué au début et à la fin de chaque saison pluvieuse a permis de mettre en évidence les effets des techniques du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-E-B), du sous-solage simple (SL) et du branchage sur la croissance du couvert herbacé et ligneux. Les résultats qui ont été obtenus montrent que la technique d'association du sous-solage-ensemencement-branchage est la plus efficace. En effet, les parcelles dans lesquelles la diversité floristique, la densité et les croissances verticale et horizontale sont plus élevées ont été aménagées par le sous-solage-ensemencement-branchage. Sur le revers du plateau, la densité passe de 14,6 à 2,2, de 7,1 à 1 et de 5,7 à 1,8 respectivement dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III de 2016 à 2021. Alors qu'au même moment, la densité est restée presque stable dans les parcelles aménagées par sous-solage, branchage et même dans les parcelles témoins.



Sur cette sous-unité, la croissance de la végétation, sur tous les plans (vertical et horizon), est insignifiante. La végétation existante ou poussée (suite à l'ensemencement) a connu une croissance spectaculaire au point où la hauteur des arbustes dans les parcelles aménagées est comparable à la hauteur des bandes boisées adjacentes. Dans la parcelle SL-E-B III, la hauteur des individus a été multipliée par près de 10 fois, en moyenne, de 27 cm en 2016 à 267 cm en 2020 pour *Guiera senegalensis*. En plus, le taux de couverture végétale dans cette parcelle qui était de 2 % en 2016 passe à plus 77 % en 2020, soit un taux de couverture multiplié par plus de 38 fois en 5 ans. Cette croissance de la végétation en bande reflète la structure de la végétation de la brousse tigrée. Ce qui confirme l'hypothèse sur l'efficacité de l'association de la technique du sous-solage, ensemencement et branchage pour une régénération durable des formations végétales contractées. Il en est de même que les parcelles aménagées sur le haut glacis où on note que la croissance de la végétation a été moins importante.

Par ailleurs, la méthodologie appliquée au cours de cette étude révèle quelques limites. À l'échelle du bassin versant, trois petits sous bassins versants auraient pu être choisis et aménagés uniquement par sous-solage simple, par branchage simple et par association du sous-solage-ensemencement-branchage. Cela aurait permis d'évaluer l'efficacité de chaque technique. À l'échelle de la parcelle, l'utilisation d'un dispositif de cartographie de l'humidité du sol aurait pu nous permettre de spatialiser l'effet des trois techniques expérimentées (sous-solage simple, branchage et association du sous-solage-ensemencement-branchage).

Nonobstant ces limites, cette recherche a permis d'expérimenter quelques théories émises depuis les années 1990 sur les possibilités de réhabilitation de la brousse tigrée en respectant sa structure (Torrekens et al., 1997), c'est-à-dire aménager les bandes boisées dégradées sans toucher les bandes nues qui leur servent d'impluvium. Il s'agissait pour nous d'entamer la récupération de ce qui reste d'abord (bande boisée en dégradation) avant de penser à la récupération de ce qui est perdu (bande nue). Cette thèse a exploré quelques nouvelles orientations sur le plan opérationnel d'aménagement de la brousse tigrée.

En d'autres termes, les résultats obtenus sont concluants : l'application des techniques d'aménagement étudiées peut contribuer efficacement à la réhabilitation de la brousse tigrée en restaurant son fonctionnement naturel et en diminuant l'érosion et le ruissellement. Cependant, une reprise de l'aménagement est nécessaire pour maintenir l'effet à long terme.

En termes de perspectives, il serait important de poursuivre le suivi à long terme de la performance de la technique du sous-solage-ensemencement-branchage (SL-EB) pour évaluer son efficacité à modifier l'état de surface et à favoriser la biodiversité. Pour cela, nous envisageons de combiner cette technique avec celle des banquettes géantes réalisées en aval des bandes boisées en dégradation ou dégradées. Nous prévoyons également de surveiller le cycle phénologique des espèces végétales les plus importantes, notamment *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*. En outre, il serait intéressant de tester la réhabilitation de la composition floristique de la brousse tigrée étant donné que dans les surfaces régénérées, *Guiera senegalensis* reste l'espèce la plus abondante, *Combretum micranthum* est moins représentée.

Enfin, une analyse des aspects socio-économiques de la réhabilitation des écosystèmes dégradés constitue une perspective de recherche à envisager. Il serait question de déterminer le coût de la mise en œuvre de ces techniques d'aménagement et leur impact sur les communautés locales. Il serait également important de déterminer les meilleures pratiques pour assurer la durabilité des projets de réhabilitation. Une analyse de la durabilité de ces techniques et leur contribution à la résilience des écosystèmes dégradés face aux changements climatiques serait particulièrement intéressante.

## Références bibliographiques

- Abdourhamane Touré, A., Guillon, R., Garba, Z., Rajot, J., Petit, C., Bichet, V., Durand, A., & Sebag, D. (2010). Évolution des paysages sahéliens au cours des six dernières décennies dans la région de Niamey : De la disparition de la brousse tigrée à l'encroustement de surface des sols. *Pangea*, 47/48, 36-40.
- Abu-Hamdeh, N. (2003). Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4), 1213-1219. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1213>
- Agence Internationale de l'Énergie Atomique. (2003). *Les sondes à neutrons et à rayons gamma : Leurs applications en agronomie* (Cours de formation N°16/F; p. 76). Section de la gestion des sols et de l'eau et de la nutrition des plantes. <https://docplayer.fr/7376269>
- Albergel, J., Casenave, J., & Valentin, C. (1986). *Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne : Simulation de pluie et cartographie des états de surface*. 75-89.
- Albergel, J., Diatta, M., Grouzis, M., Perer, P., & Sene, M. (1995). Réhabilitation d'un écosystème semi-aride au Sénégal par l'aménagement des éléments de paysage. In *L'aridité : Une contrainte au développement : Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés*. (p. 293-306). Editions de l'ORSTOM.
- Alhassane, A., Salack, S., Ly, M., Lona, I., Traore, S., & Sarr, B. (2013). Evolution of agro-climatic risks related to the recent trends of the rainfall regime over the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Sécheresse*, 24(4), 282-293. <https://doi.org/10.1684/sec.2013.0400>
- Ali, A., & Lebel, T. (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29(12), 1705-1714. <https://doi.org/10.1002/joc.1832>
- Ambouta, J.-M. K. (1984). *Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest Nigérien* [Thèse d'état]. Université de Nancy I. 112 p.
- Ambouta, J.-M. K. (1994). *Étude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin du sahel* [Philosophiae Doctor (Ph.D.)]. Université Laval.
- Ambouta, J.-M. K., & Christian, V. (1996). *Jachères et croûtes d'érosion au Sahel*. 7(4), 269-275.
- Amogu, O., Descroix, L., Souley Yero, K., Le Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., Vischel, T., Bader, J.-C., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Boubkraoui, S., & Belleudy, P. (2010). Increasing River Flows in the Sahel? *Water*, 2(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/w2020170>
- Amogu, O., Esteves, M., Vandervaere, J.-P., Malam Abdou, M., Panthou, G., Rajot, J. Louis., Souley Yero, K., Boubkraoui, S., Lapetite, J. M., Dessay, N., Zina, K., Bachir, A., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Gautier, E., Mamadou, I., & Descroix, L. (2015). Runoff evolution due to land-use change in a small Sahelian catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 78-95. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.885654>
- Anshütz, J., & Codazzi, E. (2004). *Collecter l'eau et la rétention de l'humidité du sol*. Agromisa ; CTA.

- Armand, R. (2009). *Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement*. [Thèse de doctorat en Géographie, Université de Strasbourg]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00461222>
- Atta, S., Achard, F., & Mohamedou, S. (2010). Évolution récente de la population, de l'occupation des sols et de la diversité floristique sur un terroir agricole du Sud-Ouest du Niger. *Sciences & Nature*, 7(2). <https://doi.org/10.4314/scinat.v7i2.59948>
- Balandier, P., Collet, C., Millet, J., Reynolds, P. E., & Zedaker, S. M. (2006). Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 79(1), 3-27. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi056>
- Balme, M., Galle, S., & Lebel, T. (2005). *Démarrage de la saison des pluies au Sahel : Variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger*. 16, 8.
- Bambara, D., Sawadogo, J., Kaboré, O., & Bilgo, A. (2019). Variabilité de certains paramètres climatiques et impacts sur la durée des périodes humides de développement végétal dans une station au centre et une autre au nord du Burkina Faso. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 19 Numéro 1*, Art. Volume 19 Numéro 1. <https://doi.org/10.4000/vertigo.24384>
- Barbé, L. L., & Lebel, T. (1997). Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. *Journal of Hydrology*, 188-189, 43-73. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03154-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03154-X)
- Bied-Charreton, M. (2007). *Sécheresse, désertification et développement en Afrique*.
- Bièdiers, C., Rajot, J., & Michel, K. (2004). L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : Influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. *Sécheresse*, 15.
- Blamah, J. (2004). *Impact des aménagements anti-érosifs sur les productions fourragères et le recyclage des nutriments au Sahel*. 127.
- Boubacar Na-Allah, A., Abdou, M. M., Warzagan, A., Mamadou, I., Maiga, O. F., Moussa, I. B., & Descroix, L. (2017). Efficacité du sous-solage dans la restauration des sols sahéliens dégradés : Étude expérimentale sur le site de Tondi Kiboro, Niger. *Afrique SCIENCE* 13(6) (2017), 189-201.
- Boudet, G. (1972). *Désertification de l'Afrique tropicale sèche*. 20.
- Bouzou Moussa, I. (1988). *L'érosion dans la vallée de Keita (Adar, Niger)*. J-Fourier Grenoble.
- Bouzou Moussa, I. (1997). *Défense et restauration des sols dans L'Adar (Niger) : Méthodes et appropriation par les paysans*. (1-4), 105-120.
- Bouzou Moussa, I., & Dan Lamso, N. (2004). Le « Tassa » : Une technique de conservation des eaux et des sols bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glacis des régions semiarides (Niger). *Revue de géographie alpine*, 92(1), 61-70. <https://doi.org/10.3406/rga.2004.2278>
- Bouzou Moussa, I., Descroix, L., Faran Maiga, O., Gautier, E., Adamou, M. M., Esteves, M., Yéro, K. S., Abdou, M. M., Mamadou, I., Breton, E. L., & Abba, B. (2011). Les changements d'usage des sols et leurs conséquences hydrogéomorphologiques sur un bassin-versant endoréique sahélien.

- Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Ambouta, J.-M. K., Sarr, A. B., Descroix, L., & Adamou, M. M. (2009). Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. *Sécheresse*, 20(1), 145-152. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0163>
- Bouzou Moussa, I., Malam Abdou, M., Ingatan Warzagan, A., Boubacar Na-Allah, A., Bahari Ibrahim, M., Mamadou, I., Luc, D., Eric, L. B., & Vandervaere, J.-P. (2020). Dynamique hydro-érosive actuelle des bassins versants endoréiques de la région de Niamey (Sud-Ouest Du Niger). *European Scientific Journal ESJ*, 16(33). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149>
- Butare, Zoundi, & Diallo A. (2004). *Leçons tirées des expériences de lutte contre la désertification au sahel : Actes des travaux de l'Atelier sous-régional d'échange et de réflexion organisé par le Centre de recherches pour le développement international (CRDI)*. 193.
- Casenave, A. (1991). *Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne : Influence des états de surface*. 13.
- Casenave, A., & Valentin, C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne : Influence sur l'infiltration*. 231.
- Casenave, A., & Valentin, C. (1994). *Les états de surface : Une des clefs de l'hydrologie sahélienne*. 6.
- Christophe, P., Laurent, B., & Sylvie, L. (2007). Le monde rural et les mutations agricoles en Afrique de l'Ouest. In *Atlas de l'Intégration Régionale en Afrique de l'Ouest* (p. 20). Dieudonné Ouedraogo.
- Conseil National de Développement du Niger. (1984). *Débat national sur la lutte contre la désertification, Maradi, du 21 au 28 mai 1984* (Conseil national de développement, 1984). Conseil national de développement.
- Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable (CNEDD-Niger). (2000). *Programme d'action national de lutte contre la désertification et de gestion de ressources naturelles (PAN-LCD/GRN)* (p. 83). Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable.
- Courault, D., D'Herbes, J.-M., & Valentin, C. (1990). *Le bassin versant de Sama Dey : Premières observations pédologiques et phytoécologiques* (p. 46). [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/doc34-06/38513](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/doc34-06/38513)
- Courtin, F., & Guengant, J.-P. (2011). Un siècle de peuplement en Afrique de l'Ouest. *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 19(3), 256-265. <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-socie>
- DAGET, P., P, D., & J, P. (1974). *Quelques résultats sur les méthodes d'étude phytoécologiques, la structure, la dynamique et la typologie des prairies permanentes*.
- Dai, A., Trenberth, K. E., & Qian, T. (2004). A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002 : Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117-1130. <https://doi.org/10.1175/JHM-386.1>

- Daouze, J.-P., & Roger-Estrade, J. (2017, novembre 17). Gestion du sol et machinisme Décider d'une stratégie, choisir les outils. *Des PAGES et des SILLONS*. <https://despagesetdessillons.com/2017/11/17/>
- Dardel, C. (2014). *Entre désertification et reverdissement du Sahel : Diagnostic des observations spatiales et in situ*. 200.
- Delalande, M., Gavaland, A., Mistou, M. N., Burger, P., Meunier, F., Marandel, R., Miglionico, G., Fargier, S., & Doussan, C. (2017). Mesure de l'eau du sol : Questions, méthodes et outils. Exemples d'application sur deux plateformes champs du réseau « PHENOME ». *Le Cahier des Tech. INRA*, 2017, 1-32.
- De Rosnay, P., & Baup, F. (2004). *Mesures d'humidité du sol au Gourma*. 16.
- Desconnets, J.-C. (1994). *Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger—Degré carré de Niamey)* [Thèse de doctorat]. Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G., & Diedhiou, A. (2013). Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel). *Climatologie, Volume 10*. <https://doi.org/10.4267/climatologie.78>
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., & Quantin, G. (2016). Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : La Sénégambie et le Bassin du Niger Moyen. *Climatologie, Volume 12*. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1105>
- Descroix, L., Esteves, M., Souley Yéro, K., Rajot, J.-L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., Lapetite, J. M., Dessay, N., Zin, I., Amogu, O., Bachir, A., Bouzou Moussa, I., Le Breton, E., & Mamadou, I. (2011). Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8(1), 1569-1607. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-1569-2011>
- Descroix, L., Genthon, P., Peugeot, C., Mahé, G., Abdou, M. M., Mamadou, I., Tanimoun, B., Amadou, I., Galle, S., Vischel, T., Quantin, G., Dacosta, H., Bodian, A., Nazoumou, Y., & Zannou, A. (2015). Paradoxes et contrastes en Afrique de l'Ouest : Impacts climatiques et anthropiques sur les écoulements. *Géologues*, 187, 47-52. Centre IRD de Bondy. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010069525>
- Descroix, L., Mamadou, I., Malam Abdou, M., Bachir, A., Bouzou Moussa, I., Le Breton, E., & Souley Yero, K. (2012). État des lieux et proposition de restauration des sols sur le Bassin versant de Tondi Kiboro (Niger). In É. Roose, H. Duhaufour, & G. De Noni (Éds.), *Lutte antiérosive*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12983>
- Deutsche-GIZ. (2015). *25 ans de réhabilitation et de conservation des sols au Sahel. Soutien aux efforts des populations rurales du Niger*. 40.
- D'Herbes, J. d', Ambouta, J.-M. K., & Peltier, R. (1997). *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext.



- D'Herbès, J.-M., Ambouta, J. M. K., & Peltier, R. (1997). *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens* (IRD Bondy). J. Libbey Eurotext. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010013986>
- Dia, A., Duponnois, R., & Institut de recherche pour le développement (France) (Éds.). (2010). *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : Concepts et mise en œuvre*. IRD, Institut de recherche pour le développement.
- Djogbenou, C. P., Kakaï, R. G., Arouna, O., & Sinsin, B. (2011). Analyse des perceptions locales des aménagements forestiers participatifs au Bénin. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 11 Numéro 1*, Art. Volume 11 Numéro 1. <https://doi.org/10.4000/vertigo.10893>
- Dubois, D., & Lang, J. (1981). Etude lithostratigraphique et géomorphologique du continental terminal et du Cénozoïque inférieur dans le bassin des Iullemeden (Niger). <https://www.semanticscholar.org/paper/>
- Faran Maïga, O. (2000). *La dynamique actuelle dans le Zarmaganda : Recherche géomorphologique dans l'Ouest du Niger*. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., & Leduc, C. (2009). Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger : A review. *Water Resources Research*, 45(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006785>
- Fensholt, R. (2013). *Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships*. 23.
- Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., Reenberg, A., Prince, S. D., Tucker, C., Scholes, R. J., Le, Q., Bondeau, A., Eastman, R., Epstein, H., Gaughan, A. E., Hellden, U., Mbow, C., Olsson, L., Paruelo, J., Schweitzer, C., Seaquist, J., & Wessels, K. (2012). Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007—An Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 15.
- Flaounas, E. (2010). *Analyse du mécanisme de la mise en place de la mousson Africaine : Dynamique régionale ou forçage de grande échelle ?* [Phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00735618>
- Flore, V.-C. (2008). *Mécanisme de régénération des espèces végétales dans les prairies subalpines sur un gradient d'extensification des pratiques agricoles* [Thèse de doctorat en Évolution, Écologie, Ressources Génétiques, Paléontologie, Université Montpellier II]. <https://www.jardinalpindulautaret.fr/sites/sajf/files/>
- Fontaine, B., Roucou, P., Camara, M., Vigaud, N., Konaré, A., Sanda, S. I., Diedhiou, A., & Janicot, S. (2012). Variabilité pluviométrique, changement climatique et régionalisation en région de mousson africaine. *La Météorologie*, 8(Special-AMMA), 41. <https://doi.org/10.4267/2042/48131>
- Food and Agriculture Organization of the United States. (2016). *Food and Agriculture : Key to Achieving the 2030 Agenda for Sustainable Development* (p. 32).



- Fournier, F. (1954). *La parcelle expérimentale. Méthode d'étude de la conservation du sol, de l'érosion, du ruissellement.* (p. 84). [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers10-04/10762](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-04/10762)
- Froidurot, S., & Diedhiou, A. (2017). Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system : Characteristics of wet and dry spells in West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 18(3), 125-131. <https://doi.org/10.1002/asl.734>
- Frontier, S. (1983). *Stratégies d'échantillonnage en écologie.* New York : Masson ; Presses de l'Univ. Laval.
- Galle, S. (1991). *Premier rapport de campagne 1991 : Fonctionnement hydrodynamique du bassin versant de Sama Dey.* 26.
- Galle, S., Ehrmann, M., & Peugeot, C. (1999). Water balance in a banded vegetation pattern : A case study of tiger bush in western Niger. *CATENA*, 37(1-2), 197-216. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)90060-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)90060-1)
- Galle, S., Seghieri, J., & Mounkaila, H. (1997). Fonctionnement hydrologique et biologique à l'échelle locale. Cas d'une brousse tigrée au Niger. In *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens.* (p. 105-118). John Libbey Eurotext, Paris.
- Ganaba, S. (2005). *Impact des aménagements de conservation des eaux et des sols sur la régénération des ressources ligneuses en région sahélienne et nord soudanienne du Burkina Faso.* 6(2), 15.
- Gasser, M.-O. (2012). *Effets bénéfiques combinés du sous-solage et des cultures à racines profondes pour décompacter le sol et améliorer la productivité des cultures.* (N° 6309 ; p. 60). <https://irda.blob.core.windows.net/media/2144/>
- Gaudefrois-Demonbynes, PH., & Charreau, C. (1961). *Possibilité de conservation de l'humidité dans les sols pendant la saison sèche : Influence corrélative sur le degré d'ameublissement du sol.* 17.
- Gavaud, M. (1965). *Étude pédologique du Niger Occidental.* (p. 520) [Rapport général]. IRD. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers15-12/05577](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-12/05577)
- Giannini, A., Biasutti, M., & Verstraete, M. (2008). A climate model-based review of drought in the Sahel : Desertification, the re-greening and climate change. *Global and Planetary Change*, 64, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.05.004>
- GIZ. (2012). *Bonnes pratiques de conservation des eaux et des sols. Contribution à l'adaptation au changement climatique et à la résilience des productions au Sahel.*
- Gonzalez, P., Tucker, C. J., & Sy, H. (2012). Tree density and species decline in the African Sahel attributable to climate. *Journal of Arid Environments*, 78, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.001>
- Greigert, J., (1966). *Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden : Afrique occidentale.* Bureau de recherches géologiques et minières.
- Grouzis, M. (1992). *Germination et établissement des plantes annuelles sahéliennes.* 16.

- Guengant, J.-P. (2011). *Comment bénéficier du dividende démographique ? : La démographie au centre des trajectoires de développement dans les pays de l'UMEOA ainsi qu'en Guinée, au Ghana, en Mauritanie et au Nigéria : synthèse régionale* (Centre IRD de Bondy). AFD. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010052581>
- Halidou, S. T., Alhassane, A., & Lona, I. (2021). *Analyse de l'évolution spatio-temporelle des dérivés pluviométriques caractérisant la saison agricole au Sahel—Central*. 20.
- Hewlett, J. D. (1961, janvier 1). *L'HUMIDITÉ DU SOL COMME SOURCE DE FLUX DE BASE DES BASSINS VERSANTS DES MONTAGNES STEEP*. 13.
- Hien, F. G. (1995). *La régénération de l'espace sylvo-pastoral au Sahel : Une étude de l'effet de mesures de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso*. 248.
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Hourdin, F., Musat, I., Guichard, F. se, Ruti, P. M., Favot, F., Filiberti, M.-A., Pham, M., Grandpeix, J.-Y., Polcher, J., Marquet, P., Boone, A., Lafore, J.-P., Redelsperger, J.-L., Dell'aquila, A., Doval, T. L., Traore, A. K., & Gallée, H. (2010). AMMA-Model Intercomparison Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(1), 95-104. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2791.1>
- Ichaou, A. (2004). *Aménagement Participatif et Gestion Décentralisée des Forêts Naturelles pour la production de bois-énergie* : (p. 53).
- Ichaou, A. (2004). *Gestion des espaces nus dans les systèmes forestiers de plateaux, de bas-fonds et de plaines sableuses : Ce qu'il faut faire et ce qu'il ne faut surtout pas faire !* (p. 26).
- (1905) II. Règles internationales pour la Nomenclature botanique, principalement des plantes vasculaires. (2014). *Bulletin de la Société Botanique de France*, 52(sup5), XXV-XLVI. <https://doi.org/10.1080/00378941.1905.10835927>
- Ingatan Warzagan, A. (2020). *Évaluation de l'efficacité d'ouvrages antiérosifs sur la rétention d'eau et l'hydrologie des bassins versants du Sud-Ouest du Niger : Cas des banquettes et du sous-solage* [Thèse de doctorat]. Université Abdou Moumouni de Niamey.
- Ingatan Warzagan, A., Bouzou Moussa, M., Vandervaere, J.-P., Malam Abdou, M., & Faran Maiga, O. (2019). Reducing runoff by increasing landscaped areas. *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, 3(1), 36-46.
- Blondel, J. (1996). Biogéographie. Approche écologique et évolutive. *Revue de Géographie Alpine*, 84(2), 113-113. [https://www.persee.fr/doc/rga\\_0035-1121\\_1996\\_num\\_84\\_2\\_3864](https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_1996_num_84_2_3864)
- Jacques, G., & Hily, C. (2003). *Traitement des données stationnelles (Faune)*.
- Janicot, S., Redelsperger, J.-L., & Lebel, T. (2012). La mousson ouest-africaine : Introduction à quelques contributions du programme d'étude multidisciplinaire AMMA. *La Météorologie*, 8(Special-AMMA), 2. <https://doi.org/10.4267/2042/48125>
- Justine, A., Antoinette, K., Marc, N., Rob de Neef, de N., & Ton van, de V. (2004). *Collecte l'eau et conserver l'humidité du sol*. 106.

- Kaiser, D., Lepage, M., Konaté, S., & Linsenmair, K. E. (2017). Ecosystem services of termites (Blattoidea : Termitoidae) in the traditional soil restoration and cropping system Zaï in northern Burkina Faso (West Africa). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 198-211. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.023>
- Kumar, K., & Goh, K. M. (1999). Crop Residues and Management Practices : Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield, and Nitrogen Recovery. In *Advances in Agronomy* (Vol. 68, p. 197-319). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60846-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60846-9)
- Labreuche, J. (2008). *Les techniques cult concernent un tiers*. 6.
- Labreuche, J., Souder, C. L., P Castillon, JF Ouvry, B Real, JC Germon, S De Tourdonnet, C Schubetzer, I Feix, & J Galienne. (2007). *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France*. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.34727.65444>
- Lamachère, J.-M., & Serpantié, G. (1991). *Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi*. 165-178.
- Laouali Idi, K., Sani, A., & Konaté, M. (2021). Analyse Du Remplissage Sédimentaire De La Partie Centrale Du Bassin Des Iullemmeden (Niger Central) Pendant La Période Allant Du Crétacé Supérieur Au Paléocène-Yprésien Et Transgressions Associées. *European Scientific Journal ESJ*, 17(29). <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n29p1>
- Larwanou, Abdoulaye, & Reij. (2006). *Etude de la Regeneration Naturelle Assistee dans la Region de Zinder (Niger)*. 56.
- Larwanou, M., & Saadou, M. (2012). *Impacts des activités de restauration des terres sur la végétation au Niger*. 1(7), 15.
- Le Floc'h, É., & Aronson, J. (1995). Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base. *Natures Sciences Sociétés*, 3, s29-s35. <https://doi.org/10.1051/nss/199503s029>
- Lebel, T., Janicot, S., Aubertin, C., Bernoux, M., Dounias, E., Guégan, J.-F., Mazurek, H., Sultan, B., & Reinert, M. (Éds.). (2019). Chapitre 10. Zones semi-arides : Le Sahel sensible aux variations de pluies. In *Changement climatique : Quels défis pour le Sud ?* (p. 115-127). IRD Éditions. <http://books.openedition.org/irdeditions/29436>
- Lebel, T., Panthou, G., & Théo, V. (2018, novembre 12). *Au Sahel, le climat durablement perturbé depuis la « grande sécheresse »*. 4. <https://www.lemonde.fr/afrique/article/2018/11/12/au-sahel-le-climat-durablement-perturbe->
- Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., & Cappelaere, B. (2007). Land clearance and hydrological change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61(3-4), 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011>
- Leduc, C., & Karbo, A. (1996). Variabilité spatio-temporelle de l'impact de l'infiltration sur la nappe phréatique du Continental terminal (Hapex-Sahel, Niger). In M. Hoepffner, T. Lebel, & B. Monteny (Éds.), *Interactions surface continentale/atmosphère : L'expérience HAPEX-Sahel* (Centre IRD de Bondy; p. 449-462). ORSTOM. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010008369>

- Leduc, C., & Lenoir, F. (1995). *Etude de la recharge de la nappe du continental terminal 3 en rive gauche du Niger*. 45.
- Leduc, C., & Loireau, M. (1997). *Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahélienne (sud-ouest du Niger)*. 8.
- Leduc, C., Taupin, J.-D., & Le Gal La Salle, C. (1996). Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences.Série 2a: Sciences de la Terre*, 323, 599-605. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010007686>
- Léonard, J., & Rajot, J. L. (1998). Effets induits du paillage post-cultural d'un sol sableux encroûté au Sahel. Conséquences sur l'amélioration de son fonctionnement hydrique. *Agriculture et Développement*. <http://agritrop.cirad.fr/400924/>
- Loireau, M. (1998). *Espaces, ressources, usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien* [Thèse de doctorat, Montpellier III-Paul Valéry]. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.8658>
- Loireau, M., Mongi, S., Mondher, F., Mohamed, A., Jean Mark, d'Herbès, Jean Christophe, D., Didier, L., Stéphane, D., & Eric, D. (2007). *Système d'information sur l'environnement à l'échelle locale (Siel) pour évaluer le risque de désertification : Situations comparées circumsahariennes (réseau Roselt)*.
- LONA, I., SOULEY YERO, K., GARBA, I., & HAUSWIRTH, D. (2019). *Evaluation désagrégée de l'impact des changements climatiques au Niger sur les risques de dégradation des terres, les rendements agricoles et la production de biomasse herbacée* (p. 94).
- Lona, I., Souley Yero, K., Garba, I., & HAUSWIRTH, D. (2020). *Stratégie et Plan National d'Adaptation face aux changements climatiques dans le secteur Agricole : SPN2A 2020-2035* (p. 85). [https://spn2a.org/wpcontent/uploads/2020/05/AdaptAction\\_Niger\\_SPN2A](https://spn2a.org/wpcontent/uploads/2020/05/AdaptAction_Niger_SPN2A)
- Mahamadou, B. I., Bouzou Moussa, I., & Faran Maiga, O. (2018). Évolution des caractéristiques pluviométriques et recrudescence des inondations dans les localités riveraines du fleuve Niger. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 14. <https://doi.org/10.4000/vertigo.19891>
- Mahe, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J.-E., Girard, S., Servat, E., & Dezetter, A. (2003). *Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau*. 8.
- Mahe, G., Olivry, J. C., & Servat, E. (2005). *Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : Extrêmes et paradoxes*. 9.
- Malagnoux, M. (2004). *Restauration des terres arides dégradées pour la production agricole, forestière et pastorale grâce à une nouvelle technique mécanisée de récolte des eaux pluviales*. 12.
- Malam Abdou, M. (2014). *États de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire* [PhD Thésis]. Grenoble.
- Malam Abdou, M. (2016). Production du ruissellement sur un sol sableux cultivé après sarclage au Sahel. *Étude et Gestion des Sols*, volume 23, 101-112.

- Malam Abdou, M., Vandervaere, J., Bouzou-Moussa, I., Descroix, L., Mamadou, I., & Faran-Maiga, O. (2016). Genèse des écoulements sur deux petits bassins versants cristallins de l'Ouest du Niger : Approche multi-échelles du fonctionnement hydrodynamique. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 22, 363-375. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11537>
- Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Descroix, L., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Abdou, S., Bodo Seyni, B., & Daouda, L. O. (2015). Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé du Niger. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 11.
- Mamadou, I., Gautier, E., Descroix, L., Noma, I., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Genthon, P., Amogu, O., Malam Abdou, M., & Vandervaere, J.-P. (2015). Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *CATENA*, 131, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.017>
- Mando, A. (1997). Effect of termites and mulch on the physical rehabilitation of structurally crusted soils in the Sahel. *Land Degradation & Development*, 8(3), 269-278. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199709\)8:3<269::AID-LDR260>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199709)8:3<269::AID-LDR260>3.0.CO;2-8)
- Marega, O., Emeterio, J.-L. S., Fall, A., & Andrieu, J. (2021). Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : Approche multiscalaire. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, Volume 16, Art. Volume 16. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977>
- Massuel, S. (2005). *Évolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger*. [Thèse de doctorat en Météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement]. Université Montpellier II.
- M'Hiri, A., Ben Saïd, M., Bachta, M. S., & Kaabia, M. (1995). *Pour une approche holistique de la restauration des terres soumises à l'érosion hydrique dans le Nord-Ouest de la Tunisie* (p. 307-323).
- Moussa, B. M. C., Mohamadou, T. bio, Halima, O. diadie, & Abdourahamane, B. (2022). Risques climatiques et sécurité alimentaire et nutritionnelle au Niger : Cartographie des impacts et des besoins de résilience. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 22 numéro 1, Art. Volume 22 numéro 1. <https://doi.org/10.4000/vertigo.35040>
- Moustapha, D. A. M. (2010). *Rapport sur les techniques de captage de l'eau des pluies au Niger* (p. 29).
- Nahal, I. (2004). *La désertification dans le monde : Causes—Processus—Conséquences—Lutte* (L'Harmattan). <https://www.decitre.fr/livres/la-desertification-dans-le-monde9782747563673.html>
- Niang, K., Ndiaye, O., Diallo, A., & Guisse, A. (2014). Flore et structure de la végétation ligneuse le long de la Grande Muraille Verte au Ferlo, nord Sénégal. *Journal of Applied Biosciences*, 79, 6938. <https://doi.org/10.4314/jab.v79i0.15>
- Nicholson, S. (2000). Land surface processes and Sahel climate. *Reviews of Geophysics*, 38(1), 117-139. <https://doi.org/10.1029/1999RG900014>



- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel : A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability. *ISRN Meteorology*, 2013, 1-32. <https://doi.org/10.1155/2013/453521>
- Olsson, L., Eklundh, L., & Ardö, J. (2005). A recent greening of the Sahel—Trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 556-566. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.008>
- ONU. (2019). *Perspectives démographiques en Afrique de l'Ouest* (p. 3).
- Ousseini, I. (2002). *Érosion et conservation des sols dans la vallée du Moyen Niger (République du Niger) : Interprétations préliminaires de mesures en parcelles et d'observations à l'échelle des petits et moyens bassins versants*. 33.
- Ozer, P. (2010). *Désertification au sahel : historique et perspectives*. 16.
- Ozer, P., Hountondji, Y., Niang, A. J., Karimoune, S., Laminou Manzo, O., & Salmon, M. (2010). Désertification au Sahel : Historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 54. <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/10347>
- Ozer, P., Ousmane, L. M., Didier, T. A., Bakary, D., & Florence, D. L. (2016). *Évolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014)*. 5.
- Panthou, G. (2013). Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leurs évolution au cours des 60 dernières années. *undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Analyse-des-extr%C3%>
- PASP. (2003). *Référenciel des Mesures techniques de récupération, de protection et d'exploitation durable des terres*. (N° 2; p. 51). Ministère du Développement Agricole.
- Paul, O., & Michel, L. (1997). *Rôle des termitières dans la dynamique d'un écosystème de brousse tigrée* *Role of termite mounds in the dynamics of a tiger-bush*.
- Peugeot, C. (1995). *Influence de l'encroustement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger) : Expérimentations in-situ et modélisation* (Centre IRD de Bondy; p. 356 p. multigr.) [Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I]. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010004876>
- Peyre de Fabrègues, B. A. (1977). *Lexique de noms vernaculaires de plantes du Niger*. Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux. Maisons-Alfort, [France].
- Pielou, E. C. (1993). *Measuring biodiversity: Quantitative measures of quality*. <http://www.vliz.be/nl/imis?refid=9751>
- Pielou, E. C. (2015). Shannon's Formula as a Measure of Specific Diversity : Its Use and Misuse. *The American Naturalist*. <https://doi.org/10.1086/282439>
- Pirot, R., Perret, S., & Manichon, H. (1997). *Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux : Actes du colloque du 11-12 septembre 1996, Montpellier, France*. Éditions Quae.
- Rajot, J.-L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., & Thiebaut, J.-P. (2009). Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : Cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Sécheresse*, 20(1), 131-138. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0171>

- Raper, R. L., & Bergtold, J. (2007). In-Row Subsoiling : A Review and Suggestions for Reducing Cost of this Conservation Tillage Operation. *Applied Engineering in Agriculture*, 23. <https://doi.org/10.13031/2013.23485>
- Razafindrabe, A. (2015). Politiques forestières et « bonne gestion » des ressources : Le cas de Madagascar. *Éthique publique. Revue internationale d'éthique sociétale et gouvernementale*, vol. 17, n° 2, Art. 17, n° 2. <https://doi.org/10.4000/ethiquepublique.2324>
- Redelsperger, J.-L., Diedhiou, A., Flamant, C., Janicot, S., Lafore, J.-P., Lebel, T., Polcher, J., Caniaux, G., Rosnay, P. de., Desbois, M., Eymard, L., Fontaine, B., Geneau, I., Ginoux, K., Hoepffner, M., Kane, C., Law, K., Mari, C., Marticorena, B., ... Van Den Akker, E. (2006). Amma, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *La Météorologie*, 8(54), 22. <https://doi.org/10.4267/2042/20098>
- Reij, C. (1996). *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. KARTHALA Éditions.
- Reijntjes, C., & Waters-Bayer, A. (1995). *Une agriculture pour demain : Introduction à une agriculture durable avec peu d'intrants externes*. KARTHALA Éditions.
- Renard, C., Boudouresque, E., Schmelzer, G., & Bationo, A. (1993). *Évolution de la végétation dans une zone protégée du Sahel (Sadoré, Niger)*. 9.
- Richard, J. F. (Éd.). (1990). *La dégradation des paysages en Afrique de l'ouest*. Presses Universitaires de Dakar.
- Rodríguez-Iturbe, I. (2003). Hydrologic dynamics and ecosystem structure. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 47(6), 18-24.
- Roose, E. (1985). *Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux*. 14.
- Roose, E. (2002). *Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES pour la zone méditerranéenne semi-aride de Tunisie*.
- Roose, E. (2015). *Potentiel du paillage pour réduire l'érosion et restaurer la productivité des sols tropicaux : Une revue en Afrique francophone*. 10.
- Roose, E., Albergel, J., George, D. N., Abdellah, L., & Mohamed, S. (2008). *Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides : Actes de la session VII : au sein de la conférence ISCO de Marrakech, Maroc, du 14 au 19 mai 2006*. Agence universitaire de la francophonie ; Institut de recherche pour le développement ; Éd. des Archives contemporaines.
- Roose, E., & De Noni, G. (1998). *Apport de la recherche à la lutte antiérosive : Bilan mitigé et nouvelle approche*. 14.
- Roose, É., Duchaufour, H., & Noni, G. de. (2012). *Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. IRD éd.
- Roose, E., Sabir, M., & Laouina, A. (2010). *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. IRD.
- Saadou, M. (1990). *La végétation des milieux drainés nigériens à l'Est du fleuve Niger* [Thèse de Docteur –ès Sciences Naturelles].



- Samandougou, Y., Kabore-Zoungana, C., Zoundi, S. J., & Sohero, A. (2010). *Contribution de la récupération des parcours dégradés par les cordons pierreux associés sous solage à l'amélioration de la production du fourrage naturel*. 15.
- Schlaepfer, R., Iorgulescu, I., & Glenz, C. (2002). Management of forested landscapes in mountain areas: An ecosystem-based approach. *Forest Policy and Economics*, 4(2), 89-99. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(02\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(02)00009-6)
- Seghieri, J. (1996). *Rythmes saisonniers d'une savane soudano-sahélienne en relation avec l'hydrodynamique du sol*. 12.
- Seghieri, J., & Galle, S. (1999). Run-on contribution to a Sahelian two-phase mosaic system: Soil water regime and vegetation life cycles. *Acta Oecologica*, 20(3), 209-217. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(99\)80033-2](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(99)80033-2)
- Seghieri, J., Galle, S., & Rajot, J.-L. (1994). *La brousse tigrée dans le Sahel nigérien: Étude de la cofluctuation du stock hydrique et de la végétation annuelle*. 19.
- Seghieri, J., Galle, S., & Rajot, J.-L. (1996). La brousse tigrée dans le Sahel nigérien: Étude de la cofluctuation du stock hydrique et de la végétation annuelle. In M. Hoepffner, T. Lebel, & B. Monteny (Éds.), *Interactions surface continentale/atmosphère: L'expérience HAPEX-Sahel* (IRD Bondy; p. 123-141). ORSTOM. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010008349>
- Seguis, L., Cappelaere, B., Peugeot, C., Leduc, C., & Milesi, G. (2003). *Influences de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin sahélien*. 6.
- Shannon, C., & Weaver, W. (s. d.). *The Mathematical Theory of Communication*. 131.
- Sherratt, J. A. (2015). Using wavelength and slope to infer the historical origin of semiarid vegetation bands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4202-4207. <https://doi.org/10.1073/pnas.1420171112>
- Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Mamadou, I., Vandervaere, J.-P., Bachir, T., Coulibaly, B., Rajot, J.-L., Malam Issa, O., Malam Abdou, M., Dessay, N., Delaitre, E., Maiga, O. F., Diedhiou, A., Panthou, G., Vischel, T., ... Hiernaux, P. (2013). The Niger River Niamey flood of 2012: The paroxysm of the Sahelian paradox? *Sécheresse*, 24(1), 3-13. <https://doi.org/10.1684/sec.2013.0370>
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of Diversity. *Nature*, 163(4148), Art. 4148. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Souley Yero, K. (2012). *Evolution de l'occupation des sols dans l'ouest du Niger: Influence sur la cycle de l'eau* [Phdthesis, Université de Grenoble]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00864052>
- Soumana, D., Soumana, I., Mahamane, A., Mahamane, S., Ambouta, J.-M. K., & Aboubacar, I. (2011). *Restauration de plages nues d'une brousse tachetée au Niger*. 16.
- Stern, R., Dennett, M., & Garbutt, D. (1981). *The start of the rains in West Africa*. <https://doi.org/10.1002/JOC.3370010107>
- Taylor, C. M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D. J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P. P., Janicot, S., Klein, C., & Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544(7651), 475-478. <https://doi.org/10.1038/nature22069>

- Thierry, Gérémy, P., & Théo, V. (s. d.). *Au Sahel, le climat durablement perturbé depuis la « grande sécheresse »*. Consulté 11 septembre 2020, à l'adresse [https://www.lemonde.fr/afrique/article/2018/11/12/au-sahel-le-climat-durablement-perturbe-depuis-la-grande-secheresse\\_5382513\\_3212.html](https://www.lemonde.fr/afrique/article/2018/11/12/au-sahel-le-climat-durablement-perturbe-depuis-la-grande-secheresse_5382513_3212.html)
- Torrekens, P., Brouwer, J., & Hiernaux, P. (1997). Evolution de la végétation spontanée sur plateaux latériques traités par des travaux anti-érosifs dans le département de Dosso (Niger). In *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. (p. 235-246). John Libbey Eurotext.
- Toutain, B. (1977). Essais de régénération mécanique de quelques parcours sahéliens dégradés. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 30(2), 191. <https://doi.org/10.19182/remvt.8097>
- Turland, N. J., Wiersema, J. H., Barrie, F. R., Greuter, W., Hawksworth, D. L., Herendeen, P. S., Knapp, S., Kusber, W.-H., Li, D.-Z., Marhold, K., May, T. W., McNeill, J., Munro, A. M., Prado, J., Price, M. J., Smith, G., & International Association for Plant Taxonomy (Éds.). (2018). *International code of nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) : Adopted by the nineteenth International Botanical Congress, Shenzhen, China, July, 2017*. Koeltz Botanical Books.
- Valentin, C. (1994). *Sécheresse et érosion au Sahel*. 5(3), 8.
- Vandervaere, J.-P. (1995). *Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques : Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroutés* [Thèse, hydrologie, Université Joseph-Fourier - Grenoble I]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00694150>
- Verdeaux, F. (1999). *La forêt-monde en question : Recomposition du rapport des sociétés à la forêt dans les pays du Sud*. Aube.
- Vischel, T., Lebel, T., Panthou, G., Quantin, G., Rossi, A., & Martinet, M. (2015). Chapitre 2. Le retour d'une période humide au Sahel ? In B. Sultan, R. Lalou, M. Amadou Sanni, A. Oumarou, & M. A. Soumaré (Éds.), *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (p. 43-60). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.8937>
- Vlaar, J. C. J. (1992). *Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du sahel. Rapport d'une étude effectuée dans le cadre de la collaboration entre le Comité Interafricain d'Études Hydrauliques (CIEH), Ouagadougou Burkina Faso, et l'Université Agronomique Wageningen (UAW), Wageningen, les Pays-Bas*.
- Weill, A., Bougon-Ronin, J., Bournival, P., Cayer, E., Godwin, D., & Spoor, G. (2015). *Comprendre et réussir le sous-solage*. 44.
- Yamba, B. (1993). *Ressources ligneuses et problèmes d'aménagement forestier dans la zone agricole du Niger* [Thèse de doctorat, Bordeaux 3]. <http://www.theses.fr/1993BOR30029>
- Yameogo, J. (2006). *Étude d'impact des aménagements antiérosifs sur la régénération ligneuse sur le massif forestier de Bougou, province du Namentanga*.

- Youssef, A. A. (2007). *Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes : Analyse, fonctionnement et essai de modélisation en milieu méditerranéen (El-Gouazine, Tunisie Centrale)*. 178.
- Zoure, C. O. (2019). *Étude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina Faso* [institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement]. <https://www.researchgate.net/publication/338820044>
- Zouré, C. O., Koïta, M., Niang, D., Baba, I. I., Roland, O., Dara, A. E., Fowé, T., & Queloz, P. (2017). *Relationship between soil water content and crop yield under sahelian climate conditions : Case study of Tougou experimental site in Burkina Faso*. 13(10), 8.
- Zürcher-Gasser, N., Kühne, K., Thormann, J.-J., Küffer, C., Schwitter, R., & Zürcher, S. (2016). *5.4 Échange de connaissances et controlling : Les facteurs clés d'une gestion forestière adaptative*. 12.

## Liste des tableaux

Tableau 1. Les quelques premiers sites aménagés dans la commune de Dantiandou.....	16
Tableau 2. Les caractéristiques de 8 parcelles délimitées sur les bandes dégradées du revers de plateau latéritique. ....	44
Tableau 3. Les caractéristiques des surfaces délimitées sur le piémont encroûté du haut glacis...45	
Tableau 4. Poids moyen de 100 graines de <i>Gierra senegalensis</i> et <i>Combretum micranthum</i> .....	51
Tableau 5. Les différentes parcelles de sous-solage simple et les dates de reprise de l'aménagement (remaniement).....	54
Tableau 6. Les différentes parcelles expérimentales SL-E-B et les dates de leur réaménagement. ....	55
Tableau 7. La présentation des parcelles de ruissellement par technique d'aménagement. Chaque parcelle du ruissellement fait partie intégrante d'une surface suivie (aménagée ou témoin).....	62
Tableau 8. La présentation des tubes d'accès par technique d'aménagement. Chaque tube est représenté dans la surface délimitée, suivie (aménagée ou témoin). ....	79
Tableau 9. Les droites d'étalonnage utilisées pour transformer les comptages réduits (CR) en humidité volumique ( $\theta$ ). ....	82
Tableau 10. Critères d'analyse de l'évolution de la végétation dans les parcelles suivies. ....	92
Tableau 11. Quelques caractéristiques de la pluviométrie durant la période d'observation (2016-2020) sur le site d'étude. ....	97
Tableau 12. Le nombre total de mesures de ruissellement effectuées et utilisées à l'échelle des parcelles élémentaires. ....	103
Tableau 13. Le résultat du test de Wilcoxon appliqué aux lames ruisselées par parcelle avec des traits communs, ici aménagement et sans aménagement (témoins) durant les années 2016, 2017 et 2018. ....	108
Tableau 14. Le spectre de familles des espèces herbacées recensées sur les parcelles étudiées..	164
Tableau 15. Le spectre de familles des espèces ligneuses recensées sur les parcelles étudiées. .	165
Tableau 16. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées (%) dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau en 2016. ....	167
Tableau 17. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées en pourcentage (%) dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau en 2017. ....	167
Tableau 18. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées en pourcentage (%) dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau en 2018. ....	169
Tableau 19. La fréquence et degré de présence des espèces herbacées (en %) dans les parcelles du haut glacis en 2017. ....	171
Tableau 20. La fréquence et le degré de présence des espèces herbacées (en %) dans les parcelles du haut glacis en 2018. ....	172

Tableau 21. L'indice de diversité dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau.....	173
Tableau 22. L'indice de diversité obtenu dans les parcelles étudiées du haut glacis.....	177
Tableau 23. La répartition de jour de pluie avant et depuis la date de l'ensemencement en 2016. .....	192

## **Liste des figures**

Figure 1. Le dessin technique de la technologie de la demi-lune. Source (RECA, 2014). .....	13
Figure 2. Le dessin technique de la technologie de la banquette. Source : (Fiche technique du RECA, 2016). .....	15
Figure 3. Le dessin technique de la disposition des ouvrages réalisés sur les plateaux latéritiques à brousse tigrée. Source : Soumaya et al. (2011). Les bandes aménagées représentent les bandes à revégétaliser alors que les bandes nues représentent les impluviums. ....	15
Figure 4. Les formations géologiques du Niger (d'après Greigert & Pougnet, 1967), modifié par Ingatan Warzagan (2020). .....	27
Figure 5. Les unités géomorphologiques du bassin sédimentaire dans le secteur du site d'étude (Tondi Kiboro) d'après Malam Abdou, 2014 (modifié). ....	28
Figure 6. L'illustration des unités géomorphologiques et l'organisation de la végétation. ....	29
Figure 7. La distribution du système hydrologique dans le secteur de Dantiandou (zone d'étude). Source : Massuel, 2005. ....	32
Figure 8. L'évolution de l'indice standardisé des précipitations (ISP) et de la moyenne mobile à Niamey. $ISP = (P_i - P_{moy}) / \text{écart-type}$ : $i$ = indice de l'année, $P_{moy}$ = pluie moyenne (1905-2020) = 554 mm et écart-type = 148,8 mm. Source des données AGRHYMET.....	34
Figure 9. L'évolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à Niamey au cours des périodes 1977-1989 et 1990-2004. ....	35
Figure 10. L'évolution du taux de croissance démographique au Niger d'après le département des affaires économiques et sociales des Nations unies. ....	37
Figure 11. L'évolution de la densité de la population dans la commune rurale de Dantiandou. ...	37
Figure 12. L'exploitation des terres marginales (brousse tigrée) pour le bois de chauffe et la mise en culture. ....	38
Figure 13. La spatialisation des changements d'occupation du sol sur la période 1973-2000 (en haut) et la période 2000/01-2010. Marega et al. 2021, modifiée. ....	40
Figure 14. Le site d'étude.....	41
Figure 15. Les quelques exemples des bandes boisées dégradées, à gauche (a) et à droite (b) respectivement les états moyens et très dégradés de la brousse tigrée.....	43
Figure 16. Une bande dégradée du haut glacis en début de saison pluvieuse datant de 2013 (en haut), et la même bande à la fin de la saison pluvieuse, en 2019 (en bas). ....	45

Figure 17. La présentation des surfaces délimitées et aménagées dans le bassin versant TK-IBM..	47
Figure 18. La réalisation de la technique du sous-solage des surfaces dégradées du plateau (en haut) et du haut glacis (en bas).....	49
Figure 19. Les outils de réalisation du sous-solage.....	49
Figure 20. La collecte de graines d'espèces végétales au début de la saison sèche. La photo à gauche expose le mode de cueillette des graines, alors que sur les deux photos, au milieu et à droite, on voit respectivement les graines de <i>Combretum micranthum</i> et de <i>Guiera senegalensis</i> . .....	50
Figure 21. Une séance de comptage de graines. ....	51
Figure 22. Le pesage des branchettes mortes (à gauche) et leur épandage à l'échelle de la parcelle sous-solée (à droite). ....	52
Figure 23. L'illustration des parcelles aménagées exclusivement par sous-solage sur plateau latéritique (à gauche) et sur le haut glacis encroûté (à droite). ....	54
Figure 24. La parcelle de branchage II aménagée sur le revers du plateau uniquement par la technique de branchage. ....	55
Figure 25. L'illustration d'une parcelle aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.....	56
Figure 26. Les parcelles aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis encroûté. En haut, la parcelle SL-E-B 4 (non clôturée) et en bas, la parcelle SL-E-B 5 (clôturée). .....	57
Figure 27. Les parcelles témoins sur le haut glacis encroûté (a) et sur le revers du plateau (b). ...	58
Figure 28. La représentation d'une parcelle de ruissellement de 1 m <sup>2</sup> , et du dispositif de mesure hydroclimatique, installée dans la parcelle SL I sur le revers du plateau. ....	61
Figure 29. La présentation générale du dispositif de mesure hydroclimatique. Le dispositif de mesure installé sur le revers du plateau (en haut) et à l'échelle du BV TK-IBM (en bas). ....	63
Figure 30. La station hydrométrique installée à l'exutoire du bassin versant TK-IBM.....	64
Figure 31. Les outils de mesure de la pluie : pluviographe, à gauche (a) et pluviomètre à lecture directe, à droite (b) installés sur le site d'étude.....	65
Figure 32. L'illustration de la méthode de prélèvement des échantillons d'eau pour la mesure des matières en suspension (MES) à la station de jaugeage du bassin versant TK-IBM. ....	67
<i>Figure 33. Les outils utilisés pour les mesures de la microtopographie (a, b &amp; c) et des états de surface (d). ....</i>	<i>68</i>
Figure 34. Le rapport de prétraitement (mosaïque) des images de drones prises sur le terrain. Chaque point noir sur cette carte indique une image et le chevauchement avec les autres images. .....	70
Figure 35. Les outils de mesure de l'humidité du sol. À droite (c), le prélèvement d'un échantillon avec l'utilisation d'une truelle, d'une pioche, d'un GPS, d'un mètre ruban, d'un	

sachet plastique, d'un becher et d'un marqueur. Au milieu (b), un cylindre enfoncé dans le sol. À gauche (a), un trou de 50 cm qui a servi de prélèvement d'échantillon à chaque 10 cm.....	73
Figure 36. Le séchage des échantillons à l'étuve. ....	75
Figure 37. L'illustration de deux modèles de la sonde à neutrons utilisés sur le terrain. ....	77
Figure 38. L'installation des tubes d'accès à la sonde à neutrons. À gauche, les tubes en PVC utilisés, à droite (b), la mise en exécution de l'installation des tubes avec une tarière motorisée. ....	79
Figure 39. Le schéma d'une sonde à neutrons en place dans un sol. Source : Luiz Antonio Pereira dos Santos, 1984.....	80
Figure 40. Le choix des placettes pour la mesure de la végétation. À gauche (a), une parcelle de 150 m <sup>2</sup> de superficie servant à mesurer la végétation ligneuse. À droite (b), une sous-placette de 6,25 m <sup>2</sup> déterminée à l'intérieur de la placette précédente destinée à effectuer le relevé des herbacées. ....	83
Figure 41. Le croquis du maillage des parcelles de 150 m <sup>2</sup> (15/10 m) afin de faciliter le comptage des jeunes individus par espèce et des nouvelles recrues. Le comptage se fait de manière progressive dans les placettes de 1 m <sup>2</sup> jusqu'à couvrir la totalité de la parcelle. ....	85
Figure 42. L'illustration de l'état de germination des graines de <i>Combretum micranthum</i> et de <i>Guiera senegalensis</i> . Les radicules de <i>Guiera senegalensis</i> sont aperçues à gauche et celles de <i>Combretum micranthum</i> à droite. ....	85
Figure 43. La mise en exécution du principe de mesure de la croissance verticale (hauteur) d'un jeune arbuste : exemple de mesure pour <i>Combretum micranthum</i> (A) et pour <i>Guiera senegalensis</i> (B).....	86
Figure 44. La mesure de la croissance horizontale d'un jeune arbuste.....	87
Figure 45. Les techniques de prise de vue en modes vertical (en haut) et horizontal (en bas). ....	88
Figure 46. L'occupation du sol sur le site d'étude (Tondi Kiboro).....	98
Figure 47. Les proportions des classes d'occupation du sol par rapport à la superficie totale du site d'étude. ....	99
<i>Figure 48. L'illustration de quelques obstacles entravant l'alimentation en eau des bandes boisées de la brousse tigrée et, par conséquent, leur dégradation. ....</i>	<i>99</i>
Figure 49. Du modèle numérique de terrain à la délimitation du BV TK-IBM.....	100
Figure 50. La variation des hauteurs d'eau enregistrées avant et après aménagement. ....	102
Figure 51. La perturbation du fonctionnement des parcelles de ruissellement causée par la pluie du 17 juillet 2016.....	104
Figure 52. La relation des lames ruisselées dans les parcelles P3 (témoin I), P6 (témoin II) et P13 (témoin III). ....	105
Figure 53. La relation des lames ruisselée dans les parcelles aménagées P1 (SL I), P2 (SL-E-B I), P11 (branchage I) et P12 (branchage II) de 2016 à 2018.....	106
Figure 54. Les types d'états de surface et leur proportion (%) dans les parcelles élémentaires. .	109



<i>Figure 55. L'impact de l'aménagement sur la modification des états de surface des parcelles expérimentales de ruissellement, cas de la parcelle P7 (SL-E-B III). À gauche, c'est la situation de la parcelle juste après aménagement par sous-solage-ensemencement-branchage en 2016 et à droite, c'est la situation de la même parcelle après trois ans (en 2019).</i> .....	110
Figure 56. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple sur le revers du plateau. ....	112
Figure 57. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par association du sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau.....	113
Figure 58. L'évolution de coefficient du ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du branchage. ....	114
Figure 59. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles témoins installées sur le revers du plateau.....	115
Figure 60. La comparaison du coefficient de ruissellement annuel moyen dans les parcelles témoins et aménagées sur le revers du plateau. Les barres en noir représentent les écarts-types débiaisés. Il faut noter que témoin = kr moyen dans P3 & P6 et branchage = kr moyen dans la P11 & P12. ....	116
<i>Figure 61. Le processus de remodelage des mottes de terre sous l'effet de la pluie conduisant au re-encroûtement du sol des parcelles sous-solées (SL).</i> .....	117
Figure 62. L'évolution du coefficient de ruissellement, après reprise du remaniement du sol intervenu le 10 juillet 2017, dans les parcelles SL III (P8) et SL-E-B III (P7). Les dates colorées (en rouge) indiquent la période avant remaniement du sol. ....	118
Figure 63. L'évolution du coefficient de ruissellement dans les parcelles SL I (P1) et SL-E-B I (P2), aménagées depuis 2016. ....	118
Figure 64. L'impact du remaniement du sol sur le ruissellement sur la surface témoin I (P3) à droite (a) et sur la surface SL-E-B III (P7) aménagée et remaniée à gauche (b). ....	119
Figure 65. L'évolution du coefficient du ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple sur le haut glacis. ....	120
Figure 66. L'illustration du réencroûtement de la parcelle aménagée par la technique du sous-solage simple installée sur la rive gauche du BV TK-IBM. En haut, c'est la situation en 2017, juste après aménagement de la parcelle. En bas, c'est la situation trois ans après, en 2019.....	121
Figure 67. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis. ....	122
Figure 68. L'évolution du coefficient de ruissellement annuel dans la parcelle témoin installée sur le haut glacis.....	123
Figure 69. La comparaison du coefficient de ruissellement annuel moyen dans la parcelle témoin et les parcelles aménagées sur le haut glacis. Les barres en noir représentent les écarts-types débiaisés. ....	124
Figure 70. La relation lame ruisselée (%) et érosion (g/m <sup>2</sup> ) à l'échelle des parcelles de 1 m <sup>2</sup> en 2017. Les résultats utilisés sont ceux des parcelles SL I (P1), SL II (P5), SL III (P8), SL-E-B I (P2), SL-E-B II (P4), SL-E-B III (P7), branchage (moy P11 & P12) et témoin (moy P3 & P6).	125

Figure 71. L'évolution des pertes en terre (en g/l) en fonction des pluies dans quelques parcelles du ruissellement suivies en 2017.....	126
Figure 72. La comparaison de l'évolution de la teneur en eau volumique en surface (0 à 5 cm) sur le revers du plateau.....	129
Figure 73. La comparaison de l'évolution de la teneur en eau volumique en surface (0 à 5 cm) sur le haut glacis.....	130
Figure 74. La teneur en eau et du front d'infiltration dans les tubes 15 (à gauche) et 16 (à droite) aménagés par la technique du branchage en 2017. ....	132
Figure 75. La teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 14 (à gauche) et le tube 10 (à droite) pendant la saison pluvieuse de 2016.....	133
Figure 76. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 14 (à gauche) et le tube 10 (à droite) pendant la saison pluvieuse 2017. ....	135
Figure 77. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans les tubes 4 et 5 en 2016 (année témoin, à gauche) et en 2017 (après aménagement, à droite).....	136
Figure 78. La teneur en eau et le front d'infiltration dans le tube 13 (à gauche) et le tube 11 (à droite) pendant la saison pluvieuse 2016. ....	137
Figure 79. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 13 (à gauche) et le tube 11 (à droite) pendant la saison pluvieuse 2017. ....	138
Figure 80. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans les tubes 2 et 3 (SL-E-B 4) en 2016 (année témoin, à gauche) et en 2017 (après aménagement, à droite).....	139
Figure 81. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 12 (témoin I) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) et 2017 (à droite).....	141
Figure 82. L'évolution de la teneur en eau et du front d'infiltration dans le tube 1 (témoin 4) pendant les saisons pluvieuses de 2016 (à gauche) et de 2017 (à droite). ....	142
Figure 83. La comparaison de la teneur en eau volumique avant (15/09/2017) et après la pluie (16/09/2017).....	143
Figure 84. L'influence de la reprise du remaniement du sol et d'un évènement pluvieux de 15 mm sur l'évolution de la teneur en eau volumique dans le tube 7 (SL III) à gauche et dans le tube 8 (SL III) à droite. ....	144
Figure 85. La dynamique mensuelle de la teneur en eau du sol moyenne dans du tube 15 (branchage I) et tube 16 (branchage II) pendant les saisons pluvieuses de 2017 (à gauche) et de 2018 (à droite).....	146
Figure 86. Les galeries créées par les termites dans les parcelles aménagées pouvant influencer l'infiltration de l'eau dans le sol.....	147
Figure 87. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 14 (SL I) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) et 2017 (à droite).....	148
Figure 88. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 7 (SL III) pendant les saisons pluvieuses de 2016 (à gauche) et de 2017 (à droite). ....	150

Figure 89. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique moyenne dans le tube 4 et 5 (SL 4) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) avant sous-solage et 2017 (à droite) après sous-solage. ....	151
Figure 90. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 13 (SL-E-B I) de 2016 (à gauche) à 2018 (à droite).....	153
Figure 91. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique dans le tube 13 (SL-E-B III) de 2016 (à gauche) à 2017 (à droite).....	155
Figure 92. La dynamique mensuelle de la teneur en eau volumique moyenne dans le tube 2 et 3 (SL-E-B 4) pendant les saisons pluvieuses 2016 (à gauche) avant sous-solage et 2017 (à droite) après sous-solage. ....	156
Figure 93. La dynamique mensuelle de la teneur en eau du sol dans le tube 12 installé dans la parcelle témoin I sur le revers du plateau de 2016 (à gauche) à 2017 (à droite).....	157
Figure 94. La dynamique mensuelle de la teneur en eau du sol dans le tube 1 installé dans la parcelle témoin 4 sur le haut glacis encroûté. ....	158
Figure 95. L'évolution de la composition floristique dans les parcelles étudiées sur le revers du plateau. ....	160
Figure 96. L'évolution de la composition floristique dans les parcelles de suivi installées sur le haut glacis.....	162
Figure 97. L'évolution de la fréquence moyenne des ligneux dans les parcelles SL I, SL II et SL III (à gauche) et dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III (à droite).....	171
Figure 98. L'évolution de la densité (individu/m <sup>2</sup> ) dans les parcelles aménagées par le sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau. ....	179
Figure 99. L'évolution de la densité (individu/m <sup>2</sup> ) dans les parcelles aménagées par le sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis. ....	180
Figure 100. L'évolution de la densité (individu/m <sup>2</sup> ) dans les parcelles aménagées par la technique du branchage sur le revers du plateau. ....	180
Figure 101. L'évolution de la densité (individu/m <sup>2</sup> ) dans les parcelles aménagées par sous-solage sur le revers du plateau.....	181
Figure 102. L'évolution de la densité (individu/m <sup>2</sup> ) dans les parcelles aménagées par le sous-solage sur le haut glacis.....	182
Figure 103. L'évolution de la densité (individu/m <sup>2</sup> ) moyenne dans le témoin et les parcelles aménagées sur le revers du plateau. ....	182
Figure 104. L'évolution de la densité moyenne dans le témoin et les parcelles aménagées sur le haut glacis.....	183
Figure 105. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour <i>Guiera senegalensis</i> (en haut) et pour <i>Combretum micranthum</i> (en bas) dans les parcelles SL-E-B I, SL-E-B II et SL-E-B III sur le revers de plateau. ....	185
Figure 106. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour <i>Guiera senegalensis</i> et pour <i>Combretum micranthum</i> dans les parcelles aménagées par branchage sur le revers de plateau..	186

Figure 107. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour <i>Guiera senegalensis</i> dans la parcelle témoin II. ....	187
Figure 108. L'évolution du taux de survie des jeunes pousses pour <i>Guiera senegalensis</i> dans la parcelle SL-E-B 4 sur le haut glacis. ....	188
Figure 109. Les facteurs influençant le cycle de germination des graines ensemencées pour <i>Guiera senegalensis</i> et pour <i>Combretum micranthum</i> en 2016 (schéma de Flore, 2008, modifié). ....	189
Figure 110. Les impacts négatifs de remaniement du sol et du pâturage sur le taux de régénération du couvert végétal dans les parcelles aménagées. À gauche, un pied de jeune pousse ligneuse déracinée lors de l'opération du remaniement du sol dans la parcelle SL-E-B III le 18 juillet 2018. À droite, des animaux (ânes) qui broutent la végétation poussée dans la parcelle SL-E-B I. ....	190
Figure 111. Les termites en activité sur les branchettes utilisées pour l'aménagement de la parcelle et leur rôle dans le processus de germination des graines ensemencées. À gauche, les termites sur les branchettes recouvrant la surface du sol. À droite, un termite qui ronge une graine .....	191
Figure 112. Le développement vertical des arbustes existants pour <i>Guiera senegalensis</i> et pour <i>Combretum micranthum</i> dans les parcelles SL I, SL II et SL III sur le revers de plateau. ....	192
Figure 113. L'aperçu de la dégradation de la végétation dans la parcelle SL II (remaniée deux fois en 2016 et 2017). La situation de départ en septembre 2016 est indiquée en haut, et en bas c'est l'état de la végétation dans la même parcelle en 2019. Les flèches indiquent la dégradation sur quelques individus. ....	193
Figure 114. Le développement vertical des arbustes existants pour <i>Guiera senegalensis</i> dans la parcelle SL 4 sur le haut glacis. ....	194
Figure 115. Le développement vertical des arbustes existants et jeunes pousses pour <i>Combretum micranthum</i> dans les parcelles branchage (hauteur moyenne parcelle branchage I et II) sur le revers de plateau. ....	196
Figure 116. La croissance verticale des arbustes existants (a, en haut) et jeunes pousses (b, en bas) pour <i>Guiera senegalensis</i> et pour <i>Combretum micranthum</i> dans les parcelles SL-E-B I et SL-E-B III sur le revers de plateau. ....	197
Figure 117. La croissance verticale des arbustes existants et des jeunes pousses dans la parcelle SL-E-B III. Les flèches en double sens indiquent le gain en croissance verticale, le bleu pour <i>Combretum micranthum</i> et le jaune pour <i>Guiera senegalensis</i> . ....	199
Figure 118. La croissance verticale des arbustes existants (a & c, en haut) et jeunes pousses (b & d, en bas) pour <i>Guiera senegalensis</i> et pour <i>Combretum micranthum</i> dans la parcelle SL-E-B 4 sur le haut glacis. ....	200
Figure 119. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage simple sur le revers du plateau. ....	202
Figure 120. L'évolution horizontale de la végétation dans la parcelle SL 4 aménagée par la technique du sous-solage simple sur le haut glacis. ....	203

Figure 121. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du branchage simple sur le revers du plateau. ....	204
Figure 122. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau. ....	205
Figure 123. L'évolution qualitative du taux du couvert végétal de 2016 (en haut) à 2019 (en bas) dans la parcelle SL-E-B III aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le revers du plateau. ....	206
Figure 124. L'évolution horizontale de la végétation dans les parcelles aménagées par la technique du sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis. ....	207
Figure 125. L'évolution qualitative du taux du couvert végétal dans la parcelle SL-E-B 4 aménagée par sous-solage-ensemencement-branchage sur le haut glacis.....	208

# Annexes

## Annexe I. Présentation de quelques fiches

### 1.1. Exemple d'une fiche de suivi du ruissellement et de l'érosion

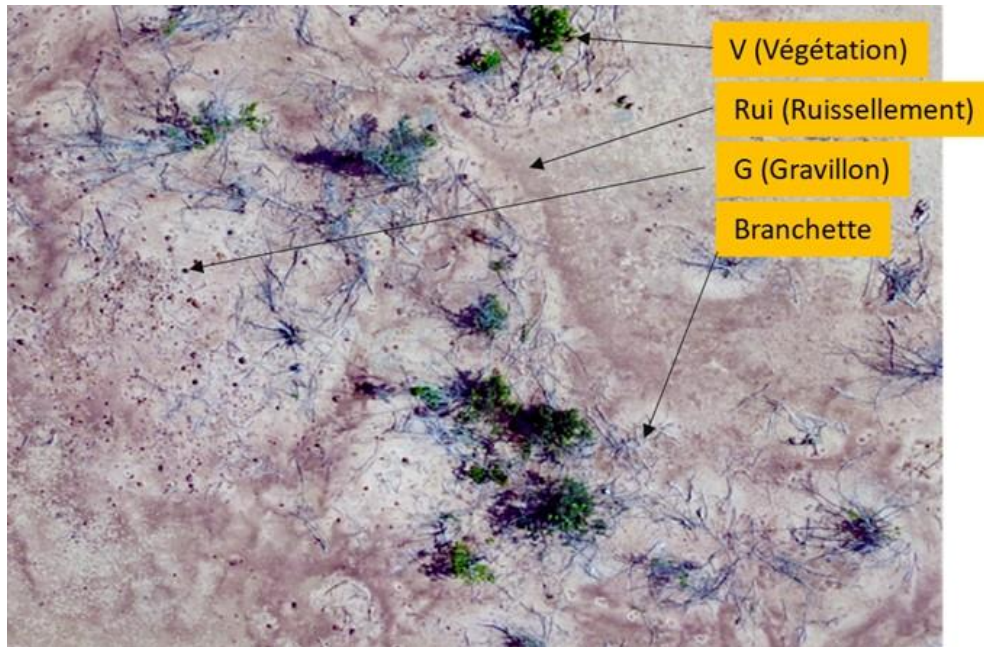
L'identifiant de la parcelle de ruissellement : P1						
Unité géomorphologique : Plateau						
Technique d'aménagement appliquée : Sous-solage simple						
Date de pluie	Date de mesure	Pluviomètre de référence : P41	Ruissellement : Hauteur d'eau mesurée dans la cuve (cm)	MES : numéros des échantillons		Observation
14/06/2017	14/06/2017	27	5	18	23	Fermé
25/06/2017	27/06/2017	11	3,5	17	18	Fermé
03/07/2017	05/07/2017	40	13	49	50	Fermé
18/07/2017	19/07/2017	14	2	76	77	Fermé
22/07/2017	22/07/2017	22	5	105	53	Fermé
02/08/2017	03/08/2017	8	1	136	131	Fermé
04/08/2017	04/08/2017	10	3	146	147	Fermé
07/08/2017	08/08/2017	23	6	139	168	Fermé
14/08/2017	14/08/2017	7	0			Trace
21/08/2017	21/08/2017	38	15	197	196	Ouvert
22/08/2017	22/08/2017	25	7	223	227	Fermé

### 1.2. Fiche de relevé de la micro topographie et des Eds à l'échelle des parcelles de ruissellement de 1 m<sup>2</sup>.

cm

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10										
20										
30										
40										
50										
60										
70										
80										
90										
100										

**1.3 : Illustration des états de surface (Eds) sur les bandes dégradées de la brousse tigrée**



**1.4. Fiche de relevé de points GPS et la topographie du terrain.**

Délimitation du bassin versant TK_IBM				
Ligne 1				
Obs	Latitude	Longitude	Topographie	Altitude relevée au GPS
REFERENCE	467635	1497931	1332	253
1	467736	1497940	1000	255
2	467726	1497946	960	255
3	467718	1497953	940	255
4	467707	1497961	925	254
5	467688	1497974	910	255
6	467679	1497980	952	255
7	467669	1497986	990	255
8	467658	1497991	1075	254
9	467646	1497997	1065	254



## Annexe II : Rapport de traitement des images avec le logiciel Agisoft-PhotoScan

### 26 Rapport de traitement (26 janvier 2022)



#### 2.1. Données initiales

Tableau 1. Caméras. Calibration de caméra

<b>Modèle de la caméra</b>	<b>Résolution</b>	<b>Distance focale</b>	<b>Taille de pixel</b>	<b>Précalibré</b>
<b>FC6310 (8.8 mm)</b>	<b>5472 x 3078</b>	<b>8.8 mm</b>	<b>2.53 x 2.53 <math>\mu</math>m</b>	<b>Non</b>
Nombre d'images :	1,278	Positions de caméra :	1,215	
Altitude de vol :	38.5 m	Points de liaison :	801,916	
Résolution au sol :	9.59 mm/pix	Projections :	4,277,073	
Zone de couverture :	0.423 km <sup>2</sup>	Erreur de reprojection :	1.68 pix	

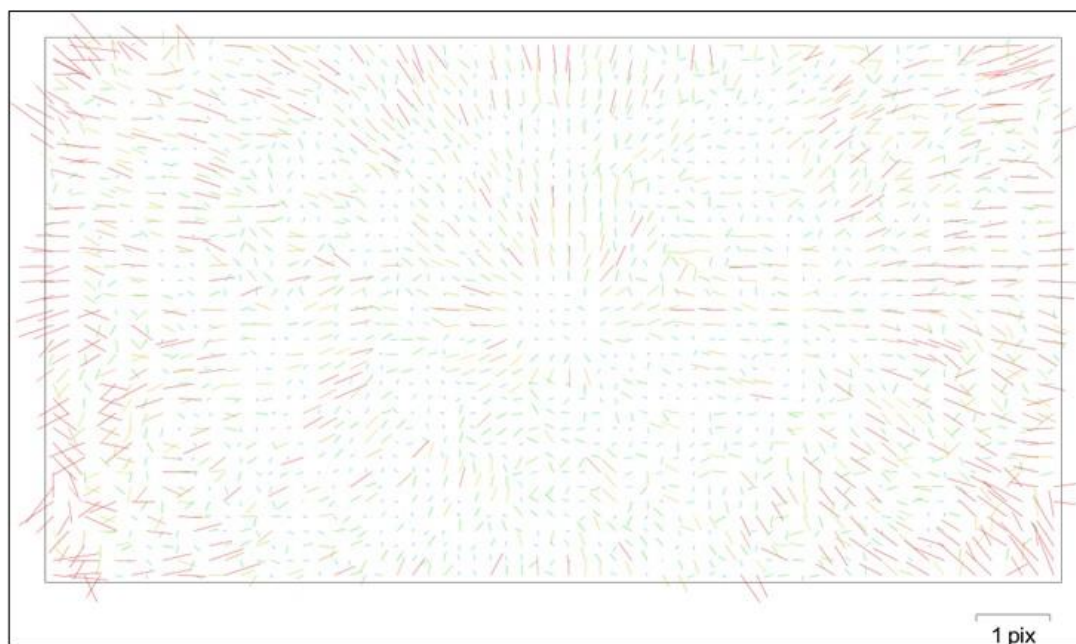


Fig. 1. Résiduelles des points de liaison pour FC6310 (8.8 mm).

## 2.2. Positions de caméra

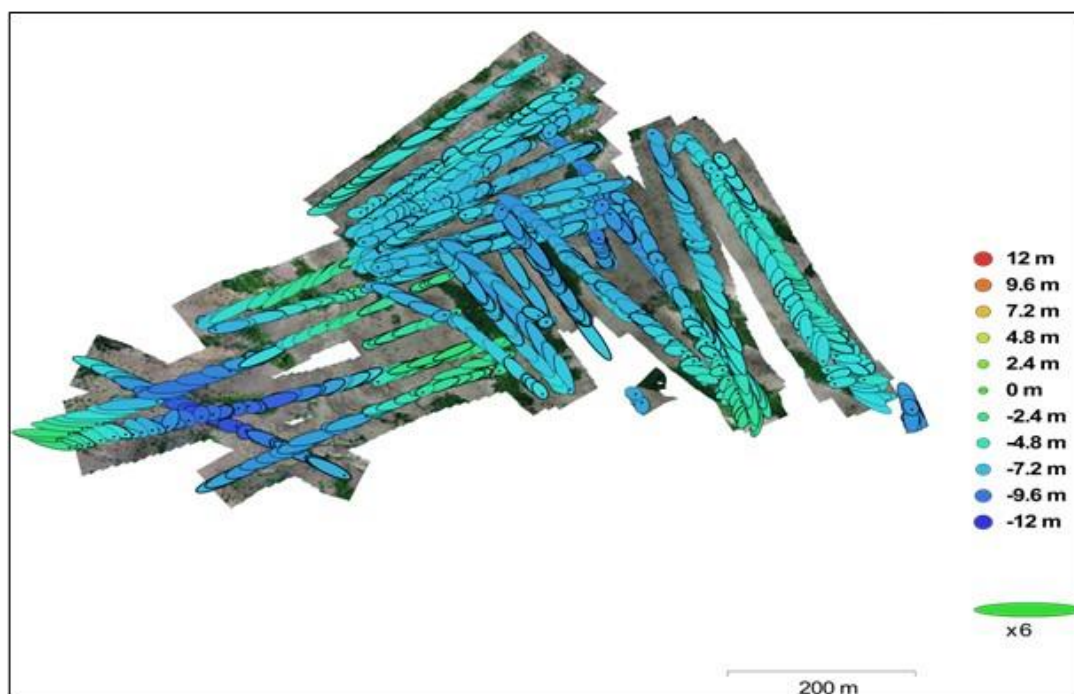


Fig. 2. Emplacements de la caméra et estimations d'erreur. Erreur Z est représenté par la couleur d'ellipse. Erreurs X, Y sont représentés par la forme d'ellipse. Les emplacements des caméras estimés sont identifiées par un point noir.

Tableau 2. Moyenne erreur d'emplacement de la caméra.

X erreur (m)	Y erreur (m)	Z erreur (m)	XY erreur (m)	Erreur totale (m)
2.7123	2.1684	6.81104	3.47254	7.64518

### 2.3. Points de contrôle terrain

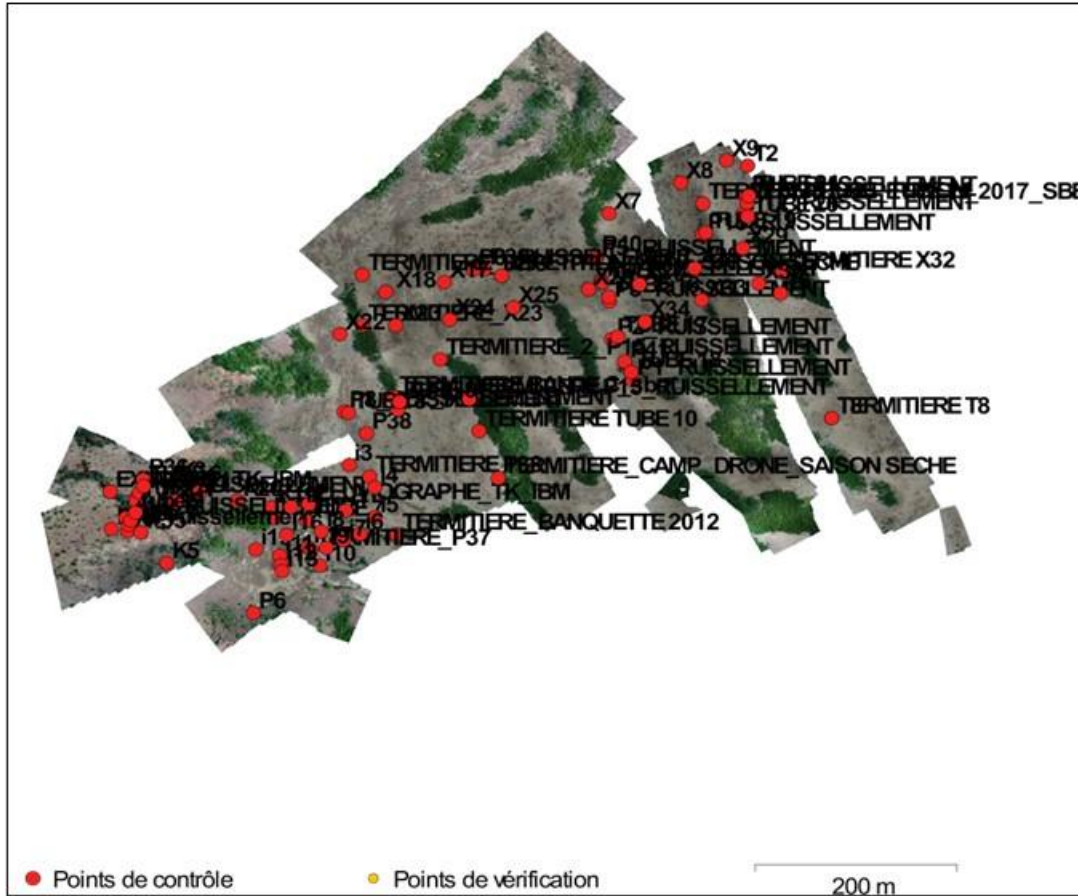


Fig. 3. Positions des points de contrôle terrain.

### 2.4. Barres d'échelle

Tableau 5. Barres d'échelle de contrôle.

Étiquette	Distance (m)	Erreur (m)
TERMITIERE BANDE C_sbe_TERMITIERE_2_P	1560.8343_RUISSELL	EMENT0.474306
Total	560	0.474306

## 2.5. Modèle Numérique de Terrain

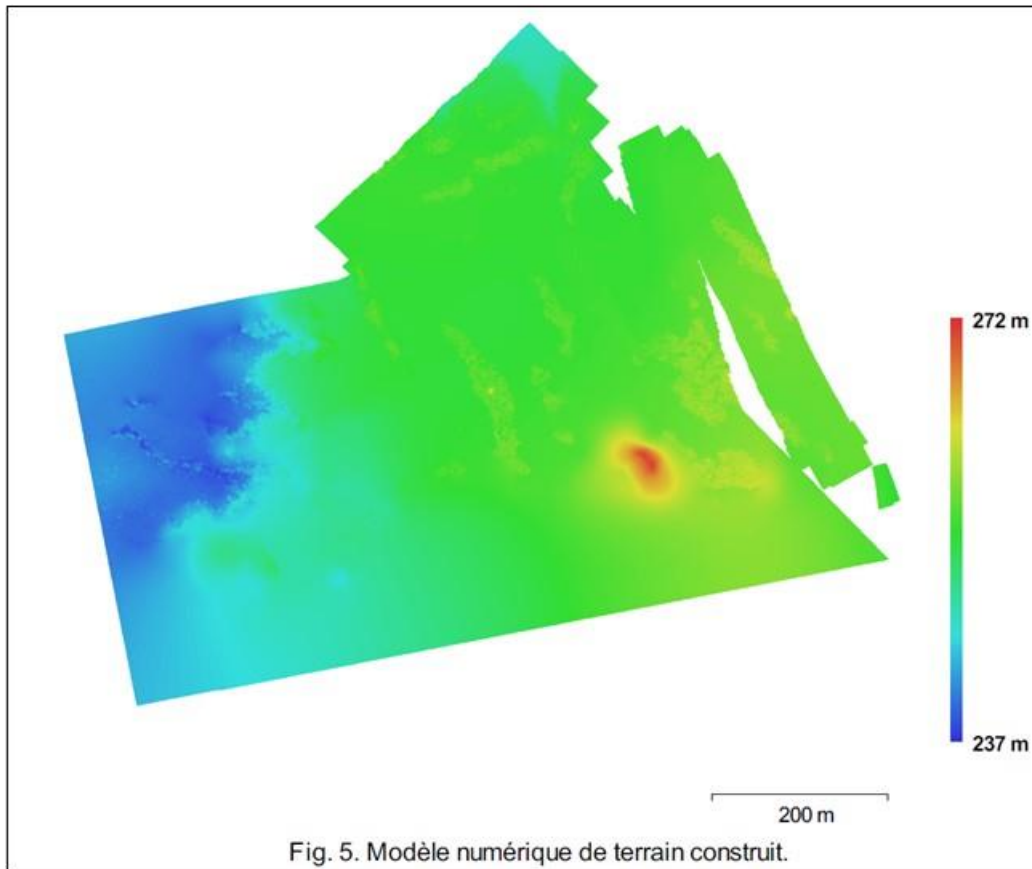


Fig. 4. Résolution : 0,43 m/pix

## 2.6. Synthèse générale du rapport de traitement d'image

### 5.6.1. Général

Caméras	1278
Caméras alignées	1215
Repères	97
Barres d'échelle	1
Système de coordonnées	WGS 84 (EPSG ::4326)

### 5.6.2. Nuage de point

Points	801,916 de 941,587
Erreur RMS de reprojection	0.293805 (1.67849 pix)
Erreur Max de reprojection	12.7577 (91.7446 pix)
Moyenne taille de point	6.02393 pix
Chevauchement efficace	5.60242

### 5.6.3. Paramètres d'alignement

Précision	Moyenne
Présélection de paires	Désactivé

Limite de points	40,000
Limite de points de liaison	4,000
Restreindre les caractéristiques par masques	Non
Adaptative ajustement du modèle de la caméra	Oui
Temps de concordance	3 jours 16 heures
Temps d'alignement	37 minutes 39 secondes
<b>5.6.4. Paramètres d'optimisation</b>	
Paramètres	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
La durée d'optimisation	7 minutes 38 secondes
<b>5.6.5. Nuage de points dense</b>	
Points	179,569,453
<b>5.6.6. Paramètres de reconstruction</b>	
Qualité	Moyenne
Filtrage de la profondeur	Modéré
Temps de génération de cartes de profondeur	14 heures 45 minutes
Temps de génération d'un nuage de points dense	1 heures 48 minutes
<b>5.6.7. Modèle</b>	
Faces	143,281
Sommets	73,600
<b>5.6.8. Paramètres de reconstruction</b>	
Type de surface	Champ de hauteur
Source de donnée	Clairsemé
Interpolation	Activé
Type de géométrie	Nuage de points
Nombre des faces	159,647
Temps de traitement	27 secondes
<b>5.6.9. MNT</b>	
Taille	28,785 x 22,579
Système de coordonnées	WGS 84 (EPSG : 4326)
<b>5.6.10. Paramètres de reconstruction</b>	
Source de donnée	Nuage dense
Interpolation	Extrapolé
Temps de traitement	5 minutes 7 secondes
<b>5.6.11. Orthomosaique</b>	
Taille	100,528 x 82,088
Système de coordonnées	WGS 84 (EPSG :4326)
Canaux	3, uint8
Mode de fusion	Mosaïque
<b>5.6.12. Paramètres de reconstruction</b>	
Surface	MNT
Activer la correction des couleurs	Non



**Annexe III. Utilisation de la fonction Hydrology (Arctoolbox / SpatialAnalyst) du logiciel ArcGis pour délimiter un BV.**

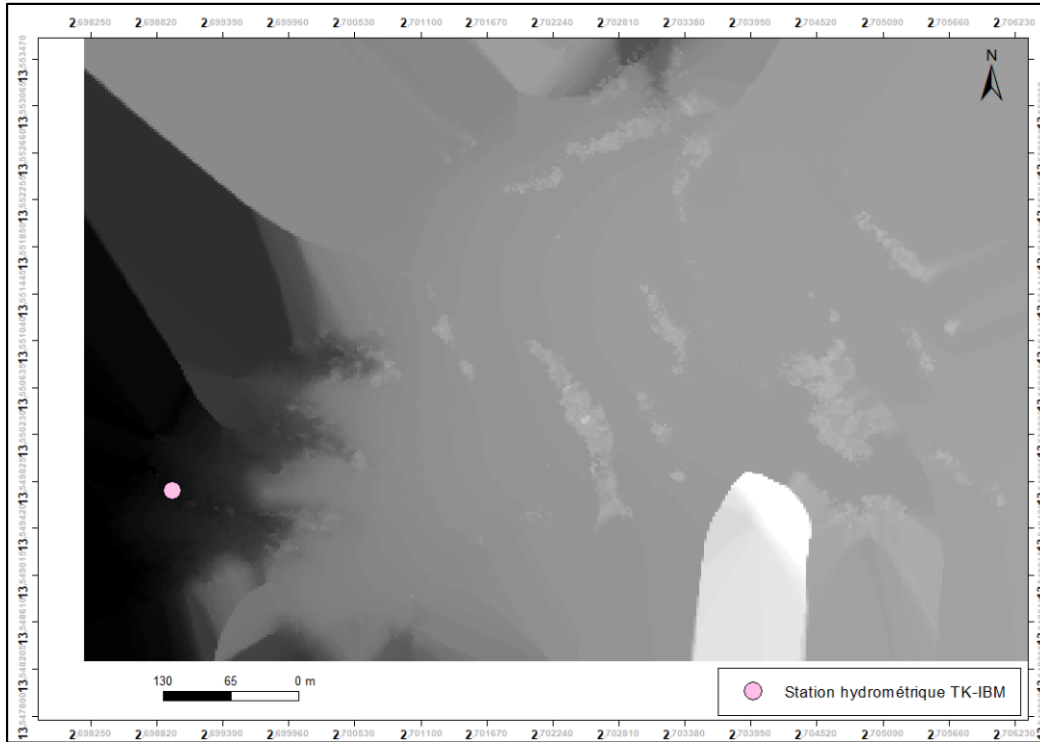


Fig. 3.1 : La fonction Fill pour le remplissage des trous.

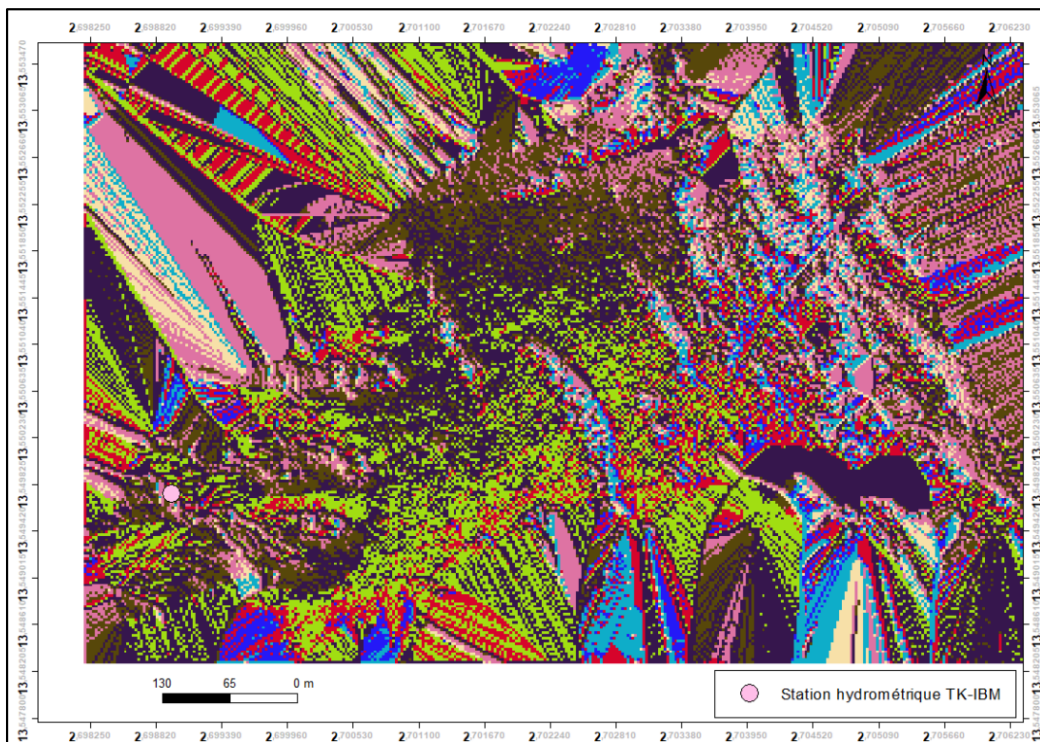
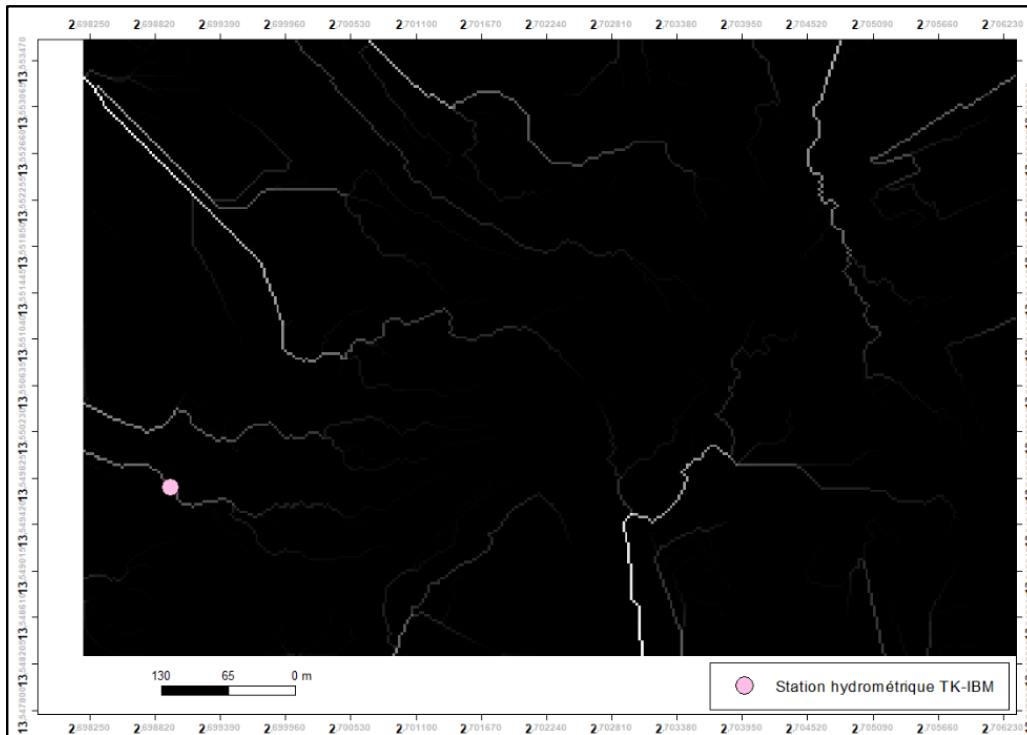
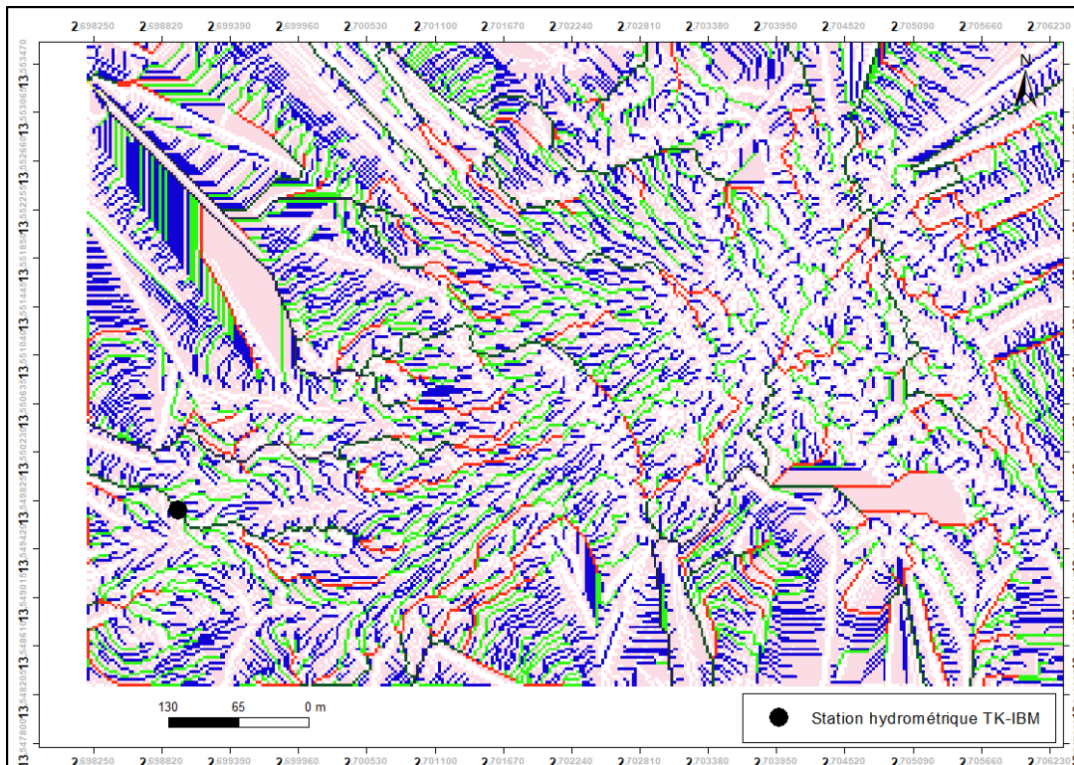


Fig. 3.2 : la fonction FlowDirection pour obtenir le réseau de rivière et la direction d'écoulement des eaux.

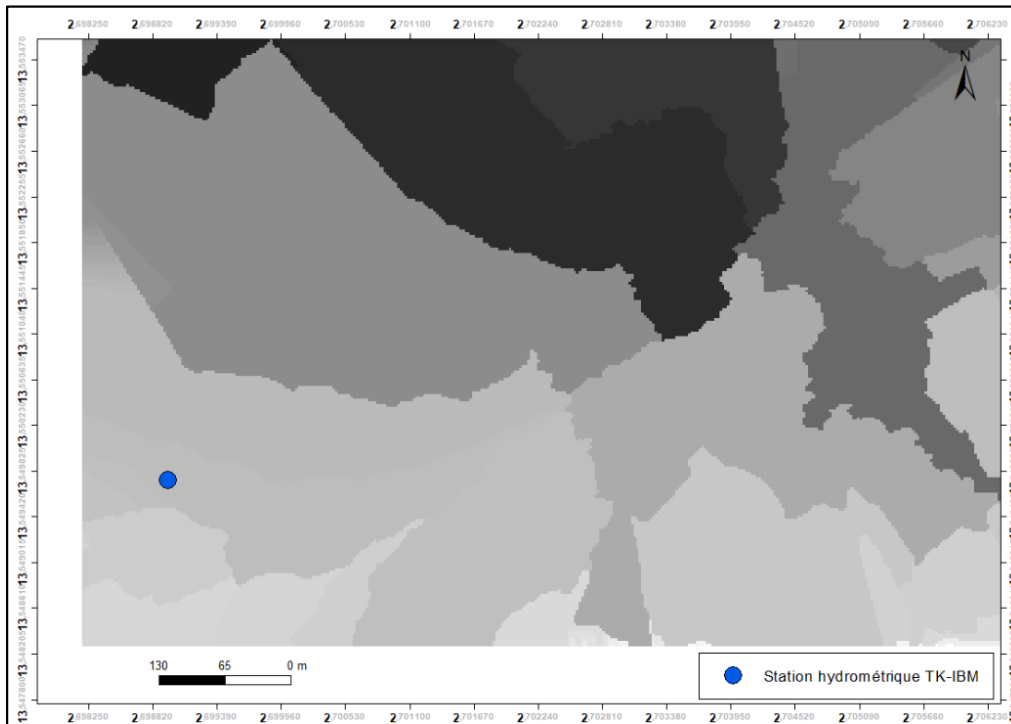


**Fig. 3.3.** La fonction FlowAccumulation pour l'accumulation total d'un MNT basée sur l'écoulement unidirectionnel.

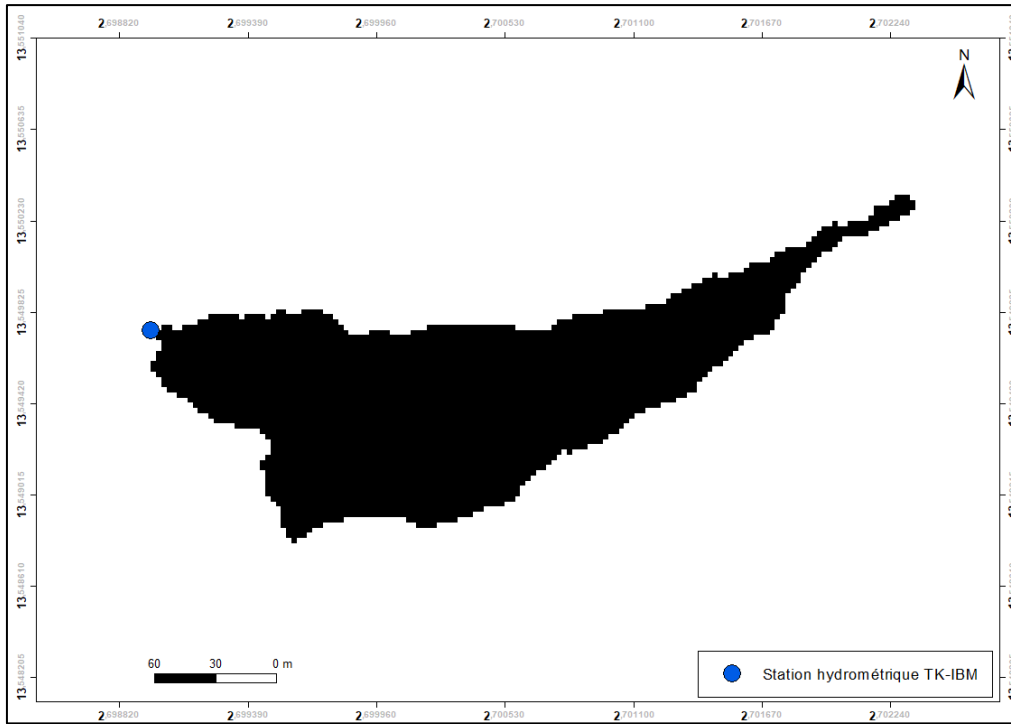


**Fig.3.4.** La fonction StreamOrder pour hiérarchiser les écoulements.





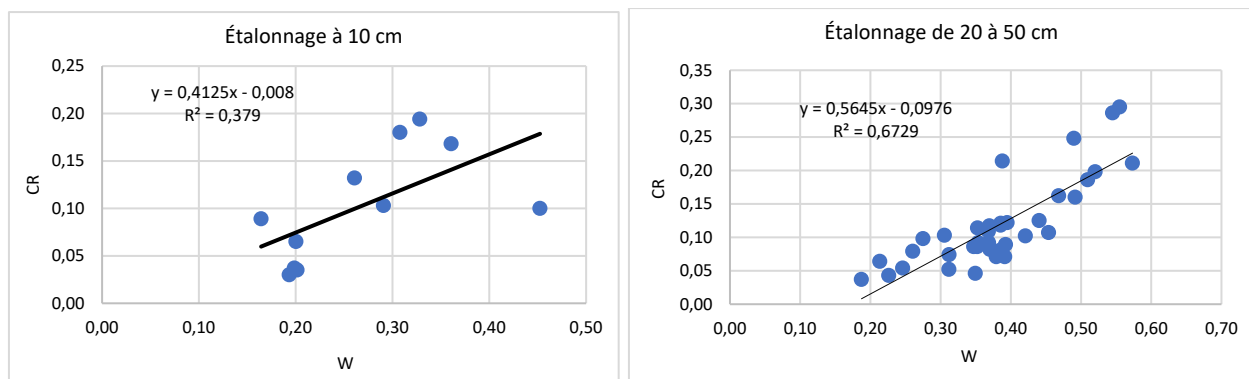
**Fig. 3.5 :** La fonction bassin pour coupler l'outil de capture de points d'écoulement (station hydrométrique du BV TK IBM) afin de déterminer la surface de captation d'écoulement au-dessus d'un ensemble de cellules d'une trame.



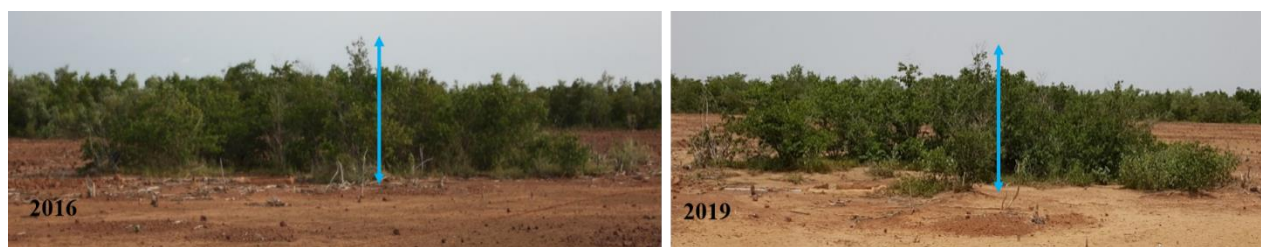
**Fig. 3.6.** La surface de drainage du BV TK-IBM.

## Annexe IV : Résultat d'étalonnage de la sonde à neutrons

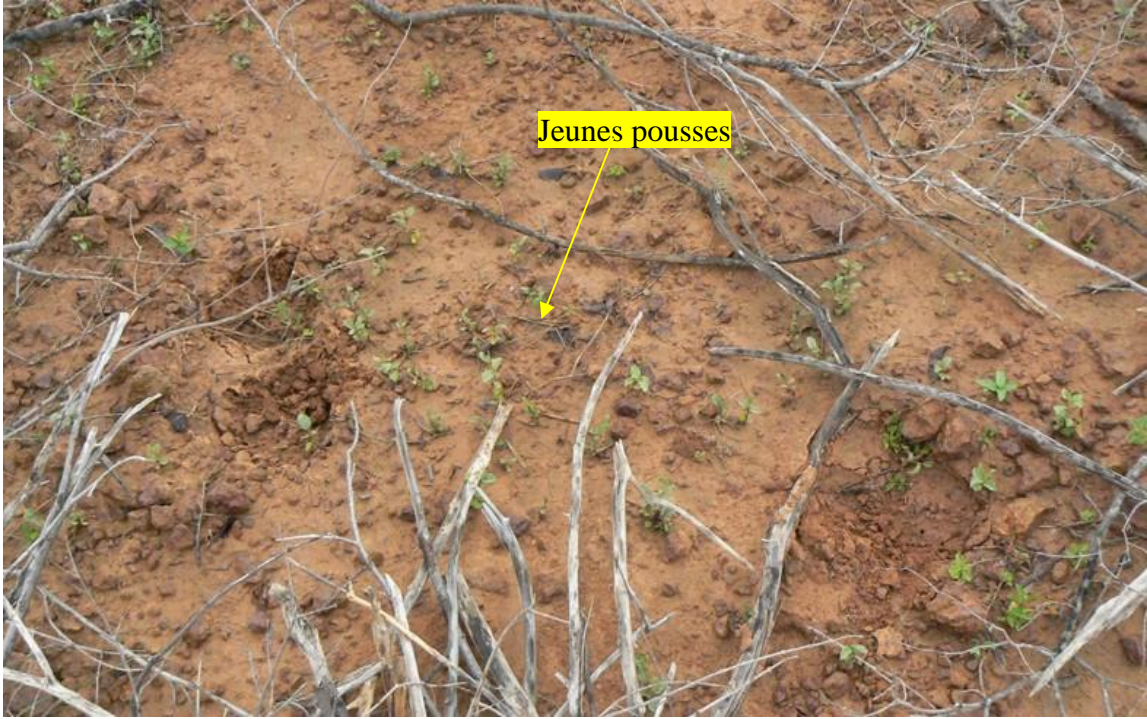
Nous avons été confrontés à des difficultés dues à des pannes de sondes à neutrons, ce qui a réduit le nombre de mesures disponibles pour établir des courbes d'étalonnage pour tous les états du sol. Ces données ont donc été incluses dans cet annexe, car elles étaient insuffisantes pour bien étalonner les sondes. Malgré cela, en 2018, nous avons mis en œuvre un protocole d'étalonnage de la sonde en utilisant deux types de sondes et en couplant des mesures gravimétriques et neutroniques à trois dates différentes pour différents niveaux d'humidité. Nous avons sondé un total de 8 tubes d'accès pour établir la relation d'étalonnage, avec 4 tubes pour chaque type de sol (glacis et plateau). Les mesures ont été effectuées avec la sonde de modèle CPN® 503 DR le 24/06/2018 et le 11/08/2018 pour des états de sol plus ou moins secs et très humides.



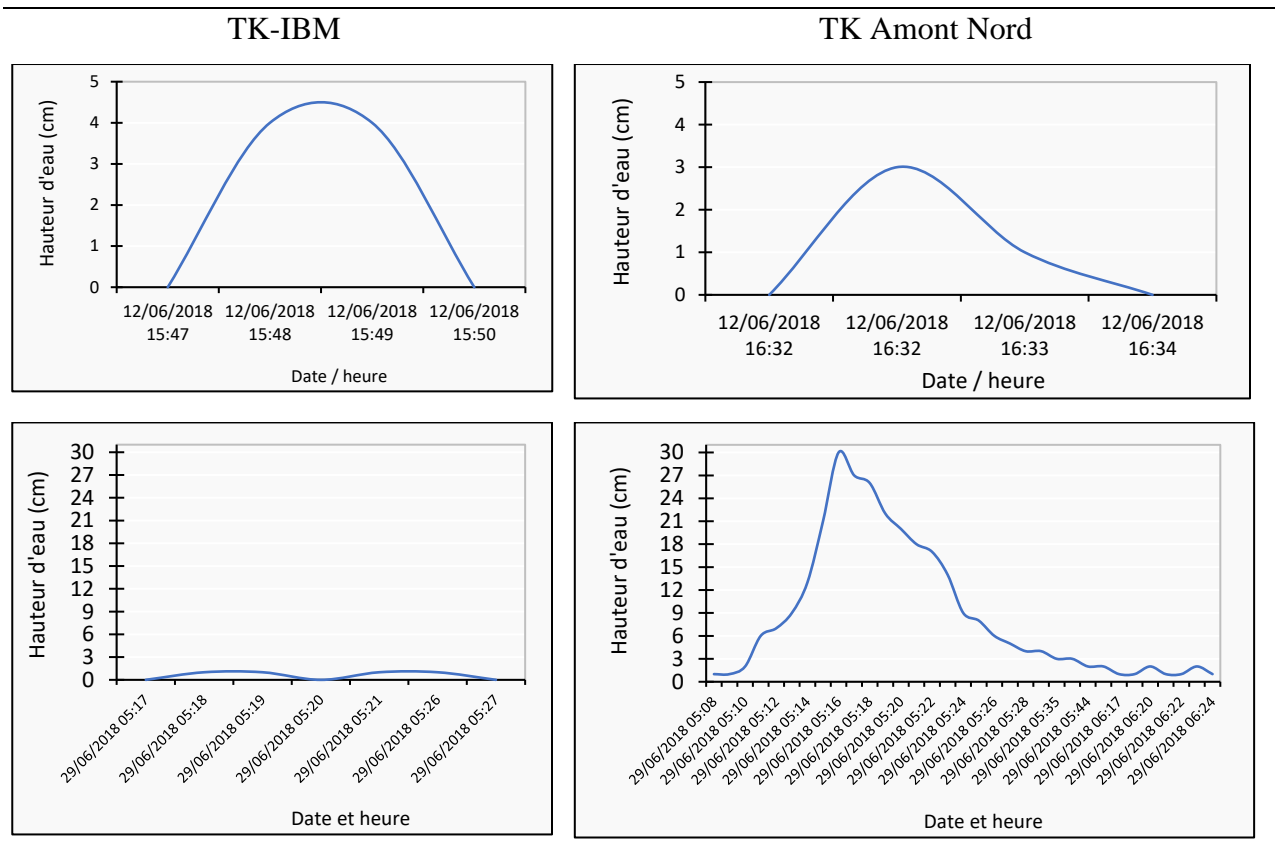
## Annexe V : Croissance verticale de la végétation dans la parcelle témoin II de 2016 à 2019.



**Annexe VI : Distribution des individus par espèces ligneuses (*Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*) dans les parcelles aménagées par sous-solage-ensemencement-branchage.**



**Annexe VII : Comparaison de la variation des hauteurs d'eau enregistrées par les Thalimèdes installés à l'exutoire des stations hydrométriques TK-IBM et TK Amont Nord.**





## Liste des publications

---

### Première page et résumé de la publication 1.

European Scientific Journal, ESJ  
November 2020 edition Vol.16, No.33

ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

### **Dynamique Hydro-Erosive Actuelle Des Bassins Versants Endoreiques De La Region De Niamey (Sud-Ouest Du Niger)**

#### **Bouzou Moussa Ibrahim,**

Université Abdou Moumouni de Niamey. Niamey  
(Niger)

#### **Malam Abdou Moussa,**

Université de Zinder Niger

#### **Ingatan Warzagan Aghali,**

#### **Boubacar Na-Allah Abdoulaye ,**

#### **Bahari Ibrahim Mahamadou,**

#### **Faran Maiga Oumarou,**

Université Abdou Moumouni de Niamey Niger

#### **Mamadou Ibrahim,**

#### **Abba Bachir,**

Université de Zinder Niger

#### **Descroix Luc,**

IRD, UMR 208 PALOC MNHN/IRD, Patrimoines  
Locaux et Gouvernance, Paris cedex

#### **Le Breton Eric,**

Laboratoire de Géographie Physique, Meudon  
Cedex France.

#### **Vandervaere Jean-Pierre,**

Université de Grenoble Alpes, CNRS, IRD,  
Grenoble INP, Grenoble France

---

#### Résumé


La généralisation du ravinement et la baisse de la productivité des terres sont quelques-unes des principales contraintes qui assaillent l'utilisation des sols au Sahel. Pour gérer efficacement ces sols, une évaluation des processus hydro-érosifs est nécessaire. Ce travail a ainsi pour objectif d'analyser la dynamique hydro-érosive sur un site expérimental installé depuis 2004 dans la région de Niamey (Niger). Sur ce site, le dispositif de mesure est composé de huit parcelles de mesures de ruissellement et d'érosion, des stations hydrométriques à l'exutoire des deux bassins versants endoréiques et de plusieurs piquets destinés aux suivis morpho-dynamiques des ravines. Après une décennie d'observation, les ruissellements mesurés sur les parcelles se caractérisent par une dynamique saisonnière croissante sur les surfaces

---

Submitted: 25 July 2020  
Accepted: 30 September 2020  
Published: 30 November 2020

Corresponding author:  
*Moussa Malam Abdou*

DOI: [10.19044/esj.2020.v16n33p149](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149)

 Copyright 2020 Pradhan et al.  
Distributed under Creative Commons  
BY-NC-ND 4.0 OPEN ACCESS

---

Cite as:  
Ibrahim B, Moussa M, Aghali, I, Abdoulaye B,  
Mahamadou B, Oumarou F, Ibrahim M, Bachir A,  
Descroix L, Eric L, Vandervaere J, (2020).  
Dynamique Hydro-Erosive Actuelle Des Bassins  
Versants Endoreiques De La Region De Niamey  
(Sud-Ouest Du Niger). *European Scientific Journal*,  
*ESJ*, 16 (33), 149.  
<https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149>

---

encroûtées (croûtes biologique et d'érosion) et décroissante sur les surfaces cultivées. Le coefficient de ruissellement varie de 5 % sur la surface cultivée à 58 % sur la croûte d'érosion. Au cours des 10 années de mesure, ce coefficient a connu une forte croissance en particulier sur la jachère (+ 80 %) et sur la surface cultivée (+ 300 %), traduisant ainsi la dégradation des sols. A l'échelle des bassins versants, l'augmentation du coefficient de ruissellement s'accompagne d'une érosion aréolaire qui décape le sol à une vitesse moyenne de 5 mm/an et d'une érosion linéaire active, de l'ordre de 4 m<sup>3</sup>/an au niveau des ravines suivies. Les transferts sédimentaires qui en résultent agissent sur le fonctionnement morpho-sédimentaire des cours d'eau. Des aménagements antiérosifs sont nécessaires pour dissiper les processus

## Dégradation des terres et inertie paysanne dans le Fakara (Niger-Ouest)

### Land Degradation and Farmer Inertia in Fakara (West Niger)

BOUZOU MOUSSA Ibrahim<sup>1</sup>, BAHARI IBRAHIM Mahamadou<sup>1</sup>, MALAM ABDOU Moussa<sup>2</sup>, FARAN MAIGA Oumarou<sup>1</sup>, INGATAN Aghali<sup>3</sup>, BOUBACAR NA-ALLAH Abdoulaye<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Enseignant-chercheurs, Département de Géographie, Université Abdou Moumouni de Niamey , BP 418, Niamey - Niger

<sup>2</sup> Enseignant-chercheur, Département de Géographie, Université de Zinder BP 656, Zinder – Niger

<sup>3</sup> Doctorants, Département de Géographie, Université Abdou Moumouni de Niamey , BP 418, Niamey - Niger

#### Résumé

Le Fakara situé dans l'Ouest du Niger, subit une dégradation des terres qui se manifeste par une érosion hydrique et éolienne de forte intensité. Devant cette menace, on observe une inertie des populations. Ce travail analyse l'état de la dégradation des terres en lien avec l'attitude paysanne. L'étude s'appuie sur des visites dans des champs des terroirs villageois, des entretiens avec la population et la cartographie. Les résultats mettent en évidence que les jachères occupent encore 35% du secteur d'étude. Toutefois, 26% sont des jachères dégradées dans lesquelles, les superficies des sols nus indurés sont très importantes ainsi que le déchaussement des ligneux. La pauvreté justifie l'inertie paysanne constatée dans la lutte contre la dégradation des terres.

Mots clés : Niger ; Fakara ; Dégradation des terres ; inertie paysanne





### **Efficacité du sous-solage dans la restauration des sols sahéliens dégradés. Étude expérimentale sur le site de Tondi Kiboro, Niger**

Abdoulaye BOUBACAR NA-ALLAH<sup>1</sup>, Moussa MALAM ABDOU<sup>2\*</sup>, Aghali INGATAN WARZAGAN<sup>1,3</sup>, Ibrahim MAMADOU<sup>2</sup>, Oumarou FARAN MAIGA<sup>1</sup>, Ibrahim BOUZOU MOUSSA<sup>1</sup> et Luc DESCROIX<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Niamey, Département de géographie, BP 418 Niamey, Niger

<sup>2</sup> Université de Zinder, Département de géographie, BP 656 Zinder, Niger

<sup>3</sup> UMR 5001, Université de Grenoble-Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE-Grenoble), CS 40700, 38058 Grenoble Cedex 9

<sup>4</sup> IRD / PALOC, UMR 208 Muséum National d'Histoire Naturelle, CP 26, 75231 Paris cedex 05

---

\* Correspondance, courriel : [moussa.malamabdou@gmail.com](mailto:moussa.malamabdou@gmail.com)

#### **Résumé**

Ce travail évalue l'efficacité du sous-solage qui est une technique traditionnelle de gestion des sols. Il est effectué sur le site expérimental de Tondi Kiboro (Niger) où ont été mises en place une parcelle sous-solée de 600 m<sup>2</sup> et une parcelle témoin, non sous-solée afin de caractériser les propriétés hydrodynamiques des sols et la végétation. La conductivité hydraulique, la teneur en eau volumique et le ruissellement sont ainsi déterminés à l'aide respectivement du dispositif de la tensio-infiltrométrie, de la sonde à neutron et des parcelles de ruissellement. Des mesures de densité, de rejet et de recouvrement végétal sont en outre effectuées afin de caractériser la végétation. Les résultats montrent que le sous-solage améliore significativement la fonctionnalité de sol. Ainsi, sur la parcelle sous-solée, le ruissellement annuel est de 75 % moindre qu'à celui de la parcelle témoin, ce qui traduit alors une nette amélioration de l'infiltration et une disponibilité de réserve en eau pour la végétation. Le suivi du front d'humidité met en évidence une quasi-constance de la teneur en eau volumique ( $\approx 25\%$ ) dans le premier mètre du sol au mois d'août qui est le plus pluvieux de la saison. Le sous-solage, qui consiste à remanier le sol sur seulement une dizaine de cm, améliore donc le stockage en eau sur des profondeurs 10 fois supérieures et c'est, notamment, dans la zone racinaire. D'où une croissance et une régénération rapide de la végétation dans la parcelle. Cependant, la capacité de stockage en eau de la parcelle sous-solée diminue progressivement du fait de l'exposition de la parcelle aux pluies intenses sahéliennes. L'opération doit donc être renouvelée au cours de la saison des pluies.

**Mots-clés :** *gestion des sols, CES / DRS, propriétés hydrodynamiques de sol, Niger, Sahel.*

---