Variation spatiale des ions majeurs en solution sous l'impact des croûtes de surface dans le Sahel du Burkina Faso

Stéphanie Batchakoue Maïga-Yaleu, HammaYacouba

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2020), 049 : 9 – 21 25^{ème}Année, Juin 2020



ISSN 0796-6687 Code Chemical Abstracts : JSOCF2 Cote INIST (CNRS France) : <27680> Site Web: <u>http://www.soachim.org</u>

Variation spatiale des ions majeurs en solution sous l'impact des croûtes de surface dans le Sahel du Burkina Faso

Stéphanie Batchakoue Maïga-Yaleu^{1*}, HammaYacouba²

¹Laboratoire de Chimie Moléculaire et des Matériaux (LCMM), UFR/SEA, Université Joseph KI-ZERBO, 03 BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso. ²Laboratoire Eaux, HydroSystèmes et Agriculture (LEHSA), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (2iE), 01 BP 594 Ouagadougou, Burkina Faso

(Reçu le 21/04/2020 – Accepté après corrections le 12/11/2020)

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer le rôle des croûtes de surface du sol sur les pertes en matières dissoutes par les eaux de ruissellement. Les données ont été collectées durant 3 années consécutives sur des parcelles de 1 m², 50 m² et 150 m² installées sur les croûtes structurale (STRU), d'érosion (ERO), gravillonnaire (GRAV) et de dessiccation (DES). Le pH moyen des eaux est de 7,6. Les écarts de CE très significatifs entre la croûte STRU et les croûtes ERO, GRAV et DES sont respectivement 43 μ S.cm⁻¹, 41 μ S.cm⁻¹ et 32 μ S.cm⁻¹. Les croûtes de surface ont un impact significatif sur les ions majeurs, particulièrement les ions HCO₃⁻, Cl⁻ ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺. On distingue trois groupes d'ions : les ions HCO₃⁻, Cl⁻ et Ca²⁺ contribuant fortement à la minéralisation des eaux de ruissellement avec des teneurs plus élevées sur la croûte STRU ; les ions NO₃⁻, Mg²⁺ et K⁺ plus importants dans les eaux sur sols limono-sableux que dans celles issues des sols argileux. Leurs concentrations sont plus importantes pour de faible volume d'eau ; et les ions SO₄²⁻, PO₄³⁻ et Na⁺ dont les teneurs sont faiblement influencées par la nature des croûtes et contribuent très faiblement à la minéralisation de l'eau.

Mots-clés : Érosion chimique, matière dissoute, croûtes de surface, Sahel, Burkina Faso.

Spatial variation of major ions in solution under impact of surface crusts in the Sahel of Burkina Faso

Abstract

The aim of this study is to assess the role of soil surface crusts on dissolved matter losses by runoff. Data were collected during Three consecutive years on 1 m², 50 m² and 150 m² plots installed on the structural crust (STRU), erosion crust (ERO), gravel crust (GRAV) and dessication crust (DES). The mean pH of water was 7.6. The significant difference of EC between STRU crust and ERO, GRAV and DES crusts were respectively 43 μ S.cm⁻¹, 41 μ S.cm⁻¹ and 32 μ S.cm⁻¹. Surface crusts have a significant impact on major ions, particularly HCO₃⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ and K⁺ ions. Three groups of ions were identified : the HCO₃⁻, Cl⁻ and Ca²⁺ ions which strongly contributed to the mineralization of runoff with the highest concentration on STRU crust ; the NO₃⁻, Mg²⁺ and K⁺ ions which were greater in waters from sandy loam soils than in those from clay soils. Their concentrations were more important went the water capacity is low ; and the SO₄²⁻, PO₄³⁻ and Na⁺ ions of which the concentration were slightly influenced by the nature of surface crusts and their contribution to the mineralization of runoff is very low.

Keywords: Water erosion, dissolve matter, surface crust, Sahel, Burkina Faso.

^{*} Auteur de correspondance : Stéphanie Maïga-Yaleu, Email: <u>yalsteph01@yahoo.fr</u>,

1. Introduction

Les matières dissoutes principalement constituées des sels inorganiques dissous dans l'eau, sont généralement reconnues sous l'appellation d'ions majeurs. Ce sont des formes ioniques des éléments chimiques dont les concentrations dans le sol sont supérieures à 100 mg.kg⁻¹ ^{[1],[2]}. Ces ions majeurs l'eau de ruissellement proviennent dans essentiellement de l'altération des roches, de la décomposition de la matière organique et des apports par l'homme. Selon leur origine, ils présentent des comportements différents et sont très variables dans le temps et dans l'espace. Ils jouent également un rôle important pour la stabilité des sols, une bonne croissance des plantes et au cycle de vie des organismes du sol^[1]. La grande partie de la matière dissoute dans l'eau de ruissellement provient du contact de l'eau avec les minéraux du sol. L'érosion chimique consiste en la mise en solution par érosion des ions constituant les sels solubles. Suivant les conditions de température, de pH, de pression, de la nature des matériaux traversés et leur degré de solubilité, une partie des minéraux primaires peut rester insoluble et constituer les minéraux secondaires, tandis qu'une autre partie peut devenir soluble et être lessivée vers les cours d'eau sous forme de micropolluants^[3].

La présence de ces ions majeurs dans l'eau de ruissellement est très dépendante du fonctionnement hydrologique du sol^[4]. Le sol est à l'origine de la présence des matières particulaires et dissoutes dans l'eau de ruissellement. En effet, le sol est la première interface entre l'eau et les minéraux^[5]. Au cours du parcours de l'eau, diverses interactions se produisent entre l'eau et les éléments solides du sol [6]. Le résultat de cette interaction est la production en solution d'éléments chimiques issus de l'altération des roches et de la décomposition de la matière organique. Le processus relève de l'écoulement de l'eau à la surface du sol correspondant à la partie de l'eau qui ne s'est ni infiltrée ni évaporée. La production du ruissellement sur un sol dépend des caractéristiques de ce sol.

La modification structurelle du sol est marquée par le développement des croûtes à la surface du sol. Dans le contexte sahélien, la sensibilité à l'encroûtement est très élevée, du fait de la très faible teneur des sols en matière organique et de la végétation éparse ^{[7],[8]}. Les croûtes de surface se forment à la suite de l'action simultanée ou succédée des mécanismes de détachement, de transport et de dépôt des particules du sol au cours des évènements pluvieux ^{[7],[9],[10]}. On distingue deux groupes de croûte de surface dont l'un résulte de la réorganisation in situ des particules du sol et l'autre de la réorganisation des particules transportées à quelque distance du lieu de dépôt^[10]. Très souvent difficiles à briser, ces croûtes jouent un rôle barrière pour l'infiltration de l'eau et augmentent le ruissellement et l'érosion^[10] avec des conséquences notables sur l'indisponibilité de l'eau pour les plantes, la recharge des aquifères, la perte de particules du sol et par conséquent de la matière dissoute ^{[11],[12],[13]}. Les croûtes de surface favorisent aussi la collecte de l'eau de ruissellement, principale voie de transfert des nutriments. Ainsi, les croûtes de surface pourraient avoir un impact sur la quantité de matière dissoute dans l'eau de ruissellement. Dans la région sahélienne, de nombreuses études [14],[15],[16],[17] ont été menées sur le rôle des croûtes de surface sur l'infiltration et le processus d'érosion des sols, mais l'impact de la formation des croûtes de surface sur les pertes en matières dissoutes est encore mal compris.

Cette étude est conduite sous pluie naturelle au nord-ouest du Burkina Faso. La zone de l'étude a subi de fortes transformations liées à la sécheresse et se caractérise par de grandes surfaces de sol encroûtées. L'objectif de cette étude est d'évaluer le rôle des croûtes de surface du sol sur la perte en matière dissoute par les eaux de ruissellement. Il s'agit de faire une évaluation qualitative et quantitative de la matière dissoute (ions majeurs dissous) transportées au cours des événements pluvieux sur les différentes croûtes de surfaces des sols. De ce fait nous avons supposé que les propriétés physiques des différentes croûtes influenceraient la dynamique des ions majeurs en solution.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques de la zone d'étude

Cette étude se déroule dans les villages de Faogodo et Baogo Poore situés respectivement au centre et en aval dans le bassin-versant de Tougou. Le bassin est situé au nord-ouest du Burkina Faso. dans la province du Yatenga, département de Namissiguima (Figure 1). Le bassin de Tougou est circonscrit entre les coordonnées géographiques 13°11' et 13°26' de latitude Nord et entre 2°6' et 2°24' de longitude Ouest. Le bassin couvre une surface d'environ 37 km². Il est caractérisé par un climat de type semi-aride avec une précipitation moyenne annuelle de 500 mm, largement inférieure à l'évapotranspiration. Cette région est caractérisée par une pluviométrie de forte intensité, peu abondante et irrégulière qui n'excède guère 3 mois. La température varie considérablement au cours de

l'année entre 18°C et 42°C. Les sols sont principalement de type ferrugineux tropicaux lessivés.

2.2. Les croûtes de surface dans la zone de l'étude

Les sols dans la zone de l'étude ont une teneur en matière organique faible et le couvert végétal épars. Ils subissent continuellement des réorganisations superficielles importantes sous l'effet des fortes intensités des pluies ^[18]. Ainsi, quatre types de croûtes de surface sont identifiés :

- Les croûtes de dessiccation (DES), caractérisées par la présence d'un seul micro-horizon sableux, légèrement pris en masse et très fragile. Elles se développent préférentiellement sur les sols à texture sableuse contenant 81 % de sable, 13 % de limon et 6 % d'argile.
- Les croûtes structurales (STRU), composées de deux micro-horizons : un micro-horizon à sable peu trié

pris en masse et continu recouvrant un micro-horizon à pellicule plasmique fine. Elles sont rencontrées principalement sur les sols à texture limono-sableuse (70 % de sable, 19 % de limon et 9 % d'argile).

- Les croûtes de gravier ou croûte gravillonnaire (GRAV) qui, contrairement aux croûtes structurales (STRU), montrent un micro-horizon constitué d'éléments grossiers recouvrant une couche plasmique épaisse. Elles se forment sur les sols à textures plus grossières. La croûte GRAV contient jusqu'à 15 % d'élément grossier (>2mm), 40 % d'argile, 38 % de sable et 7 % de limon.
- Les croûtes d'érosion (ERO), composées d'un microhorizon mince, lisse, dur et argileux à structure continue, se développent préférentiellement sur les horizons de surfaces des sols à texture argileuse. Elles comprennent 21 % de sable, 25 % de limon et 54 % d'argile.





2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé d'une répétition de parcelles de ruissellement de 1 m² (1m x 1m), 50 m² (10 m x 5 m) et 150 m² (25 m x 6 m), installées sur chacune des croûtes de DES, STRU, GRAV et ERO (figure 1). Les informations détaillées sur les caractéristiques et le mode de construction des parcelles se trouvent dans ^{[19],[20]}, respectivement. Les parcelles ont des propriétés physiques et hydrodynamiques différentes (texture, densité apparente, porosité, type de culture, type de croûte de surface). Les sols de la croûte STRU sont plus poreux que les sols de la croûte DES, suivis des croûtes ERO et GRAV. Les propriétés du sol telles que la conductivité hydraulique, la capacité de rétention de l'eau, la capacité d'échange cationique, la stabilité structurale sont très dépendantes de la texture du sol ^[21]. Par conséquent, la différence de texture qu'on observe entre les parcelles montre celles-ci, fonctionnement qu'entre le hydrodynamique est bien différent.

2.4. Collecte des données

2.4.1. Mesure du volume d'eau écoulée (Ve) sur les parcelles

Les eaux ruisselées sur les parcelles de 1 m², sont collectées dans un fut. Les volumes d'eau écoulée sont déduits à partir de la hauteur d'eau dans les fûts (mesurer avec une règle graduée). Lorsque le volume d'eau dans le fût n'est pas assez important, il est mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée. Concernant les parcelles de 50 m² et 150 m², la hauteur d'eau dans les collecteurs (cuves) est mesurée avec une règle graduée. Cette hauteur multipliée par la surface de la cuve permet d'en déduire le volume (Équation 1).

$$Ve = He^*L^*l$$
 Équation 1

Avec Ve le volume d'eau écoulé ; He la hauteur d'eau dans la cuve ; L la longueur de la cuve ; l, la largeur de la cuve.

2.4.2. Collecte d'échantillonnage d'eau et analyses chimiques

Les échantillons d'eau de ruissellement sur les parcelles expérimentales pour les analyses chimiques (ions majeurs) ont été collectés pendant les périodes hivernales de 2010, 2011 et 2012 entre juillet et septembre. Les eaux sont collectées après chaque évènement pluvieux dans des flacons en polyéthylènes de l litre préalablement lavés et rincés avec de l'eau distillée.

À l'aide d'une trousse de terrain multi-paramètre, les paramètres tels que la température (T), le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés in situ sur des échantillons non encore filtrés. Les échantillons sont par la suite filtrés à l'aide du papier Whatman 0,45 µm. Une fraction de 500 ml du filtrat obtenu est utilisée pour mesurer immédiatement sur le terrain les concentrations des ions calcium (Ca^{2+}). magnésium $(Mg^{2+}),$ chlorures (Cl⁻), hydrogénocarbonatés (HCO₃⁻), nitrates (NO₃⁻), phosphates (PO₄³⁻), sulfates (SO₄²⁻) et silice (SiO₂). Une autre fraction de 10 ml est acidifiée avec 1 ml d'acide nitrique (HNO₃) concentré pour l'analyse du sodium (Na⁺) et du potassium (K⁺) au *Laboratoire de* recherche Eau, Écosystème, Dépollution et Santé (LEDES) du Centre Commun de Recherche Eau et Climat (CCREC) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (21E) à Ouagadougou. Les méthodes d'analyses sont décrites dans Maïga-Yaleu et al., (2016). C'est au total 543 échantillons d'eau de ruissellement qui ont été collectés sur les différentes croûtes de surface et analysés, soient 161 sur STRU, 111 sur DES, 130 sur ERO et 141 sur GRAV.

La charge totale dissoute (CTD) a été calculée en faisant la somme des concentrations de tous les éléments dissous dans l'eau.

$$CTD = HCO_3^{-} + Cl^{-} + SO_4^{2-} + NO_3^{-} + PO_4^{3-} + Ca^{2+} + Ng^{2+} + Na^{+} + K^{+} + SiO_2$$

2.5. Analyses statistiques

Le logiciel SPSS V18.0 a été utilisé pour les analyses statistiques. Les caractéristiques de tendance centrale ou de dispersion issues des analyses descriptives telles que la moyenne, le minimum, le maximum, l'écart type sont représentées dans les tableaux ou sous forme de diagramme type box-plot. Le test de l'ANOVA (analyse de variance) a été réalisé pour tester l'hypothèse nulle (H₀) selon laquelle il n'y a pas de différence entre les moyennes des différentes catégories d'échantillons à analyser. L'hypothèse alternative (H_1) , quant à elle, stipule que les différents échantillons proviennent de catégories indépendantes, d'où des moyennes différentes. À ce test de l'ANOVA est associé le test de Bonferroni pour comparer les moyennes des différentes catégories deux à deux. Les différences sont significatives à un seuil inférieur à 5 % ou à 1 % et symbolisé respectivement par un astérisque (*) ou

par deux astérisques (**). Le logiciel SPSS a également servi pour l'analyse de la corrélation entre les variables et l'Analyse en Composante Principale (ACP). Cette analyse permet de réduire un grand nombre de données en un nombre restreint de facteurs permettant d'expliquer les associations existantes entre les variables et par conséquent les facteurs d'influence.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de ruissellement sur les croûtes en 2010, 2011 et 2012

Les eaux de ruissellement sur les différentes croûtes de surface ont un pH neutre, en moyen 7,6. Ce pH varie significativement d'une année à l'autre et correspond en moyenne à 7,3 en 2010 et 7,7 en 2011 et 2012 (Tableau 1). Il est plus élevé sur la croûte DES (7,7), suivi de STRU (7,6) et GRAV (7,6) avec la plus faible valeur sur ERO (7,3). La température moyenne des eaux de ruissellement sur les croûtes de surface est très peu variable avec une moyenne de 29 °C. La mesure de la conductivité électrique (CE) apporte des informations sur la variation de la minéralisation de l'eau. Elle est plus importante lorsque les eaux contiennent assez d'ions. La variation interannuelle de la CE est significative et correspond à 40 µS.cm⁻¹ en 2010, 54 µS.cm⁻¹ en 2011 et 44 µS.cm⁻¹ en 2012.

3.2. Caractéristiques chimiques des eaux de ruissellement sur les croûtes de surface de 2010 à 2012

3.2.1. Composition chimique des eaux de ruissellement sur la croûte structurale (STRU)

Sur la croûte structurale (STRU), la variation annuelle de la minéralisation de l'eau est très significative. En effet, la CTD comprise entre 41 mg.l⁻¹ et 228 mg.l⁻¹ est en moyenne respectivement de 73 mg.l⁻¹, 117 mg.l⁻¹ et 94 mg.l⁻¹ en 2010, 2011 et 2012 (Tableau 1). La valeur moyenne annuelle de CTD sur cette croûte enregistrée sur les trois années est de 92 mg.l⁻¹. Elle est en majorité composée des ions HCO₃⁻ et Ca²⁺, ce qui confère à l'eau de la croûte STRU un faciès bicarbonaté calcique. La variation annuelle de la teneur en anions est très significative. Les plus faibles valeurs sont enregistrées en 2010 et les plus fortes valeurs en 2011. Les ions HCO₃⁻, qui représentent en moyenne 42 % de la charge totale des anions, ont une concentration moyenne de 493 µéq.l⁻ ¹ et varie entre 387 µéq.l⁻¹ en 2010 et 575 µéq.l⁻¹ en 2011 (Tableau 1). Les ions Cl⁻ ont la teneur la plus élevée après les ions HCO3-; leur concentration moyenne de 325 µéq.l⁻¹, est comprise entre 261 µéq.l⁻ ¹ en 2010 et 416 μ éq.l⁻¹ en 2011; ils représentent en moyenne 28 % de la charge totale des anions. Les teneurs moyennes en NO₃⁻ (187 μ éq.l⁻¹) et SO₄²⁻ (142 μ éq.l⁻¹) constituent respectivement 16 % et 12 % de la charge totale des anions. La teneur en PO₄³⁻ (20 μ éq.l⁻¹) représente 2 % de la charge totale des anions. Les ions Ca²⁺ représentent plus de la moitié (57 %) de la charge totale des cations, avec une moyenne annuelle de 621 µéq.1-1. La teneur moyenne en ions Mg^{2+} est de 213 µéq.l⁻¹. Les teneurs en K⁺ et Na⁺ sont respectivement de 131 µéq.l⁻¹ et 116 µéq.l⁻¹. Les ions Mg²⁺, K⁺ et Na⁺ représentent respectivement 20 %, 12 % et 11 % de la charge totale des cations. La silice SiO₂ varie significativement de 7 mg.l⁻¹ en 2010 à 14 mg.1⁻¹ en 2011 (Tableau 1), avec une moyenne annuelle calculée à 8 mg.l⁻¹.

3.2.2. Composition chimique des eaux de ruissellement sur la croûte d'érosion (ERO)

La variation annuelle de la teneur de la CTD mesurée sur la croûte d'érosion (ERO) est très significative et est en moyenne de 72 mg.l⁻¹. Elle est plus élevée en 2011 (88 mg.l⁻¹) et la plus faible valeur est mesurée en 2010 (52 mg.l⁻¹) (tableau 1). Ces eaux de ruissellement sur la croûte ERO sont plus riches en anions. Les teneurs moyennes des ions HCO₃⁻ $(270 \ \mu \acute{eq}.l^{-1})$ et Cl⁻ $(222 \ \mu \acute{eq}.l^{-1})$ sont les plus élevées (respectivement 30 % et 25 % de la charge totale des anions). Suivie, respectivement des teneurs moyennes des ions SO_4^{2-} (185 µéq.1⁻¹) et NO_3^{-} (157 μ éq.l⁻¹) avec de faibles proportions en phosphates (69 µéq.1-1). Les ions Ca²⁺ sont les plus abondants des cations (343 µéq.1-1) et représentent à eux seuls 47 % de la charge totale des cations. Par ordre d'importance viennent respectivement les ions Na⁺ (22 %), Mg^{2+} (20 %) et K⁺ (11 %). Les teneurs en ions majeurs sont très variables entre les années (Tableau 1). Les eaux de ruissellement sur croûte ERO sont de nature hydrogénocarbonatée calcique.

3.2.3. Composition chimique des eaux de ruissellement sur la croûte gravillonnaire (GRAV)

Sur la croûte gravillonnaire (GRAV), les eaux de ruissellement sont de nature hydrogénocarbonatée calcique. Elles sont moins minéralisées, comparées à l'eau de la croûte ERO. La teneur moyenne de la CTD est de 67 mg.l⁻¹ (tableau 1). Elle varie significativement de 56 mg.l⁻¹ en 2010 à 79 mg.l⁻¹ en

2011. Les ions HCO_3^- et Cl⁻ sont les anions les plus abondants dans l'eau et contribuent respectivement à 30 % et 28 % de la charge totale des anions. Les ions SO_4^{2-} et NO_3^{-} avec des teneurs moyennes annuelles respectives de 153 µéq.l⁻¹ et 150 µéq.l⁻¹, comptent chacun pour 17 % de la charge totale des anions. Les teneurs moyennes annuelles des ions HCO3⁻ et Cl⁻ sont respectivement de 269 µéq.l⁻¹ et 247 µéq.l⁻¹. Les ions PO43- existent en très faible quantité dans les eaux (74 µéq.1-1). L'ordre de grandeur des cations est le suivant : Ca^{2+} (365 µéq.l⁻¹) > Mg²⁺ (154 µéq.l⁻¹) > Na⁺ (144 $\mu \acute{eq}.l^{-1}$) > K⁺ (90 $\mu \acute{eq}.l^{-1}$). La teneur moyenne de la silice SiO₂ dans les eaux sur cette croûte GRAV est de 7 mg.l⁻¹. Elle est respectivement de 5 mg.l⁻¹ en 2010, 8 mg.l⁻¹ en 2011 et 9 mg.l⁻¹ en 2012 (tableau 1).

3.2.4. Composition chimique des eaux de ruissellement sur la croûte de dessiccation (DES)

La composition chimique de l'eau sur la croûte de dessiccation (DES) est donnée dans le tableau 1. La CTD est peu variable pour les trois années étudiées. Elle correspond à 67 mg.l⁻¹ en 2010, 79 mg.l⁻¹ en 2011 et 61 mg.l⁻¹ en 2012 (tableau 1). Tout comme les eaux collectées sur les croûtes GRAV et ERO, les eaux de la croûte DES sont de nature hydrogénocarbonatée calcique. L'ion HCO3⁻ est le plus abondant des anions (37 % de la charge totale des anions) et est associé au Ca²⁺, le plus abondant des cations (53 % de la charge totale des cations). Par ordre de grandeur, on a les ions Cl⁻ (228 µéq.l⁻¹), NO_3^- (153 µéq.l⁻¹) et SO_4^{2-} (139 µéq.l⁻¹), qui représentent respectivement 26 %, 17 % et 16 % de la charge totale des anions. Comme sur les autres croûtes de surface, les ions PO43- présentent de faibles teneurs dans l'eau (36 µéq.l⁻¹). Les autres cations représentent moins de 50 % de la charge totale des cations. Ce sont les ions Na⁺ (20 %), Mg²⁺ (17 %) et K⁺ (10 %), dont les teneurs sont respectivement de 160 µéq.1⁻¹, 139 µéq.1⁻¹ et 82 µéq.1⁻¹ ¹. La teneur en SiO₂ (6 mg.l⁻¹) sur la croûte DES est semblable à celle mesurée sur la croûte GRAV.

3.3. Variation spatiale de la chimie de l'eau de ruissellement

Les différentes croûtes de surface représentent des unités hydrologiques plus ou moins homogènes et différentes. Les outils utilisés pour la caractérisation de l'effet des croûtes structurale (STRU), d'érosion (ERO), gravillonnaire (GRAV) et dessiccation (DES) sur la variation de la chimie de l'eau sont principalement, l'analyse de la matrice de corrélation et l'analyse factorielle en composante principale (ACP).

La conductivité électrique (CE) est significativement différente entre les croûtes de surface. Les écarts de CE entre la croûte STRU et les croûtes ERO, GRAV et DES sont estimés à 43 µS.cm⁻¹, 41 µS.cm⁻¹ et 32 μ S.cm⁻¹, respectivement (figure 2.a). La CTD de l'eau sur croûte STRU $(92 mg.l^{-1})$ est significativement différente de la CTD des eaux sur croûtes ERO (72 mg.l⁻¹), GRAV (67 mg.l⁻¹) et DES (68 mg.l⁻¹) (figure 2.b). La différence de la CTD et la CE entre les croûtes ERO, GRAV et DES n'est pas significative. Les valeurs de la CE et la CTD les plus élevées sur la croûte STRU montrent un enrichissement de l'eau de ruissellement en ions majeurs. En effet on remarque une activité agricole sur ces croûtes du fait de ses caractéristiques hydrodynamiques favorables. Des valeurs comparables (CE 78 µS.cm⁻¹) à celle de la croûte STRU (croûte sur sol limono-sableuse) ont été trouvées dans les eaux de ruissellement sur sol sablolimoneux en Espagne^[23]. Cette différence entre les valeurs de CE des croûtes montre une influence des caractéristiques de chaque type de croûte de surface sur la chimie des eaux.

La caractérisation de la chimie des eaux de ruissellement sur les croûtes de surface montre qu'elles ont un impact significatif sur les ions majeurs, particulièrement les ions HCO3⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg^{2+} et K⁺. Les ions HCO_3^- et Cl⁻ sont les anions les plus abondants dans les eaux de ruissellement quel que soit le type de croûte de surface (dans l'ordre HCO_3^- (35 %) > Cl^- (26 %). Leurs concentrations moyennes sont plus importantes sur la croûte STRU $(493 \ \mu \text{éq.}1^{-1} \text{ pour HCO}_3^- \text{ et } 325 \ \mu \text{éq.}1^{-1} \text{ pour Cl}^-) \text{ que }$ sur les croûtes ERO, GRAV et DES (figure 3). L'écart de concentrations entre la croûte STRU et les croûtes ERO, GRAV et DES est respectivement de 223 µéq.1⁻¹, 224 µéq.1⁻¹ et 166 µéq.1⁻¹ pour HCO₃⁻ et 103 µéq.1-1, 78 µéq.1-1, 97 µéq.1-1 pour Cl⁻. Tout comme les ions HCO₃⁻ et Cl⁻, les cations Ca²⁺, Mg²⁺ et K^+ ont des concentrations movennes significativement plus élevées sur la croûte STRU que sur ERO, GRAV et DES (figure 3). Les écarts de concentrations entre la croûte STRU et les croûtes ERO, GRAV et DES sont respectivement de 278 µéq.l⁻¹, 256 µéq.l⁻¹, 187 µéq.l⁻¹ pour le Ca²⁺, 70 $\mu \dot{q}$.l⁻¹, 59 $\mu \dot{q}$.l⁻¹, 74 $\mu \dot{q}$.l⁻¹ pour le Mg²⁺ et 50 $\mu \dot{q}$.l⁻¹ ¹, 41 μ éq.l⁻¹, 49 μ éq.l⁻¹ pour le K⁺. Cependant, les concentrations moyennes de HCO₃⁻ et Ca²⁺ sont plus élevées sur la croûte DES (respectivement 327 µéq.let 434 µéq.1-1) que sur les croûtes ERO et GRAV (respectivement 270 μ éq.1⁻¹ et 365 μ éq.1⁻¹).

	pН	Т	CE	HCO ₃ -	Cl	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -	PO4 ³⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SiO ₂	CTD
		°C	µS.cm⁻						μéq.l ⁻¹				mg.l ⁻¹	
C A			CTDU											
Croute structurale STKU														
2010 Mov	76	20	50	297	261	67	176	15	570	07	124	74	7	72
ET	7,0	20	24	201	201	47	1/0	13	214	97	124	74 50	/	75 27
E.I. 2011	0,0	Ζ	54	232	95	4/	/4	11	514	104	/0	39	4	27
Mov	77	28	80	575	416	242	211	40	605	264	157	146	14	117
E T	0.7	20	53	273	171	170	133	40	095 /18	204	87	81	14	117 42
2012	0,7	2	55	2/4	1/1	170	155	40	410	299	07	01	14	72
Mov	76	28	89	555	331	152	182	9	613	312	120	142	5	94
E.T.	0.7	2	55	262	171	109	233	15	341	269	67	76	9	35
Croûte Erosion ERO														
2010		-	-											
Moy.	6,7	29	27	184	230	82	163	7	350	129	36	34	8	52
E.Ť.	0,5	3	16	78	72	47	79	3	134	80	13	14	6	12
2011														
Moy.	7,4	29	37	328	194	274	129	202	328	182	96	183	17	88
E.T.	1,0	2	22	316	104	101	65	575	114	132	30	184	25	38
2012														
Moy.	7,6	29	29	276	236	179	173	13	349	124	94	205	10	72
E.T.	0,7	3	7	61	53	98	134	14	95	61	34	179	6	16
Croût	e grav	illonna	ire GRAV	V										
2010	= 0	•		• • •	074		1.60	0	100	124			-	
Moy.	7,3	29	32	240	274	72	168	8	400	134	55	44	5	56
E.T.	0,7	3	20	95	84	31	67	5	148	90	24	25	2	12
2011 Mari	77	20	20	207	226	220	120	250	212	107	100	104	0	70
MOY.	/,/	29	39 24	297	220	239	138	239	312 105	19/	109	194	8 11	79 26
2012	0,0	3	24	104	70	101	97	940	105	97	29	127	11	30
Mov	78	29	30	272	241	158	145	4	372	141	105	188	9	68
E T	0,5	3	8	48	39	58	111	4	105	89	39	114	5	12
Croût	e dessi	ccatior	1 DES	10		20		•	100	0,7	57	111	2	12
2010														
Moy.	7,5	28	42	320	252	60	207	7	584	130	56	48	6	67
E.T.	0,8	3	30	144	116	63	82	3	393	106	23	19	5	25
2011	-													
Moy.	7,8	28	58	409	220	213	120	103	422	178	92	218	7	79
E.T.	0,7	2	39	178	108	119	93	286	310	93	32	305	10	36
2012														
Moy.	7,8	29	29	268	216	140	138	6	334	115	94	197	6	61
E.T.	0,5	3	8	124	83	58	67	13	134	53	35	85	3	14

Tableau I : Caractéristiques physico-chimiques et Teneurs moyennes des ions majeurs (μ éq.l⁻¹), de SiO₂ (mg.l⁻¹) et charge totale dissoute (CTD) (mg.l⁻¹) dans les eaux de ruissellement sur les croûtes de surface en 2010, 2011 et 2012

Moy.: moyenne; E.T. : écart-type



Figure 2 : (a) : variation de la conductivité électrique ; (b) : charge totale dissoute entre les croûtes structurale (STRU), d'érosion (ERO), gravillonnaire (GRAV) et dessiccation (DES).

La teneur moyenne des ions SO_4^{2-} dans l'eau de ruissellement varie de 142 µéq.l⁻¹ au niveau de la croûte STRU à 185 µéq.l⁻¹ à la croûte ERO. Elle est en moyenne de 153 µéq.l⁻¹ sur GRAV et 139 µéq.l⁻¹ sur DES (figure 3). La concentration moyenne la plus élevée en NO₃⁻ est enregistrée sur la croûte STRU (187 µéq.l⁻¹) et la plus faible sur la croûte GRAV (150 µéq.l⁻¹). La concentration en PO₄³⁻, la plus faible sur toutes les croûtes, est respectivement de 20 µéq.l⁻ ¹ et 74 µéq.l⁻¹ dans les eaux des croûtes STRU et GRAV (figure 3). Les ions Na⁺ ont une concentration moyenne comprise entre 116 μ éq.l⁻¹ sur STRU et 160 μ éq.l⁻¹ sur DES. On remarque que les différences de concentrations de NO₃⁻, PO₄³⁻ et Na⁺ entre les croûtes de ruissellement ne sont pas significatives. La concentration en SiO₂ est relativement la même entre les croûtes STRU, GRAV et DES, à l'exception de sa concentration sur la croûte ERO (12 mg.l⁻¹) qui est significativement différente de celles des croûtes GRAV (7 mg.l⁻¹) et DES (6 mg.l⁻¹).



Figure 3: Variation de la teneur en ions HCO₃⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ et Na⁺ et de la silice SiO₂ sur les croûtes structurale (STRU), d'érosion (ERO), gravillonnaire (GRAV) et dessiccation (DES)

3.4. Impact des croûtes de surface sur la matière dissoute dans l'eau de ruissellement

L'Analyse en Composante Principale (ACP) tel que présentée à la figure 4, permet de visualiser les principales associations entre les ions majeurs en solution ainsi que les principaux facteurs qui contrôlent la chimie de l'eau. Les deux premiers axes de l'ACP entre les caractéristiques physiques des sols comme variables explicatives, les ions majeurs, la conductivité électrique, la charge totale dissoute et volume d'eau ruisselé comme variables le supplémentaires, expliquent à 69 % la variance observée. L'axe 1 compte pour 50 % de la variance totale et l'axe 2 pour 19 %. L'axe 1 peut être interprété comme un axe de l'augmentation de la taille des particules du sol. Ainsi, la partie négative de l'axe 1 est proportionnelle aux sols argileux, c'està-dire les croûtes d'érosion (ERO) et gravillonnaire (GRAV). La partie positive de cet axe 1 correspond aux sols sablo-limoneux (DES) ou limono-sableux (STRU) (figure 4).

La représentation des variables par rapport à ces axes nous donne les résultats suivants : le volume d'eau ruisselé est très mal représenté sur les deux axes, mais l'on observe tout de même que la quantité d'eau ruisselée augmente lorsque les sols sont riches en argile et elle diminue lorsque ceux-ci sont riches en sable. Cela se traduit par une meilleure infiltration de l'eau sur les croûtes STRU et DES par rapport aux croûtes ERO et GRAV. La disposition du volume d'eau écoulé dans le bloc négatif du diagramme par rapport à l'ensemble des ions majeurs met en évidence l'influence du volume d'eau sur les teneurs des ions majeurs à travers l'effet dilution. La projection de l'ensemble des ions majeurs dans le graphique montre que la CTD, la CE et les concentrations des ions HCO_3^- , CI^- et Ca^{2+} , sont définies positivement sur l'axe 1. Les concentrations des ions NO_3^- , Mg^{2+} et K⁺ sont également proportionnelles à l'axe 1. La silice est également proportionnelle à l'axe 1. L'axe 2 est caractérisé par les ions SO_4^{2-} , Na^{2+} et PO_4^{3-} .

La matrice de corrélation entre les ions majeurs, la CTD, la CE et les propriétés physiques du sol conjugués aux résultats issus de l'ACP, montrent que les concentrations des ions majeurs dans l'eau de ruissellement dépendent significativement du contact de l'eau avec le sol. Leurs comportements sont bien distincts les uns des autres en fonction de la quantité d'eau ruisselée et des proportions en sable et en argile dans le sol. Cette analyse permet de distinguer trois groupes d'ions :

• Groupe 1 : Ions HCO₃, Cl⁻ et Ca²⁺

La corrélation de la concentration des ions HCO₃⁻, Cl⁻ et Ca²⁺ avec la CTD et la CE indique leur contribution majeure à la minéralisation des eaux. Ces ions sont les plus influencés par la quantité d'eau ruisselée. Leurs teneurs dans l'eau sont les plus faibles sur les sols au potentiel de ruissellement plus élevé (ERO et GRAV). Les teneurs de ces ions en solution sont fortement influencées par les propriétés physiques des sols. Elles sont plus importantes dans les eaux issues des sols limono-sableux que dans les eaux issues des sols argileux.



Figure 4. Analyse en Composante Principale (ACP) pour les ions majeurs, le volume d'eau ruisselée et la nature des sols.

La nature géologique du bassin-versant, dominée par les roches granito-gneiss, élimine l'option d'une origine lithologique de ces ions. La teneur de ces ions HCO_3^- , Cl^- et Ca^{2+} en solution serait donc en relation avec les activités biologiques et anthropiques en raison de leurs teneurs plus importantes sur la croûte STRU par rapport aux croûtes ERO, GRAV et DES. En effet, les ions HCO_3^- proviennent de la dissolution du CO_2 issu de la décomposition (minéralisation) de la matière organique (processus reconnu pour être très prépondérant dans cette région ^[24]. La présence des ions Ca^{2+} et Cl^- dans les eaux est par contre, attribuable à l'utilisation des fertilisants acides tels que les chlorures de potasse et les sulfates ^[25].

• Groupe 2 : Ions NO₃⁻, Mg²⁺ et K⁺

Tout comme le premier groupe d'ions, les teneurs des ions NO_3^- , Mg^{2+} et K^+ sont plus importantes dans les eaux sur sols limono-sableux que dans celles issues des sols argileux. L'influence de la quantité d'eau ruisselée sur ce groupe d'ions est moins significative que sur ceux du groupe 1. En effet, les teneurs de ces ions en solution augmentent lorsque la quantité d'eau ruisselée est moins importante. La présence des ions nitrates NO_3^- dans les eaux de ruissellement serait due à la pratique de l'élevage dans cette région où les excréments d'animaux, très souvent riches en matières organiques azotées.

• *Groupe 3 : Ions SO*₄²⁻, *PO*₄³⁻ *et Na*⁺

Les propriétés physiques des sols et la quantité d'eau ruisselée présentent une faible influence sur les teneurs des ions Na⁺ et PO₄³⁻. Contrairement au premier et deuxième groupe d'ions, les teneurs en solution des ions SO42- sont faibles sur les sols limoneux-sableux (STRU et DES) et plus élevées sur les sols argileux (ERO et GRAV), mais très peu influencées par la quantité d'eau ruisselée. La forte corrélation entre les ions SO42- et Na⁺ et leur faible contribution à la CTD de l'eau, caractérisent mieux l'altération des minéraux kaolinites des roches granito-gneiss, sources de la présence de ces ions en solution. La teneur des ions PO_4^{3-} est la plus faible dans l'eau quelle que soit la croûte de surface, cela peut s'expliquer par la présence du fer libre dans les sols ferrugineux qui peuvent fixer le phosphate. Cette observation rejoint celle de Roose, (1981) dans les sols des régions tropicales humides. La silice SiO2 est plus importante dans les sols sur croûtes STRU et DES et provient de l'hydrolyse des minéraux silicatés des roches granito-gneiss.

3.5. Variation temporelle du flux de matières dissoutes exportées sur les croûtes de surface

En général pour toutes les croûtes de surface, le mois de juillet (début de la période d'observation)

correspond au mois où l'on a un maximum de transport de matières dissoutes, lequel transport diminue progressivement jusqu'à atteindre la valeur minimale au mois d'octobre (figure 5). Le flux de matières transportées est plus important sur la croûte ERO soit 165,8 kg.ha⁻¹.an⁻¹. La valeur du flux de matières dissoutes transportées (80,4 kg.ha⁻¹.an⁻¹) sur la croûte STRU est plus faible que celles des flux de matières transportées sur les croûtes GRAV (137,8 kg.ha⁻¹.an⁻¹) et DES (106,5 kg.ha⁻¹.an⁻¹). Le ruissellement est également plus élevé sur les croûtes GRAV et ERO, ce qui traduit l'importance des écoulements sur l'exportation des matières dissoutes par les eaux de surface. Ce résultat s'explique également par les propriétés physiques des sols sous ces croûtes de surface. Le flux de matières dissoutes est en effet plus important sur les sols argileux par rapport aux sols sableux (les croûtes ERO et GRAV par rapport aux croûtes STRU et DES). On constate également le rôle de protection que jouent les plantes et le labour sur l'érosion des sols pendant la saison de pluie.

Les croûtes de surface jouent un rôle prépondérant sur le flux de la matière dissoute. Ces croûtes ont la capacité de modifier certaines propriétés du sol (la texture et la porosité) et par conséquent, ont une influence sur les processus d'érosion, la distribution de la végétation et le flux de nutriments et de sédiments dans un écosystème [12],[27]. Dans cette étude, les flux de matières dissoutes transportées sur les croûtes ERO et GRAV sont plus élevés que sur les croûtes DES et STRU. Cela s'explique par le temps de contact entre les matériaux du sol d'où sont issus les ions majeurs et l'eau ruisselée [28]. Sur la croûte GRAV, les grosses particules ralentissent le ruissellement de l'eau et augmentent le temps de contact avec les matériaux du sol. Cette eau riche en ions majeurs qui ne peut s'infiltrer à cause de la pellicule plasmique lisse imperméable formée par l'argile est totalement ruisselée. Sur la croûte ERO, le temps de contact est réduit et les fines particules qui y sont mobilisées sont dissoutes au cours du transport. Sur ces deux croûtes, les quantités d'eau ruisselée sont très importantes ; d'où les quantités importantes de matières dissoutes transportées. Sur les croûtes DES et STRU, les eaux chargées en ions majeurs s'infiltrent facilement, engendrant de ce fait de faibles ruissellements d'eau. L'infiltration de l'eau est encore plus importante sur la croûte structurale à cause de l'effet travail du sol. Par dilution, la quantité plus importante d'eau écoulée sur la croûte ERO, GRAV est à l'origine de la faible concentration des ions majeurs et la charge totale dissoute en solution par rapport à la croûte STRU.



Figure 5. Variation du flux de matières dissoutes sur les différentes croûtes de surface

4. Conclusion

Cette étude s'est déroulée sur différents types de croûtes de surfaces caractéristiques des sols sahéliens. Il s'agit : des croûtes d'érosion (ERO), les croûtes gravillonnaire (GRAV), les croûtes de dessiccation (DES), des croûtes structurales (STRU). Sur chacune de ces quatre (4) croûtes superficielles, trois (3) parcelles de 1 m^2 (1mx1m), 50 m² (5mx10m) et 150 m² (6mx25m) y ont été installées. Les données ont été collectées sous pluie naturelle pendant trois années d'étude 2010, 2011 et 2012 et concernent essentiellement les ions majeurs. Les concentrations en ions majeurs dans les eaux de ruissellement varient suivant les propriétés physiques des croûtes de surface. Les croûtes de surface ont un impact significatif sur les matières dissoutes en solution et ont permis d'expliquer l'existence de trois (3) groupes de matières dissoutes d'origines distinctes dont les comportements sont semblables vis-à-vis de la nature physique du sol. Ce sont premièrement le groupe des ions HCO_3^- , Cl^- et Ca^{2+} dont leurs teneurs sont les plus importantes sur les sols limono-sableux. Les ions HCO₃⁻ proviendraient de la minéralisation de la matière organique ; les ions Cl^{-} et Ca^{2+} sont eux issus des fertilisants acides tels que les chlorures et les sulfates. Ensuite vient le groupe des ions NO_3^- , Mg^{2+} et K^+ , avec des teneurs semblables à celles des ions du premier groupe, et est plus important dans les eaux sur sols limono-sableux que dans les eaux issues des sols argileux. La quantité d'eau ruisselée a moins d'influence sur la teneur de ces ions que celles des ions du groupe 1. Cependant, les ions Mg²⁺ et K⁺ proviennent de l'altération des roches. Enfin comme troisième groupe, on a les ions SO42-, PO43- et Na+ dont les teneurs sont faiblement influencés par les propriétés physiques des sols et la quantité d'eau ruisselée. Les ions SO42-, PO43- proviennent des engrais chimiques et les ions Na⁺ de l'altération des roches. Le suivi spatial de la chimie de l'eau de ruissellement a permis de caractériser la composition chimique des eaux de ruissellement et d'identifier les principales sources et facteurs qui impactent la teneur en ions majeurs en solution. Ce travail démontre l'influence des croûtes de surface sur la mobilisation des éléments minéraux du sol qui jouent un rôle important dans la gestion de la dégradation des sols.

5. Remerciements

Cette étude a été financée par l'Agence suisse de Développement et la Coopération, la fondation 2iE et l'Union Européenne à travers le programme de recherche AMMA (Analyse Multidiciplinaire de la Mousson Africaine). Les auteurs remercient l'équipe du laboratoire et les observateurs de terrain pour leurs assistances dans la collecte et l'analyse des données. Merci également à l'éditeur et aux reviewers anonymes pour leur commentaire et suggestion pour l'amélioration de ce travail.

6. Références

[1] Chesworth W. Encyclopedia of soil, XXVI. Hardcover. 2008.

[2] Sposito G. The Chemistry of Soils. 2 ed.,OXFORD, university press: 2008.

[3] Ribolzi O., Vallès V., Bariac T. Comparison of hydrograph decomvolution using residual alkalinity, chloride and oxygen 18 as hydrochemical tracers. water resources research (1996) 32, 1051–1059.

[4] Grimaldi C. Hydrochimie de Petits Bassins Versants Apports à La Connaissance Du Fonctionnement Géochimique Du Sol et de La Qualité de l'eau Des Cours d'eau, 2004.

[5] Gilli E.; Mangan C., Mudry J. Hydrogéologie: Objets, méthodes, applications. DUNOD: Paris 2008.

[6] Bliefert C., Perraud R. Chimie de l'environnement: Air, eau, sols, déchets. 2008.

[7] Casenave A., Valentin C. Les etats de surface de la zone sahélienne influence sur l'infiltration. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Developpement en Coopération: Paris 1989.

[8] Belnap J., Gillette D. A. Disturbance of biological soil crusts : impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in SouthEastern Utah. Land degradation & development (1997) 8, 355–362.

[9] Assouline S. Rainfall-Induced Soil Surface Sealing: A Critical Review of Observations, Conceptual Models, and Solutions. Soil Science Society of America (2004) 3, 570–591.

[10] Valentin C. Soil crusting and sealing in West Africa and possible approaches to improved management. In Soil Tillage in Africa: Needs and Challenges.; FAO, Ed.; 1993;

[11] Sela S., Svoray T., Assouline S. Soil water content variability at the hillslope scale : Impact of surface sealing. water resources research (2012) 48, 1–14.

[12] Chamizo S., Cantón Y., Lázaro R., Solé-Benet A., Domingo F. Crust Composition and Disturbance

Drive Infiltration Through Biological Soil Crusts in Semiarid Ecosystems. Ecosystems (2012) 15, 148– 161.

[13] Bromley J., Brouwer J., Barker A. P., Gaze S. R., Valentin C. The role of surface water redistribution in an area of patterned vegetation in a semi-arid environment, south-west Niger. Journal of Hydrology (1997) 198, 1–29.

[14] De Rouw A., Rajot J. Soil organic matter, surface crusting and erosion in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. Agriculture, Ecosystems and Environment (2004) 104, 263–276.

[15] Graef F., Stahr K. Incidence of soil surface crust types in semi-arid Niger. Soil & Tillage Research (2000) 55, 213–218.

[16] Karambiri H., Ribolzi O., Delhoume J. P., Ducloux J., Coudrain-Ribstein A., Casenave A. Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. Hydrological Processes (2003) 17, 1495–1507.

[17] Malam Issa O., Valentin C., Rajot J. L., Cerdan O., Desprats J. F., Bouchet T. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. Geoderma (2011) 167–168, 22–29.
[18] Diello P. Interrelations Climat – Homme –

Environnement Dans Le Sahel Burkinabé : Impacts Sur Les États de Surface et La Modélisation Hydrologique, 2007.

[19] Maïga-yaleu S. B., Chivenge P., Yacouba H., Guiguemde I., Karambiri H., Ribolzi O., Bary A., Chaplot V. Impact of sheet erosion mechanisms on organic carbon losses from crusted soils in the Sahel. Catena (2015) 126, 60–67.

[20] Maïga-Yaleu S., Guiguemde I., Yacouba H., Karambiri H., Ribolzi O., Bary A., Ouedraogo R., Chaplot V. Soil crusting impact on soil organic carbon losses by water erosion. Catena (2013) 107, 26–34.

[21] Taubner H., Roth B., Tippkötter R. Determination of soil texture: Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis. Journal Plant Nutrition Soil Science (2009) 172, 161–171.

[22] Maïga-Yaleu S., Yacouba H., Guiguemde I. Hydrochimie des eaux de pluie et de ruissellement en région Sahélienne Hydrochemistry of rainwater and runoff in Sahel region. Journal Société Ouest-Africaine Chimie (2016) 042, 16–29.

[23] Pińol J., Ávila A., Rodà F. The seasonal variation of streamwater chemistry in three forested Mediterranean catchments. Journal of Hydrology (1992) 140, 119–141.

[24] Atlas du Burkina Faso Ministère de l'économie et du développement. 2006.

[25] Roose E. J. Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique sablo-argileux très désature sous cultures et sous forêt dense humide sub-équatoriale du sud de la Côte d'Ivoire. ORSTOM: Paris 1980.

[26] Roose E. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'afrique occidentale. étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées,. ORSTOM: 1981. [27] Casenave A. Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne . Influence des états de surface. In Utilisation Rationnelle de l'eau Des Petits Bassins En Zone Aride; Paris, 1991; Vol. 5, , pp. 77–86.

[28] Biaou A. C., Casenave A., Delhoume J.-P., Gathelier R., Thiombiano L., Gineste P., Ribolzi O. Erosion hydrique et transfert de solutés en milieu Sahélien: Etude des processus à l'échelle d'un petit bassin versant au nord du Burkina Faso. Sud Sciences et Technologies (1999) 4, 18–28.