

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ZIANE ACHOUR -DJELFA-  
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE  
DEPARTEMENT D'AGRONOMIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme  
de  
**Magister**  
en  
**Agronomie**  
Option  
**Agropastoralisme et désertification**

Présenté par

**M. Mohamed ACHIR**

Intitulé

**Évaluation et modélisation de l'érosion hydrique ; étude comparative entre la région céréalière de Rahouia et la région steppique de Faïdja -Wilaya de TIARET-**

Soutenu publiquement le 23 Novembre 2009 à 14 :00 heure.

Devant les membres de jury :

<b>Président</b>	Dr. CHOUKRI A.	Pr.	Université de Djelfa.
<b>Examineur</b>	Dr. DELLAL A.	M.C.A	Université de Tiaret.
<b>Examineur</b>	Dr. MAATOUG M.	M.C.A	Université de Tiaret.
<b>Rapporteur</b>	Dr. AZOUZI B.	M.C.A	Université de Djelfa.

**Promotion 2006-2009**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# ملخص

( / 30 / 20 / 10)

( 5 1)

20

/ 30

/ 20

/

/ 20

## RÉSUMÉ

Le travail présenté s'intéresse à la quantification de l'érosion hydraulique sous pluies simulées sur différentes pentes de sols caractérisant deux environnements distincts afin d'évaluer les risques érosifs comparativement dans un milieu céréalier et dans un milieu steppique.

L'étude des différents facteurs provoquant l'érosion montre une forte influence de l'intensité pluvieuse graduelle et les paramètres de pente, à savoir l'inclinaison et la longueur, sur les variables de l'érosion mesurées sur les deux types de sol étudiés. Les résultats obtenus confirment que l'application de différentes intensités de pluie graduées (10 mm/h, 20 mm/h et 30mm/h) génère simultanément une augmentation de l'écoulement superficiel, des concentrations en sédiments et des pertes en sol dans les deux types de sol avec des valeurs élevées enregistrées dans le sol calcimagnésique que celles inscrites dans le vertisol. De ce fait, le sol calcimagnésique semble être plus sensible à l'érosion hydraulique que le vertisol sous les conditions expérimentales décrites dans le protocole adopté.

L'aboutissement aux résultats nous a mené à déduire que les sols calcimagnésiques sont plus sensibles à l'érosion hydraulique sous les conditions expérimentales adoptées dans cette étude que les vertisols qui semblent être plus résistants. L'intensité de pluies et l'inclinaison de la pente sont les facteurs déterminant de l'érosion tandis que la longueur de la pente (1m et 5m) n'influe pas significativement sur les paramètres mesurés dans la présente étude. L'évolution de l'écoulement superficiel est fonction de l'intensité pluvieuse appliquée et aux paramètres de pentes à savoir l'inclinaison et la longueur sur les deux types de sol choisis. En effet, l'augmentation graduelle de l'intensité pluvieuse engendre une augmentation de l'écoulement superficiel. Les pertes en sol sont plus importantes pour les intensités de pluies dépassant 20 mm/h et elles diminuent lorsque l'intensité pluvieuse atteint 30 mm/h. L'intensité de pluie de 20mm/h est considérée comme la plus fréquente et la plus dangereuse dans les zones semi-arides Algériennes. La concentration en sédiments s'accroît significativement lorsque l'intensité pluvieuse passe à 20 mm/h et elle diminue par la suite.

### **Mots clés**

Erosion hydraulique, Pluies simulées, Steppe, Environnement céréalier, Ecoulement, Modélisation.

## **ABSTRACT**

The present work focuses on quantifying water erosion under simulated rainfall on different slopes of soils characterizing two distinct environments in order to assess erosion risk comparatively between cereal environment and steppe environment.

The study of various factors causing erosion shows a strong influence of the rainfall intensity and the gradual slope parameters, specifically inclination and length, on the erosion measured variables in the two types of studied soils. The results confirm that the application of different intensities of gradual rainfall (10 mm / h, 20 mm / h and 30mm / h) simultaneously generates an increase in surface runoff, sediment concentrations and soil losses in the two types of soil with high values recorded in the calcareous-magnesian soil than those listed in the Vertisoil. Thus, the calcareous-magnesian soil appears to be more sensitive to water erosion than Vertisoils under the experimental conditions described in the adopted protocol.

The results led us to conclude that the calcareous-magnesian soils are more susceptible to water erosion under the experimental conditions adopted in this study as vertisoils which seem more resistant. The rainfall intensity and slope gradient are the determining factors of erosion while the slope length (1m and 5m) does not affect significantly the parameters measured in this study. The evolution of the surface runoff is a function of the applied rainfall intensities and slope parameters especially gradients and lengths on the two soil types selected. Indeed, the gradual increase in rainfall intensity causes an increase in the runoff. Soil losses are more important for the rainfall intensities exceeding 20 mm / h and it decrease when the intensity of rainfall reached 30 mm / h. The rain intensity of 20 mm / h is considered the most common and most dangerous in the semi-arid Algerian regions. The sediment concentration increases significantly when the rainfall intensity increases to 20 mm / h and decreases thereafter.

### **Keywords**

Hydraulic erosion, Simulated rainfall, Steppe, Cereal environment, Discharge, Modeling.

## AVANT PROPOS

Merci avant tout au bon Dieu ALLAH, le clément, le miséricordieux, le plus puissant... Un grand merci à Monsieur le Docteur AZOUZI blel pour m'avoir formé au métier de chercheur, ainsi pour avoir si bien rempli son rôle de rapporteur de mon mémoire. Merci de votre soutien primordial, votre disponibilité, votre aide et vos multiples astuces qui peuvent tellement simplifier le travail... Vos conseils m'ont permis d'évoluer dans ma vision de la recherche scientifique. Grâce à vous, cette expérience m'a appris beaucoup de choses, elle été unique, diversifiée et enrichissante tant d'un point de vue scientifique qu'humain.

De plus, je remercie Monsieur CHOUKRI A., Professeur à l'Université de Djelfa, d'avoir accepté de présider le jury de mon mémoire. Je suis très honoré que Messieurs, le Docteur DELLAL Abdelkader et le Docteur MAATOUG Mohmed, Maitres de conférences (A), aient accepté de faire partie de mon jury de mémoire et d'avoir consacré un peu de leur temps précieux pour juger mon travail et rédiger le rapport. Je tiens à vous exprimer mes sincères reconnaissances de m'avoir fait partager vos savoirs que vous savez si bien transmettre...

J'exprime mes profondes gratitudee à Messieurs BOULEFRAD M. et GOURARI M. de la conservation des forêts de Tiaret, de nous avoir bien accueilli et de nous avoir disposé les documents nécessaires afin de réaliser ce travail.

J'en profite aussi pour témoigner toutes mes reconnaissances au personnel de l'I.N.S.I.D de Chellala et de Matmar qui m'ont suivi et supporté chaleureusement pour faire les analyses pédologiques, particulièrement Monsieur le Directeur BENDAOUED Abdelhafidh.

Un remerciement spécial et très chaleureux s'adresse particulièrement à mon autre AKERMI Amar et les fidèles compagnons BAGHDI A., SALEM A., SOUANA K. et TAÏBI K. pour l'amitié, les encouragements et leur disponibilité à des moments clés de l'évolution de mon travail.

J'exprime mes gratifications à mes ami(e)s qui me sont chers ATTALLAH S., BENBIGAA M., BENELHADJ C., FERHAT C., GUENFOUD M., LAREDJ H., SALEM A., SASSI M., TAYBAOUI Z., et ZERDANI B.

Je tiens également à exprimer mes profondes reconnaissances à tous mes enseignants et enseignantes, qui m'ont aidé durant mes études. J'adresse un grand merci à toutes les personnes qui m'ont aidé, un jour ou l'autre, dans mon travail. Merci également à tous le personnel technique, les secrétaires et bibliothécaires, les chercheurs aux multiples discussions ; les laborantin(e)s...

Voici donc toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à améliorer par leurs critiques et leurs encouragements cette dissertation, et par conséquent, ont rendu possible la mise en musique de cette œuvre...

J'ai une pensée très affectueuse, sincère et profonde pour ma famille qui m'a toujours soutenue. Une gratitude plus forte à mes parents, qui m'ont toujours supporté, et ce tout au long de mes études, entre autres, sans eux rien n'aurait été possible.

...à la perle de ma vie, ma mère ; par la grâce d'Allah le plus puissant, sans toi *maman*, sans tes sacrifices, sans ton soutien moral et financier je n'arrivé jamais à ce que je suis...ton appui et ton amour sont irremplaçables...

Je souhaite dédier ce travail... à ma petite famille et plus particulièrement ma chère femme et mes enfants.

...à mes frères et sœurs, mes neveux et mes nièces, beaux frères...merci d'avoir épongé mes doutes, respecté mes silences, mes absences et pour vos perpétuels encouragements, malgré les situations qui n'étaient pas toujours faciles...

...à tous qui me sont chers...

*...et à ceux qui aiment la science...*

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1** – Importance du type d'érosion en fonction de l'aridité du climat.....
- Figure 2**- Processus générale de l'érosion hydraulique des sols .....
- Figure 3**- Situation géographique de la Wilaya de Tiaret.....
- Figure 4**- distribution des classes des sols de la wilaya de Tiaret .....
- Figure 5**- Localisation des sites expérimentaux.....
- Figure 6**- Schéma parcelles expérimentales conçues dans chaque site expérimental .....
- Figure 7**- Schéma du simulateur de pluies ORSTOM. ....
- Figure 8**- Schéma du dispositif expérimental. ....
- Figure 9**- Évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.
- Figure 10**- Évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.
- Figure 11**- Évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.
- Figure 12**- Évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.
- Figure 13**- Évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.
- Figure 14**- Évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.
- Figure 15**- Évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Figure 16**- Évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Figure 17**- Évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Figure 18**- Relation entre l'écoulement superficiel et l'intensité de pluie dans le sol calcimagnésique .....
- Figure 19**- Relation entre l'écoulement superficiel et l'intensité de pluie dans le vertisol.....



- Figure 20-** Relation entre la concentration en sédiments et l'intensité de pluie dans le sol calcimagnésique. ....
- Figure 21-** Relation entre la concentration en sédiments et l'intensité de pluie dans le vertisol. ....
- Figure 22-** Relation entre les pertes en sol et l'intensité de pluie dans le sol calcimagnésique. .
- Figure 23-** Relation entre les pertes en sol et l'intensité de pluie dans le vertisol. ....
- Figure 24-** Relation entre le taux d'écoulement superficiel et les pertes en sol dans le sol calcimagnésique. ....
- Figure 25-** Relation entre le taux d'écoulement superficiel et les pertes en sol dans le vertisol. ....
- Figure 26-** Analyse en composante principale pour l'ensemble des variables étudiées.....

## LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1-** Diversité des processus, des causes et des facteurs de l'érosion hydraulique.....
- Tableau 2-** Quelques modèles fonctionnant dans la région méditerranéenne .....
- Tableau 3-** Unités lithologiques de la wilaya de Tiaret. ....
- Tableau 3-** Unités lithologiques de la wilaya de Tiaret. ....
- Tableau 4-** Occupation des sols dans la wilaya de Tiaret.....
- Tableau 5-** Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés. ....
- Tableau 6-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de l'écoulement, la concentration en sédiments et les pertes en sol dans deux types de sols sous différentes intensités pluvieuses en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 7-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 8-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 9-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 10-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 11-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 12-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 13-** Analyse de la variance à P=5% de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....

- 
- Tableau 14**– Analyse de la variance à P=5% de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 15**– Analyse de la variance à P=5% de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 16**– Analyse de corrélation basée sur le coefficient de Pearson au seuil de sécurité 95% dans les vertisols. ....
- Tableau 17**– Analyse de corrélation basée sur le coefficient de Pearson au seuil de sécurité 95% dans le sol calcimagnésique.....
- Tableau 18**– Valeurs moyennes de l'évolution du taux d'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 19**– Valeurs moyennes de l'évolution du taux d'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 20**– Valeurs moyennes de l'évolution du taux d'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....
- Tableau 21**– Valeurs moyennes de l'évolution des concentrations en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 22**– Valeurs moyennes de l'évolution des concentrations en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 23**– Valeurs moyennes de l'évolution des concentrations en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....
- Tableau 24**– Valeurs moyennes de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente. ....

**Tableau 25**– Valeurs moyennes de l'évolution des pertes en sol ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....

**Tableau 26**– Valeurs moyennes de l'évolution des pertes en sol ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.....

## **SIGNIFICATION DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS**

%	: Pour cent
°C	: Degré Celsius
C.M	: Sol calcimagnésique
CO <sub>2</sub>	: Dioxyde de carbone
dll	: Degré de liberté
ETP	: Évapotranspiration potentielle
F	: test de Fisher
FAO	: Food and Agriculture Organization
Fig.	: Figure
g	: Gramme
ha <sup>-1</sup>	: Hectare
INA	: Institut national d'agronomie de France
INRA	: Institut national des recherches agronomiques de France
I.T.G.C	: Institut technique des grandes cultures
J	: Jour
Kg	: Kilogramme
l	: Litre
m <sup>2</sup>	: Mètre carré
m	: Mètre
Mg	: Magnésium
mg	: Milligramme
mm	: Millimètre
mn	: Minute
P	: Probabilité
USLE	: Universal Soil Loss Equation
r	: Coefficient de corrélation de Pearson
Tab.	: Tableau
V	: Volume
t	: Tonne

## Table des matières

- ملخص.....	
- Résumé.....	
- Abstract.....	
- Liste des figures.....	
- Liste des tableaux.....	
- Signification des symboles et des abréviations .....	
- Table des matières .....	
- Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I- Changement climatique et dégradation des sols .....	4
1-1- Causes naturelles.....	5
• Une érosion intense .....	5
• Une salinisation .....	5
• Une érosion éolienne.....	5
• Un réchauffement climatique .....	5
• Une dégradation physique des sols .....	6
1-2- Causes anthropiques .....	6
2- Définition de l'érosion hydrique .....	8
3- Mécanismes de l'érosion hydrique.....	9
• Désagrégation .....	9
• Ruissellement .....	10
• Transport et sédimentation .....	11
• Mécanismes de l'érosion hydrique.....	12
4- Les formes de l'érosion hydraulique.....	12
• l'érosion diffuse .....	12
• l'érosion en nappe .....	12
• l'érosion linéaire.....	12

• l'érosion en ravine .....	13
• l'érosion en rigole .....	13
• les griffes .....	13
• l'érosion par mouvement de masse.....	14
• les glissements de terrain.....	14
• les décollements.....	14
5- Les facteurs d'érosion.....	16
• Agressivité du climat.....	16
• Erodibilité des sols.....	16
• Occupation du sol .....	16
• Topographie .....	17
• La lithologie.....	17
6- Les Conséquences de l'érosion hydrique .....	18
6-1- Conséquences socio-économiques .....	18
6-2- Conséquences agro-environnementales.....	18
7- Quantification de l'érosion hydraulique.....	20
7-1- Modèles empiriques .....	20
a- L'équation de la perte en sol (USLE).....	20
b- L'équation de la perte de sol révisée (RUSLE) .....	20
7-2- Modélisation numérique .....	22
• Avantages des modèles .....	25
8- L'érosion hydrique dans le milieu steppique .....	26
9- Lutte contre l'érosion hydrique .....	27
10- Les moyens de lutte contre l'érosion hydrique.....	30
11- Les aménagements hydrauliques.....	33
12- Ecologie de la restauration des sols.....	37

## CHAPITRE II – PRESENTATION GENERALE DE LA WILAYA DE TIARET

1- Situation géographique .....	38
2- Caractéristiques physiques.....	39
• Géologie .....	39
• Hydrogéologie .....	40
• Types de sol.....	41
• Occupation du sol.....	42
• Climatologie .....	43
• Etages bioclimatiques .....	43
2- Aspect socio-économique .....	44

## CHAPITRE III –MATERIEL ET METHODE

1- Le Dispositif expérimental .....	45
• Choix des sites expérimentaux .....	45
• Conception des parcelles expérimentales .....	46
2- Caractéristiques physico-chimiques des sols .....	47
• Etude granulométrique .....	48
• Le pH .....	49
• La conductivité électrique.....	49
• Le calcaire total.....	49
3- Protocole expérimental .....	50
• Démarche expérimentale.....	50
• Le simulateur de pluie .....	50
• Intensités pluvieuses.....	53
• Récupération des eaux ruisselée et des sédiments.....	53
4- Analyse statistique.....	54



## CHAPITRE IV-RESULTATS

I -Caractéristiques physico-chimique des sols .....	55
II - Quantification de l'érosion hydrique .....	57
3-Evolution du taux d'écoulement superficiel en fonction de la pente .....	58
• Sous l'intensité pluvieuse de 10 mm/h .....	58
• Sous l'intensité pluvieuse de 20 mm/h .....	59
• Sous l'intensité pluvieuse de 30 mm/h .....	61
2-Evolution de la concentration en sédiments en fonction de la pente.....	62
• Sous l'intensité pluvieuse de 10 mm/h .....	62
• Sous l'intensité pluvieuse de 20 mm/h .....	63
• Sous l'intensité pluvieuse de 30 mm/h .....	65
3-Evolution des pertes en sol en fonction de la pente .....	67
• Sous l'intensité pluvieuse de 10 mm/h .....	67
• Sous l'intensité pluvieuse de 20 mm/h .....	68
• Sous l'intensité pluvieuse de 30 mm/h .....	69
4-Analyse de corrélation.....	71
III - La modélisation de l'érosion hydraulique .....	73
1- Evolution du taux d'écoulement superficiel en fonction de l'intensité des pluies ...	73
• Dans le sol calcimagnésique .....	73
• Dans le vertisol .....	74
2- Evolution de la concentration en sédiments en fonction de l'intensité des pluies...	74
• Dans le sol calcimagnésique .....	74
• Dans le vertisol.....	75
3- Evolution des pertes en sol en fonction de l'intensité des pluies.....	76
• Dans le sol calcimagnésique .....	76
• Dans le vertisol.....	76
4- Relation entre l'écoulement superficiel et les pertes en sol.....	77
• Dans le sol calcimagnésique .....	77
• Dans le vertisol.....	77
4- Analyse en composante principale.....	78

## CHAPITRE V – DISCUSSION

1- Discussion.....	80
Conclusion générale .....	84
Références bibliographiques .....	85
Annexes.....	103

# Introduction générale

## INTRODUCTION GENERALE

Les changements climatiques sont devenus plus contraignants bien que l'élévation des températures moyennes et le changement des régimes de précipitations provoquent des modifications du contexte écologique affectant gravement les écosystèmes (Dietz et *al.*, 2007) quoique l'abondance des événements extrêmes les accentuent davantage (Schulze et *al.*, 2005). Ces changements de l'écosystème, signalés dans les zones du bassin méditerranéen, constituent incontestablement un facteur limitant pour l'équilibre biologique des terres fertiles (Pugnaire et Valladares, 2007).

L'agriculture en Algérie est caractérisée par sa faible productivité, les faibles rendements des cultures sont souvent expliqués par les conditions météorologiques défavorables (Lionello et *al.*, 2006) et par la pauvreté naturelle des sols en matière organique et en éléments nutritifs (Djellouli et Nedjraoui, 1995 ; Bado, 2002). La forte croissance démographique a entraîné une forte pression sur les ressources en terres cultivables, cette dernière est accompagnée d'une augmentation du cheptel (Nedjraoui, 1999) notant que l'agriculture n'est pas systématiquement intégrée avec l'élevage mais il s'agit d'activités distinctes pratiquées par des acteurs différents (Djebaili, 1978; Le Houerou, 1995; Houmani, 1999). En effet, une concurrence pour l'eau douce s'établit entre les secteurs municipaux, industriels et agricoles dans plusieurs régions et la conséquence est une attribution diminuée pour l'agriculture (Tilman et *al.*, 2002). On s'attend à ce que ce phénomène se continue et s'intensifie dans les régions arides et dans les pays sous-développés qui souffrent des problèmes écologiques sérieux (Pugnaire et Valladares, 2007).

Les tendances actuelles à l'aridification pourraient détériorer les sols des régions sèches tandis que les tendances à l'humidification aboutissant aux inondations qui pourraient entraîner de graves érosions et dégradations des sols (Burger et Faure, 2005). La susceptibilité à l'érosion s'accroît sous ces conditions en entraînant une destruction progressive du sol (Khaldoun, 1995). Une spirale de dégradation est constituée, sans intervention, elle conduira à une désertification irréversible (Warner, 2004).

La zone soumise à la désertification se situe entre les isohyètes 400 mm et 100 mm avec une présence très importante en Algérie. Les principales causes sont liées au climat, au sol et à l'eau, auxquels s'ajoutent les systèmes et modes inappropriés d'utilisation des terres la dégradation touche aussi la couverture végétale constamment sollicitée pour la satisfaction des besoins croissants des populations en terre de culture, en bois et ressources fourragère pour le cheptel. La dégradation des sols par l'érosion hydrique constitue une menace permanente à la désertification dans le monde (Kinnell, 2000).

Il existe une érosion naturelle due aux spécificités du relief et du régime des pluies, qui contribue à l'enrichissement des terres et écosystèmes situés en aval. Mais l'érosion connaît actuellement une grave amplification dans de nombreuses régions du monde. Une cause importante en est la grande pauvreté rurale qui s'est aggravée avec les sécheresses récentes et répétées (Antipolis, 2003)

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone semi-aride, touchant particulièrement les pays d'Afrique du Nord dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol (Demmak et *al.*, 1991). C'est ainsi que sur les 467 millions d'hectares de terres affectées par l'érosion hydrique dans le monde, 119 M.h se trouvent en Afrique contre seulement 48 Mh en Europe (UNEP, 1993).

Le caractère très violent et irrégulier des précipitations (intensités élevées) entraînant une forte perte d'eau par ruissellement et une évapotranspiration élevée associé à une faible couverture végétale ; toutes ces caractéristiques font des zones semi arides et arides, des milieux très vulnérables à l'érosion hydrique (Warner, 2004).

C'est ainsi que l'érosion hydrique affecte toutes les zones géographiques à des degrés divers. En effet, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus importantes d'Afrique du Nord, dépassant les 2000 t/km<sup>2</sup>.an et concerne la plupart des bassins versants de l'Atlas tellien (Rhiou, ISly, Fodda, Mazagran, Isser, Soummam,...) (Meguenni et Remini, 2008) ; il atteint 4000 t/km<sup>2</sup>.an sur la chaîne des côtières Dahra et 5000 t/km<sup>2</sup>.an sur le bassin d'Ighi-Emda (Demmak, 1982).

Lutter contre la dégradation des sols implique d'intervenir sur l'ensemble des facteurs évoqués y compris les activités humaines négatives (Burger et Faure, 2005). Le développement durable des pays menacés par la désertification ne deviendra une réalité qu'à la suite d'une bonne compréhension des différents facteurs qui contribuent à la dégradation des terres. Or, l'érosion est le principal mécanisme direct de désertification au

niveau mondial (UNEP, 1999). C'est la forme la plus commune et la plus répandue de la dégradation des terres et on estime qu'elle affecte 84 % des sols dégradés (Steiner, 1996).

Les facteurs et les processus érosifs interagissent non linéairement dans l'espace et le temps, rendant complexe la formalisation des processus élémentaires de l'érosion (Warner, 2004). La quantification de l'érosion hydrique reste un problème crucial qui ne peut être résolu qu'à partir d'une meilleure connaissance du processus et de l'élaboration d'une carte d'isolignes d'érosion spécifique. En effet, même si des progrès notables ont été réalisés ces dernières années dans l'étude des phénomènes d'érosion, des difficultés subsistent, les plus significatives étant liées à l'appréhension de l'hétérogénéité spatiale des matériaux étudiés, et à la non linéarité de la réponse des processus de l'érosion aux forçages climatiques et anthropiques (Cerdan et *al.*, 2006)

L'objectif de la présente étude vise en premier lieu à évaluer les pertes causées par l'érosion hydrique à savoir le taux d'écoulement superficiel, les pertes en sol et les concentrations en sédiments sur deux types de sol les plus dominants dans la wilaya de Tiaret l'un appartenant à un écosystème steppique (calcimagnésique) et l'autre à un écosystème agricole (vertisol) sur de petites parcelles expérimentales qualifiées représentatives, de dimensions et de pentes variables, soumises aux intensités pluvieuses artificielles graduelles. Ceci est afin d'évaluer et de comparer les risques érosifs dans le milieu céréalier et dans le milieu steppique.

Les résultats dégagés de l'expérimentation sur terrain servent à créer des modèles numériques permettant de simuler les paramètres mesurés dans cette étude sur le terrain sous différents scénarios climatiques pour la quantification future de l'érosion hydrique.

Le manuscrit est présenté en cinq parties ; la première est une synthèse bibliographique traitant l'érosion hydrique dans toutes ses dimensions, la deuxième partie présente la zone d'étude, la partie suivante expose la méthodologie adoptée pour réaliser ce travail. La quatrième partie présente les résultats auxquels nous sommes parvenus tandis que la dernière partie interprète ces résultats.

# Synthèse bibliographique

## **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

L'Algérie avec une superficie de 2,4 millions de km<sup>2</sup> abrite de grands ensembles biogéographiques constitués par la zone tellienne caractérisée par un climat méditerranéen de type sub-humide sec, soumise au phénomène d'érosion, la zone steppique avec un climat aride et semi-aride confrontée à la désertification et enfin la zone saharienne qui occupe 80% du territoire sujette à un climat désertique (Skouri, 1984).

### **1- Changements climatiques et dégradation des sols**

Les changements climatiques se révèlent un événement d'importance de nos jours dont les causes semblent être reconnues. On perçoit des tendances en matière d'écoulement fluvial dont des augmentations et des diminutions du volume d'écoulement dans de nombreuses régions.

La dégradation des sols dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches due à divers facteurs, dont les variations du climat et l'activité humaine. Par ailleurs la dégradation des sols définit comme une diminution ou la disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement, tels que : l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau; la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économiques des sols; et la disparition à long terme de la végétation naturelle (Barrow, 1990).

Il est probable que l'ampleur et la fréquence des inondations augmenteront dans la plupart des régions et que les basses eaux diminueront dans de nombreuses régions. Les changements climatiques pourraient diminuer les ressources en eau dans certaines régions soumises à un stress hydrique, les augmenter dans d'autres. Il est peu probable que ces changements aient des effets majeurs sur la demande municipale et industrielle, mais ils pourraient affecter fortement les prélèvements pour l'irrigation.



La dégradation des sols et des ressources en eau est l'un des grands problèmes que devra surmonter l'agriculture mondiale suite aux changements climatiques. On a établi avec un degré élevé de confiance que la dégradation des sols s'intensifiera en raison des changements attendus dans les températures et les précipitations. L'écosystème perd son équilibre suite aux différents agresseurs naturels et anthropiques notamment ;

**a) Causes naturelles**

*1 - Une érosion hydrique intense*

En Afrique du Nord, l'une des conséquences de ces phénomènes d'érosion la plus spectaculaire réside dans le transport, vers l'aval, des alluvions qui, en s'accumulant dans les retenues des barrages réduisent leur capacité de régulation. La possibilité de stockage de 100 à 120 millions de m<sup>3</sup> d'eau dans les barrages est annuellement perdue soit une perte en possibilité d'irrigation de 10000 à 12000 ha/an (Warner, 2004) .

*2 - Une salinisation*

Algérie : une superficie de 300.000 ha (sur 1.400.000 ha étudiés) est concernée par la salinisation ou l'alcalinisation. Dans les seules wilaya de Saïda et de Biskra, il est estimé que 22.000 ha de terres irriguées et 5 millions d'hectares de terrains de parcours sont touchés par la salinisation qui y conjugue ses effets avec ceux de l'ensablement. En fait, ce phénomène est général à toutes les zones arides ou subdésertiques (Bennaceur et *al.*, 2001)

*3 - Une érosion éolienne*

En phase de rhexistase, dans les régions subsahariennes, l'ensablement, dû à l'érosion éolienne, constitue l'une des principales manifestations de la désertification. En effet, l'absence de couvert végétal permettant la rétention du sable, permet à celui-ci de voyager sur de longues distances (Warner, 2004).

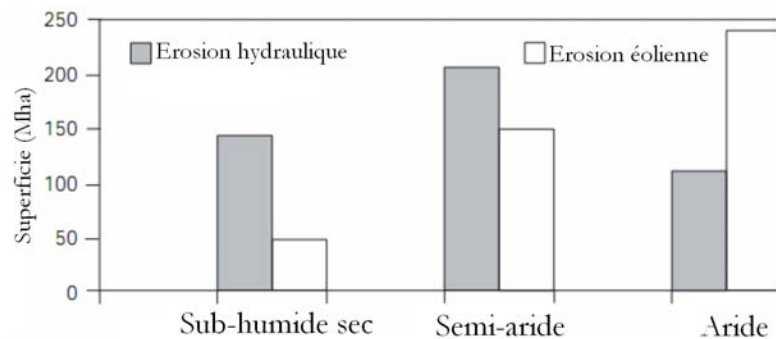
*4 - Un réchauffement climatique*

Les effets du réchauffement climatique ne peuvent qu'amplifier et accélérer le phénomène de désertification.

### 5 - Une dégradation physique des sols

La forme la plus commune et la plus répandue de la dégradation des sols est l'érosion. On estime qu'elle affecte 84 % des sols dégradés (Steiner, 1996). Cette érosion se manifeste par un transport des matériaux des couches superficielles du sol.

Ce transport peut-être d'origine hydrique ou éolienne. Bien que ce processus soit à l'origine de nombreux sols sur la planète, il devient néfaste lorsque, accéléré par l'intervention de l'homme, il entraîne une perte de matériaux, quantitative et qualitative, préjudiciable à la productivité des sols. L'importance relative de ces deux types d'érosion dépend de plusieurs facteurs (degré d'aridité, nature des sols) qui devront être pris en compte dans le raisonnement et la Conception des techniques de lutte.



**Figure 1-** Importance du type d'érosion en fonction de l'aridité du climat (Middleton et Thomas, 1997)

#### b) Causes anthropiques

Le rôle de l'homme dans le processus de dégradation des terres est plus ou moins mis en avant par rapport à des causes "naturelles" telles que les variations climatiques. Ainsi, les terres se dégradent lorsque l'utilisation qui en est faite par les hommes n'est pas compatible avec leurs caractéristiques. Si l'on compare, à l'échelle mondiale, l'évolution de la démographie à celle de la superficie des terres arables, il apparaît que la disponibilité en terres arables par tête a fortement diminué depuis les années 1950. Cette tendance devrait être de plus en plus marquée à l'avenir dans les pays en développement, où le taux de croissance de la population est le plus élevé (Skouri et *al.*, 2007).

Les processus de désertification sont favorisés par des pratiques culturelles inadaptées. En effet, certains types de cultures intensives et maraîchères contribuent considérablement à l'appauvrissement des sols et à l'accentuation des phénomènes de salinisation.

Le pastoralisme joue également un rôle dans la désertification .L'écosystème étant déjà considérablement fragilisé par le réchauffement climatique, les formes modernes d'élevage intensif ne sont pas du tout adaptés, en particulier sur l'approche alimentaire des animaux, compte tenu de leur nombre et de la capacité de renouvellement de la ressource végétale.

L'impact sur l'écosystème forestier. tant l'exploitation locale en bois d'énergie que celle liée à la construction ne fait pas l'objet de reboisement compensateur pourtant nécessaire au maintien du couvert végétal.

La pollution de l'eau résulte essentiellement des activités humaines, elle est importante et se compose pour sa majorité des eaux de rejet domestiques non traités.

## 2- Définition de l'érosion hydrique

Erosion vient de "eroderer", verbe latin qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre comme un chien qui s'acharne sur un os (Roose, 1994) ; il évoque l'usure de la surface sous l'action des éléments météorologiques de façon permanente ; ce phénomène débute dès que les roches émergent et se trouvent en contact avec l'atmosphère (Lal, 1990). Prise au sens strict, l'érosion désigne le mécanisme de détachement des matériaux de la surface de la terre. Selon Roose (1994) on peut distinguer l'érosion naturelle dite encore géologique ou lente et l'érosion accélérée ou anthropique induite par l'action humaine et dont la vitesse est 10 à 100 fois supérieure à la première. L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre (Le Bissonnais et *al.*, 2002).

L'érosion des sols est un processus en deux phases comprenant le détachement des particules du sol et leur transport par les agents d'érosion tels que l'eau et le vent. Quand l'énergie de transport des particules devient insuffisante, une troisième phase de dépôts se produit. L'érosion est un processus complexe, il concerne l'arrachement, le transfert et la sédimentation des particules par l'eau. Depuis l'origine de la terre, l'érosion façonne les reliefs et construit les plaines, lesquelles nourrissent la majorité des populations du monde (Roose et *al.*, 1998).

L'érosion hydrique est un phénomène naturel essentiel de l'évolution des paysages et de la modification du relief terrestre. Elle correspond à un déplacement de matière sous l'action de l'eau. Les flux de matières générées sont transférés sur la surface continentale et conduisent à l'arasement des zones montagneuses et à la formation de riches plaines alluviales (Leguedois, 2003)

L'érosion est définie comme étant l'arrachage et le transport par l'eau ou le vent des particules du sol. C'est un processus géologique naturel essentiel à la formation des sols et des paysages.

La perte en terre est définie comme la masse nette de sol perdu pendant une certaine période pour une surface donnée. Elle s'exprime en unité de masse par unité de surface (t/ha), et peut être calculée pour un événement pluvieux, ou comme valeur moyenne pour une période spécifiée (Cerdan, 2001).

### 3- Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol.

Plusieurs études ont été consacrées à l'identification des processus hydrologiques au niveau des bassins versants de toutes tailles et de tous genres. Ces études font ressortir que la plus part des cas ce sont les parties montagneuses des bassins versants qui sont les plus soumises aux dangers d'érosion et où les agriculteurs sont les plus pauvres et la pression de population est la plus forte à l'égard des ressources.

La première théorie importante concernant ce sujet est apparue au début du siècle dernier avec les travaux d'Hortan (1993) basée sur la notion de dépassement de la capacité d'infiltration des sols.

Le concept général est le suivant tant que la capacité d'infiltration du sol n'est pas dépassée la totalité de l'eau de pluie s'infiltrer ; mais dès que les intensités pluviométriques dépassent cette capacité, le surplus d'apport d'eau ruisselle en surface. Ce ruissellement de surface forme l'écoulement rapide de crue. La pluie et le ruisselle

ment superficiel sont à l'origine de l'arrachage, du transport et du dépôt de la terre enlevée. Ce type d'écoulement domine dans les bassins en climat semi-aride avec des sols peu filtrants et dépourvus de couvert végétal.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. (Ruissellement par saturation) (Le Bissonnais et *al.*, 2002). L'arrachage est due à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement et le transport est assuré par ces eaux.

#### 3-1- Désagrégation

Les sols subissent un martèlement considérable causé par les gouttes de pluie. Les premières gouttes s'infiltrer dans le sol d'autant plus aisément qu'il est meuble et que sa porosité est élevée. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement des particules et d'un tassement du sol. Lorsque la couche superficielle s'humidifie, trois processus se développent simultanément.

- La dégradation de la structure

- La formation d'une pellicule de battance
- L'érosion par splash

L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher des particules de leur surface.

Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes et nécessite une pluie d'une certaine énergie, variable selon les sols. Son influence augmente avec la teneur en eau, du fait d'une part, de la diminution de la résistance mécanique des agrégats et d'autre part, du changement de nature des chocs lié au ralentissement de l'infiltration (Cerdan, 2001). Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement (Gimenez et Govers, 2002).

### **3-2- Ruissellement**

L'écoulement d'une lame d'eau est un moteur essentiel de l'érosion. Il détache, transporte et exporte des fragments de sol (Luguedois, 2003). Le ruissellement se produit lorsque l'eau sur une pente ne peut pas s'infiltrer assez vite dans le sol ou être interceptée par des obstacles naturels. Le taux de ruissellement est souvent accru si l'infiltration est diminuée par la compaction, la formation d'une croûte ou le gel (Arnold et *al.*, 1989). En milieu semi-aride, le ruissellement de surface rapide qui a lieu pendant et juste après un événement pluvieux- contribue au débit de façon Majoritaire.

Le ruissellement de surface peut être dû à un dépassement de la capacité d'infiltration du sol (génération de ruissellement hortonien (Horton, 1933)). Les fortes intensités des événements, conjuguées à la faible capacité d'infiltration des sols (due à des sols souvent compactés et recouvert d'une croûte et une végétation peu abondante) expliquent la prépondérance du ruissellement hortonien dans les zones arides et semi arides (Chaponnière, 2005). Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement (Gimenez et Govers, 2002).

### 3-3- Transport et sédimentation

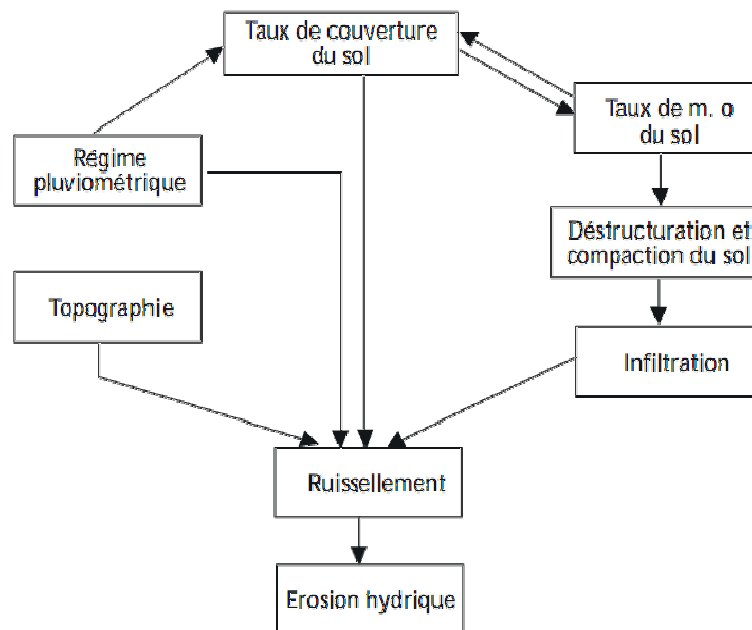
Les particules arrachées aux terres se déposent entre le lieu d'origine et les mers en fonction :

1. de leur dimension
2. de leur densité
3. de la capacité de transport du ruissellement ou de la rivière.

Les particules se déposent dans l'ordre suivant :

1. Sable fin
2. Limon

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation.



**Figure 2-** Processus général de l'érosion hydrique des sols (Skouri, 1984).

## **4- Les formes de l'érosion hydrique**

### **4-1- L'érosion diffuse**

Concerne l'ensemble de la parcelle de façon plus ou moins uniforme et se produit sur des terres planes sans relief marqué quand le ruissellement est modéré (Dautrebande et *al.*, 2006).

### **4-2- L'érosion en nappe**

L'Érosion hydrique en nappe désigne un phénomène d'enlèvement d'une mince couche de terre sur de grandes superficies. Cette forme d'érosion présente un danger car, sur une durée de plusieurs années, la quantité de terre enlevée peut être importante.

L'érosion en nappe est liée à deux mécanismes : Le détachement des particules de terre causé par le choc de gouttes des pluies (effet splash).Le ruissellement lorsque l'intensité devient supérieure à la vitesse d'infiltration. Cette forme d'érosion est caractéristique des sommets de bassin versant.Le martèlement des pluies (splash) détache les particules et les maintient en suspension par turbulence. L'érosion en nappe a un effet érosif maximal au sommet des versants ou à l'aval d'un obstacle. Au bas des versants, au contraire, il s'agit d'accumulation.

### **4-2- L'érosion linéaire**

Un micro filet ou une rigole est une dépression suffisamment petite pour pouvoir être supprimée par les façons culturales. Sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.

Dans les bassins versants on peut avoir plusieurs formes d'érosion du type linéaire .On parle de griffes lorsque que les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur .On parle de nappe ravinant lorsque les creux les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres et enfin de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) (Juillerat, 2004).



#### **4-3- L'érosion en ravine**

L'Érosion hydrique en ravin désigne un phénomène qui se produit sur des terrains meubles, dont la structure est fragile. L'eau se concentre et peut dégager plus de particules terreuses. La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. La rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion. Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables. L'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands" et explique également la sape d'ouvrages (ponts, radiers, digues filtrantes...). Lorsque l'aménagement des ravines n'est pas prolongé suffisamment en aval (Juillerat, 2004).

#### **4-4- L'érosion en rigole**

L'érosion hydrique en rigole désigne un phénomène qui se produit lorsque l'eau se concentre dans un creux de terrain. Sa force s'accroît et il se forme des filets et des rigoles dans lesquelles la terre est emmenée vers l'aval.

L'écoulement d'eau commence très vite à se concentrer dans les petites dépressions (par exemple, traces de pneus) et entraîne les particules de sol au fond des rigoles, parfois même au fond de la couche labourée. Les rigoles peuvent normalement être récupérées par le nivellement mais les dégâts sont considérables. Si l'érosion en rigoles se répète trop souvent, la couche supérieure d'un champ peut être déplacée en quelques années ou saisons (Juillerat, 2004).

#### **4-5- Les griffes**

Dans les bassins versants on peut avoir plusieurs formes d'érosion du type linéaire. On parle de griffes lorsque que les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur. On parle de nappe ravinant lorsque les creux les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres et enfin de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) (Juillerat, 2004).

#### **4-6- L'érosion par mouvement de masse**

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux mais on peut les regrouper en six groupes principaux :

##### **4-6-1- Glissement de terrain**

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique généralement sans décollement qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers. Dans les zones sylvopastorales ; la circulation des animaux le long des versants peut également entraîner la formation d'escaliers encadrés par les réseaux de fissures (Moeyersons, 1989).

##### **4-6-2- Les décollements**

Il s'agit d'un déplacement d'une couche plus ou moins épaisse du sol, sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée, servant de plan de glissement (Juillerat, 2004).

**Tableau 1-** Diversité des processus, des causes, des facteurs de l'érosion hydrique.

Les processus de dégradation et d'érosion et leurs formes	Les causes et les mécanismes	Les facteurs de résistance du milieu
<p>Dégradation par perte de structure. Forme particulière dans les terrains loessiques : formation de croûtes de battance</p>	<p>Nombreuses : Minéralisation des matières organiques, Compaction, etc.</p>	<p>◆ la résistance de la structure est fonction des teneurs en matière organique, en fer, en alumine, en argiles loculées, en cations adsorbés ; ◆ elle est aussi fonction du drainage de la nappe et de sa charge en ions ; ◆ la compaction est fonction du poids des outils utilisés, de la pression des pneus des tracteurs et de la fréquence des passages.</p>
<p>Erosion mécanique sèche Forme : « creeping » (rampement des particules de sol)</p>	<p>Gravité, et poussée exercée par les outils de travail du sol</p>	<p>◆ Elle est fonction de l'intensité du travail du sol (fréquence des travaux et type d'outils). ◆ Elle dépend de la pente et de la cohésion du terrain.</p>
<p>Erosion en nappe. Formes variées selon que l'on est dans la zone d'ablation ou de sédimentation.</p>	<p>Chocs des gouttes de pluie, et force tractrice exercée par le ruissellement diffus en nappe</p>	<p>◆ Le couvert végétal. ◆ La pente. ◆ La nature du sol. ◆ les techniques et structures antiérosives.</p>
<p>Erosion linéaire. Formes : griffes, rigoles, ravines</p>	<p>Le ruissellement concentré. Son énergie dépend du volume écoulé et du carré de sa vitesse</p>	<p>◆ La vitesse de l'érosion est fonction de la pente et de la rugosité. ◆ Le volume ruisselé est fonction de la surface de bassin versant et de la capacité d'infiltration. ◆ La résistance dépend du profil du sol et des racines qui en forment l'armature.</p>
<p>Erosion en masse Forme : creeping (rampement du sol), glissements ; coulées boueuses.</p>	<p>Gravité, déséquilibre des versants.</p>	<p>Facteurs aggravants : ◆ Le poids de la couverture sol + eau + végétaux ; ◆ l'humidification du plan de glissement ; ◆ la topographie : existence d'un pendage parallèle à la pente ; présence de niveaux imperméables ou de « couches savons ».</p>

(Roose, 1991)

## **5- Les facteurs d'érosion**

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992).

### **5-1- L'agressivité du climat**

La pluie reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (Leguedois, 2003).

D'après Henensal (1986) c'est l'énergie cinétique de la pluie qui contribue à l'arrachement des particules solides. Cette énergie est directement liée aux intensités de pluies.

C'est ainsi qu'en région méditerranéenne la variabilité des précipitations est très grande d'une année à l'autre. Les pluies, qui surviennent surtout en saison froide (plus de 90 % des précipitations annuelles se produisent entre les mois de septembre et de mars), peuvent être très violentes, et atteindre des intensités instantanées très fortes (100 millimètres à l'heure, et même plus). Elles provoquent alors un ruissellement considérable, qui peut entraîner deux formes d'érosion : l'érosion diffuse en nappes, et l'érosion concentrée, dans les ravines, les torrents ou les oueds (Antipolis, 2003).

### **5-2- Erodibilité des sols**

Les principales caractéristiques des sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont les suivantes: la profondeur, la pierrosité (Cerdan et *al.*, 2001), la granulométrie (Legudois, 2003), la teneur en matière organique (Roose et *al.*, 1993), la nature minéralogique des argiles (Le Bissonnais et *al.*, 1995), l'infiltrabilité (Papy et *al.*, 1995) et la cohésion (Mériaux, 1961).

La résistance à l'érosion hydrique est plus faible pour les sols superficiels que pour les sols profonds (Ryan, 1982).

### **5-3- Occupation du sol**

Le principe est simple ; plus un sol est couvert, plus ce couvert est dense et permanent et plus ce sol sera protégé du pouvoir érosif des gouttes de pluie et des flux de ruissellement (Dautrebande et *al.*, 2006).

L'érosion des sols est fortement contrôlée par la couverture végétale dont dépend la production de la biomasse (Boukheir et *al.*, 2001).

La classification du degré de protection suivant le de la couverture du sol, pourrait être réalisé à l'aide des images de télédétection à haute résolution (HR) (Batti et Depraetere, 2007).

#### **5-4- Topographie**

D'après Henensal (1986), l'érosion ne dépend pas uniquement de la déclivité de la pente mais aussi de la forme et la longueur de la pente.

Sur les pentes raides, l'eau de pluie ruisselle vite et cause de graves érosions. Dans les milieux semi-arides et arides, le gradient de la pente est corrélé positivement avec le recouvrement de la surface du sol par les fragments des roches qui agissent en diminuant le ruissellement et la perte en sols (Cerdan et *al.*, 2001).

Le ruissellement moyen et maximal diminue lorsque la pente augmente ce qui est démontré dans les travaux menés en Algérie par Roose et *al.* (1993) ainsi qu'au Maroc sur les vertisols par Heusch (1970). Ces auteurs indiquent que la position morphologique est parfois plus importante que la pente.

Concernant la convexité horizontale et la convexité verticale : le taux d'accroissement de l'érosion est relativement faible pour les pentes inférieures à 5 %, pour les pentes supérieures, la corrélation entre l'accroissement et la convexité est linéaire (Henensal, 1986).

#### **5-5- La lithologie**

Les différents types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et par les sols et en conséquence sur la quantité de sol susceptible d'être érodée (Demmak, 1982). Une faible infiltration des roches affleurantes indique qu'une grande quantité d'eau ruisselle, par conséquent, une forte quantité de terre peut être emportée. Les sols marneux lorsqu'ils sont secs, restent non érodibles mais, dès qu'ils atteignent une certaine humidité, leur sensibilité à la détectabilité et au ruissellement augmente (Boukheir et *al.*, 2001).

## 6- Les conséquences de l'érosion hydrique

Les conséquences de l'érosion hydrique sont nombreuses : pertes de terre arable, diminution des éléments nutritifs (N, P, K) et de la matière organique, champs ravinés, rendements moindres. Outre la dégradation agronomique, les impacts environnementaux de l'érosion hydrique peuvent être importants : eutrophisation, problèmes de turbidité, de sédimentation, de pesticides dans les hydrosystèmes ainsi que coulées de boue, inondations, voies de communication endommagées (Boiffin, 1984).

### 6-1- Conséquences socio-économiques

Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas à l'envasement des retenues. L'érosion contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface. Par ailleurs, les particules des cours d'eau entraînant un risque plus élevé d'inondation et, d'autre part, à augmenter la turbidité des eaux ce qui affecte alors les infrastructures en aval telles que les usines de traitement d'eau potable, les centrales hydroélectriques et les barrages. Ce dernier problème touche particulièrement les pays du Maghreb.

En Afrique du Nord, l'une des conséquences de ces phénomènes d'érosion la plus spectaculaire réside dans le transport, vers l'aval, des alluvions qui, en s'accumulant dans les retenues des barrages réduisent leur capacité de régulation. La possibilité de stockage de 100 à 120 millions de m<sup>3</sup> d'eau dans les barrages est annuellement perdue soit une perte en possibilité d'irrigation de 10000 à 12000 ha/an. La capacité de stockage perdue jusqu'à présent est estimée à 1000 millions de m<sup>3</sup> (Torre et *al.*, 2007).

En Algérie, une réduction de 20 % de la capacité initiale de stockage était liée à l'envasement des retenues depuis la construction des barrages. Du point de vue socio-économique outre les baisses croissantes de rendements les conséquences suivantes peuvent être citées. L'érosion hydrique provoque l'envasement des barrages, les retenues d'eau, les rivières, les canaux et système de drainage par la terre érodée des sols dégradés et la réduction des stocks de poissons à la suite de tels effets ainsi que des inondations dues aux eaux de ruissellement par suite de la réduction de la capacité d'infiltration des sols dégradés, et la baisse de niveau ou assèchement des nappes et points d'eau à cause des pertes d'eau par ruissellement ; à cela s'ajoutent les problèmes

sanitaires et de qualité de la vie : un environnement dégradé n'offre que de les mauvaises conditions de vie Enfin les pertes définitives de terre entraînent Les préjudices à la société et aux générations futures (Remini, 2006).

## **6-2- Conséquences agro-environnementales**

Les conséquences environnementales liées à l'érosion hydrique des terres agricoles, sous forme de ruissellement mobilisant préférentiellement les particules fines du sol, les nutriments et les pesticides qui leur sont associés, sont donc multiples. Contrairement aux autres pollutions urbaines et industrielles, ce type de perturbation induit par les activités agricoles interagit avec les hydrosystèmes avoisinants, via le ruissellement. Cette pollution est diffuse, car difficilement localisable, et souvent liée à plusieurs sources. S'il est possible de connaître les intrants potentiellement polluants auprès des agriculteurs, leur répartition spatiale n'est pas facilement quantifiable après un travail répétitif du sol, les récoltes et de nombreuses précipitations. Si les pertes en nutriments sont remplaçables par les pratiques de fertilisation, en revanche, la perte de matière organique, la dégradation de la structure et de la capacité de rétention en eau sont beaucoup plus difficiles, voire impossibles, à corriger. La perte de rendements, imputable à l'érosion hydrique des sols cultivés, provient au moins autant des dégradations physiques que de la perte de nutriments. En règle générale, les superficies érodées sont appauvries en éléments nutritifs (ce qui implique une baisse des rendements). L'érosion hydrique constitue donc le principal vecteur de transfert et de répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès), contribuant à induire des pollutions diffuses dans l'environnement. Cet enrichissement en nutriments des eaux courantes et stagnantes, accéléré entre autres par les mutations agraires, crée de grands conflits d'utilisation des ressources hydriques et/ou une limitation coûteuse de leurs divers usages originels. L'érosion accélère la dégradation physique, biologique et chimique des horizons superficiels des sols cultivés (Roose, 1994).

Le ruissellement et l'érosion peuvent avoir une influence néfaste immédiate sur les rendements des cultures en place. Ils peuvent aussi modifier progressivement les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol (par érosion sélective des éléments les plus fertiles) et réduire les potentialités de certains sols, en particulier des

sols peu épais (faible capacité de stockage de l'eau et des engrais) et des sols forestiers (dont la fertilité et les activités biologiques sont concentrées dans les horizons superficiels).

Selon Klaij (1994), à plus long terme, il peut y voir une perte de productivité en raison de la dégradation des propriétés physiques des sols (réduction de la macroporosité, plus pierreuses, moins riches en matière organique...). L'érosion hydrique des sols modifie aussi leurs propriétés chimiques (concentration ou dilution d'éléments fertilisants et/ou de produits phytopharmaceutiques, redistribution des matières organiques et des couches de sol les plus fertiles...) et biologiques (appauvrissement de la microfaune et de la microflore du sol).

## **7- Quantification de l'érosion hydrique dans les bassins versants**

### **7-1- Modèles empiriques**

#### **a) L'équation universelle de la perte en sol (USLE)**

L'USLE, mis au point par les scientifiques Wischmeier et Smith en 1978, a été le plus largement accepté et utilisé, l'objectif était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champs cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat la pente et les facteurs de production.

L'équation pour l'estimation annuelle moyenne de l'érosion des sols est la suivante:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

A = perte moyenne en terre sol [en t / ha /an],

R = Facteur d'agressivité climatique,

K = facteur d'érodibilité des sols,

LS = facteur topographique,

P = facteur de la pratique de la conservation.

#### **b) L'équation universelle de la perte de sol révisée (RUSLE)**

L'équation universelle de la pertes en terre révisée (Revised Universel Soil Loss Equation (RUSLE)) est largement basée sur le modèle USLE c'est une version



modifiée de l'équation universelle de pertes en sol (USLE) originellement élaborée par Wischmeier et Smith (1978). La différence entre ces deux modèles réside dans les algorithmes utilisés pour l'estimation des valeurs des facteurs de l'équation suivante :

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P$$

A : Pertes de sols ( $t\ h^{-1}an^{-1}$ ) ;

R : indice d'érosivité des pluies ( $MJ\ mm\ ha^{-1}ha^{-1}$ ) ;

K : facteur d'érodibilité du sol ( $t\ h\ MJ^{-1}mm^{-1}$ ) ;

L : indice de longueur de pente ;

S : Facteur de l'inclinaison de la pente ;

C : facteur de gestion des cultures ;

P : facteur des pratiques agricoles.

## 7-2-Modélisation numérique

Les paysages sont caractérisés par une grande variation, à la fois spatiale et temporelle, la tolérance et la réponse aux processus naturels et anthropiques est très variable. Ces variations peuvent être analysées à travers l'étude de certains paramètres tels que le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat. Toutefois, les études sont à la fois longues et coûteuses.

L'évolution de la modélisation de l'érosion des sols et des paysages fournit un environnement de simulation à court et à long terme, c'est ainsi que les conditions d'occupation des sols et les stratégies d'aménagement du territoire peuvent être comparées et évaluées (Harmon et *al.*, 2002). Ces modèles fournissent la base pour le développement des systèmes de la gestion des terres et d'aide à la décision.

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire.

- **Différents modèles utilisés**

Un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe. A chaque stade de la modélisation des approximations sont réalisées : perception du phénomène formalisation en un cadre conceptuel traduction dans un langage de programmation (Bazi et *al.*, 1995).

Il existe, dans la littérature, de nombreux modèles hydrologiques des bassins versants ayant chacun leurs spécificités et leurs domaines d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité de représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations. C'est une étape très délicate. Plusieurs auteurs ont proposé une classification des modèles hydrologiques des phénomènes érosifs dans les bassins versants (Cerdan et *al.*, 2001). A titre d'exemple, Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique. Chocat (1997), propose quant à lui de classer les modèles hydrologiques par type d'utilisation (modèles cognitifs, modèles prévisionnels, modèles décisionnels et modèles normatifs).

Par type d'approche physique/analogique/symbolique/axiomatique déterministe/probabiliste (stochastique microscopique (réductionniste)/macroscopique (holistique, conceptuelle), empirique/théorique et spéculative/pragmatique).

- CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) Knisel (1985)
- KIRENOS (the kinematic runoff and erosion model) (Smith *et al.*, 1995)
- EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams, 1985)
- ANSWERS (Areal Non Point Source Watershed environment Response Simulation)
- LISEM (Limburg Soil Erosion Model) (De Roo *et al.*, 1996a, b)
- MEDRUSH (Kirkby, 1998)
- MOSES (Modular Soil Erosion System)
- MWISED (Modelling Within Storm Sediment Dynamics)
- PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment)
- SERAE (Soil Erosion Risk Assessment in Europe)
- STREAM (Sealing, Transfer, Runoff, Erosion, Agricultural Modification) model
- SWAT (Soil and Swat Assessment Tool)
- WATEM (Water and tillage erosion model)
- WEPP (Water Erosion Predicting Project (Flanagan and Nearing, 1995)
- EUROSEM (Européen Soil Erosion Model) (Morgan *et al.*, 1998; Quinton, 1994)

**Tableau 2-** Quelques modèles fonctionnant dans la région méditerranéenne (Reiffsteck et *al.*, 2006)

Nom du Modèle	Description	Aire d'application	Echelle spatiale d'intégration	Echelle temporelle d'intégration	Paramètres d'entrée
EUROSEM (European Soil Erosion Model)	prédiction des pertes en sols à partir d'évènements pluvieux très courts d'environ 1 minute	Europe	Champs ou petits bassins		Végétation, précipitations, topographie, microtopographie, propriétés mécaniques et hydriques du sol
LISEM (Linburg Soil erosion process)	prédiction de l'érosion hydrique à partir d'évènements pluvieux très courts d'environ 5 à 15 secondes	Monde	Champs ou petits bassins jusqu'à 25 km <sup>2</sup>	Evènements pluvieux très courts de 5 à 15 secondes	Plus de 30
SEMMED (Soil Erosion Model for Mediterranean areas)	prédiction des pertes de sols sur une base annuelle en essayant de séparer le processus d'érosion en 2 phases (phase écoulement et phase sédimentaire). Le modèle se base notamment sur les paramètres de l'USLE	Bassin Méditerranéen	Bassins versants de quelques km <sup>2</sup>		Couverture végétale, Capacité d'infiltration du sol, érodibilité du sol, intensité de la pluie, pente, direction des écoulements, réseau hydrographique, conductivité à saturation du sol
RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)	Version révisée de L'USLE avec de nouvelles méthodes pour évaluer les facteurs de l'équation de Wischmeier et dans laquelle les calculs et les bases de données sont informatisés [1]				
MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use)	Détermine la sédimentation au cours d'inondations catastrophiques	Bassin Méditerranéen	Bassins versants de quelques km <sup>2</sup>		Les paramètres d'entrée sont contenus dans 4 sous modèles qui interagissent (Atmosphère-Sol-Végétation-Surface). Ces

					modèles sont définis pour chaque point pris le long d'une pente
MEDRUSH	Détermine la sédimentation au cours d'inondations catastrophiques	Bassin Méditerranéen	Grands bassins versants de plusieurs milliers de km <sup>2</sup>		Le modèle MEDRUSH se base sur un découpage en sous bassins versants sur lesquels un modèle MEDALUS simplifié est appliqué

- **Avantages des modèles**

Avoir une évaluation rapide du rythme d'érosion dans une région et de mettre à jour la sensibilité des sols à l'érosion

Permettent aux aménagistes de choisir des pratiques appropriées de conservation, de l'eau et du sol, même dans les cas où la précision de la prédiction pourrait être incertaine.

Ils peuvent suivre et quantifier l'érosion à grande échelle et évaluer ainsi l'impact du problème à l'échelle régionale.

Ils peuvent pour régler les activités sur le terrain à des fins de conservation, car ils peuvent fournir un système d'évaluation juste. Le modèle pourrait ne pas donner exactement la quantification de l'érosion sur tous les domaines de chaque année, mais à long terme, les prédictions sont justes et raisonnablement précises.

Ils peuvent être utilisés pour estimer les dépôts de sédiments dans les différents ouvrages hydriques (barrages, retenue).

## **8. L'érosion hydrique dans le milieu steppique**

La steppe Algérienne est une région très sensible à l'érosion à cause de la pauvreté naturelle des sols en matière organique, la faible couverture végétale, son relief particulier et d'un climat méditerranéen aux pluies saturantes d'hiver et orageuses d'été. L'érosion hydrique est due en grande partie aux pluies torrentielles qui sous forme d'orages violents désagrègent les sols peu épais, diminuent leur perméabilité et leur fertilité. Les éléments fins, l'humus et les éléments minéraux sont emportés par le ruissellement qui provoque la formation de rigoles et de ravines entaillant profondément la surface du sol. 50 à 250 t/ha/an de terre sont entraînés par le ruissellement sur les sols dénudés à forte pente (Le Houerou, 1995).

Les données récentes montrent que ces phénomènes ont provoqué d'énormes pertes: près de 600.000 ha de terres en zone steppique sont totalement désertifiés sans possibilité de remontée biologique et près de 6 millions d'hectares sont menacés par les effets de l'érosion éolienne (Ghazi et Lahouati; 1997).

Depuis 1950, la dégradation des terres s'est accélérée par suite d'une pression démographique croissante et il en résulte une recrudescence de l'érosion hydrique en milieu steppique et agricole. Malgré les efforts du gouvernement algérien pour instaurer une politique classique de "Défense et de Restauration des Sols" (DRS), l'érosion poursuit son travail de destruction des sols. Globalement, les paysans n'ont pas accepté la quantité importante de travail ainsi que la perte de terrain de culture sans qu'il y ait en retour une amélioration sensible de la productivité des sols.

Dans ce contexte physique et humain particulier où la DRS n'a pu résoudre tous les problèmes, il est proposé une nouvelle approche où conjointement chercheurs et paysans mènent une action concrète de "Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES)". En luttant contre l'érosion hydrique, la GCES vise à augmenter la biomasse, la productivité des terres et du travail ainsi que les revenus nets des paysans pour diminuer la charge sur les milieux steppiques fragiles.

Elle doit s'appliquer en trois phases:

- 1) sensibilisation et dialogue pour développer la confiance entre la population locale, les chercheurs et les techniciens,
- 2) expérimentation des techniques améliorées de production dans les champs des populations locales,

3) planification de l'aménagement de l'espace exploité par une communauté rurale.

Le rôle modérateur que joue la végétation dans les manifestations de l'érosion hydrique et dans les instabilités de versant est trop important. Ce rôle peut être direct, la végétation faisant obstacle au ruissellement et protégeant les sols (Snelder et Bryan, 1995 ; Morgan *et al.*, 1997 ; Bochet *et al.*, 1998 ; Cerdá, 1999 ; Martinez-Mena *et al.*, 1999 ; Richard et Mathys, 1999 ; Descroix et Gautier, 2002). Il peut également être indirect, le couvert végétal assurant une amélioration du bilan hydrique et des propriétés physiques du sol (Dunne *et al.*, 1991 ; Bergkamp *et al.*, 1996 ; Solé-Benet *et al.*, 1997 ; Cerdá, 1998). Il dépend aussi du stade de développement de la végétation (Rovéra *et al.*, 1999).

## 9. Lutte contre l'érosion hydrique

Il est possible de réduire la quantité de sol perdu d'un champ ou de lutter contre ce type d'érosion grâce à plusieurs mesures. On réduit l'érosion due au travail du sol en diminuant le nombre de façons culturales. Le travail minimal du sol, le semis direct, un drainage amélioré et la rotation des cultures, y compris le recours à des cultures couvre-sol, peuvent contribuer grandement à réduire l'érosion due au vent ou à l'eau.

Dans certaines situations, ces mesures ne suffisent pas et d'autres pratiques de conservation du sol deviennent nécessaires (Mietton, 1986 ; Ludwig, 1992 ; Arabi et Roose, 1992).

- *Bassin de retenue de l'eau et des sédiments*

C'est un ouvrage aménagé en travers des voies de drainage et fonctionne comme un petit barrage pour intercepter le ruissellement concentré et l'achemine sous terre au moyen d'un drain ainsi pour la protection d'un champ ou de la ferme contre les érosions par ravinement et en rigoles. Ce type est très utile dans les champs aux pentes irrégulières ou non uniformes en remplacement des voies d'eau gazonnées. Ce type d'aménagement est relativement coûteux.

- *Voies d'eau gazonnées*

Ce sont des canaux larges et peu profonds, le couvert de gazon protège contre l'érosion. Cela sert à la protection d'un champ ou de la ferme contre les érosions par ravinement et en rigoles. L'inconvénient est que matériel peut facilement traverser les voies d'eau et les rangs de la culture doivent être perpendiculaires aux voies d'eau.

- *Terrasse de dérivation*

C'est un canal de dérivation avec un talus du côté inférieur. L'aménagement est perpendiculaire à la pente pour intercepter le ruissellement de surface et l'évacuer vers un exutoire.

- *Terrasse*

Les terrasses sont construites le long d'une pente et servent à briser les pentes longues. L'excès d'eau est acheminé hors du champ. Les trois principaux types sont à base élargie, à base étroite ou à voie gazonnée. Ce type d'aménagement sert à protéger contre les érosions par ravinement, en rigoles et en nappe mais ils sont très coûteux, l'espacement entre les terrasses dépend de l'inclinaison de la pente, de l'érodabilité du sol, du type de culture, de l'abondance des pluies et de la gestion.

- *Culture en bandes alternantes*

1. *Culture en bandes alternantes suivant les courbes de niveau*

Les bandes sont semées à angle droit par rapport à la pente naturelle. Elles assurent la protection contre les érosions en nappe et en rigoles. L'assistance technique peut être nécessaire pour établir les courbes de niveau pour pouvoir réduire l'érosion jusqu'à 75 %.

2. *Culture en bandes alternantes*

Ce sont des bandes de largeur uniforme sont perpendiculaires à la pente, elles protègent contre les érosions en nappe et en rigoles ; cette technique est la plus répandue, elle permet de réduire l'érosion jusqu'à 75 %.

3. *Culture de bandes enherbées en alternance avec la culture*

Ces bandes permanentes de gazon ou de cultures fourragères peuvent être cultivées entre des bandes de largeur égale de cultures en rotation régulière pour assurer la protection contre les érosions en nappe et en rigoles. La largeur des bandes dépend des cultures de la rotation et de l'inclinaison de la pente. Il est souvent nécessaire d'aménager des ouvrages permettant d'intercepter l'eau pouvant causer une ravine ou une rigole dans un champ. Ces ouvrages exigent moins d'entretien s'ils sont combinés à un travail réduit du sol ou au semis direct. On peut aussi avoir recours à la culture en bandes alternantes pour protéger le sol de l'érosion hydrique - un système selon lequel une bande de culture sarclée fait alternance avec une bande de culture



fourragère ou céréalière. En combinant un travail de conservation à la culture en bandes alternantes, on augmente la largeur des bandes nécessaires.

- *Protection des fossés et des ruisseaux*

Une grande quantité de sédiments dans l'eau provient souvent des berges des fossés et des ruisseaux. Les berges non protégées continuent de s'éroder, rongant peu à peu les terres agricoles. L'intérêt grandissant pour la protection des eaux de surface et des eaux souterraines dénote l'importance de cette ressource. La protection des berges des fossés et des ruisseaux peut faire l'objet de certaines mesures, tout comme l'eau qui y circule. Un débit trop élevé et le passage de la machinerie ou du bétail peuvent concourir à l'érosion des berges. Des débits concentrés peuvent former des rigoles ou des ravines à leur arrivée dans un cours d'eau. On stabilise généralement les berges de ruisseaux et de fossés à l'aide d'un des éléments suivants : colonne de descente, chute enrochée, zone tampon, protection des sorties de canalisations de drainage souterrain ou tube collecteur. Il faut éviter que le bétail n'ait accès aux cours d'eau : le clôturage constitue souvent une bonne solution. Des ponts, des ponceaux ou des passages constituent certaines des solutions qui s'offrent pour le déplacement en toute sécurité de la machinerie et du bétail.

- *Brise-vent*

Il faut souvent une protection supplémentaire contre le vent s'il n'y a pas assez de résidus pour que le sol reste en place. En ralentissant la vitesse du vent, le brise-vent offre une protection près du sol. Il existe deux types de brise-vent : le premier, plus fréquent, est composé de cinq rangs ou moins et le second, de six rangs et plus.

- *Abandon d'une terre fragile*

Il arrive à l'occasion que l'on ne puisse lutter contre l'érosion dans un champ ou l'une de ses parties. L'érosion peut être trop grande ou le champ peut présenter également d'autres problèmes qui le rendent moins rentable pour la culture ou en font une ressource moins durable. Les parcelles de terre fragiles comprennent entre autres les secteurs près des ruisseaux, des lacs et des terres humides, qui peuvent être inondés ou d'autres parcelles soumises à une érosion grave. Ces parcelles de terre ne devraient plus faire partie de la zone productive; elles devraient plutôt être consacrées au pâturage ou au reboisement.

## 10. Les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

Pour être efficaces, les moyens de lutte doivent se situer dans deux zones bien distinctes (Derancourt, 1995):

- une zone émettrice de ruissellement,
- une zone sensible accumulant les précipitations.

Ces deux zones correspondent donc à deux limites différentes auxquelles doivent s'adapter des mesures différentes. Deux aspects sont donc à prendre en compte :

*L'aspect agronomique (préventif) qui englobe les techniques culturales:*

- couverture du sol,
- structure du sol,

*L'aspect hydraulique (curatif) : aménagements divers...*

Il convient d'agir en priorité sur le premier (techniques culturales) car on considérera que dans la région à dominante agricole, il est à l'origine même de l'érosion, le second aspect n'intervenant que pour limiter les conséquences engendrées par le travail du sol. En fait toute modification de la structure du sol entraîne une variation de sa stabilité dans le temps et de son comportement vis à vis des précipitations.

- **Les techniques culturales**

- 1. Diminuer l'impact des gouttes de pluie**

L'effet des pratiques culturales n'est pas facile à calculer. Néanmoins, tous les experts s'accordent à dire qu'il est possible de réduire d'au moins 1 mm les volumes de ruissellement sur les terres labourées, ceci rapporté à la surface du bassin versant peut être considérables (Ludwig, 1992).

- 1.1. Non déchaumage pendant l'interculture**

Il permet de maintenir un effet de "mulch" (couverture végétale morte) qui diminue fortement l'impact des précipitations, le sol n'étant pas travaillé, il reste résistant aux incisions. Pour les récoltes de fin de printemps il permet entre autre de garder l'humidité du sol pour la restituer en été. Il est principalement recommandé dans les zones de concentration ou tout ameublissement du sol est à proscrire et dans les zones de fortes pentes et de ruptures de pentes (Gauvin, 2000).

## **1.2. Non labour**

Il présente deux effets opposés selon sa position géographique, sur le plateau (impluvium) ou dans la vallée (zone de concentration du ruissellement). En effet il permet de garder un sol compact et peu sensible à l'arrachement dans la zone de ruissellement concentré (située en général en fond de vallée), il favorise au contraire le ruissellement si la parcelle est située sur l'impluvium du fait de sa faible capacité d'infiltration (Ludwig, 1992).

## **1.3. Cultures intermédiaires**

Outre le fait de diminuer l'impact des gouttes de pluies, le couvert végétal constitue un excellent piège à nitrate. Il existe quatre techniques d'implantation :

- semis sous couvert avant récolte du blé ;
- semis sur chaumes sans travail du sol ultérieur ;
- semis sur chaumes avant déchaumage, juste après récolte ;
- semis sur chaumes avant déchaumage trois semaines après récolte.

## **1.4. Intérêts des semis d'engrais vert**

Hydraulique (limite le ruissellement en protégeant le sol de la battance et piège les sédiments dans la parcelle). Agronomique (améliorent la structure du sol pendant la végétation et temporairement après enfouissement, facilite la décomposition des pailles). Economique (limitent le drainage de l'azote pendant l'hiver, facilite le travail du sol, améliorent les rendements de la culture suivante (Ludwig, 1992).

## **2. Augmenter la capacité d'infiltration et de stockage à la surface du sol**

### **2.1. Travail du sol**

- Le déchaumage intervient surtout pour les grandes parcelles à sol compact susceptibles de concentrer l'eau. Contrairement au non déchaumage il sert avant tout à faciliter la décomposition des résidus de récolte (en appliquant un premier mélange avec le sol) et à détruire les graines et les adventices laissés sur le sol. L'application du déchaumage et du non-déchaumage dépend beaucoup du type de sol, de la culture implantée et des conditions météorologiques.
- Le sous solage (ou décompactage) pour éclater la semelle de labour et/ou les zones de tassement pour créer une zone de fissuration et d'infiltration de l'eau, et ainsi retarder l'apparition du ruissellement (Gauvin, 2000).

## **2.2. Utilisation d'équipements permettant de répartir les charges des engins**

Le tassement du sol par les engins agricoles est un facteur défavorable, les traces servent fréquemment de réseau de collecteur des eaux de ruissellement. L'importance des tassements et des ornières varie selon le matériel utilisé (tasse-avant, roues jumelées, pneus larges...).

## **2.3. Favoriser les céréales d'hiver aux cultures de printemps**

Elles permettent d'obtenir un couvert végétal susceptible de freiner l'impact des précipitations fréquentes en hiver, et d'absorber le surplus d'azote susceptible de ruisseler vers les cours d'eau. Mais la rentabilité reste l'une des préoccupations majeures des agriculteurs et constitue souvent un frein à leur mise en place (Gauvin, 2000).

## **3. Consolider le sol**

### **3.1. Par l'apport de matières organiques**

Elles favorisent l'agrégation des particules entre elles et améliorent la stabilité structurale en agissant sur la mouillabilité (favorisent l'infiltration de l'eau), et en limitant la battance et la prise en masse des couches labourées (Ludwig, 1992).

### **3.2. Par l'amendement calcique**

Nécessaire à la floculation du complexe argilo-humique; il faut maintenir un taux de calcaire d'au moins 3 % et un pH entre 7,5 et 7,8 sachant que la consommation annuelle est d'environ 0,5 à 1 tonne par hectare de carbonate de calcium. Il donne au sol une structure plus stable, moins apte à produire une croûte de battance. (Derancourt, 1995).

### **3.3. Favoriser le tassement sur les zones de passage d'eau**

Pour constituer une bande de sol compact et ainsi augmenter la résistance du sol et la largeur d'étalement de l'écoulement. La limite de cette méthode dépend de la pente qui doit être inférieure à 2-3 % et des débits qui doivent être faibles (Derancourt, 1995).

### **3.4. Eviter l'affinement excessif**

Pour éviter la formation de la croûte de battance en travaillant sur sol bien ressuyé, en limitant les passages et en regroupant les outils (peu agressifs et adaptés au type de sol).

#### **4. Empêcher la concentration des eaux**

##### **4.1. Taille, forme et orientation des parcelles et des travaux qu'elles induisent**

Un travail perpendiculaire à la pente évite l'accumulation de l'eau au fond de la parcelle en même temps qu'il limite la prise de vitesse de l'eau lors du ruissellement. En diminuant son énergie cinétique, il diminue aussi les risques d'incisions ou de coulées de boue (Gauvin, 2000).

##### **4.2. Eviter le tassement du sol à l'intérieur des parcelles par les engins agricoles**

Le risque de ruissellement augmente fortement avec le pourcentage de surface tassée et le degré de tassement.

##### **4.3. Alternier les cultures sur un bassin versant : assolement judicieux et en commun**

Les agriculteurs organisent leurs successions culturales à partir d'assolement comme la betterave, la pomme de terre ou le maïs. Il s'agit dans l'ensemble d'une rotation triennale avec de temps à autres l'introduction en fin de succession du lin ou du maïs. Pour les assolements qui favorisent les sols nus en hiver avec des chantiers de semis à risque au printemps, il est conseillé d'introduire des cultures intermédiaires pour couvrir la surface, réduisant ainsi fortement les risques d'érosion et de ruissellement (pratique particulièrement développée chez les grosses exploitations légumières). Les parcelles d'un même versant étant bien souvent cultivées par des exploitants différents, il est intéressant qu'une concertation se mette en place pour le choix des assolements (Ludwig, 1992).

#### **11. Les aménagements hydrauliques**

Dans les situations à pluviométrie extrême et l'absence d'effort des agriculteurs, les mesures agronomiques ne suffisent pas toujours, et une action complémentaire au moyen d'aménagements hydrauliques s'impose. Ils sont placés le plus en amont possible des phénomènes d'érosion et de ruissellement pour permettre de canaliser et stocker l'eau excédentaire, c'est leur succession le long de la pente qui sera le gage de leur efficacité (Gauvin, 2000).

## **1. Méthode de travail pour une étude d'aménagement hydraulique**

L'approche pour estimer les volumes de ruissellement et les débits repose sur une connaissance précise du terrain et une adaptation la plus étroite possible des risques à chaque bassin versant. Ces méthodes sont souvent utilisées par les bureaux d'études afin de dimensionner les ouvrages nécessaires pour contenir successivement le long d'un bassin versant les eaux de ruissellement et limiter ainsi l'érosion. Elles s'appuient sur des analyses d'intensité de pluie, sur des choix de coefficient de ruissellement, sur des estimations de temps de concentration, sur des estimations de débits et de volumes ruisselés. Les aménagements généralement proposés sont prévus pour lutter contre les phénomènes chroniques. Ils ne sont pas dimensionnés pour faire face à des événements de fréquence rare, mais au mieux, de fréquence décennale (pluie apparaissant statistiquement une année sur dix). Un niveau de protection supérieur exige des ouvrages de capacités plus importantes donc des emprises plus vastes (Gauvin, 2000).

### **2.1. Limiter les volumes de ruissellement**

#### **2.1.1. La bande enherbée**

Elle peut de jouer un double rôle : elle permet de lutter à la fois contre l'érosion et contre les pollutions des cours d'eau par les produits phytosanitaires d'origines agricoles et le ruissellement des matières en suspension (Gauvin, 2000).

La localisation des bandes enherbées répond à plusieurs principes. Elles peuvent être :

- en position d'intercepter transversalement le ruissellement diffus au sein de la parcelle, ou en bordure de celle-ci: dans ce cas, elles freinent l'eau, retiennent des sédiments et jouent le rôle de diffuseur (limite la concentration de l'eau).
- en position de canalisation du ruissellement, c'est-à-dire qu'elle est implanté dans l'axe du talweg. Dans ce cas, elle empêche le décollement des particules terreuses dans la zone déprimée. Elle est positionnée de sorte à guider l'eau vers l'aval sans emporter les sédiments.
- en position de banquettes d'adsorption, de diffusion associant au filtre une dépression aménagée en amont qui exerce un triple rôle ; décantation, infiltration et répartition de la lame d'eau ruisselante sur le filtre provenant de l'amont. En limitant le ruissellement à l'amont, on favorise davantage l'infiltration de l'eau(Ludwig, 1992).

### **2.1.2. Dissociation zones émettrices amonts et zones de pente**

En fonction du sens du travail du sol, le plateau va diriger le ruissellement vers les fourrières (zone où l'agriculteur relève les outils de la machine lors de son passage). Pour éviter la concentration de l'eau en fonds de talweg, des bandes enherbées et des fossés de rétention sont installés sur toute la longueur correspondant à la zone de collecte du ruissellement.

### **2.2. Limiter la concentration du ruissellement et créer des zones de dépôts**

Ces ouvrages de stockage des ruissellements situés en général à l'interface entre les terres cultivées et les zones urbanisées n'ont pas d'effet sur l'érosion elle-même (si elles sont bien entretenues) mais sert seulement à la contenir.

- les plis ou modelés.
- les barrages en balles de paille.
- les diguettes avec fossés de stockage. - les mares tampons.
- les talus et bandes boisées.
- les haies.
- les banquettes d'absorption-diffusion.
- les bandes enherbées qui empêchent l'arrachement du sol sur les passages en eau.

En jouant le rôle de barrière et en déviant les écoulements, les haies peuvent protéger une partie des surfaces du bassin versant. Elles peuvent favoriser l'infiltration des nitrates avec d'autres produits phytosanitaires et donc leur piégeage, mais cela dépend beaucoup des pratiques culturales. Des risques existent selon le mode d'implantation de ces ouvrages. La maîtrise de l'évacuation des eaux est primordiale, elle dépend beaucoup de l'entretien des aménagements (Gauvin, 2000).

### **2.3. Ouvrages pour protéger les chemins d'eau et organiser l'écoulement**

- chenal enherbé : il sert à acheminer l'eau en évitant l'incision et permet d'éviter le caractère boueux aux inondations. Il permet aussi de filtrer les matières en suspension en créant des dépôts. Les résidus de fauche sont destinés au compostage ou à l'incinération mais en aucun cas ils ne doivent servir pour l'alimentation animale.

- fossés de drainage (ou barrages filtrants) et ouvrages de canalisation. Ils peuvent faire office de bassins de rétention, puisque l'eau est ralentie et donc en partie stockée à l'amont des aménagements.

- Réseau hydraulique cohérent.

Tous ces ouvrages correspondent néanmoins à des actions limitées et apparaissent comme des solutions secondaires et coûteuses, d'où l'intérêt de développer les actions préventives agronomiques (Ludwig, 1992).

#### **2.4. Ouvrages pour protéger les zones bâties des inondations**

Il s'agit en général d'ouvrages de grandes dimensions pouvant supporter des volumes d'eau engendrés par des pluies décennales ou centennales.

- Bassin de rétention.

- Les bassins d'orages

- Aménagement des exutoires pour une bonne répartition des eaux en aval.

#### **2.5. Pour les secteurs urbanisés**

- Ralentir le transit des eaux de ruissellement par des bassins de rétention (coûts d'entretien élevé).

- Suivre le développement des surfaces imperméabilisées (toitures, routes, parking, trottoirs...) pour contrôler la vitesse de ruissellement.

Les aménagements les plus efficaces pour lutter contre l'érosion sont à mettre en place lors du remembrement (Prise en charge de certains coûts pour moitié par le département). Un principe général doit être respecté : les aménagements doivent représenter une contrainte minimale pour les exploitants. Ainsi ils seront toujours disposés parallèlement au sens du travail du sol.

En dehors du cadre d'un remembrement, la mise en place d'action de lutte contre l'érosion se fait en plusieurs étapes :

- une concertation entre agriculteurs au niveau du bassin versant sur le choix des assolements. Celles-ci évitera par exemple que des versants entiers soient occupés uniquement par des cultures de printemps.

- une étude préalable pour inventorier les phénomènes d'érosion, rechercher leur cause et proposer des remèdes en concertation avec les agriculteurs, les élus des bassins concernés et les riverains ;



- un recours à une entreprise de travaux publics ou à la DDE par exemple ;
- un suivi de réalisation ;
- un entretien périodique des aménagements.

Dans le département de la Somme, l'organisation du suivi agronomique et de la mise en place des aménagements prévus est souvent effectuée par la SOMEA (Somme Espace et Agronomie : association de 1901 constituée par le Conseil Général de la Somme et la Chambre d'Agriculture) qui s'occupe des études de bassin versant (Ludwig, 1992 ; Gauvin, 2000).

## **12. Ecologie de la restauration des sols**

L'érosion constitue un phénomène naturel aux conséquences préoccupantes dans beaucoup de régions du monde. La lutte contre l'érosion par des végétations représente aujourd'hui un défi majeur sur les espaces où se localisent des enjeux socio-économiques, aussi bien dans certains milieux semi-naturels (bassins versants torrentiels, berges de rivières) que dans les milieux fortement anthropisés (pistes de ski, talus, terrains agricoles, carrières).

Les objectifs sont de mieux comprendre l'influence de la végétation et des ouvrages de génie biologique sur l'érosion hydrique de surface dans les milieux érodés. Pour cela, une meilleure connaissance de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de milieux restaurés, à diverses échelles spatiales (de la plante à la métacommunauté, du versant au bassin versant) et aux différents stades du processus de restauration est nécessaire. Les recherches se concentrent sur l'étude de la dynamique des communautés végétales et sur son interaction avec la dynamique de l'érosion. L'une des finalités fortes est notamment de déterminer les limites d'action de la végétation et des ouvrages de génie biologique dans la maîtrise de l'érosion, autrement dit d'identifier des seuils spatio-temporels de biorhexistase (passage d'une dynamique érosive dominante à une dynamique végétale dominante).

Cette voie répond à des besoins opérationnels de lutte contre l'érosion dans les milieux de montagne. Outre son rôle dans l'accroissement des connaissances, elle présente donc un fort caractère finalisé et visent à développer des méthodes et des outils d'ingénierie écologique et d'expertise pour le contrôle de l'érosion et la restauration des terrains érodés (Pugnaire et Valladares, 2007).

Présentation générale  
de la Wilaya de  
Tiaret

## PRESENTATION GENERALE DE LA WILAYA DE TIARET

### 1- Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya de Tiaret, région du centre ouest algérien, (Tihert) capitale des Rostémides fondée en 787 par Ibnou Rostom, elle fait partie intégrante de la région physiographique des hauts plateaux ; distante à plus de 300 kilomètres au sud ouest de la capitale .Elle côtoie plusieurs wilayas et constitue un relais entre les régions du N-W et celles du sud.

Sur le plan administratif, elle compte, 14 Dairas et 42communes.

Elle est délimitée par plusieurs wilayas à savoir :

- Tissemsilt et Relizane au Nord;
- Laghouat et El Bayadh au Sud;
- Mascara et Saida à l'Ouest;
- Et Djelfa à l'Est.

Les coordonnées géographiques grossièrement sont :

- Nord, x :  $2^{\circ} 40' 19''$  E y :  $35^{\circ} 43' 09''$ N
- Centre, x :  $1^{\circ} 35' 1.7''$  E y :  $34^{\circ} 53' 41''$ N
- Sud, x :  $0^{\circ} 31' 4,34''$  E y :  $34^{\circ} 03' 37''$ N

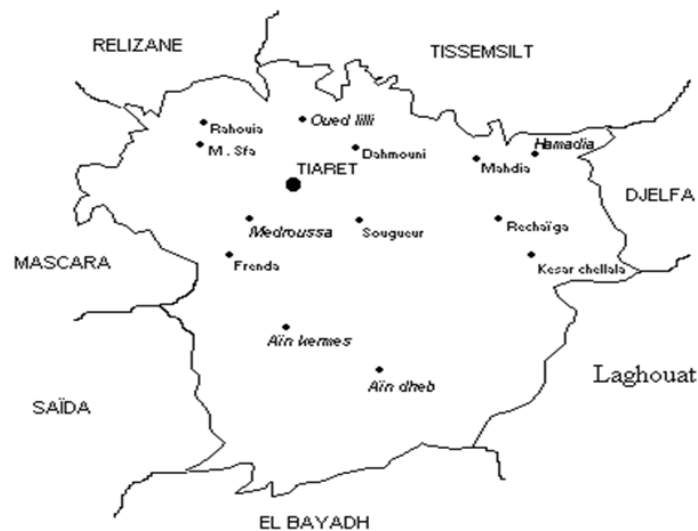


Figure 3- Situation géographique de la Wilaya de Tiaret

## 2- Caractéristiques physiques

- **Relief**

D'une manière générale, le relief est caractérisé par le versant méridional du chaînon de l'Atlas tellien (Ouarsenis) qui constitue sa limite septentrionale, au sud ouest par les monts de Frenda. Les pentes généralement comprises entre 2 et 16% (Annexe).

Par ailleurs, les zones steppiques faisant partie des hautes plaines algéro-oranaises se dressent le massif du Nador relié au sud est aux monts de Chellala. Cet ensemble constitue les zones arides pré atlasiques.

- **Géologie**

Il est intéressant de connaître la nature géologique des sols de la wilaya de Tiaret ce qui permet de comprendre l'impact sur le degrés d'érosion. Géologiquement la wilaya de Tiaret est constituée de deux grandes unités distinctes

1. La première représente le domaine tellien dominé par les formations qui correspondent aux placages Plio –Quaternaire couvrant le Sersou; le; le Miocène inférieur qui s'étale de Tiaret à Dahmouni; l'Oligo - Miocène correspond aux sud de Tiaret, l'Eocène calcaire se trouve au nord ouest de la wilaya s'étalant de Rahouia à Djillali Ben Amar et enfin le Miocène supérieur et moyen relatif à l'ensemble de Mechraa Sfa Tagdempt et Djebel Guezoul.

Le Jurassique supérieur domine le massif de Sdama et qui repose essentiellement sur des formations calcaires et marno – calcaire.

Le Jurassique supérieur forme aussi de grands affleurements au nord de Takhmaret et Ain Hedid; en contournant au nord le massif de Sdama ils atteignent le barrage de Benkhada sur l'oued de Mina En fait, il s'agit de marnes et d'argiles à bancs de grés.

Le Crétacé recouvert par le Sénonien de Mellakou – Sougueur : c'est le crétacé de la

Mina qui s'étend jusqu'au piémont du Nador vers l'est et au Sud de Tiaret vers le Nord et au Djebel Chebka vers le Chott ech Chergui au Sud.

2. La deuxième représente le domaine pré- atlasique couvrant particulièrement les zones steppiques. La partie sud est constituée de formations d'origine marine et continentale attribuées au Crétacé.

Entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien s'enclavent des dépressions fermées (Chott Zahrez, Chott Chergui et des dayas), de formations souvent détritiques tertiaire et quaternaire qui reposent sur les séries du Secondaire (Othmane, 2003).

Le massif du Nador qui s'individualise au sein de cet espace steppique à 40 Km au Sud -Est de Tiaret aligné sensiblement SO-NE sur une cinquantaine de kilomètres. C'est une chaîne des hauts plateaux au climat continental.

**Tableau 3-** Unités lithologiques de la wilaya de Tiaret (URBATIA, 2008)

Âge et formation	Symbole	Caractéristiques lithologiques	Localisation
<b>Quaternaire</b>	Q	Limons, croûtes gypso – salines et	Lacs, dayas et chotts
<b>Pliocène</b>	pL	Poudings et calcaires lacustres.	Oued Abd et Taht
<b>Miocène</b>	Ms	Calcaires grés et argiles	Tiaret à Dahmouni
<b>Miocène</b>	Mi	Marnes bleues sableuses et des	Nord Est du djebel
<b>Crétacé</b>	Cs	Marnes jaunes à petits bancs de	Pied Nord du massif
<b>Crétacé</b>	Ci	Calcaires et marnes, dolomies	Oued Touil
<b>Jurassique</b>	Js	Marnes schisteuses noir gris	Massif du djebel
<b>Jurassique</b>	Jm	Grés roux et blancs	
<b>Jurassique</b>	Ji	Calcaires, de marnes grises ou	Sersou, de l'Oued
<b>Trias</b>	T	Schistes grés rouges, calcaires	

- **Hydrogéologie**

- **Les eaux superficielles**

La wilaya de Tiaret est alimentée par deux grands bassins versants, (les bassins du Cheliff et des hauts plateaux oranais), à l'intérieur de ces deux bassins versants, on recense quatre sous bassins versants drainés par 889 km d'oueds pérennes et de 1049 km de cours d'eau intermittents .Il s'agit des oueds: Abd, Mehti, Mina, Rhiou, Souslem, Taht, Tiguiguest et Touil.

La capacité d'eau que dispose la wilaya est estimée à 100 hm<sup>3</sup>, à l'origine des 1525 hm<sup>3</sup> que draine le Cheliff. Les 100 hm<sup>3</sup> sont alimentés à partir des barrages Bekhada, Dahmouni Bougara avec les capacités respectives de 45, 42 et 13hm<sup>3</sup>

- **Les eaux souterraines**

Près de 80% du volume global des ressources hydriques souterraines de la wilaya sont localisées dans la zone steppique ; elle renferme trois principales nappes à savoir :

- Le Sersou, renfermant des horizons aquifères dans les dépôts calcaires marneux du plio-quadernaires
- Oued Touil. qui présente des horizons aquifères dans les dépôts de sable, limon, poudingue du Quaternaire, argilo sableux du Plio Quaternaire, grés granulaire du Miocène et du Baremo alpien, dolomie de calcaire du Kimméridgien;
- Chott Chergui, présente des horizons aquifères dans les niveaux grossiers de base du Tertiaire continental, calcaire sénonien, calcaire et dolomie de l'Aeleno – Bajo-Batonien.

Avec un total de 44.60 hm<sup>3</sup>/an, les principales ressources en eau souterraines sont réparties comme suit :

- Nappe Oued Abd→07 hm<sup>3</sup>/an.
- Nappe Oued Mina→.08 hm<sup>3</sup>/an.
- Nappe Oued Taht→01.4 hm<sup>3</sup>/an.
- Nappe Oued Touil→.17 hm<sup>3</sup>/an.
- Nappe Sersou→07 hm<sup>3</sup>/an.

- **Types de sol**

La figure 4 présente la répartition géographique des types de sols les plus dominants dans la wilaya de Tiaret.

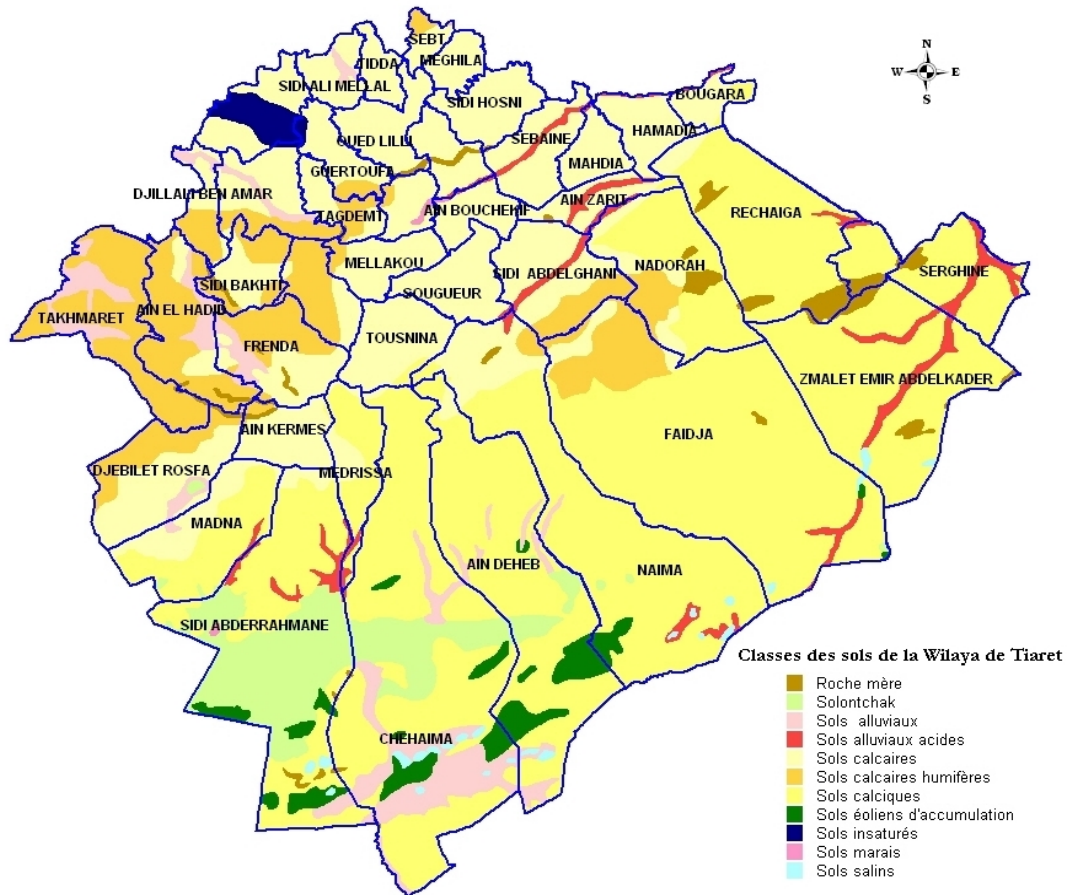


Figure 4- Distribution des classes des sols dominants dans la Wilaya de Tiaret.

- **Occupation du sol**

L'analyse de la diversité et de la répartition géographique des formations végétales de la Wilaya de Tiaret fait ressortir que le territoire de la wilaya peut être subdivisé en trois parties distinctes :

- Au nord: zone montagneuse;
- Au sud: zone steppique;
- Au centre: zone des hautes plaines

Avec les typologies agro-écologiques suivantes:

- agro-sylvicole
- agro-sylvo-pastorale
- agro-pastorale
- alfatières/steppes

**Tableau 4-** Occupation des sols (DSA, 2008)

Désignation	Superficies en 2002 (ha)	Superficies en 2007 (ha)
S.A.U	704.596	705.650
Pacages et parcours	390.596	389.420
Terres incultes	39.790	38.926
S.A.T	1.134.799	1.133.996
Forêts	142.966	142.966
Nappes alfatières	332.960	332.938
Terres utilisées pour l'agriculture	1.610.725	1.609.900
Terres utilisées pour l'agriculture	1.610.725	1.609.900
<b>TOTAL</b>	<b>2.008.633</b>	<b>2.005.005</b>

- **Climatologie**

Le climat de la wilaya Tiaret est type semi aride. En effet le régime pluviométrique est caractérisé par une irrégularité interannuelle et saisonnière (pluie en hiver, sécheresse en été), avec une précipitation moyenne annuelle estimée à 475,1 mm. La majorité des précipitation se concentre entre Novembre et Mars avec une grande variabilité intra annuelle et interannuelle ; les régimes thermiques sont relativement contrastés de type continental avec une saison estivale alternant avec une saison hivernale pluvieuse, fraîche sinon froide.

- **Etages bioclimatiques**

Le système d'Emberger permet la classification des différents types de climats méditerranéens. Ceux-ci sont caractérisés par des saisons thermiques nettement tranchées et à pluviosité concentrée sur la période froide de l'année. L'été est la saison sèche. Ce quotient est défini par la formule :

$$Q = 2000P \frac{P}{M^2} - m^2$$



Dans laquelle  $M$  est la moyenne des maxima du mois le plus chaud et  $m$  celle des minima du mois le plus froid. La valeur  $Q$  est d'autant plus élevée que le climat est plus humide. Notons que  $M$  et  $m$  sont exprimés en degré Kelvin.

Ce quotient a été modifié par STEART en 1969, pour donner la nouvelle formule :

$$Q2 = 3,43 \frac{P}{M - m}$$

L'application de cette formule dans la région de Tiaret donne :  $Q2 = 35,42$ , ce qui nous permet de la classer dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid selon les climogrammes d'EMBERGER. La moyenne annuelle des précipitations sur période de dix ans (1996/2006) est de 475,1 mm.

### **3- Aspect socio-économique**

La wilaya recèle d'importantes potentialités naturelles et notamment 1.609.900 ha de terres agricoles, 142.966 Ha de zone steppique et d'une zone forestière de 142.422 ha. Une pluviométrie moyenne annuelle de 300 à 500 mm par an.

Elle est caractérisée par l'existence de dix retenues collinaires d'une capacité de 1.500.000 m<sup>3</sup> et six autres en voie de réalisation dont la capacité est de 4.700.000 m<sup>3</sup>. La production laitière dans la wilaya est de 30.000.000 litres. La production végétale est dominée par la production céréalière notamment le blé tendre, le blé dur, l'orge et l'avoine. La wilaya dispose aussi d'un cheptel estimé à 1.190.000 têtes ovines et 37.652 têtes ovines et enfin de 115.957 têtes caprines (DSA, 2008).

# Matériel et méthode

## MATERIEL ET METHODES

La résolution des problèmes d'érosion hydraulique nécessite l'utilisation de méthodes de mesure pour analyser et quantifier le ruissellement et les quantités de sédiments. Parmi ces méthodes la mesure du ruissellement peut être abordée à partir de simulation de pluie. La généralisation de la pratique des simulateurs de pluies pour mesurer les risques de l'érosion hydrique nécessite la simplification et l'amélioration du matériel de simulation.

### 1- Dispositif expérimental

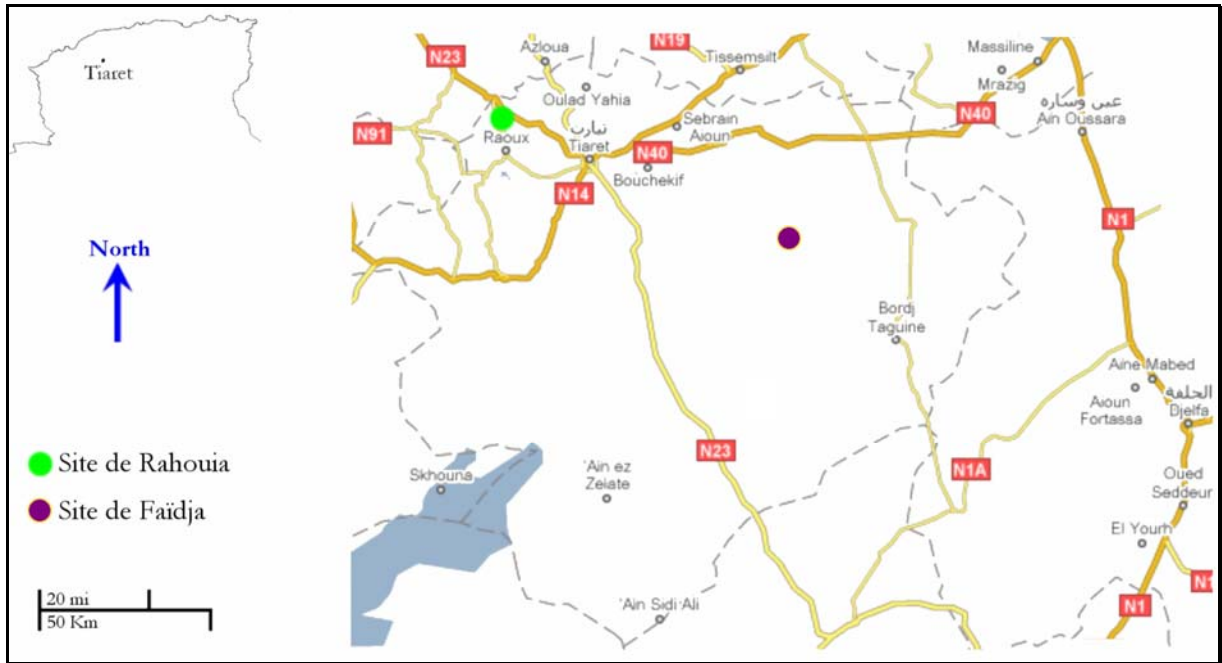
- **Choix des sites expérimentaux**

L'expérimentation est réalisée sur huit petites parcelles réparties sur deux sites expérimentaux ; dans la région de Rahouia dans le Nord de la wilaya de Tiaret caractérisée par les vertisols très fertiles et dans la région de Faïdja (Radem) caractérisée par la dominance des sols calcimagnésiques (Fig. 4).

Le choix de ces deux régions est engendré afin d'évaluer les risques et les caractéristiques de l'érosion hydraulique comparativement dans un milieu céréalier et dans un milieu steppique. Les types de sols choisis font partie des classes caractéristiques des régions semi-arides :

a) *Sols calcimagnésiques* : recouvrent la grande partie des sols de la wilaya surtout dans la région Sud qui est soumise à une forte érosion hydrique favorisée par la nature des sols, la topographie et le caractère souvent orageux et agressif des variables climatiques, ils sont caractérisés par la présence en quantité importante de Carbonate de Calcium ou de Calcium, Magnésium, ou de Sulfate de Calcium (Aubert, 1965).

b) *Sols vertiques ou vertisols* : sont localisés principalement dans la partie Nord de la wilaya, ces sols sont relativement résistants aux agressions climatiques. Leur structure est polyédrique à prismatique large la macroporosité est très faible et la cohésion, ainsi que la consistance, très fortes lorsque le sol est sec. Ce sont des sols fréquemment très argileux et à dominance d'argile gonflante, de couleur en général foncée relative à leur teneur en matière organique ; le complexe absorbant est souvent très riche en Mg (Aubert,1965).



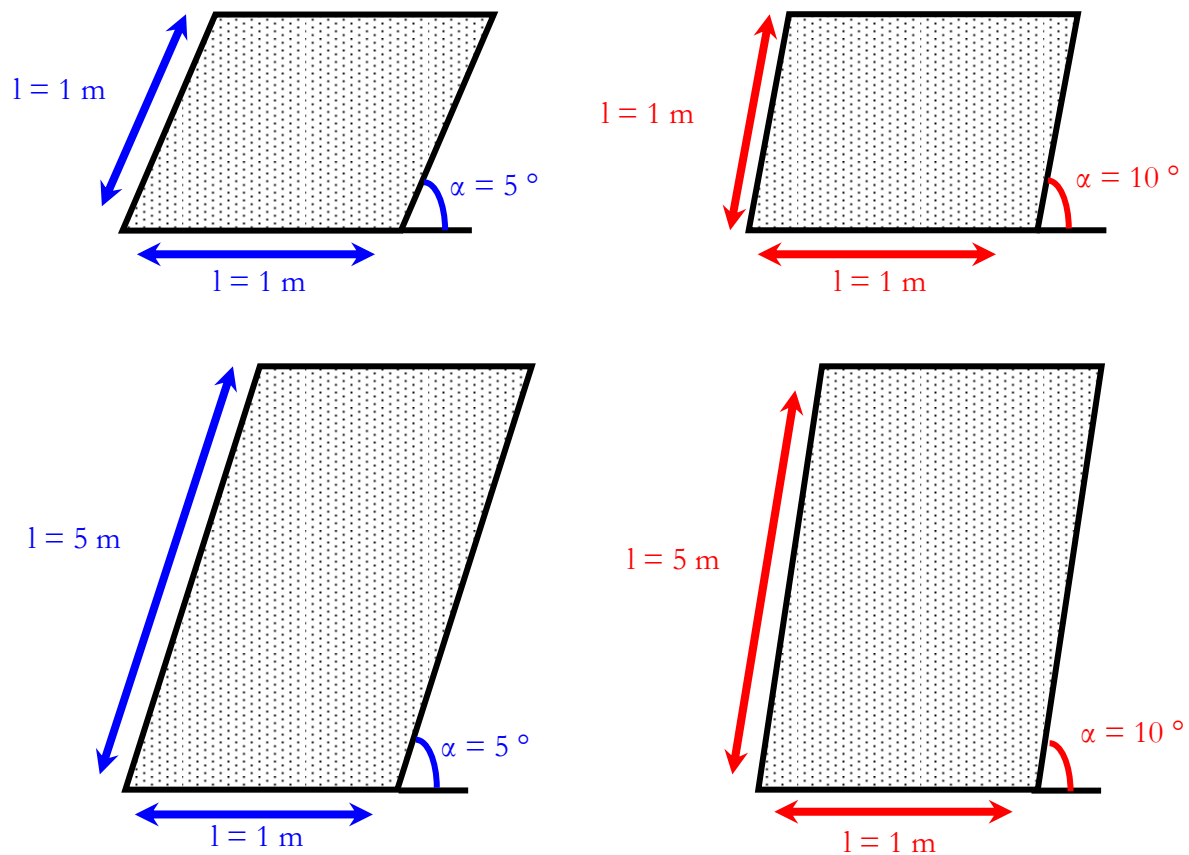
**Figure 5-** Localisation des sites expérimentaux (Google Earth, 2009).

- **Conception des parcelles expérimentales**

L'expérimentation est réalisée sur huit petites parcelles réparties sur les deux sites expérimentaux ; quatre parcelles sont choisies dans la région de Rahouia dans le Nord de la wilaya de Tiaret par contre, les autres parcelles sont situées dans la région de Faïdja.

Les parcelles ont une largeur fixe de 1m et deux longueurs différentes ; deux parcelles ont une longueur de 1m tandis que les deux autres parcelles ont une longueur de 5m. Le choix de ces deux longueurs est fait pour mettre en évidence l'effet de ce facteur sur les paramètres mesurés dans cette expérience.

Deux inclinaisons des pentes les plus dominantes dans la wilaya de Tiaret sont sélectionnées ( $5^\circ$  et  $10^\circ$ ) à l'aide d'un appareil numérique de type LEICA 1600 avec l'assistance d'un bureau d'étude en génie civil.



**Figure 6-** Schéma des parcelles expérimentales conçues dans chaque site expérimental.

## 2- Caractérisation physico-chimique des sols

Les caractéristiques physico-chimiques du sol ; la structure, la texture et la composition lui confèrent des caractéristiques particulières qui influencent les phénomènes d'infiltration et de rétention des éléments traces métalliques.

Après les prélèvements, les échantillons sont d'abord séchés à l'air libre puis à  $40^\circ\text{C}$  avant d'être tamisés à 2 mm, selon la norme NF ISO 11 464 de prétraitement des sols pour analyses physicochimiques (AFNOR, 1999).

Des échantillons des sols sont ramenés au laboratoire de l'Institut National des Sols, Irrigation et Drainage de Matmar à Relizane. Une analyse physico-chimique est procédée pour la détermination des sols étudiés ;

- **Étude granulométrique**

La granulométrie est déterminée par la méthode de pipette de Robinson qui consiste à la destruction de la matière organique du sol par de l'eau oxygénée et à la dispersion des argiles par l'hexamétaphosphate de sodium.

La détermination de la distribution de la taille des particules, ou composition granulométrique du sol, est appelée analyse granulométrique. La séparation des particules par groupes de taille est réalisée par tamisage, au travers de tamis.

La détermination des différentes classes de particules minérales identifiées s'effectue selon leur taille. L'échelle utilisée est celle d'Atterberg qui donne 5 classes de particules :

Argiles : 0 à 2  $\mu\text{m}$ ,

Limons fins : 2 à 20  $\mu\text{m}$

Limons grossiers : 20 à 50  $\mu\text{m}$ ,

Sables fins : 50 à 200  $\mu\text{m}$ ,

Sables grossiers : 200  $\mu\text{m}$  à 2mm.

L'analyse consiste en une mise en suspension dans l'eau des particules après destruction de la matière organique et des agrégats et dispersion des particules d'argile. Les particules sont, par hypothèse, supposées avoir toutes la même densité et une forme sphérique. Cette suspension étant stabilisée dans des conditions bien définies, la séparation des différentes classes s'effectue par sédimentation gravitaire pour les fractions fines (<50 $\mu\text{m}$ ) et par tamisage pour les fractions supérieures (CODE CATALOGUE : 105 CODE INTERNE : PROCEDURE N° PS0902).

La proportion de particules fines est une information importante, car elle gouverne certaines propriétés physiques du sol comme la perméabilité ou la sensibilité à des entraînements mécaniques (Conil et Clozel, 1999).

Les caractéristiques physico-chimiques, ont été déterminées selon les normes françaises en vigueur pour l'analyse des sols (AFNOR, 1999). En reportant les pourcentages de sables, limons et argiles dans le triangle de texture proposé par le Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA) (Bonneau et Souchier, 1979), on peut déterminer la texture du sol.

- **Le pH eau**

Cette méthode instrumentale de mesure en routine du pH est appliquée à tous les types de sols séchés à l'air. La mesure s'effectue à l'aide d'une électrode de verre combinée d'un pH-mètre trempant dans une suspension de sol dans un rapport (M/V) de 1/2.5 dans l'eau (pH H<sub>2</sub>O).

Le principe de la méthode consiste à réaliser une mise en équilibre ionique entre la phase solide et la phase liquide. La mesure est effectuée dans des conditions déterminées (rapport sol/solution=1/2,5) de la différence de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence plongées dans une solution aqueuse en équilibre avec l'échantillon de sol (CODES CATALOGUE : 108 et 109 CODE INTERNE: PROCEDURE N° PS0919).

- **La conductivité électrique**

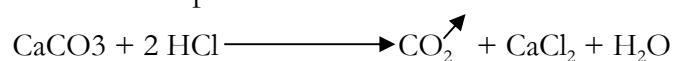
La conductivité électrique est mesurée par un conductimètre en mS/cm sur une suspension de terre d'un rapport 1 volume sol : 5 volumes eau.

La mesure est réalisée à l'aide d'un conductivimètre et la lecture est directe selon l'échelle de lecture sélectionnée. L'appareil est étalonné par rapport à une solution de KCl à 56mg/l dont la conductibilité est de 100 µS/cm à 25°C (CODES CATALOGUE : 125 CODE INTERNE : ACS).

- **Le calcaire total**

Le calcaire total est déterminé par le calcimètre de Bernard en décomposant les bicarbonates du sol par le HCl (6N) et en mesurant le volume du CO<sub>2</sub> dégagé. Le volume de CO<sub>2</sub> dégagé est converti sur une gamme d'étalonnage de CaCO<sub>3</sub>. La détermination des carbonates dans des échantillons de sol par la méthode volumétrique s'applique à tous types d'échantillons de sols séchés à l'air dont le pH est supérieur à 7.00.

Le principe est d'ajouter l'acide chlorhydrique à l'échantillon de sol, pour décomposer tous les carbonates présents.



Le volume de gaz carbonique dégagé est mesuré à l'aide d'un calcimètre BERNARD et est comparé au volume de gaz carbonique produit par du carbonate de calcium pur. Pour éviter de faire des corrections pour des différences de température et de pressions, toutes les mesures sont réalisées dans les mêmes conditions.

La teneur en carbonate est exprimée par la concentration équivalente de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). En fait, on mesure tous les carbonates et bicarbonates présents dans l'échantillon. On trouve le plus fréquemment les carbonates sous forme de calcite et d'aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) mais on peut les trouver également sous forme de dolomie ( $\text{Ca, Mg (CO}_3)_2$ ), de sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ) et dans les sols arides des régions sèches, de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3, 10\text{H}_2\text{O}$ ) (CODE CATALOGUE : 110 CODE INTERNE : PROCEDURE N° PS0905).

### 3- Protocole expérimental

- **Démarche expérimentale**

L'humidité initiale du sol est un facteur essentiel pour le déclenchement de l'écoulement superficiel (Le Buissonnet, 2002), nous avons tenu à assurer la saturation du sol en eau avant chaque essai. Une pluie est appliquée sur le sol durant 30mn environ jusqu'à la saturation du sol et le déclenchement de l'écoulement superficiel (Asseline et *al.*, 1993).

Un intervalle de temps de 90mn est respecté entre le temps de saturation des sols ou la fin de la simulation précédente ( $t_0$ ) et le temps de déclenchement de la simulation suivante ( $t_1$ ) qui correspond au temps de ressuyage (Joerin, 2000).

Chaque simulation est maintenue pendant 30mn. En moyenne, quatre répétitions de mesure sont effectuées. Un épisode de pluie simulée est appliqué avec des intensités réglées sur les deux parcelles.

- **Le simulateur de pluie**

La simulation de pluie consiste à produire une averse artificielle (pluie standard approchant les caractéristiques d'une pluie naturelle) sur une parcelle, afin de mesurer le ruissellement et les pertes en terre induits. Plusieurs types de simulateur de pluie existent, allant d'environ dix à trente mètres de hauteur, et peuvent arroser des surfaces approchant une cinquantaine de mètres carré (Benkhelil et *al.*, 2002).



Ces types d'appareil présentent plusieurs inconvénients d'ordre pratique, pour cela en 1975 au Etats-Unis, hydrologues et pédologues ont mis au point un mini-simulateur de pluie permettant d'étudier sur quelques mètres carré les réactions du sol aux précipitations en fonction de ses caractéristiques et de la nature de la végétation.

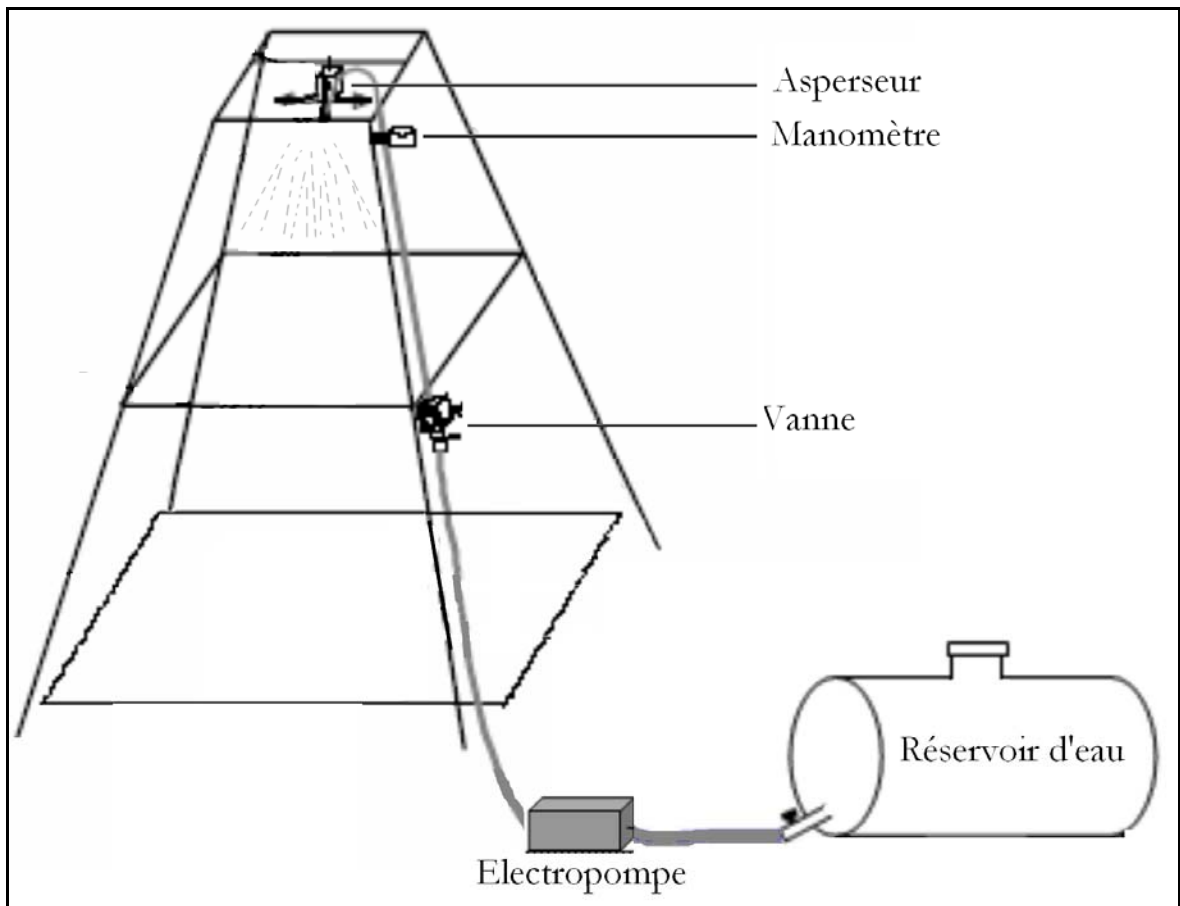
Cette idée de simulateur fut exploitée et développée par l'ORSTOM dans le cadre de leurs travaux de recherches (Asseline et Valentin, 1978). Des modifications d'ordre pratique visaient essentiellement à rendre le matériel plus maniable sont apportées. Cet appareil modifié a été utilisé par plusieurs organismes tels que le CEMAGREF, l'INA et l'INRA.

Le simulateur de type ORSTOM à une structure pyramidale de 3.50m de haut et arrose une surface de l'ordre de quelques m<sup>2</sup> centrée sur la verticale du gicleur sert de zone de mesure.

Le simulateur (Fig. 6) devra reproduire des pluies pour lesquelles l'intensité couvre une gamme étendue et peut être varié.

Notre simulateur de pluie aura pour caractéristiques : un support d'environ 3,60 m de haut, un asperseur, une buse monté sur un bras mobile, un dispositif d'aspersion permettant le réglage de l'intensité de la pluie, une électropompe à débit variable, un canal collecteur pour récupérer l'eau ruisselée.

Le simulateur de pluie développé se compose essentiellement de deux parties (Fig. 6) : un système d'aspersion des gouttes d'eau et un système de récupération des flux.



**Figure 7-** Schéma du simulateur de pluies ORSTOM (Joerin, 2000).

Le dispositif conçu permet de produire des pluies artificielles sur les parcelles expérimentales à l'aide d'un asperseur suspendu à 3,60 m de hauteur de la surface de la terre et maintenu par un support métallique. Ce simulateur génère des pluies artificielles d'intensités prédéterminées tout en respectant les caractéristiques des pluies naturelles (Demmak, 1982).

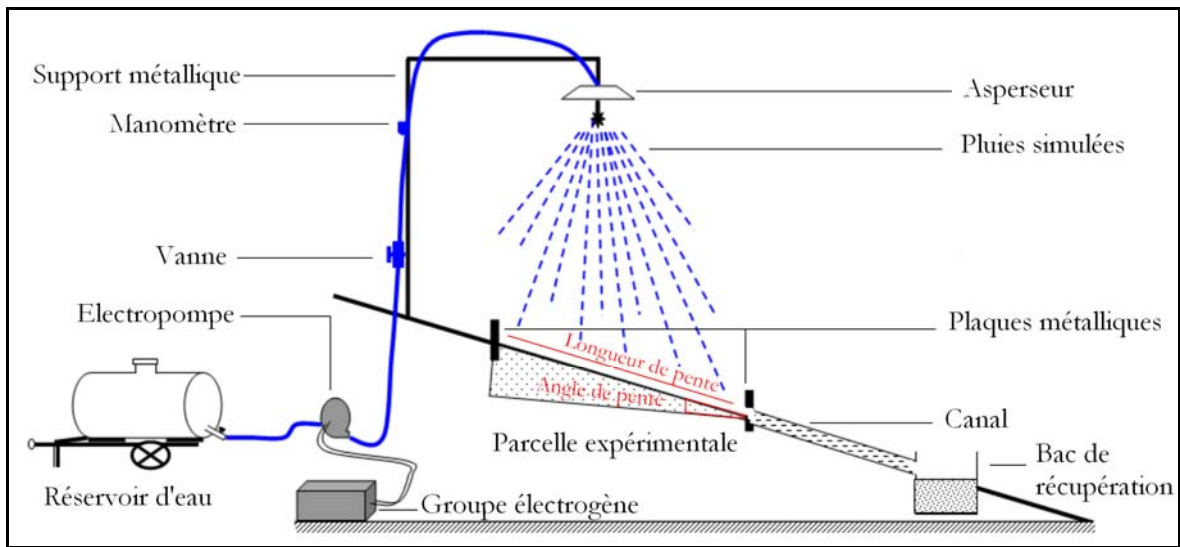


Figure 8- Schéma du dispositif expérimental.

- **Intensités pluvieuses**

L'eau est fournie sous pression par une motopompe. La pression est contrôlée par un manomètre et une vanne, la pluie est réglable sur trois intensités pluvieuses ; 10mm/h, 20 mm/h et enfin 30mm/h.

La surface arrosée par le simulateur de pluie, comprend la parcelle d'essai délimitée par le cadre et une frange extérieure permettant d'assurer l'uniformité des charges dans le sol à l'intérieur de la parcelle expérimentale.

- **Récupération de l'eau ruisselée et des sédiments**

Les parcelles sont délimitées par des tôles métalliques de 20 cm de hauteur implantées à 10 cm dans le sol. La plaque métallique située à la base de chaque parcelle expérimentale est perforée et reliée à un canal en PVC de 2 m de longueur pour acheminer les eaux de ruissellement de la parcelle délimitée vers un bac de récupération, de dimensions de 70 cm x 100 cm x 100 cm, ancré à l'aval à 50 cm dans le sol loin du jet du simulateur, pour ne récolter que les eaux d'écoulement dans la parcelle expérimentale et qui sont récupérées par la suite dans un récipient gradué pour mesurer le volume des eaux ruisselées.

Les eaux d'écoulement sont collectées et mises dans des récipients gradués. Les échantillons sont immédiatement pesés pour estimer par la suite le volume d'eau écoulé qui est généralement exprimé en pourcentage de l'eau précipitée (%).

Les échantillons sont mis au repos pendant 24h afin de permettre la séparation de la phase liquide et la phase solide précipitée. Les sédiments collectés sont séchés par le passage à l'étude pendant 48 heures sous une température de 105°C. Les résidus sont pesés par la suite à l'aide d'une balance analytique de précision, et de ce fait, les pertes en sol sont estimées.

#### **4- Analyse statistique**

Les résultats obtenus au cours de cette expérimentation sont soumis à plusieurs tests statistiques dans un intervalle de confiance de  $\alpha=95\%$ ;

Une analyse de la variance est procédée sur deux types de sol (*vertisol* et *calcimagnésique*) de deux longueurs de pente (1m et 5m) et deux inclinaisons de pente (5° et 10°) soumises à trois intensités pluvieuses (10mm/h, 20mm/h et 30mm/h).

Une analyse de corrélation basée sur le coefficient de *Pearson* entre les différents paramètres mesurés a été réalisée pour mesurer le degré d'association entre ces variables.

Les méthodes de régression statistiques sont ainsi appliquées dans la création des modèles qui permettent la prévision dans le futur des variables modélisées.

L'analyse en composante principale a permis aussi de bien illustrer le degré d'association entre les différentes variables étudiées.

# Résultats

## RESULTATS

La démarche abordée dans la présente étude vise à exprimer la vulnérabilité de deux milieux distincts, l'un steppique et l'autre céréalier, à travers la quantification des dégâts de l'érosion hydrique en matière d'écoulement superficiel, concentrations des sédiments et pertes en sol dans une première approche, puis, à l'élaboration des modèles statistiques stochastiques permettant de prédire les différents variables mesurées dans des conditions similaires.

Dans son ensemble, cet écrit illustre ainsi une étude comparative, traite l'érosion hydrique, entre l'environnement céréalier et l'environnement steppique dont dérive le choix des deux régions, ce travail permet de divulguer la sensibilité et la vulnérabilité des milieux steppiques fragiles, le sol calcimagnésique représente dans ce cas l'environnement steppique des régions Sud de la wilaya par contre le vertisol représente l'environnement céréalier des régions semi-arides situées dans le Nord de la wilaya de Tiaret :

### I- Caractérisation physico-chimiques des sols

Les principales caractéristiques des échantillons étudiés sont présentées dans le tableau 5. L'analyse des résultats montre que les sols calcimagnésiques ne contiennent pas beaucoup d'argile (16 %) comparativement aux vertisols (33 %), cet élément est indispensable à la stabilité structurale des sols. Les sols calcimagnésiques sont relativement riches en sables (33 %) et limon (51 %) alors que les teneurs de ces dernières composantes sont de l'ordre de 23 % et 44 % respectivement dans les vertisols.

Ce résultat se traduit par un volume trop important de la macroporosité dans le premier sol que dans le deuxième, un élément très important conditionne l'infiltration et le ruissellement des eaux pluviales. La texture définie de notre sol calcimagnésique est limono-sabloneuse, qu'elle est argilo-limoneuse dans le vertisol.

La teneur en calcaire total est beaucoup plus prononcée dans le sol calcimagnésique (24,15) que dans le vertisol (18,8), l'une caractéristique des sols steppiques, ainsi, le pH est trop élevé dans ces derniers (8,24) comparativement aux vertisols (6,5).

**Tableau 5-** Caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés.

	<b>Sol calcimagnésique</b>	<b>Vertisol</b>
	<b>Argile (%)</b>	16
<b>Granulométrie</b>	<b>Limon (%)</b>	51
	<b>Sable (%)</b>	33
		23
<b>Calcaire total (g C/kg)</b>	24,15	18,8
<b>pH</b>	8,24	6,5
<b>Matière organique (%)</b>	0,9	2
<b>Conductivité électrique (mS/cm)</b>	0,34	0,79
<b>Porosité</b>	0.540	0,411
<b>Cailloux</b>	10	7

La matière organique est abondante dans les vertisols (2%) qui présente une conductivité électrique (0,79 mS/cm) supérieure à celle enregistrée dans le sol calcimagnésique (0,34 mS/cm) qui exprime un faible taux en matière organique (0,9%).

La porosité exprimée dans les sols calcimagnésiques est de l'ordre de 0,54 avec une teneur en cailloux de 10 par contre, elle est de l'ordre de 0,41 dans les vertisols avec une teneur en cailloux autour de 7.

## II- Quantification de l'érosion hydrique

L'analyse des résultats acquis au cours de la présente étude concernant les paramètres retenus et mesurés dans les parcelles d'expérimentation ; représentés par l'écoulement superficiel, les pertes en sol et la concentration en sédiments sous l'influence des intensités graduelles de pluies artificielles appliquées sur deux types de sol à deux inclinaison et deux longueurs de pente, dévoile de grandes fluctuations des valeurs enregistrées pour les variables étudiées.

**Tableau 6**– Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de l'écoulement, la concentration en sédiments et les pertes en sol dans deux types de sols sous différentes intensités pluvieuses en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	Écoulement		Concentration en sédiments		Pertes en sol	
	F.Obs	P	F.Obs	P	F.Obs	P
Intensité de pluie	986,35	***0	5 230	***0	84 690	***0
Longueur de pente	2,37	0,13	8 646	***0	148 000	***0
Pente	514,82	***0	1 162	***0	24 270	***0
Type de sol	65,03	***0	406,80	***0	8 972	***0
Intensité de pluie * Longueur de pente	61,07	***0	3 697	***0	64 010	***0
Intensité de pluie * Pente	11,01	***0	390,52	***0	6 722	***0
Intensité de pluie * Type de sol	1,36	0,26	158,57	***0	2 425	***0
Longueur de pente * Pente	5,51	*0,02	971,43	***0	15 290	***0
Longueur de pente * Type de sol	1,75	0,19	341,59	***0	5 628	***0
Pente * Type de sol	1,71	0,19	39,02	***0	1 133	***0
Intensité de pluie * Long. de pente * Pente	0,64	0,53	333,26	***0	6 467	***0
Intensité de pluie * Long. de pente * Type de sol	2,97	0,06	142,46	***0	2 327	***0
Intensité de pluie * Pente * Type de sol	6,14	***0	29,44	***0	274,63	***0
Longueur de pente * Pente * Type de sol	3,98	*0,05	33,60	***0	696,46	***0
Intensité.pluie * Long. de pente * Pente * Type.sol	1,29	0,28	31,56	***0	258,70	***0

\* : Variation significative (P<0.05)

\*\* : Variation hautement significative (P<0.01)

\*\*\* : Variation très hautement significative (P<0.001)

L'écoulement superficiel s'avère fortement lié à l'intensité de pluie (P<0,001\*\*\*) et l'inclinaison de la pente (P<0,001\*\*\*) dans les deux types de sol choisis (P<0,001\*\*\*) ainsi qu'à son interaction (P<0,001\*\*\*) tandis que la longueur des pentes seule n'a pas d'effet statistiquement significatif (P>0,05) sur ce paramètre. L'analyse de la variance dévoile des variations statistiques très hautement significatives (P<0,001\*\*\*) constatées pour les variables représentées par la concentration des sédiments et les pertes en sol mesurées sous l'effet des différentes sources de variabilité notant l'intensité de pluie, l'inclinaison et la longueur de pente ainsi que le type de sol.



### 1- Évolution du taux d'écoulement superficiel en fonction de la pente

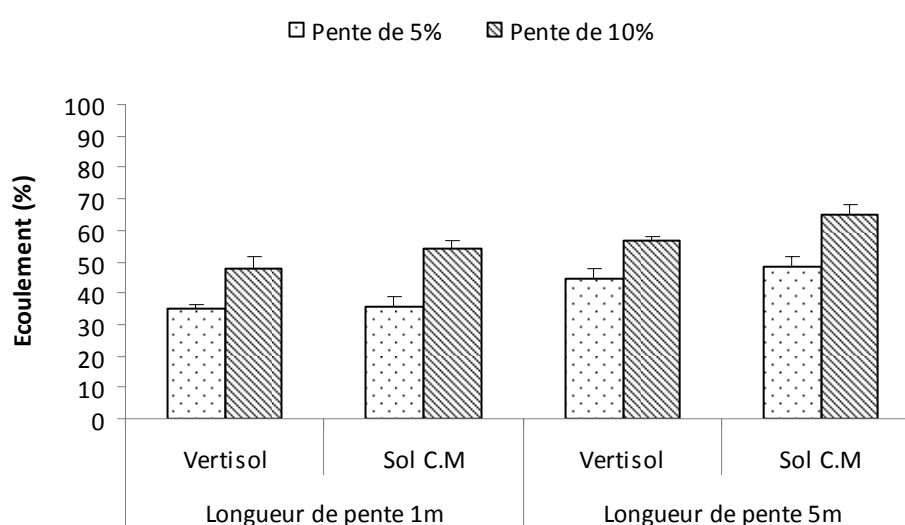
- Sous l'intensité pluvieuse de 10 mm/h

L'analyse statistique des résultats obtenus indique que l'écoulement superficiel sous l'intensité de pluie de 10 mm/h est variable entre les deux types de sol ( $P < 0.01^*$ ) et s'accroît avec l'inclinaison ( $P < 0.001^{**}$ ) et la longueur de la pente ( $P < 0.001^{**}$ ). Or, l'interaction entre les différentes sources de variabilité n'exprime aucun effet statistiquement significatif ( $P > 0.05$ ) sur ce paramètre.

**Tableau 7**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	83,83	***0
Pente	168,52	***0
Type de sol	17,59	***0,001
Longueur de pente * Pente	0,31	0,587
Longueur de pente * Type de sol	1,18	0,293
Pente * Type de sol	3,94	0,065
Longueur de pente * Pente * Type de sol	0,02	0,905

L'examen de la figure 9 montre clairement que l'écoulement superficiel augmente avec l'inclinaison et la longueur de la pente bien que les valeurs restent supérieures dans les sols calcimagnésiques que dans les vertisols.



**Figure 9**- Évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Quand la longueur de pente est 1m, l'écoulement augmente de  $34.73 \pm 1.27$  % sous la pente de 5% à  $47.9 \pm 3.75$  % lorsque la pente devient 10% sur le vertisol, dans le sol calcimagnésique, l'écoulement évolue de  $35.89 \pm 2.92$  % à  $53.91 \pm 2.53$  % dans les mêmes conditions expérimentales.

Lorsque la longueur de pente devient 5m, l'écoulement augmente de  $44.53 \pm 3.16$  % sous la pente de 5% à  $56.7 \pm 1.44$  % lorsque la pente devient 10% dans le vertisol et pareillement de  $48.47 \pm 3.26$  % à  $64.93 \pm 3.23$  % dans le sol calcimagnésique.

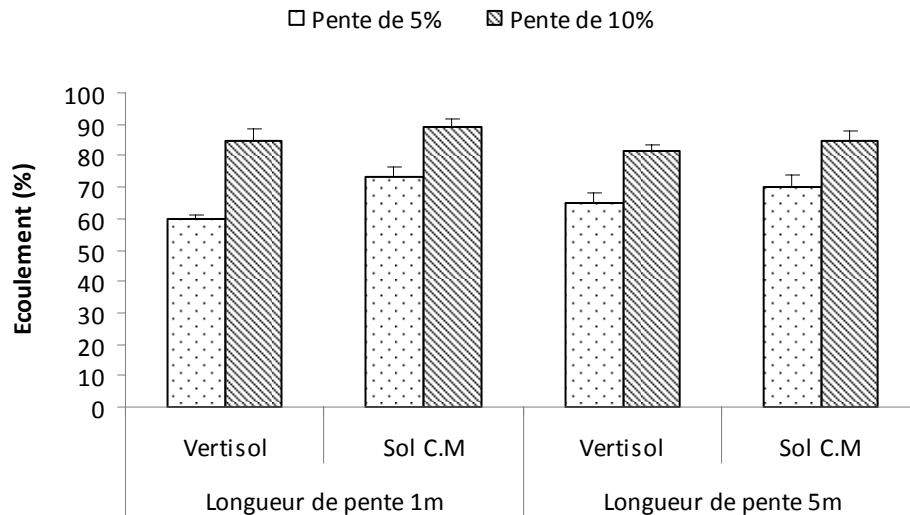
- **Sous l'intensité pluvieuse de 20 mm/h**

L'analyse de la variance indique que l'écoulement superficiel sous cette intensité pluvieuse est fonction de l'inclinaison de la pente ( $P < 0.001^{***}$ ) et du type de sol ( $P < 0.001^{***}$ ) ainsi de leur interaction ( $P < 0.05^*$ ). En outre, les autres facteurs et leurs interactions ne provoquent aucune variation significative ( $P > 0.05$ ) du point de vue statistique.

**Tableau 10**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	1,043	0,32
Pente	191,122	***0
Type de sol	25,735	***0
Longueur de pente * Pente	3,435	0,08
Longueur de pente * Type de sol	3,629	0,07
Pente * Type de sol	4,798	*0,04
Longueur de pente * Pente * Type de sol	1,701	0,21

Les résultats illustrés dans la figure 10 indiquent que l'écoulement superficiel augmente avec l'inclinaison et la longueur de la pente sous cette intensité de pluies bien que les valeurs inscrites demeurent plus élevées dans les sols calcimagnésiques.



**Figure 11-** Évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

L'écoulement superficiel augmente significativement de  $59.87 \pm 3.99$  % sous la pente de 5% à  $84.71 \pm 2.08$  % sous la pente de 10% à une longueur de pente 1 m sur le vertisol.

Les valeurs enregistrées sur le sol calcimagnésique sont plus élevées ; l'écoulement s'accroît de  $73.44 \pm 3.11$  % à  $89.22 \pm 1.05$  % sous les mêmes commodités.

La permutation de la longueur de pente à 5m provoque une augmentation des valeurs inscrites pour l'écoulement superficiel de  $65.1 \pm 3.83$  % sous la pente de 5% à  $81.76 \pm 2.64$  % sous la deuxième pente dans le vertisol, également, dans le sol calcimagnésique, les valeurs évoluent de  $70.36 \pm 1.95$  % à  $84.72 \pm 4.92$  %.

Il est à noter que le taux de l'écoulement superficiel dans ce cas est plus important lorsque la longueur de pente est courte puisqu'il diminue lorsqu'on augmente l'inclinaison de la pente pour le vertisol et dans les deux angles de pente pour le sol calcimagnésique.

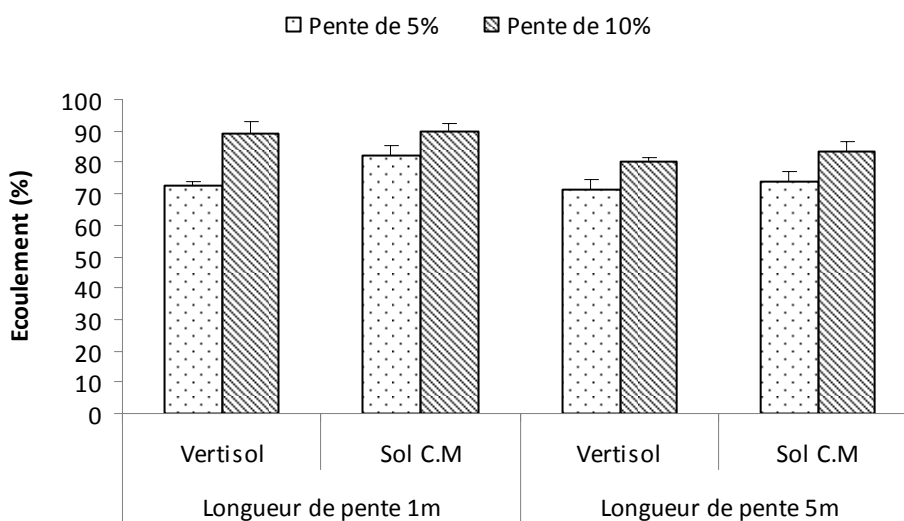
• **Sous l'intensité pluvieuse de 30 mm/h**

Le traitement statistique par l'analyse de la variance des résultats obtenus montre des différences statistiquement significatives expliquant des fortes dépendances entre le taux de l'écoulement superficiel et le type de sol ( $P < 0.001^{***}$ ), l'inclinaison ( $P < 0.001^{***}$ ) et la longueur de pente ( $P < 0.001^{***}$ ). Les interactions entre les différentes sources de variabilité ne sont pas toujours évidentes et leurs effets ne sont pas toujours statistiquement significatifs ( $P > 0.05$ ) sur le paramètre étudié.

**Tableau 9**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	59,12	***0
Pente	169,03	***0
Type de sol	24,59	***0
Longueur de pente * Pente	3,18	0,093
Longueur de pente * Type de sol	2,62	0,125
Pente * Type de sol	5,76	*0,029
Longueur de pente * Pente * Type de sol	7,74	**0,013

L'écoulement superficiel s'accroît significativement de  $72,67 \pm 1,53$  % sous la pente de 5% à  $88,97 \pm 0,81$  % sous la pente de 10 % à une longueur de pente 1 m sur le vertisol. Les valeurs inscrites sur le sol calcimagnésique sont plus éminentes ; l'écoulement s'accroît de  $82,27 \pm 4,53\%$  à  $83,32 \pm 1,16$  % sous les mêmes commodités.



**Figure 12-** Évolution de l'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Le changement de la longueur de pente à 5m provoque une augmentation des valeurs inscrites pour l'écoulement superficiel de  $71,44 \pm 0,45$  % sous la pente de 5% à  $80,28 \pm 1,18$  % sous la deuxième pente dans le vertisol, également, dans le sol calcimagnésique, les valeurs évoluent de  $73,85 \pm 1,50$  % à  $83,32 \pm 1,16$  %.

## 2- Évolution de la concentration en sédiments en fonction de la pente

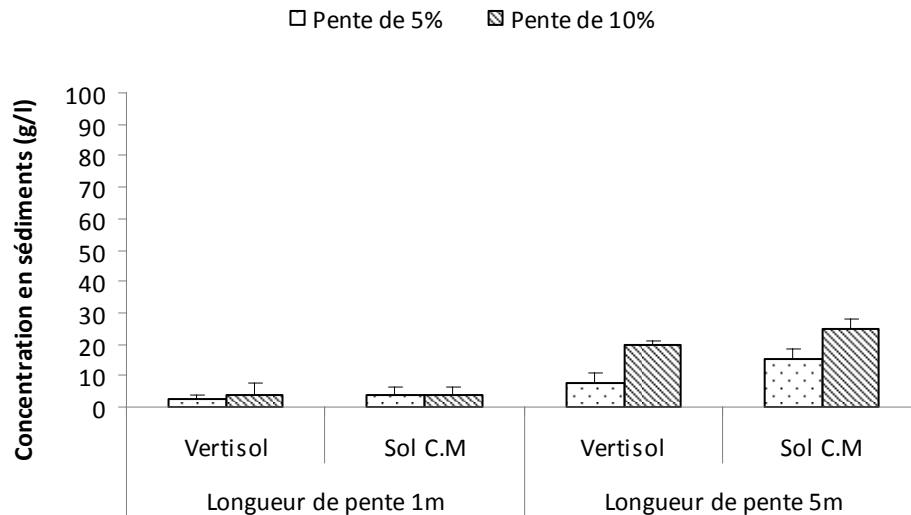
### • Sous l'intensité pluvieuse de 10 mm/h

L'analyse statistique des résultats obtenus montre que la concentration en sédiments sous l'intensité de pluie de 10 mm/h est variable entre les deux types de sol ( $P < 0.001^{***}$ ) et s'accroît avec l'inclinaison ( $P < 0.001^{***}$ ) et la longueur de la pente ( $P < 0.001^{***}$ ). Ainsi, l'interférence entre les différentes sources de variabilité exprime certainement un effet statistiquement significatif ( $P < 0.001^{***}$ ) sur ce paramètre.

**Tableau 10-** Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	637,67	***0
Pente	118,908	***0
Type de sol	38,404	***0
Longueur de pente * Pente	92,629	***0
Longueur de pente * Type de sol	26,938	***0
Pente * Type de sol	2,219	0,156
Longueur de pente * Pente * Type de sol	0,571	0,461

L'examen de la figure 13 montre l'évolution de la concentration en sédiments qui augmente avec l'inclinaison et la longueur de la pente bien que les valeurs restent supérieures dans les sols calcimagnésiques que dans les vertisols.



**Figure 13-** Évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Quand la longueur de pente est 1m, la concentration en sédiments augmente significativement sur le vertisol de  $2,84 \pm 0,20$  g/l sous la pente de 5% à  $3,90 \pm 0,40$  g/l lorsque la pente devient 10%. Dans le sol calcimagnésique, la concentration en sédiments évolue de  $3,76 \pm 0,36$  g/l à  $4,04 \pm 0,59$  g/l dans les mêmes conditions expérimentales.

Lorsque la longueur de pente devient 5m, la concentration en sédiments augmente de  $7,92 \pm 0,37$  g/l sous la pente de 5% à  $19,87 \pm 1,44$  g/l lorsque la pente devient 10% dans le vertisol et pareillement de  $15,08 \pm 0,97$  g/l à  $24,67 \pm 3,06$  g/l dans le sol calcimagnésique.

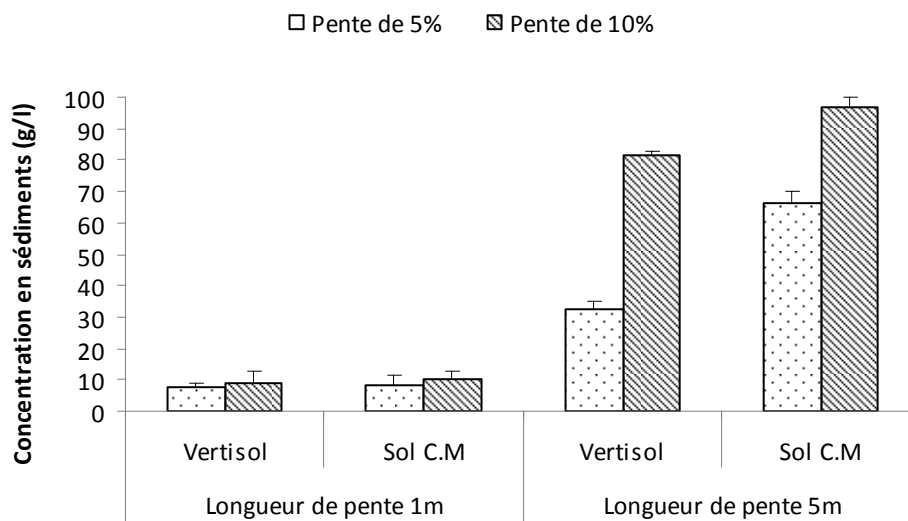
- **Sous l'intensité pluvieuse de 20 mm/h**

L'analyse de la variance indique de grandes dépendances statistiquement significatives indiquant que la concentration en sédiments sous cette intensité pluvieuse est très sensible aux variables de forçage ( $P < 0.001^{***}$ ) ainsi de leur interaction ( $P < 0.001^{***}$ ).

**Tableau 11**– Analyse de la variance à P=5% de l'évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	19730,00	***0
Pente	2312,00	***0
Type de sol	875,88	***0
Longueur de pente * Pente	1959,00	***0
Longueur de pente * Type de sol	767,44	***0
Pente * Type de sol	123,46	***0
Longueur de pente * Pente * Type de sol	124,32	***0

Les résultats illustrés dans la figure 14 indique que la concentration en sédiments augmente avec la longueur de la pente sous cette intensité de pluies bien que les valeurs inscrites demeurent plus élevées dans les sols calcimagnésiques.



**Figure 14**- Évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

La concentration en sédiments augmente significativement de  $7,43 \pm 0,40$  g/l sous la pente de 5% à  $9,07 \pm 0,47$  g/l sous la pente de 10% à une longueur de pente 1 m sur le vertisol. Les valeurs enregistrées sur le sol calcimagnésique sont plus élevées ; la concentration en sédiments s'accroît de  $8,23 \pm 0,70$  g/l à  $9,90 \pm 1,56$  g/l sous les mêmes conditions.

Une fois la longueur de pente a changé à 5m, une augmentation très hautement significatives des valeurs inscrites pour la concentration en sédiments, de  $32,18 \pm 0,99$  g/l sous la pente de 5% à  $81,63 \pm 0,67$  g/l sous la deuxième pente dans le vertisol, également, dans le sol calcimagnésique, les valeurs évoluent de  $66,51 \pm 0,86$  g/l à  $96,75 \pm 1,86$  g/l.

- **Sous l'intensité pluvieuse de 30 mm/h**

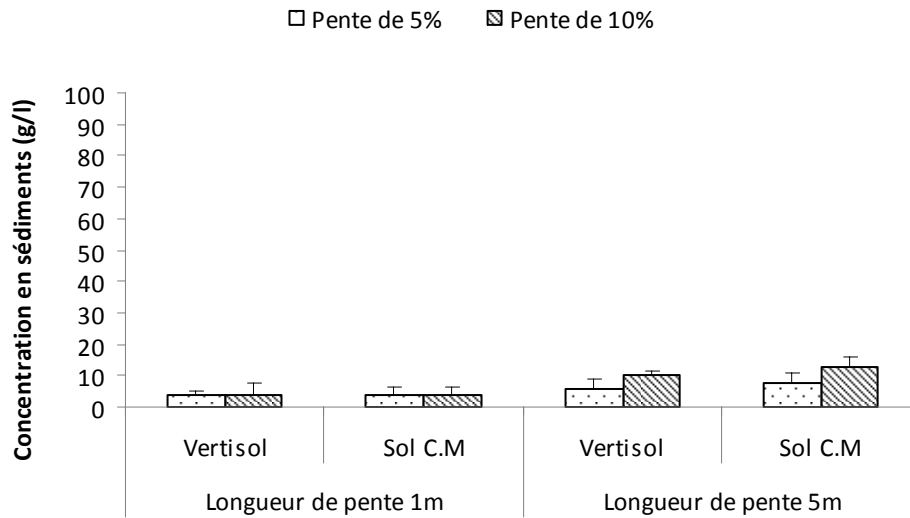
Le traitement statistique par l'analyse de la variance des résultats obtenus montre des différences statistiquement significatives expliquant des fortes dépendances entre la concentration en sédiments et les paramètres de la pente, à savoir la longueur ( $P < 0.001^{***}$ ) et l'inclinaison ( $P < 0.001^{***}$ ), tandis que la variation est légèrement significative en fonction du type de sol ( $P < 0.05^*$ ). Les interactions entre les différentes sources de variabilité ne sont pas toujours évidentes et leurs effets ne sont pas toujours statistiquement significatifs ( $P > 0.05$ ) sur le paramètre étudié.

**Tableau 12**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	107,52	***0
Pente	24,92	***0
Type de sol	5,04	*0,039
Longueur de pente * Pente	21,75	***0
Longueur de pente * Type de sol	4,27	0,055
Pente * Type de sol	0,25	0,624
Longueur de pente * Pente * Type de sol	0,28	0,604

La concentration en sédiment reste presque constante de  $3,64 \pm 0,42$  g/l sous la pente de 5% à  $3,82 \pm 0,23$  g/l sous la pente de 10% à une longueur de pente 1 m sur le vertisol. Les valeurs inscrites sur le sol calcimagnésique sont plus éminentes ; la concentration en sédiments s'accroît légèrement de  $3,74 \pm 0,43$  g/l à  $3,90 \pm 0,86$  g/l sous les mêmes magnificences.





**Figure 15-** Évolution de la concentration en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Le changement de la longueur de pente à 5m provoque une élévation des valeurs enregistrées pour la concentration en sédiments de  $5,78 \pm 0,27$  g/l sous la pente de 5% à  $10,21 \pm 0,72$  g/l sous la deuxième pente dans le vertisol, également, dans le sol calcimagnésique, les valeurs évoluent de  $7,46 \pm 2,15$  g/l à  $12,95 \pm 2,51$  g/l.

### 3- Évolution des pertes en sol en fonction de la pente

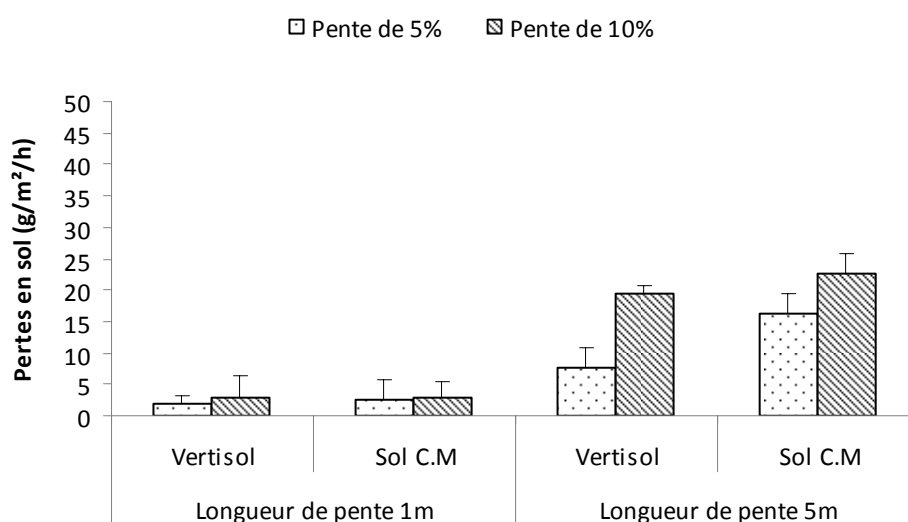
- Sous l'intensité pluvieuse de 10 mm/h

L'analyse statistique des résultats obtenus indique de fortes corrélations sous l'intensité de pluie de 10 mm/h entre les pertes en sol et les variables de forçage indiqués par le type de sol ( $P < 0.001^{***}$ ), l'inclinaison ( $P < 0.001^{**}$ ) et la longueur de la pente ( $P < 0.001^{**}$ ). Toutefois, l'interaction entre les différentes sources de variabilité demeure statistiquement significative ( $P < 0.05^*$ ).

**Tableau 13**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution des pertes en sol ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	531,441	***0
Pente	61,417	***0
Type de sol	26,31	***0
Longueur de pente * Pente	50,199	***0
Longueur de pente * Type de sol	19,998	***0
Pente * Type de sol	5,865	*0,028
Longueur de pente * Pente * Type de sol	3,455	0,082

L'examen de la figure 16 montre que les pertes en sol sont supérieures dans les sols calcimagnésiques que dans les vertisols.



**Figure 16**- Évolution des pertes en sol ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Quand la longueur de pente est 1m, les pertes en sol augmentent légèrement de  $1,97 \pm 0,26$  g/m<sup>2</sup>/h sous la pente de 5% à  $2,76 \pm 0,13$  g/m<sup>2</sup>/h lorsque la pente devient 10% sur le vertisol, dans le sol calcimagnésique, les pertes en sol restent pratiquement inchangées autour de 3 g/m<sup>2</sup>/h.

Lorsque la longueur de pente évolue à 5m, les pertes en sol augmentent de  $7,76 \pm 0,56$  g/m<sup>2</sup>/h sous la pente de 5% à  $19,29 \pm 1,76$  g/m<sup>2</sup>/h lorsque la pente devient 10% dans le vertisol et pareillement de  $16,10 \pm 2,07$  g/m<sup>2</sup>/h à  $22,49 \pm 3,01$  g/m<sup>2</sup>/h dans le sol calcimagnésique.

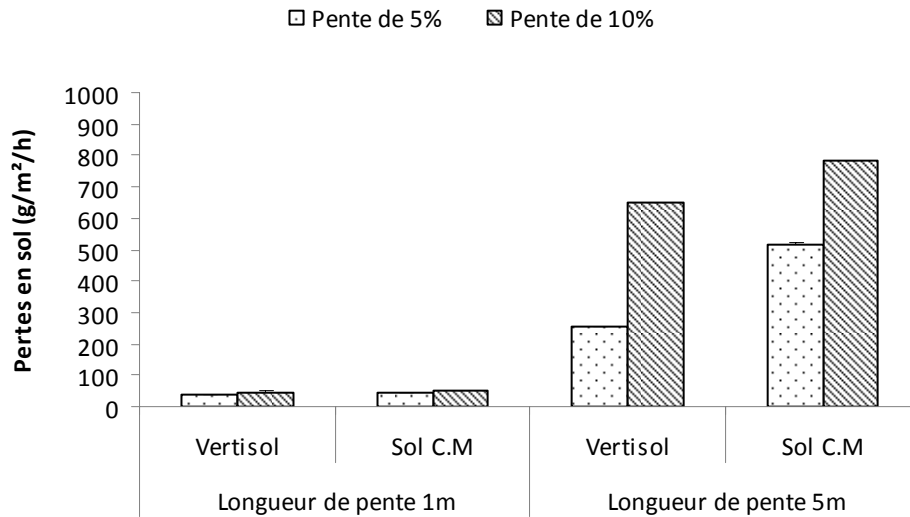
- **Sous l'intensité pluvieuse de 20 mm/h**

L'analyse de la variance indique une forte corrélation entre les facteurs de variabilité et la variable étudiée ( $P < 0.001^{***}$ ) sous cette intensité pluvieuse. Les interactions sont aussi très hautement significatives ( $P < 0.001^{***}$ ) du point de vue statistique.

**Tableau 14**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	326 800	***0
Pente	36 450	***0
Type de sol	13 180	***0
Longueur de pente * Pente	33 180	***0
Longueur de pente * Type de sol	12 030	***0
Pente * Type de sol	1 496	***0
Longueur de pente * Pente * Type de sol	1 381	***0

Les résultats illustrés dans la figure 17 indiquent que les pertes en sol augmentent considérablement avec la longueur de la pente sous cette intensité de pluies beaucoup plus dans les sols calcimagnésiques.



**Figure 17-** Évolution des pertes en sol ( $\text{g/m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse  $20 \text{ mm/h}$  en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Les pertes en sol augmentent significativement de  $38,44 \pm 0,56 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous la pente de 5% à  $47,53 \pm 0,71 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous la pente de 10% à une longueur de pente 1 m sur le vertisol. Les valeurs enregistrées sur le sol calcimagnésique sont plus élevées ; les pertes s'accroissent de  $44,33 \pm 0,60 \text{ g/m}^2/\text{h}$  à  $50,73 \pm 0,85 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous les mêmes commodités.

La permutation de la longueur de pente à 5m provoque une augmentation considérable des valeurs inscrites de  $252,93 \pm 1,45 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous la pente de 5% à  $649,79 \pm 2,91 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous la deuxième pente dans le vertisol, également, dans le sol calcimagnésique, les valeurs évoluent de  $518,41 \pm 1,82 \text{ g/m}^2/\text{h}$  à  $781,18 \pm 4,66 \text{ g/m}^2/\text{h}$ .

Il est à noter que les pertes sont plus importantes lorsque la longueur de pente est longue surtout pour le sol calcimagnésique.

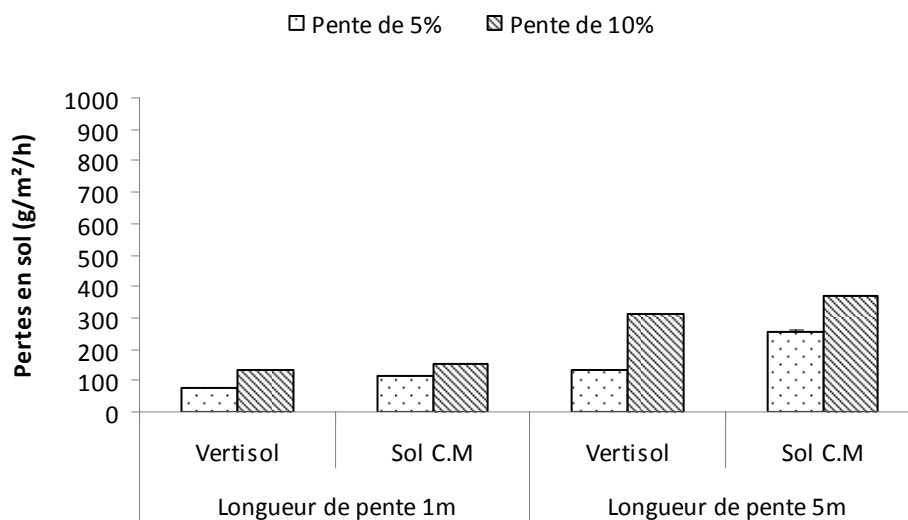
- **Sous l'intensité pluvieuse de  $30 \text{ mm/h}$**

Le traitement statistique par l'analyse de la variance des résultats obtenus montre des différences statistiquement significatives expliquant des fortes dépendances entre les pertes en sol et le type de sol ( $P < 0.001^{***}$ ), l'inclinaison ( $P < 0.001^{***}$ ) et la longueur de pente ( $P < 0.001^{***}$ ) ainsi de leurs interactions ( $P < 0.001^{***}$ ) sur le paramètre étudié.

**Tableau 15**– Analyse de la variance à  $P=5\%$  de l'évolution des pertes en sol ( $\text{g/m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Source de la variabilité	F	P
Longueur de pente	11 890	***0
Pente	5 034	***0
Type de sol	1 920	***0
Longueur de pente * Pente	1 310	***0
Longueur de pente * Type de sol	503,28	***0
Pente * Type de sol	278,19	***0
Longueur de pente * Pente * Type de sol	75,34	***0

Les pertes en sol s'accroissent significativement de  $74,28 \pm 5,49 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous la pente de 5% à  $132,87 \pm 1,27 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous la pente de 10% à une longueur de pente 1 m sur le vertisol. Les valeurs inscrites sur le sol calcimagnésique sont plus éminentes ; les pertes s'accroissent de  $114,54 \pm 1,75 \text{ g/m}^2/\text{h}$  à  $151,20 \pm 4,11 \text{ g/m}^2/\text{h}$  sous les mêmes commodités.



**Figure 18**- Évolution des pertes en sol ( $\text{g/m}^2/\text{h}$ ) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Le changement de la longueur de pente à 5m provoque une augmentation des valeurs inscrites pour l'écoulement superficiel de  $131,46 \pm 1,41$  g/m<sup>2</sup>/h sous la pente de 5% à  $312,99 \pm 1,26$  g/m<sup>2</sup>/h sous la deuxième pente dans le vertisol, également, dans le sol calcimagnésique, les valeurs évoluent de  $256,97 \pm 2,82$  g/m<sup>2</sup>/h à  $369,02 \pm 5,18$  g/m<sup>2</sup>/h.

### Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation basée sur le coefficient de Pearson, au seuil de sécurité 95%, indique plusieurs dépendances positives statistiquement significatives. Le taux d'écoulement superficiel est bien corrélé avec l'intensité de pluies dans les vertisols ( $r=+0,77^{**}$ ) et les sols calcimagnésiques ( $r=+0,75^{**}$ ) ce qui met en relation l'importance de ce facteur sur le taux d'écoulement superficiel dans tous les types de sol.

À moindre degré, le taux d'écoulement est liée à l'angle de pente pareillement dans les vertisols ( $r=+0,45^{**}$ ) les sols calcimagnésiques ( $r=+0,41^*$ ), ceci indique que le taux d'écoulement superficiel s'accroît avec l'augmentation de l'angle de pente.

**Tableau 16**– Analyse de corrélation basée sur le coefficient de Pearson au seuil de sécurité 95% dans les vertisols.

	Intensité de pluies	Longueur de pente	Angle de pente	Écoulement superficiel	Concentration en sédiments	Pertes en sol
Intensité de pluies	1					
Long. de pente	0	1				
Angle de pente	0	0	1			
Écoulement	0,771**	0,055	0,459**	1		
Conc. sédiments	-0,088	0,492**	0,267	0,282	1	
Pertes en sol	0,321	0,494**	0,302	0,534**	0,873**	1

\* : Corrélation significative

\*\* : Corrélation hautement significative

\*\*\* : Corrélation très hautement significative

Les concentrations en sédiments sont également positivement corrélées avec les longueurs de pentes choisies dans cette étude, le coefficient de corrélation est plus grand dans les sols calcimagnésiques ( $r=+0,56^{**}$ ) que dans les vertisols ( $r=+0,49^{**}$ ) ce qui indique une grande vulnérabilité des sols des milieux steppiques à l'érosion lorsque les pentes sont longues.

Également, les pertes en sol sont fortement liées aux longueurs de pentes, au taux de l'écoulement superficiel et aux concentrations en sédiments dans les deux types de sols analysés.

**Tableau 17**– Analyse de corrélation basée sur le coefficient de Pearson au seuil de sécurité 95% dans le sol calcimagnésique.

	Intensité de pluies	Longueur de pente	Angle de pente	Écoulement superficiel	Concentration en sédiments	Pertes en sol
Intensité de pluies	1					
Long. de pente	0	1				
Angle de pente	0	0	1			
Écoulement	0,751**	0,004	0,411*	1		
Conc. sédiments	-0,11	0,560**	0,14	0,2	1	
Pertes en sol	0,336*	0,564**	0,15	0,435**	0,868**	1

\* : Corrélation significative

\*\* : Corrélation hautement significative

\*\*\* : Corrélation très hautement significative

Le coefficient de Pearson montre que les pertes en sol sont supérieures dans les sols calcimagnésiques ( $r=+0,56^{**}$ ) que dans les vertisols ( $r=+0,49^{**}$ ) lorsque les pentes sont plus longues. Par contre, les pertes en sol sont supérieures dans les vertisols ( $r=0,53^{**}$ ) que dans les sols calcimagnésiques ( $r=0,43^{**}$ ).

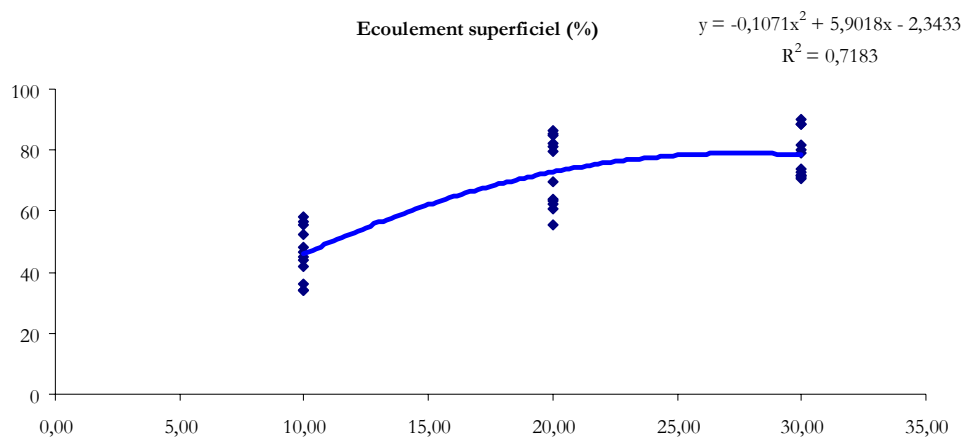
Tenant compte des résultats obtenus, le sol calcimagnésique s'avère plus sensible à l'érosion hydrique que le vertisol.



### III- Modélisation de l'érosion hydrique

#### 1- Évolution du taux d'écoulement superficiel en fonction de l'intensité de pluies

- Dans le sol calcimagnésique



**Figure 19-** Relation entre l'écoulement superficiel et l'intensité de pluie dans le sol calcimagnésique.

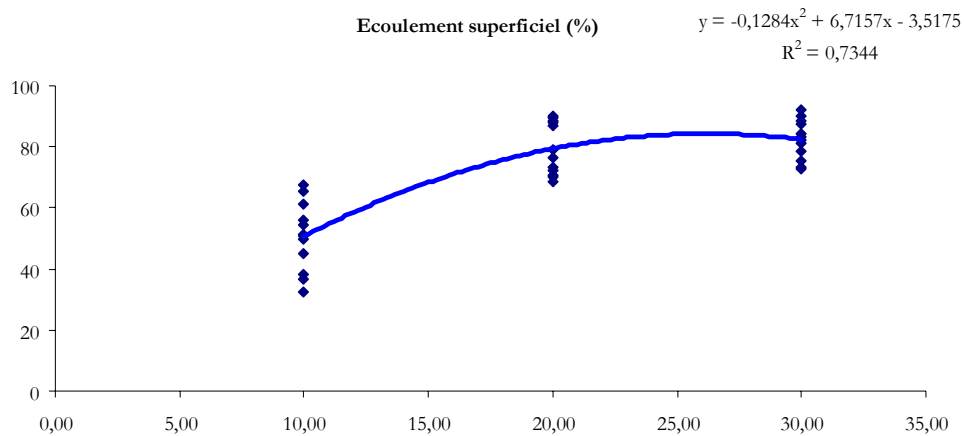
L'interaction entre l'écoulement superficiel et l'intensité pluvieuse a permis de dégager une équation numérique mettant en relation ces deux paramètres.

L'écoulement est une fonction de l'intensité pluvieuse donnée comme suit :

$$Y = -0,1071X^2 + 5,9018X - 2,3433 \text{ avec un } R^2 = 0,7183$$

Dans les sols calcimagnésiques cette équation permet donc de simuler l'écoulement superficiel à partir des intensités pluvieuses.

- Dans le vertisol



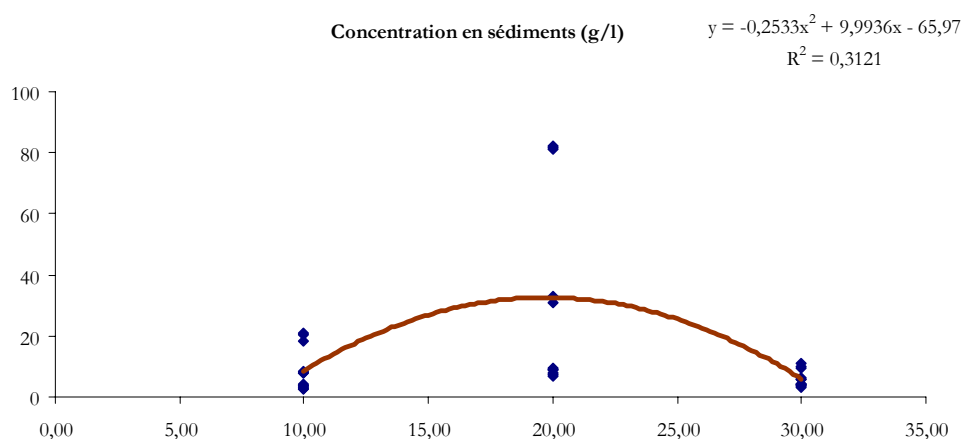
**Figure 20-** Relation entre l'écoulement superficiel et l'intensité de pluie dans le vertisol.

Une équation similaire mettant en évidence la relation hautement significative ( $R^2=+0,7344$ ) entre l'écoulement superficiel et l'intensité pluvieuse dans les vertisols est trouvée et s'exprime ainsi :

$$Y = -0,1284X^2 + 6,7157X - 3,5175 \text{ avec un } R^2 = 0,7344$$

## 2- Évolution de la concentration en sédiments en fonction de l'intensité de pluies

- Dans le sol calcimagnésique

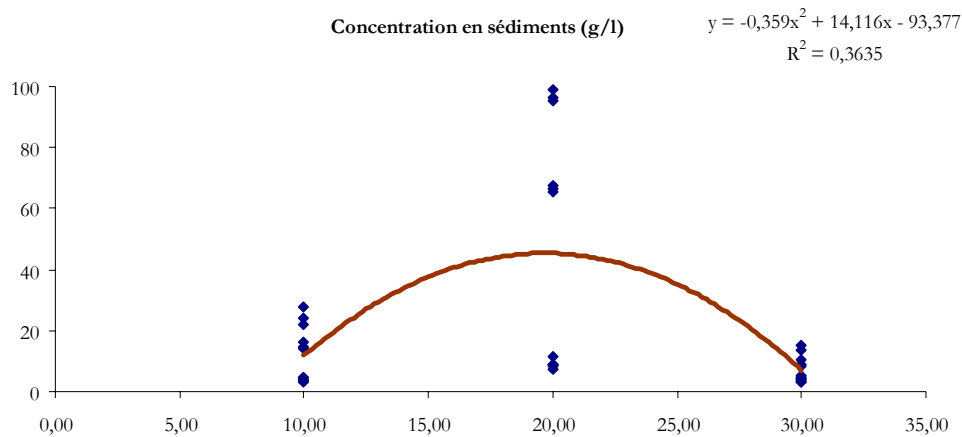


**Figure 21-** Relation entre la concentration en sédiments et l'intensité de pluie dans le sol calcimagnésique.

La concentration en sédiments est fonction de l'intensité pluvieuse. L'équation mettant en relation la concentration en sédiments l'intensité de pluie est décrite comme suit ;

$$Y = -0,2533X^2 + 9,9936X - 65,97 \text{ avec un } R^2=0,3121$$

- **Dans le vertisol**



**Figure 22-** Relation entre la concentration en sédiments et l'intensité de pluie dans le vertisol.

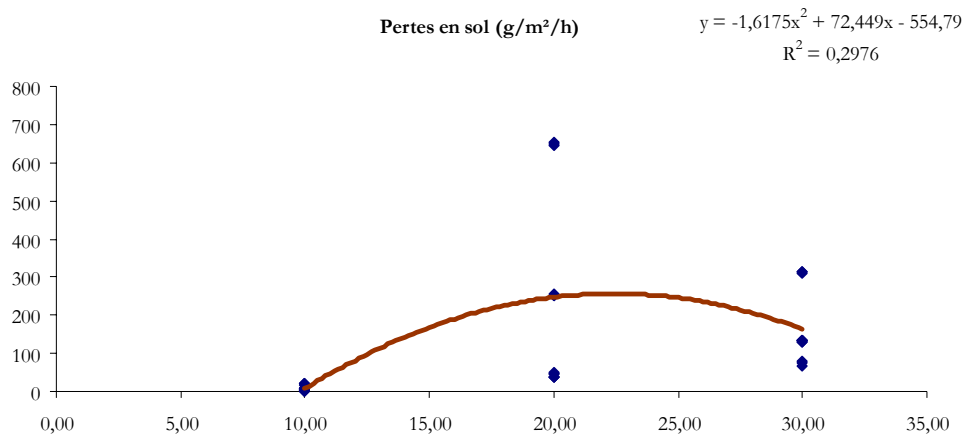
Pareillement pour les vertisols, la concentration en sédiments est une fonction de l'intensité pluvieuse suivant l'équation suivante :

$$Y = -0,359X^2 + 14,116X - 93,377 \text{ avec un } R^2=0,3635$$

La concentration en sédiments dans les vertisols peut être évaluée aisément par la mesure de l'intensité des pluies.

### 3- Évolution des pertes en sol en fonction de l'intensité de pluies

- Dans le sol calcimagnésique



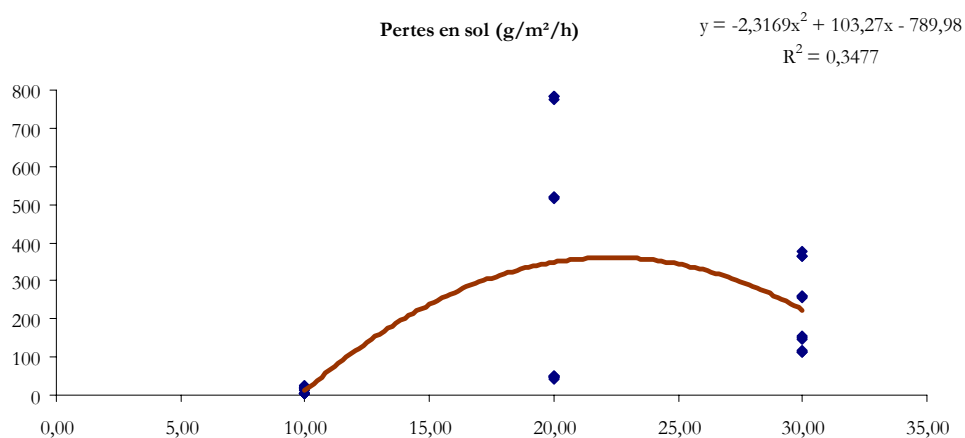
**Figure 23-** Relation entre les pertes en sol et l'intensité de pluie dans le sol calcimagnésique.

La relation entre l'intensité pluvieuse et les pertes en sol est fortement corrélée avec  $R^2=0,2976$ , cette association est représentée par l'équation suivante :

$$Y = -1,6175X^2 + 72,449X - 554,79 \text{ avec un } R^2 = 0,2976$$

Ce modèle permet donc d'évaluer les pertes en sédiments dans un sol calcimagnésique pour un évènement pluvieux.

- Dans le vertisol



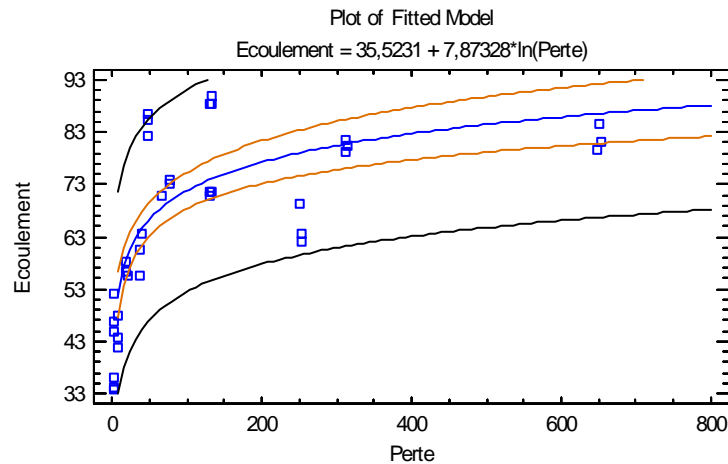
**Figure 24-** Relation entre les pertes en sol et l'intensité de pluie dans le vertisol.

Comme pour les sols calcimagnésiques, l'équation permettant l'estimation des pertes en sol en fonction de l'intensité pluvieuse dans le vertisol est :

$$Y = -2,3169X^2 + 103,27X - 789,98 \text{ avec un } R^2 = 0,3477$$

#### 4- Relation entre l'écoulement superficiel et les pertes en sol

- Dans le sol calcimagnésique

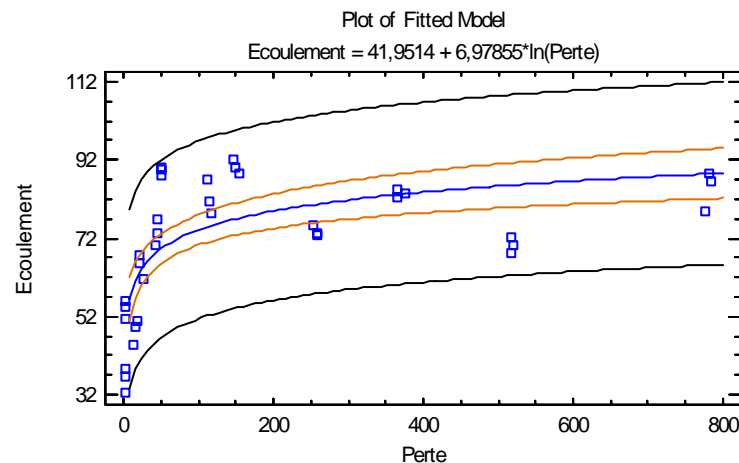


**Figure 25-** Relation entre le taux d'écoulement superficiel et les pertes en sol dans le sol calcimagnésique.

Des relations sont établies entre le taux d'écoulement superficiel et les pertes en sol, le lien établi est une fonction logarithmique présentée pour le sol calcimagnésique comme suit :

$$\text{Ecoulement} = 35,5231 + 7,87328 \times \ln(\text{pertes en sol}) \text{ avec } R^2 = 0,51.$$

- Dans le vertisol



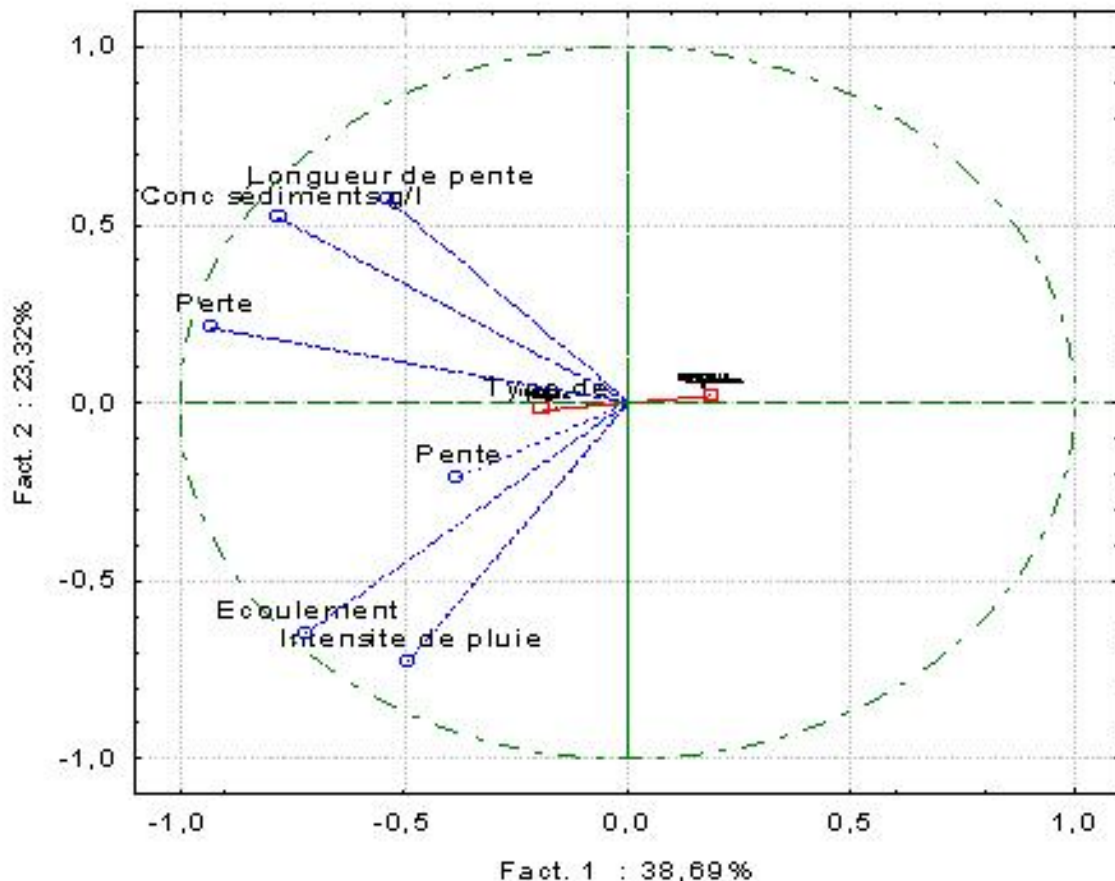
**Figure 26-** Relation entre le taux d'écoulement superficiel et les pertes en sol dans le vertisol.

Egalement, pour le vertisol, les relations établies entre le taux d'écoulement superficiel et les pertes en sol sont aussi représentées par une fonction logarithmique décrite comme suit :

$$\text{Ecoulement} = 41,9514 + 6,97855 \times \text{Ln}(\text{pertes en sol}) \text{ avec } R^2=0.39.$$

### 5- Analyse en composante principale

Les variables mesurées dans la présente étude pour la quantification de l'érosion hydrique ont fait l'objet d'une analyse en composante principale (suivant la méthode française), les résultats sont illustrés dans la figure 23.



**Figure 27-** Analyse en composante principale pour l'ensemble des variables étudiées.

Deux composantes sont retenues exprimant, respectivement, 38,7% de la variance expliquée et 23,3% par les variables.

**La première composante**

Toutes les variables mesurées au cours de cette expérimentation sont associées dans cet axe, à savoir, l'inclinaison et la longueur de la pente, l'intensité de pluies, le taux d'écoulement superficiel, les pertes en sol et les concentrations en sédiments.

Les relations établies entre ces paramètres sont discutées dans la partie discussion des résultats en se fondant aussi sur l'étude de la corrélation basée sur le coefficient de Pearson.

**La deuxième composante**

Les variables associées dans le côté positif sont : les pertes en sol, la concentration en sédiments et la longueur de pente. Cette alliance peut s'expliquer par la corrélation positive ( $r=+0,52^{**}$ ) qui résulte entre les pertes en sol qui augmentent significativement lorsque la pente augmente, et de ce fait, la concentration de sédiments augmente en parallèle.

Les variables associées dans le côté négatif sont : l'inclinaison de la pente, l'intensité de pluies et le taux d'écoulement superficiel. Cette assemblage peut s'expliquer également par la corrélation positive ( $r=+0,77^{**}$ ) qui explique que le taux d'écoulement superficiel augmentent significativement lorsque l'inclinaison de la pente augmente.

# Discussion



## DISCUSSION

Les résultats obtenus dans les parcelles expérimentales portent sur l'écoulement superficiel, la concentration en sédiments et les pertes en sol, ces résultats permettent d'envisager une vision sur le degré de vulnérabilité des sols des environnements céréalier et steppique à l'érosion hydrique. Différents facteurs peuvent être envisagés pour expliquer la variabilité manifestée pour ces paramètres caractérisant l'écoulement et les pertes en sol à l'échelle des parcelles expérimentales soumises à des pluies simulées. Cette variabilité s'interprète par l'effet de l'inclinaison et de la longueur de pentes d'une part ( $r=+0,52^{**}$ ), et de l'intensité pluvieuse d'autre part ( $r=+0,77^{**}$ ).

Les caractéristiques physico-chimiques influent largement sur les paramètres qui conditionnent l'érosion hydrique. La décroissance du taux de carbone du sol avec l'intensité culturale, notamment l'intensité du travail du sol est bien établie (Feller et Beare, 1997). Elle est notamment expliquée par la minéralisation consécutive à l'aération du sol par les opérations culturales antécédentes et le volume de la macroporosité, et également par les restitutions organiques, notamment racinaires, souvent plus faibles et l'érosion plus forte sous culture que sous jachère. En revanche, sur sol vertique, la teneur en carbone nettement plus élevée sous travail minimum que sous jachère est surprenante, de même que les teneurs similaires sous jachère (Diallo et *al.*, 2004).

La relation étroite entre la teneur en carbone et la teneur en argile et limons fins a été rapportée par d'autres auteurs. La corrélation entre teneur en carbone et texture résulte des liaisons étroites qui s'établissent entre colloïdes minéraux et organiques, et assurent une protection du carbone contre la minéralisation (Diallo et *al.*, 2004).

L'influence des teneurs en argile et en matière organique sur la stabilité structurale a été rapportée par différents auteurs (Le Bissonnais, 1996 ; Amézketa, 1999) ; toutefois, l'influence de la matière organique sur l'agrégation est souvent jugée plus importante que celle de la texture. Cet effet des colloïdes organiques et minéraux résulte des liaisons qu'ils constituent entre particules, et qui contribuent à la stabilité de l'agrégation (Baldock, 2002).

La richesse en argile et en carbone du sol vertique explique sa forte stabilité structurale (Baldock, 2002); elle s'explique par la destruction des agrégats et la minéralisation accrue de la matière organique causées par les restitutions organiques souvent faibles sous culture. La relation entre stabilité de l'agrégation et l'érosion est signalée par d'autres auteurs (Barthès et *al.*, 2000).

L'analyse des résultats obtenus montre une étroite dépendance entre l'écoulement superficiel, l'intensité pluvieuse ( $r=+0,77^{**}$ ) et l'inclinaison de la pente ( $r=+0,43^{**}$ ). En effet, l'augmentation de l'intensité pluvieuse associée à une forte inclinaison de pente engendre un accroissement de l'écoulement superficiel.

Cette hypothèse est démontrée par Wishmeier et Smith (1978) qui montraient que le ruissellement superficiel s'accroît avec le gradient de la pente. L'évolution de l'écoulement peut être expliquée par la nature du sol en surface, qui au démarrage, présente une rugosité non altérée pour les sols calcimagnésiques que pour les vertiques (Duchaufeur, 1972), l'eau s'infiltré rapidement grâce au volume important de la macroporosité du sol (Grésillon, 1994), ce phénomène retarde en quelque sorte l'écoulement superficiel qui s'amplifie dès que la lame d'eau écoulée s'épaissit, s'accélère pour acquérir une énergie cinétique assez suffisante à assurer le détachement des particules de la couche sous-jacente du sol (Coulomb et *al.*, 2000). L'eau en excès s'écoule par gravité du haut en bas et forme ainsi l'essentiel de l'écoulement superficiel et ce par l'action combinée de l'intensité pluvieuse, l'inclinaison et la longueur de la pente (Coquet et *al.*, 2000).

Plusieurs auteurs confirment l'importance du facteur pente sur l'écoulement superficiel (Le Buissonet et *al.*, 2002 ; Cerdan, 2003). En effet, les appréciations divergent au sujet de l'importance à donner aux autres facteurs mis en jeu tels que l'intensité de la pluie, la nature du sol et la pente (Leguédois, 2003).

C'est ainsi que les mesures réalisées sous pluies naturelles et simulées à l'échelle du mètre carré montrent que l'érosion hydrique augmente significativement lorsque la pente passe de 2° à 8° (Chaplot et Le Bissonnais, 1999). Ces résultats confirment les travaux de Kinnell (1990).

Les pertes en sol observées dans nos essais sont plus importantes, elles augmentent proportionnellement avec l'intensité pluvieuse ( $r=+0,35^{**}$ ) et la longueur de la pente ( $r=+0,52^{**}$ ) dans les deux types de sol.

Les sols calcimagnésiques subissent des pertes relativement importantes par rapport aux vertisols. Ces différences s'expliquent par la variation de la nature physico-chimique des sols (Leguédois, 2003). La stabilité structurale des sols est fortement influencée par la faible teneur en matière organique (Haynes et Swift., 1990) et par le taux relativement élevé en calcaire (Albrecht et *al.*, 1992). On peut donc attribuer cette évolution de l'écoulement, d'une part à l'intensité pluvieuse et à l'inclinaison de la pente et d'autre part à la nature des sols étudiés nos résultats sont confirmés par Luguédois (2003) dans ses travaux sur les mécanismes de l'érosion diffuse des sols qui observé les mêmes tendances des pertes en sols.

En revanche, l'effet du changement de la longueur de pente de 1m à 5m dans nos essais est hautement significatif sur la quantité des pertes en sol ( $r=+0,52^{**}$ ) et la concentration en sédiments ( $r=+0,52^{**}$ ). Ces résultats confirment les travaux de Le Bissonnais et *al.* (1998) et Kinnell (2000) qui constatent également que les pertes en sol dans les eaux d'écoulement sont plus importantes lorsque les pentes sont plus longues.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus montrent pour les deux types de sol que les concentrations en sédiments évoluent avec l'augmentation de l'intensité pluvieuse pour atteindre leur pic maximal sous l'intensité pluvieuse de 20mm/h, elles diminuent ensuite sous l'intensité pluvieuse de 30mm/h. L'essentiel du transport en sédiment se produit avec les premières augmentations pour se stabiliser et même régresser dans certains cas (Brivois, 2005). Cela peut être expliqué par le fait que les particules de faibles dimensions subissent un arrachage puis un entraînement rapide (Wan et Fell, 2004).

Le transport des éléments fins augmente pour atteindre un seuil maximal, les fragments grossiers ne seraient pas susceptibles à cette remise en mouvement du fait de leur poids relativement élevé (Bivois, 2005). Les concentrations en sédiments en faveur des fractions fines ont été constaté par plusieurs auteurs en comparant les granulométries agrégées des sédiments exportés avec celles du sol initial (Moss, 1991 ; Sutherland et *al.*, 1996 ; Wan et El Swaify, 1998).

Dans des travaux similaires, relatifs au ruissellement et à l'érosion des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique du Sud du Brésil (Nilza, 1997) mettent en évidence une relation fondamentale : les concentrations en sédiments élevées se produisent quand l'écoulement est important ; pour les faibles

ruissellements, les concentrations en sédiments sont faibles. Par contre, on peut avoir de faibles concentrations de sédiments quand le ruissellement est important, notamment pour les campagnes où le taux de recouvrement par la végétation était élevé.

L'évolution des pertes en sol enregistrées est intimement liée à la variation des différents facteurs à savoir l'intensité des pluies simulées ( $r=+0,35^{**}$ ), le gradient de la pente ( $r=+0,21^*$ ) et la longueur de pente ( $r=+0,52^{**}$ ). En revanche, les pertes varient avec la nature du sol ; c'est ainsi que les vertisols enregistrent des valeurs relativement faibles par rapport aux sols calcimagnésiques, cette différence est probablement due à la haute stabilité structurale des vertisols (Calvet, 2004).

Ces résultats sont confirmés par les travaux de Luguédois (2003) sur les mécanismes de l'érosion diffuse des sols qui donnent des tendances analogues.

# Conclusion générale

## **CONCLUSION GENERALE**

Les résultats auxquels nous sommes parvenus s'intéressent à la quantification des pertes en sols dans de petites parcelles expérimentales sous des pluies simulées et sur deux types de sols d'inclinaisons et de longueurs de pentes variables. Le choix de ces deux types de sol est fait dans deux environnements distincts afin d'évaluer les risques et les caractéristiques de l'érosion hydrique comparativement dans un milieu céréalier et dans un milieu steppique.

L'étude des différents facteurs provoquant l'érosion montre une forte influence de l'intensité pluvieuse graduelle et les paramètres de pente, à savoir l'inclinaison et la longueur, sur les variables de l'érosion mesurées sur les deux types de sol étudiés.

Les résultats obtenus confirment que l'application de différentes intensités de pluie graduelles (10 mm/h, 20 mm/h et 30mm/h) génère simultanément une augmentation de l'écoulement superficiel, des concentrations en sédiments et des pertes en sol dans les deux types de sol avec des valeurs élevées enregistrées dans le sol calcimagnésique que celles inscrites dans le vertisol. De ce fait, le sol calcimagnésique semble être plus sensible à l'érosion hydrique que le vertisol sous les conditions expérimentales décrites dans le protocole adopté.

La conduite des essais par la simulation de pluies a un double objectif ; le premier est l'évaluation des écoulements superficiels, des concentrations en sédiments et des pertes en sol tandis que le second objectif est l'utilisation des résultats dégagés pour créer des modèles numériques permettant de simuler les paramètres mesurés dans cette étude sur le terrain sous différents scénarios climatiques.

L'aboutissement aux résultats nous a mené à déduire les constatations suivantes :

Les sols calcimagnésiques sont plus sensibles à l'érosion hydrique sous les conditions expérimentales adoptées dans cette étude que les vertisols qui semblent être plus résistants.

L'intensité de pluies et l'inclinaison de la pente sont les facteurs déterminant de l'érosion tandis que la longueur de la pente (1m et 5m) n'influe pas significativement sur les paramètres mesurés dans la présente étude. L'évolution de l'écoulement superficiel est fonction de l'intensité pluvieuse appliquée et aux paramètres de pentes à savoir l'inclinaison et la longueur sur les deux types de sol choisis. En effet, l'augmentation graduelle de l'intensité pluvieuse engendre une augmentation de ce paramètre.

Les pertes en sol sont plus importantes pour les intensités de pluies dépassant 20 mm/h et elles diminuent lorsque l'intensité pluvieuse atteint 30 mm/h. L'intensité de pluie de 20mm/h est considérée comme la plus fréquente et la plus dangereuse dans les zones semi-arides Algériennes (Demmak, 1982). La concentration en sédiments s'accroît significativement lorsque l'intensité pluvieuse passe à 20 mm/h et elle diminue par la suite.

# Références bibliographiques



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achite M., Meddi M., 2005-** Cartographie spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride .Cas du bassin versant de l' Oued Mina (nord ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau* 18/spécial. 37-56
- Alberts G.A., Nearing M.A., Weltz M.A., Risse L.M., Pierson F.B., Zhang X.C., Laflen J.M. Simanton J.R., 1995-** 'Chapter 7. Soil component'. *In*: D.C. Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Albrecht A., Rangon L ., Barret P., 1992-** Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, no (1): 121-133.
- Ambroise B. 1991-** Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré - processus et modèles. Séminaire du Conseil scientifique du Département « Science du Sol » de l'INRA à Dijon, 26-27 mars 1991.
- Amézketa E., 1999-** Soil aggregate stability : A review. *J Sustainable Agric*, (14): 83-151.
- Anthony J.P., Athol D.A., 2005-** Overland flow "Hydraulics and erosion mechanics"; 421p
- Antipolis S., 2003 -** Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens. *Étude bibliographique* p.1-69
- Arabi M. et Roose E., 1992-** Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols en montagne semi-aride algérienne, 10 p. Dact. + Tableaux en ann., en cours de publication dans Cah. ORSTOM, série Pédologie
- Arabi M., Roose E., 1989-** Influence de quatre systèmes de production méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bulletin Réseau Erosion* (9) : 39-51
- Arnold J.B., Wall G., Moore N., Baldwin C.S. Shelton I.J., 1989-** L'érosion du sol - Causes et Effets. p 198.

- Arnold J.C., Weltz M.A., Alberts E.E., Flanagan D.C., 1995-** ‘Chapter 8. Plant growth component’. In: D.C. Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Ascough J.C., Baffaut C., Nearing M.A., Liu B.Y., 1997-** ‘The WEPP watershed model: I. Hydrology and erosion’. *Trans. Am. Soc. of Agric. Eng.*, 40(4), p. 921-933.
- Ascough J.C., Baffaut C., Nearing M.A., Flanagan D.C., 1995-** ‘Chapter 13. Watershed model channel hydrology and erosion processes’. In: D.C. Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Asseline J., De Noni G., Nouvelot J., Roose E., 1993-** Note sur la conception et l’utilisation d’un simulateur de ruissellement. *Centre ORSTOM, Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, (2): 405-411
- Asseline J., Valentin C., 1978-** Construction et mise au point d’un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM XV* (4) : 321-349.
- Auzet A.V., 1987-** L’érosion des sols par l’eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Min Env. /Min Agr, CEREG-URA 95, CNRS Strasbourg, 60 p.
- Bado, B. V. 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des sols guinéenne et soudanienne du Burkina-faso. *Thèse doctorat Université Lava*, 197 p Disponible sur le «<http://www.theses.ulaval.ca/2002/20487/20487.html-12k>». Consulté le 16/07/2006
- Baldock J.A., 2002-** Interactions of organic materials and microorganisms with minerals in the stabilization of soil structure. In : Huang PM, Bollag JM, Senesi N, éd. *Interactions between soil particles and microorganisms : Impact on the terrestrial ecosystem*. Chichester (GB) : Wiley & Sons, 2002 : 85-131.

- Barrow, N.J. 1990.** «Relating chemical Process to Management System», Phosphorus Requirement for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania, *Rapport de Symposium*, pp 200-209, IRRI, Philippines
- Barthès B., Azontonde A., Boli Z., Prat C., Roose E., 2000-** Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *Eur J Soil Sci* ; (51): 485-95.
- Batti A., Depraetere C., 2007-** Panorama des méthodes d'analyse de l'érosion dans un contexte insulaire. Composante 1A - Projet 1A4 Gestion Côtière Intégrée : p 20-22.
- Bazi, M.H., Verberne, E.L.J, Disjsterhuis, G.H. et Sanou, A.A. 1995.** Les modèle de simulation comme outils de gestion des sols et de développement agricole : exemple du modèle «cultures pluviales du Burkina-Faso» In : Groot, J.J.R, and Coulibaly, A. (eds) Les modèles de simulations de la croissance végétale comme outils de recherche développement. *Rapports PSS N°11* Compte rendu du séminaire de Bamako, Mali, du 7 au 8 Nov 1994. Wageningen, pp 53-66
- Begon M., Townsend C.R., Harper J.L, 2006-** Ecology, From Individuals to Ecosystems. Fourth Edition. Blackwell Publishing Ltd. P 759.
- Benkhadra H., (1997) -** Battance, ruissellement et érosion diffuse sur les sols limoneux cultivés. Déterminisme et transfert d'échelle de la parcelle au petit bassin versant.- Th. doc. : Sciences de la Terre: Université d'Orléans.- 202 p. :
- Benkhelil H., Masson F.X., Henry E., Abriak N.E., Boulemia C., 2002-** Démarche méthodologique pour la conception d'un micro-simulateur de pluie pour les milieux rural et urbain. *Conférence internationale sur la gestion des milieux urbains*, Alger 2002.
- Bennaceur M., Rahmoune C., Sdiri H., Meddahi M.L., Selmi M., 2001-** Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains de quelques variétés maghrébines de blé ; Science et changements planétaires. *Sécheresse*, Volume 12, Numéro 3, p.167-74.

- Bergkamp G., Cammeraat L. H. and Martinez-Fernandez J., 1996-** Water movement and vegetation patterns on shrub land and on abandoned field in two desertification–threatened areas in Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 1073–1090.
- Bochet E., Rubio J. L. and Poesen J., 1998-** Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the micro–scale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 23, 139–150.
- Boiffin J., 1984-**La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, INA-PG ; 320 p.
- Boukhari Y., 2002-**Etude du ruissellement et du transport solide dans les monts de Beni-Chougrane Utilisation de la simulation de pluie sur les parcelles expérimentales Thèse de magister, pp 43-105
- Boukheir R., Girard M.C.I., Khawlie M., Abadallah C., 2001-** Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique p 234.
- Boulaine. J., 2002-** les vertisols des bassins tertiaires méditerranéens et leur érosion .CIHEAM - Options Mediterraneennes n°25 , pp :44-46
- Brivois O., 2005-** Contribution à la modélisation de l'érosion de fortes pentes par un écoulement turbulent diphasique, Thèse Université Aix-Marseille II, 215 p, 2005
- Bryan R.B., 1979-** The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rainsplash. *Earth Surface Processes and Landforms*, 4: 43-58.
- Burger P., Faure S., 2005-** Les différents facteurs de dégradation se conjuguent pour créer un déséquilibre écologique social et biologique ,2-6
- Calvet J.-C., Rivalland V., Picon-Cochard C. and Guehl J.M., 2004-** "Modelling forest transpiration and CO<sub>2</sub> fluxes - response to soil moisture stress". *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 124(3-4), pp. 143-156, doi: 10.1016/j.agrformet.2004.01.007.
- Cerdá A. (1998)** – The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 12, 661–671.
- Cerdá A., 1999-** Parent material and vegetation affect soil erosion in eastern Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 362–368.

- Cerdan O ., Le Bissonnais Y ., Souchère V ., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D ., Desprats J.F., 2006-**Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols ; Rapport n° 3 Synthèse et recommandations Générales. BRGM/RP-55104-FR
- Cerdan O ., Souchere V., Lecomte V ., Couturiera A ., Le Bissonnais Y., 2001-** Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena* 46, p, 89–205.
- Cerdan O., 2001-** Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés 11p
- Chaplot V., Le Bissonnais Y., 1999-** Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 1-10.
- Chaponniere A., 2005-** *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride, Cas du bassin versant du Rebraya (Haut Atlas marocain)*.Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Chocat B., 1997-** Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Ed Tech et Doc, Paris Lavoisier, 1124 p.
- Christian K. K., Hecke J.M., Mirscheland W., Wegehenkel M., 2004-** Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems European Science Foundation ESF and COST 718 .p 271
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J., 2000-** Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. Aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols*, 7 (1), 7-24
- Coulomb B. Kiniry J.R., Debaeke P., 2000-** Effects of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field grown maize. *Agronomy J.* 92: 428-435
- Cros-Cayot S., 1996-** Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Thèse de doctorat de l'ENSAR, 218 p.
- Dautrebande S., Cordonnier H., Thirion M., Biolders C., 2006-** Lutter contre l'érosion des terres. Ministère de la Région wallonne, direction générale de l'Agriculture. Livret de l'agriculture n°12.p 9

- Demmak A., Ouaar A. et Guedjal A., 1991-** Quantification de l'érosion à l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride p : 179-188
- Demmak A., 1982-** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 323p.
- Derancourt F., 1995-** Erosion des terres agricoles, méthodologie proposées à l'étude de bassins versants agricoles. Rapport Chambre d'Agriculture Pas-de-Calais.
- Descroix L. and Gautier E., 2002–** Water erosion in the southern French Alps : climatic and human mechanisms. *Catena*, 50, 53–85.
- Descroix l., González Barrios J.L., Viramontes D., Poulenard J., Anaya E., Eesteves M., Estrada J., 2008-** Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect, *Catena*, 325–339
- Diallo D., Barthès B., Orange D., Roose E., 2004-** Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali. Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 15, Numéro 1, 57-64, JANVIER-FÉVRIER-MARS 2004.
- Dietz T., Ruben R., Verhagen J., 2007-** Le changement climatique et les stratégies de SandT pour la RandD agricole dans les pays ACP. *The impact of climate change on dry lands, with a focus on West Africa*.
- Direction des Services Agricole, 2008-** Statistiques agricole de la wilaya de Tiaret. Document officiel. p 55.
- Djebaili S., 1978-** Recherches phytosociologiques et phytoécologiques sur la végétation des Hautes Plaines Steppiques et de l'Atlas Saharien algérien. Thèse doct. Montpellier, 229p.
- Djellouli Y. et Nedjraoui D., 1995-** *Evolution des parcours méditerranéens. In Pastoralisme, troupeau, espaces et société.* Hatier ed. Paris, 440-454.
- Dunne T., Zhang W. and Aubry B.F., 1991–** Effects of rainfall, vegetation and micro topography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27, 2271–2285.

- Feller C., Beare M.H., 1997-** Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 1997 ; 79 : 69-116.
- Flanagan D.C., Ascough II. A.D., Nicks M.A., Nearing A.M., Laflen 1995-** Over view of the wepp erosion prediction model.
- Flanagan D.C., Ascough J.C II.A.D., Nicks M.A., Nearing M.A., Laflen., 1995-** Over view of the wepp erosion prediction model pp 1.9-1.10
- Flanagan D.C., Nearing M.A., 1995 -** USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Francis M., Denis B., 2003-** bilan des connaissances sur l'érosion et les phénomènes de ruissellement
- François G., Sylvia D., Catherine S., Vincent B .,2007-** L'érosion hydrique des sols 481 p.
- Gauvin D., 2000-** Inventaire des zones sensibles à l'érosion des sols en vallée d'Authie dans une perspective d'application des mesures agri-environnementales. Mém. D.U.E.S.S. "Eau et Environnement", D.E.P., Univ. Picardie Jules Verne, 105 p. + annexes et cartes.
- Gherzi G., 2002-** L'agriculture des pays méditerranéens du sud entre conquête des marchés européens et réponse aux besoins de subsistance. *Communauté de Communes Bastides & Vallons du Gers* p 17.
- Gimenez R., Govers G., 2002-** ((Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds)). *Soil Science Society of America Journal*, 66:1475–1483.
- Giordano A., Marchisio C.,1992-** Analysis and Correlation of Soil Erosion Maps in the Mediterranean Basin. *Quaderni di Scienza del Suolo* No. 4 CNR. Firenze.
- Govers G., 1985 -** Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 12: 35-49.
- Govers G., Takken I., Helming, K., 2000-** (Soil roughness and overland flow). *Agronomie* 20:1

- Grésillon J.M. 1994-** Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. *Approches numériques et expérimentales à différentes échelles*, Document présenté pour obtenir le diplôme d'habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Janvier 1994.
- Guillaume N., 2006-** Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle. thèse de doctorat, université de Joseph Fourier, Grenoble, France ,16 P
- Haynes R.J., Swift R.S., 1990-** Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *J. Soil Sci.*, 41: 73-83.
- Henensal P., 1986-** L'érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes. Rapport de recherches Laboratoire Central des Ponts et Chaussées N° 138.
- Heusch B., 1970-** L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Annale Rech. Forestière du Maroc*, tome 12, 176 p.
- Horton R.E. 1933-** The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Trans. Am. Geophys. Union*, 14, 446-460.
- Houmani M., 1999-** Situation alimentaire du bétail en Algérie. INRA, 4, 35-45.
- Huang C., Gascuel-Oudoux C. and Cros-Cayot S., 2001-** Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena*, 46: 177-188.
- Huang C.H., 1995-** Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas *Soil Science Society of America Journal*, 59: 982-990.
- Jetten V., de Roo A. et Favis-Mortlock D., 1999** - Evaluation of field-scale and catchments-scale soil erosion models. *Catena* 37, 521–541.
- Joerin C., 2000-** Étude des processus hydrologiques par l'application du traçage environnemental. Association à des mesures effectuées à l'échelle locale et analyse d'incertitude. Thèse de Doctorat n° 2165, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, p 283.
- John B. and Jean P., 2006-** Soil Erosion in Europe “Environmental Change Institute, University of Oxford, & Physical and Regional Geography Research Group, Katholieke Universiteit Leuven GEO-Institute, Belgium”855 p



- Jordan J.P., 1994-** Spatial and temporal variability of storm flow generation processes on a Swiss catchments. *J. Hydrol.*, 153: 357-382.
- Joseph G. C., Diane E. P., Louis F. P., 2006-** Terrestrial Ecosystems in a Changing World: P 252-26.
- Juillerat M., 2004-** Etude hydrologique comparative de 5 bassins versants du Haut Atlas marocain, mémoire de maîtrise, université de franche-comté.
- khalidoun A., 1995-** Les mutations récentes de la région steppique d'El Aricha. Réseau Parcours, 59-54.
- King D., LE Bissonnais Y., 1992-** Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *C.R. Académie Agriculture Fr.*, 78, n°6, pp. 91-105.
- Kinnell P.I.A., 2000-** A Discourse on Rainfall Erosion Processes and Modelling on hillslopes Centre for Australian Regolith Studies Occasional Paper No. 6, p 1-40
- Kinnell P.I.A., 2000-** A Discourse on Rainfall Erosion Processes and Modelling on Hillslopes .School of Resource, Environmental and Heritage Sciences Division of Science and Design University of Canberra
- Kinnell, P.I.A., 1990-** The mechanics of raindrop-induced flow transport. *Australian Journal of Soil Research*, 28: 497-516.
- Kirkby M.J., Le Bissonnais Y., Coulthard T. J., Daroussin J. and McMahon M. D., 2000-** The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion *Agriculture, Ecosystems and environment*, p 125–135.
- Klaij M.C., 1994-** Le Travail du Sol pour une Agriculture Durable « Conservation des sols et de l'eau »;( archives de documents de la FAO)
- Kottwitz E.R., 1995-** Chapter 12. Irrigation component'. In: D.C. Flanagan and M.A.Nearing (eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Lal R., 1990-** Soil erosion and land degradation: The global risks. *Adv. In Soil. Sci.* 11: 129-172

- Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Gallien E., 1996-** Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse des sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m<sup>2</sup> au bassin versant élémentaire agricole, *Géomorphologie, relief, processus, environnement*, 3, pp. 51-64
- Le Bissonnais Y., 1996-** Soil characteristics and aggregate stability. In : Agassi M, éd. *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York : Dekker, 1996 : 41-60.
- Le Bissonnais Y., Dubreuil N., Daroussin J., Gorce M., 2004-** Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D. ,2001 –** Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46, P 207–220.\*
- Le Bissonnais Y., Renaux B., Debouche H., 1995 -** Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena* 2 : 1-4.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002-** L'érosion hydrique des sols en France.
- Le Houerou H.N., 1995-** Dégradation, régénération et mise en valeur des terres sèches d'Afrique du Nord. Coll. « L'homme peut-il faire ce qu'il a défait ? » ORSTOM, Tunis, 65-102
- Leguedois S., 2003-** Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse Université Orléans. INRA. 167p.  
<http://www.inra.fr/ea/theses/Theses2003.htm#Leguedois>
- Lionel M.R. et Laverdière C.B., 2002-** L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France.
- Lionello P., Malanotte-Rizzoli P., Boscolo R., 2006-** Mediterranean climate variability. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4. Edition Elsevier B.V. p 496.
- Liu B.Y., Nearing M.A., Baffant C., Ascough J.C. II., 1997-**The WEPP watershed model: III .Comparaisons of measured data from watersheds pp.945-952
- Lu S., 2003-** Mécanismes de l'érosion diffuse des sols Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés, thèse de doctorat, université d'Orléans, France; pp 24

- Ludwig B., 1992-** L'érosion par ruissellement concentrée des terres cultivées du Nord du Bassin Parisien. Thèse, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 200 p.
- Mamady D., 2005-** l'érosion du sol, environnement guinée .p1
- Martinez-Mena M., Alvarez Rogel J., Albaladejo J. and Castillo V.M., 1999-** Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semi-arid environment. *Catena*, 38, 175–190.
- Meguenni K. et Remini B., 2008-** Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza pp. 7-19
- Mériaux S., 1961-** Action du chaulage sur les composantes de la structure et sur l'état de saturation du sol. Compte rendu à l'Académie 'Agriculture, 322-325.
- Mermut A., Luk S., Römkens M. and Poesen J., 1997-** Soil loss by splash and wash during rainfall from two loess soils. *Geoderma*, 75:203–214.
- Middleton N. and Thomas D., 1997-** World Atlas of Desertification (Second Edition). London (UK): Arnold.
- Mietton M., 1986-** Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. Cah. ORSTOM. St?. Pedol., vol. XXII, no 2,: 181-196
- Ministère de l' agriculture et du développement rural. direction générale des forets .organe national de coordination sur la lutte contre la désertification., 2004-** Rapport national de l' Algérie sur la mise en oeuvre de la Convention de Lutte Contre la Désertification
- Moeyersons J., 1989-** Les glissements de terrain au Rwanda occidental: leurs causes et les possibilités de leur prévention. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1): 131 – 150.
- Morgan R., Quinton J., Smith R., Govers G., Poesen J., Auerswald K., Chisci G., Torri D. and Styczen M., 1998 -** The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments .*Earth Surf. Process. Landforms* 23, 527–544.
- Morgan R.P.C., McIntyre K., Vickers A.W., Quinton J. N. and Rickson R.J., 1997-** A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technology*, 11, 291–299.
- Moss A. J., 1991-** Rain-impact soil crust. II. Some effects of surface-slope, drop size and soil variation. *Australian Journal of Soil Research*, 29:291–309.

- Nearing M.A., Foster., Lane L.J. and Finkner S.C., 1989-** Process-based soil erosion model for USDA-water erosion predic- Trans. ASAE 32:1545–1550. tion project technology. Trans. ASAE 32:1587–1593.
- Nedjraoui D., 1999-** Notes de réflexions sur la politique de lutte contre la désertification en Algérie. Rapport, OSS, 34p.
- Nicks A.D., Lane L.J. and Gander., 1995-** Chapter 2. Weather generator. In: D.C.Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana
- Nilza M., 1997-** Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique du Sud du Brésil (Rio Grande do Sul ) thèse de doc. Editions ORSTOM n°165, p191
- Papy F., Douyer C., 1991-** Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. 201-15.
- Papy F., Le Bissonnais Y. et Guérif J., 1995 -** Valorisation et protection de la ressource en eau. Projet : recherches sur les processus physiques et la maîtrise de l'érosion hydrique à l'échelle d'un territoire agricole. Le programme valorisation et protection des ressources en eau 1992-1995. Protection des ressources en eau, INRA éditions, 27 p.
- Poesen J., 1984-** The influence of slope angle on infiltration rate and orntonian overland flow volume.Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd, 49: 117-131.
- Pugnaire F.I., Valladares F., 2007-** Functional Plant Ecology, *Second Edition*, edited by CRC Press, Taylor and Francis Group, p 748.
- Refsgaard J.C. et Storm B., 1996-** Construction, calibration and validation of hydrological models. In : Distributed hydrological modelling. Kluwer academic publishers. Netherlands, pp. 41-42.
- Reiffsteck P., Pham T.L., Vargas R. and Paihua S., 2006-** Comparative study of superficial and internal erosion tests, 3rd International Conference on Scour and Erosion, Amsterdam.
- Remini B., 2006-** La problématique de l'eau en Algérie, Ed. O.P.U., 182p.

- Richard D. and Mathys N., 1999-** Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. *Actes du colloque "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne"*, Draix, Le Brusquet, Digne, 22–24 Octobre 1997. CEMAGREF, Grenoble, 11–28.
- Rivas R.E., 1997** -Teledetection et risques d'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées :Application sur la région centrale de la province de Buenos Aires -Argentine « mémoire d'études supérieures spécialisées de teledetection »pp 30
- Rody F. et Xanthoulis D., 2005-** Analyse de sensibilité du modèle mathématique Erosion Productivity Impact Calculator” (EPIC) par l’approchev One-Factor-At-A-Time (OAT) 179–190
- Roose E., 1991-** Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive: la GCES-Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, vol. XXVI, n°2, 1991-pp. 145-181
- Roose E., 1994-** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique n° 70, FAO, Rome, 420 p.
- Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., Morsli B., 1993-** Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 28(2): 289-308.
- Rovéra G., Robert Y., Coubat M. and Nedjai R., 1999–** Érosion et stades biorhexistatiques dans les ravines du Saïgon (Alpes-de-Haute-Provence) ; essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. *Études de Géographie Physique*, 28, 109–115.
- Ryan J., 1982-**A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon. Publication 69, American University of Beirt, p15-38.

- Savabi M.R. and Williams J.R., 1995-** 'Chapter 5. Water balance and percolation'. In: D.C. Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana
- Savabi M.R., Young G.R., Benoit J.M., Witte D.C. and Flanagan D.C., 1995-** Chapter 3. Winter hydrology. In: D.C. Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Schipman A.J., Vandervaere J.P., Descroix L. and Oubkraoui S., 1999-** Fonctionnement hydrodynamique et écoulements de crue sur versants : Variabilité, agrégation et passage à l'échelle du bassin. Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement : Rapport de synthèse
- Schulze E.D., Beck E., Müller-Hohenstein K., 2005-** Plant ecology. Edition Springer Berlin- Heidelberg. P 692.
- Skouri K., Konstantaras I., Papachristos S. and Ganas I., 2007-** An inventory model for deteriorating items with ramp type demand rate, partial backlogging and permissible delay in payments, 22nd European Conference on Operational Research, Prague, 8-11.
- Skouri M., 1984-**La désertification dans le bassin Méditerranéen : Etat actuel et tendance. Division of ecological studies UNESCO PARIS France, p 23-26.
- Smith R.E., Woolhiser D.A., 1971-** Overland flow on an infiltrating surface. Water Resour. Res., 7(4): 899-913.
- Snelder D.J. and Bryan R.B., 1995-** The use of rainfall simulation to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo district (Kenya). *Catena* 25, 105–116.
- Solé-Benet A., Calvo A., Cerdá A., Lázaro R., Pini R. and Barbero J., 1997-** Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena* 31, 23–38.

- Steiner K.G. 1996-** Causes de la dégradation des sols et approches pour la promotion d'une utilisation durable des sols (version française : GUENAT, D. et LAURENT, F.), Acade, Bussigny, Suisse, 97p + annexes
- Stott D.E. Alberts E.E., Weltz M.A., 1995-** 'Chapter 9. Residue decomposition and management'. In: D.C. Flanagan and M.A. Nearing (eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report
- Sutherland R. A., Wan Y., Lee C. T., Ziegler A. D., 1996-** Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol. *Catena*, 26:187–208.
- Tescult B., 2004-** Etude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant Projet Détaillé (lots n°1à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots n°5et 6) PHASE 2. Identification et Evaluation du degrés d'érosion Lot n°5:Barrage Gargar et S .M.Benaouda.
- Tescult V., 2004-** Etude de la protection des basins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant Projet Détaillé (lots n°1à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots n°5et 6) PHASE1.Déscription du milieu physique- rapport principal, version Définitive.
- Tilman D., Cassman K G., Matson P. A., Naylor R. and Polasky S., 2002-** Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, Vol 418, 671-677.
- Torne X., Zubrowsky G. et Levin S., 2007-** Desertification et changement climatique au sud du Maroc
- UNEP, 1993-** Developing Large Environmental Databases for Sustainable Development: *UNEP/IUFRO International Workshop*, July 14-16, 1993, Nairobi, Kenya, Proceedings.
- UNEP, 1999-** Singh, A., Dieye, A., Finco, M., Chenoweith, M.S., Fosnight, E.A., and Allotey, A., Early Warning of Selected Emerging Environmental Issues in Africa: Change and Correlation from a Geographic Perspective. UNEP/DEIAEW/TR.99-2.

- UNEP., 1998-** Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. Programme d'actions prioritaires centre d'activités régionales
- Valentin C., 1998-** Towards an improved predictive capability for soil erosion under global change. In: Boardman, J. and Favis-Mortlock, D.T. (Eds) Modelling Soil Erosion by Water. NATO ASI Series I-55. Springer, Berlin, Germany, pp. 7–17
- Victor J., de Roo ., David F. M., 1999 -** Evaluation of field-scale and catchments-scale soil erosion models. *Catena* 37, p 521–541.
- Wan C.F. and Fell R., 2004-** Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, *Journal of Geotech. and Geoenv. Eng.*, 30(4): 373-380.
- Wan Y. and El-Swaify S. A., 1998-** Characterizing interrill sediment size by partitioning splash and wash processes. *Soil Science Society of America Journal*, 62:430–437.
- Warner T.T., 2004-** Desert Meteorology. Ed Cambridge University Press. p 612.
- West LT., Miller W.P., Langdale G.W., Bruce R.R., Laflen J.M., Thomas A.W., 1999-** Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia piedmont. *Soil Soc Am J* 1991; 55: 460-6.
- William K., Lauenroth., Ingrid C., Burke., 2008 -** Ecology of the Shortgrass Steppe A Long-Term Perspective
- Williams J.R., 1980-** Chapter 1. Simulation of the surface water hydrology'. In: W.G. Knisel (ed.) CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. p. 13-35.
- Williams J.R., 1995-** Chapter 25. The EPIC model'. In: V.P. Singh (ed.), Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, p. 909-. Smith, **R.E. , J.R.**
- Wischmeier W. H., Smith D. D., 1978 -** Predicting rainfall erosion losses: a guide to Conservation planning. USDA Handbook, 537, 58 p.
- Zahar Y., Laborde J.P., 1998-** Génération stochastique d'averses et de leurs index d'érosivité pour la simulation de la dynamique érosive en Tunisie centrale. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46(2)



**Zubert. C., 1965-** Tableaux des Classes, Sous-classes, Groupes et Sous-Groupes de Sols utilisés par la Section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. pp: 265-288

# Annexes

## ANNEXE

**Tableau 18**– Valeurs moyennes de l'évolution du taux d'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	34,73±1,27	47,90±3,75	35,89±2,92	53,91±2,53
Longueur 5 m	44,53±3,16	56,70±1,44	48,47±3,26	64,93±3,23

**Tableau 19**– Valeurs moyennes de l'évolution du taux d'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	59,87±3,99	84,71±2,08	73,44±3,11	89,22±1,05
Longueur 5 m	65,10±3,83	81,76±2,64	70,36±1,95	84,72±4,92

**Tableau 20**– Valeurs moyennes de l'évolution du taux d'écoulement superficiel (%) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	72,67±1,53	88,97±0,81	82,27±4,53	90,11±1,82
Longueur 5 m	71,44±0,45	80,28±1,18	73,85±1,50	83,32±1,16

**Tableau 21**– Valeurs moyennes de l'évolution des concentrations en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	2,84±0,20	3,90±0,40	3,76±0,36	4,04±0,59
Longueur 5 m	7,92±0,37	19,87±1,44	15,08±0,97	24,67±3,06

**Tableau 22**– Valeurs moyennes de l'évolution des concentrations en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	7,43±0,40	9,07±0,47	8,23±0,70	9,90±1,56
Longueur 5 m	32,18±0,99	81,63±0,67	66,51±0,86	96,75±1,86

**Tableau 23**– Valeurs moyennes de l'évolution des concentrations en sédiments (g/l) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	3,64±0,42	3,82±0,23	3,74±0,43	3,90±0,86
Longueur 5 m	5,78±0,27	10,21±0,72	7,46±2,15	12,95±2,51

**Tableau 24**– Valeurs moyennes de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 10 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	1,97±0,26	2,76±0,13	2,70±0,62	2,81±0,37
Longueur 5 m	7,76±0,56	19,29±1,76	16,10±2,07	22,49±3,01

**Tableau 25**– Valeurs moyennes de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 20 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	38,44±0,56	47,53±0,71	44,33±0,60	50,73±0,85
Longueur 5 m	252,93±1,45	649,79±2,91	518,41±1,82	781,18±4,66

**Tableau 26**– Valeurs moyennes de l'évolution des pertes en sol (g/m<sup>2</sup>/h) dans les deux types de sols sous l'intensité pluvieuse 30 mm/h en fonction de l'inclinaison et la longueur de pente.

Pente	Vertisol		Sol calcimagnésique	
	Inclinaison	Inclinaison 10	Inclinaison	Inclinaison
Longueur 1 m	74,28±5,49	132,87±1,27	114,54±1,75	151,20±4,11
Longueur 5 m	131,46±1,41	312,99±1,26	256,97±2,82	369,02±5,18