

Production du ruissellement sur un sol sableux cultivé après sarclage au Sahel

M. Malam Abdou

1) Département de Géographie, Université de Zinder, BP 656, Zinder - Niger

*: Auteur correspondant: moussa.malamabdou@gmail.com

RÉSUMÉ

L'extension concomitante des zones cultivées et encroûtées au Sahel et la hausse des ruissellements qui en découle ont amené des chercheurs à s'intéresser aux impacts des pratiques agricoles sur l'encroûtement des sols. Ce travail étudie l'effet du sarclage et des outils aratoires sur la production du ruissellement sur un sol sableux cultivé de l'Ouest du Niger. Des mesures de ruissellement et d'infiltration sont de ce fait réalisées, à l'aide des parcelles expérimentales et d'un infiltromètre à succion contrôlée, sur des surfaces sarclées avec la hiler manuelle et celle à traction animale. Ces mesures, effectuées après chaque pluie, visent à analyser l'aptitude au ruissellement de ces surfaces en fonction des cumuls de pluie qui y sont enregistrés depuis le sarclage. Les résultats montrent que la production de ruissellement est faible après le sarclage (9 % de la pluie, contre 30 % avant le sarclage) grâce à la porosité créée par cette opération et qui augmente l'infiltration. Cependant, l'effet bénéfique du sarclage sur l'infiltration s'estompe dès que la surface enregistre un cumul de pluie de l'ordre de 80 mm après le sarclage. Dès lors, l'aptitude au ruissellement augmente et la surface cultivée produit régulièrement un volume de ruissellement équivalent, voire supérieur, à celui mesuré sur une surface en jachère. L'augmentation du ruissellement met donc en évidence l'encroûtement des sols cultivés. Ceci est confirmé par la faible valeur de conductivité hydraulique (10 mm.h^{-1}) mesurée sur ces sols, valeur qui correspond à celle mesurée sur une croûte d'érosion. L'encroûtement est plus rapide si le sarclage est effectué avec la hiler manuelle. Tous ces résultats apportent un éclairage sur la dynamique des sols cultivés qui pourrait contribuer à l'amélioration de la performance des modèles de production des ruissellements sur ces sols en zone sahélienne.

Mots clés

Ruissellement, sarclage, hiler, sol sableux, Niger, Sahel.

SUMMARY**RUNOFF PRODUCTION ON CULTIVATED SANDY SOIL AFTER WEEDING IN SAHEL**

In sahelian area, the concomitant expansion of cultivated and crusted surfaces with the resulting runoff increase led researchers to focus on the impacts of agricultural practices on soil crusting. This paper analyzes the effect of weeding and plowing tools on the production of runoff on sandy soil cultivated in western Niger. Measures of runoff and infiltration are realized by using runoff plots and disc infiltrometer on weeded surfaces (with manual weeded tool and animal traction). These measures, made after each rain, aim to analyze runoff production capacity of these surfaces according to cumulative rainfall after weeding. Data analysis shows that runoff production evolves with the weeding date. From 83 measurements, only 26 are impacted by the positive action of weeding, which generates a superficial porosity and increases infiltration. Their mean runoff coefficient is 9 % vs 30 % for those measured before the weeding process. Otherwise, only rainfall events reaching 20 mm are able to generate runoff after the weeding operation, since only 7 mm were necessary to yield runoff on the same surface feature before weeding (figure 6). However, the monitoring carried out shows that the beneficial effect of weeding on infiltration fades as soon as the surface recorded a cumulative rainfall of about 80 mm after weeding. Therefore, the ability to runoff increases and the cultivated area regularly generates (figure 7) an equivalent or even higher runoff coefficient than the one measured on a fallow area, which is 28 % (figure 9). Consequently, the runoff increase highlights the crusting of cultivated soils impacted by rain storms intensity and kinetic energy, which deletes soil surface roughness and fill the porosity created by weeding. This is confirmed by the low value of hydraulic conductivity (10 mm.h^{-1}) measured on the surface corresponding to that measured on an erosion crust. Measurements realized in 2014 show that soil crusting appears sooner when weeding is done with manual weeding tool (iler) (figure 8), due to the low roughness created by this tool. Weeding thus constitutes a significant factor explaining runoff, and the date of weeding constitutes a good indicator to determine and model runoff yield on cultivated surfaces. These results give a perspective on cultivated soils dynamics, which could contribute to improve runoff productions models performance in Sahelian area.

Key-words

Runoff, weeding, iler, sandy soil, Niger, Sahel.

RESUMEN**GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA EN UN SUELO ARENOSO CULTIVADO TRAS DESBROCE EN EL SAHEL**

La extensión de áreas de cultivos con suelos encostrados en el Sahel y el consecuente aumento del escurrimiento ocasionaron que los científicos se interesen en los impactos de prácticas agrícolas sobre el encostramiento de los suelos. Este trabajo estudia el efecto de la escarda y de los instrumentos aratorios sobre la producción de escurrimiento en suelos arenosos del oeste de Niger. Mediciones de escurrimiento e infiltración se realizan, en parcelas experimentales, con un infiltrómetro de presión controlada, sobre superficies escardadas con la « iler » (el tipo de azada usada en el Sahel) y otras con tracción animal. Estas mediciones, efectuadas después de cada lluvia, tienen como objetivo de analizar la aptitud al escurrimiento de éstas superficies en función de la cantidad de lluvia registrada desde la escarda. Los resultados enseñan que la producción de escurrimiento es débil después de la escarda (coeficiente de escurrimiento 9 %, en vez de 30 % antes de la escarda), debido a la porosidad creada por esta operación que aumenta la infiltración. Sin embargo, el efecto benéfico de la escarda sobre la infiltración se aleja en cuanto la superficie recibe un total de 80 mm de lluvia desde la escarda. Desde luego, la aptitud al escurrimiento crece y la superficie cultivada produce regularmente un volumen de agua escurrida equivalente, o hasta mayor, a la que se mide en superficies en barbecho. El incremento del escurrimiento se debe al encostramiento de los suelos cultivados. Esto está confirmado por la débil conductividad hidráulica (10 mm.h^{-1}) medida en estos suelos, valor que corresponde al que se observa en costras de erosión. El encostramiento es más rápido cuando la escarda se hizo manualmente con la « iler ». Estos resultados conllevan información sobre la dinámica de los suelos cultivados, que podría contribuir a mejorar la calidad de los modelos de producción de escurrimientos en los suelos del Sahel.

Palabras clave

Escurrimiento, escarda, « iler », suelos arenosos, Niger, Sahel.

L'étude des propriétés hydrodynamiques des sols cultivés sahéliens vise généralement à caractériser l'aptitude agronomique de ces sols vis-à-vis des plantes. Mais depuis les années 1970, nombreux sont les travaux qui explorent les sols cultivés afin de vérifier l'hypothèse, probable, mettant en cause l'évolution de l'occupation des sols (à travers la mise en culture particulièrement) dans la hausse des écoulements des rivières sahéliennes (Albergel, 1987; Albergel et Valentin, 1991; Séguis *et al.*, 2004; Leblanc *et al.*, 2008; Descroix *et al.*, 2012; Amogu *et al.*, 2015). Des mesures expérimentales sont ainsi effectuées à diverses échelles spatiales (Peugeot *et al.*, 1997; Esteves et Lapetite, 2003; Karambiri *et al.*, 2009; Le-Breton, 2012; Mounirou, 2012) pour déterminer l'aptitude au ruissellement des sols cultivés. Cependant, les résultats de ces mesures ne permettent pas souvent de vérifier l'hypothèse car le coefficient de ruissellement mesuré sur la surface cultivée est généralement inférieur à celui mesuré sur une surface en jachère ou sur une surface dégradée (Roose, 1977, 1983; Bouzou Moussa *et al.*, 2009, 2011; Descroix *et al.*, 2009; Abba, 2012; Bahari Ibrahim, 2013). Outre les facteurs explicatifs d'ordre pluviométrique et morpho-pédologique (Casenave et Valentin, 1991, 1992; Lamachère, 1991; Ambouta *et al.*, 1996; Le Bissonnais, 2010), l'approche souvent utilisée, qui consiste à caractériser le ruissellement par un coefficient moyen arithmétique, ne permet pas de décrire le potentiel ruisselant d'une surface cultivée (Malam Abdou, 2014). Celle-ci est en effet soumise au sarclage qui modifie, plus ou moins profondément, les conditions d'infiltrabilité selon le type d'outil utilisé, l'état d'humidité du sol au moment de sa réalisation (Malam Abdou *et al.*, 2015), la direction du remaniement par rapport au sens général de la pente du terrain (Ndiaye *et al.*, 2005). Le sarclage induit ainsi une variabilité temporelle dans l'aptitude au ruissellement des sols cultivés. La mise en évidence de cette variabilité nécessite cependant une approche qui permet d'évaluer le potentiel ruisselant avant et après le sarclage. Ce travail s'inscrit dans cette perspective. Il vise à faire ressortir l'aptitude au ruissellement des sols cultivés avant et après le sarclage en étudiant, *in situ*, l'évolution simultanée du ruissellement et de l'infiltration.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site d'étude

Les mesures sont effectuées sur le site expérimental de Melé Haoussa, situé dans la zone cultivée de la vallée du fleuve Niger, à 70 km au nord-ouest de Niamey. Le paysage de ce site se caractérise par la juxtaposition de diverses unités morpho-pédologiques dont les principales sont des buttes résiduelles et des longs glacis, entrecoupés souvent par des affleurements rocheux. Les sols sont sableux, avec toutefois une proportion limoneuse de l'ordre de 10 %, ce qui les rend alors susceptible à l'encroûtement (Ambouta, 1994). Ces sols sont pauvres en

argiles (moins de 2 %) et en matière organique (moins de 1 %) et sont, par conséquent, très sensibles à l'érosion hydrique et éolienne. Avec un cumul pluviométrique annuel de l'ordre de 400 à 450 mm, le climat de la zone est typiquement sahélien. Les pluies sont concentrées entre les mois de juin et septembre. Le système de production repose essentiellement sur l'agriculture. Le mil, le sorgho et le niébé sont traditionnellement cultivés sur des sols sableux fins ou sablo-limoneux des glacis. On note par ailleurs la pratique de la riziculture traditionnelle dans la zone inondable du fleuve Niger ainsi que la riziculture moderne dans les aménagements hydro-agricoles mis en place par l'ONAHA (Office national des aménagements hydro-agricoles). Durant la saison des pluies (de juin à septembre), l'entretien des champs de culture pluviale consiste généralement à effectuer deux opérations de sarclage, espacées de plus ou moins un mois, afin d'améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol et réduire la concurrence 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). L'outil généralement utilisé est la herse manuelle ou à traction animale (*figure 1*). Ce remaniement modifie plus ou moins durablement les conditions d'infiltrabilité. Pour étudier son effet sur la production du ruissellement, un protocole visant à suivre l'évolution temporelle du ruissellement et de l'infiltration est ici expérimenté dans un champ cultivé situé sur un glacis.

Protocole de suivi temporel du ruissellement

Pour suivre la production et l'évolution du ruissellement, trois parcelles expérimentales, de 10m² chacune, ont été installées sur le champ cultivé. Chaque parcelle est délimitée par des murets (*figure 2*) destinés à circonscrire la propagation des flux latéraux et est équipée, en aval, d'un bidon pouvant contenir 200 litres. Après chaque événement pluvieux, le volume ruisselé recueilli dans le bidon permet de déterminer le coefficient de ruissellement événementiel par la formule:

$$Kri = Lri / Pi \quad (Eq. 1)$$

où Lri (mm) est la lame ruisselée sur une parcelle durant l'événement i , et Pi (mm) est la hauteur de la pluie mesurée dans un pluviomètre situé près de la parcelle. Le suivi d'effet du sarclage sur le ruissellement consiste à analyser les coefficients de ruissellement événementiels mesurés avant et après sarclage et leur évolution en fonction des cumuls de pluies reçues depuis le sarclage. En 2014, ce suivi a, par ailleurs, porté sur l'effet des outils aratoires sur la production du ruissellement. Deux des trois parcelles expérimentales sont ainsi sarclées avec la herse à traction animale et la troisième avec la herse manuelle. L'entretien des parcelles s'effectue conformément aux pratiques paysannes locales. Le propriétaire du champ dans lequel se trouvent les parcelles définit la variété cultivée, la gestion des sols (amendement ou pas) ainsi que la date et le type de sarclage (avec herse manuelle ou à traction animale). La direction du sarclage est généralement

Figure 1 - Outils de sarclage utilisés sur le site d'étude. Iler manuelle à gauche et à traction animale à droite.

Figure 1 - Hoeing tools used within the study area. Handy Iler at left, animal power iler at right.



Figure 2 - Parcelle suivie dans le champ d'un paysan.

Figure 2 - Monitored plot in a peasant field.



parallèle aux lignes des poquets de semis. Celles-ci peuvent être parallèles ou perpendiculaires à la pente générale de terrain. En 2013 et en 2014, la direction du sarclage est perpendiculaire à la pente des parcelles.

Suivi temporel de l'infiltration

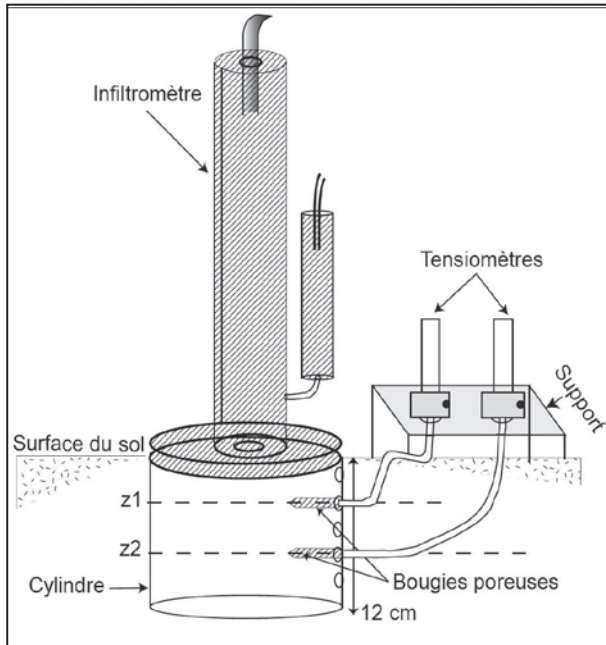
Pour suivre l'évolution de l'infiltration de l'eau dans le sol après le sarclage, des mesures *in situ* sont effectuées dans le champ précédemment évoqué, près des parcelles de ruissellement. Ces mesures consistent à suivre l'évolution temporelle de la conductivité hydraulique. Cette dernière caractérise l'aptitude d'un sol à laisser circuler l'eau. C'est une variable pertinente et omniprésente dans les applications des sciences de l'environne-

ment pour estimer les processus de transferts d'eau et de solutés à travers la matrice du sol. La conductivité hydraulique est un paramètre intrinsèque pour un sol donné à un instant donné. Son changement traduit une modification de la structure du sol.

Le dispositif utilisé pour mesurer la conductivité hydraulique est la tensio-infiltrométrie (Vandervaere, 1995; Vandervaere *et al.*, 1997; Malam Abdou, 2014; Malam Abdou *et al.*, 2015) Ce dispositif (*figure 3*) est constitué d'un infiltromètre à disque (de 80 mm de diamètre), placé à la surface du sol et sous lequel se trouve un cylindre métallique, et de deux tensiomètres. L'infiltromètre à disque est un appareil dont le principe consiste à appliquer un apport d'eau à la surface du sol en lui imposant une pression constante. Il permet, au cours des essais (*figure 4*), de suivre le flux d'infiltration d'eau par unité de temps grâce aux lectures

Figure 3 - Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique (tensio-infiltrométrie).

Figure 3 - Device used for hydraulic conductivity measurements (tensio-infiltrometry).



régulières de la variation de la lame d'eau dans le réservoir. Les tensiomètres, installés à deux profondeurs (z1 et z2), émettent des signaux électriques lisibles à l'aide d'un multimètre numérique et qui sont par la suite convertis en pression grâce à la courbe d'étalonnage établie pour chaque tensiomètre (Malam Abdou, 2014).

Le cylindre métallique (de 85 mm de diamètre et 120 mm de hauteur) a pour rôle de forcer l'écoulement en monodimensionnel (1D) vertical et permettre la détermination de la conductivité hydraulique par l'application directe de la loi de Darcy (Darcy, 1856) en 1D par:

$$Ks = - qz \frac{\Delta z}{\Delta H} \quad (Eq. 2)$$

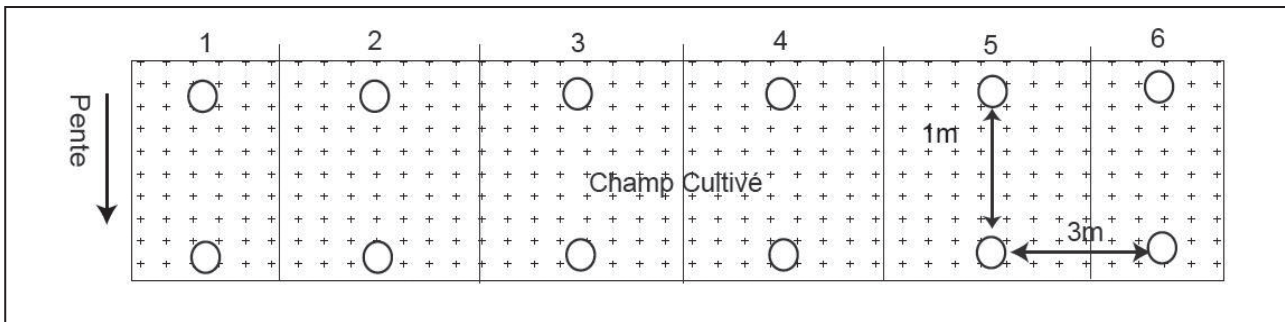
où qz est le flux d'infiltration vertical stabilisé; Δz est la différence de profondeur d'infiltration entre z1 et z2 et ΔH est la perte de charge hydraulique.

Le protocole de mesure consiste à installer d'abord les cylindres dans le champ juste après le sarclage. Six couples de cylindres sont ainsi installés. Les couples de cylindres sont numérotés, dans l'ordre, de un à six (figure 5). Après la pluie de rang 1 (ordre de pluie depuis l'installation des cylindres) et de hauteur hp1 (mm), sont effectuées des mesures sur le premier

Figure 4 - Déroulement de mesure d'infiltration sur le champ, près d'une parcelle de ruissellement (en 2nd plan). Chaque infiltromètre, placé sur un cylindre installé préalablement, est suivi par un lecteur qui note régulièrement (chaque minute) le niveau de la lame d'eau dans le réservoir ainsi que les signaux émis par les tensiomètres et lisibles à l'aide des voltmètres numériques.

Figure 4 - Infiltration measurement progress on a field, close to runoff plot (behind). Each infiltrimeter, located upon a previously installed cylinder, is monitored by an observer who reads regularly (each minute at least at the beginning) the water level in the reservoir, as well as signal emitted by tensiometers, read on digital voltmeters.



Figure 5 - Protocole de suivi temporel de la conductivité sur un champ cultivé.**Figure 5** - Schematic monitoring plan for the hydraulic conductivity evolution on the cultivated field.**Tableau 1** - Dates des sarclages du champ suivi.**Table 1** - Weeding dates on the monitored field.

	1 ^{er} sarclage	2 ^e sarclage
2011	28 août	/
2012	17 juillet	20 août
2013	21 juillet	26 août
2014	20 juillet	19 août

couple de cylindres (noté 1 sur la *figure 5*). Puis, pour la pluie de rang 2 et de hauteur hp_2 , les mesures sont effectuées sur le deuxième couple (noté 2 sur la *figure 5*) et ainsi de suite. Le suivi d'évolution de l'infiltration de l'eau dans le sol consiste alors à analyser l'évolution de la conductivité en fonction du cumul de pluie H_p défini par:

$$H_p = - \sum_{i=1}^j hp_i \quad (\text{Eq. 3})$$

Toutes les expérimentations sont réalisées en condition de pluies naturelles, qui sont distribuées de manière aléatoire au cours du temps.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le ruissellement

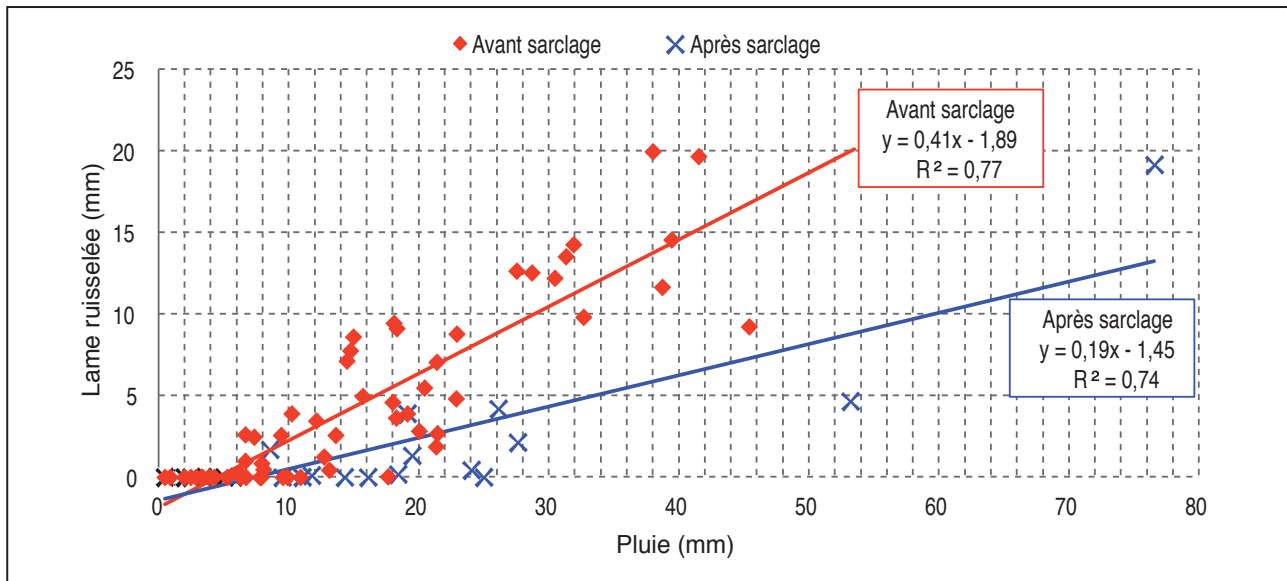
Les mesures du ruissellement ont concerné 83 des 87 événements pluvieux observés entre 2011 et 2014. Quatre mesures ont, en effet, été annulées à cause du dysfonctionnement de partiteur et/ou du débordement du bidon. Le *tableau 1* récapitule les dates des sarclages réalisés durant cette période, sept au total. L'année 2011 étant mauvaise sur le plan agricole,

le deuxième sarclage n'a pas eu lieu. Tous les sarclages sont réalisés avec la herse manuelle sauf sur deux parcelles qui sont sarclées par traction animale en 2014. Aucun apport d'engrais ou de fumier n'est enregistré. De plus, les résidus de culture (tiges, chaumes) sont systématiquement ramassés après la récolte pour être vendus ou être utilisés dans la confection des cases.

Sur près de 1300 mm de pluie enregistrés durant cette période, la lame ruisselée moyenne des trois parcelles est de 300 mm, soit un coefficient de ruissellement de l'ordre de 23 % (± 0.03). Ce coefficient est du même ordre de grandeur (22 %) que celui mesuré sur un sol sableux fins de l'Ouest du Niger (Mamadou, 2012) mais supérieur à ceux mesurés sur les sols sableux du bassin sédimentaire des lullemeden (Peugeot *et al.*, 1997; Abba, 2012; Bahari Ibrahim, 2013). Contrairement donc à l'idée généralement reçue, le ruissellement des zones cultivées sahéliennes n'est pas si négligeable. En discriminant le potentiel de ruissellement en fonction du sarclage (*figure 6*), on constate que les événements qui surviennent après le sarclage ont un potentiel plus faible (pente de régression relativement faible), ce qui est tout à fait attendu car le sarclage est fait en partie pour accroître l'infiltration.

Sur les 83 mesures effectuées, seules 26 sont concernées par l'effet bénéfique du sarclage. Celles-ci, représentées en bleu sur la *figure 6*, sont intervenues après le sarclage au moment où le sol sarclé est encore relativement perméable. Leur coefficient de ruissellement moyen est de 9 %, contre 30 % pour ceux survenant avant le sarclage. En outre, seules les pluies atteignant quelques 20 mm sont capables de générer le ruissellement après le sarclage alors qu'il suffisait seulement 7 mm pour le produire sur la même surface avant le sarclage. Les nombreuses croix bleues alignées sur l'axe des abscisses (*figure 6*) correspondent aux ruissellements quasi-nuls mesurés après sarclage qui sont produits par des pluies dont la hauteur n'atteint pas la valeur seuil.

Sur la surface cultivée, le ruissellement peut donc être exceptionnellement élevé, en particulier pour des pluies qui surviennent avant ou longtemps après le sarclage. Trente pour cent

Figure 6 - Relations pluie-ruissellement avant (rouge) et après sarclage (bleu) sur une surface cultivée.**Figure 6** - Rainfall/Runoff Relationships before (red) and after weeding on a cultivated area.

de mesures (soit 25 événements) effectuées ont un coefficient de ruissellement supérieur à la moyenne (*figure 7*). Ces derniers sont, en outre, distribués successivement dans le temps. La distribution successive et régulière des barres rouges sur la *figure 7* traduit, en effet, le fait que des ruissellements importants (supérieurs à la moyenne) sont produits continuellement sur un même espace-temps. L'analyse des données pluviométriques montre que ces forts ruissellements ne sont pas dus à des averses particulièrement abondantes. Ils se produisent dès que la surface sarclée reçoit un cumul de pluie atteignant les 70-80 mm après le sarclage. Ainsi, sur les 25 événements dont le coefficient de ruissellement est supérieur à la moyenne, 85 % sont observés après ce cumul. Les 15 % restants sont générés par les premières pluies d'hivernage qui interviennent avant les 1^{ers} sarclages qui sont, par ailleurs, réputées très ruisselantes (Roose, 1983; Lamachère, 1991; Peugeot, 1995; Lamachère et Serpantié, 1998). Par conséquent, la totalité des événements survenus moins de 80 mm de pluie après sarclage ruissellent moins que la moyenne, ce qui témoigne de la fiabilité de l'indicateur que constitue la date de sarclage.

Pour atténuer le potentiel ruisselant d'une surface cultivée, il est donc nécessaire de réaliser un autre sarclage dès qu'un cumul de pluie de l'ordre de 80 mm aura été atteint après le précédent sarclage. Sinon, le ruissellement devient progressivement important et peut atteindre, voire dépasser, le ruissellement produit sur une surface en jachère.

Sur les quatre années d'observation, on remarque que le cumul moyen séparant deux sarclages d'une année est d'environ 190 mm, ce qui dépasse largement la limite du cumul-seuil sus

évoqué. De ce fait, des ruissellements importants, équivalents à ceux mesurés sur la jachère, se produisent alors sur la surface cultivée. Ainsi, plus de 25 % des événements mesurés ont un coefficient de ruissellement égal ou supérieur à celui mesuré sur une surface en jachère qui est de 28 % (Malam Abdou et al., Accepté). Ceci laisse conclure que le sarclage ne diminue le ruissellement que dans des proportions limitées. Sous l'effet de l'intensité et de l'énergie cinétique des averses, la surface sarclée s'aplanit et se transforme au fur et à mesure qu'elle reçoit des pluies pour passer d'une surface rugueuse et perméable à une surface quasiment plane et compacte. Dès cet instant, l'effet du sarclage sur l'infiltration est alors inhibé et la surface cultivée produit significativement du ruissellement.

L'expérience effectuée en 2014, comparant l'impact du sarclage à l'herminette manuelle à celle à traction animale sur le ruissellement, montre que l'effet du sarclage est plus consistant si celui-ci est réalisé avec la herminette à traction animale (*figure 8*), ce qui est bien cohérent puisque le microrelief créé par cet outil est plus rugueux et sa profondeur plus importante (15-20 cm). D'où une capacité importante de rétention superficielle. Ce microrelief s'aplanit lentement mais progressivement.

On remarque sur la *figure 8* que le ruissellement se produit d'abord sur la surface sarclée manuellement et son volume est toujours supérieur à celui qui se produit sur la même surface remaniée par traction animale. Ceci confirme donc l'avantage du remaniement relativement profond effectué avec la herminette à traction animale. Pourtant, ce type de sarclage n'est pas très dominant dans la zone d'étude à cause, selon l'avis des paysans, de l'inaccessibilité (coût) du matériel et de l'animal de trait.

Figure 7 - Distribution de ruissellement en fonction de cumul de pluie depuis le sarclage. Cette figure représente, chronologiquement, les coefficients de ruissellement des 83 mesures effectuées de 2011 à 2014. Le cumul de pluie repart de zéro après chaque sarclage.

Figure 7 - Runof distribution according to cumulated rainfall depth from the weeding. This figure represents, chronologically, runoff coefficients of the 83 measurements realised from 2011 to 2014. Cumulated rainfall begins again from 0 after each weeding process.

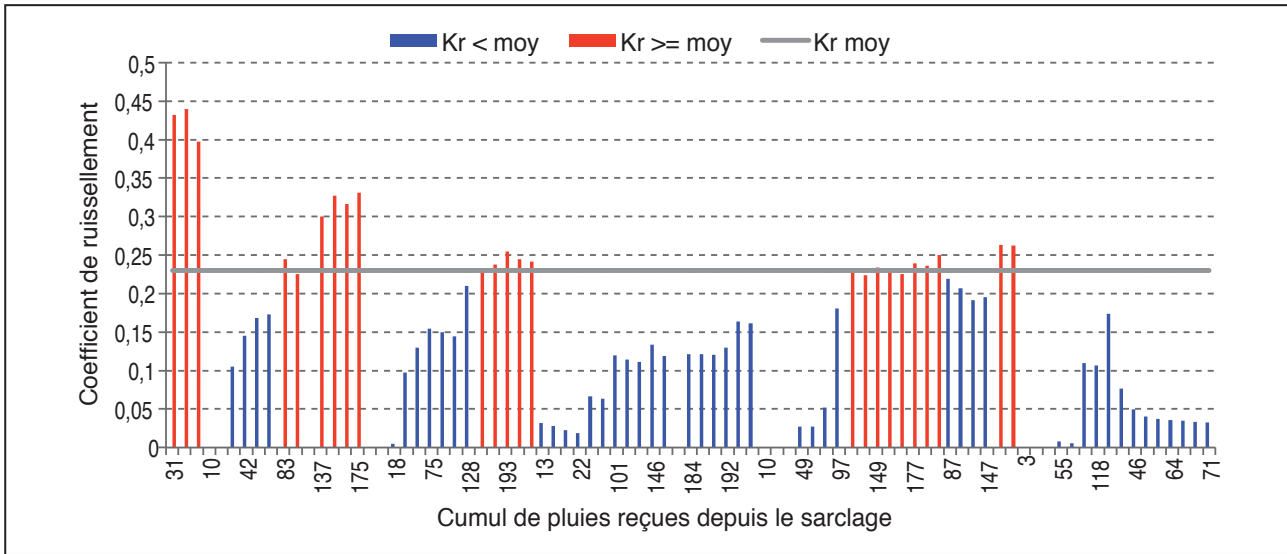


Figure 8 - Evolution du ruissellement produit sur des surfaces sarclées à la iler manuelle et à traction animale.

Ces données sont mesurées (en 2014) entre les deux sarclages des parcelles expérimentales suivies. Les points rouges représentent les mesures effectuées sur une parcelle sarclée manuellement avec la iler et les bleus correspondent aux valeurs moyennes des deux parcelles sarclées avec la iler à traction animale. Les deux courbes correspondent à des régressions.

Figure 8 - Runoff yield evolution on iler and animal power weeded surfaces.

These data are measured (in 2014) between two weeding on the monitored experimental plots. Red points represent measurements realised on handly (with iler) weeded plot ; blue points are mean values obtained in two plots animal power weeded. The two curves are the regression ones.

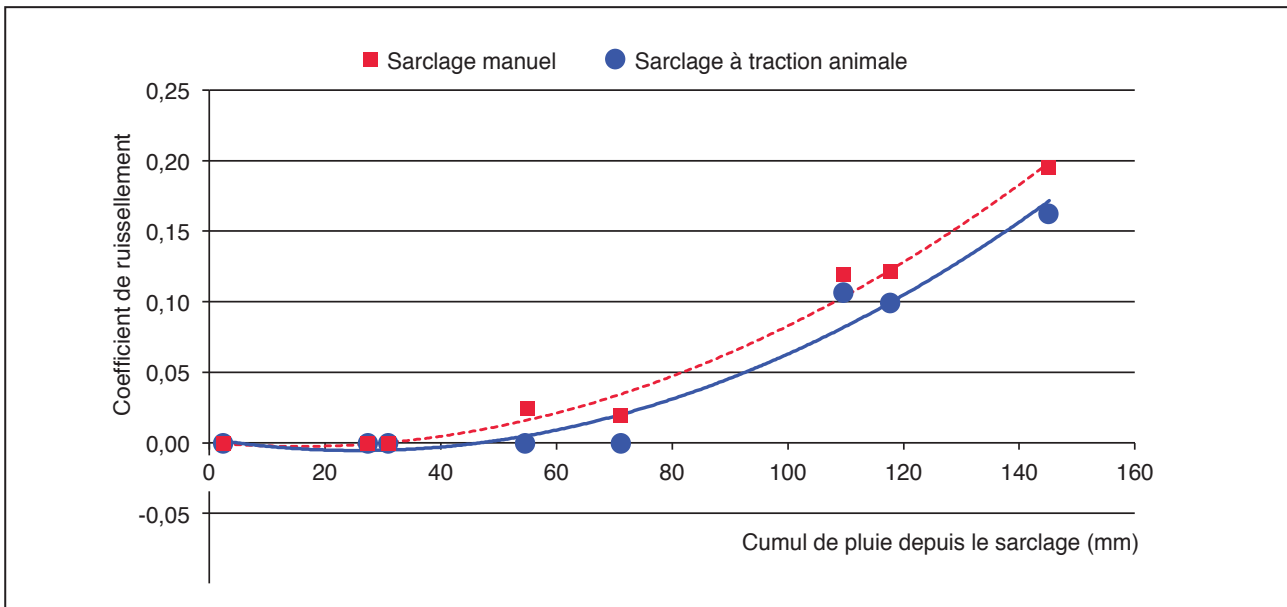
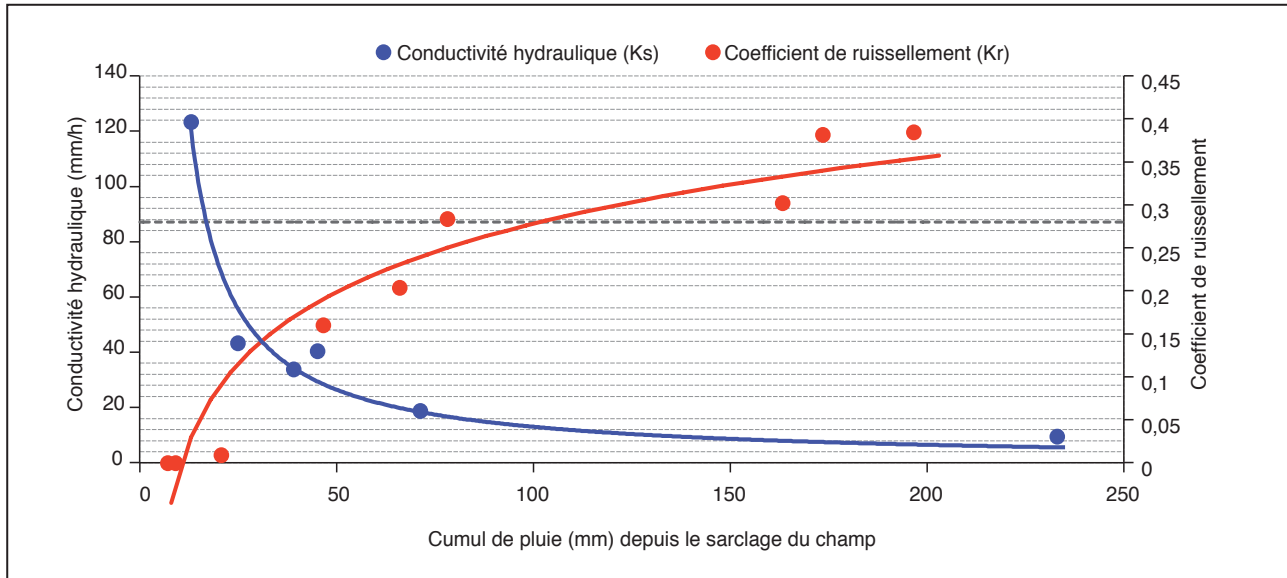


Figure 9 - Evolution simultanée de l'infiltration (en bleu) et du ruissellement (en rouge) en fonction du cumul de pluie depuis le sarclage. Les mesures effectuées sont représentées par des points. Les courbes représentent des ajustements. Le tiret discontinu et horizontal représente le coefficient de ruissellement moyen d'une surface en jachère.

Figure 9 - Simultaneous evolution of infiltration (in blue) and runoff (in red) depending on cumulated rainfall depth from the weeding. Measurements are represented by points. Curves are the adjustments. Horizontal broken line represents the mean runoff coefficient of a fallow area.



Les coefficients de ruissellement moyens mesurés sur des surfaces sarclées avec la herse manuelle et à traction animale sont respectivement de 21 % et 18 %.

L'infiltration

Les mesures d'infiltration ont été réalisées durant la saison de pluies de 2012, sur les six couples de cylindres installés après le premier sarclage. Ces mesures ont été effectuées parallèlement aux mesures de ruissellement présentées précédemment afin d'analyser l'évolution simultanée du ruissellement et de l'infiltration sur des mêmes surfaces et pour des mêmes averses. La *figure 9* représente le résultat de ces suivis.

La valeur moyenne de conductivité pour les six couples de cylindre (soit 12 mesures) est de 38 mm.h⁻¹. Cette moyenne cache une grande disparité (l'écart type est de ± 28 mm.h⁻¹) qui s'explique par l'évolution temporelle de la structure superficielle du sol de champ cultivé. Le suivi effectué montre en effet que la conductivité décroît fortement lorsque le cumul de pluies reçues par la surface sarclée augmente. La valeur de conductivité hydraulique déterminée après une pluie de 10 mm qui suit le sarclage est de 120 mm.h⁻¹. Cette valeur élevée limite la probabilité de production du ruissellement sur cette surface car conformément au principe hortonien (Horton, 1933), il n'y a production de ruissellement sur un sol donné que lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration de ce sol qui, en régime

permanent d'infiltration, équivaut à la conductivité hydraulique. Dans ce cas, seules les pluies dont l'intensité est supérieure à 120 mm.h⁻¹ sont alors capables de produire du ruissellement. Les pluies sahéliennes sont certes intenses (Le-Breton, 2012; Descroix *et al.*, 2013; Panthou *et al.*, 2014) mais la faible occurrence des averses si intenses après le sarclage fait que le ruissellement est fréquemment nul après cette opération. Ceci est illustré sur la *figure 9* par trois averses successives et postérieures au sarclage qui, malgré leur intensité maximale de l'ordre de 70 mm.h⁻¹, n'ont pas généré de ruissellement. Cependant, la susceptibilité de la surface cultivée au ruissellement augmente rapidement comme l'illustre la *figure 9* (courbe rouge) car l'infiltrabilité de la surface diminue après chaque averse du fait que celle-ci engendre l'aplanissement de la rugosité et le colmatage des pores créés par le sarclage. Cette baisse d'infiltrabilité traduit l'encroûtement de la surface cultivée qui entraîne une production élevée du ruissellement pouvant dépasser celle de la jachère (*figure 9*) et atteindre des ruissellemes comparables à ceux mesurés sur une surface encroûtée de type ERO (Malam Abdou, 2014). Ceci confirme les travaux de Ndiaye *et al.* (2005) réalisés sous simulation des pluies et qui montrent l'encroûtement (développement des croûtes structurales et d'érosion) des champs cultivés en fonction des cumuls de pluies. Le coefficient de ruissellement maximum mesuré est en effet de 58 % tandis que la valeur minimale de conductivité, mesurée après quelques 200 mm de pluies reçues après le sarclage, est de 10 mm.h⁻¹.

Avec de telles valeurs de conductivité, mêmes les pluies faiblement intenses, de l'ordre de 10 mm.h⁻¹, génèrent alors le ruissellement. L'encroûtement des surfaces cultivées, caractérisé ici de manière quantitative, est également décrit par d'autres auteurs en corrélant l'extension pluriannuelle des surfaces cultivées et l'augmentation des ruissellements (Albergel et Valentin, 1991; Leblanc *et al.*, 2008; Bouzou Moussa *et al.*, 2009, 2011; Souley Yero, 2012; Malam Abdou, Soumis) et ou avec l'érosion éolienne (Abdourahamane Touré *et al.*, 2013).

CONCLUSION

L'étude des conditions d'infiltrabilité effectuée dans ce travail permet d'abord de conclure que les valeurs moyennes annuelles du ruissellement et de l'infiltration sont peu pertinentes pour décrire l'aptitude au ruissellement d'une surface cultivée à cause de l'évolution structurale qu'entraîne le sarclage. Le coefficient de ruissellement moyen, bien qu'atteignant l'ordre de 23 %, reste tout de même inférieur à celui des surfaces en jachères ou des surfaces encroûtées. De ce fait, il ne permet pas de corroborer aisément l'encroûtement, et l'augmentation des ruissellements subséquente constatée dans tout l'espace sahélien depuis les années 1970, qu'entraîne la mise en culture des sols. En revanche, le suivi temporel ici effectué met clairement en évidence l'encroûtement d'une surface cultivée qui se traduit par une diminution de l'infiltration et une augmentation du ruissellement. Dès que la surface cultivée enregistre un cumul de pluie atteignant les 80 mm après le sarclage, l'effet de ce dernier est alors inhibé et la surface produit continuellement et régulièrement un volume de ruissellement équivalent ou supérieur à celui de la jachère. Les deux sarclages généralement réalisés par saison culturale ne diminuent alors le ruissellement que dans des proportions limitées. Pour atténuer l'aptitude au ruissellement des champs cultivés, un sarclage est nécessaire à chaque fois que le cumul de pluie atteint les 80 mm après le précédent sarclage. L'effet du sarclage est relativement plus durable si ce dernier est réalisé avec la herse à traction animale. Mais cet avantage paraît plutôt faible car le coefficient de ruissellement d'une surface sarclée avec la herse à traction animale n'est pas très significativement différent de celui mesuré sur une surface sarclée manuellement. Enfin, le sarclage constitue donc un facteur déterminant pour expliquer le ruissellement des surfaces cultivées et la date de sa réalisation est un bon indicateur pour caractériser et modéliser la production du ruissellement des surfaces cultivées.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le LabEx Osug@2020 (Investissements d'avenir - ANR10LABX56), la JEA Sapalote et l'Observatoire AMMA-Catch que nous remercions vivement ici.

BIBLIOGRAPHIE

- Abba B., 2012 - Changements d'usage des sols et érosion dans l'aire «ay noma » à la périphérie du parc national du W du Niger. Thèse de l'Université Abdou Moumouni de Niamey. 227 p.
- Abdourahamane Touré A., Rajot J.-L., Garba Z., Guillon R., Didier T. A., Marticorena B., Petit C. et Sebag D., 2013 - Six années de suivi du flux d'érosion éolienne sur un sol sableux cultivé au Sahel: impacts des résidus de culture et de l'encroûtement. *Etude et Gestion des Sols*, 20: 57-70
- Albergel J., 1987 - Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface: application aux petits bassins du Burkina Faso. *In: The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*, pp. 355-365. Wallingford: IAHS.
- Albergel J. et Valentin C., 1991 - 'Sahélisation' d'un petit bassin versant soudanien: Kognere-Boulsa, au Burkina Faso. *Presse Universitaire de Dakar*
- Ambouta J.-M. K., 1994 - Etude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin au Sahel. *PhD de l'Université Laval de Québec*. 97 p.
- Ambouta K., Valentin C. et Laverdière M. R., 1996 - Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, 7: 269-75
- Amogu O., Esteves M., Vandervaere J.-P., Abdou M. M., Panthou G., Rajot J.-L., Yéro K. S., Boubkraoui S., Lapetite J.-M., Dessay N., Zin I., Bachir A., Moussa I. B., Maïga O. F., Gautier E., Mamadou I. et Descroix L., 2015 - Runoff evolution due to land-use change in a small Sahelian catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 60: 78-95
- Bahari Ibrahim M., 2013 - Dynamique hydrogéomorphologique actuelle du kori Mountséka, centre sud Niger. Thèse de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, 227 p.
- Bouzou Moussa I., Faran Maïga O., Karimou Ambouta J., Sarr B., Descroix L. et Adamou M. M., 2009 - Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. *Sécheresse*, 20: 145-152
- Bouzou Moussa I., Descroix L., Faran Maïga O., Gautier E., Adamou M. M., Esteves M., Souley Yéro K., Malam Abdou M., Mamadou I., Le-Breton E. et Abba B., 2011 - Les changements d'usage des sols et leurs conséquences hydrogéomorphologiques sur un bassin-versant endoréique sahélien. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 22: 13-24
- Casenave A. et Valentin C., 1991 - Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne, IAHS: 99-108
- Casenave A. et Valentin C., 1992 - A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130: 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. V. Dalmont, Paris - URL <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k624312>
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J.-C., Albergel J., Amogu O., Cappelaere B., Dessouassi R., Diedhiou A., Le Breton E., Mamadou I. et Sighomnou D., 2009 - Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology*, 375: 90-102
- Descroix L., Genthon P., Amogu O., Rajot J.-L., Sighomnou D. et Vauclin M., 2012 - Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global and Planetary Change*, 98-99: 18-30
- Descroix L., Diongue Niang A., Dacosta H., Panthou G., Quantin G. et Diedhiou A., 2013 - Evolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger Moyen (Sahel). *Climatologie*, 10: 37-50

- Esteves M. et Lapetite J. M., 2003 - A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *CATENA*, 50: 255-271
- Horton R. E., 1933 - The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14: 446
- Karambiri H., Yacouba H., Barbier B., Mahé G. et Paturel J. E., 2009 - Caractérisation du ruissellement et de l'érosion de la parcelle au bassin versant en zone sahélienne: cas du petit bassin versant de Tougou au nord du Burkina Faso. In: Wallingford: AISH Hyderabad: Blöschl G., ed., Van de Giesen N., ed., Muralidharan D., ed., Ren L., ed., Seyler Frédérique, ed., Sharma U., ed., Vrba J., ed.
- Lamachère J., 1991 - Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage, *IAHS*: 109-119
- Lamachère J.-M. et Serpantié G., 1998 - Valorisation agricole des eaux de ruissellement sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi). *Bulletin - Réseau Erosion*: 133-151
- Le Bissonnais Y., 2010 - Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion: la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés. *Ingénieries*, 22, 27-36. URL <http://www.set-revue.fr/analyse-experimentale-des-mecanismes-derosion-la-degradation-structurale-superficielle-et-le-detache>
- Leblanc M. J., Favreau G., Massuel S., Tweed S. O., Loireau M. et Cappelaere B., 2008 - Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61: 135-150
- Le-Breton E., 2012 - Réponses hydrologiques et géomorphologiques aux changements environnementaux au Sahel nigérien. Thèse de l'Université de Niamey et de l'Université de Paris 1, 197 p.
- Malam Abdou M., 2014 - Etats de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire. Thèse de l'Université de Grenoble et de l'Université de Niamey, 268 p.
- Malam Abdou M., Vandervaere J., Bouzou Moussa I., Descroix L., Faran Maiga O., Souley A., Bodo Seyni B. et Ousseini Daouda M., 2015 - Evolution temporelle de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé du Niger. *Biotechnol. Agron.Soc. Environ*, 19: 269-279
- Malam Abdou M., Vandervaere J., Bouzou Moussa I., Descroix L., Mamadou I. et Faran Maiga O., Accepté - Genèse des écoulements sur deux petits bassins versants cristallins de l'Ouest du Niger: approche multi-échelles du fonctionnement hydrodynamique. *Geomorphologie*
- Malam Abdou M., Soumis - Hausse des écoulements sur le bassin versant de Dargol: impact de l'homme ou du climat ? *Revue de géographie de l'Université de Ouagadougou*, RGO
- Mamadou I., 2012 - 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 de Paris 1, 290 p.
- Mounirou L., 2012 - Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso: quantification et transposition des données. Thèse de l'Université de Montpellier, 249 p.
- Ndiaye B., Esteves M., Vandervaere J.-P., Lapetite J.-M. et Vauclin M., 2005 - Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil. *Journal of Hydrology*, 307: 294-311
- Panthou G., Vischel T. et Lebel T., 2014 - Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34, 3998-4006
- Peugeot C., 1995 - Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien, Niger. Expérimentations in-situ et modélisation. URL <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00610524>
- Peugeot C., Esteves M., Galle S., Rajot J. L. et Vandervaere J. P., 1997 - Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *Journal of Hydrology*, 188-189: 179-202
- Roose E., 1977 - Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, vingt années de mesures en parcelles expérimentales. Paris: ORSTOM URL <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:09011>
- Roose E., 1983 - Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique Occidentale. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 20: 327-339
- Séguis L., Cappelaere B., Milési G., Peugeot C., Massuel S. et Favreau G., 2004 - Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrological Processes*, 18: 3401-3413
- Souley Yero K., 2012 - Evolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger: Influence sur le cycle de l'eau. Thèse de l'Université de Grenoble, 231 p.
- 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 encroûtés. URL <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00694150>
- Vandervaere J. P., Peugeot C., Vauclin M., Angulo Jaramillo R. et Lebel T., 1997 - Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. *Journal of Hydrology*, 188-189: 203-223

