
Contribution à la connaissance du comportement hydrodynamique des sols argileux par l'utilisation de la simulation de pluies

Mohammed Habi* — **Boutkhil Morsli**** — **Mohamed Meddi*****

* *Maître de conférences, Université de Tlemcen – B.P. 230 Tlemcen, Algérie, moha.habi@gmx.de*

** *Chargé de Recherche, INRF, BP. 88 Mansourah Tlemcen 13000, Algérie, morbinrf@yahoo.*

*** *Laboratoire de recherche eau, roche et plante Centre universitaire de Khemis Miliana 44225 Khemis Miliana Algérie, mmeddi@yahoo.fr*

RESUME: L'alternance sécheresse - réhydratation des sols entraîne un comportement hydrodynamique particulier des sols argileux et par conséquent des risques de mouvement en masse et d'érosion. Cette étude rentre dans ce cadre et a permis de contribuer à la compréhension de cette dynamique (évolution de l'infiltration, du ruissellement et du phénomène de retrait) par l'utilisation de la simulation de pluie, outil permettant de reproduire sur le terrain les conditions correspondant à une pluie naturelle. Les résultats obtenus ont bien montré l'influence de l'humidité préalable du sol, de l'intensité de la pluie et l'état de surface sur le comportement hydrodynamique. L'écoulement de l'eau dans le sol argileux est de deux types : un écoulement lent (écoulement au niveau de la microporosité du sol) qui se réalise lorsque le sol est humide et fermé (non fissuré) et un écoulement rapide par l'intermédiaire de la macroporosité (écoulement privilégié et hypodermique).

ABSTRACT: Alternating drought - soil rehydration results in a particular hydrodynamic behaviour of clay soils and therefore the risk of mass movement and erosion. This study falls within this framework and helped contribute to the understanding of the dynamics (changes in infiltration, runoff and the phenomenon of withdrawal) by the use of simulated rain, a tool to reproduce on the ground conditions corresponding to a natural rain. The results have shown the influence of prior soil moisture, intensity of rainfall and surface condition on the hydrodynamic behaviour. The flow of water in the clay soil is of two types: a low flow (discharge from the microporosity of the soil) that occurs when the soil is wet and closed (not cracked) and a rapid flow by the through the macroporosity (preferential flow and interflow).

MOTS-CLES: Algérie, simulation de pluies, pluie d'imbibition, infiltration, intensité de pluies, humidité du sol

KEYWORDS: Algeria, rain simulation, rainfall imbibitions, infiltration, intensity of rainfall, soil moisture

1. Introduction

Les sols argileux occupent des surfaces importantes en Algérie et constituent de grandes potentialités mais aussi des risques tel que l'érosion, les mouvements en masse, l'instabilité du bâtiment, etc.

Dans les zones étudiées, celles de Mascara et de Tlemcen, ces sols de types gonflants occupent des surfaces importantes en plaines et en montagne et sont largement utilisés par l'agriculture, le génie civil et dans de nombreuses applications en géotechniques. Leurs propriétés et leur comportement hydrodynamique peuvent être néfastes ou favorables sur plusieurs plans. L'alternance sécheresse-réhydratation entraîne localement des mouvements de terrain pouvant aller jusqu'à provoquer des glissements de terrain, de l'érosion, des fissurations du bâti, etc.

Il paraît donc important d'avoir une meilleure compréhension du comportement hydrodynamique des sols argileux afin de mieux maîtriser leur utilisation et de prévoir les risques. Ce travail s'inscrit dans ce cadre. Il a pour objectif l'étude du comportement hydrodynamique des sols argileux gonflants non saturés.

2. Méthodologie

Nous avons jugé utile, dans un premier temps, de caractériser les propriétés structurales des sols argileux formés sur marne. Cette première étude, qui nous paraît nécessaire, est consacrée à la dynamique structurale des sols argileux à l'échelle de l'année. Le suivi de l'évolution structurale a été effectué pendant la période allant du 15 Mars à la fin Août, de façon à couvrir toute la gamme d'humidité in situ. La fréquence des observations et des prélèvements varie de 15 à 30 jours et quelquefois moins de 15 jours. Les observations ont été effectuées entre la quasi-saturation du sol (fin Mars) et le dessèchement maximum (fin Août). Des tests du suivi de la vitesse d'infiltration ont été déjà réalisés sur quatre époques en automne, en hiver, en printemps et en été. Le choix de ces dates a été fait surtout sur la base de la répartition de la pluie au cours de l'année. Les tests ont été accompagnés chaque fois par la mesure de la densité apparente, de l'humidité et de l'observation de l'allure de la frange infiltrée.

Pour l'étude du comportement hydrodynamique de ces sols argileux formés sur marne, nous avons adopté la méthode de la simulation de pluie. Cette méthode permet d'obtenir sur le terrain, de façon expérimentale dans un temps relativement court, de nombreuses données mesurées sur le comportement de l'eau en surface et dans le sol sous des averses artificielles réalisées et contrôlées par le simulateur de pluie de type ORSTOM (Figure 1). Les variables explicatives qui ont été retenues pour l'appréciation du comportement hydrodynamique sont :

- la pluie d'imbibition (P_i). Elle correspond à la phase d'humectation du sol, durant laquelle le volume d'infiltration est supérieur à la pluie tombée et où aucun ruissellement n'est observé. Elle permet de déterminer les seuils de pluies

nécessaires pour déclencher le ruissellement et d'apprécier la réaction du sol durant l'averse.

- le ruissellement (R).
- l'intensité minimale d'infiltration (F_n). Elle correspond à la différence entre le volume de ruissellement et le volume d'eau de la pluie tombée en un temps donné (t_u) et elle correspond au coefficient de ruissellement maximal.
- et les charges solides exportées en suspension dans l'eau (érosion due au détachement des agrégats).

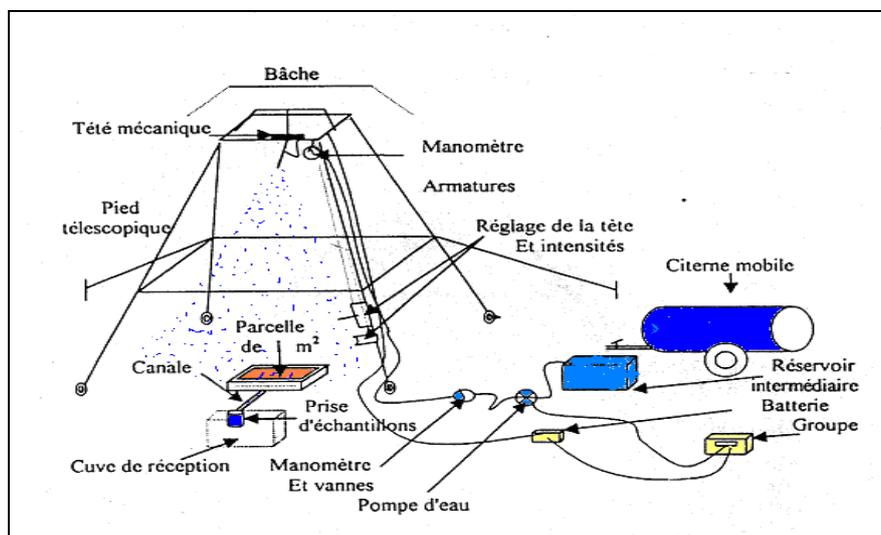


Figure 1. Le simulateur de pluie utilisé et ses accessoires (modèle ORSTOM)

3. Résultats et discussion

La majorité des sols argileux sont a priori sujets au phénomène de retrait gonflement mais l'ampleur des variations de volume induit est fortement variable selon la composition minéralogique de leur phase argileuse. Les sols argileux étudiés, formés sur marne, se caractérisent par une richesse en argile qui dépasse les 50%. Les résultats de la Diffraction des Rayons X réalisés au laboratoire de l'ORSTOM de Paris ont montré que la composition minéralogique des argiles est de type 2:1 (smectites). Les sols présentent un horizon d'altération important. Cet horizon est le résultat de l'interaction d'agents d'altération météorique (gel, dégel, humectation, dessiccation). Ce manteau d'altérites se caractérise par une structuration progressive qui s'accompagne d'une augmentation de la porosité. Cela va faciliter l'infiltration des eaux pluviales par un écoulement préférentiel et hypodermique.

3.1. Suivi de la dynamique structurale

La dynamique hydrique des sols argileux est très particulière. L'infiltration est très liée à l'état hydrique et structural du sol. Le suivi du fonctionnement structural en parallèle au suivi de l'infiltration a permis d'expliquer cette dynamique particulière.

Au printemps le sol est humide et tout en s'approchant de la fin de la saison, il commence à se dessécher. Les premières fissures apparaissent et continuent à prendre de l'ampleur au fil de l'arrivée de la saison sèche (Figure 2). L'infiltration est relativement élevée (298 à 126 mm/h).

Au début de l'été, le dessèchement du sol provoque une réorganisation de ses constituants. Il en résulte un retrait se manifestant par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition des fissures. La fissuration du sol s'effectue en deux étapes : le dessèchement provoque d'abord une fragmentation du sol, créant un réseau de fissures fines, puis il provoque une prise en masse, créant un réseau lâche de fissures larges. La fissuration des sols argileux semble s'effectuer en deux phases : La fragmentation et la prise en masse (Hallaire, 1988 ; Ferroukh, 1994).

Les premières fissures sont décelables à l'observation en dessous d'une humidité d'environ 27% (Figure 2). Le dessèchement provoque l'apparition d'un réseau serré de fissures fines, puis le retrait continue avec le temps et on observe l'élargissement de certaines fissures aux dépens d'autres. Des fissures fines peuvent aussi se former aux seins des blocs pris en masse tandis que les fissures résiduelles sont de plus en plus espacées. Il en résulte un réseau plus lâche de fissures larges et profondes. Le retrait atteint son maximum aux environs d'une humidité pondérale de 14%. Les fissures restent ouvertes jusqu'à l'automne (début de la saison des pluies). Par l'évaporation intense, il se produit un retrait qui se traduit horizontalement par l'ouverture de fissures de retrait qui dépasse les 5cm. Les mouvements verticaux du sol depuis le début du suivi ont dépassé les 5cm au niveau des couches les plus superficielles. En profondeur, ils perdent de l'importance (2cm à plus de 1m).

En été, lorsque le sol est sec et fissuré, l'infiltration est très élevée (526 à 1153mm/h) et peut atteindre des valeurs plus basses (66mm/h) sur les blocs pris en masse. Lors des orages d'été, toutes les eaux s'écoulent et se dirigent vers les fissures (écoulement préférentiel) et peuvent provoquer de l'érosion interne et des mouvements de sol surtout au niveau des exutoires naturels.

Dans l'essai d'automne, l'humidification du sol par les pluies d'automne a provoqué un gonflement qui a fait disparaître progressivement les fissures (les traces reste encore visibles), l'infiltration est relativement faible (360 à 98 mm/h).

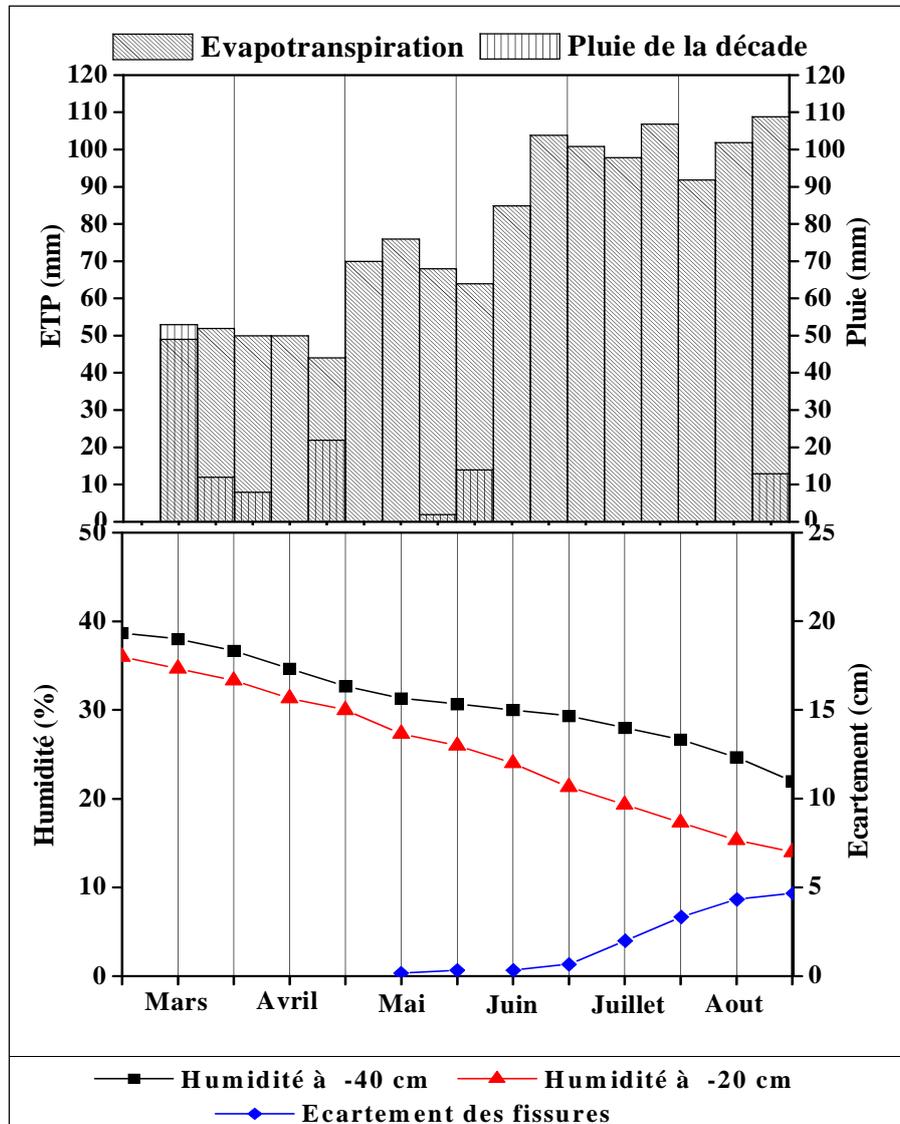


Figure 2. Suivi en continu de l'humidité et des déplacements du sol sur site -ETP : évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite (station météo. Mascara)-.

En hiver, l'infiltration devient encore plus faible (140 à 9 mm/h), le sol étant très humide, totalement fermé et presque imperméable. Les valeurs de l'infiltration ont baissé de 11 à 60 fois par rapport à celles obtenues en été. Les traces de ruissellement sont très visibles sur le terrain.

La figure 2, montre que les diminutions des teneurs en eau se produisent après le manque d'épisodes pluviométriques bien marqués, ce qui traduit la propagation rapide des fissures au niveau des sols. Ces observations illustrent la bonne corrélation entre les précipitations sur le site et les mouvements du sol.

Le climat des zones étudiées est de type méditerranéen semi-aride. La répartition annuelle des précipitations est marquée par deux périodes distinctes, humide et sèche, cette dernière peut être affectée d'orages violents. On enregistre des écarts très sensibles entre les mois secs et les mois humides. La différence entre précipitations et évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la pluie efficace, théoriquement disponible pour réhumidifier les sols. Les pluies sont plus efficaces en hiver. Durant la période de mesure (Figure 2), l'ETP est très nettement supérieure aux précipitations, avec un écart maximal en été. Les sols argileux en été se dessèchent et durcissent en surface. L'amplitude des mouvements du sol observés est cependant très variable selon l'état de dessiccation du sol : pour des précipitations de hauteur importante (saturante), on obtient un fort gonflement sur un sol très sec en phase de réhumidification hivernale, alors que le gonflement est à peine perceptible pour un sol sec en phase de retrait estival.

L'état actuel des connaissances indique clairement que les principaux facteurs de déclenchement des mouvements du sol sont les conditions hydro-climatiques. Afin de mieux comprendre ces mécanismes de déclenchement, il apparaît que les observations in-situ sont indispensables.

3.2. Suivi du comportement hydrodynamique

Pour les différentes expériences que nous avons réalisées, le temps de la phase d'imbibition varie entre 6 à 70 minutes (8 à 35 mm de pluie) pour les sols secs ; 1 à 3 minutes (1.6 à 2.6 mm de pluie) pour les sols humides et d'une minute (0.5 à 1.3 mm de pluie) pour les sols très humides (Figure 3). Une infiltration préférentielle attribuable à des macro-pores semble se produire au début de l'infiltration dans la plupart des cas. A ce stade, le sol absorbe rapidement l'eau et à mesure que l'eau s'infiltré le mouvement d'eau diminue et devient de plus en plus lent.

La pluie d'imbibition varie selon l'état de surface (fissuration, encroûtement) et de l'humidité précédente qui paraît déterminante si on compare les trois états étudiés dans notre expérimentation. Les pluies d'imbibition sont élevées pour les sols secs, le retard d'apparition du ruissellement et son importance est d'autant plus considérable que la rugosité et la porosité sont importantes. Au cours de cette phase, l'impact des gouttes de pluie (l'effet splash) attaque les agrégats terreux et les mottes provoquant une diminution de la rugosité et un départ des particules fines qui

colmatent les pores réduisant ainsi l'infiltration. Pendant cette phase, l'infiltration est supérieure à l'apport de pluie et au fur et à mesure de la simulation de pluie nous constatons la formation des flaques d'eau retenues par les dépressions qu'on appelle détention mobilisable (D_m) des micros reliefs qui finiront par se rejoindre les unes aux autres au moment du déclenchement du ruissellement.

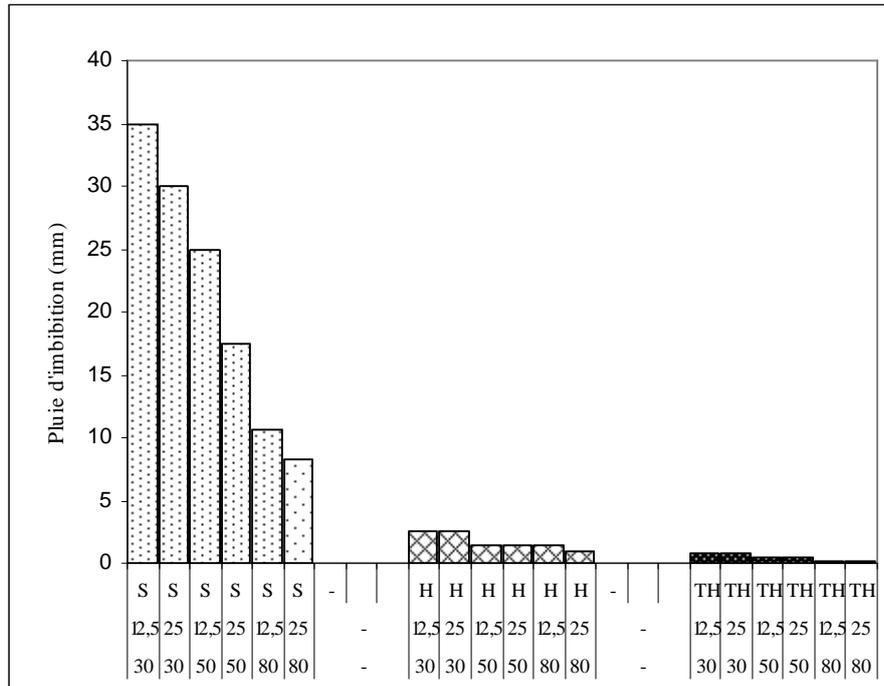


Figure 3. Pluie d'imbibition pour différentes situations

L'état de l'humidité initial du sol influence directement la durée de la pluie d'imbibition. Le sol sec est caractérisé par un état motteux et un réseau dense de fissures profondes. Les premières gouttes d'eau ont donc peu de chance de donner un ruissellement, puisque le réseau de fissures permet de véhiculer l'eau rapidement en profondeur, mais aussi en lessivage oblique, le long de la pente, ce qui permet une exportation interne de matériaux, tant que les fissures sont ouvertes. Les phénomènes de suffosion peuvent ainsi s'expliquer.

L'humidité préalable du sol et l'intensité de la pluie sont inversement proportionnelles à la durée de la phase d'imbibition. Lorsqu'on passe de 30 à 80 mm/h d'intensité de pluie, la valeur de la durée de la phase d'imbibition diminue de 88% pour les sols secs, de 34 à 50% pour les sols humides et de 25 à 50% pour les sols très humides. Les pluies de forte intensité permettent une certaine infiltration et un risque de mouvement réduit, par contre avec des pluies d'intensités faibles,

l'infiltration est très élevée et les risques de mouvement du sol deviennent plus grands. Cela est dû principalement au volume d'eau recueilli à la surface du sol en un temps donné qui dépasse quelques fois la capacité d'absorption du sol et à l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qui tout en augmentant, elle détruit de plus en plus rapidement la structure du sol et par conséquent la pluie d'imbibition diminue. L'énergie libérée par la pluie a un impact majeur sur la dégradation des états de surface et sur le bilan infiltration- ruissellement.

L'effet de la pente sur cette phase n'est pas négligeable. Pour une pente très forte, le déclenchement du ruissellement est plus rapide, ne laissant pas le temps à l'imbibition du sol. Par contre, pour une pente plus faible, le déclenchement du ruissellement est retardé laissant place à une imbibition prolongée des particules du sol. Donc, lorsque la pente augmente, la durée de la phase d'imbibition diminue et on aura moins d'eau infiltrée. Ces observations sont confirmées par les travaux réalisés sur des parcelles d'érosion de 100 m² de type Wischmeir. D'après ces résultats, le ruissellement sur ces parcelles démarre après 20 mm de pluie et plus si le sol est sec et après 3 mm si le sol est compact ou humide. Ces seuils de hauteur limite dépendent surtout de l'humidité préalable et de l'état de la surface du sol (déficit de saturation des premiers centimètres du sol, fissures de dessiccation) (Morsli *et al.*, 2004).

3.3. Infiltration

Lors de la simulation de pluie, on constate que l'infiltration décroît au cours du temps au fur et à mesure que le front d'infiltration pénètre à l'intérieur du sol et que la structure du sol se dégrade.

L'infiltration finale varie en fonction des trois paramètres : l'état de surface (humidité préalable et état structurale), l'intensité de la pluie et la pente. Elle varie de 17,4 à 5,2 mm/h pour les sols secs et de 10 à 1,2 mm/h pour les sols très humides. Si on passe d'un sol sec motteux à un sol humide et moyennement dégradé ou d'un sol humide à un sol très humide, la valeur de l'infiltration finale diminue respectivement de 35 à 50% et de 23 à 45%.

Le passage d'une intensité de pluie de 30 à 50 mm/h engendre une diminution de la valeur de l'infiltration finale de 35 à 46% et lorsqu'on passe de 50 à 80 mm/h, elle diminue de 44 à 63%. Lafforgue (1977), a montré que l'infiltration du sol augmente si l'intensité des pluies augmente dans le cas d'une surface rugueuse du sol. Par contre, si le sol constitue un plan homogène finement poudreux, l'augmentation de l'intensité de la pluie ne joue pas sur l'infiltration.

L'influence de la pente n'est pas négligeable sur l'infiltration finale, lorsqu'on passe d'une pente de 12.5 à 25%, elle diminue de 20 à 26%. L'infiltration finale est inversement proportionnelle à l'intensité de la pluie, à l'état de surface et à la pente.

L'état d'un sol sec se traduit par un réseau très serré de fissures et d'une complète désagrégation en fines particules de l'horizon de surface. Les petites

particules désagrégées qui se détachent facilement sont immédiatement emportées par les eaux de ruissellement. Par contre, à l'état humide les pluies précédentes ont déjà attaqué les agrégats terreux, provoquant une diminution de la rugosité, un colmatage des pores et une formation d'une croûte superficielle qui réduit relativement l'ablation du sol tout en engendrant le ruissellement.

Concernant le ruissellement et l'érosion, nos résultats obtenus sous pluies simulées rejoignent ceux de Morsli *et al.* (Morsli *et al.*, 2004), de Mazour (Mazour, 2004) et de Arabi *et al.* (Arabi et Roose, 1992) obtenus sous l'effet de pluies naturelles. Pour le suivi de l'infiltration le long des saisons, nous avons aussi constaté que nos résultats concordent avec ceux obtenus par Morsli (Morsli, 1996).

A partir de cette analyse, on peut dire que l'écoulement de l'eau dans les sols argileux est de deux types :

- Un écoulement lent dans le sol (écoulement au niveau de la microporosité du sol), se réalise lorsque le sol est humide et fermé (non fissuré). Il est possible de décrire cet écoulement de manière satisfaisante à l'aide de la théorie classique des écoulements.

- Un écoulement rapide par l'intermédiaire des fissures de diamètre important. C'est un écoulement privilégié et hypodermique (écoulement préférentiel) à travers la macroporosité. L'écoulement préférentiel est mis en évidence par le suivi de l'état structural du sol (observation in situ) et de l'infiltration. Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique se transforment progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours des grandes averses.

4. Conclusion

Les différentes approches utilisées pour tenter de répondre à notre recherche aux questions se sont révélées relativement convergentes. Elles reflètent bien le comportement hydrodynamique très particulier des sols argileux.

Les sols argileux étudiés formés sur marne, se caractérisent par une richesse en argile qui dépasse les 50%. La composition minéralogique a montré que l'argile est de type 2:1 (smectites). Les sols, présentent un horizon d'altération important. Cet horizon est le résultat de l'interaction d'agents d'altération météorique. Ce manteau d'altérés se caractérise par une structuration progressive qui s'accompagne d'une augmentation de la porosité. Cela va faciliter l'infiltration des eaux pluviales par un écoulement préférentiel et hypodermique.

L'état actuel des connaissances indique clairement que les principaux facteurs de déclenchement des mouvements du sol sont les conditions hydro - climatiques. La diminution des teneurs en eau se produit après le manque d'épisodes pluviométriques bien marqués, ce qui se traduit par la propagation rapide des fissures au niveau du sol. L'amplitude des mouvements du sol observés est très

variable selon l'état de dessiccation du sol qui est très liée à la variation des précipitations à l'échelle de l'année.

Les résultats obtenus par la simulation de pluie ont bien montré l'influence de l'humidité préalable du sol, de l'intensité de la pluie et l'état de surface sur le comportement hydrodynamique. L'infiltration varie de 6 à 13,5 mm de pluie pour les sols secs, de 0,3 à 1 mm de pluie pour les sols humides et de 0,12 à 0,15 mm de pluie pour les sols très humides. A partir de cette analyse, on peut dire que l'écoulement de l'eau dans le sol argileux est de deux types : un écoulement lent dans le sol (écoulement au niveau de la microporosité du sol). Cet écoulement se réalise lorsque le sol est humide et fermé (non fissuré) et un écoulement rapide par l'intermédiaire des fissures, écoulement privilégié et hypodermique (écoulement préférentiel) à travers la macroporosité.

Cette étude a permis de contribuer à la compréhension du comportement hydrodynamique des sols argileux des deux zones étudiées et en particulier sur l'évolution de l'infiltration et du phénomène retrait (périodes sèches) - gonflement (période humide) à l'échelle de l'année ainsi que sur la naissance du ruissellement.

5. Bibliographie

- Arabi M., Roose E., Water and soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains. In: 7th ISCO Conférence, 27-30 septembre 1992, Sydney, p. 341-347.
- Ferroukh H., Etude du comportement physique des vertisols de la Mitidja, Thèse de magister, INA El Harrach Alger, 1994.
- Hallaire, V., « La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. Description in situ », *Agronomie*, vol.8, n^o2, 1988, p. 139-145.
- Lafforge A., « Inventaire et examen des processus élémentaires du ruissellement et d'infiltration sur parcelles », ORSTOM, 1977, p. 299-344.
- Mazour M., Etude de facteurs de risque de ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser, Tlemcen, Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen 2004.
- Morsli B., Mazour M., Mededjel N., Hamoudi A., Roose E., « Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du Nord ouest de l'Algérie », *Sécheresse n°1*, vol. 15 (2), 2004, p. 96-104.
- Morsli B., Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne - Cas des monts de Beni-Chougrane. Thèse de Magister INA El Harrach Alger, 1996.