

Efficacité du sous-solage dans la restauration des sols sahéliens dégradés. Étude expérimentale sur le site de Tondi Kiboro, Niger

Abdoulaye BOUBACAR NA-ALLAH¹, Moussa MALAM ABDOU^{2*}, Aghali INGATAN WARZAGAN^{1,3}, Ibrahim MAMADOU², Oumarou FARAN MAIGA¹, Ibrahim BOUZOU MOUSSA¹ et Luc DESCROIX⁴

¹ Université de Niamey, Département de géographie, BP 418 Niamey, Niger

² Université de Zinder, Département de géographie, BP 656 Zinder, Niger

³ UMR 5001, Université de Grenoble-Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE-Grenoble), CS 40700, 38058 Grenoble Cedex 9

⁴ IRD / PALOC, UMR 208 Muséum National d'Histoire Naturelle, CP 26, 75231 Paris cedex 05

* Correspondance, courriel : 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 m² 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.*

Abstract

The effectiveness of sous-solage in the restoration of degraded sahelian Soils. Experimental study at the Tondi Kiboro site, Niger Republic

This study measures the effectiveness of *sous-solage* (about 10 cm deep plowing) which is a traditional technique used in soil management. The investigation is carried out at the experimental site of Tondi Kiboro (Niger Republic) where were set up a 600 m² plowed plot and a control plot in order to characterize the

hydrodynamic properties of soils and vegetation. The hydraulic conductivity, the volume water content, and the runoff are thus determined using the tensio-infiltrometry device, capacitive borer, and runoff plots respectively. Measurements of density, of rejection and of vegetation cover are also carried out to characterize the vegetation. The results show that deeper plowing significantly improves soil functionality. Thus, on the plowed plot, the annual run-off is 75 % less than that of the control plot, which translates into a clear improvement in infiltration and an availability of water for the vegetation. The monitoring of soil moisture reveals a quasi-constant volume water content (≈ 25 %) in the first meter of the soil in August which is the rainiest month of the season. *Sous-solage*, which involves recasting the soil on only about ten centimeters deep, improves water storage to depths 10 times higher, and this is particularly the place where the plant roots are located. This results in a rapid growth and regeneration of vegetation in the plot. However, the water storage capacity of the plowed plot decreases progressively as a result of the plot being exposed to intense Sahelian rains. The technique, that is, *sous-solage*, must therefore be renewed during the rainy season.

Keywords : *soil management, CES / DRS, hydrodynamic properties of soil, Niger Republic, Sahel.*

1. Introduction

L'Ouest nigérien est soumis à une variabilité climatique qui se manifeste par des sécheresses sévères et récurrentes depuis les années 1970 [1, 2]. Ces sécheresses ont engendré une dégradation de la végétation et un profond changement dans l'usage et dans l'occupation des sols [3 - 5]. Les jachères disparaissent, sinon, s'amenuisent au profit des champs de culture [6]. Cette dynamique est, par ailleurs, accentuée par la forte croissance démographique. Ainsi, la région de Tillabéry, à laquelle appartient administrativement le site d'étude, a connu un quadruplement de sa population en 35 ans entre 1977 et 2012 [7]. Une telle croissance démographique implique l'exploitation quasi-régulière des ressources foncières et forestières [8] avec, dans certains cas, des pratiques peu conservatrices [9, 10]. D'où le déclenchement des processus d'érosion hydrique et éolienne qui se manifestent par l'encroûtement [11 - 13] et ou par le ravinement [14 - 16]. Les conséquences environnementales de ces processus sont notamment l'accélération de ruissellement, l'accentuation des inondations [17 - 20] et la baisse des rendements agricoles et ses corollaires de famine ou d'insécurité alimentaire [21, 22]. Dans ce contexte, certaines techniques de gestion des sols, notamment la jachère, deviennent de moins en moins efficaces pour garantir, d'une part, les fonctions des sols et, d'autre part, la satisfaction des besoins alimentaires d'autant plus que les paysans nigériens font très rarement recours à l'amendement des sols [23].

Ceci met en lumière à la fois les limites de la jachère mais pose aussi la problématique de la gestion durable des sols cultivés. L'appréhension scientifique et la forte médiatisation de la dégradation des sols et de ses conséquences ont stimulé, durant les décennies 1980 et 1990, une prolifération des programmes d'aménagement et / ou de développement rural (Projet Agro-sylvo-pastoral ; Projet de Développement Agroforestier et d'Aménagement des Terroirs ; Programme de Mesures Antiérosives, etc.) visant à promouvoir le « smart agriculture » ou à améliorer les techniques traditionnelles existantes [24, 25]. Ainsi, la technique de demi-lune a été introduite vers les années 1974 pour faire face au problème de la dégradation des sols et rehausser les rendements des cultures. D'autres techniques ont par la suite été introduites et ou améliorées [26, 27] parmi lesquelles le sous-solage qui est une technique ancestrale très bien connue des paysans sahéliens grâce à la diversité de ses fonctions. C'est une technique qui est souvent utilisée soit pour restaurer les sols dégradés, soit pour brouiller les lignes de semis contre les bestioles qui déterrent les grains soit enfin pour accroître la capacité de stockage en eau des sols cultivés. L'efficacité de cette technique a été évaluée au Burkina Faso où il est montré, en conditions climatiques soudaniennes, qu'elle améliore nettement le taux de survie et la croissance des espèces végétales grâce à la restauration des conditions

Abdoulaye BOUBACAR NA-ALLAH et al.

Tableau 1 : Caractéristiques des sols étudiés

Texture des sols (%)	
Sable (2000 - 40 μm)	88
Limon (40 - 2 μm)	7
Argile (< 2 μm)	4
Matière organique (%)	< 1
Densité apparente (g / cm^3)	1.7

La disparition de la steppe arbustive qui occupait le glacis a entraîné l'accélération de la dégradation des sols qui se manifeste par la formation de la croûte d'érosion (**Figure 2**). Ainsi, dès que ce type de croûte se développe sur une unité, les paysans mettent celle-ci en jachère qui est technique traditionnelle de restauration des fonctions d'un sol. Mais la durée souvent longue, nécessaire pour restaurer naturellement ces fonctions, et le besoins de produire en quantité font que cette pratique est de moins en moins possible, d'où le développement du sous-solage.

**Figure 2 : Vue de la steppe arbustive dégradée sur le glacis et de la croûte d'érosion**

2-2. Technique et protocole de réalisation de sous-solage

Le sous-solage, connu aussi sous le nom du labour, permet la destruction de la croûte d'érosion (ERO) qui est une pellicule d'épaisseur millimétrique et quasi-imperméable. Sa destruction augmente alors l'infiltration. La technique du sous-solage a été vulgarisée par les ONG après les années 1980. Elle est pratiquée avec la charrue ou le tracteur, matériels souvent inaccessibles aux paysans pour des raisons financières. D'où sa réalisation avec la hiler et ou avec la pioche. Pour cette étude, le glacis encroûté de Tondi Kiboro a été sous-solé afin d'améliorer les propriétés hydrodynamiques du sol. Cette opération a été réalisée par les paysans avec des pioches (**Figure 3**). La profondeur d'action de cet outil aratoire est d'environ 10 cm. L'opération a été réalisée deux fois, en juillet 2013 et en juillet 2014, sur une surface de 600 m². Celle-ci a été clôturée avec du grillage pour éviter toute perturbation (animale et humaine). Elle a été ensuite enssemencée avec des graines « tout-venant » ramassées dans l'environnement de la parcelle aménagée et appartenant, quasi-exclusivement, à des essences locales.



Pioches



Réalisation de sous-solage sur le site d'étude

Figure 3 : Outil et réalisation de sous-solage sur le site d'étude

2-3. Dispositifs d'évaluation des impacts du sous-solage

Plusieurs grandeurs ont été mesurées sur la parcelle aménagée et sur une parcelle témoin, aux conditions morpho-pédologiques identiques que la parcelle aménagée, afin de comparer les impacts du sous-solage.

2-3-1. Mesures de l'infiltration et de la teneur en eau volumique (θ)

Des mesures d'infiltration sont effectuées sur le site d'étude à l'aide du dispositif de la tensio-infiltrométrie [29, 10], constitué d'un infiltromètre et des deux tensiomètres. Ce dispositif permet de déterminer la conductivité hydraulique à saturation (K_s) qui est une variable caractérisant la capacité d'infiltration d'un sol par l'application de l'**Équation 1** :

$$K_s = -q_z \frac{\Delta z}{\Delta H} \quad (1)$$

K_s étant la conductivité hydraulique à saturation, q_z le flux d'infiltration vertical stabilisé, Δz la différence de profondeur entre la base de l'infiltromètre et le niveau de tensiomètre et H la charge hydraulique exprimée sous forme de gradient. Des mesures de la teneur en eau ont, par ailleurs, été réalisées avec une sonde à neutron afin d'évaluer le stock hydrique dans les deux premiers mètres du sol. Ces mesures échantillonnent l'humidité tous les 10 cm, soit [0 - 10 cm], [10 - 20 cm], ... [190 - 200 cm]. Pendant la saison des pluies, ces mesures interviennent après chaque pluie tandis qu'en saison sèche (d'octobre à mai), elles ont une périodicité mensuelle.

2-3-2. Mesure de ruissellement

Pour analyser l'aptitude au ruissellement de la surface aménagée et de son témoin, deux parcelles de ruissellement de 1 m² y ont été installées sur chacune d'elle. Ainsi, des coefficients de ruissellement sont déterminés pour chaque événement pluvieux par l'application de l'**Équation 2** :

$$K_r = \frac{L_r}{p} \quad (2)$$

K_r est le coefficient de ruissellement événementiel ; L_r est la lame ruisselée moyenne mesurée et P est la pluie enregistrée près de la parcelle et mesurée grâce à un pluviomètre à lecture directe.

Des appréciations qualitatives du ruissellement sont également rapportées grâce aux illustrations prises régulièrement pendant les pluies.

2-3-3. Mesures de la végétation

L'inventaire des espèces herbacées a été effectué à l'aide de la méthode de points quadrats alignés. La procédure consiste à tendre un mètre ruban sur 5 m et effectuer des lectures tous les 10 cm. Quant à la végétation ligneuse, le nombre total d'individus par espèce est intégralement recensé. En outre, des mesures dendrométriques sont aussi effectuées notamment le diamètre à la base à 15 cm, la hauteur moyenne et le taux de recouvrement.

3. Résultats

3-1. Impacts du sous-solage sur l'infiltration

La **Figure 4** représente la conductivité hydraulique moyenne de la surface sous-solée et de la parcelle témoin. On remarque que la conductivité de la parcelle sous-solée vaut plus de quatre fois celle de la parcelle témoin. La réalisation du sous-solage permet donc d'accroître d'un facteur quatre (4) la capacité d'infiltration d'un sol. Ceci présente l'énorme avantage d'infiltrer l'eau de pluie et donc d'inhiber, sinon retarder le ruissellement. En effet, conformément aux principes hortonien du ruissellement, il faudra une pluie intense de près de 60 mm / h pour produire le ruissellement sur la parcelle sous-solée alors qu'une pluie intense de 15 mm / h suffit pour le produire sur la parcelle témoin.

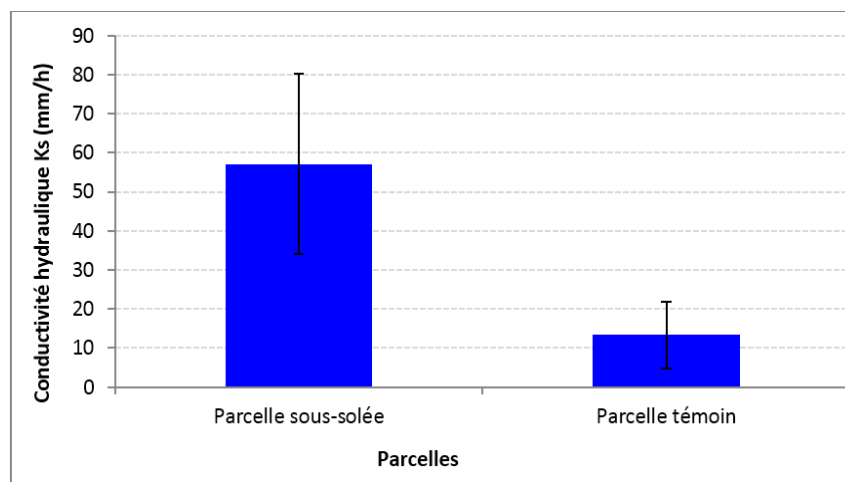


Figure 4 : Valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur la parcelle sous-solée et son témoin.

NB. La barre d'erreur représente un écart type

3-2. Impacts du sous-solage sur la teneur en eau du sol

La **Figure 5** représente la dynamique des teneurs en eau dans la parcelle aménagée et son témoin. Afin de faciliter la comparaison, sont seulement représentées les mesures des quelques mois caractéristiques en lien avec la distribution temporelle des pluies au Sahel. Le mois de juin caractérise le début de la saison des pluies dans la zone d'étude ; le mois d'août est le mois le plus pluvieux de la saison ; le mois d'octobre correspond à la fin de la saison tandis que le mois d'avril est caractéristique de forte chaleur.

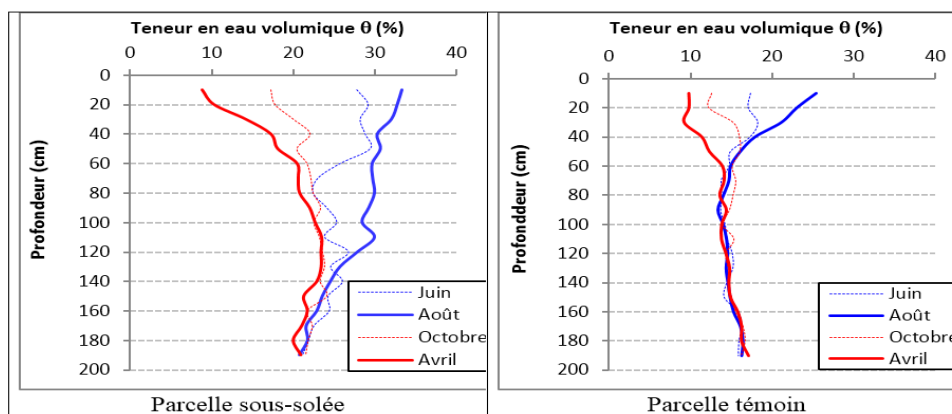


Figure 5 : *Dynamique hydrique dans les parcelles aménagée et témoin*

Le commentaire qu'inspire la **Figure 5** est que, pendant la saison sèche et chaude (avril), les teneurs en eau des deux parcelles sont du même ordre de grandeurs ($\approx 10\%$) dans les vingt premiers cm du sol qui restent sous l'emprise de l'évaporation. Mais dès le début de la saison des pluies (juin), une nette différence s'observe car la teneur en eau (θ) atteint les 30% dans la parcelle sous-solée alors qu'elle reste inférieure à 20% dans la parcelle témoin. Cette différence se maintient même au mois d'août qui est le plus pluvieux du fait d'une évolution constante de l'humidité superficielle ($0 - 20$ cm). L'autre fait marquant du sous-solage est l'amélioration de la profondeur d'infiltration. Dans la parcelle témoin, on constate qu'au-delà de 60 cm de profondeur, la teneur en eau reste constante, de l'ordre de 15% et ce, quel que soit l'apport en eau qu'elle reçoit. Dans la parcelle sous-solée en revanche, l'apport en eau reste sensible même à 2 m de profondeur. Ainsi, le sous-solage, qui consiste à remanier le sol sur seulement une profondeur d'environ 10 cm, améliore l'infiltration de l'eau sur des profondeurs quinze fois plus grandes. Jusqu'au-delà du premier mètre du sol, l'influence du sous-solage est réelle et permet d'accumuler des quantités d'eau importantes dans le sol. Ainsi, sur la période allant de juin à août, la lame d'eau stockée est de l'ordre de 460 mm dans la surface sous-solée alors qu'elle n'est que de 140 mm dans la parcelle témoin sur un total de 495 mm de pluie enregistrée sur la période. L'accumulation de l'eau dans le premier mètre du sol est capitale pour la végétation tant pour les espèces annuelles, dont la profondeur racinaire ne dépasse guère 40 cm, que pour les ligneux. Sa dynamique montre combien le sous-solage du sol encroûté est important pour une bonne alimentation des racines des plantes jusqu'en profondeur.

3-3. Impacts du sous-solage sur le ruissellement

Les coefficients de ruissellement annuels moyens des deux parcelles sont représentés sur la **Figure 6**.

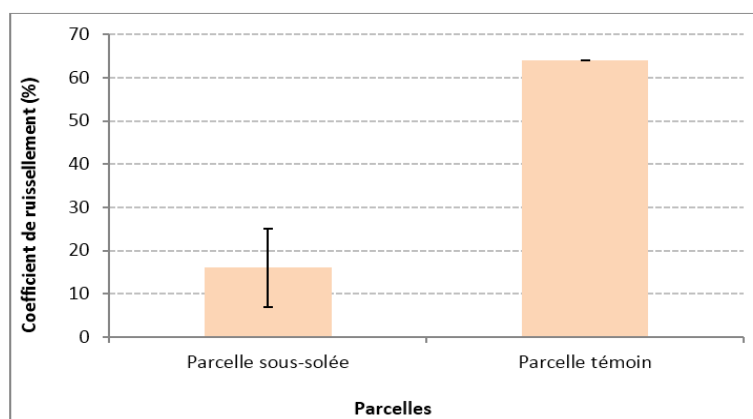


Figure 6 : *Coefficient de ruissellement moyen des parcelles*
NB. La barre d'erreur représente l'écart type

La **Figure 6** met en évidence l'importance de ruissellement mesuré sur la parcelle témoin. Celui-ci dépasse les 60 % de la pluie sur le témoin, contre seulement 15 % dans la parcelle aménagée. L'analyse synchronique de l'infiltration et de ruissellement, **Figures 4 et 6** respectivement, met en évidence la cohérence des résultats. En effet, sur la parcelle sous-solée, où l'infiltration est importante, le ruissellement est moindre, contrairement à la parcelle non aménagée.

3-4. Impacts du sous-solage sur la biomasse

Sur la parcelle aménagée, il n'y avait que quatre individus rabougris de *Guiera senegalensis* avant la réalisation du sous-solage. La diversité floristique était ainsi très faible. Mais, la hausse d'infiltration et l'accroissement de stock d'eau engendrés par l'aménagement ont permis d'améliorer la croissance de la végétation. La **Figure 7** montre les évolutions en termes de hauteur, de diamètre et du recouvrement de la végétation dans les deux parcelles entre 2013 et 2016. Les évolutions sont données par rapport à la situation de 2013 prise ici pour référence.

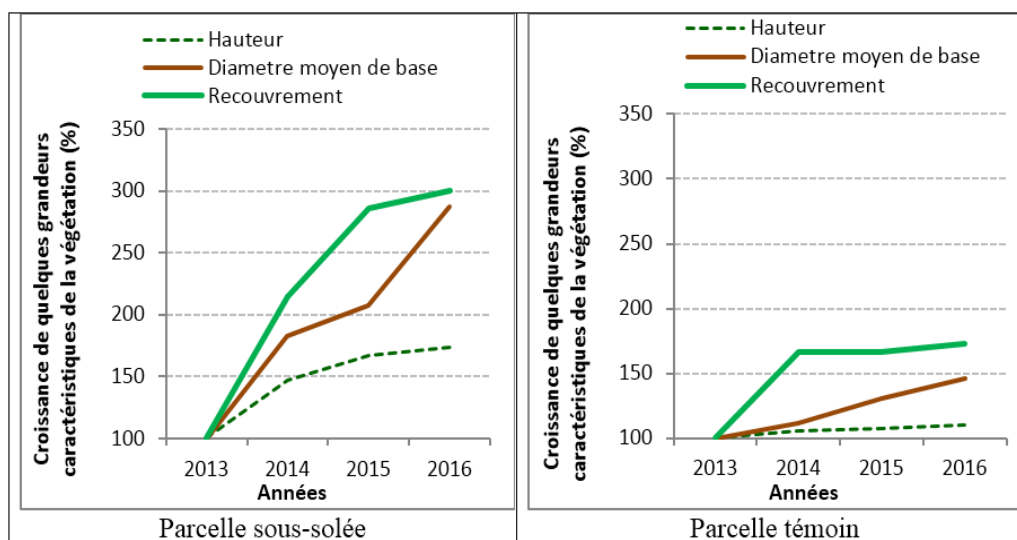


Figure 7 : Évolution de quelques grandeurs caractéristiques de la végétation sur les deux parcelles
 NB. Les évolutions sont déterminées à partir de 2013 qui est prise comme année de référence.
 L'échelle en ordonnée est gardée identique sur les deux graphiques à des fins de comparaisons

Dans la parcelle sous-solée, la **Figure 7** montre que la hauteur moyenne de *Guiera senegalensis* a enregistré une croissance de l'ordre de 170 % par rapport à son niveau de 2013, ce qui en valeur absolue correspond à une croissance de plus d'un mètre, contre 20 cm seulement pour le *Guiera senegalensis* se trouvant dans la parcelle témoin. La même dynamique est observée pour le diamètre moyen de base et pour le taux de recouvrement comme l'illustre ladite figure. Le rapport d'évolution de toutes les grandeurs caractéristiques de la végétation entre la parcelle témoin et la parcelle aménagée montre que la croissance est plus importante dans cette dernière. Par ailleurs, le sous-solage a permis une végétalisation très remarquable du glacié dégradé de Tondi Kiboro durant les quatre années d'observation alors que, sur la même période, la régénération est quasiment nulle dans la parcelle témoin. La **Figure 8** illustre l'évolution de la végétation dans la parcelle sous-solée. Au total, 22 espèces herbacées ont germé dans la parcelle. Il s'agit entre autres de *Andropogon gayanus*, *Borreria chaetocephala*, *Borreria radiata*, *Borreria stachydea*, *Cassia mimosoides*, *Cenchrus biflorus*, *Chrozophora brocchiana*, *Commelina benghalensis*, *Commelina forskalae*, *Cyperus amabilis*, etc. *Andropogon gayanus* est l'espèce dominante avec 67 pieds relevé en 2016.

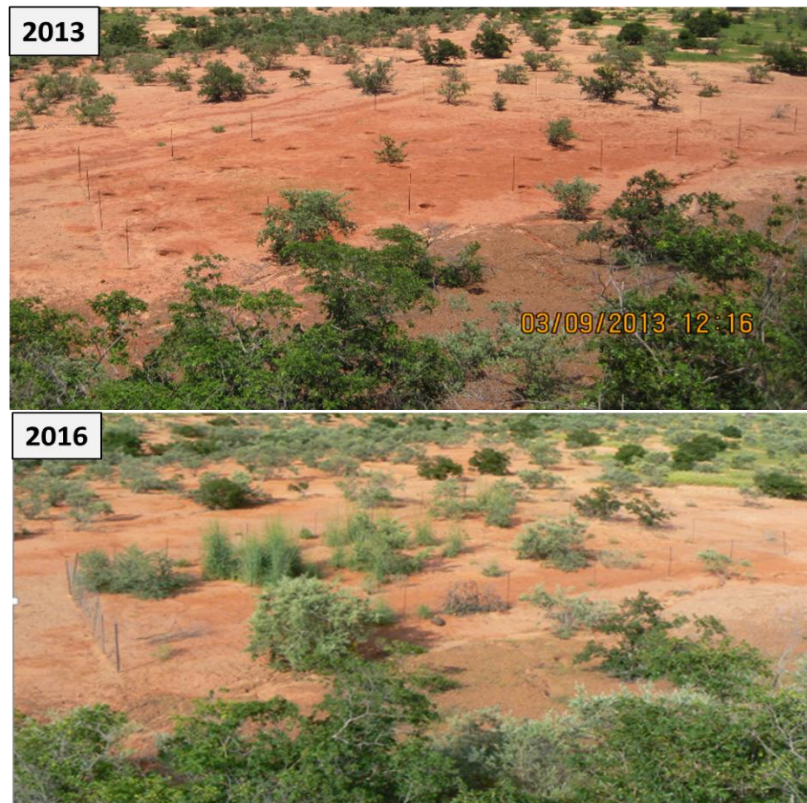


Figure 8 : Etat de la végétation en 2013 et en 2016 dans la parcelle sous-solée

Quant aux espèces ligneuses, leur nombre est variable selon l'espèce et l'année. Le **Tableau 2** montre la survie des 5 espèces qui ont germé à la suite de l'ensemencement et du travail du sol effectué. Ainsi, le nombre d'individus d'*Acacia nilotica* a chuté de 2013 à 2016, de 137 individus à 7 individus soit une disparition de 130 individus. Par contre, celui de *Guiera senegalensis* a connu une évolution positive. Il est passé de 40 individus en 2013 à 46 en 2016. Ceci s'explique par la présence de cette espèce sur la parcelle avant l'aménagement. Il y a aussi l'apparition de *Combretum micranthum* à partir de 2015.

Tableau 2 : Survi des espèces ligneuses de la parcelle sous-solée

Espèce	Nombre d'individu par année			
	2013	2014	2015	2016
<i>Balanites aegyptiaca</i>	1	1	1	1
<i>Piliostigma reticulatum</i>	1	1	1	0
<i>Guiera senegalensis</i>	40	23	45	46
<i>Acacia nilotica</i>	137	60	11	7
<i>Combretum micranthum</i>	0	0	1	1

4. Discussion

Plusieurs grandeurs ont été analysées dans ce travail afin d'apprécier l'efficacité du sous sous-solage dans la restauration des sols sahéliens encroûtés. L'étude met en évidence l'influence très significative du sous-solage dans l'amélioration de l'infiltration qui est d'un facteur 4 par rapport à un témoin non sous-solé. Ainsi, le stock d'eau qui s'accumule dans le sol est nettement plus important que celui de la parcelle témoin, conformément à ce qui est rapporté en zone soudanienne Burkinabè [28]. Dans la parcelle témoin,

non sous-solée, la profondeur d'infiltration se limite à 60 cm de la surface. A cette profondeur, la ponction évaporatoire est très importante [30]. De ce fait, la faible réserve d'eau qui se constitue est aussitôt reprise par l'évaporation, réduisant ainsi le développement ou la survie des quelques rares espèces herbacées qui s'y installent. En revanche, le front d'humidité reste sensible même sur des profondeurs de l'ordre de 2 m dans la parcelle sous-solée. Sachant que le remaniement induit par le sous-solage n'est que de l'ordre de 10 cm, le front d'humidification serait probablement plus grand si l'on réalisait le remaniement sur des profondeurs de l'ordre de 20 ou 30 cm. Cependant, le taux et la vitesse d'infiltration ne sont pas constants dans la parcelle sous-solée. Ceci est traduit par le large écart-type de la conductivité hydraulique mesurée sur la parcelle sous-solée, comparée à son témoin (**Figure 4**). En effet, le suivi d'évolution de la conductivité d'une parcelle sous-solée dans l'Ouest du Niger [10] montre que celle-ci est élevée juste après la réalisation du sous-solage mais sa valeur décroît (**Figure 9**) au fur et à mesure que la parcelle reçoit des pluies sahéliennes intenses [31]. Ces dernières, du fait de leurs intensités et de leurs énergies, entraînent l'encroûtement de la parcelle par battance.

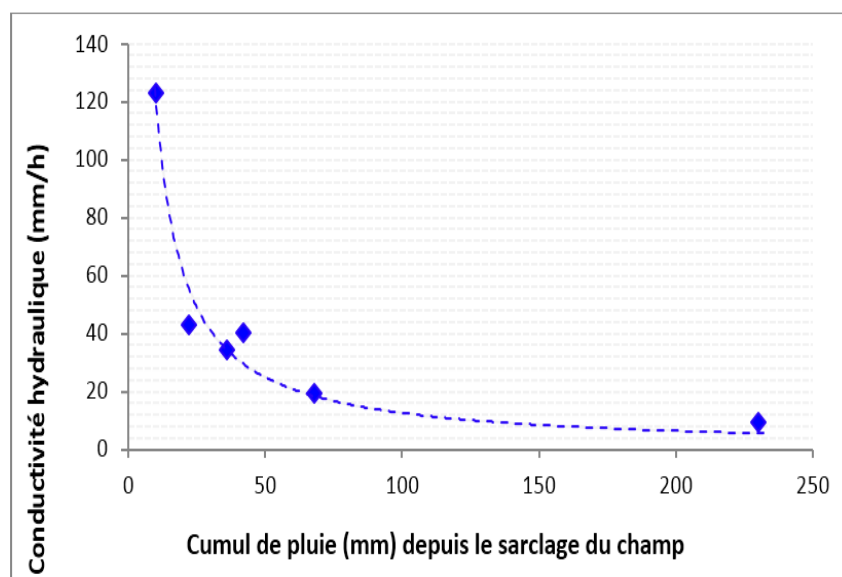


Figure 9 : Évolution de la conductivité hydraulique sur une surface sous-solée (D'après [10])

La conséquence de l'encroûtement de la parcelle sous-solée est illustrée par la **Figure 10** montrant la production variée du ruissellement sur la même parcelle en deux périodes différentes. Les pluies qui ont généré les ruissellements sur la parcelle sont de même ordre de grandeur (≈ 30 mm). Sur l'image de gauche (**Figure 10A**), la pluie ayant produit le ruissellement est observée le 22/08/2013. Sur cette image, on remarque une absence totale de ruissellement dans la partie aménagée, ce qui dénote l'importance de l'infiltration. Sur l'image de droite par contre (**Figure 10B**), datant du 09 septembre 2013, on observe une lame d'eau qui couvre la parcelle aménagée. La production du ruissellement s'explique par le fait que, entre les deux dates (du 22/08/2013 au 09/09/2013), la parcelle aménagée a reçu un cumul de pluie de l'ordre de 120 mm et qui a entraîné le tassement et l'encroûtement de la parcelle. Dans ce cas, une pluie même de faible intensité peut générer le ruissellement car l'encroûtement implique une baisse de l'infiltration. Cette baisse temporelle de l'infiltration justifie donc la nécessité de la répétition de l'opération du sous-solage au cours d'une saison culturale.



Figure 10 : *Impact de ré-encroûtement de la parcelle sous solée sur la production de ruissellement*

L'encroûtement de la parcelle sous-solée traduit aussi la nécessité d'un élément structurant empêchant la compaction du sol. Il est ainsi montré qu'une proportion des résidus de culture de l'ordre de 2 % est suffisante pour limiter la déflation et la compaction des sols [9] dans le secteur de cette étude. Donc la réalisation d'un sous-solage couplé à l'épandage de résidus permettrait de maintenir durablement les fonctions du sol. Par ailleurs, le **Tableau 3** compare l'efficacité de quelques aménagements dans la réduction du ruissellement. On conclut ainsi que le sous-solage réduit davantage le ruissellement qu'une surface aménagée en bandes enherbées et ou aux cordons pierreux.

Tableau 3 : *Efficacité de quelques ouvrages antiérosifs dans la réduction du ruissellement*

Type d'aménagement	Impact sur la réduction du ruissellement (%)	Situation de l'aménagement	Auteur
Sous-solage	- 75	Glacis	Ce travail
Bandes enherbées	- 48 à -51	Glacis	[32]
Cordons pierreux	-55 à -71	Glacis	[32]
Paillage	- 50	Versant	[33]
	- 75	Glacis	[34]
Tassa	- 90	Glacis	[34]

5. Conclusion

Ce travail a mis en évidence l'efficacité du sous-solage dans la restauration d'un glacis sahélien dégradé. L'aménagement a permis de réduire le ruissellement de 75 %, ce qui a alors accru le stock d'eau dans le sol d'un facteur 3, comparée à celui de la parcelle témoin non aménagée. La disponibilité de l'eau dans la zone racinaire a permis la régénération de la végétation qui colonise progressivement la parcelle aménagée et qui témoigne ainsi la restauration des propriétés des sols. Toutefois, l'exposition de la parcelle aux pluies sahéliennes intenses réduit les avantages du sous-solage. Afin de pérenniser ces derniers, il est envisagé, en perspective, de coupler le sous-solage avec l'opération de branchage et / ou du paillage.

Références

- [1] - A. DAI, P. J. LAMB, K. E. TRENBERTH, M. HULME, P. D. JONES et P. XIE, « The recent Sahel drought is real », *International Journal of Climatology*, Vol. 24 (11) (2004) 1323 - 1331 p.
- [2] - G. MAHÉ and J.-E. PATUREL, « 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers », *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 341, N° 7 (2009) 538 - 546
- [3] - M. J. LEBLANC, G. FAVREAU, S. MASSUEL, S. O. TWEED, M. LOIREAU and B. CAPPELAERE, « Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger », *Global and Planetary Change*, Vol. 61, N° 3-4 (2008) 135 - 150
- [4] - I. BOUZOU MOUSSA, L. DESCROIX, O. FARAN MAIGA, E. GAUTIER, M.-M. ADAMOU, M. ESTEVES, K. SOULEY YERO, M. MALAM ABDOU, I. MAMADOU, E. LE BRETON and B. ABBA, « Les changements d'usage des sols et leurs conséquences hydrogéomorphologiques sur un bassin-versant endoréique sahélien », *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 22, N° 1 (2011) 13 - 24
- [5] - L. DESCROIX, I. BOUZOU MOUSSA, P. GENTHON, D. SIGHOMNOU, G. MAHÉ, I. MAMADOU, J. P. VANDERVAERE, E. GAUTIER, O. FARAN MAIGA, J.-L. RAJOT, M. MALAM ABDOU, N. DESSAY, A. INGATAN WARZAGAN, I. NOMA, K. SOULEY YÉRO, H. KARAMBIRI, R. FENSCHOLT, J. ALBERGEL and J.-C. OLIVRY, « Impact of drought and land - use changes on surface - water quality and quantity : the sahelian paradox », in *Current perspectives in contaminant hydrology and water resources sustainability*, P. M. Bradley, Éd. Rijeka : Intech, (2013) 243 - 271
- [6] - M. LOIREAU, « Espaces-ressources-usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien », Thèse de l'Université de Montpellier 3, Montpellier, (1998) 413 p.
- [7] - M. MALAM ABDOU, « Hausse des écoulements sur le bassin versant de Dargol : entre facteurs anthropiques et climatiques », *Revue de géographie de L'université de Ouagadougou (RGO)*, Vol. 2, N° 5 (2016) 19 - 44
- [8] - M. HAROUNA, « Migrations de colonisation agricole et dynamique du peuplement dans les communes rurales de Say et de Tamou (Ouest du Niger) », in DAMBO et REYNARD (Eds.), « *Vivre dans les milieux fragiles : Alpes et Sahel : Hommage au professeur Jorg Winistorfer*, Lausanne, (2005) 149 - 164
- [9] - A. ABDOURAHAMANE TOURÉ, J. L. RAJOT, Z. GARBA, B. MARTICORENA, C. PETIT et D. SEBAG, « Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel », *CATENA*, Vol. 85, N° 3 (2011) 205-214 p.
- [10] - M. MALAM ABDOU, J.-P. VANDERVAERE, L. DESCROIX, I. BOUZOU MOUSSA, O. FARAN MAIGA, S. ABDU, B. BODO SEYNI and M. L. OUSSEINI DAOUDA, « Evolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé dans l'Ouest du Niger », *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, Vol. 19, N° 3 (2015) 270 - 280
- [11] - C. VALENTIN et L.-M. BRESSON, « Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils », *Geoderma*, Vol. 55, N° 3-4 (1992) 225 - 245
- [12] - O. MALAM ISSA, C. VALENTIN, J. L. RAJOT, O. CERDAN, J.-F. DESPRATS et T. BOUCHET, « Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils », *Geoderma*, Vol. 167 - 168, (2011) 22 - 29 p.
- [13] - A. ABDOURAHAMANE TOURE, G. BERGAMETTI, C. BIELDERS, C. BOUET, Y. CALLOT, S. DUPONT, H. KHATTELI, M.T. LABIADH, B. MARTICORENA, J.-L. RAJOT and C. VALENTIN (Éds), « Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physiques, métrologie et techniques de lutte », *Revue des Régions Arides*, Vol. 36, N° 1 (2015)
- [14] - C. VALENTIN, J. POESEN et Y. LI, « Gully erosion : Impacts, factors and control », *Catena*, Vol. 63, N° 2-3 Special Iss. (2005) 132 - 153 p.
- [15] - I. MAMADOU, « *La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger* », Thèse de l'Université de Niamey et de l'Université Paris 1, Niamey-Niger, (2012) 290 p.
- [16] - B. ABBA, « Dynamique des versants dans une zone anthropisée du Niger : cas du bassin du kori Tyala (périphérie du Parc national du W) », *Annales de l'université Abdou Moumouni de Niamey*, Vol. série B (2014) 161 - 174 p.

- [17] - D. SIGHOMNOU *et al.*, « La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ? », *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 24, N° 1 (2013) 3 - 13 p.
- [18] - V. AICH, B. KONÉ, F. F. HATTERMANN et E. N. MÜLLER, « Floods in the Niger basin; analysis and attribution », *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 2, N° 8 (2014) 5171 - 5212 p.
- [19] - O. AMOGU, M. ESTEVES, J.-P. VANDERVAERE, M. MALAM ABDU, G. PANTHOU, J.-L. RAJOT, K. SOULEY YÉRO, « Runoff evolution due to land-use change in a small Sahelian catchment », *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 60, N° 1 (2015) 78 - 95 p.
- [20] - B. N. NKA, L. OUDIN, H. KARAMBIRI, J.-E. PATUREL et P. RIBSTEIN, « Trends in floods in West Africa : analysis based on 11 catchments in the region », *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, N° 11 (2015) 4707 - 4719 p.
- [21] - P. OZER, Y. HOUNTONDI, A. J. NIANG, S. KARIMOUNE, O. LAMINOU MANZO et M. SALMON, « Désertification au Sahel : Historique et perspectives », *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, Vol. 54, (2010)
- [22] - J.-P. O. de SARDAN, « Au Niger, le cycle des crises alimentaires », *Le Monde diplomatique*, (2011)
- [23] - M. BANOIN et J.-P. GUENGANT, « Les systèmes agraires traditionnels nigériens dans l'impasse face à la démographie », in *Jachère et systèmes agraires*, Niamey, (1998) 1 - 14 p. multigr.
- [24] - P. TORREKENS, J. BROUWER et P. HIERNAUX, « Evolution de la végétation spontanée sur plateau latéritiques traités par des travaux antiérosifs dans le département de Dosso (Niger) », in JMK AMBOUTA et R. PELTIER (Eds.), « *Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes Forestiers Contractés* », (1997) 235 - 246 p.
- [25] - MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT AGRICOLE/REPUBLIQUE DU NIGER, « Référentielle technique du Projet Agro-sylvo-pastoral », Niger, (2003)
- [26] - I. BOUZOU MOUSSA, « Défense et restauration des sols dans l'Adar (Niger) : méthodes et appropriation par les paysans », *Geo Eco Trop*, Vol. 1-4, (1997) 105 - 120 p.
- [27] - M. M. ADAMOU, « Rapport sur les techniques de captage de l'eau des pluies au Niger », Stockholm Environmental Institute, (2010)
- [28] - F. W. KAGAMBEGA, S. TRAORE, A. THIOMBIANO et J. I. BOUSSIM, « Impact de trois techniques de restauration des sols sur la survie et la croissance de trois espèces ligneuses sur les « zipellés » au Burkina Faso », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, N° 3 (2011)
- [29] - J. P. VANDERVAERE, C. PEUGEOT, M. VAUCLIN, R. ANGULO JARAMILLO et T. LEBEL, « Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers », *Journal of Hydrology*, Vol. 188-189, (1997) 203 - 223 p.
- [30] - C. VELLUET *et al.*, « Building a field- and model-based climatology of local water and energy cycles in the cultivated Sahel - annual budgets and seasonality », *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, Vol. 11, N° 5 (2014) 4753 - 4808 p.
- [31] - G. PANTHOU, T. VISCHÉL et T. LEBEL, « Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel », *Int. J. Climatol.*, Vol. 34, (2014) 3998 - 4006 p.
- [32] - R. ZOUGMORE, K. OUATTARA, A. MANDO et B. OUATTARA, « Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso », *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 15, N° 1 (2004) 41 - 48 p.
- [33] - E. ROOSE, « Restauration de la productivité des sols tropicaux », in *Gestion intégrée des eaux et des sols : Ressources, aménagements et risques en milieux ruraux et urbains*, Hanoi (Vietnam), (2007) 6 p.
- [34] - I. BOUZOU-MOUSSA et N. D. LAMSO, « Le « Tassa » : une technique de conservation des eaux et des sols bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glacis des régions semi-arides (Niger), *Revue de géographie alpine*, Vol. 92, N° 1 (2004) 61 - 70 p.