HAL
open science

Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé du Niger

Moussa Malam, Jean-Pierre Vandervaere, Luc Descroix, Ibrahim Moussa, Oumarou Faran, Souley Abdou, Bodo Seyni, Maman Laouali, Ousseini Daouda

To cite this version:

Moussa Malam, Jean-Pierre Vandervaere, Luc Descroix, Ibrahim Moussa, Oumarou Faran, et al.. Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé du Niger. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement / Biotechnology, Agronomy, Society and Environment, 2015, 19, pp.270 - 280. ird-02153170

HAL Id: ird-02153170

https://ird.hal.science/ird-02153170

Submitted on 12 Jun 2019

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.

B A
S E *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2015 **19**(3), 270-280

Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé du Niger

Moussa Malam Abdou [1, 2], Jean-Pierre Vandervaere [2], Luc Descroix [3], Ibrahim Bouzou Moussa [4], Oumarou Faran Maiga [4], Souley Abdou [4], Bachirou Bodo Seyni [5], Maman Laouali Ousseini Daouda [4]

[1] Université de Zinder. Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Département de Géographie. BP 656. Zinder (Niger).
[2] Université Joseph Fourier-Grenoble 1. Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE). UMR 5564 (UJF/CNRS/IRD/INPG). BP 53. FR-Grenoble cedex 09 (France). E-mail : jean-pierre.vandervaere@ujf-grenoble.fr
[3] Museum National d'Histoire Naturelle. IRD. UMR 208 Patrimoines locaux (PALOC). FR-75231 Paris cedex 05 (France).
[4] Université Abdou Moumouni de Niamey. Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Département de Géographie. BP 418. Niamey (Niger).
[5] Université Abdou Moumouni de Niamey. Faculté d'Agronomie. Département Sciences du Sol. BP 10960. Niamey (Niger).

Reçu le 21 juillet 2014, accepté le 5 février 2015.

Description du sujet. Ce travail présente et analyse l'évolution de la conductivité hydraulique des surfaces cultivées et en jachère des formations pédologiques sablo-limoneuses couvrant les altérites du socle cristallin de l'Ouest du Niger. Le travail est mené en des emplacements choisis pour leur représentativité dans la zone sahélienne cultivée.
Objectifs. Il vise à faire ressortir l'effet des pratiques culturales, sarclage humide, sarclage sec, sur cette évolution et leurs conséquences sur l'infiltrabilité du sol et le ruissellement.
Méthode. L'approche utilisée consiste à étudier l'infiltration sous condition de faible succion grâce à un dispositif constitué d'un infiltromètre et de deux minitensiomètres dans le cadre d'un écoulement monodimensionnel.
Résultats. Les mesures, effectuées en suivant le cumul de pluie reçue, ont permis de déterminer et quantifier (i) l'effet du sarclage, (ii) celui de l'humidité préalable du sol au moment du sarclage et (iii) celui de la mise en jachère sur l'évolution de la conductivité hydraulique. La valeur de la conductivité hydraulique en surface s'avère toujours inférieure à celle du sol sous-jacent. La conductivité de la jachère est stable autour de 20 $mm \cdot h^{-1}$. Celle des zones cultivées, très élevée (120 $mm \cdot h^{-1}$) après sarclage humide retrouve la valeur mesurée en jachère après 70 mm de pluie et devient même moitié moindre après 230 mm de pluie. Le sarclage en conditions sèches est peu performant, à la fois en termes de conductivité et en termes de persistance de son effet.
Conclusions. On en déduit que l'effet bénéfique du sarclage n'est que d'assez courte durée et l'opération devrait être renouvelée après 100 mm de pluie reçue.
Mots-clés. Sarclage, jachère, travail du sol, croûtes du sol, conductivité hydraulique, Niger.

Evolution of the hydraulic conductivity of a cultivated sandy soil in West Niger

Description of the subject. The present study aims to present and analyze the evolution of the hydraulic conductivity of soils in cultivated and fallow areas in the loamy-sand superficial soils within the granitic basement region of West Niger. To this end, experimental plots considered representative of the area were chosen in the Sahelian cultivated area.
Objectives. Our objective was to evidence the effect of cultural practices and of both wet hoeing and dry hoeing on this evolution and their consequences in terms of soil infiltrability and runoff.
Method. A tension disc infiltrometer was used together with a pair of minitensiometers in one-dimensional flow geometry.
Results. Measurements were carried out and variations in total rainfall were calculated, allowing us to determine and quantify the effects of the following on the evolution of conductivity: (i) hoeing, (ii) the level of soil moisture prior to this operation and (iii) the lack of cultivation in fallow areas. Hydraulic conductivity was consistently found to be minimal at the surface. Conductivity in the fallow field was stable at 20 $mm \cdot h^{-1}$. In the cultivated zones, conductivity was very high (120 $mm \cdot h^{-1}$) after hoeing in wet conditions, decreasing to the fallow value after 70 mm of rain and even down to half of this value after 230 mm of rain. Hoeing in dry conditions showed poor efficiency, both in terms of conductivity and the duration of the effect.
Conclusions. The benefits of hoeing were found to be only short-lived, with the task needing to be repeated after 100 mm of rain.
Keywords. Weeding, fallow, tillage, soil crusts, hydraulic conductivity, Niger.

1. INTRODUCTION

L'étude des propriétés hydrodynamiques du sol est une étape indispensable pour caractériser les transferts de l'eau et des matières à l'interface sol-atmosphère. Ces transferts traduisent la capacité du sol à stocker et à transporter l'eau et les solutés, éléments indispensables pour la productivité des milieux cultivés. Dans la zone sahélienne, ces transferts sont connus pour être sous la dépendance des états de surfaces qui sont des micro-horizons (épais de l'ordre du mm au cm) qui contrôlent l'hydrodynamique superficielle (Casenave et al., 1990 ; Casenave et al., 1992) et qui évoluent sous l'influence des facteurs climatiques et anthropiques (Valentin et al., 1992).

Les sécheresses récurrentes que subit le Sahel depuis les années 1970 ont causé une baisse de rendement des cultures. Depuis, l'influence des facteurs anthropiques sur l'évolution des états de surface et de l'occupation des sols s'est accrue. La végétation naturelle recule fortement au profit des cultures et, de plus en plus, des terrains sont dégradés, et les sols dénudés et érodés par l'érosion hydrique et l'érosion éolienne.

Des travaux soulignent l'augmentation concomitante des surfaces cultivées et encroutées et déduisent des liens directs entre la mise en culture et la dégradation des sols qui se manifeste par l'encroutement superficiel (Albergel et al., 1991 ; Séguis et al., 2004 ; Leblanc et al., 2008 ; Bouzou Moussa et al., 2009 ; Descroix et al., 2011 ; Souley Yero, 2012). D'autres études (Ambouta et al., 1996 ; Valentin et al., 2004) notent cependant que les pratiques culturales (sarclage, labour) favorisent l'élimination des éléments fins par lessivage et érosion hydrique et/ou éolienne, entrainant ainsi l'accumulation des éléments grossiers en surface, ce qui contrarie la formation et le développement des croutes en surface. En termes de processus hydrodynamiques, il existe peu d'articles (Valentin et al., 1990 ; Vandervaere et al., 1996 ; Peugeot et al., 1997 ; Valentin et al., 2004 ; Ndiaye et al., 2005) expliquant l'effet des pratiques culturales sur les propriétés de transfert dans le sol. Le lien direct entre la mise en culture des sols et leur encroutement est-il vraiment établi ? Si oui, comment le vérifier, sachant que la quasi-totalité des études effectuées sur parcelles expérimentales (Bachir, 2012 ; Mamadou, 2012) notent un coefficient de ruissellement plus faible sur les parcelles cultivées que sur les autres états de surface des sols ?

L'objectif de ce travail est donc de clarifier l'effet du sarclage sur l'évolution de la conductivité hydraulique des zones cultivées de l'Ouest du Niger en comparaison avec celle des zones de jachère.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Site d'étude

Les mesures sont effectuées sur le bassin versant de Melé Haoussa (6 ha), situé dans la zone cultivée de la vallée du fleuve Niger, à 70 km au Nord-Ouest de Niamey au Niger (**Figure 1**). Ce bassin est dominé en surface par des formations pédologiques sablo-limoneuses souvent de faible épaisseur (moins d'1 m) couvrant les altérites du socle cristallin (essentiellement granitique). Le paysage se caractérise par la juxtaposition de plusieurs unités morpho-pédologiques (**Figure 2**), drainées par les affluents du fleuve Niger, dont les principales sont les buttes résiduelles et des longs glacis, entrecoupés souvent par des affleurements rocheux (dômes granitiques). Avec un cumul pluviométrique annuel de l'ordre de 400-450 mm étalé sur quatre mois (de juin à septembre), le climat de la zone est typiquement sahélien. L'agriculture est pluviale et/ou fluviale. La riziculture et le maraichage se pratiquent, de manière intensive, au bord du fleuve Niger, tandis que les

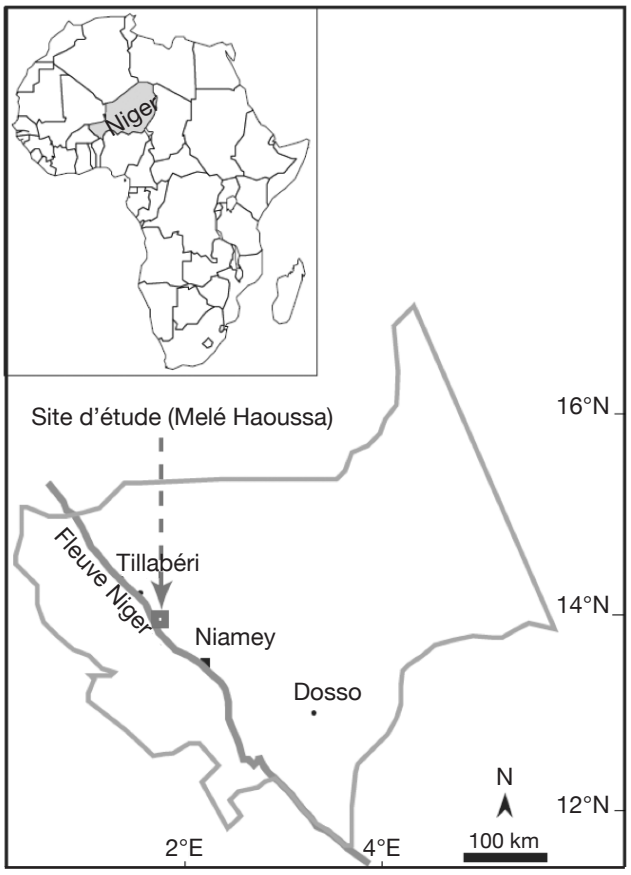

Figure 1. Localisation du site d'étude dans l'Ouest du Niger — *The study site localisation in West Niger.*

Pour voir cette figure en couleur, consulter notre site Internet — *See the article online to view this figure in color.*

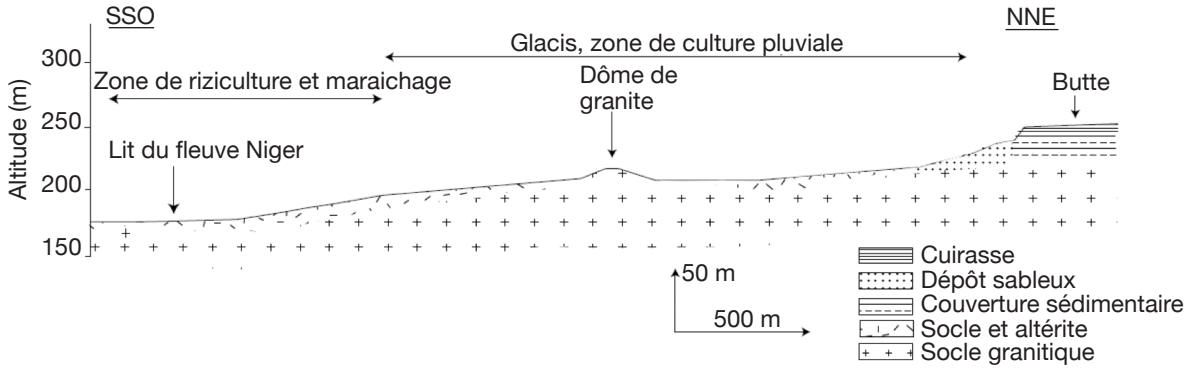

Figure 2. Unités morpho-pédologiques caractéristiques du site d'étude — *Characteristic morpho-pedological units of the study site*.

cultures céréalières (mil et sorgho) sont pluviales et produites de manière extensive sur les glacis. L'espace agricole pluvial est constitué d'une mosaïque d'aires cultivées et d'aires en jachère dont les proportions sont variables d'une période à l'autre. L'espace en jachère sert d'aire de pâturage aux animaux. La mise (ou la remise) en culture des terres se caractérise par une série de techniques débutant avec le défrichement qui consiste à couper les arbustes avant la saison des pluies. Le semis est ensuite effectué après la première pluie consistante. L'entretien des champs, durant la saison des pluies, se limite aux opérations de sarclage (deux passages en général) pour améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol et réduire la compétition entre plantes cultivées et adventices, en éliminant ces dernières. Le sarclage implique un remaniement de la surface du sol sur une faible profondeur (5-10 cm environ). L'outil utilisé pour cela est la iler (**Figure 3**).

2.2. Les variables caractéristiques de l'hydrodynamique du sol

La dynamique de l'eau dans le sol résulte de la somme des diverses forces auxquelles elle est soumise (gravité, capillarité, adsorption, etc.) dont les principales sont définies par le potentiel matriciel du sol (h) et le potentiel de gravité ($-z$) attaché à l'axe z vertical descendant. Le potentiel matriciel h est lié aux forces capillaires et d'adsorption et correspond à une énergie par unité de poids, soit l'équivalent d'une hauteur de colonne d'eau verticale. Le potentiel matriciel h est une grandeur négative en zone non saturée, l'eau y étant présente à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La dynamique de l'eau dans le sol est par ailleurs décrite par le potentiel gravitaire, notée ($-z$), exercé par les forces de la pesanteur. Le comportement dynamique de la phase liquide s'effectue donc en réponse aux variations spatiales de ces deux potentiels dont la somme correspond au potentiel total ou charge hydraulique (H) défini par :

$$H = h - z \qquad \text{(Éq. 1)}$$

Entre deux points d'un écoulement, la variation de la charge hydraulique H est exprimée sous forme de gradient de charge et les phénomènes mis en jeu dans le transfert de l'eau en milieu poreux non saturé sont décrits par la loi de Darcy (Darcy, 1856) dont l'expression, généralisée aux milieux saturés ou non, est :

$$\vec{q} = -K(h)\overrightarrow{grad}H \qquad \text{(Éq. 2)}$$

où q est le flux d'infiltration par unité de surface [LT^{-1}], $K(h)$ est la conductivité hydraulique [LT^{-1}] dépendante du potentiel matriciel et gradH, le gradient de charge hydraulique [].

L'Éq. 2 introduit une grandeur fondamentale pour la description du transfert de l'eau dans le sol, la conductivité hydraulique. Elle caractérise l'aptitude d'un sol à laisser circuler l'eau. C'est une variable omniprésente en sciences du sol et en hydrologie.

Figure 3. La iler, outil de sarclage largement utilisé dans la zone d'étude — *The iler, hoeing tool widely used within the study area*.

La conductivité hydraulique est un paramètre intrinsèque pour un sol donné à un instant donné et son changement renseigne sur l'évolution des propriétés hydrodynamiques de ce sol, en particulier celles affectant sa structure sous l'effet du climat et/ou de facteurs anthropiques.

2.3. Dispositif et protocole de mesures

Pour suivre l'évolution de la conductivité hydraulique du sol en rapport avec les pratiques culturales, nous avons effectué des mesures *in situ* dans le champ cultivé et dans la jachère au cours de la saison des pluies de 2012. Ces mesures consistent à suivre l'évolution temporelle de la conductivité hydraulique sur ces deux types de surface dont l'un est cultivé et l'autre non (jachère). Ces surfaces, situées sur un versant à faible pente (de l'ordre de 3 %), sont représentatives, d'une part, de la zone des cultures de mil pluviales, toutes situées en bas de versant et, d'autre part, de la jeune jachère destinée à être remise en culture après une période de cinq à sept ans, ce qui est une durée moyenne pour la zone sahélienne. Le dispositif de mesure utilisé est appelé tensio-infiltrométrie (**Figure 4**). Ce dispositif est constitué d'un infiltromètre à succion contrôlée (Perroux et al., 1988), placé à la surface du sol, sous lequel se trouve un cylindre métallique dont le rôle est de forcer l'écoulement en monodimensionnel vertical et de deux mini-tensiomètres. Par rapport à l'infiltrométrie classique, axisymétrique, le fait d'avoir un écoulement monodimensionnel réduit fortement les incertitudes sur la détermination de la conductivité hydraulique (Vandervaere, 1995 ; Vandervaere et al., 2000), ce qui permet de faire des comparaisons entre sites ou entre méthodes de travail du sol sans craindre de fausses conclusions fondées sur du bruit de mesure. Les cylindres, de 12 cm de longueur et de 8,5 cm de diamètre, sont percés à la hauteur du passage souhaité pour ces tensiomètres. Ils sont enfoncés dans le sol à la main sans choc afin de garder la perturbation du sol minimale. L'infiltromètre à succion contrôlée permet d'assurer un apport d'eau contrôlé à la surface du sol en lui imposant une succion constante. Il présente l'avantage d'imposer une pression négative, contrairement aux anciens infiltromètres (infiltromètre à double anneau ou infiltromètre de Muntz, Casenave et al., 1989 ; Boivin, 1990) et donc de permettre d'étudier les transferts hydriques à différents états de saturation. Tous les essais sont réalisés à une pression de - 10 mm. En l'absence de macroporosité (jamais observée sur les sites), cette valeur est suffisamment proche de zéro pour garantir la saturation de tous les pores du sol, ce qui permet d'assimiler la conductivité mesurée à sa valeur à saturation, *Ks*. Chacun des deux tensiomètres est constitué d'une bougie poreuse en céramique (longueur, 20 mm ; diamètre, 2,2 mm) collée à un tube capillaire semi-rigide, lui-même connecté à un capteur de pression. Les bougies ont été installées à deux profondeurs, *z1* et *z2*, situées respectivement à environ 3 cm et 6 cm de la surface du sol. Les dénivelées entre les capteurs et les bougies sont soigneusement mesurées à l'aide d'une règle et d'un niveau à bulle.

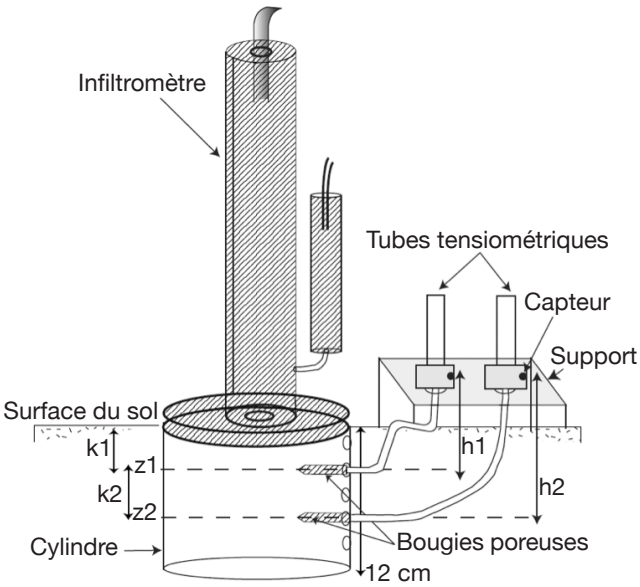

Figure 4. Dispositif de mesure d'infiltration *in situ* (tensio-infiltrométrie) — *Device used for* in situ *infiltration measurements (tensio-infiltrometry)*.

Le flux d'infiltration étant forcé en géométrie monodimensionelle verticale le long du cylindre métallique, la projection de la loi de Darcy (Éq. 2) sur l'axe vertical donne la conductivité hydraulique par :

$$Ks = -qz\frac{\Delta z}{\Delta H} \qquad \text{(Éq. 3)}$$

où *qz* est le flux d'infiltration vertical stabilisé.

Le protocole de mesure consiste à installer d'abord les cylindres dans le sol au niveau des points de mesure ciblés. Pour cela, nous avons installé six couples de cylindres sur un champ cultivé juste après le sarclage et six autres sur une jachère (âgée de cinq à sept ans) à la même date. Chaque couple correspond à deux répétitions d'un même état de surface. Les couples de cylindres sont numérotés, dans l'ordre, de un à six (**Figure 5**). Après la pluie de rang 1 (ordre des pluies depuis l'installation des cylindres) et de hauteur hp_1 (mm), nous effectuons les mesures sur les premiers couples de cylindres (notés 1 sur la **figure 5**). Puis, pour la pluie de rang 2 et de hauteur hp_2, les mesures sont effectuées sur les deuxièmes couples (notés 2 sur la **figure 5**) et ainsi de suite. Cette expérimentation est réalisée en condition de pluies naturelles. De ce fait, les

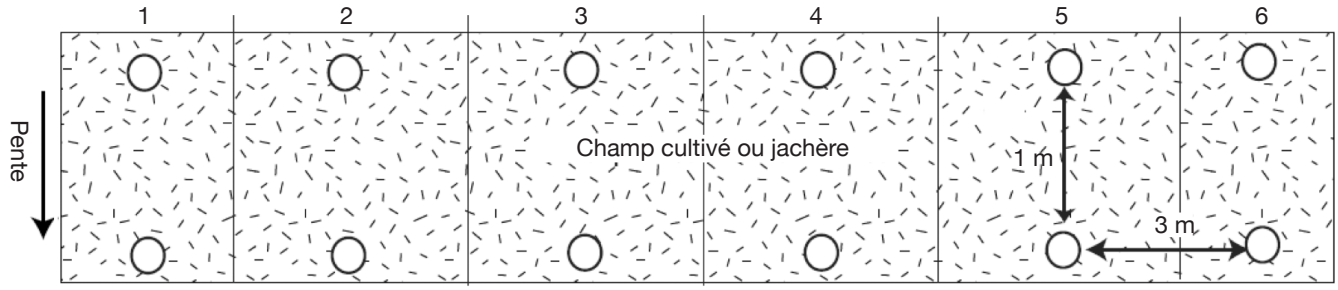

Figure 5. Protocole de suivi temporel de la conductivité sur le champ cultivé et sur la jachère pour la saison 2012 (pas à l'échelle) — *Schematic monitoring plan for the hydraulic conductivity evolution on the cultivated field and on the fallow for the 2012 season (not to scale).*

averses et leurs hauteurs sont distribuées de manière aléatoire au cours du temps. Le suivi d'évolution de la structure du sol consiste alors à analyser l'évolution de la conductivité en fonction du cumul de pluie *Hp* défini par :

$$Hp_j = \sum_{i=1}^{j} hp_i \qquad \text{(Éq. 4)}$$

Durant la saison 2012, le sarclage a été réalisé en conditions de sol humide. Lors de la saison 2013, l'essai a été répété, nous avons souhaité évaluer l'effet de l'humidité du sol lors du sarclage sur l'évolution de la conductivité. Les cylindres devant servir aux mesures ont alors été installés, d'une part, sur une parcelle sarclée en état sec où cinq couples sont installés et, d'autre part, sur une parcelle sarclée en état humide, cinq couples également (**Figure 6**).

Au total, 22 couples de cylindres sont installés dont 12 en 2012 et 10 en 2013.

La teneur en eau initiale du sol au moment du sarclage est mesurée avec un humidimètre capacitif SM200 (Delta-T) qui échantillonne les cinq premiers centimètres de la surface.

2.4. Déroulement et analyse des mesures d'infiltration

L'infiltromètre permet de suivre la stabilisation progressive du flux d'infiltration, tandis que les tensiomètres permettent de suivre l'évolution du

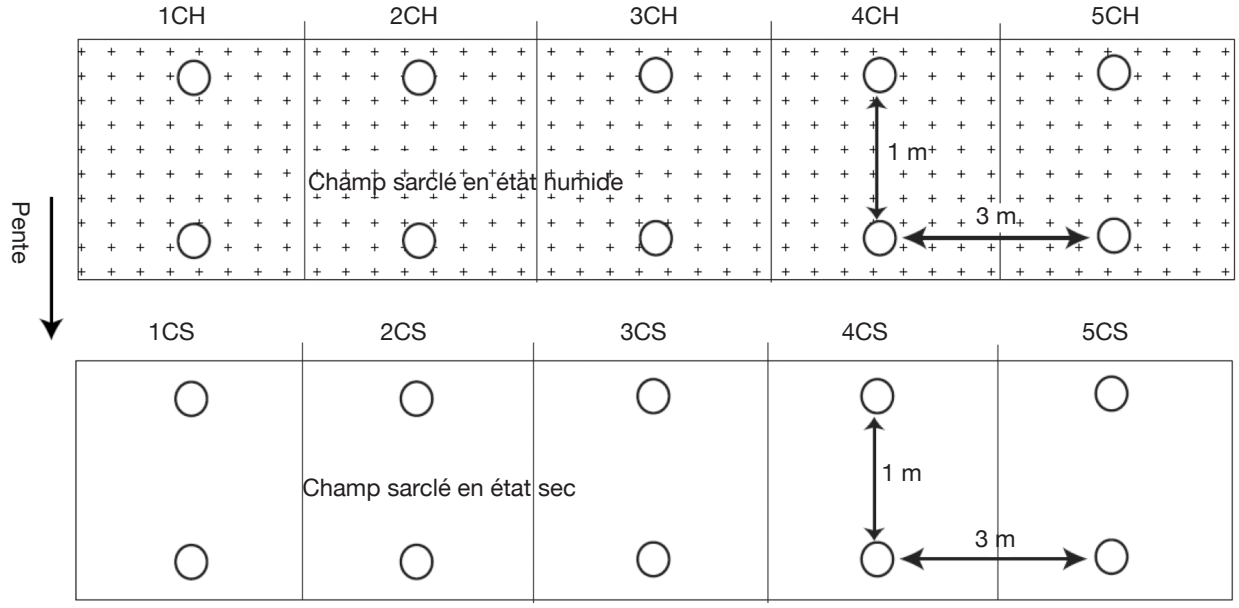

Figure 6. Protocole de suivi temporel de la conductivité sur les champs sarclés en état humide et en état sec pour la saison 2013 (pas à l'échelle) — *Schematic monitoring plan for the hydraulic conductivity evolution on the cultivated field with wet hoeing and dry hoeing for the 2013 season (not to scale).*

CH : champ cultivé en état humide — *wet hoeing* ; CS : champ cultivé en état sec — *dry hoeing*.

potentiel matriciel de l'eau au cours du temps. Les capteurs connectés à ces tensiomètres sont fournis en courant par une alimentation stabilisée à 5V et répondent à la pression par des signaux en tension qui, après amplification, sont directement lus sur un voltmètre numérique. Pour passer de la tension (U en mV) au potentiel matriciel (*h* en cm), ce dispositif est étalonné *in situ* avant chaque essai pour s'affranchir des dérives possibles en température. Cet étalonnage est réalisé en deux points en amenant le capteur à des élévations successives de 10 et 50 cm environ au-dessus d'une surface libre et en notant, dans chaque cas, la tension fournie une fois le signal stabilisé. L'incertitude finale sur les valeurs de potentiel matriciel a été estimée à moins de 3 cm d'eau. Ainsi, en désignant respectivement par *h1* et *h2* les potentiels matriciels mesurés aux cotes *z1* et *z2*, l'évolution de *h1* par rapport à la pression *h* imposée permet de suivre le gradient de charge hydraulique entre la surface du sol et la profondeur *z1*, tandis que l'évolution entre *h1* et *h2* donne le gradient entre *z1* et *z2* (**Figure 4**).

Chaque essai est prolongé le temps nécessaire pour atteindre un régime permanent en flux et en pression.

En chaque point, nous obtenons ainsi deux valeurs de conductivité, soit une valeur de conductivité en surface (*K1* pour 0-3 cm) et une autre en sub-surface (*K2* pour 3-6 cm) en utilisant les valeurs de gradients correspondantes.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le **tableau 1** récapitule le nombre de mesures retenues et la valeur moyenne de conductivité hydraulique par état de surface. En tout, nous avons installé 22 couples de cylindres pour effectuer nos mesures. Sur les six couples installés en 2012 sur la surface en jachère (qui sert aussi d'espace de pâturage), trois ont été piétinés par les animaux. Sur les 11 couples installés sur la surface sarclée en état humide (six couples en 2012 et cinq couples en 2013), seuls six ont effectivement fourni des mesures exploitables. Parmi les cinq couples non utilisés, deux ont été déterrés par des enfants avant la mesure. Les autres ont été rejetés après critique en raison des valeurs erronées de la tension, et donc de la conductivité, dues à un mauvais contact d'un tensiomètre avec le sol. Un des cinq couples installés sur la surface sarclée en état sec est également inexploité à cause de la chute de l'infiltromètre durant la mesure et un autre rejeté après critique. Finalement, seuls 12 des 22 couples sont analysés.

Les durées d'essai varient entre 1h30 et 2h30. Les **figures 7** et **8**, issues des mesures effectuées en 2013 (sur le cylindre 2 CH haut, suivant le sens de la pente, **figure 6**) et données ici à titre d'exemple, illustrent, respectivement, la stabilisation du flux d'infiltration et celle des potentiels matriciels pour un même essai après 1h30. Elles permettent d'apprécier la quasi-stabilité des dernières valeurs mesurées. Les dynamiques de ces figures sont représentatives de la majorité des essais effectués.

Pour chaque essai, la valeur de conductivité s'obtient par l'application de l'Éq. 3.

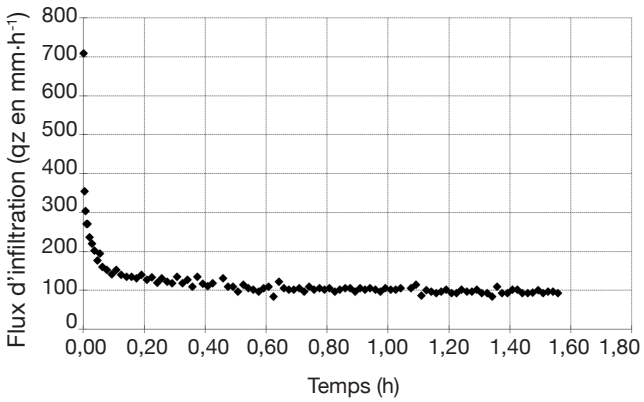

Figure 7. Exemple de stabilisation du flux d'infiltration (qz) au cours d'un essai (ici sur le champ cultivé) — *Example of infiltration flux stabilisation (qz) during a test (here on the cultivated site).*

Tableau 1. Nombre de mesures retenues et conductivité moyenne (Ks) par état de surface, en surface et en sub-surface — *Number of valid measures and mean hydraulic conductivity (Ks) per surface feature, at the surface and the subsurface.*

	Surface (0-3 cm)		**Sub-surface (3-6 cm)**	
	Nombre de répétitions par état de surface	**Ks moyenne et écart-type** (mm·h^{-1})	**Nombre de répétitions par état de surface**	**Ks moyenne et écart-type** (mm·h^{-1})
Jachère	6	21 (± 9)	6	119 (± 70)
Champ sarclé en état humide	12	38 (± 28)	12	108 (± 72)
Champ sarclé en état sec	6	32 (± 15)	6	275 (± 189)

Les écarts-types sont donnés entre parenthèses — *Standard deviations are given between brackets.*

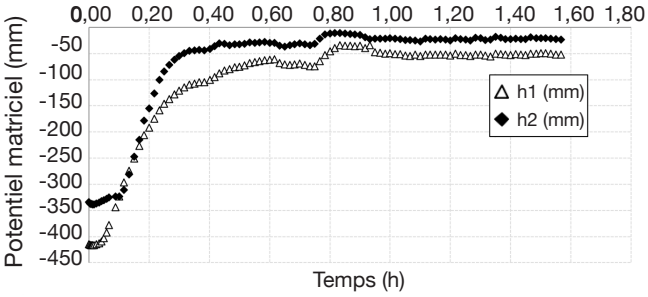

Figure 8. Exemple d'évolution de la pression d'eau du sol au cours d'un essai (ici sur le champ cultivé) — *Example of soil pressure head evolution during a test (here on the cultivated site).*

h1 et h2 sont les valeurs du potentiel matriciel à 3 cm et à 6 cm de profondeur, respectivement — *h1 et h2 are pressure head values at 3 cm and 6 cm depth, respectively.*

3.1. Les valeurs moyennes de la conductivité mesurée en surface et en sub-surface

La **figure 9** représente les valeurs moyennes des conductivités mesurées en surface et en sub-surface sur les trois types d'états de surface.

Il apparait clairement que, contrairement aux milieux tempérés où la conductivité décroit avec la profondeur, la conductivité des sols de notre zone d'étude est plus faible en surface d'un facteur trois à cinq. Il s'agit d'une particularité bien connue des sols sahéliens sujets à l'encroutement de surface dû aux fortes intensités de pluie. Sur la jachère, la valeur moyenne de conductivité de surface est plus faible que celle du champ cultivé, ce qui va dans le sens attendu puisque le travail du sol est en partie fait pour améliorer l'infiltration. Cette valeur est par ailleurs plus élevée sur le champ sarclé en état humide. Cependant, les écarts-types sont relativement plus grands sur la surface cultivée, ce qui dénote une forte variabilité spatiale, probablement le signe de l'irrégularité du passage de l'outil, et surtout temporelle puisqu'il s'agit d'une moyenne sur un ensemble de mesures effectuées à des dates variées par rapport au sarclage.

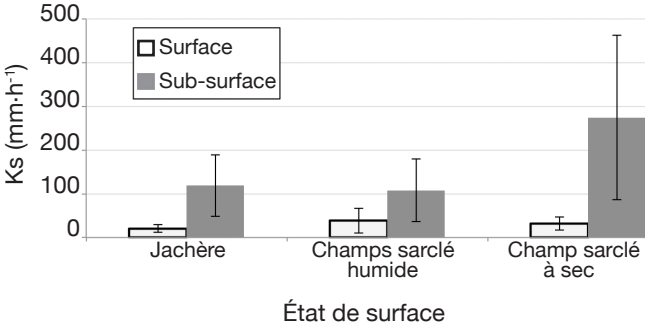

Figure 9. Valeurs moyennes des conductivités mesurées en surface (0-3 cm) et en sub-surface (3-6 cm) — *Mean conductivity values measured at the surface (0-3 cm) and the subsurface (3-6 cm).*

Le nombre de répétitions des essais par état de surface est fourni dans le **tableau 1** — *The number of replications for each surface feature is given in* ***table 1*** ; La barre d'erreur correspond à un écart-type — *The error bar corresponds to one standard deviation.*

En sub-surface, la valeur moyenne de conductivité est identique sur la jachère et sur le champ sarclé en état humide et est nettement inférieure à celle déterminée en sub-surface du champ sarclé en état sec. Les larges écarts-types de ces mesures s'expliquent par la variabilité spatiale des propriétés du sol, mais aussi et surtout par les faibles valeurs fréquentes du gradient de charge hydraulique qui peut tendre parfois vers zéro en sub-surface. La division du flux par ce gradient (Éq. 3) conduit à des valeurs très fortes. En conséquence, la valeur de la conductivité de sub-surface est très sensible aux imprécisions sur la valeur de ce gradient, même pour un flux d'infiltration bien stabilisé.

On voit donc que l'infiltration de l'eau est pilotée par les propriétés de surface et par l'existence des croutes ou des couches compactes à faible conductivité hydraulique sur seulement les deux ou trois premiers centimètres. Cette réduction de l'infiltration entraine l'augmentation de la fraction qui ruisselle durant la pluie. Les couches compactes n'étant que de faible épaisseur, leur structure n'est pas irréversible et un remaniement relativement peu profond peut permettre de les détruire et d'homogénéiser la structure du sol. Après travail du sol, la conductivité du profil homogénéisé a donc de fortes chances de tendre vers la valeur de la sub-surface, plus favorable à l'infiltration de l'eau.

3.2. Évolution temporelle comparée de la conductivité hydraulique sur culture et jachère

Seul le suivi temporel de la conductivité de surface est présenté ici. Le résultat de ce suivi, effectué sur la surface cultivée (saisons 2012 et 2013) et sur la jachère (saison 2012), est représenté **figure 10**.

Sur la **figure 10**, on constate que la conductivité mesurée sur la jachère n'évolue quasiment pas au cours de la saison des pluies, malgré le développement des herbacées. La conductivité mesurée après 10 mm de pluie depuis l'installation du cylindre est égale à celle mesurée sur un cylindre ayant enregistré un cumul de pluie de près de 230 mm depuis l'installation. Cette quasi-stationnarité de la conductivité sur la jachère n'est toutefois pas tout à fait attendue au vu de l'évolution, au moins apparente, de la structure du sol qu'entraine le développement de la végétation herbacée. Elle peut être interprétée comme le signe

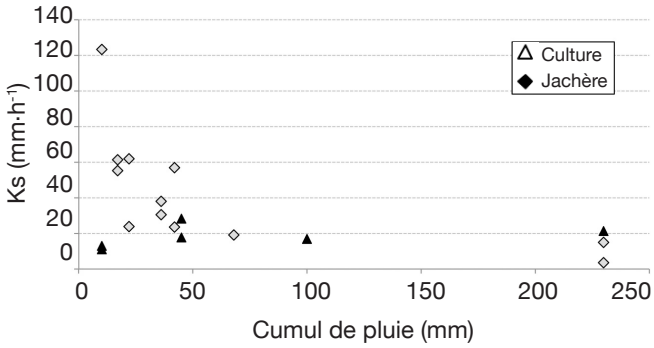

Figure 10. Évolution de la conductivité hydraulique (Ks) sur les surfaces cultivée et en jachère en fonction du cumul de pluie reçue après le sarclage (pour la surface cultivée) ou depuis l'installation des cylindres (pour la jachère). Seules les mesures réalisées en surface (0-3 cm) sont ici représentées — *Hydraulic conductivity (Ks) evolution on the cultivated and fallow fields as a function of the amount of rain received after hoeing (for the cultivated field) or after the installation of the cylinders (for the fallow). Only the surface (0–3 cm) measurements are shown.*

d'une faible influence des pores racinaires sur l'infiltration. Des résultats similaires sont notifiés dans la littérature. Thébé (1987)[1], cité par Peugeot (1995), rapportait, en étudiant l'infiltration dans le Sahel camerounais, que la végétation n'a pas une influence notable sur l'infiltration si sa densité de recouvrement est inférieure à 57 %. L'évolution de la conductivité qu'aurait entrainée la croissance de la végétation sur la jachère est donc imperceptible. La faible conductivité de la jachère peut par ailleurs s'expliquer par l'âge de celle-ci. Ambouta et al. (1996) ont en effet montré qu'au-delà d'une durée de cinq à sept ans, la jachère s'encroute et ne restaure plus les propriétés hydrodynamiques de façon optimale. Ils expliquent l'encroutement de la jachère par la « fossilisation » de l'abondante poussière éolienne (riche en particules fines) piégée du fait de la réinstallation de la végétation et qui, n'étant plus incorporée à l'ensemble de l'horizon superficiel à cause de l'arrêt des travaux culturaux, s'accumule à la surface et colmate la porosité lors des évènements pluvieux.

Le résultat du suivi de la conductivité de la surface cultivée de la **figure 10** correspond à celui mesuré sur la surface sarclée en état humide. La conductivité hydraulique décroit fortement et régulièrement en fonction du cumul de pluies enregistrées après le sarclage. La conductivité hydraulique déterminée juste après le sarclage (après seulement 10 mm de pluie enregistrée) est de l'ordre de 120 mm·h^{-1}. Cette valeur, qui est du même ordre de grandeur que celle du sol sous-jacent (108 mm·h^{-1}, **Figure 9**) montre l'importance du remaniement du sol dans l'amélioration de l'infiltration à court terme. Le travail superficiel permet d'homogénéiser le sol sur une dizaine de centimètres. En conséquence, la réponse hydrodynamique du sol est contrôlée par une surface homogène et sans compaction (Ahuja et al., 1998) d'où, le plus souvent, l'absence de ruissellement après le sarclage. Durant les premières pluies qui suivent le sarclage, la conductivité hydraulique décroit rapidement. Après un cumul de 70 mm de pluie, la conductivité atteint 20 mm·h^{-1}, ce qui correspond à la conductivité moyenne obtenue sur la jachère. Après 230 mm de cumul de pluie depuis le sarclage, la conductivité de la surface cultivée atteint la faible valeur de 10 mm·h^{-1}, semblable à celle mesurée sur les surfaces encroutées (Malam Abdou, 2014) comme les croutes d'érosion nommées ERO qui sont constituées d'une mince pellicule compacte qui se forme après décapage des micro-horizons superficiels du sol (Casenave et al., 1989) ou les croutes biologiques (Malam Issa et al., 2011). Cette évolution laisse affirmer qu'après un cumul de pluie de l'ordre de 70 mm, le sarclage n'a plus d'effet positif sur l'infiltration et que cet effet devient même négatif au-delà, le champ sarclé atteignant une faible conductivité qui n'est jamais observée sur la jachère.

Il est important de souligner la grande variabilité de la conductivité des surfaces cultivées (120 à 10 mm·h^{-1}). Elle explique le large écart-type de conductivité mesurée en surface (**Figure 9**). Prendre une valeur moyenne de conductivité hydraulique de la surface cultivée sans prise en compte de la date de travail du sol et du cumul pluvieux reçu serait hydrologiquement de bien peu d'intérêt.

Nous retenons également que le sarclage présente l'avantage d'ameublir et d'homogénéiser le sol, ce qui constitue en soi une bonne mesure de régénération. Cependant, cet avantage est temporellement très limité comme le notifient Roose (1977) et Peugeot et al. (1997). Cependant, ces auteurs ne fournissent pas de valeurs de conductivité hydraulique du sol. La profondeur d'action des outils aratoires utilisés limite leur efficacité sur une couche superficielle de l'ordre de 10 cm seulement. Le manque d'apports des matériaux (matière organique en l'occurrence) aidant la régénération fait que cette couche superficielle se compacte assez vite sous l'effet des pluies (effet splash), ce qui inhibe progressivement l'effet du sarclage sur l'infiltration. L'analyse des valeurs numériques de la conductivité hydraulique permet, en conséquence, de dresser un schéma qualitatif et quantitatif d'évolution des surfaces cultivées, passant d'une surface initiale à forte valeur de conductivité à l'équivalent d'une surface encroutée de type ERO. Ce schéma d'évolution

[1] Thébé, 1987. *Hydrodynamiques de quelques sols du Nord Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelle*. Thèse : Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (France).

rejoint celui élaboré par Valentin et al. (1992) basé sur des critères morphologiques dans lequel ces auteurs décrivent les étapes de modifications structurales successives d'une surface à structure fragmentaire (fraichement remaniée) vers une surface compacte de type ERO en passant par une surface structurale caractéristique de la jachère.

Par ailleurs, étant donné que le nombre moyen de sarclages par saison pluviométrique (de juin à septembre) est généralement de deux dans notre zone d'étude, on voit que cette pratique culturale ne contrarie l'encroutement des surfaces cultivées que sur une période limitée. Cette assertion est d'ailleurs confirmée par la mesure du ruissellement produit par la surface cultivée où nous avons montré (Malam Abdou, 2014) que sur 63 évènements pluvieux observés entre 2011 et 2013, 22 ont un coefficient de ruissellement supérieur ou égal à celui de la jachère (qui est de 0,28), dont près des deux tiers sont observés après plus de 70 mm de pluie suivant le sarclage.

On peut donc retenir que dès qu'une surface sarclée reçoit un cumul de pluie de l'ordre de 70 mm, l'effet bénéfique du sarclage sur l'infiltration s'estompe. Cette conclusion rejoint celle formulée par Ndiaye et al. (2005) sur la base de mesures de flux. De ce fait, doit-on accroitre le nombre de sarclages pour optimiser davantage l'infiltration de l'eau dans le sol ? L'expérimentation faite par Bachir (2012) sur deux parcelles cultivées, dont l'une sarclée après chaque pluie et l'autre sarclée deux fois par saison culturale (conformément aux pratiques paysannes locales), permet de conclure que l'effet d'un grand nombre de sarclages est contre-productif pour l'infiltration. Cet auteur a en effet obtenu un coefficient du ruissellement de 0,25 sur la parcelle régulièrement sarclée (après chaque pluie) et un coefficient de 0,14 sur celle sarclée deux fois. Ce résultat est par ailleurs confirmé par Bahari Ibrahim (2013). Une hypothèse qui peut ici être faite est qu'en effectuant plusieurs sarclages, on accroit potentiellement la quantité de particules prédisposées à l'érosion, principal facteur de dégradation des sols. L'intensité de l'érosion crée alors localement des micro-dépressions hydro-éoliennes dénudées, constituant ainsi des impluviums qui s'élargissent au fil du temps par déflation. L'explication de l'effet contre-productif d'un trop grand nombre de sarclages est alors à chercher à une échelle plus grande que l'échelle ponctuelle, ce qui sort du cadre de la présente étude.

3.3. Effet de la teneur en eau initiale au moment du sarclage sur l'évolution temporelle de la conductivité

Devant le succès des mesures de tensio-infiltrométrie réalisées au cours de la saison 2012, nous avons repris le même protocole au cours de la saison 2013 pour comparer les surfaces sarclées en état sec et en état humide (**Figure 6**), ce qui nous a permis d'étudier l'effet de l'humidité initiale prévalant au moment du sarclage sur les valeurs et sur la décroissance de la conductivité.

Les teneurs en eau mesurées au moment des sarclages sont fournies dans le **tableau 2**. Elles montrent un facteur supérieur à dix entre les valeurs moyennes des deux conditions.

Les valeurs de conductivité hydraulique sont données à la **figure 11** avec, pour le cas du sarclage en conditions humides, le regroupement des données des saisons 2012 et 2013.

On voit clairement que la conductivité d'une surface sarclée en état sec est inférieure à celle de la même surface sarclée en état humide dès le travail du sol et par la suite. Ceci peut s'expliquer par une faible aération et une moindre agrégation du sol en conditions sèches, aboutissant à un encroutement de la surface cultivée plus rapide. L'effet du sarclage est donc à la fois plus fort et plus persistant dans le temps s'il est réalisé en état humide, au plus tôt après une pluie. Cette

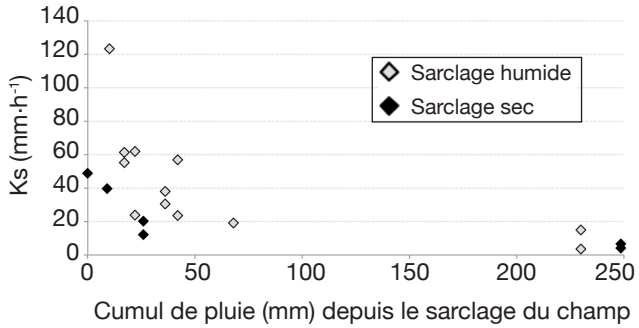

Figure 11. Effet de la teneur en eau lors du sarclage sur l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction du cumul de pluie reçu depuis le sarclage — *Effect of the initial hoeing soil moisture onto the hydraulic conductivity evolution as a function of the amount of rain received after hoeing*.

Tableau 2. Teneurs en eau volumiques initiales des surfaces sarclées en état sec et en état humide sur le sol cultivé — *Initial volumetric water content of the cultivated field for dry hoeing and wet hoeing*.

	1re mesure	2e mesure	3e mesure	Moyenne	Écart-type
Sarclage en état sec ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	0,007	0,017	0,002	0,009	± 0,008
Sarclage en état humide ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	0,156	0,142	0,175	0,158	± 0,017

particularité est d'ailleurs connue des agriculteurs de la région où le sarclage humide domine largement, mais on sait qu'un manque de main-d'œuvre peut conduire à l'impossibilité de sarcler tous les champs d'une même famille le même jour. Le sarclage à sec peut donc être pratiqué par défaut. Les agriculteurs justifient leur préférence pour le sarclage humide par une plus grande facilité à le réaliser et par le fait que, selon eux, le sol conserve plus longtemps son humidité, ce qui constituerait un avantage en termes de rétention et non en termes de perméabilité, donc un avantage distinct de celui que nous avons mis en évidence. Ils rapportent que le sarclage à sec présente, toutefois, l'avantage de permettre l'élimination complète des adventices. Si le sarclage intervient après une pluie, les racines de certaines herbacées restent enfouies dans le sol malgré le remaniement et peuvent, l'humidité superficielle aidant, se repiquer naturellement.

4. CONCLUSIONS

Ce travail a permis de caractériser et suivre l'évolution de la conductivité hydraulique de la surface du sol sur un petit bassin sur socle de l'ouest du Niger. Ces zones se caractérisent par une mosaïque des surfaces cultivées et des surfaces en jachère. Partout, la conductivité est minimale sur les trois premiers centimètres par rapport à la couche sous-jacente. Le suivi saisonnier montre une quasi-stationnarité de la conductivité des surfaces en jachère (âgées de cinq à sept ans) autour de 20 $mm \cdot h^{-1}$, qui s'explique par la faible influence de la végétation herbacée sur la structure superficielle du sol. Sur les surfaces cultivées en revanche, ces propriétés évoluent sous l'effet du sarclage qui opère une redistribution superficielle de la structure et de la macroporosité qui se colmate au fur et à mesure que la surface reçoit la pluie. L'effet du sarclage sur l'infiltration qui va jusqu'à augmenter la conductivité à 120 $mm \cdot h^{-1}$, s'estompe dès que la surface sarclée enregistre un cumul de pluie de l'ordre de 70 mm. Après un cumul de pluie de l'ordre de 200 à 250 mm, la surface sarclée présente la même valeur de conductivité que les surfaces de type ERO, ce qui traduit l'encroutement progressif des surfaces cultivées. L'encroutement est d'ailleurs plus rapide lorsque le sarclage est effectué sur un sol sec du fait de la faible agrégation qu'entraine le travail du sol dans ces conditions. Cette étude permet ainsi d'établir le lien direct entre la mise en culture, l'encroutement et l'augmentation du ruissellement dans les zones cultivées. Ceci a pu être mis en évidence à l'échelle saisonnière. Il reste, à l'avenir, à concevoir et mettre en place des protocoles permettant de saisir l'effet de la mise en culture à l'échelle pluriannuelle. Une autre perspective envisagée dans le cadre de notre bassin d'étude est de comparer les efficacités respectives du travail du sol manuel à la iler et du travail effectué à la charrue. Ceci pourrait être fait en parallèle par tensio-infiltrométrie et par suivi de parcelles de ruissellement. À l'échelle régionale, il est probable que nos résultats concernant l'évolution des surfaces cultivées après sarclage soient assez bien généralisables à d'autres zones du Sahel. En revanche, la stationnarité des paramètres d'infiltrabilité des jachères constitue une observation difficile à généraliser car probablement très dépendante de leur âge et du type de végétation herbacée.

Remerciements

Ce travail a été financé par le LabEx Osug@2020 (Investissements d'avenir – ANR10LABX56), le PPR-SREC, la JEAI Sapalote, l'Observatoire AMMA-Catch et l'IFS que nous remercions vivement ici. Le premier auteur a bénéficié d'une bourse de thèse de l'IRD-DSF.

Bibliographie

Ahuja L.R. et al., 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**(5), 1228.

Albergel J. & Valentin C., 1991. *Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien Kognere-Boulsa, au Burkina Faso*. Dakar : Presse Universitaire de Dakar.

Ambouta K., Valentin C. & Laverdière M.R., 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, **7**, 269-275.

Bachir A., 2012. *Changements d'usage des sols et érosion dans l'aire « ayi noma » à la périphérie du parc national du W du Niger*. Thèse de doctorat : Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger).

Bahari Ibrahim M., 2013. *Dynamique hydrogéomorphologique actuelle du kori Mountséka, centre sud Niger*. Thèse de doctorat : Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger).

Boivin P., 1990. Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode Muntz : variabilité de la mesure. *Bull. Réseau Érosion*, **10**, 14-24.

Bouzou Moussa I. et al., 2009. Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. *Sécheresse*, **20**(1), 145-152.

Casenave A. & Valentin C., 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration*. Paris : ORSTOM, http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:27816, (19/06/15).

Casenave A. & Valentin C., 1990. Les états de surface : une des clefs de l'hydrologie sahélienne. *In* : *Proceedings of the Sahel Forum, The state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa, Urbana, International Water Ressources*, 135-147, http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:39696, (19/06/15).

Casenave A. & Valentin C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J. Hydrol.*, **130**(1-4), 231-249.

Darcy H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. Paris : Victor Dalmont.

Descroix L. et al., 2011. Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **8**(1), 1569-1607.

Leblanc M.J. et al., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global Planet. Change*, **61**(3-4), 135-150.

Malam Abdou M., 2014. *États de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire*. Thèse de doctorat : Université de Grenoble 1 (France) et Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger).

Malam Issa O. et al., 2011. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. *Geoderma*, **167-168**, 22-29.

Mamadou I., 2012. *La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger*. Thèse de doctorat : Université de Grenoble 1 (France) et Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger).

Ndiaye B. et al., 2005. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil. *J. Hydrol.*, **307**(1-4), 294-311.

Perroux K.M. & White I., 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**(5), 1205.

Peugeot C., 1995. *Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentations* in situ *et modélisation*. Thèse de doctorat : Université Joseph Fourier - Grenoble 1 (France).

Peugeot C. et al., 1997. Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *J. Hydrol.*, **188-189**, 179-202.

Roose E., 1977. *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, vingt années de mesures en parcelles expérimentales*. Paris : ORSTOM.

Séguis L. et al., 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrol. Processes*, **18**(17), 3401-3413.

Souley Yero K., 2012. *Évolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger : influence sur le cycle de l'eau*. Thèse de doctorat : Université Joseph Fourier - Grenoble 1 (France).

Valentin C. et al., 1990. Le fonctionnement hydrodynamique aux échelles ponctuelles. *In* : *Structure et fonctionnement hydropédologique d'un petit bassin versant de savane humide*. Études et Thèses. Paris : ORSTOM, 147-163.

Valentin C. & Bresson L.-M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, **55**(3-4), 225-245.

Valentin C., Rajot J.-L. & Mitja D., 2004. Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **104**(2), 287-302.

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 de doctorat : Université Joseph-Fourier - Grenoble I (France).

Vandervaere J.-P. et al., 1996. Caractérisation hydrodynamique *in situ* de sols encroûtés. *In* : Hoepffner M., Lebel T. & Monteny B., éds. *Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel*. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, 63-78.

Vandervaere J.-P., Vauclin M. & Elrick D.E., 2000. Transient flow from tension infiltrometers II. Four methods to determine sorptivity and conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**(4), 1272-1284.

(29 réf.)