

EFFET DE L'APPLICATION DE BOUES D'ÉPURATION SUR LA CAPACITÉ D'INFILTRATION DES SOLS AGRICOLES

BOUGHALEM Mostafia^{1*}, IENCIU Anișoara Aurelia² et BELHOUCINE Latifa³

1. Centre universitaire Ain Temouchent - Institut des sciences -Département des Sciences de la Nature et de la Vie - Laboratoire Hydrologie Appliquée et Environnement, Algérie.

2. Faculté d'Agriculture, Université du Banat, Roumanie.

3. Labo de recherche n°31, Département des Ressources Forestières, Université de Tlemcen, Algérie.

Reçu le 04/09/2020, Révisé le 12/12/2020, Accepté le 28/12/2020

Résumé

Description du sujet : Au nord-ouest de l'Algérie, une partie importante des écoulements de crue provient du ruissellement de surface, qui peut se généraliser à l'échelle de versants dénudés et fortement ravinés. Ce ruissellement et son corollaire l'érosion dépendent du dépassement de la capacité d'infiltration du sol, c'est-à-dire de sa possibilité d'absorber le flux.

Objectifs : L'objectif de ce travail est d'évaluer l'effet de la boue d'épuration urbaine sur la capacité d'infiltration comme caractéristique centrale qui régularise les flux d'eau, le ruissellement et l'érosion des sols.

Méthodes : Une méthode de remédiation et d'amélioration des situations dégradées est d'utiliser la boue d'épuration urbaine comme amendement en agriculture. La capacité d'infiltration des sols a été évaluée par la méthode du monocylindre à charge décroissante.

Résultats : Les résultats obtenus dans cette expérimentation montrent que l'ajout au sol de l'amendement organique utilisé a eu un effet bénéfique sur les propriétés hydrodynamiques du sol. Il a amélioré son infiltrabilité et a augmenté sa porosité totale.

Conclusion : Le traitement par une dose de 30 t ha⁻¹ permet d'augmenter l'infiltration d'eau et s'opposer au ruissellement, mais il est déconseillé pour sa toxicité due aux métaux lourds. L'épandage de 10 t de boues à l'hectare restera le traitement recommandé.

Mots clés : boues d'épuration ; épandage ; ruissellement ; érosion ; infiltration.

EFFECT OF THE SEWAGE SLUDGE APPLICATION ON THE INFILTRATION CAPACITY OF AGRICULTURAL SOILS

Abstract

Description of the subject: In the Northwest of Algeria, a considerable quantity of flood flows comes from surface runoff that can be generalized on the scale of bare and ravined slopes. Both runoff and erosion depend on surpassing capacity of soil infiltration, ie, its possibility to absorb the flow.

Objective: The objective of this work is to study the effect of mud on the infiltration capacity as a central characteristic regulating water flows, runoff and erosion as well.

Methods: A possible way of remedying and improving degraded cases is the use of urban sewage sludge as improvements in agriculture. The infiltration capacity of the soil was evaluated by the single cylinder method with decreasing load.

Results: the short-term results gained show that the organic improvement added to the soil had a beneficial effect on the hydrodynamic properties. In fact, it improved the soil infiltrability and increased its complete porosity.

Conclusion: The treatment of the studied soil using 30 t ha⁻¹ sludge dose helps to increase water infiltration and oppose runoff, but not recommended for its toxicity due to heavy metals. The application of 10 t of sludge per hectare remains the best treatment.

Keywords: sewage sludge; flows; runoff; erosion; infiltration.

* Auteur correspondant : BOUGHALEM Mostafia, E-mail : boughalem_2000@yahoo.fr

INTRODUCTION

En Algérie du Nord, le phénomène d'érosion hydrique est la forme la plus importante de dégradation physique des sols. Ce phénomène affecte les reliefs, la production agricole et la stabilité des versants [1]. Au niveau du bassin versant (BV) de l'oued Isser, le système de production repose principalement sur une céréaliculture extensive, souvent associée aux élevages ovin et caprin sur des terres de parcours. Les rendements sont faibles sur des sols pauvres en nutriments [2]. La végétation n'est pas assez couvrante pour protéger efficacement le sol contre une dégradation de sa structure sous l'impact des gouttes de pluies. La fragilité des sols est accentuée par des pratiques anthropiques destructrices qui génèrent du ruissellement [3]. La connaissance de l'infiltrabilité de la couche superficielle du sol est nécessaire pour améliorer la prévision des crues dans ce bassin versant torrentiel. Par ailleurs, l'augmentation de la quantité de boues provenant des stations d'épuration (STEP) est de plus en plus importante [4]. Ces boues pourraient être valorisées en les transformant en produits favorisant la cohésion des constituants du sol et en contribuant à leur structuration et à leur stabilité. Ceci devrait ainsi constituer une solution alternative permettant de transformer les boues en produits favorisant l'infiltration des sols et limitant par effet induit, les risques de ruissellement et d'érosion. L'épandage des boues sur les sols agricoles peut augmenter la porosité, la pénétration des racines et la dynamique des fluides du sol comme le soulignent plusieurs travaux mettant en évidence le gain qualitatif et quantitatif apporté par les boues d'épuration sur les sols cultivés [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Par ailleurs, la matière organique apportée par les boues joue un rôle significatif sur la dynamique des états de surface du sol. Ces derniers influencent fortement la partition infiltration/ruissellement [16]. Ainsi, les composantes les plus actives sont le couvert végétal et le sol nu qui varient en sens inverse. La couverture du sol, en interceptant l'énergie des gouttes de pluies et des eaux ruisselantes peut avoir une influence considérable sur l'infiltration [17, 18]. Les surfaces fermées (croûte de sédimentation,

pellicule de battance, semelle de compaction ou cailloux pris dans la masse) jouent un rôle négatif dans la dynamique d'infiltration car elles vont produire rapidement de l'eau libre à la surface du sol. Pour que celle-ci ruisselle, il faut encore qu'elle évite les pièges des surfaces ouvertes c'est-à-dire fissures profondes, zones motteuses, galeries des termites et des vers de terre très perméables [19, 20]. En Algérie, quelques études ont été menées pour évaluer l'impact de l'application des boues comme amendement organique aux sols. Ces études ont surtout porté sur les qualités fertilisantes du sol et le rendement des cultures [5, 13, 21, 22], les effets sur la biomasse microbienne [23] et sur la distribution des métaux lourds dans le sol [6, 13, 24, 25]. Par contre, l'effet des boues sur l'infiltrabilité des sols cultivés n'a jamais été abordé. Le présent travail a pour objet d'estimer l'effet de l'apport des boues d'épuration sur l'amélioration du processus d'infiltration de l'eau de pluie dans les sols. Différentes méthodes d'évaluation de l'infiltration de l'eau dans le sol ont été abordées dans la littérature. La méthode de MÜNTZ des doubles anneaux donne des résultats intéressants pour étudier l'infiltration des eaux d'irrigation par submersion. Cependant, elle exige beaucoup d'eau et ne convient pas pour estimer les risques de ruissellement sur les pentes supérieures à 5% [26]. La méthode Pioger à double anneau consomme déjà moins d'eau, mais n'est pas adaptée aux fortes pentes [27]. Dans la présente étude, nous avons opté pour le test d'infiltration au cylindre unique sous charge décroissante suggéré par Roose *et al.* [28]. Cette méthode indicatrice de ruissellement s'adapte parfaitement aux fortes pentes (>15%), cas des parcelles sur lesquelles la présente étude a été menée (pentes 5 à 20 %). Un exemple sera décrit sur un versant marneux de l'Isser sur sols bruns calcaires argileux.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Site d'étude

Le bassin versant (BV) de l'Oued Isser se situe au Nord-Ouest algérien, entre les longitudes 1° 20' 31" W et 0° 52' 28" W et les latitudes 34° 41' 22" N et 35° 9' 37" N. Il s'étend sur une superficie de 1122 km² pour un périmètre de 207.7 km (Fig. 1).

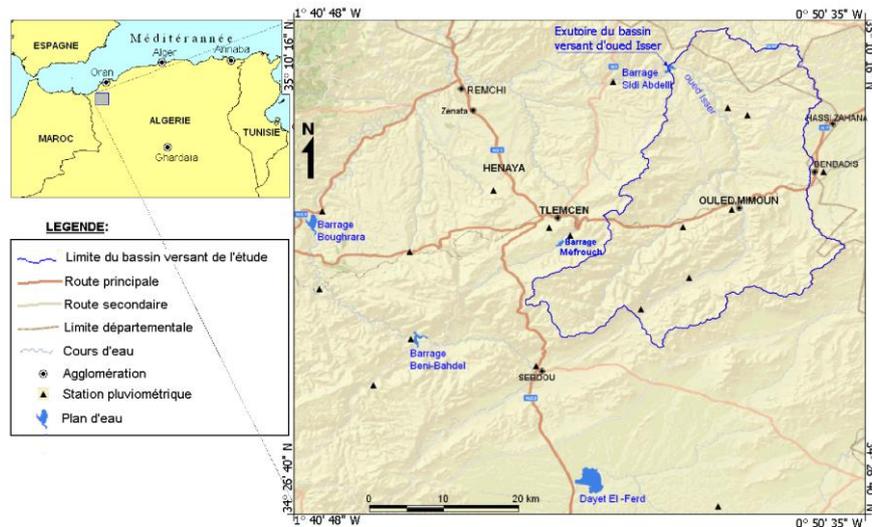


Figure 1 : Carte de situation du bassin versant de l'oued Isser [32]

Le climat régional est de type méditerranéen semi-aride à hiver tempéré ; à une saison froide et pluvieuse succède une saison chaude et sèche. Les pluies sont déterminées par une irrégularité spatio-temporelle et par un régime de courte durée et à forte intensité. La majeure partie des précipitations tombent à une époque où les cultures couvrent mal le sol. Le réseau hydrographique du bassin versant est dense [3]. Il est composé d'un oued principal (oued Isser) et d'une série de tributaires : oued Chouli, oued Fernan, oued Ben Hadi et oued Beniane (Fig. 2).

Affluent rive droite de la Tafna, l'oued Isser est long de 81 km. Il prend sa source à Ain Isser au sud de Ouled Mimoun. Le paysage est complexe et se compose d'une mosaïque d'unités réagissant différemment aux actions érosives de l'eau (Fig. 3) [3]. Dans la partie nord, les versants sont constitués de substrats tendres (marnes et argiles) avec intercalations gréseuses. Dans le côté sud, la partie dominante porte des sols à croûte et encroûtements calcaires et surmonte un lit de galets cimenté par un ciment jaune rougeâtre.

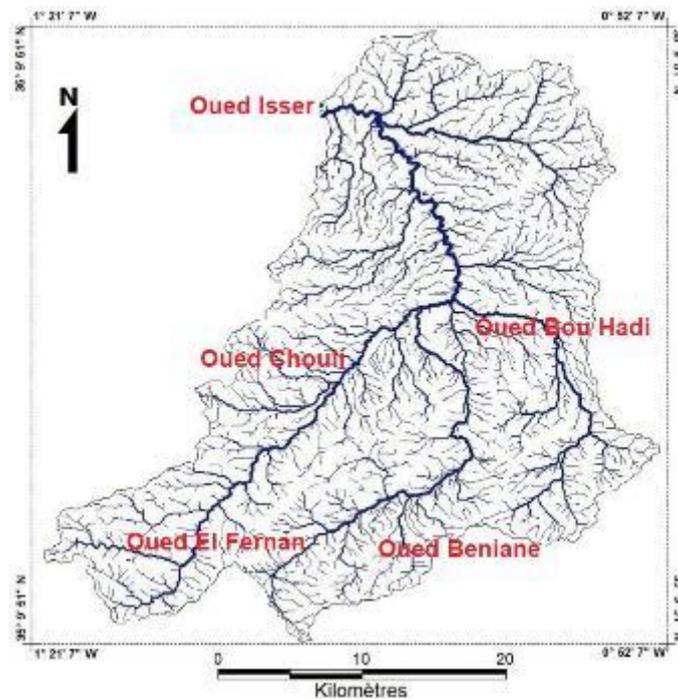


Figure 2 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Isser [3]



Figure 3 : Formes d'érosion rencontrées au niveau du bassin versant de l'oued Isser.

A : Érosion en nappe (sélective) ; B : Phénomène de suffosion ; C : Ruissellement hypodermique sous un seuil de correction torrentielle ; D : Ravinement transformant le paysage en badlands.

2. Protocole expérimental

La présente étude repose sur un dispositif expérimental installé au nord du bassin sur 2 campagnes agricoles (2018-2019) et constitué d'une parcelle paysanne de 45m×45m divisée en 5 blocs de mêmes dimensions, sur des pentes allant de 15 à 20 %. Les boues utilisées proviennent de la station de traitement et épuration des eaux (STEP) de la ville de Tlemcen de type boues activées à faible charge. Elle est située à environ 50 km à l'ouest du bassin. Ces boues sont issues des décanteurs secondaires et séchées à l'air libre sur un lit de séchage non planté. Leurs caractéristiques physicochimiques sont résumées dans le tableau 1. L'épandage des boues a été appliqué manuellement en automne 2018, juste après les premières pluies. Leur incorporation au sol a été réalisée à 10 cm de profondeur à l'aide d'une

herse à disques. Cinq traitements ont été retenus pour cette expérimentation : TB0 : Témoin, sol sans application de boue ; TB1 : 6 tonnes de boue à l'hectare ; TB2 : 10 tonnes de boue à l'hectare, TB3 : 30 tonnes de boue à l'hectare et TB4 : 60 tonnes de boue à l'hectare. Ce choix a été fait sur la base d'une étude régionale relative à la valorisation agricole des boues [21]. Chaque dose de boues a été épandue sur cinq sous blocs ayant chacun une superficie de 10m², séparés par une allée de 1,5m. Le blé a été semé à la volée durant l'opération de labour. Cette culture a été menée en pluvial pendant les 2 années d'étude, sur un sol pauvre en matières organiques dont les paramètres physicochimiques sont rassemblés dans le tableau 2.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques de la boue d'épuration utilisée (valeurs moyennes, année 2018)

Paramètres	Teneur	Norme	Paramètres	Teneur	Norme 44-
Matières sèches MS (%)	50	≥ 50	Rapport carbone / azote	18	-
Matières organiques (% MS)	85	≥ 30	Azote (%)	2,5	< 3%
Matières minérales (% MS)	15	< 40	Phosphore (%)	2,95	< 3%
Indice de boue (mg/l)	173 à	-	Potassium (%)	1,3	< 3%
pH	7	-	Conductivité électrique	1500	-

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques des sols étudiés

Paramètres	Teneur	Paramètres	Teneur
Argiles (%)	29,58	Conductivité électrique (CE) à C/N	175
Sables (%)	29,54	Azote (N) (%)	8
Limon (%)	40,87	Phosphore (P) (méq/100g)	0,7
Matière organique (Mo)	0,87	Potassium (K) (méq/100g)	0,05
Ca CO ₃ Total (%)	19,89		1,6
pH	8,02		

3. Méthode d'analyse

La connaissance de l'infiltrabilité de la couche superficielle du sol est nécessaire pour l'analyse de la modélisation du fonctionnement hydrologique d'un sol agricole. Ainsi, nous avons procédé par la détermination, sur le terrain, des taux d'infiltration des sols pour les cinq traitements appliqués. Sur chaque sous bloc ont été réalisées cinq mesures d'infiltrométrie afin de se faire une idée plus précise de la valeur d'infiltration des horizons superficiels. L'outil choisi pour ce travail est un dispositif à simple anneau à charge décroissante [28] (Fig. 4). Le test consiste à suivre l'infiltration en fonction du temps d'un litre d'eau introduit dans un cylindre métallique de 100 cm² de section et de 10 cm de charge initiale. Des couples de lecture (hauteur d'eau « h », temps « t ») sont effectués toutes les minutes. La mesure se poursuit jusqu'à ce que l'on obtienne une vitesse d'infiltration stable. Les points de mesure sont, par la suite, reportés sur un graphique pour tracer les tronçons de droite définissant les perméabilités. C'est un test rapide qui exige peu d'eau.

Il permet une bonne compréhension du comportement de l'eau dans le profil et le long d'une toposéquence ; le matériel est très mobile, à la portée de toutes les bourses. Les caractéristiques du sol et en particulier ses états de surfaces jouent un grand rôle sur ses propriétés hydrodynamiques. Ceci nous a conduits à affiner encore plus l'étude en analysant les états de surface du sol. Ainsi, toutes les mesures d'infiltration ont été couplées à des relevés des états de surfaces. Avant chaque mesure, nous avons observé en chaque point, le type de surface rencontré : sol nu, cailloux, litière, végétation, ainsi que la nature ouverte ou fermée de la surface, selon la méthode des points quadrats proposée par Levy et Madden [29] (Fig. 5). Nous avons donc relevé l'absence ou la présence de chaque élément. Ainsi, les données ont directement été fournies en %. Notons que la somme des surfaces couvertes et nues est égale à 100%. Il en est de même pour la somme des surfaces fermées et ouvertes. Cinq relevés d'états de surfaces ont été effectués sur chaque parcelle le long d'un transect de façon à estimer la variabilité intra parcellaire.



Figure 4 : Test d'infiltration au monocylindre

A : Test d'été (août), B : Test d'hiver (février)



Figure 5 : Relevés des états de surfaces par la méthode des points quadrats

A : Test d'été (août), B : Test d'hiver (février)

3.1. Influence de l'état hydrique des sols

Afin d'avoir des résultats comparables, tous les tests de suivi de la vitesse d'infiltration ont été réalisés en été (mois d'août), lorsque les sols se trouvaient dans leur état le plus sec (humidité du sol = 5%). Cependant, en raison de l'évolution annuelle de l'état hydrique initial des sols, des répétitions ont été menées en automne (novembre), en hiver (février) et au printemps (mai) sur des sols qui renfermaient respectivement une teneur d'eau mesurée en pour-cent massique de l'ordre de 15%, 45% et 28% dans les 10 premiers centimètres du sol.

RÉSULTATS

Pour tous les commentaires, nous donnerons la valeur moyenne des cinq répétitions réalisées pour chaque mesure d'infiltration et relevé des états de surfaces.

1. Dynamique de l'infiltration

La variabilité spatio-temporelle de l'infiltration de l'eau est décrite par des courbes représentant la distribution verticale des teneurs en eau dans le sol, à différents instants (Fig. 6). Conformément aux résultats d'autres auteurs [26, 30], la cinétique d'infiltration montre la même allure de décroissance avec le temps pour toutes les courbes. Ces dernières présentent l'enchaînement de 3 phases : (i) La phase d'imbibition : durant laquelle toute l'eau s'infiltre dans le sol en pénétrant par les pores, les fissures, les orifices pratiqués par les vers ou occasionnés par la pourriture des racines. Ainsi, l'eau remplit en premier lieu les interstices en surface et pénètre par la suite sous l'action de la gravité et les forces de succion. Par ailleurs, une infiltration préférentielle attribuable à des macropores semble se produire en début

d'infiltration, dans la plupart des cas. Cette phase coïncide avec la constitution de la croûte structurale ou croûte de battance sous l'action mécanique et physique de l'eau ; (ii) La phase de décroissance de l'infiltration qui se présente avec un profil de diminution progressif et correspond à la transformation de la croûte structurale en croûte d'érosion ; (iii) La phase de stabilisation (intensité limite d'infiltration), au cours de laquelle la diminution de l'infiltrabilité se poursuit très lentement et coïncide conjointement avec le développement de la croûte d'érosion sur les zones restées saillantes et de la croûte de sédimentation dans les zones immergées.

1.1. Influence de l'état hydrique initial du sol sur l'infiltration de l'eau

Les vitesses d'infiltration enregistrées en hiver (février) sont nettement inférieures à celles observées pendant la période sèche au mois d'août (Fig. 6). Elles varient de 325 à 1002 mm/h pour les sols secs (humidité = 5%), de 219 à 998 mm/h pour les sols humides (humidité = 15 - 28%) et de 148 à 541 mm d'eau par heure pour les sols très humides (humidité = 45%). Ces résultats indiquent que l'infiltrabilité d'un sol dépend surtout de son taux initial d'humidité [31, 32].

1.2. Effet de la boue sur l'infiltration de l'eau

L'infiltration moyenne de l'eau est significativement variable entre les cinq traitements appliqués au sol. La figure 6 présente les valeurs mesurées qui varient proportionnellement avec la dose de boue épandue, de 148 mm/h pour TB0 à 1002 mm/h pour TB4.

Les courbes d'infiltration obtenues montrent que l'incorporation des boues a modifié de manière significative l'infiltrabilité dans les sols amendés par rapport au témoin (TB0). Nous constatons, par ailleurs que l'infiltration est fortement influencée par l'état hydrique des sols qui change en fonction des saisons (Fig. 6) : en été, l'infiltration est élevée (325- 1002 mm/h) à cause de la sécheresse du sol. Dans l'essai d'automne (novembre),

l'humidification du sol par les précipitations automnales a provoqué une dilatation des marnes faisant disparaître les fissures. L'infiltration est plus faible que celle obtenue en été (219- 998 mm/h). Elle devient encore plus faible au 3ème essai (148- 541 mm/h), en février, quand la terre est très mouillée. Au 4ème essai, en avril, le sol commence à se dessécher, l'infiltration augmente doucement et varie de 275 à 839 mm/h suivant les conditions. Ces résultats sont comparables à ceux rapportés par Morsli [31].

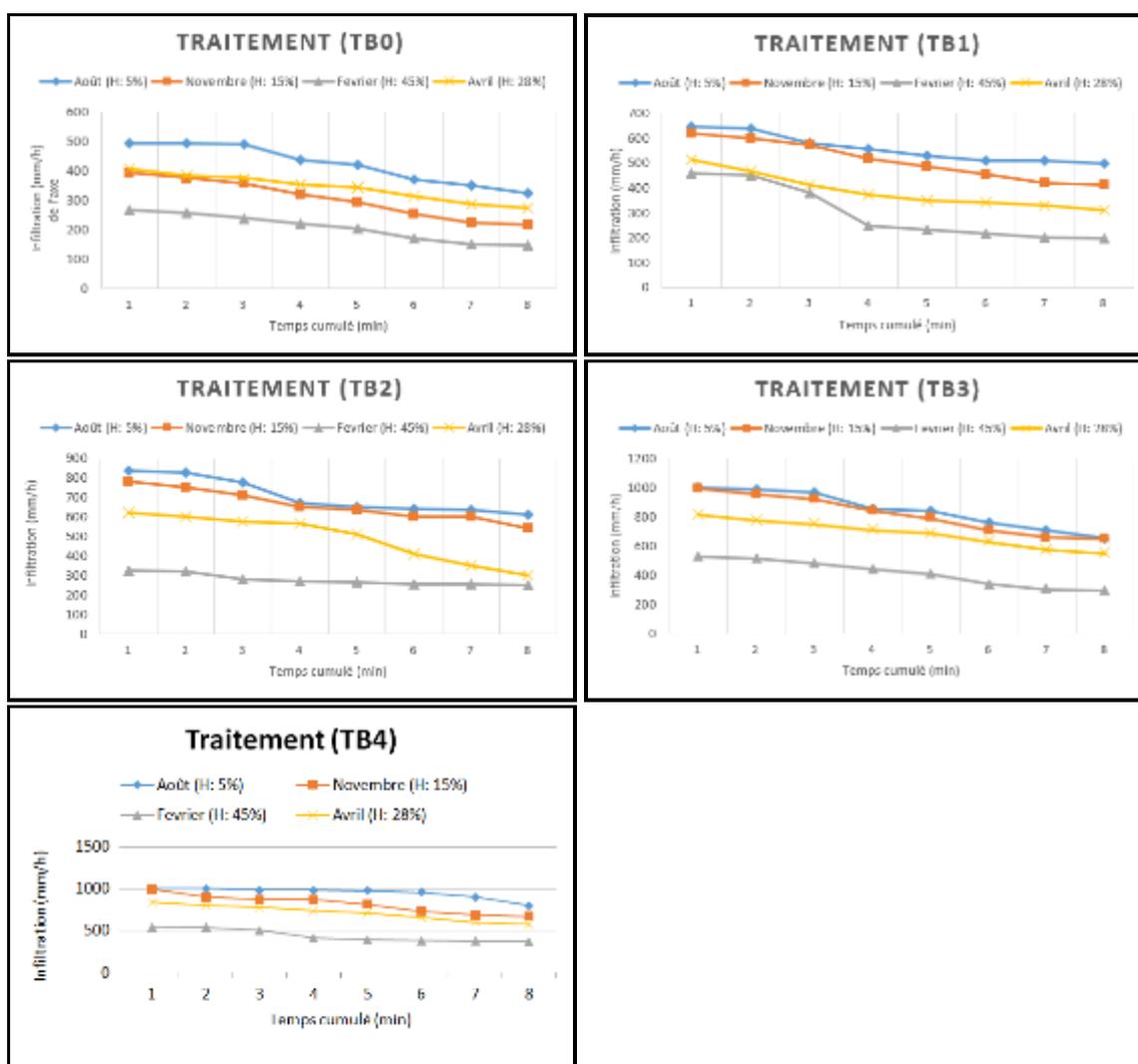


Figure 6 : Courbes d'infiltration des parcelles sous différents traitements de boues (TB0 à 4 pour respectivement 0, 6, 10, 30 et 60t ha-1)

1.3. Infiltration de l'eau et dynamique des états de surface

L'état de surface du sol, a été caractérisé par des paramètres descriptifs qui conditionnent l'infiltrabilité et la rétention superficielle.

Les résultats obtenus montrent que les composantes de l'état de surface du sol de chaque parcelle évoluent d'un relevé à l'autre (Tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques des états de surface des différentes parcelles amendées ou non par des boues en fonction du temps

	Traitements (doses)	Etats de surfaces						
		Sol nu (%)	Surface couverte (%)	Surface ouverte (%)	Surface fermée (%)	Litière (%)	Cailloux (%)	Adventices (%)
Août	TB0	81	19	50	50	9	9	2
	TB1	78	22	64	36	7	9	6
	TB2	72	28	64	36	10	8	10
	TB3	63	37	67	33	23	10	4
	TB4	62	38	69	31	18	10	7
Novembre	TB0	85	15	33	67	4	9	2
	TB1	82	18	34	66	4	9	5
	TB2	72	28	55	45	7	9	12
	TB3	66	34	56	44	20	10	4
	TB4	65	35	56	44	20	12	4
Février	TB0	63	37	6	94	14	9	14
	TB1	60	40	7	93	13	9	18
	TB2	51	49	8	92	20	8	21
	TB3	44	56	17	83	23	9	24
	TB4	44	56	18	82	20	7	5
Avril	TB0	15	85	27	73	20	9	56
	TB1	12	88	36	64	21	9	58
	TB2	10	90	42	58	24	8	58
	TB3	7	93	44	56	26	10	50
	TB4	3	97	47	53	25	12	52

DISCUSSION

En été, les sols marneux présentent la plus forte proportion de surfaces ouvertes (50- 69%), en hiver la plus faible proportion (6%), avec des valeurs intermédiaires au printemps et en automne (27- 56%). Ceci est dû au phénomène du retrait-gonflement entraînant une microfissuration des agrégats. Lorsque ces sols sont fissurés, l'infiltration est très élevée et une érosion interne peut être engendrée (Fig. 3B). A l'état plus ou moins saturé, l'infiltration devient très faible, ce qui déclenche facilement le ruissellement.

Les parcelles traitées avec TB1 et TB2 présentent une proportion de surface couverte (18 – 90 %) moins importante que les parcelles amendées avec TB3 (34- 93%) et TB4 (35- 97%). En TB2, le taux de couverture est élevé (jusqu'à 90%) et l'infiltration atteint 840 mm/h. En effet, la végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface [3], lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. Les apports de boues d'épuration, riches en azote, phosphore et potassium (2,5%, 2,95 % et 1,3%,

respectivement) permettent d'accroître le taux de matières organiques et, par conséquent la perméabilité du sol [21]. En TB1, les parcelles présentent une proportion de surface couverte modérée allant de 18 à 88 % et une infiltration moyenne modeste (199-645 mm/h). Les boues étudiées ont une texture plus organique que minérale avec 85% de matières organiques. Cette dernière a amélioré la porosité et la structure du sol [2]. Par ailleurs, la conductivité saturée du sol qui est un des paramètres clés dans la modélisation hydrologique, est estimée par la mesure in situ de l'infiltrabilité. Du point de vue salinité, les boues utilisées dans cet essai présentent une forte conductivité électrique (1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$) par rapport à celle du sol (175 $\mu\text{s}/\text{cm}$). Elles possèdent donc une bonne capacité d'échange cationique. Ainsi, l'enfouissement de boues (TB1 à 4) dans la zone rhizosphérique où l'activité biologique est très intense améliore considérablement l'accessibilité des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) aux plantes. Sur les parcelles non amendées (TB0), la proportion en surface couverte varie de 15 à 85%. L'infiltration moyenne de l'eau y est encore plus faible qu'en TB1.

Elle varie de 148 à 496 mm/h. Celle-ci peut atteindre jusqu'à 148 mm/h quand le sol est humide (3^{ème} essai en février). Les surfaces en blé ruissellent tôt et longtemps entre décembre et mai car l'état de surface est dégradé par les pluies alors que les blés sont peu couvrants en début d'hiver [33]. L'eau de ruissellement arrache les particules fines et légères (argiles et matières organiques) responsables de la fertilité des sols. Dans cette étude, nous avons opté pour l'enfouissement de la boue dans un sol très pauvre en matière organique (0,87%), car il permet, non seulement de s'opposer aux pertes en sol par l'eau de ruissellement, mais aussi d'éviter la création d'odeurs désagréables dans le milieu environnant. Les eaux de ruissellement correspondent aux eaux non infiltrées. L'occurrence du phénomène dépend d'abord de la capacité du sol et du couvert végétal à absorber ou retenir les eaux de pluies [34]. Les parcelles traitées avec TB3 et TB4 quant à elles, bénéficient des taux de recouvrement les plus élevés (34-97%). Nous constatons que le pourcentage de sol nu a diminué considérablement et parallèlement, celui du couvert végétal a augmenté progressivement (du 1er au 4^{ème} relevé). A ce niveau, l'infiltration moyenne est très élevée. Elle varie de 294 à 999 mm/h en TB3 et de 370 à 1002 mm/h en TB4 : la présence d'une litière à la surface du sol, vigoureusement transformée par les vers de terre et les termites, explique l'absence des croûtes de battance et l'amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau par les traitements TB3 et TB4. Les résultats montrent que l'infiltration est plus élevée sur les parcelles présentant les taux de recouvrement les plus élevés. Ces résultats sont en concordance avec ceux enregistrés par Morsli [31], Morsli *et al.* [35] et Sabir *et al.* [20]. Par ailleurs, les infiltrabilités observées sont bien corrélées avec l'ouverture du sol ($R^2=0,72$). Il est bien entendu que l'infiltration sur un sol humide est plus faible que sur un sol sec, néanmoins la courbe d'infiltration relative aux parcelles non amendées (TB0) indique bien l'inverse. Ce résultat inattendu peut être expliqué par le fait que le sol se soit fermé assez brusquement par la dilatation des marnes présentes.

L'entassement des marnes sur ces sols peu évolués et pauvres en matière organique permet une réaction rapide avec l'eau pendant les premières minutes du contact de l'eau avec le sol le rendant tout de suite imperméable. Un effondrement en masse de ces sols instables peut facilement avoir lieu par simple soutirage ou rupture de pente. Nous constatons d'une manière générale que sous les mêmes conditions climatiques, les parcelles étudiées présentent des infiltrabilités différentes dues à la différence de leurs états de surfaces. Les valeurs d'infiltrabilité les plus élevées ont été enregistrées au mois d'août au niveau des parcelles traitées avec TB3 (999 mm/h) et TB4 (1002 mm/h). Celles-ci présentent les plus fortes proportions de surfaces ouvertes (jusqu'à 67%). A ce niveau, le sol est maintenu couvert en constance par une biomasse sèche de débris végétaux. Sa fertilité s'enrichit grâce aux insectes et vers de terres creusant des tunnels (macropores) qui permettent à l'eau de pénétrer dans le sol et d'y circuler rapidement. Tandis que la plus faible infiltrabilité (148 mm/h) a été mesurée au 3^{ème} essai (février) sur les parcelles non amendées (TB0) présentant une faible proportion de surface ouverte (6%). Cela s'explique par leur pauvreté en biomasse qui s'oppose à l'infiltration et favorise ainsi l'écoulement. Ce sont donc ces parcelles qui encouragent le plus le ruissellement. Ceci est reflété par leurs états de surfaces (sol tassé et durci, croûte de battance...). Cette relation montre que l'ouverture du sol, telle que nous l'avons considérée visuellement, est un paramètre hydrodynamique approprié. Ces résultats concordent avec ceux de Habi *et al.* [36], obtenus sous pluies simulées et ceux de Morsli [31], obtenus à partir des tests d'infiltration par la méthode de Piogger. En freinant le ruissellement, l'incorporation des boues au sol a constitué une protection efficace contre l'érosion. Les résultats mettent en évidence l'exception que constitue TB3 et TB4 comme étant les traitements exposant l'état de surface le moins dégradé ; la formation de croûtes sédimentaires, témoin de la formation du ruissellement y est très rare. Certains auteurs ont obtenu de bons résultats en termes de rendement des cultures, avec des doses de boue supérieures à TB3 : 40 t ha⁻¹ appliqués en céréaliculture, au nord-est de l'Algérie [37],

60 t ha⁻¹ sur les plants de Mélèzes en France [38] et 90 t ha⁻¹ sur des sols de vignobles au sud de la France [7]. Les résultats obtenus montrent que bien que le traitement TB4 apporte deux fois plus de matière organique, il a contribué d'une façon similaire au traitement TB3 à augmenter l'infiltrabilité du sol. Cette finalité peut être attribuée aux métaux lourds ajoutés par la double dose de boue (60 tonnes à l'hectare) qui aurait exercé un certain effet toxique sur la biomasse microbienne du sol inhibant son activité biologique. La restauration de la matière organique du sol par épandage de boues a été fréquemment abordée dans la littérature. Cependant l'application anarchique de ces amendements peut constituer une nouvelle menace pour l'environnement de par leur forte concentration en charge polluante [6, 39, 40]. De l'analyse de l'infiltration, il ressort que le traitement du sol étudié par une dose de 30 t. ha⁻¹ de boues serait plus intéressant pour augmenter l'infiltration d'eau et s'opposer au ruissellement. Toutefois, le flux des métaux lourds limite l'usage de ces boues.

De ce fait, le seuil de tolérance autorisé par la norme NFU44-051 [41] sur dix ans en cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc est respectivement de 0,15 kg/ha, 6 kg/ha, 10kg/ha, 3 kg/ha, 9 kg/ha et 30 kg/ha. Dans cette étude, le plomb constitue l'élément le plus restrictif. Sa concentration dans les boues étudiées est de 142,2 mg/Kg MS ce qui représente 79% de la norme recommandée (Tableau 4). Les teneurs en plomb de TB3 et TB4 dépassent largement la valeur seuil préconisée par la norme NFU 44-051. Ces traitements ne peuvent donc être appliqués pour leur forte toxicité bien qu'ils aient donné les meilleures Infiltrabilités. Le traitement TB1 (6 t ha⁻¹) apporte 853,2 g/ha de plomb soit 31,6% de la valeur limite NFU44-051. Dans ce cas, le seuil toléré est de 19 T/ha de boue par épandage et par an, limitant sur 10 ans, 10 apports au maximum. Le traitement TB2 (10 t ha⁻¹), quant à lui, ne permettra que 6 épandages mais reste le traitement recommandé. Il améliore l'infiltrabilité du sol et s'oppose au ruissellement tout en respectant l'équilibre environnemental.

Tableau 4 : Teneurs moyennes en éléments métalliques des boues d'épuration utilisées comparativement aux normes NFU44-051 [41]

	Cadmium	Chromer	Cuivre	Nickel	Plomb	Zinc
Boues de Tlemcen	1,6	46,2	142,4	17,3	142,2	308,6
AFNOR NFU44-051	3	120	300	60	180	600
AFNOR NFU44-051	45	1800	3000	900	2700	9000
AFNOR NFU44-051	150	6000	10000	3000	9000	30000

CONCLUSION

Le présent travail a permis d'évaluer le comportement hydrodynamique des sols du bassin versant de l'Isser sous l'effet d'apport de boues d'épuration comme amendements organiques. La connaissance de la distribution spatiale de l'eau dans la couche superficielle du sol permet d'appréhender les zones contributives au ruissellement et à l'érosion. Par ailleurs, l'observation morphologique des états de surface du sol fournit des indicateurs de risques d'émission du ruissellement à l'échelle de la parcelle. Les sols marneux se caractérisent par une structure stable et une infiltration très variable dans le temps et dans l'espace.

Cette étude démontre que la valeur agronomique des boues étudiées consiste non seulement dans leur aptitude à fournir des éléments nutritifs aux plantes, mais aussi dans leur capacité à améliorer les propriétés physiques et microbiologiques du sol propices à l'infiltration des eaux de pluies et la croissance des plantes. Cependant, l'utilisation de ces boues ne peut se pérenniser sans la garantie de leur innocuité (teneur en micropolluants et en pathogènes). Ces résultats sont prometteurs et permettent d'établir des recommandations visant à encourager et à élargir l'emploi des boues dans le domaine agricole, pour améliorer les rendements des cultures et pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols de la région.

Remerciements

Nous remercions la population du village « Ain Nekrouf » qui nous a aidés et accompagnés sur le terrain. Notre sincère gratitude s'adresse aux propriétaires des terres qui nous ont permis d'installer des dispositifs expérimentaux dans leurs champs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **Souidi Z., Hamimed A., Donze F. (2014).** Cartographie du risque de dégradation des terres en région semi-aride : Cas des Monts de Beni Chougrane dans le Tell Occidental Algérien. *Geo Eco Trop*, 38 : 85-102.
- [2]. **Mazour M. (2004).** Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen. Thèse de doctorat : Université de Tlemcen (Algérie), 184 p.
- [3]. **Boughalem M., Mazour M., Grecu F., Abdellaoui A., Hamimed A. (2013).** Evaluation par analyse multicritères de la vulnérabilité des sols à l'érosion : cas du Bassin versant de l'Isser-Tlemcen-Algérie. *Analele Universității București, Geografie*, 12 : 5-26.
- [4]. **Benoudjit F. (2016).** Caractérisation et Valorisation des Boues Issues d'un Office d'Assainissement. Cas ONA Boumerdès (STEP Boumerdès. Thèse de doctorat : Université de Boumerdes (Algérie), 109p.
- [5]. **Dridi B., Toumi C. (1999).** Influence d'amendements organiques et d'apports de boues sur les propriétés d'un sol cultivé. *Étude et Gestion des Sols*, 1 : 7-14.
- [6]. **Igoud S. (2001).** Valorisation des Boues Résiduaire Issues des Stations d'Épuration Urbaines par leur Epandage dans les Plantations Forestières. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, 8 : 69-73.
- [7]. **Korboulewsky N., Masson G., Bonin G., Massiani C., Prone A. (2001).** Effets d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol d'un vignoble du Sud de la France. *Étude et Gestion des Sols*, 8 : 203-210.
- [8]. **Pernin C. (2003).** Épandage de boues d'épuration en milieu sylvo-pastoral. Étude des effets in situ et en mésocosmes sur la mésofaune du sol et la décomposition d'une litière de chêne liège (*Quercus suber L.*) Thèse de doctorat : Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille. 157p.
- [9]. **Amir S. (2005).** Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost Thèse de doctorat : Université de Toulouse (France), 312p.
- [10]. **Bipfubusa M., N'dayegamiye A., Antoun H. (2006).** Evaluation des effets des boues mixtes fraîches et de leurs composts sur les rendements des cultures et leur nutrition minérale. *Agrosols* ; 17 : 65-72.
- [11]. **Adler E. (2009).** Directive communautaire sur les boues d'épuration : quelles perspectives pour la filière biologique ? *Techniques Sciences et Méthodes*, 11 : 109-118.
- [12]. **Bahri H., Annabi M. (2011).** Effet des boues urbaines sur la mouillabilité et la stabilité structurale d'un sol cultivé. *Étude et Gestion des Sols*, 18 : 7-15.
- [13]. **Guerfi Z. (2012).** Impact de l'utilisation des boues résiduaire sur les propriétés physico-chimiques des sols de la haute vallée de la Medjerda, wilaya de Souk Ahras. Mémoire de magister : Université BADJI Mokhtar- Annaba (Algérie), 73p.
- [14]. **Mtshali J.M., Tiruneh A.T., Fadiran A.O. (2014).** Characterization of Sewage Sludge Generated from Wastewater Treatment Plants in Swaziland in Relation to Agricultural Uses. *Resources and Environment*, 4, 4 : 190-199.
- [15]. **Pradel M., Serre J., Mehier S., Benard L., Tessier C., Bapst S., Houot S. (2015).** Gestion des filières de traitement et de valorisation/élimination des boues par les collectivités. L'analyse du cycle de vie comme outil d'innovation : état des lieux et perspectives. *Techniques Sciences et Méthodes*, 6 : 38-51.
- [16]. **Armand R. (2009).** Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol, Mise au point d'un indicateur de ruissellement. Thèse de doctorat : Université de Strasbourg (France), 208 p.
- [17]. **Bannari A., Haboudane D. et Bonn F. (1999).** Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. 21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Université d'Ottawa, Canada, 21-24 juin 1999.
- [18]. **Roose É. (1994).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome : FAO, 438 p.
- [19]. **Roose É. (1996).** Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bull. Réseau Erosion*, 16 : 87- 97.
- [20]. **Sabir M., Merzouk A., Berkat O., Roose É. (1994).** Effet du pâturage sur l'état de surface, l'infiltrabilité et la détachabilité du sol dans un milieu pastoral aride (Arid, Haute Moulouya, Maroc). *Bull Réseau Erosion*, 14 : 444-462.
- [21]. **Boutmedjet A., Boukaya N., Houyou Z., Ouakid M.L., Biolders C. (2015).** Étude des effets de l'application de boues d'épuration urbaines sur un sol érodé cultivé dans la région de Laghouat. *Revue des Régions Arides*, 36 : 235-246.
- [22]. **Chouial M., Benamirouche S., Belbeldi O. (2017).** Performances et limites d'utilisation des boues des stations d'épuration pour l'élevage de plants forestiers en pépinière : Cas du pin maritime (*Pinus pinaster Ait.*) *Revue Agriculture*, 8, 1 : 55- 67.
- [23]. **Trad Raïs M., Khelil M.N., Marzougui N., Sabbahi S. (2016).** Impact de L'épandage Agricole des Boues Résiduaire Urbaines sur la Qualité Microbiologique de Trois Légumes ». *European Journal of Scientific Research*, 137 : 26-36.
- [24]. **Cherfouh R. (2019).** Impacts à long terme de boues résiduaire et d'eaux usées épurées urbaines sur les sols agricoles de Corso wilaya de Boumerdes : Paramètres agronomiques, concentrations et spéciations des éléments traces métalliques. Thèse de doctorat : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie), 207p.
- [25]. **Sahnoun A.Y. (2019).** Contribution à la valorisation des boues des stations d'épuration des eaux usées. Thèse de doctorat : Université Université Mohamed Boudiaf, Oran (Algérie), 209 p.

- [26]. **Lafforgue A. (1978)**. Détermination des variations de la capacité d'absorption d'un sol en place sous averses simulée. *Hydrological Sciences Journal*, 23, 3 : 355-372.
- [27]. **Audry P., Combeau A., Humbel F.X., Roose E., Vizier J.F. (1973)**. Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols : Paris : ORSTOM, 133 p.
- [28]. **Roose E., Blancaneaux Ph., Freitas P. (1993)**. Un test simple pour observer l'infiltration et la dynamique de l'eau dans les horizons du sol. *Cah. ORSTOM Pédol*, 28 : 413-419.
- [29]. **Levy E.B., Madden E.A. (1933)**. The point method for pasture analysis. *New Zealand Journal of Agriculture*. 46 : 267-279.
- [30]. **Poss R., Pleuvret C., Saragon H. (1989-1990)**. Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridional). *Cah. ORSTOM, Pédol*, 24, 4 : 405-418.
- [31]. **Morsli B. (1997)**. Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne ; cas des monts de Béni-Chougrane- Mascara. Mémoire de magister : Institut National d'Agronomie, Alger (Algérie). 165p.
- [32]. **Boughalem M., Abdellaoui A., Moussa K. (2014)**. Variabilité spatiale de l'infiltrabilité sur les versants marneux de l'Isser-Tlemcen (Algérie). *Revista de Geomorfologie*, 16: 71-77.
- [33]. **Horner G.M. (1960)**. Effet of cropping systems on runoff, erosion and wheat yields. *Agronomy Journal*, 52 : 342-344.
- [34]. **Le Bissonnais Y., Thorette J. Et Daroussin J. (2002)**. L'érosion hydrique des sols en France : INRA : IFEN, 106 p.
- [35]. **Morsli M., Habi M., Meddi M. (2013)**. Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne : facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. *Revue des sciences de l'eau*, 26, 2 : 89-105.
- [36]. **Habi M., Morsli B. et Meddi M. (2009)**. Contribution à la connaissance du comportement hydrodynamique des sols argileux par l'utilisation de la simulation de pluies. *Colloque International Sols Non Saturés et Environnement, UNSA Tlemcen, Tlemcen, 27- 28 Octobre 2009*.
- [37]. **Ati S. (2011)**. Etude de l'effet des boues résiduaires sur sol cultivé : Dynamique du phosphore et son utilisation en zone semi-aride. Thèse de Magister : Université Elhadj Lakhdar, Batna (Algérie), 146 p.
- [38]. **Bourrioug M. (2013)**. Évaluation des impacts environnementaux de l'apport des boues urbaines liquides sur les plants de Mélèzes cultivés sur un sol acide : Bénéfices et risques. Thèse de doctorat : Université de Franche-Comté, Besançon (France), 254p.
- [39]. **Desachy C. (1999)**. L'histoire et l'évolution de la réglementation de l'incinération des déchets. *Techniques Sciences et Méthodes*, 4 : 62-70.
- [40]. **Bourdat-Deschamps M., Ferhi S., Bernet N., Feder F., Crouzet O., Patureau D., Montenach D., Moussard G., Mercier V., Benoit P., Houot S. (2017)**. Fate and impacts of pharmaceuticals and personal care products after repeated applications of organic waste products in long-term field experiments». *Sci Total Environ*, 607-608 : 271-280.
- [41]. **AFNOR. (2006)**. Association Française de Normalisation, (AFNOR NFU44-051). Limites des teneurs en ETM, CTO, agents pathogènes, inertes et impuretés.