



UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI

Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires
Sahélo-Sahariens : Aménagement et Développement

Revue scientifique thématique semestrielle
Environnement et Dynamique des Sociétés

*Evaluation de la dégradation des terres
dans la zone de cultures pluviales du Niger*

Sous la direction de :
Professeur BOUZOU MOUSSA Ibrahim



Numéro
Spécial
Juin
2026



ISSN



1859 - 5146

Presse Universitaire
Niamey



UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI (NIGER)

Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires
Sahélo-Sahariens : Aménagement et Développement

LERTESS - AD**Revue scientifique thématique semestrielle****E**nvironnement et **D**ynamique des **S**ociétés

FACTEUR D'IMPACT (SJIFactor.com)		INDEXATION EDS	
2024	4,9		https://sjifactor.com/passport.php?id=23616
2023	4,866		https://universiteabdoumoumouni.deniamy.academia.edu/EnvironnementetDynamiquedesSoci%C3%A9t%C3%A9sEDS
2022	4,497		https://portal.issn.org/resource/ISSN/1859-5146
2021	4,09		https://orcid.org/0009-0006-0118-2004
2020	3,752		

Photo de couverture :

A : Vue de la bordure du plateau de Tondi Kiboro (Commune rurale de Dantiandou, Département de Kollo, Région de Tillabéri Niger - (Source : Google Earth Pro)

B : Revers du plateau de Hamdalaye aménagé en demi-lunes pastorales (Source : Abdoulaye Boubacar Na-Allah, Août 2025)

C : Vue de la mare de Tondi Kiboro (Commune rurale de Dantiandou, Département de Kollo, Région de Tillabéri Niger - (Source : Abdoulaye Boubacar Na-Allah, Août 2025)

MAQUETTE & PAO: Dr MAMAN WAZIRI MATO Zaneidou, LERTESS/AD, UAM - Niamey**Numéro Spécial****ISSN****1859-5146****JUIN 2026**

Note aux auteurs

La revue « Environnement et Dynamique des Sociétés » du Laboratoire d'étude et de recherche sur les territoires sahélo-sahariens : aménagement, développement est une revue thématique semestrielle. Elle publie en français ou en anglais des articles originaux ou des ouvrages résultant des recherches effectuées dans l'école doctorale Lettres, Arts, Sciences de l'Homme et de la Société par des chercheurs extérieurs dans les domaines d'intérêt de la revue. Pour faciliter l'édition, les auteurs sont invités à suivre les recommandations suivantes :

- [1]. En principe aucun article ne doit occuper plus de 15 pages dans la revue, tout compris, sachant qu'une page de la revue contient environ 500 mots.
- [2]. Le manuscrit doit être soumis en version numérique. L'article doit répondre à la structure suivante :
 - a) Pour un article qui est une contribution théorique et fondamentale : le titre (il doit être concis mais complet et précis), le nom et prénoms de l'auteur ou les noms et prénoms des auteurs suivis de son titre ou de leurs titres académiques ou professionnels, le nom de l'institution ou les noms des institutions d'appartenance de l'auteur ou des auteurs et son adresse ou leurs adresses (y compris les adresses mail). Le plan du texte doit répondre au schéma suivant : Introduction (justification du thème, problématique, hypothèses/objectifs scientifiques, approche), Développement articulé, Conclusion, Bibliographie.
 - b) Pour un article qui résulte d'une recherche de terrain : le titre (il doit être concis mais complet et précis), le nom et prénoms de l'auteur ou les noms et prénoms des auteurs suivis de son titre ou de leurs titres académiques ou professionnels, le nom de l'institution ou les noms des institutions d'appartenance de l'auteur ou des auteurs et son adresse ou leurs adresses (y compris les adresses mail). Le plan du texte doit répondre au schéma suivant : Introduction, Méthodologie, Résultats et Discussion, Conclusion, Bibliographie.
- [3]. Le texte au format A4, doit être saisi en police Times New Roman, taille 12 pour le corps du texte et 14 pour les titres et avec un interligne de 1,5. Les articulations d'un article, à l'exception de l'introduction et de la conclusion et de la bibliographie doivent être titrées et numérotées par des chiffres (exemples : 1. 1.1. 1.2. ; 2. ; 2.1. ; 2.2.1. ; 2.2.2. ; 3. ; etc.).
- [4]. Les auteurs peuvent envoyer leurs textes qui doivent être traités en Word sur PC par Internet à EDS : revueeds@gmail.com.
- [5]. Tout article doit être accompagné d'un résumé n'excédant pas 200 mots avec indication des mots clés au maximum 5 en français et d'un Abstract et des Key words en anglais. Ces résumés doivent permettre au lecteur d'apprécier exactement l'intérêt de l'article, les problèmes posés, les méthodes employées et les résultats obtenus. Ils doivent être rédigés avec le plus grand soin, dans une langue claire.
- [6]. Les illustrations qui doivent être pertinentes (photos, croquis, graphiques, cartes et tableaux) se limiteront au minimum nécessaire.
- [7]. Les références bibliographiques : elles doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (B. Yamba, 1975, p21). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné suivi de : « et al. ». A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique croissant et de date pour un même auteur le tout numéroté. Pour chaque référence, inclure les noms complets de tous les auteurs. Une référence en ligne (Internet) est acceptable si elle s'avère fiable et crédible, on prend soin de mentionner le lien (la page web). Exemple : ANTHELME Fabien, BOISSIEU Dimitri, GIAZZI Franck et WAZIRI MATO Maman - (Page consultée le 30 mai 2011) *Dégradation des ressources végétales au contact des activités humaines et perspectives de conservation dans le massif de l'Air (Sahara, Niger)* - Vertigo, La revue électronique en sciences de l'environnement, Vol.7 no2, Adresse URL : <http://www.vertigo.uqam.ca/>.

Exemples :

- ▽ **Pour un article de journal ou revue** : Nom (s) suivi du prénom (s) de l'auteur (s); la date de parution de l'article : le titre de l'article, le titre du périodique en italique et précédé de « in » ; le volume et le numéro de la première et de la dernière page de l'article. Exemple : BOUZOU MOUSSA Ibrahim., 2003 - Les loupes d'érosion, formes majeures de dégradation des terres de glaciés à sols indurés : Cas de Bogodjotou (Niger). In *Annales de l'Université Abdou Moumouni de Niamey*, Tome VII, pp. 220-228.
 - ▽ **Pour les ouvrages** : le nom de l'auteur précédé du prénom (s) ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage en italique ; le nombre de volumes et le nombre total de page ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Exemple : KILANI Mondher et WAZIRI MATO Maman, 2000 - *Gomba Hausa : dynamique du changement dans un village sahélien du Niger*, éditions Payot, Lausanne, 175 pages.
 - ▽ **Pour un chapitre dans un ouvrage** : le nom de l'auteur précédé du prénom (s) ; la date de l'édition ; le titre complet du chapitre ; le titre de l'ouvrage en italique, le nom de l'éditeur entre parenthèse ; la maison d'édition ; le lieu de l'édition. Exemple : MOTCHO Henri Kokou, 2007 - Dynamique urbaine et intégration régionale en Afrique de l'Ouest. - In : *Les États-nations face à l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest : le cas du Niger*, (WAZIRI MATO, éd.), Karthala, Paris, pp. 121-137.
 - ▽ **Pour un article d'acte de colloque** : le nom de l'auteur précédé du prénom (s) ; la date de l'édition ; le titre de l'article, titre du colloque précédé de in, le nom de la revue, le lieu d'édition, le volume et le numéro de la première et de la dernière page de l'article. Exemple : BOUZOU MOUSSA Ibrahim, 1998 - Dégradation des terres et pauvreté au Niger : cas du terroir villageois de Windé - Bago (Dallol Bosso Sud). In: *Actes du Colloque du Département de Géographie FLSH/UAM Niamey 4-6 juillet 1996. Urbanisation et pauvreté en Afrique de l'Ouest*. Annales de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, n° Hors-Série, pp.49-61.
 - ▽ **Pour une agence gouvernementale ou internationale considérée comme auteur** : Ministère de l'Aménagement du Territoire et du Développement Communautaire, 2006 - *Guide national d'élaboration d'un plan de développement communal*, Direction Générale du Développement Communautaire, 35 pages.
- [8]. Les notes : elles doivent être en bas de chaque page et mentionnées dans le texte par leur numéro respectif. La police est la même avec le texte mais de taille 10.
 - [9]. Les cartes, les graphiques et les figures : ils doivent être produits à l'échelle définitive avec des dimensions adaptées au format de la revue. Les titres sont placés en haut.
 - [10]. Les photographies : il faut fournir des tirages bien contrastés en couleurs ou en noir et blanc. Les titres sont placés en haut.
 - [11]. Les tableaux : ils sont numérotés en chiffre arabe et le titre doit être placé en bas.

UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI (NIGER)*Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens : Aménagement et Développement***Revue scientifique thématique semestrielle****Environnement et Dynamique des Sociétés****DIRECTEURS DE PUBLICATION****Directeur de publication** : Pr AMADOU Boureima**Directeur Adjoint de publication** : Pr WAZIRI MATO Maman**COMITE SCIENTIFIQUE**

Pr AMADOU Boureima, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr BOUZOU MOUSSA Ibrahim, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr MOTCHO Kokou Henri, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr ISSA DAOUDA Abdoul-Aziz, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr TANDINA OUSAMANE Mahamane, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr TIDJANI ALOU Mahamane, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr YAMBA Boubacar, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr ZOUNGROUNA Pierre Tanga, Université J. K. de Ouagadougou (Burkina Faso) ; Pr WAZIRI MATO Maman, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr BONTIANTI Abdou, Université Abdou Moumouni, Niamey ; Pr MOUNKAÏLA Harouna, Université Abdou Moumouni, Niamey, Pr. BOULAMA Kaoum, Université Abdou Moumouni de Niamey, Pr BOUKPESSI Tchaa, Université de Lomé (Togo), Pr. YABI Ibouaïma, Université d'Abomey-Calavi (Benin), Pr. KABLAN N'guessan Hassy Joseph, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan (Côte d'Ivoire), Pr. KADET GAHIE Bertin, Ecole Normale Supérieure d'Abidjan (Côte d'Ivoire), KADOUZA Padabô, Université de Kara (Togo).

COMITE DE REDACTION**Rédacteur en chef** : Pr WAZIRI MATO Maman**Rédacteur en chef Adjoint** : Pr DAMBO Lawali

Membres : Pr MOUNKAILA Harouna, Pr BODE Sambo, Dr ABDOU YONLIHINZA Issa (MC), Dr YAYE SAIDOU Hadiara (MC), Dr BAHARI IBRAHIM Mahamadou (MC), Dr MAMAN Issoufou (MC), Dr KONE MAMADOU Mahaman Moustapha (MC)

Nota Bene : Les opinions et analyses présentées dans ce numéro n'engagent que leurs auteurs et nullement la rédaction de la revue Environnement et Dynamique des Sociétés (EDS).

ADRESSE :*Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens : Aménagement et Développement***UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI****BP** : 418 Niamey - NIGER.**Email:** revueeds@gmail.com **Site :** www.revue-eds.com

© Copyright : Revue EDS, 2026

COMITE DE LECTURE

- ✿ Pr AMADOU Boureima, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*
- ✿ Pr DAMBO Lawali, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*
- ✿ Pr MOTCHO Kokou Henri, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*
- ✿ Pr. BODE Sambo, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*
- ✿ Pr. SOULEY Kabirou, *Université André Salifou de Zinder (Niger)*
- ✿ Pr. WAZIRI MATO Maman, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*
- ✿ MC. ABBA Bachir, *Université André Salifou de Zinder (Niger)*
- ✿ MC. BAHARI IBRAHIM Mahamadou, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*
- ✿ MC. MALAM ABDOU Moussa, *Université André Salifou de Zinder (Niger)*
- ✿ MC. MAMADOU Ibrahim, *Université André Salifou de Zinder (Niger)*
- ✿ MC. MAMAN Issoufou, *Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
<i>BOUZOU MOUSSA Ibrahim</i>	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE TERROIR DE SANSANE HAOUSSA (COMMUNE DE KOURTHEYE, REGION DE TILLABERI, NIGER)	11
<i>MOUNKEILA NOUHOU Abdourhamane¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{2*}</i>	
EFFETS DES CHANGEMENTS SPATIO-TEMPORELS DE 1985 A 2022 DE L'OCCUPATION DES SOLS ET DES DEBITS SUR LA DYNAMIQUE DU FLEUVE NIGER DE BAC FARIE A SEKOUKOU AU NIGER	26
<i>MAMOUDOU MOSSI Abdoul-Nourou¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim²</i>	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE KABE BANGOU (COMMUNE RURALE DE SIMIRI, DEPARTEMENT DE OUALLAM, NIGER)	43
<i>MOUNKAILA DJIBO Zakari¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim²</i>	
ÉVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT AVAL DE LA MARE DE KONGOU GOROU A LA PERIPHERIE DE LA VILLE DE NIAMEY AU NIGER	57
<i>KASSOUM HASSANE Roukayatou¹, BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{2*} et TANKARI MAIFADA Moussa³</i>	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DU KORI ADOUWAL DANS LE DEPARTEMENT DE SAY AU NIGER	74
<i>YACOUBA SEYBOU Abdoul Rachidou¹ et BAHARI IBRAHIM Mahamadou^{2*}</i>	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE TERROIR VILLAGEOIS DE MARADI-ARLIT DE L'AIRE AYI NOMA (COMMUNE RURALE DE TAMOU, REGION DE TILLABERI, NIGER)	92
<i>AWAL HOUSSEINI Mahamane Sani¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{2*}</i>	
ÉVALUATION DE LA DÉGRADATION DES TERRES DANS LE TERROIR DE FANDOU MAYAKI (COMMUNE RURALE DE TONDIKANDIA/TILLABÉRI/ NIGER)	105
<i>NOMA TALIBI Younoussa ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{2*}</i>	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT FONCTIONNEL DE LA MARE DE TONDI KIBORO (COMMUNE RURALE DE DANTIANDOU, DEPARTEMENT DE KOLLO, REGION DE TILLABERI, NIGER)	119
<i>TANKARI MAIFADA Moussa¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{2*}</i>	
EVALUATION DU RISQUE D'EROSION HYDRIQUE A L'AIDE DE L'USPED SUR LE BASSIN VERSANT FONCTIONNEL DE LA MARE DE TONDI KIBORO (DEGRE CARRE DE NIAMEY, NIGER)	134
<i>BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{1*} et TAHIROU Souley²</i>	

EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DU KORI DE KABANGOU DU VILLAGE DE KOLBOU DE LA COMMUNE RURALE DE KIOTA (DOSSO, NIGER)	152
SOUMANA SALEY Oumarou ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LA COMMUNE RURALE DE KARAKARA (REGION DE DOSSO, NIGER)	167
GUERO NOMAO Moussa ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LA COMMUNE RURALE DE MATANKARI (DEPARTEMENT DE DOGON DOUTCHI, REGION DE DOSSO, NIGER)	182
ROUAFFI RORO Mahamadou ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE SECTEUR AVAL DU BASSIN VERSANT DE DOUTSIN BARGOUME, (COMMUNE DE TIBIRI, REGION DE DOSSO)	195
HAMIDIN BRAZE Chaibou ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MARE DE DOGONDOUTCHI (REGION DE DOSSO, NIGER)	211
BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{1*} , MAIFADA MOUSSA Tankari ² et SAIDOU IDI Nassirou ³	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE BASSIN VERSANT DU KORI SAKKARAWA (COMMUNE RURALE DE OURNI, REGION DE TAHOUA, NIGER)	226
MAHAMADOU MAIGAYA Issoufou ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
EVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DU SITE RAMSAR DU LAC MADAROUNFA DANS LA REGION DE MARADI AU NIGER	241
SANI OUSMANE Abdoul Hadi ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
ÉVALUATION DE LA DEGRADATION DES TERRES DANS LE TERROIR D'YATAOUA (COMMUNE URBAINE DE TESSAOUA, MARADI, NIGER)	260
MAMAN ISSAKA Sahirou ¹ et BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{2*}	
RESTAURATION DES SOLS DEGRADÉS EN ZONE SAHÉLIENNE : EFFETS RÉMANENTS DU SOUS-SOLAGE D'UN GLACIS MIS EN DÉFENS SUR LE SITE AMMA-CATCH DE TONDI KIBORO, ANALYSES PAR TÉLÉDETECTION, DYNAMIQUE D'OCCUPATION DES SOLS ET STRUCTURE DU PAYSAGE	276
BOUZOU MOUSSA Ibrahim ^{1*} , BOUBACAR NA-ALLAH Abdoulaye ² , DESCROIX Luc ³ , MALAM ABDOU Moussa ⁴ , INGATAN WARZAGAN Aghali ⁵ , TANKARI MAIFADA Moussa ⁶ et SALOUHOUDINE IBRAHIM Hakibou ⁷	
CONCLUSION	291
BOUZOU MOUSSA Ibrahim	

RESTAURATION DES SOLS DEGRADÉS EN ZONE SAHÉLIENNE : EFFETS REMANENTS DU SOUS-SOLAGE D'UN GLACIS MIS EN DÉFENS SUR LE SITE AMMA-CATCH DE TONDI KIBORO, ANALYSES PAR TÉLÉDETECTION, DYNAMIQUE D'OCCUPATION DES SOLS ET STRUCTURE DU PAYSAGE

BOUZOU MOUSSA Ibrahim^{1*}, BOUBACAR NA-ALLAH Abdoulaye², DESCROIX Luc³, MALAM ABDOU Moussa⁴, INGATAN WARZAGAN Aghali⁵, TANKARI MAIFADA Moussa⁶ et SALOUHOUDINE IBRAHIM Hakibou⁷

Professeur Titulaire, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger

Docteur en géographie, Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)

Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR 208 PALOC / MNHN, Département Hommes, Nature, Sociétés. 75231 Paris cedex 05, France

Maître de Conférences, Université André Salifou de Zinder, Niger

Docteur en géographie, Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)

Doctorant, Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-sahariens, ED Lettres, Art, Sciences de l'Homme et de la Société, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger

Doctorant, Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-sahariens, ED Lettres, Art, Sciences de l'Homme et de la Société, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger

**Correspondant courriel : ibrahimb1958@gmail.com*

Résumé

Cette étude évalue l'effet rémanent du sous-solage sur la restauration des sols dégradés en zone sahélienne (Ouest du Niger) sur une période de 12 ans (2013-2024) en combinant des observations de terrain (relevés de la végétation herbacée et ligneuse) et analyses du paysage (télédétection, fragmentation, modélisation Markov). L'aménagement par sous-solage, associé à des techniques biologiques (clôture, ensemencement et branchage) a permis une reconversion notable des croûtes d'érosion (85 % en 2010) vers un couvert végétal atteignant 71 % en 2019. Cette reconquête s'accompagne d'une structuration spatiale du paysage à l'échelle de la parcelle et une diversité accrue (indice de Shannon) passant respectivement 0,53 en 2010 à 0,78 en 2019. Mais sans entretien régulier, une régression rapide a été observée après 2019 : chute du couvert végétal à 26,7 % en 2024, fragmentation accrue et reconstitution des croûtes. Le modèle Markov indique une probabilité de 0,73 de rebasculer vers la croûte d'érosion cinq ans après la dernière intervention. À l'horizon 2035, la projection spatiale anticipe une ré-fragmentation et une diversité due à la juxtaposition de surfaces végétalisées, encroûtées et semi-dégradées. Ces résultats sont corroborés par les données terrain avec 63 % d'espèces recrutées durant la première phase de l'aménagement (2013-2016), 23 % durant la deuxième phase (2017-2020) et 14 % durant la dernière (2021-2024). Les ligneux présentent une variabilité de résilience selon les espèces : *Guiera senegalensis* se maintient mieux qu'*Acacia nilotica*.

Ces résultats confirment l'intérêt du sous-solage comme levier de restauration à court terme, mais soulignant la nécessité d'une gestion adaptative intégrant des réinterventions tous les 4 à 5 ans, appuyées par des techniques biologiques pour garantir la durabilité écologique en milieu sahélien.

Mots clés : Sous-solage, restauration des sols, diversité végétale, télédétection, Niger, Sahel

Abstract

This study assesses the residual effects of subsoiling on the restoration of degraded soils in the Sahelian zone (western Niger) over a 12-year period (2013-2024), combining field observations (herbaceous and woody vegetation surveys) with landscape analyses (remote sensing, fragmentation assessment, and Markov chain modelling). The subsoiling treatment, combined with biological techniques (fencing, seeding, and brush layering), enabled a substantial conversion of erosion crusts (85 % in 2010) toward a vegetation cover reaching 71 % in 2019. This vegetation recovery was accompanied by spatial structuring of the landscape at the plot scale and increased diversity, as measured by the Shannon index, which rose from 0.53 in 2010 to 0.78 in 2019. However, in the absence of regular maintenance, a rapid regression was observed after 2019: vegetation cover declined to 26.7% in 2024, fragmentation increased, and erosion crusts re-established. The Markov model indicates a probability of 0.73 of reverting to an erosion crust state five years after the last intervention. By 2035, spatial projections anticipate renewed fragmentation and increased diversity attributable to the juxtaposition of vegetated, crusted, and semi-degraded surfaces. These results are corroborated by field data, with 63% of species recruited during the first phase of the restoration (2013-2016), 23 % during the second phase (2017-2020), and 14% during the final phase (2021-2024). Woody species exhibited variable resilience depending on the taxon: *Guiera senegalensis* showed greater persistence than *Acacia nilotica*. The finding confirms the value of subsoiling as a short-term restoration driver, while highlighting the necessity of adaptative management integrating re-interventions every 4 to 5 years, supported by biological techniques, to ensure long-term ecological sustainability in Sahelian environments.

Keywords: Subsoiling, soil restoration, plant diversity, remote sensing, Niger, Sahel

Introduction

Les écosystèmes sahéliens, notamment ceux de l'Ouest du Niger, sont confrontés à une dynamique de dégradation rapide sous l'effet conjugué de la variabilité climatique et des pressions anthropiques croissantes. Depuis les années 1970, la région est marquée par des épisodes de sécheresse sévères et récurrents qui ont

altéré durablement la productivité des terres, la régénération naturelle des végétaux, ainsi que les pratiques agropastorales traditionnelles (M. H. Assouma et al., 2019; P. Hiernaux et al., 2024; S. E. Nicholson, 2013; L. Olsson et al., 2005).

Ces mutations socio-environnementales se traduisent, entre autres, par la disparition des jachères, l'extension continue des terres agricoles, et l'exploitation non durable des ressources forestières (O. Mertz et al., 2009). À titre d'exemple, la région de Tillabéry, à laquelle appartient le site d'étude de Tondi Kiboro, a vu sa population quadrupler de 1977 à 2012 (INS, 2012), intensifiant la pression foncière et contribuant à l'amplification des processus d'érosion hydrique et éolienne.

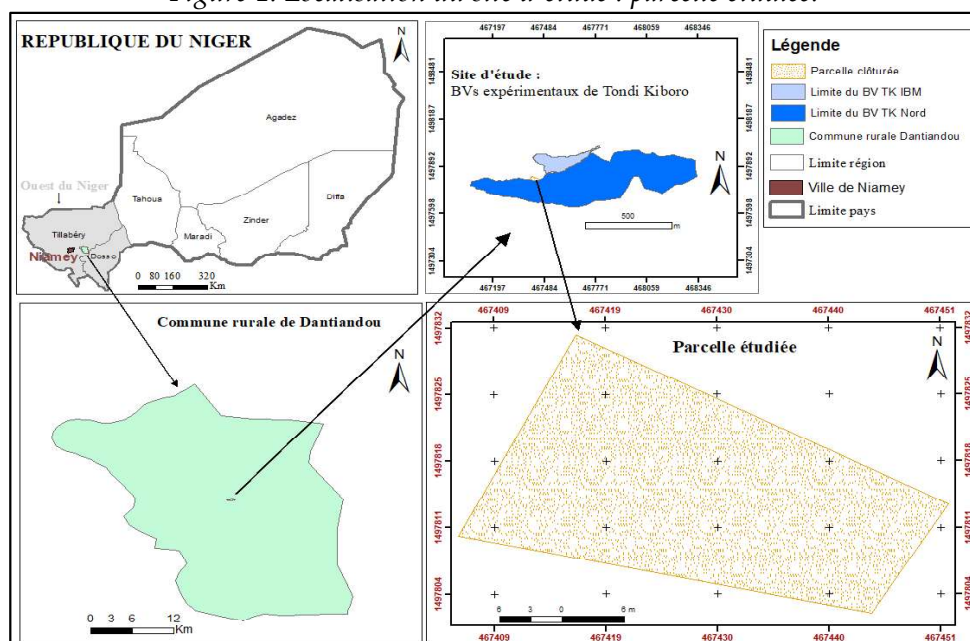
Dans ce contexte de vulnérabilité croissante, plusieurs approches d'aménagement ont été expérimentée depuis les années 80 à travers des programmes nationaux et internationaux tels que le Projet de Développement Rural Intégré de Keita ou encore les Projets CES/DRS et la grande muraille verte (R. Chris et al., 2009; A. Dia et al., 2010; C. Reij, 1996). Ces programmes ont permis la promotion de techniques de gestion durables des terres telles que les cordons pierreux, les demi-lunes, les zaï, ou encore le sous-solage manuel.

À l'échelle du Niger, les études évaluant l'efficacité du sous-solage en conditions sahéniennes restent rares, fragmentées ou peu diffusées (Ministère de l'Environnement, 2014). Dans ce cadre, notre étude vise à documenter les effets rémanents du sous-solage, sur 12 ans, sur la dynamique du paysage et la diversité floristique.

1. Présentation du site d'étude

L'étude a été conduite sur le glaci encroûté de Tondi Kiboro, situé dans la zone sahéniennne de l'Ouest du Niger (figure 1).

Figure 1. Localisation du site d'étude : parcelle étudiée.



2. Matériel et méthode

2.1. Protocole d'aménagement

En mai 2013, une parcelle expérimentale d'environ 700 m² a été sélectionnée sur la partie amont du glacis, zone connue aussi sous le nom de piedmont dégradé (figure 1a). Cette parcelle a été clôturée dès juillet 2013 pour éliminer les perturbations anthropiques et animales. Le sous-solage manuel, réalisé à l'aide d'une pioche, à consister à rompre la croûte superficielle sur une profondeur de 10 à 15 cm, selon la capacité de l'opérateur. L'objectif visé est d'améliorer la porosité, l'infiltration de l'eau et la pénétration racinaire (R. Zougmore et al., 2014).

L'aménagement en sous-solage a été complété par un ensemencement de graines locales « tout-venant » incluant des espèces ligneuses et herbacée (*Guiera senegalensis*, *Andropogon gayanus*, *Ctenium elegans*, *Cenchrus biflorus*). En août 2013, 50 plants ont été introduits, soit 35 pieds d'*Acacia senegal* et 15 de *Ziziphus mauritiana*. En 2017, un retraitement par sous-solage a été réalisé, accompagné d'un ajout de graines et de branchages éparpillés, pour renforcer la rétention hydrique et la protection du sol.

Figure 2. Choix de la parcelle à aménager



2.2. Télédétection, structure paysagère et modélisation

Markov

2.2.1. Traitement des images satellitaires

Les cartes d'occupation des sols (2010, 2013, 2019 et 2024) ont été produites à partir d'images Google Earth classifiées dans Arc GIS, analysées dans TerrSet Libera GIS / Idrisi. Le choix de ces dates a été fait en fonction de la disponibilité des images et des périodes du suivi *in situ*. Les étapes incluent la classification supervisée

(maximum de vraisemblance), le croisement temporel des cartes (CrossTab) et l'extraction des transitions de classes.

2.2.2. Modélisation par chaînes de Markov

Le modèle CA-Markov (TerrSet) a permis d'évaluer les probabilités de transition entre classes d'occupation (croûte d'érosion, croûte structurale et végétation) sur les périodes 2010-2013, 2013-2019, 2019-2024. Les matrices de transition permettent d'identifier les classes les plus instables ou les plus résilientes, et de simuler le paysage projeté à l'horizon 2035.

2.2.3. Analyse de la fragmentation et diversité paysagère

Les indices de fragmentation spatiale ont été calculés à l'aide du logiciel fragstats, incluant les indices SHDI (Shannon) et SIDI (Simpson). L'objectif de ces analyses consiste à suivre l'évolution de la structure spatiale de la végétation et la complexification ou la simplification du paysage au fil du temps.

2.3. Dispositif expérimental et collecte de données in situ

2.3.1. Suivi de la végétation

La végétation herbacée a été inventoriée selon la méthode des quadrats systématiques, disposés le long de deux transects de 5 m posés en amont et en aval de la parcelle, avec des relevés tous les 10 cm. Le recensement des ligneux est exhaustif chaque année en septembre, avec des mesures complémentaires de la hauteur et l'estimation du taux de recouvrement visuel. Les données ont été analysées selon les approches phytosociologiques.

2.3.2. Évaluation des ligneux introduits et spontanés

Un suivi individuel des plans introduits a permis d'analyser les taux de survie, la résilience selon les espèces et la croissance en hauteur. Des comparaisons interannuelles ont été réalisées pour évaluer l'effet rémanent du sous-solage sur les ligneux.

2.3.3. Analyse de l'effet temporel et rémanent du sous-solage

L'évaluation de l'effet rémanent du sous-solage a été structurée en trois phases : la phase initiale post-aménagement (2013-2016), la phase post-retraitement (2017-2024), et l'ensemble de la durée depuis l'aménagement initial. Des modèles de régression et des tests de significativité (p-value), avec le logiciel Excel et Xlstat, ont été utilisés pour établir les relations entre la dynamique temporelle et les indicateurs écologiques : diversité floristique, densité ligneuse et surface végétalisée. Une attention particulière a été portée à la capacité de relance écologique par la reprise du sous-solage.

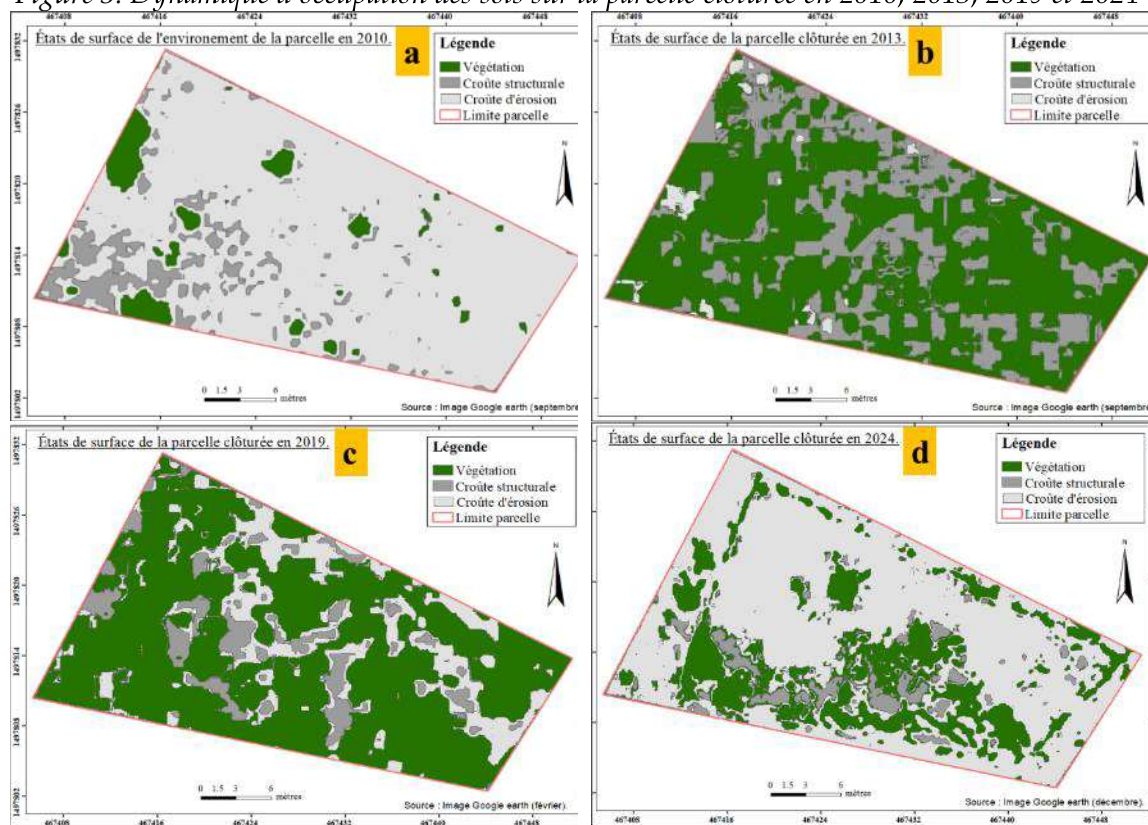
3. Résultats

3.1. Dynamique de l'occupation des sols et fragmentation du paysage à l'échelle parcellaire

3.1.1. Dynamique de l'occupation des sols

L'analyse diachronique des cartes d'occupation des sols à l'échelle de la parcelle clôturée (figure 3 et tableau 1), illustrée par les figures 4 et 5, met en évidence une dynamique marquée par des phases successives de forte dégradation (avant aménagement, antérieur à 2013), de restauration rapide (post-aménagement, 2013-2019), de régression écologique progressive (après 2019) et la tendance sur la projection à l'horizon 2035.

Figure 3. Dynamique d'occupation des sols sur la parcelle clôturée en 2010, 2013, 2019 et 2024



Année	Type d'occupation des sols (%)			
	Croûte d'érosion	Croûte structurale	Végétation	Total
2010	84,7	9,3	6	100
2013	2,3	29,1	68,6	100
2019	19,2	9,7	71,1	100
2024	68	5,4	26,6	100

Tableau 1. Composition de l'occupation des sols à l'échelle de la parcelle clôturée

Le tableau 1 montre qu'en 2010, la parcelle est caractérisée par une situation de dégradation avancée, avec une prédominance écrasante de la croûte d'érosion (84,7 %) et une végétation résiduelle réduite à 6 %. C'est la configuration typique des systèmes sahéliens soumis à des processus d'érosion intense (physique et anthropique). La présence minimale de croûte structurale (9,3 %) indique les vestiges de stabilité passée, rapidement effacés par la dynamique érosive. L'intervention, par sous-solage en 2013, combinée à des techniques biologiques (clôture, paillage et ensemencement avec du "tout-venant"), a entraîné une reconversion remarquable de la parcelle par rapport à la situation avant aménagement (voir figure 2). La végétation couvre jusqu'à 68,6 % de la surface principalement dominée par les herbacées (figure 4a). Simultanément, la croûte d'érosion chute à 2,3 % (figure 5), tandis que la croûte structurale augmente à 29,1 %, ce qui reflète une réorganisation du sol vers des formes stables, défavorables au ruissellement (figure 4b).

En 2019, la couverture végétale atteint un maximum de 71,1 %, soit un état de végétalisation optimale, traduisant un pic d'efficacité de l'aménagement (figure 4c). Cependant, la part de la croûte d'érosion remonte légèrement à 19,2 % (figure 5).

Entre 2020 et 2024, la végétation chute brutalement de 71,1 % à 26,6 %, soit une perte de 44,4 points en 5 ans (figure 4d). C'est la phase des dépôts sableux éoliens et la forte remontée de la croûte d'érosion (68 %). La croûte structurale, quant à elle, régresse à 5,4 % traduisant l'effondrement des structures édaphiques stabilisées. Ce retournement rapide indique que, sans réintervention, les acquis écologiques du sous-solage s'estompent rapidement. La reconversion des surfaces dégradées en végétation est possible, mais elle est réversible sans un plan de gestion durable (stratégies de réintervention cyclique).

Figure 4. Illustration de l'évolution du couvert végétal sur la parcelle clôturée

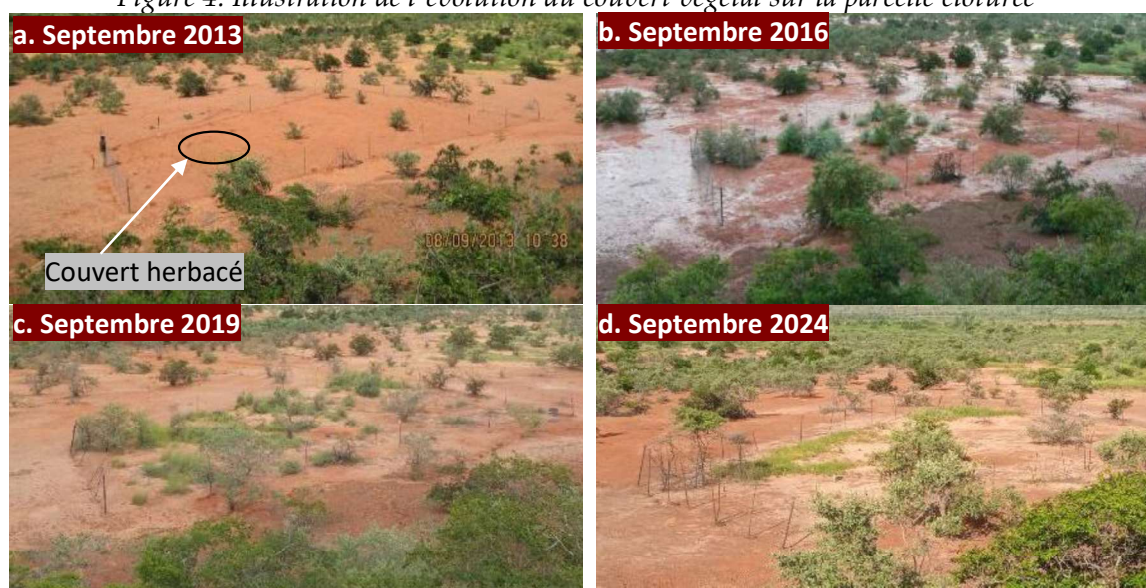
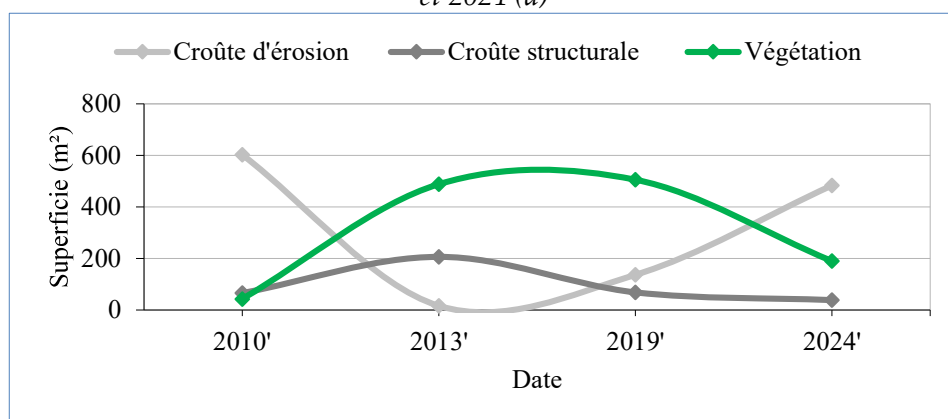


Figure 5. Dynamique des états de surface sur la parcelle clôturée de 2010 (a), 2013 (b), 2019 (c) et 2024 (d)



3.1.2. Évolution des états de surface par modélisation de Markov

L'analyse par chaînes de Markov a permis de quantifier les probabilités de transition entre les classes d'occupation des sols (croûte d'érosion, croûte structurales, végétation) sur trois périodes clés : 2010-2013, 2013-2019 et 2019-2024. Cette approche aléatoire a permis de mieux comprendre la trajectoire d'évolution du paysage à l'échelle parcellaire en intégrant des dynamiques de conversion des différentes classes d'occupation.

La première phase a amorcé une restauration rapide et massive des états initiaux en 2010-2012 vers des classes de végétation (2013), avec une probabilité de conversion de 0,73 à 0,74, quel que soit la classe de départ (tableau 2). Cela montre que le paysage de la parcelle aménagée a connu un changement de régime écologique, passant rapidement d'un état dominé par la dégradation à un état végétalisé.

	Croûte d'érosion	Croûte structurale	Végétation	Total
Croûte d'érosion	0,03	0,24	0,73	1
Croûte structurale	0,03	0,23	0,74	1
Végétation	0,03	0,24	0,73	1

Tableau 2. Phase 1-2010 à 2013 : amorce rapide de restauration

La deuxième période de conversions importantes vers la végétation s'est caractérisée par un net ralentissement, notamment la diminution des chances de reconversion vers le couvert végétal (tableau 3). En effet, les surfaces en croûte d'érosion ont encore 53 % de chances de devenir végétation (contre 73 % en 2013). Les croûtes structurales ont 61 % de chance de devenir végétation.

En outre, la résilience de la végétation existante a été relativement forte : 76 % des pixels végétalisés le restent depuis 2013 à 2019.

	Croûte d'érosion	Croûte structurale	Végétation	Total
Croûte d'érosion	0,18	0,29	0,53	1
Croûte structurale	0,22	0,18	0,61	1
Végétation	0,16	0,08	0,7	1

Tableau 3. Phase 2 – 2013-2019 : poursuite des transitions mais avec ralentissement

Quant à la troisième phase, elle marque une rupture écologique significative et inquiétante. Contrairement aux phases précédentes, toutes les classes, y compris la végétation, basculent massivement vers la croûte d'érosion (tableau 4). Une surface végétalisée en 2019 à 73 % de chance de redevenir croûte d'érosion d'ici 2024. Même les croûtes structurales retournent à un état plus dégradé avec une probabilité de 74 %. Ce phénomène traduit la non rémanence des effets du sous-solage sans entretien régulier. L'évolution du système vers un nouvel état de dégradation révèle que le temps seul suffit à éroder les acquis, même sur des terrains déjà restaurés et la projection à l'horizon 2035 confirme ces résultats (tableau 5).

	Croûte d'érosion	Croûte structurale	Végétation	Total
Croûte d'érosion	0,74	0,04	0,22	1
Croûte structurale	0,74	0,04	0,22	1
Végétation	0,73	0,04	0,23	1

Tableau 4. Phase 3 — 2019 à 2024 : basculement vers la dégradation

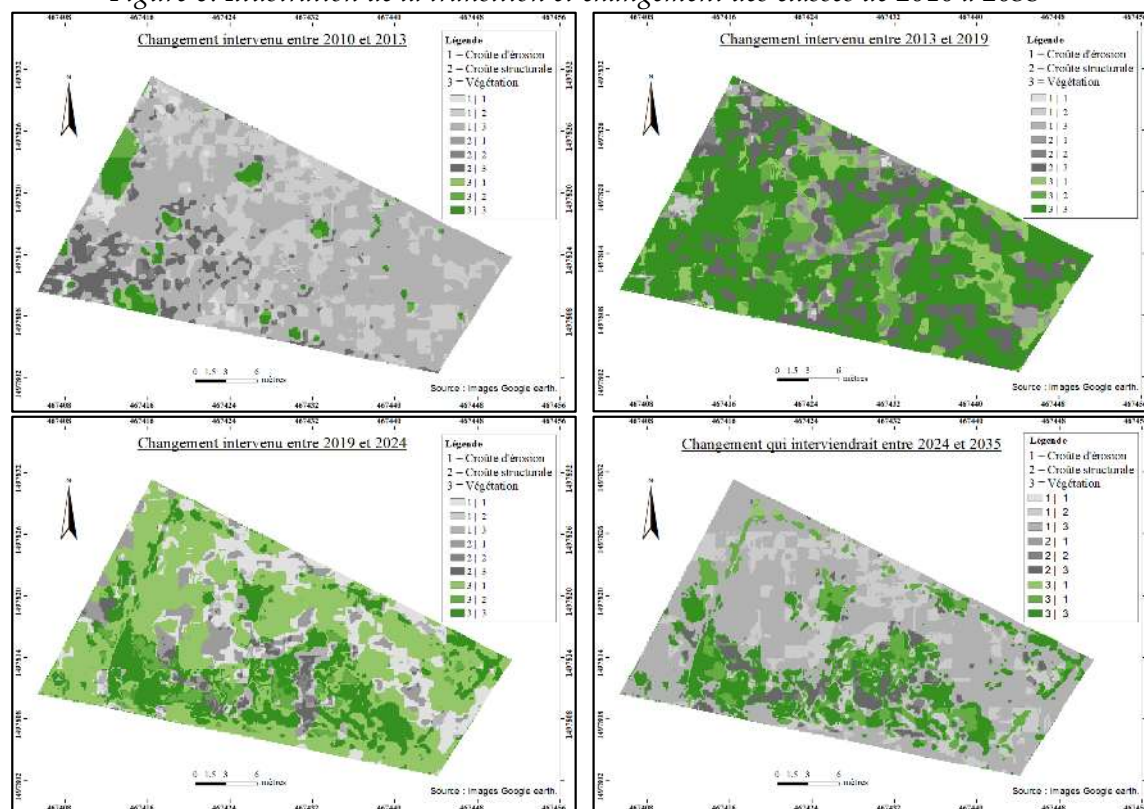
	Croûte d'érosion	Croûte structurale	Végétation	Total
Croûte d'érosion	0,59	0,05	0,37	1
Croûte structurale	0,68	0,03	0,29	2
Végétation	0,68	0,06	0,25	3

Tableau 5 Projection des changements qui interviendront à l'horizon 2035

La projection montre que le basculement vers les croûtes d'érosion et structurale se maintient d'une manière remarquable. Une surface végétalisée en 2024 à 68 % de chance de redevenir croûte d'érosion d'ici 2035.

Ces différentes probabilités de conversion sont illustrées dans la figure 6.

Figure 6. Illustration de la transition et changement des classes de 2010 à 2035



3.1.3. Fragmentation du paysage à l'échelle parcellaire

Les indices de diversité calculés (Shannon et Simpson) ont permis de mesurer la complexité de la répartition des unités paysagères à l'échelle parcellaire (tableau 6). De 2010 à 2019, c'est l'augmentation de la diversité portée par la reconversion végétale. En 2019, le pic de développement est atteint. Mais de cette période à 2024, une légère baisse de la diversité se constate et reflète la ré-fragmentation progressive des unités végétales. La prédiction en 2035 signale une perte écologique marquée par une perte de compacité végétale, une montée en morcellement, et un retour vers des états de dégradation dominés par des croûtes (érosion et structurale).

Année	Shannon	Simpson	Interprétation
2010	0,53	0,27	Faible diversité, dominance des croûtes
2013	0,71	0,44	Diversité en hausse, début de complexification
2019	0,78	0,45	Pic de diversité, haute hétérogénéité
2024	0,77	0,46	Début de régression, complexité encore présente
2035	0,70	0,44	Diversité en baisse, mais hétérogénéité relative

Tableau 6. Analyse de la diversité par les indices de Shannon et de Simpson.

3.2. Analyse écologique de la résilience des ligneux dans la parcelle

La croissance et la densité des ligneux suivent une évolution en trois temps. Dès 2013, une forte augmentation du nombre d'individus ligneux est observée, atteignant une densité maximale (1 pied / 3 m²) (figure 8), soit une recolonisation

végétale significative. Cette densité diminue progressivement au fil des années pour atteindre 1 pied / 28 m² en 2024, reflétant un affaiblissement de l'effet des aménagements. Notons que la perte de densité a été plus importante durant la phase initiale post-sous-solage que durant la phase post-retraitement. En outre, l'analyse des comportements spécifiques montre des différences significatives entre les espèces et/ou individus présents, introduits et spontanés. *Guiera senegalensis* (36 individus en 2013 à 15 en 2024 (figure 9), espèce déjà préexistante à l'aménagement, démontre une excellente résilience, avec une faible variation de hauteur moyenne (figure 9). Quant à *Acacia nilotica*, elle témoigne d'une bonne adaptation : sa hauteur moyenne passe de 10 cm en 2013 à 300 cm en 2024 (figure 9) ; et reste stable après 2017 (figure 9).

Ces résultats soulignent l'effet positif mais temporaire du sous-solage sur l'établissement et la croissance des ligneux, et traduit l'importance de la complémentarité entre interventions mécaniques (tous 4-5 ans) et techniques biologiques (ensemencement, branchage). Une telle gestion adaptative est indispensable pour assurer la pérennité des acquis écologiques en milieu sahéliens.

Figure 7. Évolution du ratio de la densité des ligneux par superficie en m²

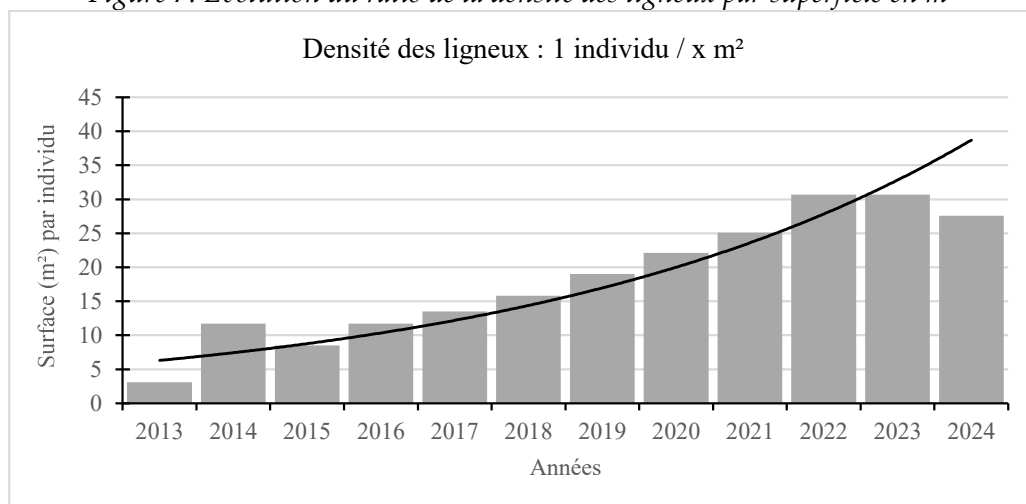


Figure 8. Évolution de la survie des individus de *Guiera senegalensis* et d'*Acacia nilotica*

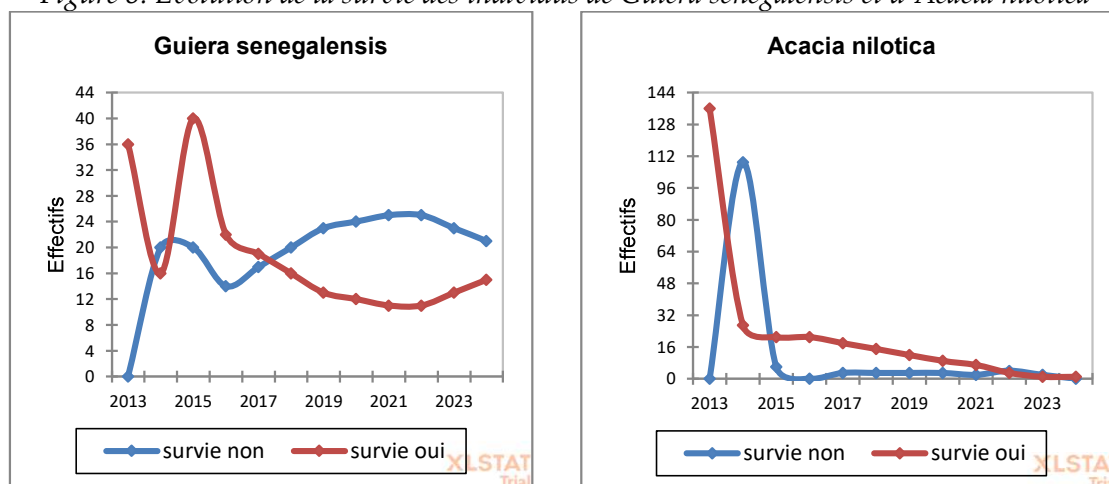
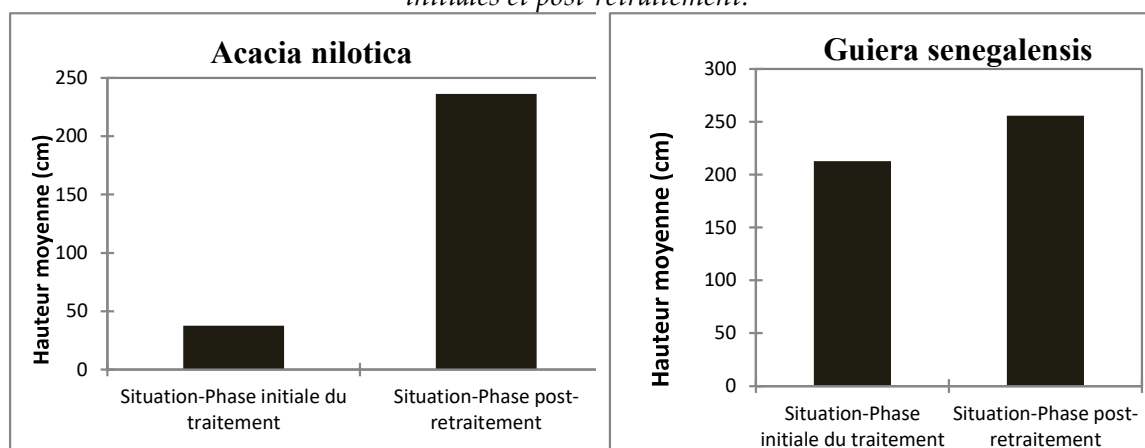


Figure 9. Croissance moyenne d'*Acacia nilotica* et *Guiera senegalensis* durant les phases initiales et post-retraitement.



Par ailleurs, la faible résilience a été notée aussi chez les espèces introduites (plantées), notamment *Ziziphus mauritiana* et *Acacia senegal*, dont le taux de mortalité est le plus élevé, avec leur disparition complète deux ans après la plantation (2013 à 2014), traduisant leur dépendance à des conditions d'entretien très coûteux.

4. Discussion

La région Ouest du Niger, à l'instar de plusieurs secteurs sahéliens, est confrontée à une dégradation sévère des sols accentuée par la variabilité climatique, la pression anthropique et les phénomènes d'érosion hydrique.

Du point de vue de l'occupation des sols et évolution du paysage à l'échelle parcellaire, les données de télédétection montrent un basculement net dans la dynamique d'occupation des sols. Après la restauration rapide observée entre 2010 et 2013, avec une augmentation de la végétation de 6 à 69 % et une forte diminution de la croûte d'érosion, la période 2019-2024 illustre un retour brutal à la dégradation (végétation à seulement 26,6 %, croûte d'érosion à 68 %). Ce retournement rapide souligne la forte nature rémanente, mais temporaire, des bénéfices du sous-solage, qui sans entretien régulier, perd en efficacité (voir tableau 1, 4 et 5). Ces observations concordent avec les travaux de (I. Bouzou Moussa et al., 2020; P. Hiernaux, 2013), qui décrivent l'instabilité des écosystèmes sahéliens à l'érosion.

Les modélisations par chaîne de Markov mettent en avant la résistance initiale du couvert végétal (76 % de stabilité sur la période 2013-2019), mais aussi la fragilité du système à moyen terme, traduite par l'augmentation de la fréquentation des états dégradés (croûtes d'érosion) à la fin du suivi (2019-2024). Pour garantir une persistance du gain écologique, il apparaît impératif de planifier des réinterventions et combinaisons techniques adaptées (sous-solage, ensemencement clôture, branchage), des recommandations qu'on retrouve chez R. Zougmore et al. (2014).

La diversité floristique observée (35 espèces, 14 familles) est dominée par des graminées. Cette structure floristique, ainsi que la dynamique de recrutement, la

forte augmentation initiale, puis stabilisation, voire déclin sans réintervention, recourent les tendances décrites dans les parcs agroforestiers sahéliens (P. Hiernaux et al., 2006; A. Kiema et al., 2013, p. 5, 2008, p. 287). A. Kiema et al. (2013, 2008) ont également rapporté un doublement de la richesse floristique dans les premières années suivant la mise en œuvre des aménagements. Corrélée à l'évolution de la pluviométrie et à la fréquence des interventions. L'importance de la clôture pour protéger la régénération, la complémentarité entre ligneux et herbacées, et l'adaptation aux nouvelles contraintes climatiques sont des clés essentielles pour la durabilité de ces aménagements (P. Hiernaux et al., 2009; H. Sawadogo & J. Kini, 2011).

L'apparition rapide d'espèces comme *Andropogon gayanus*, suivie par l'installation progressive de ligneux (*Guiera senegalensis*, *Acacia nilotica*), illustre une succession écologique classique des milieux clôturés du Sahel, avec une phase herbacée dominante puis une reconquête progressive par les ligneux (P. Hiernaux et al., 2006; H. Sawadogo & J. Kini, 2011).

Toutefois, *Acacia nilotica* montre une croissance en hauteur remarquable, traduisant une forte réponse aux améliorations édaphique, mais aussi une dépendance accrue à l'entretien du site (GIZ, 2012, p. 22; M. Larwanou & M. Saadou, 2010, p. 197).

Les résultats combinés des analyses de télédétection, de la diversité floristique et de la régénération ligneuse évoquent la nature à la fois prometteuse mais fragiles des effets du sous-solage dans les environnements sahéliens. Le retour rapide à la dégradation vers 2024, sans réintervention, traduit bien la nécessité d'articuler les interventions mécaniques aux techniques biologiques complémentaires et à un suivi communautaire rigoureux.

La gestion adaptative reposant sur des réinterventions périodiques, associée à une diversification des techniques CES/DRS, s'avère incontournable pour assurer la pérennité écologique et la résilience des sols et des paysages sahéliens (GIZ, 2012; C. Reij, 1996; R. Zougmore et al., 2014). Cette approche validée par notre suivi à long terme, constitue un levier stratégique pour l'amélioration durable des conditions de vie et des systèmes agropastoraux de l'Ouest du Niger.

Conclusion

Cette étude, basée sur des observations terrain et des analyses par télédétection, montre que le sous-solage favorise une restauration rapide des sols encroûtés au Sahel, avec une forte augmentation de la couverture végétale entre 2010 et 2013 (de 6 à plus de 68 %). Cependant, cette amélioration est partiellement transitoire car, à partir de 2019, un retournement net s'opère, marqué par une forte diminution de la végétation et une recrudescence des croûtes d'érosion (plus de 68 % en 2024). Les analyses statistiques révèlent un déclin significatif de la diversité végétale au fil du

temps depuis le traitement initial, indiquant un épuisement progressif des bénéfices écologiques sans entretien régulier. Néanmoins, les phases de retraitement permettent de relancer partiellement cette dynamique ; ce qui met en évidence la nécessité d'une gestion adaptative et périodique. Sur le plan écologique, la trajectoire de succession floristique est classique, dominée par des graminées sahéliennes, mais la faible résilience d'espèces plantées (introduites) comme *Ziziphus mauritiana* et *Acacia senegal*, souligne l'importance de favoriser la restauration par ensemencement de *Guiera senegalensis* et *Acacia nilotica*. Enfin, s'il est efficace à court et moyen terme, le sous-solage ne suffit pas à lui seul à garantir une restauration durable. Il doit être intégré dans les stratégies combinant entretien régulier, techniques complémentaires de CES/DRS (demi-lune, zaï, branchage) et suivi écologique rigoureux. Cette approche est essentielle pour renforcer la résilience des écosystèmes sahéliens face aux aléas climatiques et aux pressions anthropiques.

Bibliographie

- ASSOUMA Mohamed Habibou, HIERNAUX Pierre, LECOMTE Philippe, ICKOWICZ Alexandre, BERNOUX Martial, et VAYSSIÈRES Jonathan, 2019 - Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*, 162, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.013>
- BOUBACAR NA-ALLAH Abdoulaye, MALAM ABDOL Moussa, INGATAN WARZAGAN Aghali, MAMADOU Ibrahim, FARAN MAIGA Oumarou, BOUZOU MOUSSA Ibrahim, et DESCROIX Luc, 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.
- BOUZOU MOUSSA Ibrahim, MALAM ABDOL Moussa, INGATAN WARZAGAN Aghali, BOUBACAR NA-ALLAH Abdoulaye, BAHARI IBRAHIM Mahamadou, MAMADOU Ibrahim, LUC Descroix, ERIC Le Breton, et VANDERVAERE Jean-Pierre, 2020 - Dynamique hydro-érosive actuelle des bassins versants endoréiques de la région de Niamey (Sud-Ouest Du Niger). *European Scientific Journal*, 16(33). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149>
- CHRIS Reij, GRAY Tappan, et MELINE Smale, 2009 - *Agroenvironmental transformation in the Sahel: Another kind of « Green Revolution »*. Intl Food Policy Res Inst.
- 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.
- 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*.
- HIERNAUX Pierre, 2013 - *Les facteurs d'insecurite lies à la degradation des ressources pastorales : pratiques d'exploitation des terres et changement climatique*. 8.

- HIERNAUX Pierre, ICKOWICZ Alexandre, et RAIMOND Christine, 2024 - *Comment l'adaptation aux variations du climat et de l'environnement permet-elle de lutter contre la désertification?* <https://agritrop.cirad.fr/608988/1/608988.pdf>
- HIERNAUX Pierre et Le HOUÉROU NOËL Henry, 2006 - Les parcours du Sahel. *Sécheresse*, 17.
- INGATAN WARZAGAN Aghali, BOUZOU MOUSSA Ibrahim, VANDERVAERE Jean-Pierre, MOUSSA MALAM Moussa Malam, BOUBACAR NA-ALLAH Abdoulaye, et DESCROIX Luc, 2023 - Effets du sous-solage sur les propriétés physiques et le stock d'eau des sols nus de brousse tigrée de l'ouest du Niger. *Territoires, Sociétés & Environnement*, 55-66.
- INS, 2012 - *Etat structure population du Niger en 2012* (Décret N° 2011-059/PCSRD/ME/F DU 27 Janvier 2011; p. 88).
- KIEMA A, NIANOGO Ai, KABORE-ZOUNGRANA Cy, et JALLOH B, 2013 - Effets des demi-lunes associées au scarifiage sur les productions fourragères en région sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(6), 4018-4030. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i6.13>
- KIEMA André, J NIANOGO Aimé, et OUEDRAOGO Tinrmegson, 2008 - Effets des cordons pierreux sur la régénération d'un pâturage naturel de glacié au Sahel. *Cahiers Agricultures*, 17(3), 281-288. <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0204>
- LARWANOU Mahamane, et SAADOU Mahamane, 2010 - *The role of human interventions in tree dynamics and environmental rehabilitation in the Sahel zone of Niger*. 194-200.
- MERTZ Ole, MBOW Cheikh, REENBERG Anette, et DIOUF Awa, 2009 - Farmers' Perceptions of Climate Change and Agricultural Adaptation Strategies in Rural Sahel. *Environmental Management*, 43(5), 804-816. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9197-0>
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 2014 - *Cadre stratégique de la gestion durable des terres (cs-gdt) au Niger et son plan d'investissement 2015 - 2029* (p. 100).
- NICHOLSON Sharon 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>
- REIJ Chris., 1996 - *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. KARTHALA Editions.
- SAWADOGO Hamado, et KINI Janvier., 2011 - *REVUE DES TECHNOLOGIES AU BURKINA FASO*.
- ZOUGMORÉ Robert, JALLOH Abdulai, et TIORO André, 2014 - Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zaï techniques. *Agriculture & Food Security*, 3(1), 16. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-3-16>