



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
جامعة حسيبة بن بوعلي الشلف  
Université Hassiba Benbouali de Chlef  
كلية علوم الطبيعة و الحياة  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
قسم العلوم الزراعية و البيوتكنولوجيا  
Département des Sciences Agronomiques et Biotechnologie

# Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT EN SCIENCE

Spécialité : Sciences agronomiques

### Evaluation de la dégradation des sols par l'érosion hydrique en fonction des différents systèmes d'utilisation des terres dans le micro bassin de Tifiles, Ténès, Algérie « Aspects méthodologiques et techniques »

Présenté par : KESSAISSIA Abderrahmane

Soutenu publiquement le :

Devant le jury:

<b>BOUTHIBA</b>	<b>Abdelkader</b>	<b>Professeur</b>	<b>U. Chlef</b>	<b>Président</b>
<b>ACHITE</b>	<b>Mohammed</b>	<b>Professeur</b>	<b>U. Chlef</b>	<b>Examinateur</b>
<b>LARID</b>	<b>Mohamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>U. Mostaganem</b>	<b>Examinateur</b>
<b>ABABOU</b>	<b>Adda</b>	<b>Professeur</b>	<b>U. Chlef</b>	<b>Examinateur</b>
<b>BOUALEM</b>	<b>Abdelkader</b>	<b>M.C.A.</b>	<b>U. Mostaganem</b>	<b>Examinateur</b>
<b>MAZOUR</b>	<b>Mohamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>C.U. Ain Témouchent</b>	<b>Directeur de thèse</b>

Année universitaire : 2019/2020

## **REMERCIEMENTS**

Au terme de mon travail et avant tous, je remercie mon dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté, la patience et ma guidé tout au long de ma vie et qui m'a permis de m'instruire et de finir ce travail.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements et toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse monsieur Mazour Mohamed, professeur au centre universitaire d'Ain Temouchent, pour tout son dévouement lors de mon encadrement, pour toute son aide, ses précieux conseils, sa patience et sa compréhension.

Je remercie M. Bouthiba Abdelkader , professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'université de Hassiba ben Bouali de Chelf pour m'avoir fait l'honneur et le plaisir d'accepter de présider le jury.

Je remercie également Mr Ababou Adda, professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'université de Hassiba Ben Bouali de chlef , Mr Achite Mohammed, professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'université de Hassiba Ben Bouali de chlef , Mr Larid Mohamed professeur à l'université de Mostaganem et Mr Boualem Abdelkader , maitre de conférence à l'université de Mostaganem pour l'honneur qu'il m'ont fait en acceptant d'être membre de mon jury de thèse. Je tiens à leur assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail.

Je tiens à remercier mon co-promoteur Mr M'hamed Bouzina Mahfoud pour son aide et ses conseils.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les personnes qui m'ont aidés de près ou du loin pour l'accomplissement de ce travail .

En fin, je remercie tous les membres de ma famille, ma femme et mes enfants pour leur soutien et leur patience.

Abderrahmane

# SOMMAIRE

## Introduction

## Chapitre I. Synthèse bibliographique

1.1-Définitions	4
1.1.1- Dégradation des terres	4
1.1.2- Dégradation des sols	5
1.1.3- Erosion	5
A- Erosion hydrique	6
B-Distinction entre l'érosion, la dégradation et la désertification	6
1.2 –Dégradation du sol par l'érosion hydrique	7
1.2.1- Processus de la dégradation du sol par l'érosion hydrique	7
A- Processus de dégradation dans le milieu agricole	8
B- Processus de dégradation dans les milieux forestiers	9
1. 2. 2 - Facteurs de l'érosion hydrique	11
A- Facteurs favorisant l'érosion hydrique	11
B - Facteurs modifiant l'expression de l'érosivité de la pluie	17
1.2.3 - Formes d'érosions hydriques	18
A - Erosion en nappe	18
B - Erosion linéaire	20
C - Mouvement en masse ou glissement en masse	20
1.2.4 - Conséquences de l'érosion hydrique	21
A - Effets visibles de la dégradation des sols par l'érosion hydrique	22
B - Effet sur l'évolution de la matière organique	23
C - Effet sur le carbone organique du sol (SOC) et le réchauffement du climat	24
1.3 - Evaluation de la dégradation des sols	24

1.3.1-Evaluation de l'érosion hydrique. ....	24
A. La première catégorie. ....	25
B. la deuxième catégorie . ....	25
C. La troisième catégorie ....	27
1.3.2- Evaluation de l'effet de l'érosion sur les propriétés du sol ....	30
A- Evaluation visuelle de la qualité du sol (Visual assessment of soil quality) . . . . .	31
B- Evaluation par mesure des propriétés du sol (Soil measurements) ....	31

## **Chapitre II. Etude du milieu**

2.1 - Etude de milieu du sous bassin versant de Tifiles .....	32
2.1.1- Situation géographique... ..	32
2.1.2 - Situation administrative ... ..	32
2.2 - Caractéristiques physiques du micro bassin versant .....	33
2.2.1-Caractéristiques géométriques .....	33
A – Surface .....	33
B- Forme ... ..	33
2.2.2- Courbe hypsométrique .....	33
A-Altitudes .....	34
B - Indice de pente globale .....	35
C - Dénivelée spécifique .....	35
2.2.3- Réseau d'écoulement .....	36
A- Classification de Schum .....	36
B - Rapport de confluence .....	36
C - Rapport des longueurs ... ..	37
d - Densité de drainage Dd .....	37
E - Densité hydrographique .....	37
F- Temps de concentration des eaux .....	38



G- Vitesse d'écoulement .....	38
2.2.4- Profil en long .....	38
A- Coefficient de sinuosité .....	39
2.3 – Climat .....	39
2.3.1 – Pluviométrie .....	39
A – Pluviométrie moyenne annuelle .....	40
B- Courbe intensité –durée- fréquence .....	41
2.3.2-Température .....	47
2.3.3 - Autres caractéristiques climatiques .....	48
A- Vent .....	48
B- L'évaporation .....	49
2.4- Synthèse climatique .....	49
2.4.1 - Diagramme ombrothermiques de Bagnouls et Gausson .....	49
2.4.2 - Climatogramme D'EMBERGER .....	49

### **Chapitre III. Matériels et méthodes**

3-1- Echelle de l'évaluation .....	57
3-2- critères de choix de micro bassin .....	57
3.3- Organigramme du travail .....	57
3.4. Evaluation qualitative.....	58
3.4.1- Matériels .....	58
A- Logiciels utilisés .....	58
B- Outils de prospection .....	59
C- Données .....	59
3.4.2-Méthodes .....	60
A- Elaboration des cartes thématique. ....	60

B- Elaboration des cartes de fragilité et de sensibilité potentielle à l'érosion.....	62
3.5- Evaluation quantitative .....	62
3.5.1- Technique du césium-137.....	63
A- matériels.....	64
B-Méthodes .....	64
3.5.2-Approche de maillage .....	66
A-Matériels .....	66
B- Méthodes .....	66
3.5.3- Méthodes de mini disque d'infiltration test (MDIT) .....	67
A-Matériels .....	67
B- Méthodes .....	68
<b>Chapitre IV : Résultats et discussion</b>	
4.1- Evaluation qualitative .....	70
4.1.1- Elaboration des cartes thématiques .....	70
A- Carte lithologique.....	70
B - Carte de pente .....	71
C- Cartes d'occupation du sol .....	73
4.1.2- Cartes de fragilité et de sensibilité potentielle à l'érosion.....	79
A- Cartes de fragilité du sol à l'érosion.. .....	80
B- Cartes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion .. .....	83
4.2- Evaluation quantitative .....	86
4.2.1- Evaluation par la technique du césium-137.....	86
A-Activité du césium-137 .....	85
B-Bilan de l'érosion .....	91
4.2.2-Evaluation par l'approche de maillage.....	93
a- Ravine du site forestier .....	94

b-Ravine du site mixte .....	94
C-Ravine du site post-incendié .....	95
D-Quantification du transport solide .....	95
4.3- Evaluation de l'infiltration et du pouvoir hydrofuge des sols ..	96
4.3.1- Infiltration .....	96
4.3.2- Pouvoir hydrofuge .....	100
4.4 Conclusion générale .....	105

## Liste des acronymes et leur signification

Acronyme	Signification
ANRH	Agence National de ressources hydrologique
ASSOD	Assessment of the status human-induced soil degradation
CEReS	Le Centre pour l'environnement et la télédétection
CLC	Covert Land Classification
CORINE	Co-ordination of Information on the Environment
CRNA	Centre de recherche nucléaire et atomique
EEA	European Environmental Agency
ENVI	Environnement for Visualising Images
EUSOILS	Europe soils
FAO	Food and alimentation organization
GLADA	Global Assessment of Land Degradation and Improvement
GLASOD	Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation
GPS	Global Position System
HPEA	Hiver Printemps Eté Automne
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
INCT	Institut National de la Cartographie
MSDI	Moving Standard Deviation Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
ONM	Office national de météorologie
PDF	Pluie-Durée-Fréquence
PESSIRA	Pan European Soil Erosion Risk Assessment
RALA	Agricultural Research Institute of land degradation
RALA/LR	Agricultural Research Institute of land degradation and soil conservation service
RIVM	National Institute of Public Health and Environment (Netherlands)
ROI	Region of interest
RUSLE	revised universal soil loess equation
SIG	Système d'information géographique
SOC	Soil Organic Carbon
SUT	Système d'utilisation des terres
SWCS	Soil and Water Conservation Society
TM	Thematique mapper
TUT	Type d'utilisation des terres
UNEP	United Nations Environment Programme
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTM	Universal Transverse Mercator
WOCAT	World of conservation approaches and technologies



## LISTE DES FIGURES

N°	Intitulé	Page
01	Les étapes de l'érosion hydrique depuis le rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact de la goutte de pluie (Effet splash)	06
02	Relation « Dégradation du sol-Erosion-Désertification »	07
03	Les phases du processus de l'érosion hydrique	08
04	Le surpâturage et la dégradation du sol	08
05	Le travail du sol et la dégradation du sol	09
06	Processus de dégradation du sol dans les écosystèmes forestiers	09
07	Cycle de la dégradation du sol dans les forêts incendies	10
08	Facteurs et causes de la dégradation des sols	10
09	Les variables du ruissellement	13
10	Zones de transport, d'érosion et de sédimentation des particules du sol en fonction de la vitesse du ruissellement.	14
11	Ruissellement par dépassement de l'infiltration	15
12	Ruissellement par saturation	15
13	Contribution partielle de la surface du bassin versant	16
14	Stades de la dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie	19
15	Exemples de glissements du terrain	21
16	Conséquences de l'érosion hydrique	21
17	Méthodologies du RIVM pour l'évaluation de l'érosion hydrique	27
18	Méthode d'évaluation du risque d'érosion des sols (Modèle CORINE)	28
19	Présentation du modèle de PESSIRA	29
20	Comportement des éléments radioactifs dans le sol	30
21	Situation géographique du sous bassin versant de l'Oued Tifiles	32
22	Courbe hypsométrique du sous bassin versant de l'Oued Tifiles	34
23	Carte des altitudes et des surfaces	35
24	Réseau hydrographique du micro bassin de l'Oued Tifiles	36
25	Profil en long du cours d'eau	39
26	Précipitations moyennes mensuelles (1982-2012)	40
27	Précipitations moyennes annuelles (1990-2010)	42
28	Représentation graphique de la pluie journalière maximale	44
29	Courbe PDF de la station de Ténès de 1990-2010	46
30	Courbe IDF de la station de Ténès de 1990-2010	47
31	Diagramme ombrothermique de Ténès de 1982-2012	49
32	Climatogramme d'Emberger de Ténès de 1982-2012	50

33	Forêt complètement incendiée	52
34	Régénération naturelle empêchée par la répétition des incendies	52
35	Occupation des terres dans le sous bassins versant	53
36	Ravine à l'intérieure d'un site incendié	53
37	Ravine à l'intérieure d'un site forestier	54
38	Ravine à l'intérieure d'un site mixte	54
39	Enlèvement de l'envasement d'une piste	55
40	Sapement des berges du cours d'eau principal	55
41	Envasement de la cour d'une cité habitée	56
42	Organigramme de la méthodologie de travail	58
43	Sites de l'échantillonnage et du suivi	63
44	Appareil de détection de l'activité des isotopes	64
45	Etapas de détermination de l'activité du césium-137	65
46	Mini infiltromètre à disque Decagon Devices version 2014	68
47	Carte lithologique du micro bassin	70
48	MNT du micro bassin de l'Oued Tifiles	71
49	Carte des classes des pentes	72
50	Images brutes du satellite Landsat TM	73
51	Exemples des régions d'intérêt (Region Of Interest:ROI)	74
52	Typologies des principales occupations du sol	75
53	Carte d'occupation du sol en 1987	76
54	Carte d'occupation du sol en 2001	78
55	Carte d'occupation du sol en 2011	78
56	Carte de fragilité du sol en 1987	81
57	Carte de fragilité du sol en 2001	81
58	Carte de fragilité du sol en 2011	82
59	Classes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion en 1987	84
60	Classes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion en 2001	85
61	Classes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion en 2011	85
62	Variation de l'activité du césium-137 dans le site de référence	88
63	Variation de l'activité du césium-137 dans le site forestier	88

64	Variation de l'activité du césium-137 dans le site post-incendié	89
65	Variation de l'activité du césium-137 dans le site mixte	90
66	Graphe utilisé pour la détermination de $h_0$ dans la zone d'étude	91
67	Profil en 3D de la ravine du site forestier	94
68	Profil en 3D de la ravine du site mixte	94
69	Profil en 3D de la ravine du site post-incendié	95
70	Variation de l'infiltration moyenne au niveau de 1cm de profondeur	99
71	Variation de l'infiltration moyenne au niveau de 3 cm de profondeur	99

## LISTE DES TABLEAUX

N°	Intitulé	Page
01	Vitesse moyenne et le diamètre moyen des gouttes (Layth, 1984)	12
02	Caractéristiques du réseau hydrographique	36
03	Coordonnées de la station météorologique de Ténès	39
04	Précipitations mensuelles et saisonnières (source ANRH)	41
05	Pluies journalières maximales annuelles (1990-2010)	41
06	Fréquences empiriques des précipitations maximales	43
07	Pluie en millimètre en fonction des durées et des fréquences	45
08	Intensité de pluie en fonction des durées et des fréquences	46
09	Températures mensuelles de Ténès (1982-2012)	48
10	Vitesse moyenne mensuelle des vents de 2002-2012	48
11	Evaporation moyenne mensuelle de 2002-2012	48
12	Bilan des inondations enregistrées à l'aval du micro bassin de 1990-2012	56
13	Données cartographiques de la région de Ténès en coordonnées UTM	59
14	Caractéristiques des images landsat	60
15	Classes lithologiques	71
16	Classe des pentes du micro bassin	72
17	Matrice de confusion pour l'année 1987	76
18	Matrice de confusion pour l'année 2001	76
19	<b>Matrice de confusion pour l'année 2011</b>	76
20	Surfaces d'occupation du sol en Km <sup>2</sup>	79
21	Poids des classes lithologique selon la sensibilité à l'érosion	80
22	Poids des classes d'occupation du sol selon leur degré de protection contre l'érosion	80
23	Matrice entre l'occupation du sol et la lithologie du sol	80
24	Surfaces des classes de fragilité du sol (%)	82
25	Matrice entre les classes de pente et les classes de fragilité du sol	83
26	Surface des classes de sensibilité potentielle du sol (%)	84
27	Activité du césium-137 (Bq/kg) dans le site de référence	86
28	Activité du césium-137 (Bq/kg) dans le site forestier	87
29	Activité du césium-137 (Bq/kg) dans le site mixte	87
30	Activité du césium-137 (Bq/kg) dans le site post-incendié	87
31	Valeurs de l'activité du césium-137 utilisées pour la détermination de h <sub>0</sub>	91
32	Bilan de l'érosion dans le site forestier	92



33	Bilan de l'érosion dans le site post-incendié	92
34	Bilan de l'érosion dans le site mixte	92
35	Volume en m <sup>3</sup> de la ravine du site forestier	94
36	Volume en m <sup>3</sup> de la ravine du site mixte	95
37	Volume en m <sup>3</sup> de la ravine du site post-incendié	95
38	La différence des volumes en m <sup>3</sup> des différentes ravines	96
39	Masse du sol détachée ou déposée en Kg	96
40	Infiltration enregistrée dans le site forestier au niveau de 1 cm	97
41	Infiltration enregistrée dans le site forestier au niveau de 3 cm	97
42	Infiltration enregistrée dans le site mixte au niveau de 1 cm	97
43	Infiltration enregistrée dans le site mixte au niveau de 3cm	97
44	Infiltration enregistrée dans le site post-incendié au niveau de 1cm	98
45	Infiltration enregistrée dans le site post-incendié au niveau de 3 cm	98
46	Coefficient de variation du taux d'infiltration du site forestier	100
47	Coefficient de variation du taux d'infiltration du site mixte	100
48	Coefficient de variation du taux d'infiltration du site post-incendié	100
49	Pouvoir hydrofuge au niveau de 1 cm dans le site forestier	101
50	Pouvoir hydrofuge au niveau de 3cm dans le site forestier	101
51	Pouvoir hydrofuge au niveau de 1 cm dans le site mixte	102
52	Pouvoir hydrofuge au niveau de 3 cm dans le site mixte	102
53	Pouvoir hydrofuge au niveau de 1 cm dans le site post-incendié	103
54	Pouvoir hydrofuge au niveau de 3cm dans le site post-incendié	103

# Evaluation de la dégradation des sols par l'érosion hydrique en fonction des différents systèmes d'utilisation des terres dans le micro bassin de Tefilis, Ténès, Algérie – Aspects méthodologiques et techniques.

## Résumé

L'évaluation de la dégradation du sol à cause de l'érosion hydrique par différentes méthodes dans le micro bassin de Tifiles montre que le sol de la région d'étude se dégrade dans l'espace et dans le temps. L'évaluation qualitative au cours de trois des années de 1987, 2001 et 2011 montre que le sol présente une fragilité qui varie dans l'espace et dans le temps et que la classe moins fragile se transforme en classe fragile et classe très fragile en fonction de la dégradation du couvert végétale par les incendies dont la classe très fragile et la classe moins fragile passe successivement de 1987 en 2011 de 44% à 52% et de 3% à 1%. De même, la région présente une forte sensibilité à l'érosion dont les classes varient aussi dans l'espace et dans le temps. Les résultats montrent que la surface de la sensibilité potentielle à l'érosion a augmenté dans le temps et dans l'espace. La surface de la classe très potentiellement sensible est estimée à 71% en 1987 et 2001 et 70% en 2011. Par ailleurs, l'évaluation quantitative durant l'année du 2012 par le biais du suivi du bilan de l'érosion par la technique radioactive du césium-137 et l'érosion linéaire montre que l'érosion nette estimée par la technique du césium-137 est plus marquée dans le sol du site mixte suivi du site forestier et varie successivement de  $34.83 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$  et  $2 \text{ t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  par contre les dépôts sont plus marqués dans le site post-incendie et le forestier par des valeurs successivement égales à  $6.82 \text{ t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  et  $1.25 \text{ t ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ . Cependant le suivi de l'érosion linéaire par l'approche de maillage montre que le site mixte présente de détachement par le ruissellement avec une quantité moyenne de 97.650 Kg contre 62.462 Kg au niveau du site post- incendié et 46.631 Kg au niveau du site forestier. En outre l'évaluation de l'infiltration et le pouvoir hydrofuge durant l'année 2015 montre que la région présente des sols de forte pouvoir et hydrofuge notamment le site post incendie. Les différents résultats d'évaluation montrent que les sols sont naturellement fragiles et que la réduction du couvert végétal par les incendies rend les sols de la région de plus en plus dégradés.

Mots clés : évaluation, dégradation, érosion hydrique, bassin versant

# Evaluation of soil degradation by water erosion according to different land use systems in the Tefiles micro basin, Ténès, Algeria - Methodological and technical aspects.

## Abstract

The assessment of soil degradation due to water erosion by different methods in the Tefiles micro-basin shows that the soil of the study region is degrading in space and time. The qualitative assessment in three years of 1987, 2001 and 2011 shows that the soil presents a fragility that varies in space and time and that the fragile classes turns into a fragile and very fragile class according to the degradation of the vegetation cover by fires whose very fragile class and less fragile class successively increased from 44% to 52% in 2011 and from 3% to 1%. Similarly, the region has a high sensitivity to erosion. The classes also vary in space and time. The results show that the surface of potential sensitivity to erosion has increased over time and space. The area of the very potentially sensitive class is estimated at 71% in 1987 and 2001 and 70% in 2011. On the other hand, quantitative assessment estimated during the year of 2012 through the mass balance isotope erosion model of cesium-137 and linear erosion shows that the net erosion estimated by the cesium-137 technique is more marked in the mixed site and forest site successively varies from 34.83 t ha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup> and 2 t ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> on the other hand the deposits are more marked in the post-fire site and the forester by amount successively equal to 6.82 t ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> and 1.25 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> . However, the monitoring of rill erosion by the mesh approach shows that the mixed site presents detachment by runoff with an average amount of 97,650 kg against 62,462 kg at the post-burned site and 46,631 kg at the forest site. In addition, the assessment of infiltration and power water repellency registered during 2015 shows that the region has soils of high power water repellency namely the post-fire site. The various evaluation results show that soils are naturally fragile and the reduction of vegetation cover by fires makes the soils of the region to become more and more degraded.

Key words : assessment, degradation , water erosion , watershed

# تقييم تدهور التربة بالتعرية المائية وفقا لمختلف نظم استخدام الأراضي في حوض نهر تفيلس تنس -الجوانب المنهجية والتقنية

## الملخص

تقييم تدهور التربة بسبب التعرية المائية بطرق مختلفة في الحوض الصغير للتيفيلس يبين أن تربة منطقة الدراسة تتدهور في المكان والزمان. ويبين التقييم النوعي في ثلاث سنوات من عام 1987 و 2001 و 2011 أن التربة تتميز بهشاشة تتفاوت في المكان والزمان وأن هشاشة التربة تتحول الى اكثر حساسية للانجراف وفقاً لتدهور الغطاء النباتي بسبب الحرائق التي زادت في حساسيتها بحيث ارتفعت مساحتها من 44 في المائة إلى 52 في المائة في عام 2011 و انخفضت المساحة الاقل هشاشة من 3 في المائة إلى 1 في المائة وبالمثل فإن المنطقة لديها حساسية عالية للتآكل وتتغير مساحتها أيضا من حيث المكان والزمان. وتبين النتائج أن مساحة الحساسية المحتملة للتآكل قد ازدادت بمرور الوقت والمكان. وتقدر مساحة الفئة الحساسة جدا بنسبة 71 في المائة في عامي 1987 و 2001 و 70 في المائة في عام 2011. من ناحية أخرى يبين التقييم الكمي خلال عام 2012 من خلال رصد التآكل بالتقنية المشعة للسيزيوم-137 والتآكل الخطي بطريقة الشبكة يبين بأن التآكل الصافي المقدر بتقنية سيزيوم-137 أكثر في الموقع الزراعي و موقع الغابات وقدر على التوالي الي 34.83 طن الهكتار العام و 2 طن الهكتار العام . من ناحية أخرى تم تسجيل الترسبات خاصة في موقع الغابة المحروقة بحيث قدرت على التوالي 6.82 طن الهكتار العام و 1.25 طن الهكتار العام غير أن رصد تآكل الخطي يبين أن الموقع المختلط يمثل الأكثر عرضة للجريان حيث قدرت كمية التآكل 97.650 كيلوغراما مقابل 462.62 كيلوغراما في موقع المحروق و 631.46 كيلوغراما في موقع الغابات. وبالإضافة إلى ذلك، يبين تقييم نفاذية الماء في التربة والقدرة الطاردة للمياه خلال عام 2015 أن المنطقة بها تربة ذات طاقة عالية الطاردة للمياه خصوصا الموقع المحروق. وتبين من خلال نتائج التقييم المختلفة أن التربة هشة بشكل طبيعي وأن انخفاض الغطاء النباتي بفعل الحرائق يجعل تربة المنطقة أكثر تدهورا.

كلمات المفتاحية: تقييم تدهور التربة تعرية المائية حوض نهر تيفيلس





# **INTRODUCTION**

## **Introduction générale**

La dégradation des sols des zones de montagne par l'érosion hydrique est un sérieux problème pour les régions du nord de l'Algérie. Cette dégradation est favorisée par un climat très agressif caractérisé par des pluies agressives très irrégulières dont les torrentielles sont plus fréquentes en automne avec des intensités dépassant souvent  $45 \text{ mm h}^{-1}$  (Touabia et *al.*, 1999) et par les facteurs anthropiques dont les incendies, les défrichements, le morcellement du foncier, le surpâturage et l'utilisation inappropriée des sols ont contribué d'une manière remarquable à ce phénomène en rendant les bassins-versants très vulnérables à la dégradation par l'érosion hydrique et au ruissellement.

Les conséquences sont importantes où 6 millions d'hectares sont exposées à une érosion active dont la quantification spécifique varie entre  $2000 \text{ t Km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  à  $4000 \text{ t Km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ , soit 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux de ruissellement (Demmak, 1982).

La sensibilité des sols à l'érosion est favorisée surtout dans les forêts dénudées suite aux incendies, les zones fragiles notamment dans les milieux à pâturage excessif ou mis en jachère pour une longue durée et surtout les terres de grandes cultures qui restent sans couvert végétal et exposées à l'érosion pendant la période des semailles où les pluies sont plus érosives (Larid, 1994).

Le Nord-Ouest de l'Algérie est le plus touché par ce type de dégradation (Achite et al, 2006). La partie aval de certains bassins versants de cette région a connu au cours de ces dernières décennies des inondations remarquables lors des événements torrentiels. Ces événements sont plus destructifs surtout avec l'appropriation des conditions favorables à savoir la nature du relief dont la pente dépasse généralement les 25%, une lithologie sensible dominée par les marnes et les schistes et un système d'utilisation des terres inapproprié ne respectant pas les mesures de base de la conservation des sols. En plus, la dégradation du couvert végétal par la répétition des incendies a exposé plus de surface de terre aux divers aléas érosifs.

Faisant partie du Nord algérien, le micro bassin de l'Oued Tifiles constitue le site de cette étude. Il est caractérisé par des systèmes d'utilisation des terres généralement orientés dans le sens de la pente. Ils sont dominés par trois types d'utilisation des terres : terres forestières, terres de forêt après incendie (maquis) et des terres mixtes où généralement les conditions anthropiques et édaphiques sont favorables à toute aggravation de la fragilité et la de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique.

En effet, les incendies de forêt qu'a connu la région ont conduit à une réduction spectaculaire du couvert végétal, ce qui a exposé les sols aux divers risques de dégradations. Cela s'est manifesté par le détachement, le transport et le dépôt des sédiments plus à l'aval. Le tout a été accentué par les inondations des terres agricoles et des agglomérations engendrant ainsi des dommages considérables au niveau des infrastructures et des habitations et souvent par des pertes de vies humaines.

Par ailleurs, des mesures de conservation ont été déployées de part et d'autre dans la région comme l'installation des banquettes nécessitant beaucoup d'entretiens, la correction torrentielle par gabionnage souvent inadéquate et le reboisement des espaces post-incendie avec souvent des espèces inappropriées et sensibles au feu. Le tout a contribué d'une manière relative à une protection de ce milieu qui demeure toujours sensible aux événements pluviométriques importants et, où les problèmes de l'érosion hydrique continuent de se manifester à l'amont du micro bassin et à l'aval expliquant ainsi la faible efficacité de ces mesures.

Devant une telle situation, l'évaluation de la dégradation des sols s'avère une étape importante permettant de dégager les zones d'intervention prioritaires pour une lutte ciblée, efficace, économique et respectueuse de l'environnement.

Les méthodes de l'évaluation de la dégradation des sols ont connu un important développement, surtout avec la détermination de nouveaux modèles et de nouvelles techniques de mesures. On peut citer : Water Erosion Prediction Project (WEPP) de Flanagan and Nearing (1995), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) de Arnold et *al.* (1998), European Soil Erosion Model (EUROSEM) de Morgan et *al.* (1998), les modèles basés sur l'équation universelle de perte de sol (USLE) de Wischmeier et Smith (1978) et ses versions modifiées (MUSLE) et révisées (RUSLE) (Renard et *al.* 1997) et pour terminer les techniques nucléaires basés sur l'utilisation des isotopes (Ritchie and McHenry, 1990; Zapata, 2003).

De même, l'utilisation de la géomatique (Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et la télédétection) a permis des études multidisciplinaires couvrant de grandes surfaces dans un temps record et selon différentes échelles allant du local à l'international.

L'évaluation de la dégradation des sols causée par l'érosion hydrique en Algérie a été réalisée surtout à l'aide de l'utilisation de l'équation universelle dont les résultats ont montré que l'érosion en nappe reste toujours au dessous du seuil de tolérance des terres agricoles et varie entre  $0.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  à  $6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Arrabi, 1989), (Mazour, 1991), (Mazour et *al.*, 2004), (Morsli et *al.*, 2004), (Kessaissia, 1993, 2010) et (Kessaissia et *al.* 2013). Cependant,

les résultats de l'érosion par ravinement sont plus importants que l'érosion en nappe (Kouri, 1993) et (Kessaissia et Mahieddine, 2007).

Cette étude montre un exemple d'estimation de la dégradation des sols causé par l'érosion hydrique par une double évaluation, l'une qualitative basée de l'utilisation des systèmes d'informations géographiques et la télédétection et l'autre par une évaluation quantitative basée sur l'utilisation de la technique de l'isotope césium -137 dont le principe est l'approche par maillage où l'évaluation de l'infiltration et du pouvoir hydrofuge s'obtient à l'aide du minidisque infiltromètre test (MDIT).

**L'étude a pour objectifs principaux de :**

- Promouvoir une évaluation de la dégradation des sols par l'érosion hydrique à l'échelle locale sur la base des données disponibles (données cartographiques, images satellitaires et données de terrain).
- Déterminer avec précision les zones prioritaires d'intervention pour d'éventuels aménagements,
- Evaluer l'érosion hydrique et la redistribution du sol en fonction des systèmes d'utilisation des terres dans les zones de montagne.

**Ainsi, cette étude sera composée de quatre chapitres et une conclusion générale :**

- Le premier porte sur une synthèse bibliographique relative à la thématique générale.
- Le deuxième est consacré à l'étude générale du milieu de la zone d'étude.
- Le troisième présente la méthodologie d'approche du travail (matériels et méthodes).
- Le quatrième présente les résultats, leurs interprétations et leurs discussions.
- Enfin, une conclusion générale synthétisant les principaux résultats et les suggestions.



**Chapitre I : Synthèse  
bibliographique**

## **Introduction**

L'érosion des sols est considérée comme l'un des principaux facteurs contribuant à la dégradation des terres dans le monde en raison de son impact sur la capacité des sols à exercer certains types de fonctions (Morgan 2015). Elle est considérée comme l'une des formes les plus graves et les plus répandues de dégradation des sols et, à ce titre, constitue une grave menace pour la durabilité et la capacité productive de l'agriculture et des écosystèmes terrestres (Pimentel, 1993).

### **1.1. Définitions**

#### **1.1.1. Dégradation des terres**

La dégradation des terres est un terme complexe qui décrit comment un ou plusieurs aspects des ressources terrestres ont changé en fonction du temps. Il existe plusieurs opinions intervenant dans la définition de la dégradation des terres :

- En 1992, l'UNEP a défini la dégradation des terres comme un processus qui provoque la réduction des ressources potentielles de la terre (UNEP, 1992).
- En 1994, l'UNCCD l'a définie en termes de réduction ou de perte de productivité biologique ou économique.
- En 2002, la FAO a défini la dégradation des terres comme temporaire ou permanente de la productivité, cette définition suppose que la dégradation des terres est le résultat des changements du climat ou le changement des phénomènes naturels (FAO, 2002).
- En 2003, Reynolds et al, (2003) ont supposé que la dégradation des terres est un processus qui provoque la diminution de la production environnementale et la production agricole.
- Autres définitions font la différence entre la dégradation réversible des terres et leur dégradation irréversible. L'irréversibilité dépend de la perspective de l'évaluation et de l'échelle du temps envisagé.

Cependant, la dégradation des terres est difficile à être évaluée complètement. La capacité productive de la terre ne peut pas être évaluée par une simple mesure. Ainsi, on utilise des indicateurs de la dégradation des terres comme l'état du sol. Ce dernier est l'une des meilleurs indicateurs de la dégradation des terres. Le sol intègre d'important processus impliquant le développement végétatif, le ruissellement, l'infiltration, l'utilisation de la terre et les aménagements du sol.

### 1.1.2. Dégradation des sols

La dégradation des sols peut être décrite comme un processus par lequel un ou plusieurs des fonctions écologiques potentielles du sol sont lésés. Ces fonctions sont liées à la production de biomasse (nutriments, l'air et l'approvisionnement en eau, soutien de la racine des plantes), de filtrage, mise en mémoire tampon, de stockage et de transformation (p. ex., eau, nutriments, polluants) et à la réserve biologique de l'habitat et de la génétique. La dégradation des sols est définie comme un processus qui réduit la capacité actuelle ou future du sol pour produire des biens et des services. Deux catégories d'un processus de dégradation des sols sont reconnues à savoir, le déplacement des matériaux du sol (p. ex., érosion des sols par les forces de l'eau ou par les forces de vent) et une détérioration du sol in situ couvrant la dégradation chimique ou physique du sol ( FAO , 1994).

Les principaux phénomènes de dégradation des sols sont ; l'érosion hydrique et l'érosion éolienne, la dégradation chimique (acidification, salinisation, perte de fertilité et affaiblissement de la capacité de rétention des cations), la dégradation physique (encroûtement, tassement, durcissement, etc.) et la dégradation biologique (réduction du carbone total et du carbone issu de la biomasse et diminution de la biodiversité des sols). La dégradation des sols se caractérise donc par la détérioration des fonctions principales du sol où l'érosion hydrique est le phénomène majeur qui accentue la dégradation chimique, la dégradation physique et la dégradation biologique.

### 1.1.3. L'érosion

Le terme (érosion) provient du verbe latin (éroder) qui signifie ronger. Il évoque l'usure de la surface terrestre sous l'action des éléments météorologiques. Ce phénomène existe de façon permanente, il débute dès que les roches émergent et se trouvent en contact avec l'atmosphère.

L'érosion est définie comme l'enlèvement de la matière des sols sous l'effet des agents externes (eau, vent, gravité, etc.) vers une zone de dépôt. Elle exprime l'action exercée par les agents climatiques ou naturels (vent, pluie, etc.) souvent amplifiés par l'action de l'homme (surpâturage, déforestation, incendies...) qui provoquent l'enlèvement de la couche superficielle des sols et des roches meubles (Lozet et *al.*, 1986).

## A. Erosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt. Donc, les trois étapes par lesquelles passe l'érosion sont le détachement, le transport et la sédimentation. Cependant, il est à signaler que la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées comme schématisé dans la figure suivante.

La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie (= Détachement par splash). Se traduit par une action de fragmentation des agrégats et surtout par le détachement des particules de leur surface (Fig.1). Ainsi, l'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais est transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash. Ce mécanisme nécessite une pluie d'une certaine énergie qui est variable selon le type de sols.

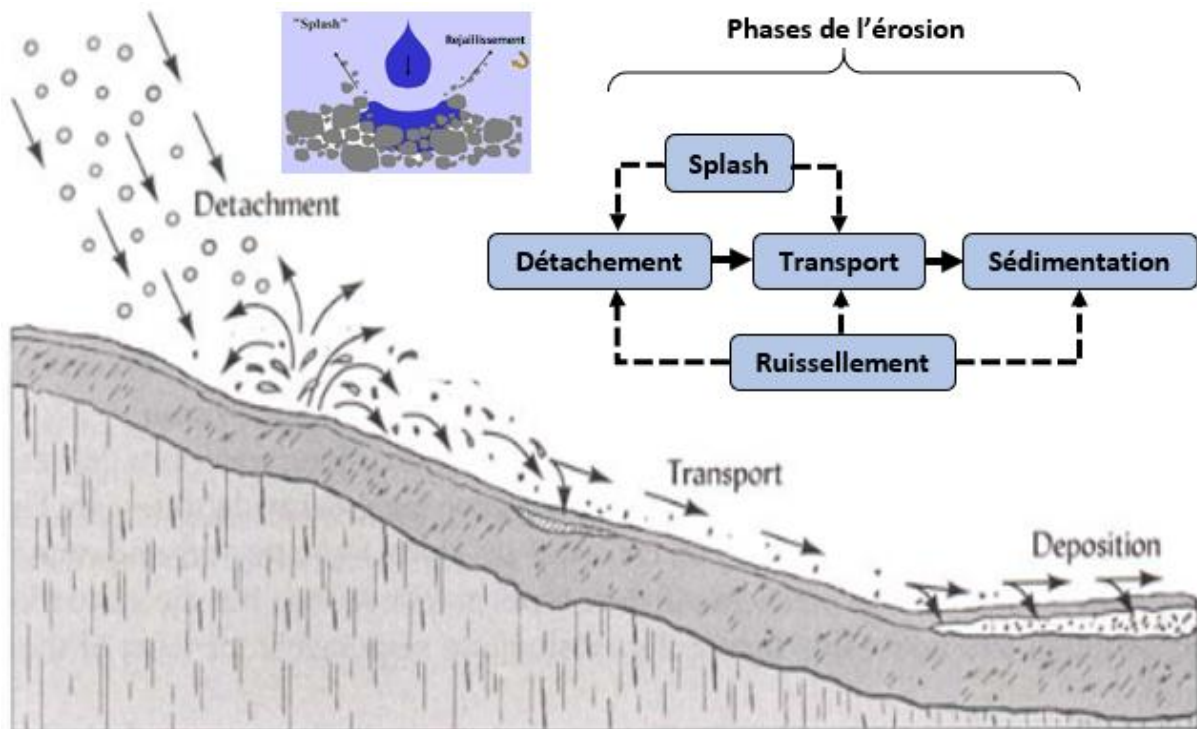


Figure 01. Les étapes de l'érosion hydrique depuis le rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact de la goutte de pluie (Effet splash)

## B. Distinction entre l'érosion, la dégradation et la désertification

- **L'érosion** se produit lorsqu'une partie du sol est déplacée d'une variable distance par rapport au site original par l'eau ou par le vent.



- **La dégradation** se produit lorsque la terre est dégradée dans son site d'origine sans l'enlèvement du sol. Elle concerne les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les processus impliqués sont généralement réversibles tel que l'acidification de la terre.
- **La désertification** est la conséquence de l'érosion et de la dégradation des sols. C'est un processus qui implique l'érosion et la dégradation selon l'article 1 de la convention des nations unis pour combattre la désertification (OECD, 1994). La désertification signifie la dégradation des zones arides, zones semi-arides et les zones subhumides, elle est les résultats de plusieurs facteurs inclus les variations climatiques et les activités humaines. L'érosion éolienne est le type essentiel de la désertification. Cependant la dégradation physique et la dégradation chimique peuvent causer aussi la désertification comme la salinisation et aridification.

La relation entre la dégradation, l'érosion et la désertification est exprimée par le schéma suivant :

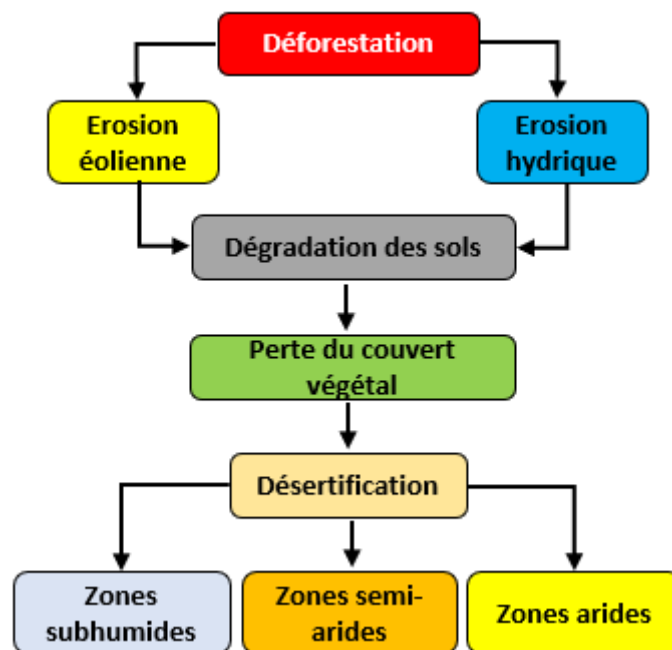
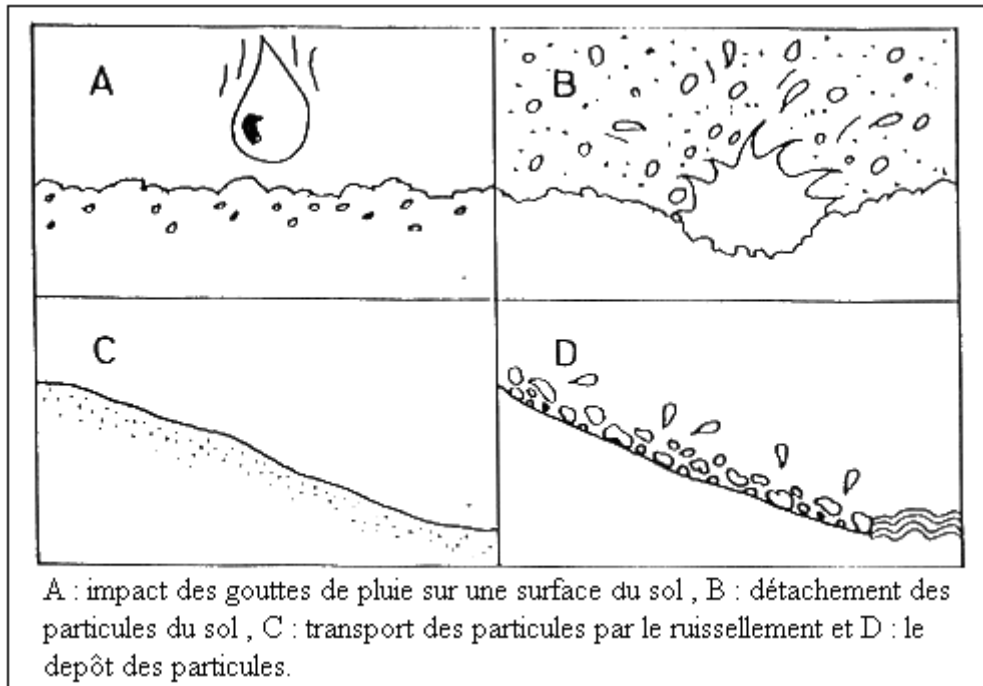


Figure 02. Relation entre dégradation du sol, l'érosion et la désertification

## 1.2. Dégradation du sol par l'érosion hydrique

### 1.2.1. Processus de la dégradation du sol par l'érosion hydrique

Le processus de la dégradation du sol par l'érosion hydrique commence par l'action des gouttes de pluie qui provoque le détachement des particules de sol suivi de la formation d'une croûte de battance qui provoque la diminution de l'infiltration et l'apparition du ruissellement (Gril et Duvoux, 1991). Ce processus est illustré par la figure suivante.

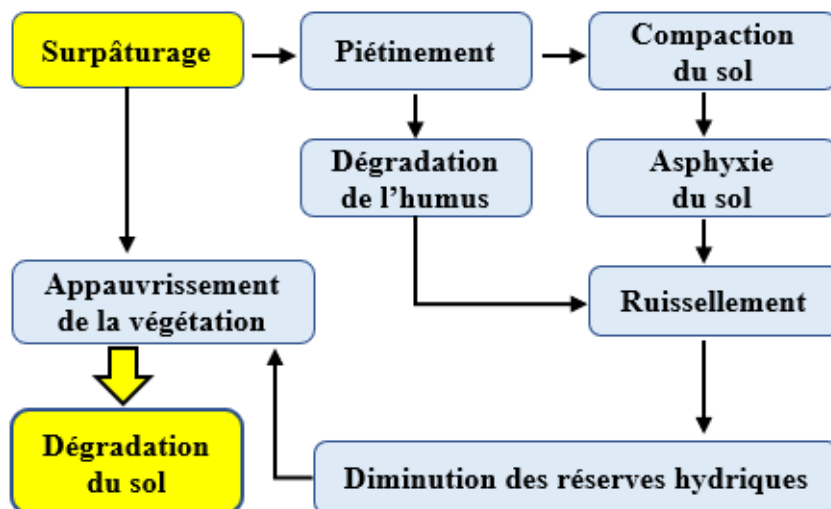


**Figure 3. Les phases du processus de l'érosion hydrique**

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage du transport et du dépôt de la terre enlevée. L'arrachage est dû à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement. Le transport des particules détachées est assuré par le rejaillissement pour un déplacement sur quelques centimètres et par les eaux du ruissellement sur des distances plus importantes.

#### **A. Processus de dégradation dans le milieu agricole**

En générale, la dégradation du sol par l'érosion hydrique est accentuée par l'action anthropique (le surpâturage et le travail du sol) comme il est indiqué dans les figures 04 et 05 :



**Figure 4. Le surpâturage et la dégradation du sol**

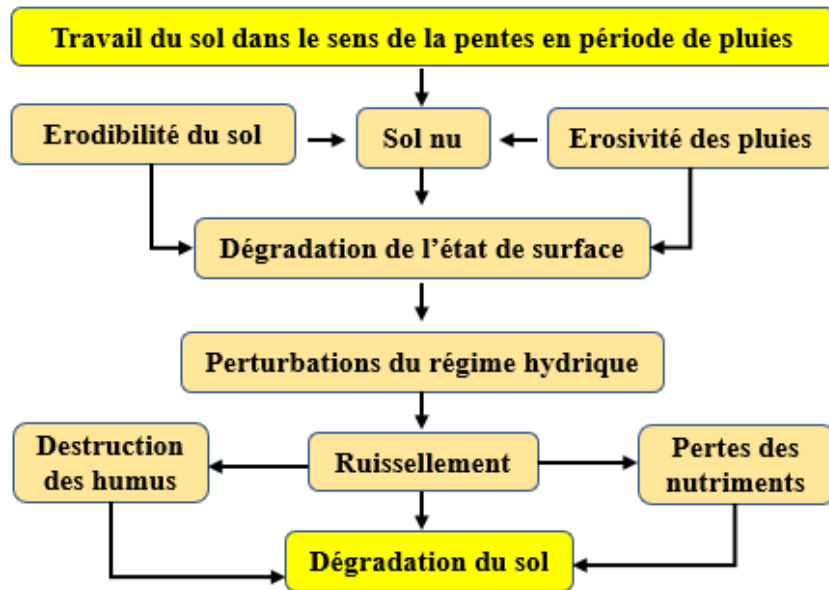


Figure 5. Le travail du sol et la dégradation du sol

### B. Processus de dégradation dans les milieux forestiers

Le processus de dégradation dans les milieux forestiers est complexe. Le climat, le sol, la topographie, la géologie et la végétation sont en interactions et affectent le ruissèlement et l'érosion (Fig. 6).

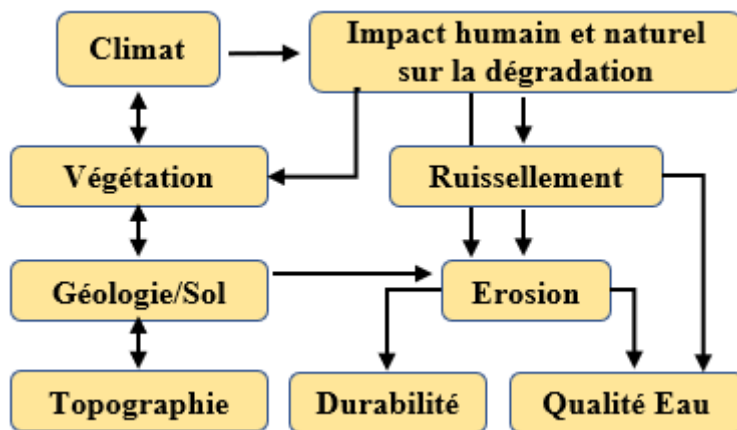


Figure 6. Processus de dégradation du sol dans les écosystèmes forestiers

La figure ci-dessus, montre que l'effet de l'érosion se produit à l'intérieur et à l'extérieur de la forêt. Ce processus est influencé par les perturbations naturelles. Les incendies à large extension et les événements climatiques sévères engendrent les inondations, les glissements du terrain, etc.

L'effet des incendies sur la dégradation du milieu commence par la dégradation de la végétation et touche par la suite les autres composantes de la forêt comme il est indiqué dans la figure suivante :

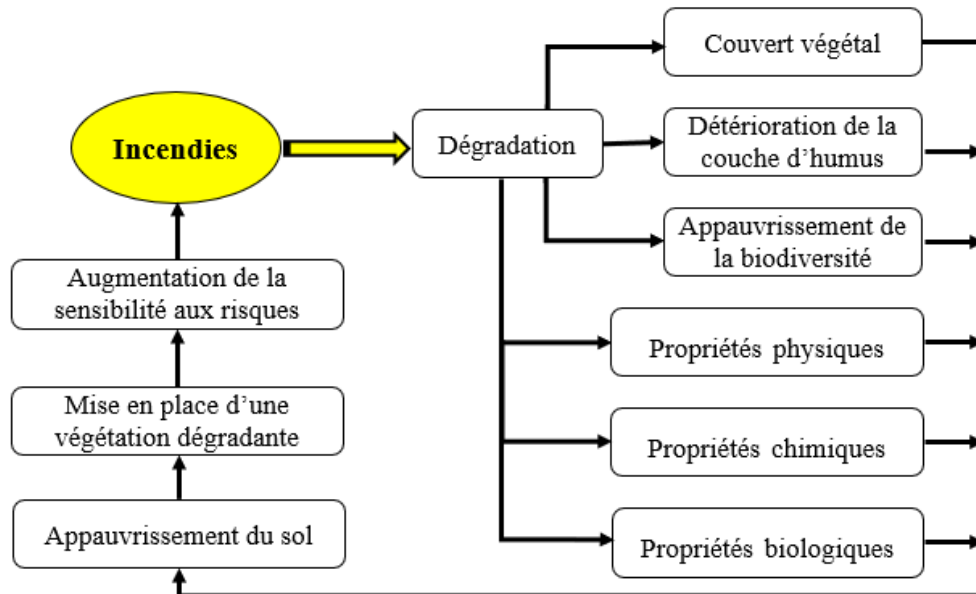


Figure 7. Cycle de la dégradation du sol dans les forêts incendiées

L'effet du processus est modifié par la nature du sol, le climat, le terrain et le couvert du sol et avec les interactions entre ces différents éléments comme il est indiqué dans la figure suivante :

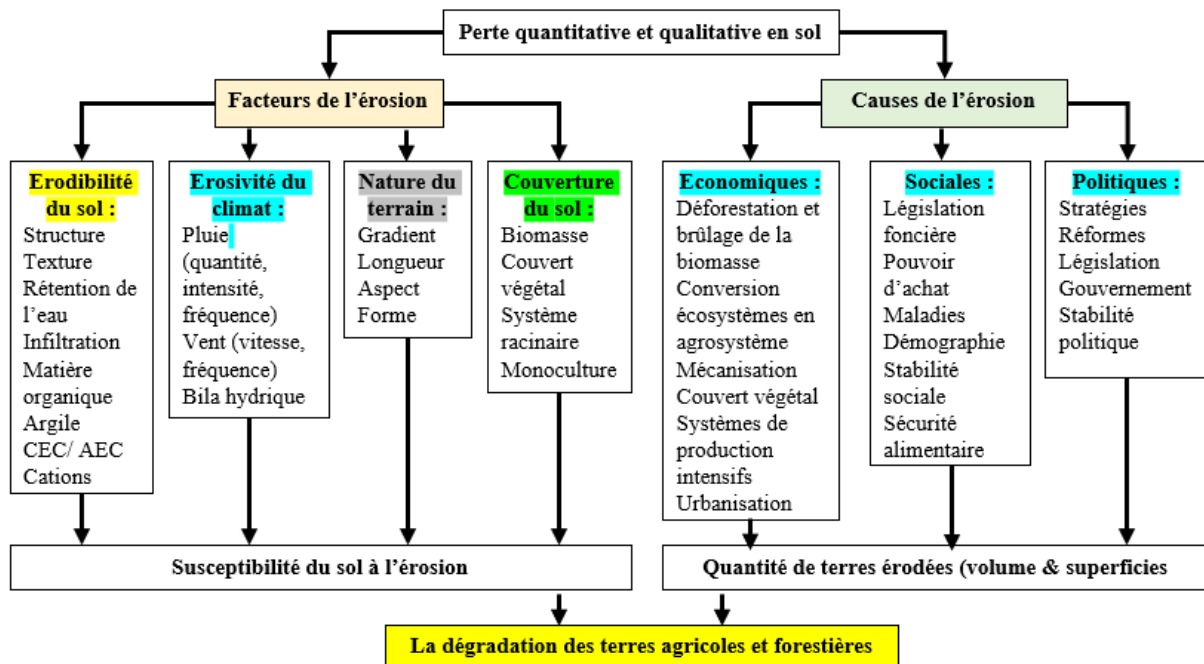


Figure 8. Facteurs et causes de la dégradation des sols

## 1. 2. 2. Facteurs de l'érosion hydrique

Les facteurs de l'érosion peuvent être expliqués par les facteurs qui favorisent et ceux qui freinent l'érosion hydrique.

### A. Facteurs favorisant l'érosion hydrique

- **Précipitations atmosphériques :** Les précipitations ont un effet considérable sur l'érosion des sols. Elles interviennent par l'intensité, l'énergie cinétique, la hauteur, le volume de ses gouttes, la répartition saisonnière et la vitesse finale de chute.
- **Hauteur de pluie :** La hauteur est un facteur plus important utilisé dans le calcul de l'agressivité du climat (Roose, 1981). Plusieurs recherches ont démontré l'existence des relations entre l'érosion et la hauteur de pluie (Fournier, 1969).
- **Influence de l'intensité des pluies :** Il est bien évident que compte tenu de la détachabilité du sol, le détachement sera d'autant plus considérable que l'énergie cinétique des gouttes de pluie sera elle-même plus élevée. Celle-ci dépend de la taille et de la vitesse de chute des gouttes. Or, la taille et la vitesse sont d'autant plus grandes que les pluies sont plus intenses. L'intensité des précipitations doit donc constituer un facteur de l'érosion plus important que leur hauteur. L'intensité pluviale a un effet aussi sur le ruissellement. Ce dernier se déclenche lorsque le sol cesse d'absorber la totalité de la pluie. Or pour un sol donné (granulométrie, état structural, stabilité de la structure), la vitesse d'infiltration est en relation directe avec l'intensité de la pluie : Il existe une intensité maximale admissible qui correspond à sa plus grande capacité d'absorption ou capacité limite. La pluie en excès est alors disponible pour le ruissellement.
- **Action des gouttes de pluie : le battage du sol :** Les gouttes de pluie peuvent détacher les particules fines de la surface des agrégats et les entraînent en suspension en rebondissant après un choc élastique et en se fragmentant en multiples gouttelettes.
- **Energie cinétique de goutte de pluie :** L'énergie cinétique des gouttes d'eau constitue le fondement de l'érosivité des pluies. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1.1)$$

La masse  $m$  d'une goutte est assimilée à une sphère. La valeur maximale de son diamètre est de l'ordre de 9 mm. Une goutte plus grosse éclate d'elle-même car la tension superficielle de l'eau est insuffisante pour la maintenir. Dans une atmosphère agitée, le diamètre maximum ne dépasse généralement pas 5 à 6 mm.

La vitesse de chute d'une goutte dépend de sa masse, donc de son diamètre. Elle n'est pas constante pendant toute la chute. Elle augmente pour atteindre une vitesse limite ou vitesse terminale (Tab.1). Cette vitesse est atteinte lorsque la distance parcourue dépasse 20 mètres. C'est donc le cas des pluies naturelles (Layth, 1984).

<b>Tableau 1. Relation entre la vitesse moyenne de chute et le diamètre moyen des gouttes de pluie (Layth, 1984)</b>	
<b>Vitesse moyenne de chute (mm / heure)</b>	<b>Diamètre moyen de la goutte (mm)</b>
0.25	0.75 - 1
1.27	1 - 1.25
2.54	1.25 - 1.50
12.70	1.75 - 2.00
24.40	2.00 - 2.25
50.80	2.25 - 2.5
101.60	2.75 - 3
102.40	3.00 - 3.25

La répartition de la dimension des gouttes de pluie est variable selon la chute des pluies. Elle est liée à l'intensité pluviale et se caractérise par le diamètre médian (désigné par  $D_{50}$ ). C'est le diamètre pour lequel le volume total des gouttes de taille supérieure est égal au volume total des gouttes de taille inférieure (Fournier, 1969). L'exemple suivant montre cette relation (Poesen, 1985 et Auzet, 1987)

$$D_{50} = a I^b \quad (1.2)$$

$D_{50}$  diamètre de gouttes de pluie (mm)

$I$  : intensité (mm/heure)

$a$  et  $b$  des constantes

Wishmeier et Smith, (1978) ont établi une formule qui met en relation l'énergie avec l'intensité exprimée par la relation suivante :

$$E_c = 916 + 331 \ln I \quad (1.3)$$

$E_c$  = énergie cinétique (pieds tonnes par acre)

I = intensité pluviale (inch par heure).

- **Fréquence des pluies :** Les précipitations sont caractérisées par leur répétition à court terme pendant la saison des pluies : une répétition journalière des pluies est un fait commun. Ces répétitions à court terme ne permettent pas au sol de se ressuyer entre deux averses, il atteint vite sa saturation et les dernières pluies, quels que soient leurs caractères, ruissellent beaucoup plus qu'elles ne s'infiltrent. D'autre part, le phénomène de détachement des particules fines du sol apparaît lorsque les agrégats sont recouverts d'un film d'eau. Avec une grande fréquence des pluies, certaines d'entre elles, bien que moins hautes ou moins intenses que d'autres, peuvent donc générer des ruissellements et des érosions plus élevés (Fournier, 1969).
- **Ruissellement :** Le ruissellement est le facteur essentiel de l'érosion : l'eau qui s'écoule déplace les particules plus ou moins grosses en fonction de la quantité d'eau en mouvement et de la pente, ce qui peut avoir un effet abrasif sur le terrain soumis au ruissellement. Les principales variables associées au ruissellement comme il est indiqué dans la figure 8 sont des variables :
  - ✓ Géométriques sont  $\sin \beta$  qui peut être remplacée par la pente ( $S_0$ ) pour des valeurs faibles de  $\beta$  et la longueur de la pente  $L$ .
  - ✓ Physiques sont l'intensité de la pluie  $R$ , l'épaisseur de la lame d'eau  $h$ , la vitesse moyenne de l'écoulement  $V$ , le débit unitaire  $q$ , la rugosité de fond  $k$ .

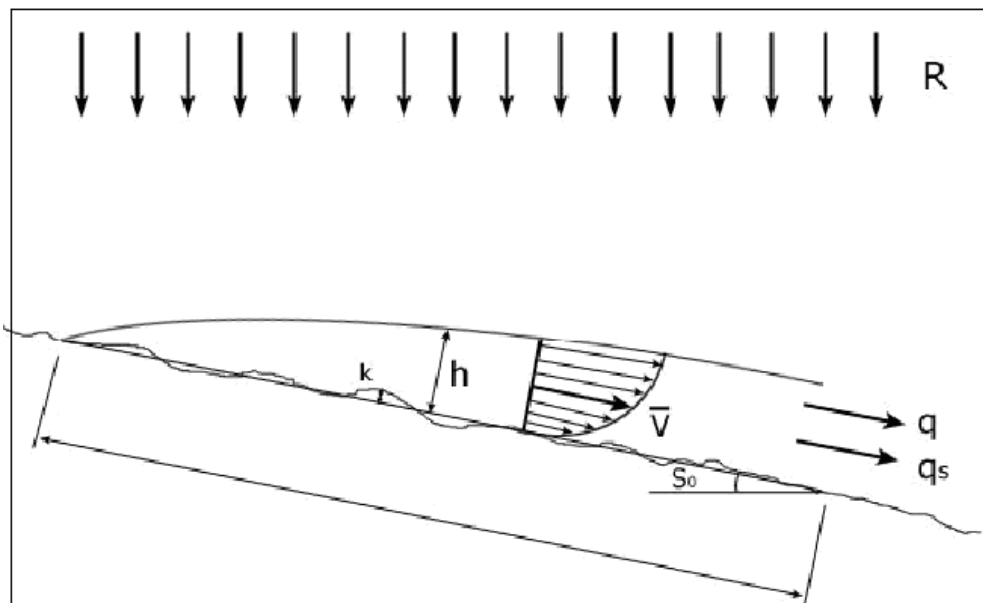
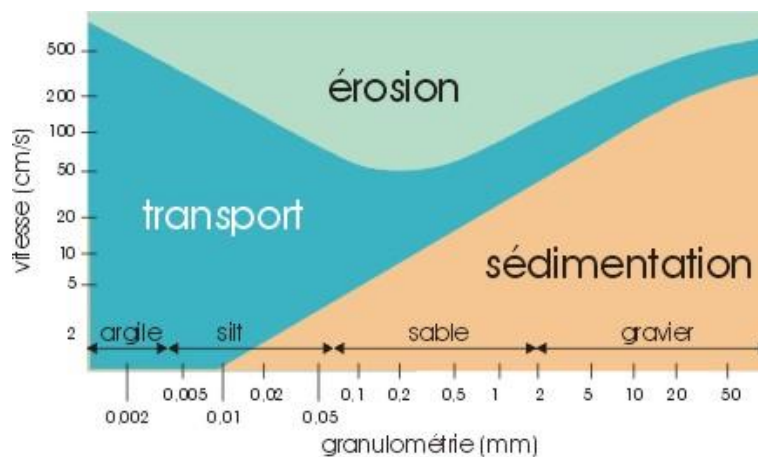


Figure 9. Les variables du ruissellement (Julien et Simons, 1985)

Le paramètre généralement associé au débit massique de sédiment par unité de largeur  $q_s$  est la contrainte de cisaillement au niveau du lit.

Les études sur le ruissellement en tant que facteur causal de l'érosion ont débuté dès l'ère scientifique. Les géographes et les géologues ont étudié le ruissellement en tant que facteur d'évolution des paysages à la surface du globe. Pour le géomorphologue, le ruissellement rassemble les eaux de pluie dans les ravines puis les vallées et qui arrache une masse importante de matériaux.

Cette hypothèse (Hjulstrum, 1935) admet que le ruissellement comme la seule ou tout au moins la principale cause de l'érosion aboutit à des études très intéressantes sur la vitesse de l'eau, sa compétence et sa capacité de charge, les zones de sédimentation, de transport et d'érosion des particules en fonction de leur diamètre et de la vitesse de l'eau (Fig. 10).



**Figure 10. Zones de transport , d'érosion et de sédimentation des particules du sol en fonction de la vitesse du ruissellement.**

Ainsi, la naissance du ruissellement est expliquée par trois théories :

- ✓ **Théorie de Horton (1945) :** Le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (Fig.11). Cette théorie est basée sur le principe, que tant que la capacité d'infiltration du sol n'est pas dépassée, la totalité de la pluie s'infiltré mais dès que les précipitations dépassent cette capacité, le surplus d'eau ruisselle à la surface du sol.



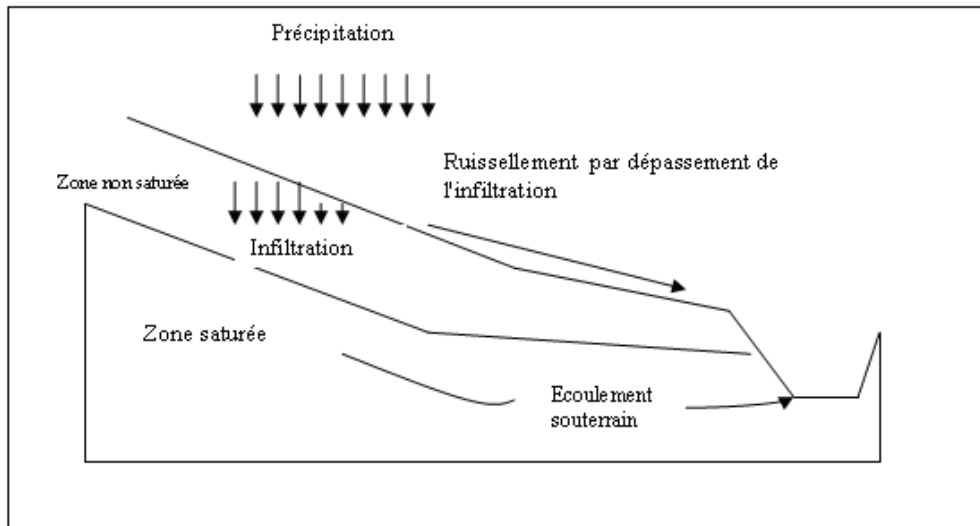


Figure 11. Ruissellement par dépassement de l'infiltration (Ward et Robinson, 1990)

- ✓ **Théorie de la saturation du milieu :** Le ruissellement naît lorsque l'espace poreux du sol est saturé. Par conséquent, la pluie arrivant à cet espace ne peut plus s'infiltrer et ruisselle à la surface du sol (Fig.12).

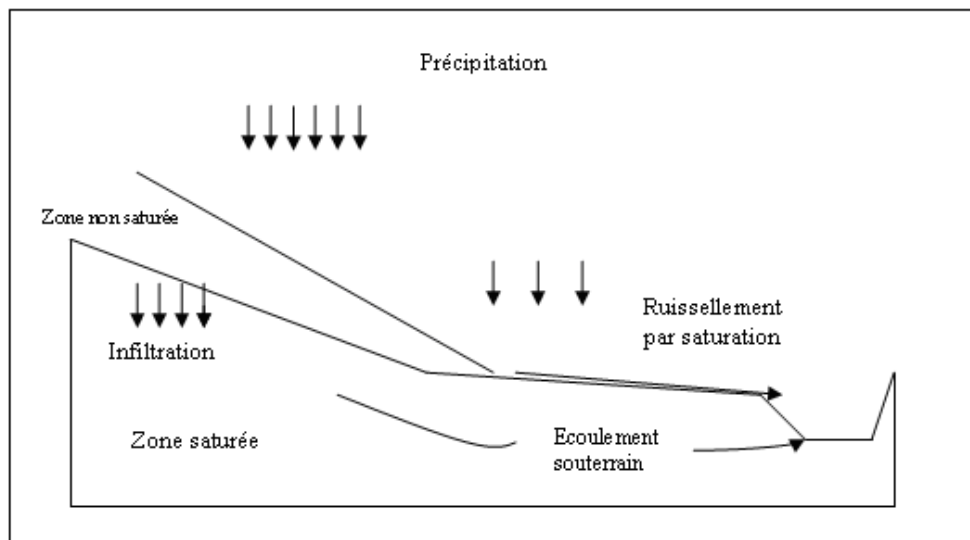


Figure 12. Ruissellement par saturation (Ward et Robinson, 1990)

- ✓ **Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin versant :** Cette théorie est basée sur des observations du comportement de ruissellement au niveau des rivières en fonction de la surface du sol saturée au fond de la vallée. Il est constaté qu'au cours de la saison sèche les rivières réagissent très rapidement aux orages alors qu'il n'y a pas de ruissellement sur les versants. Par contre, en fin d'hiver lorsque tout le volume de la couverture pédologique est réhumectée

jusqu'aux capacités au champ, la moindre averse qui alimente la nappe va latéralement saturer une plus grande surface de la vallée. Par conséquent, même s'il n'y a pas de ruissellement sur le versant en période humide, l'ensemble du bassin versant va contribuer au volume écoulé par la rivière par extension de la surface saturée, la nappe étant alimentée directement par le drainage de l'ensemble du bassin (Fig. 13).

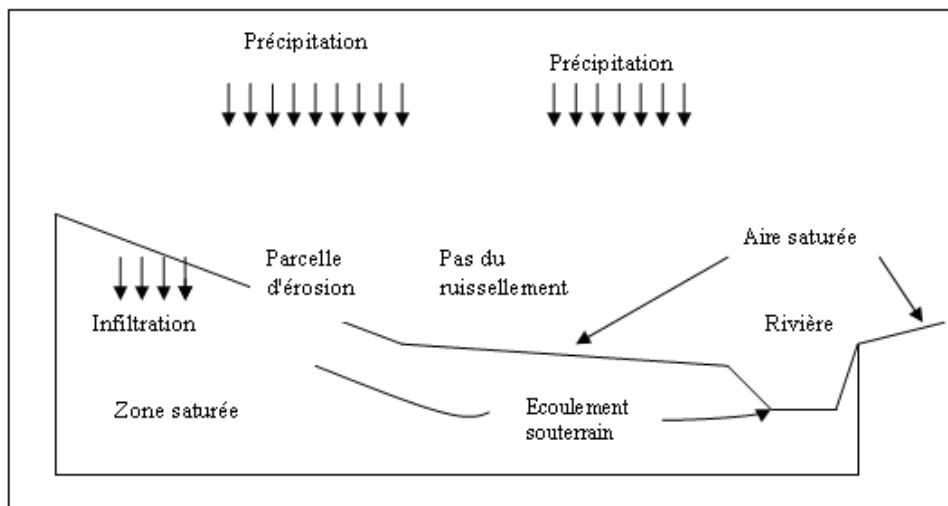


Figure 1. Contribution partielle de la surface du B. versant (Ward et Robinson, 1990)

- **Relation entre Précipitation et Ruissellement** : Ce n'est qu'en 1930 qu'une série d'études mettant en relation les précipitations et le ruissellement a commencé. Ainsi, une série d'études sur l'effet « splash » et l'énergie cinétique des gouttes a été réalisée par Wischmeier et Smith (1958).
- ✓ **Ellison (1945)** a démontré que les gouttes d'eau, en s'écrasant sur un sol gorgé d'eau, libèrent une énergie capable de désintégrer les agrégats et de déplacer les particules de terre sans le concours du ruissellement. (Woodruff, 1948) a démontré que si la contribution de l'énergie des gouttes de pluie est capitale à faibles pentes, elle devient secondaire par rapport à l'énergie du ruissellement au-delà de 16% de pente.
- ✓ **Wischmeier et Smith (1958)** en établissant une corrélation étroite entre l'érosion, l'énergie cinétique et l'intensité instantanée maximale pendant 30 minutes ( $I_{\max 30'}$ ) des pluies, ont montré le lien qui unit l'effet splash et le ruissellement.
- ✓ **Hudson (1971)** en Rhodésie du Sud, mit en évidence de façon très piquante l'importance primordiale du couvert végétal sur l'érosion (comparaison de l'érosion et du ruissellement sur parcelle nue ou sur parcelle couverte de gazon) et, par là même, la primauté de l'effet splash sur le ruissellement. En effet, si pour une forte

énergie cinétique correspond à une forte intensité de la pluie, celle-ci entraînera l'engorgement de l'horizon superficiel du sol et un fort ruissellement. Dans le cas d'une érosion en nappe, le ruissellement n'est que l'agent transporteur des débris arrachés par l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

## **B. Facteurs modifiant l'expression de l'érosivité de la pluie**

Les facteurs qui peuvent augmenter ou freiner l'agressivité de la pluie et du ruissellement sont : le sol, la pente, la couverture végétale et les techniques culturales.

- **Sol** : Le sol par sa structure et sa texture réagit soit positivement soit négativement à l'agressivité de la pluie. La texture des différents horizons du sol, par le biais de la perméabilité, modifie directement l'une des causes de l'érosion : le ruissellement. Celui-ci dépend beaucoup de la profondeur de l'horizon le moins perméable. De plus, un même sol répond très différemment à l'agressivité des pluies suivant sa structure. Après un défrichage, le sol mis à nu se tasse et l'on voit le ruissellement s'intensifier, la stabilité de la structure se dégrade rapidement (minéralisation brutale de la matière organique) et croître son érodibilité. De plus, les sables et les argiles développent entre leurs éléments des forces d'attractions très distincts. L'érosion sur un sol argileux est étroitement liée à l'énergie développée par la pluie pour séparer les particules tandis que sur un sol sableux (toujours moins cohérent) elle est l'expression de la capacité de transport du ruissellement. Par ailleurs, certains types de sols sont plus sensibles que d'autres. C'est le cas des sols ferrugineux, des sols lessivés en général et des sols podzoliques,
- **Pente** : La pente par sa longueur, son inclinaison et sa forme joue un rôle considérable sur les phénomènes de l'érosion.
  - ✓ **Longueur de la pente** : La force du ruissellement de causer l'érosion augmente avec l'augmentation de la longueur de la pente. Ainsi, plus la pente est longue plus la lame est épaisse et plus la vitesse est grande et plus la capacité du ruissellement d'arracher le sol est forte.
  - ✓ **Inclinaison de la pente** : La proportion de l'eau de percoler dans le sol diminue avec l'augmentation de l'inclinaison de la pente. De plus, les gouttelettes projetées par l'effet « splash » toucheront le sol plus rapidement vers le haut que vers le bas de la pente.

- ✓ **La forme de la pente :** La concavité de la pente réduit les transports solides (par sédimentation localisée) tandis que la convexité l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu (Wischmeier,1974). La présence de pentes concaves dans le paysage indique qu'il doit y avoir des piègeages, des colluvions et d'alluvions dans le bassin-versant.
- **Couverture végétale :** C'est le facteur principal sur lequel l'homme peut intervenir pour contrôler l'érosion par l'utilisation de différentes cultures ou plantations. Le rôle de la végétation sur l'érosion est assuré par :
  - ✓ L'appareil aérien qui intercepte l'énergie cinétique des gouttes de pluie.
  - ✓ Le système racinaire superficiel fixe et retient le sol, ralentit la vitesse du ruissellement et favorise la structure du sol et un bon drainage.
  - ✓ Les débris des végétaux morts recouvrent le sol et freinent le ruissellement. La décomposition des végétaux donne naissance à l'humus qui a un effet positif sur l'amélioration de la structure du sol, le drainage et la productivité du sol.
- **Influence de l'action de l'homme :** L'érosion, devenue essentiellement liée à l'activité humaine. Elle est le principal facteur de la dégradation des sols. Elle se fait par :
  - ✓ Les aménagements routiers et urbains en augmentant les surfaces imperméables exacerbent les inondations favorisent le ruissellement et donc l'entraînement du sol. La disparition des méandres et d'espèces qui freinaient le cours de l'eau a également exacerbé les cycles inondations sécheresses qui sont également facteurs d'érosion et de dégradation des sols.
  - ✓ Les techniques culturales : Les techniques culturales appliquées aléatoirement augmentent les risques d'érosion en perturbant la végétation locale. Parmi les pratiques accélérant l'érosion du sol, le surpâturage, la monoculture, le défrichage et la déforestation.

### 1.2.3. Formes de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique regroupe trois formes d'érosion :

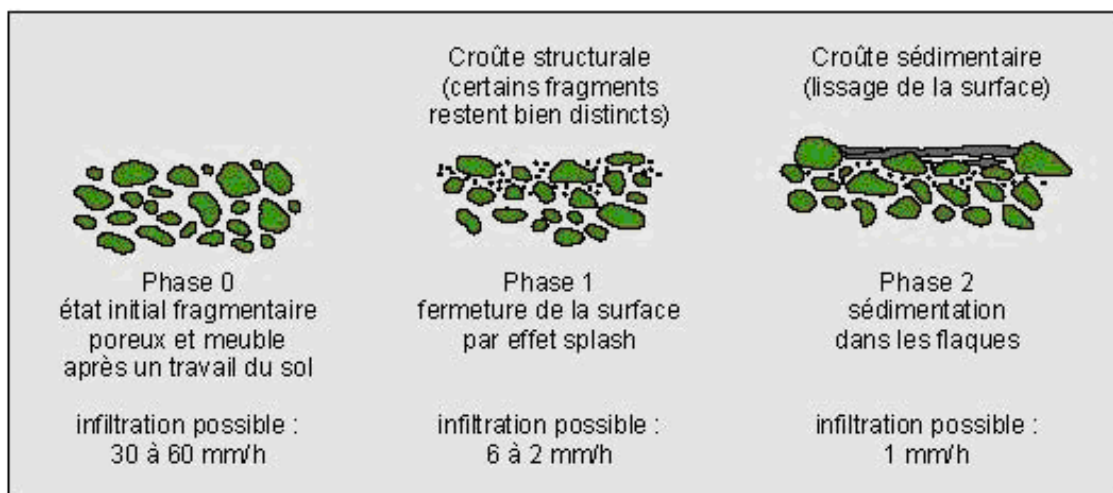
#### A. Erosion en nappe « sheet érosion »

On parle d'érosion en nappe ou aréolaire parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique sur toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le

ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion. Elle 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.
- Le « splash » a un rôle déterminant dans la formation des croûtes : la couche superficielle est compactée et sa rugosité diminue sous l'action des pluies. La capacité de rétention de l'eau sous forme de flaques est ainsi réduite et l'excès d'eau va se transformer plus souvent et plus rapidement en ruissellement.

La figure 14 montre les stades de dégradation du sol par l'action de la pluie selon Boiffin (1984).



**Figure 2. Stades de la dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie (Boiffin, 1984)**

L'érosion en nappe se manifeste par :

- Le nivellement de la surface du sol par dégradation des mottes et le remplissage des creux. Il s'ensuit des croûtes diverses, lisses et blanches (exemple : zipellé en Moré veut dire : zone blanche).
- La squelettisation des horizons superficiels par la perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sable et de gravier, plus claire que l'horizon humifère sous-jacent.
- Le décapage de l'horizon humifère laissant des plages de couleur plus claire : l'horizon minéral sous-jacent apparaît à l'air libre.

## **B. Erosion linéaire « micro-channel ou Rill érosion »**

L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, il creuse des formes de plus en plus profondes. On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur mais sont encore effaçables par les techniques culturales. On parle de nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres et on parle de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales.

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.

## **C. Mouvement en masse ou glissement en masse**

Cette forme d'érosion se produit lorsque la force de cisaillement est supérieure à la force de la résistance du sol. Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux et peuvent être regroupés en:

- Les glissements lents (creep ou reptation du sol),
- Les glissements en planches,
- Les glissements rotationnels en "coups de cuillère",
- Les glissements rapides,
- Les versants moutonnés,
- Les coulées boueuses (lave torrentielle).

Elle se manifeste généralement par :

- Surface du sol ondulé,
- Présence de coulée de boue,
- Présence de talus de forme généralement demi circulaire.  
Déformation de la base des arbres (sens de la pente)

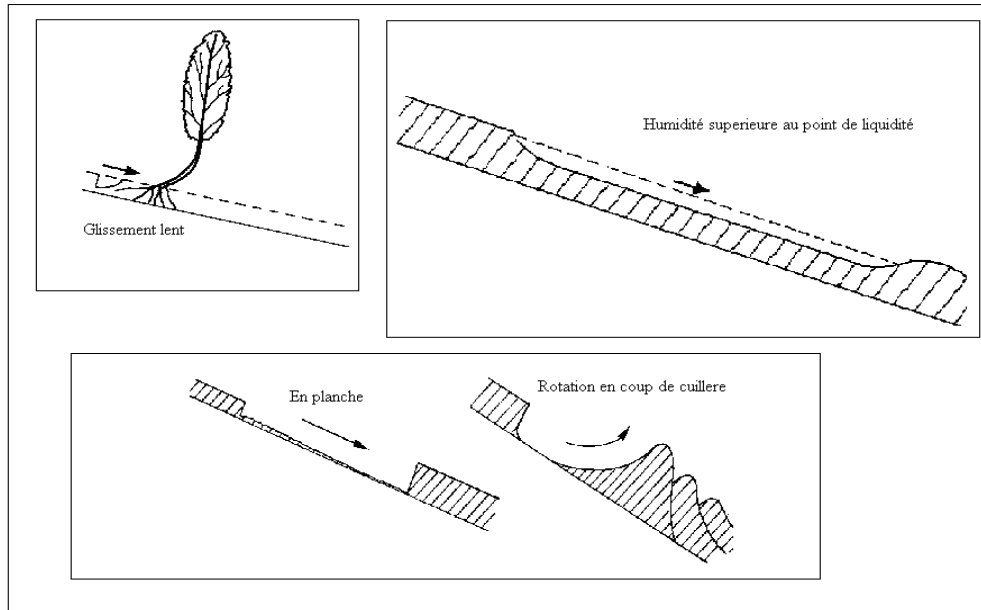


Figure 15. Exemples de glissement du terrain

#### 1.2.4. Conséquences de l'érosion hydrique

Le sol est la fine couche de la terre composée de matières minérales et organiques qui permettent la rétention et la circulation de l'eau et de l'air et de toute une bioturbation. Aujourd'hui, l'érosion des sols participe à plusieurs grands problèmes socio-économiques et environnementaux qui perturbent notre cadre de vie. La perte du sol sur site par l'érosion réduit sa surface, sa fertilité et donc sa productivité. Hors site, l'atterrissement des sédiments érodés provoquent souvent le recouvrement de fossés, routes et l'envasement de barrages. Ils augmentent la turbidité de l'eau et la charge solide de l'eau potable. La faible restitution au sol de débris végétaux l'appauvrit en matière organique principale ressource pour une bio fertilisation. Associés inévitablement aux sédiments, les engrais et pesticides contribuent à la pollution de l'environnement et nuisent à la santé. Ainsi, le phénomène de l'érosion est un circuit fermé dont les conséquences de l'érosion peuvent être représentées dans la figure suivante :

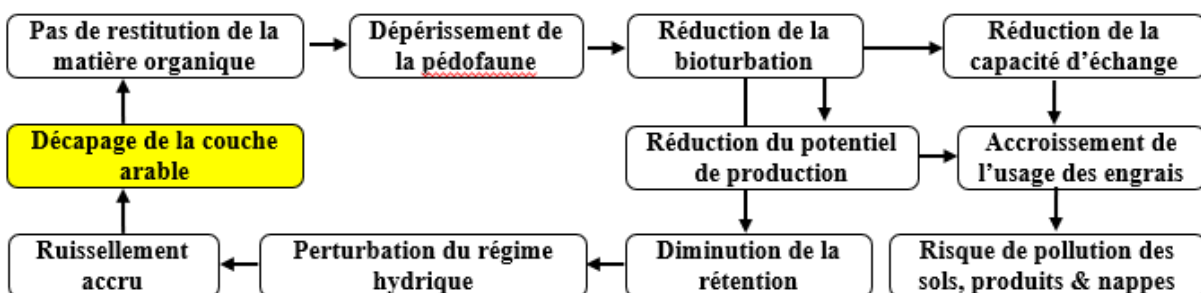


Figure 3: Conséquences de l'érosion hydrique

## A. Effets visibles de la dégradation des sols par l'érosion hydrique

Les signes et les effets physiques visibles de la dégradation du sol par l'érosion hydrique qui peuvent être distingués sont :

- **Les griffes et les fines rigoles** formées par l'eau particulièrement en haut des pentes, sur le bord des pistes ou dans les champs sillonnés par les labours. Elles deviennent des ravines par élargissement dû à la concentration de ruissellement excessif.
- **Les pavages de cailloux et de pierres** laissés en surface. Une fois les particules les plus fines du sol emporté par le ruissellement, ils sont observés dans un grand nombre de champs labourés et de terrains de pâture.
- **Les buttes** de sol résiduel où sont perchées des touffes d'herbes : Signes d'érosion, quand elles n'ont pas été créées par l'accumulation de débris foliacés et d'humus, ou par le fouissage des rongeurs.
- **L'accumulation des sédiments** autour des arbres, des pierres, des palissades et des haies sur terrains en pente.
- **L'exposition des racines d'arbres et arbustes** à l'air ou mise à nu dans des cours d'eau, résultats d'une dispersion du sol ou d'un accroissement de ruissellement suite à la dégradation de bassins versants.
- **Les dépôts de sols sur les pentes douces** de graviers, des sables et des limons dans les lits de cours d'eau résultent d'une érosion en amont.
- **Les taches nues dans les herbages et les pacages** (signes d'une tendance à la dégradation).
- **Le déplacement du sol par piétinement** résultant du pâturage sur les pistes à bétail au long des courbes de niveau où les animaux font progressivement glisser la terre en bas de la pente.
- **La modification de la flore** par exemple et la substitution de l'herbe par les buissons survenant après surpâturage accentue souvent l'érosion.
- **Les atterrissements** des sédiments dans les retenues, les barrages, les lacs et les étangs. En plus aux baisses croissantes de rendements, les conséquences suivantes peuvent être citées :
- **L'envasement** des barrages, des retenues d'eau, des rivières, des canaux et des systèmes de drainage par la terre érodée des sols dégradés et la réduction des stocks de poissons à la suite de tels effets.



- **La réduction de la capacité d'infiltration** des sols dégradés et la baisse du niveau ou assèchement des nappes et points d'eau à cause des pertes d'eau par ruissellement.
- **Les problèmes sanitaires et de qualité de la vie** : Un environnement dégradé n'offre que de mauvaises conditions de vie.
- **Les besoins accrus** de terre et de facteurs de production agricole.
- **Les préjudices** à la société et aux générations futures qu'entraînent les pertes définitives de terre.

## **B. Effet sur l'évolution de la matière organique**

La matière organique dans le sol est un élément important de la santé et de la fertilité du sol. Elle est fortement liée à de nombreux aspects importants de la qualité du sol comme le cycle des éléments nutritifs, l'agrégation et la structure du sol, le mouvement de l'air et de l'eau dans et à travers le sol, l'adsorption et la dégradation des pesticides, la capacité d'échange de cations, le stockage du carbone et la quantité et la diversité des microorganismes. Les pertes de matière organique du sol contribuent à dégrader la structure du sol, à rendre le sol plus vulnérable à l'érosion et à réduire sa fertilité, ce qui se traduit finalement par une réduction des rendements et de la pérennité des ressources du sol.

Si les pertes en nutriments sont remplaçables par les pratiques de fertilisation, en revanche, 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. En outre, elle engendre :

- **La minéralisation des matières organiques** du sol (d'autant plus active que le climat est chaud et humide) et l'exportation minérale par les cultures (non compensée par des apports de fumure) entraînent la baisse de l'activité de la microfaune et de la méso faune responsables de la macroporosité.
- **La squelettisation ou l'enrichissement en sable** des horizons de surface par érosion sélective des particules fines, des matières organiques ou des nutriments, suite à la battance des pluies qui tasse le sol, casse les mottes, arrache au passage des particules

qui vont former des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation favorisant le ruissellement.

### **C. Effet sur le carbone organique du sol (COS) et le réchauffement du climat**

Les stocks des éléments dans les sols et en particulier ceux du carbone sont en constante évolution sous l'effet de facteurs naturels (climat, végétation, effets de l'altération, de la lixiviation, et plus généralement de l'ensemble des processus pédogénétiques) et anthropiques (impacts locaux des utilisations des sols, effets diffus d'apports hydriques et atmosphériques).

En un point donné, les variations des stocks de carbone sont dues à divers processus : Modification des apports de matière organique, transferts du carbone sous forme solide (particulièrement par érosion en nappe) ou soluble (lixiviation et ruissellement) et pertes par minéralisation de la matière organique des sols (Blanchart et Martial, 2005).

Les études récentes ont montré que les matériaux érodés jouent un rôle significatif dans la compréhension de la distribution du carbone du sol et par la suite la qualité du sol (Ritchie et McCarty, 2003).

En effet, l'érosion provoque l'entraînement des particules du sol riches en matière organique et se traduit par suite par la réduction de carbone du sol (SOC). La quantité de carbone du sol érodée facilement libérable dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). Avec le temps, ce dernier devient un facteur de pollution et contribue au réchauffement du climat par le phénomène de l'effet serre.

### **1.3. Evaluation de la dégradation des sols**

Dans le passé, l'évaluation de la dégradation des sols est effectuée en générale lorsque le problème touche la production agricole. L'évaluation de la dégradation des sols peut varier en fonction de type du processus de dégradation, de l'échelle et de la méthode d'évaluation.

Il y a deux parties à l'évaluation du sol, d'une part l'évaluation et la notation de l'activité, du type et de la gravité de l'érosion du sol et d'autre part, l'évaluation de l'effet de l'érosion sur les propriétés du sol, ce qui se traduit par une évaluation de la santé du sol.

#### **1.3.1. Evaluation de l'érosion hydrique**

Afin de surveiller et d'évaluer les impacts environnementaux et sociaux de l'érosion des sols et d'appliquer les stratégies d'aménagement, il faut avoir des informations quantitatives sur les taux d'érosion des sols pour des grandes surfaces.

La demande d'informations crédibles sur l'érosion pour des surfaces importante a mené à l'élaboration de nombreux efforts de surveillance, de programmes d'inventaire et de coopération inter institutions pour la collecte de données d'évaluation de l'érosion. Pour cela plusieurs approches ont été déterminées et qui sont groupés en trois catégories (Liu et *al.* 2013).

### A. La première catégorie

Elle comprend une évaluation fondée sur l'échantillonnage et sur l'utilisation des parcelles de ruissellement et d'érosion. L'exemple le plus connu de cette approche l'utilisation l'équation universelle (USLE) et l'équation universelle de perte du sol modifiée (MUSLE) mené au états unis par le service de conservation naturelle (NRCS), (Nusser, and Goebel, 1977). Parmi les exemples de cette catégorie :

- L'équation universelle de perte du sol (USLE) qui a été développé par le service de conservation des sols SCS à l'USA en 1935. L'évaluation par cette équation a donnée des résultats positifs dans les sols agricoles par contre elle n'est pas applicable dans l'évaluation des terres de parcours (Arnolds, 2008). L'USLE a été largement utilisée dans l'évaluation à long terme les pertes du sol annuelles. Cette approche tienne en compte uniquement l'érosion au niveau des rigoles et l'érosion au niveau de l'inter rigole mais néglige l'érosion du ruissellement concentré et les mouvements en masse.
- Pour tenir compte du ruissellement, l'équation universelle a été modifié et révisée en équation universelle de perte de sol modifié MUSLE (Williams and Berndt, 1977) et en équation de perte du sol universelle révisée RUSLE (SWCS, 1993).

### B. La deuxième catégorie

Elle comprend des méthodes qualitatives basées sur des approches factorielles et sur des méthodes réalisées par des experts. Ces méthodes utilisent les images satellitaires, les système d'informations géographiques (Li et *al.* , 2012). Parmi les exemples de cette catégorie :

- **Evaluation global de l'effet de l'homme sur la dégradation des sols** : L'objectif de la méthode GLASSOD (GLobal Assessment of human induced Soil Degradation) dite évaluation globale de l'effet de l'homme sur la dégradation des sols est de fournir des informations pour mettre en garde les décideurs et les hommes politiques contre les dangers de la dégradation des sols. Elle montre l'état actuel de la dégradation des sols par des mesures cartographiques. Le pourcentage de la zone cartographiée affecté, la rapidité apparente du processus de dégradation des sols estimé au cours des cinq à dix

ans et le type d'intervention humaine physique qui causait la dégradation des sols (Oldeman et al. 1991). Les zones touchées par la dégradation des sols à la suite des activités de l'homme sont définies comme des régions où l'équilibre entre l'effet des forces du climat et la résistance naturelle sont affectées par les interventions de l'homme, se qui se traduit sur la réduction de la capacité de ces zone d'être considérées comme un support de vie. Les classes selon la gravité de la dégradation du sol (faible, moyenne, haute et très haute) sont calculées en GLASOD en combinant le degré de dégradation (légère, modérée, forte, extrême) avec son étendue relative (pour cent d'une unité de la carte touchée : 0 -5 %, 6-10 %, 11- 25 %, 26 - 50 %, et > 50 %). Le degré de dégradation est défini en termes de réduction de la productivité des terres (FAO, 2000).

- **Evaluation de l'état de dégradation du sol par l'homme :** L'Evaluation de l'état de dégradation du sol par l'homme (Assessment of the Status humain-induced Soil Degradation : ASSOD) est une méthode qui fait continuer les activités du GLASOD dans le sud et le sud Est de l'Asie, en utilisant le même principe dans l'évaluation de la dégradation des sols mais seulement avec une légère amélioration. L'étude a touché dix-sept pays en utilisant plusieurs données sur différents types de dégradation inclus l'érosion par l'eau et par le vent et leurs sub-types ; La perte de la partie superficielle du sol, la déformation du terrain (en milliers d'hectares) et les sub-types dominant (tel que la salinisation). Dans la méthode ASSOD, le degré de dégradation des sols est exprimé dans tous les sous-types de dégradation en termes qualitatifs comme un impact sur la productivité (impact négligeable, légère, modérée, forte, extrême). La classification est basée sur l'estimation des changements dans la productivité et prend également en considération le niveau de gestion. Les changements de la productivité sont exprimés en termes relatifs, c'est-à-dire l'actuelle productivité moyenne par rapport à la productivité moyenne dans la situation non dégradé (ou non-améliorées,) et en tenant compte des intrants van (Van Lynden et Oldeman ,1997).
- **Approche des surfaces sévèrement dégradée :** L'Approche des surfaces sévèrement dégradée (hot spot approach) s'effectue par l'analyse et la cartographie des zones à risque d'érosion (hot spot) entre dans les préoccupations de l'EEA et l'UNEP (EEA, 2000). La carte des surfaces d'érosion à pour but de présenter les différents types d'indicateurs précieux qui permettent d'identifier les priorités d'intervention et la visualisation des données. La méthodologie de cette approche est basée tout d'abord par l'identification des grandes zones pour lequel les processus d'érosion sont largement

similaires. Les points chauds (hot spots) sont ensuite mis en évidence au sein de chaque zone et associés à la meilleure estimation pour les taux d'érosion dans ces zones réactives.

- **Approche de RIVM** : Les bases de cette approche ont été préparées dans les années de 1990 (RIVM, 1992). Elle combine les risques de l'érosion actuelle due au climat et les projections économiques pour faire une projection sur le futur. L'avantage de cette approche est la réalisation d'un scénario des projections explicatives mais elle est seulement disponible pour une résolution de 50 km ainsi elle ne pourrait pas être utilisée pour des échelles d'évaluation inférieures. Cette approche a aussi un avantage de combinaison des éléments physiques et des éléments économiques. La méthodologie de l'approche est représentée dans la figure suivante :

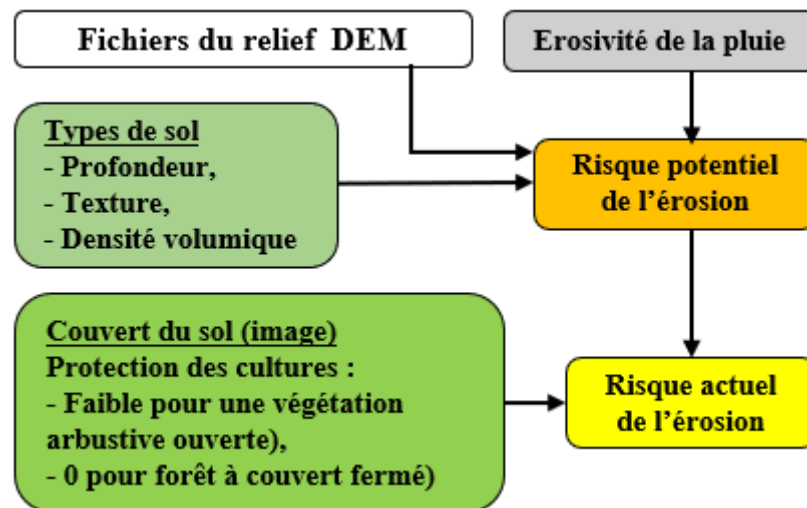


Figure 17. Méthodologie du RIVM pour l'évaluation de l'érosion hydrique

### C. La troisième catégorie

Elle se compose d'une grille d'évaluation sur la base des modèles empiriques, des modèles physiques et des modèles de distribution. Parmi les exemples de cette catégorie :

- **Modèle de CORINE** (Coordination of information on the environment) : Ce modèle est une méthode standard utilisée par les pays de la communauté européenne pour la détermination des risques et la qualité des terres. Ce modèle est basé sur la cartographie de l'érosion et l'analyse de plusieurs facteurs pour déterminer le risque actuel de l'érosion (Fig. 18). Il crée un système d'information pour les pays de l'UE en tenant compte des données liées à l'administration, la géographie, l'utilisation des terres

et la couverture végétale ainsi que les divers paramètres environnementaux (CORINE, 1994).

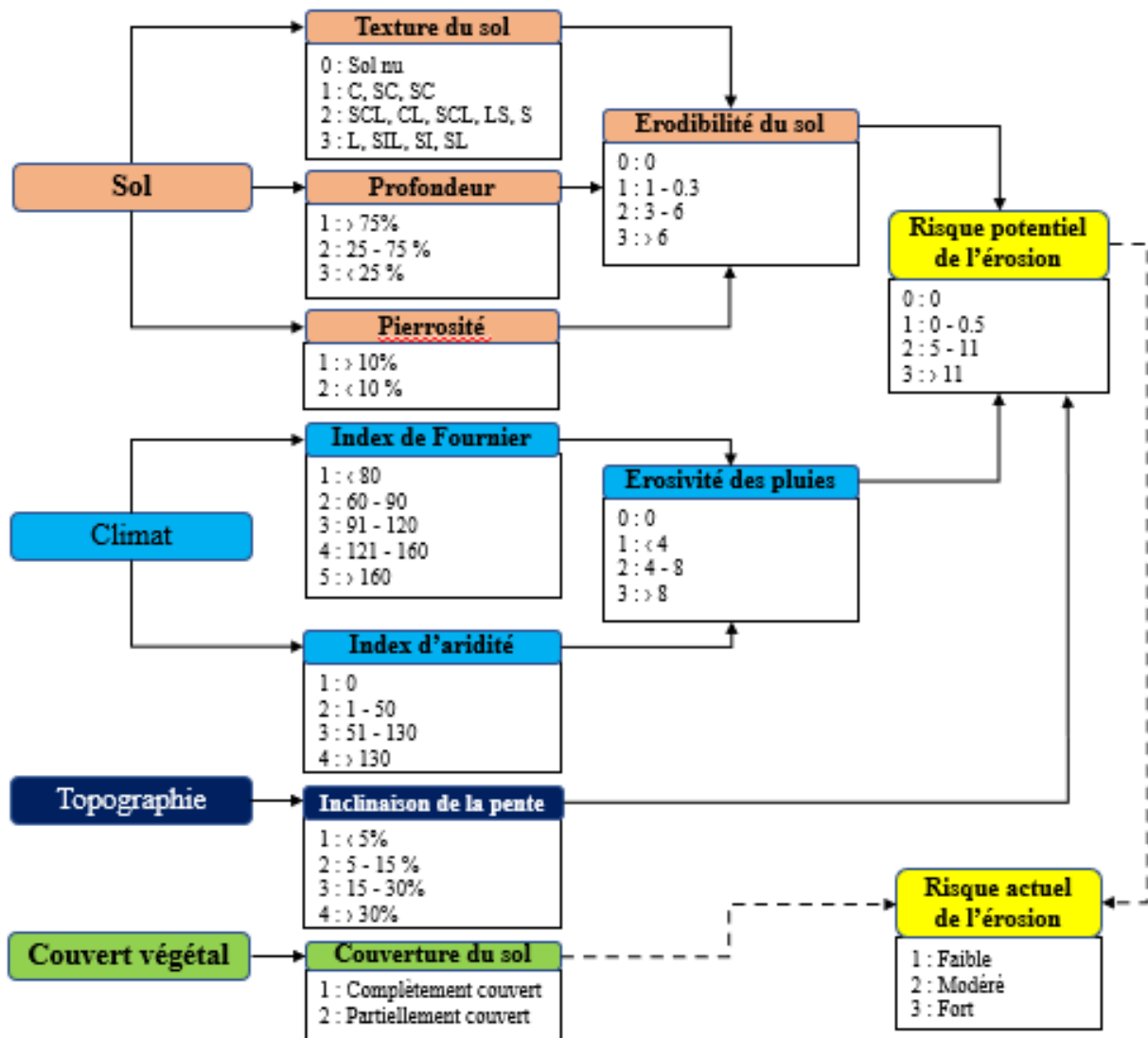


Figure 18. Méthode d'évaluation du risque d'érosion des sols (Modèle CORINE) (in Giordano, 1994)

- **Modèle de PESSIRA** : Il s'agit d'un modèle à base physique et de distribution spatiale, développé pour quantifier l'érosion des sols à une échelle régionale dans les zones écologiquement de forte sensibilité à l'érosion et de définir des stratégies de conservation du sol (Grimm et al., 2000). Le modèle PESSIRA combine l'effet de la topographie, du climat et du sol en une seule prévision intégrée des eaux du ruissellement et de l'érosion (Fig. 19). Les données pour chacune des trois facteurs ont été extraites de sources existantes et combinées dans un modèle physique pour faire des prévisions rationnelles de l'érosion des sols.

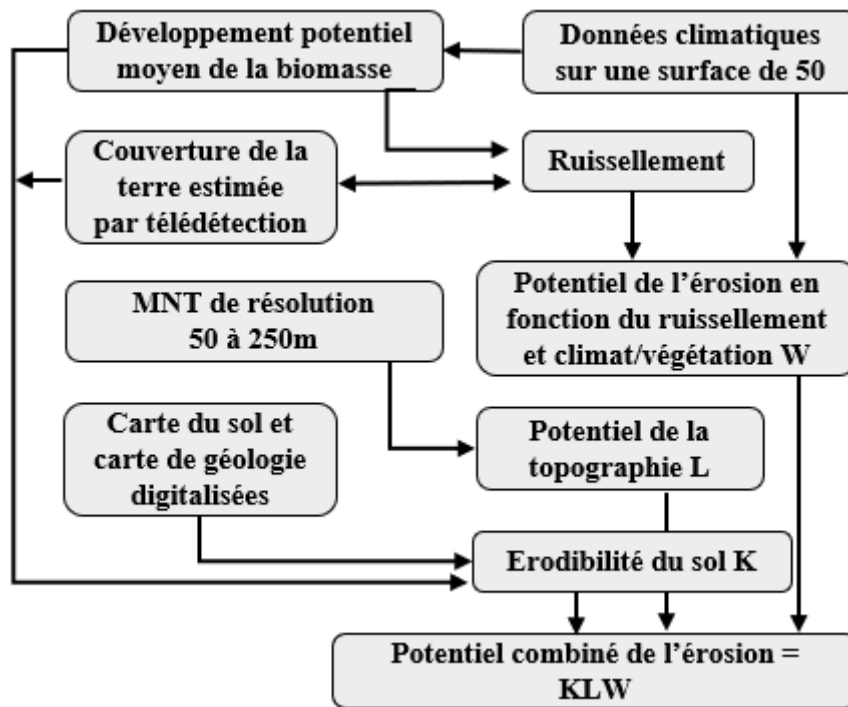


Figure 19 : Présentation du modèle de PESSIRA

Il est a signalé que cette catégorie demande beaucoup de données ce qui limite son utilisation.

- **Utilisation des éléments radioactifs :** L'utilisation des éléments radioactifs ont atteint une étape importante dans l'évaluation de l'érosion hydrique durant ces dernières années. Le césium-137, le Béryllium-7 et le Plomb-210 sont les éléments les plus utilisés, ces éléments se concentrent essentiellement à la surface du sol (Fig. 20). Dans les sols non remaniés, ils se concentrent à la surface et diminuent sous la forme exponentielle vers la profondeur. La distribution verticale du Berilium-7 est nettement différente que celle du césium-137 et celle du Plomb210. Cependant dans les sols remaniés, la redistribution verticale dépend surtout du travail du sol et l'érosion (Laugharn et al. ,2002).

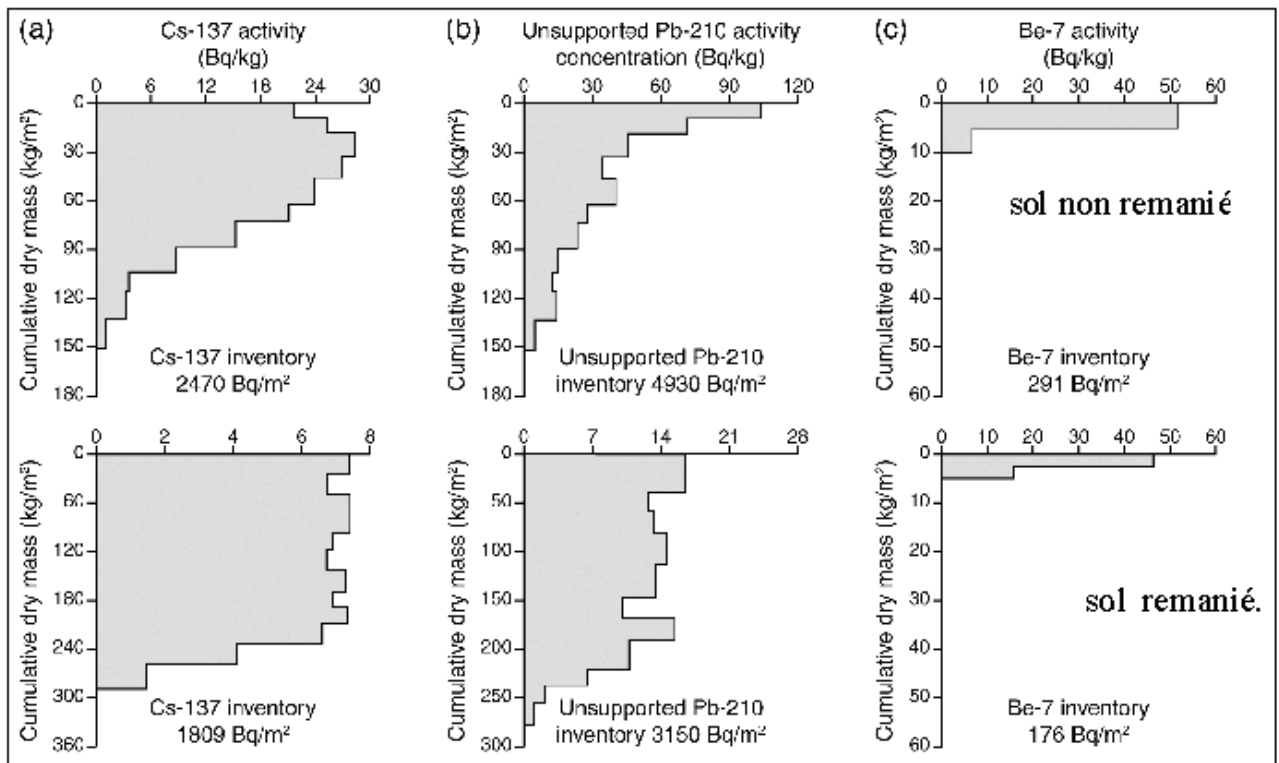


Figure 20. Comportement des éléments radioactifs dans le sol (Lougharn *et al.*, 2002)

- ✓ **Utilisation du césium-137 :** Le césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) est un radio-isotope anthropique qui permet de quantifier les déplacements de sol à des échelles spatiales variant de la parcelle au bassin versant. On procède à des prélèvements ponctuels de sol, pour déterminer l'activité spécifique en  $^{137}\text{Cs}$ . Ces valeurs sont comparées à celles établies dans un site témoin considéré comme stable vis-à-vis de l'érosion hydrique (vieille prairie ou milieu forestier). La différence d'activité entre les sites de prélèvements et la valeur du site référentiel permet, via une relation mondialement reconnue, d'estimer les mouvements des sols (Bernard *et al* 1998).

### 1.3.2. Evaluation de l'effet de l'érosion sur les propriétés du sol

Rosen (2009) a indiqué que les sols peuvent être dégradés en raison de l'érosion, mais que les sols déjà dégradés présentent un risque d'érosion plus élevé. Il a également expliqué que l'érosion entraîne une réduction de la capacité d'infiltration et de stockage de l'eau, de la teneur en matière nutritive et organique, de la profondeur du sol, de la productivité, de la croissance de la végétation et de la biodiversité. Ces facteurs sont interdépendants et il est très difficile de séparer l'impact relatif et l'effet que l'un a de l'autre. L'effet d'érosion sur les sols dépend donc des propriétés intrinsèques du sol, de la capacité de transport de l'agent érosif, de



la relation avec les pratiques de gestion des sols, du climat et de la pente (Fangmeier, et *al.*, 2005). L'évaluation des propriétés du sol et de la santé du sol extraite de la méthodologie VS-Fast (McGarry, 2006) et des méthodes VSA sélectionnées de Shepherd (2000) se base sur les caractéristiques suivantes du sol :

- La description du sol (profondeur, texture, structure, couleur, superposition, etc.),
- Distribution de la taille des agrégats,
- Croute du sol, travail du sol,
- Vie du sol (en particulier les vers de terre et les racines),
- Destruction et dispersion,
- pH,
- Infiltration d'eau,
- Carbone organique
- Salinité du sol et de l'eau.

Pour cela, deux catégories d'évaluation peuvent être utilisées : Une évaluation visuelle de la qualité du sol et une évaluation par des mesures de quelque propriétés du sol.

#### **A. Evaluation visuelle de la qualité du sol**

Cette catégorie concerne sept indicateurs visuels de la qualité du sol:

- Profondeur du sol-
- Texture du sol
- Structure du sol (poêle à travail, répartition de la taille de l'agrégat);
- Croûte de surface
- Couleur du sol
- La vie du sol (c.-à-d. les vers de terre et autres biotes)
- Racines.

#### **B. Evaluation par mesure des propriétés du sol (Soil measurements)**

Cinq propriétés du sol sont mesurées ou évaluées dans cette section. Chacune est notée et intégrée pour donner une valeur pour l'évaluation de la qualité du sol.

- Destruction et dispersion
- pH du sol
- Infiltration d'eau
- Carbone organique (fraction de laboratoire)
- Salinité du sol et de l'eau (conductivité électrique).



## **Chapitre II : Etude du milieu**

## Introduction

Le choix de sous bassin versant de Tefilis comme une zone d'étude est justifié d'une part, par le fait que cette zone n'a été jamais l'objet d'une étude et d'autre part, cette région a connue dernièrement une forte augmentation de la fréquence des inondations et d'érosion.

### 2.1. Etude de milieu

#### 2.1.1. Situation géographique

Cette étude a été menée dans le sous-bassin versant de Tifiles situé dans la région de Ténès (wilaya de Chlef) à environ 215 km à l'Ouest d'Alger. Ce bassin-versant fait partie du massif du Dahra, entre les latitudes 36°30' et 36°34' Nord et les longitudes 1°20' et 1°24' Est (Fig.21).

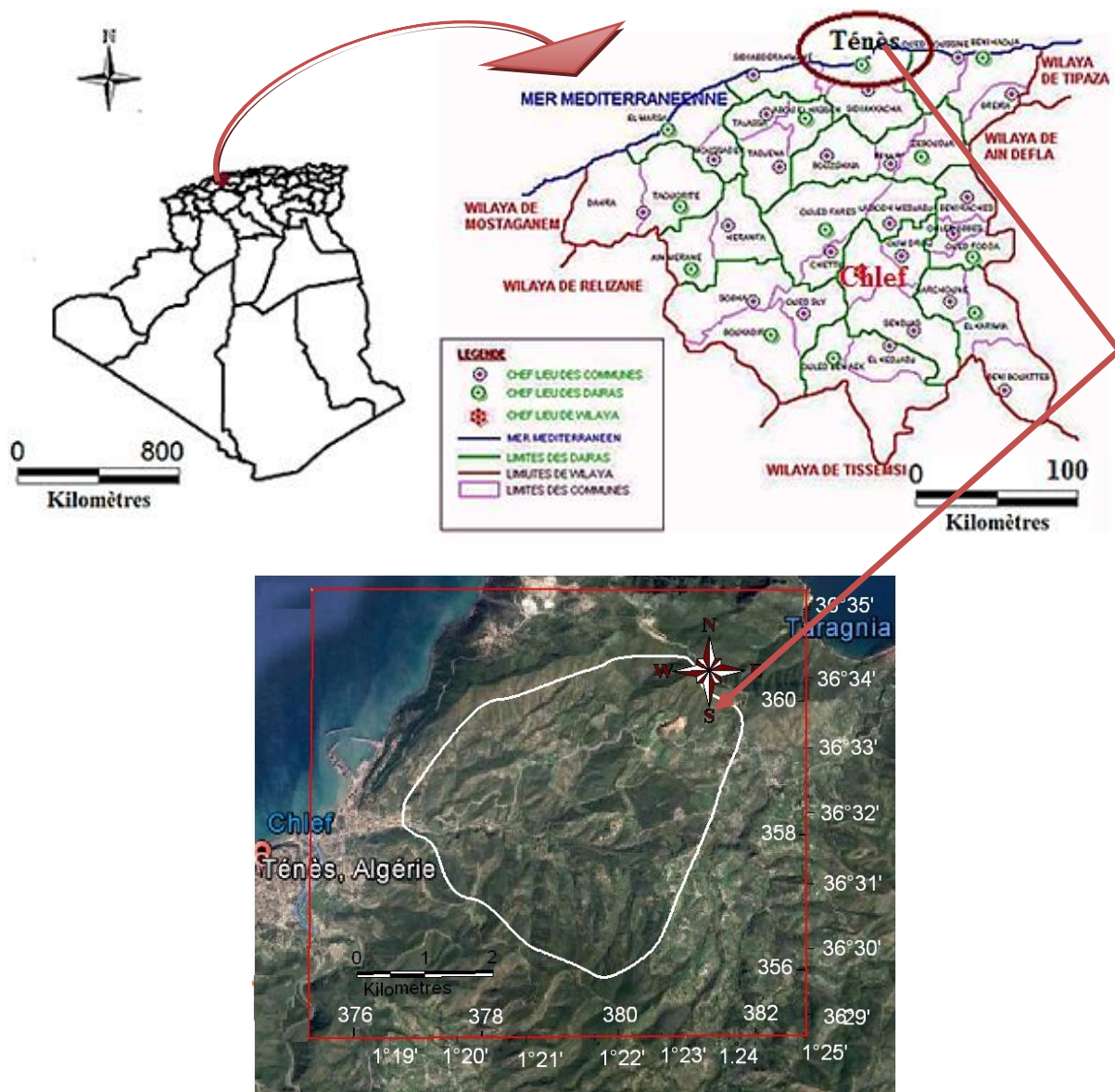


Figure 21. Situation géographique du sous bassin versant de l'Oued Tifiles

### 2.1.2. Situation administrative

Le sous-bassin versant de Tifiles est situé dans la commune de Ténès, Daïra de Ténès, au Nord de la wilaya de Chlef, au Nord-Ouest de l'Algérie. La ville a été fondée au milieu de la côte du Dahra, entre Alger et Oran, sur un plateau légèrement incliné de 30 à 40 mètres par rapport au niveau de la mer. Elle est bordée :

- Au Nord par la mer méditerranée,
- A l'Est par la commune d'oued Guoussine,
- Au Sud par la commune de Sidi Akkacha,
- A l'Ouest par la commune de Sidi Abderrahmane.

## 2.2. Caractéristiques physiques du micro bassin-versant

### 2.2.1. Caractéristiques géométriques

#### A. Surface

La surface de micro bassin est estimée à 16 Km<sup>2</sup>.

#### B. La forme

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise pour une même pluie des faibles débits de pointe de crue en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration.

La forme du bassin versant influence fortement l'écoulement. Un bassin très allongé ne se comporte pas comme un bassin ramassé. L'indice de compacité de Gravelius (**l'Indice de forme Kc**) est défini par :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (2.1)$$

Les valeurs du périmètre et de la surface du micro bassin sont déterminées à partir de la digitalisation du bassin à l'aide du logiciel Map info, ainsi :

- Le périmètre P = 15.26 Km
- La surface S = 16 Km<sup>2</sup>
- L'indice de Gravelius Kc est égal à :  $Kc = 0.28 \frac{15.26}{\sqrt{16}} = 1.0682$

Pour un **Kc = 1.0687**, cela signifie que le sous-bassin se caractérise par une forme quasiment circulaire.

### 2.2.2- Courbe hypsométrique

Une courbe hypsométrique détermine le pourcentage cumulé de surfaces qu'occupe un relief (tranches d'altitudes) au sein d'un bassin-versant. L'élaboration de cette courbe s'avère

nécessaire pour la lecture du rapport (relief /surface) dans un bassin donné mais aussi pour la détermination des altitudes caractéristiques.

Ainsi, la courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée (Fig. 22).

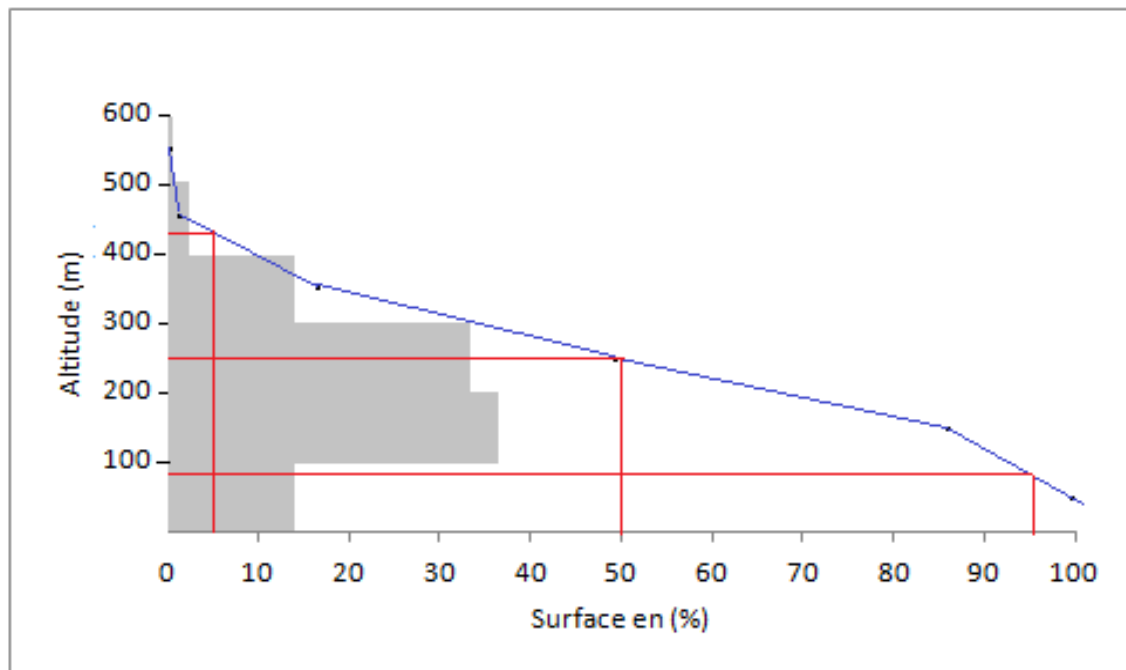


Figure 22. Courbe hypsométrique du sous-bassin versant de l'Oued Tifiles

#### A. Les altitudes

- **Les altitudes maximales et minimales :** L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale représente le point le plus bas, généralement se trouve à l'exutoire. Ces deux données deviennent importantes surtout lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologies telles que la température et les précipitations. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente. Pour notre sous bassin versant :

- Altitude maximale :  $H_{max} = 550 \text{ m}$
- Altitude minimale :  $H_{min} = 10 \text{ m}$

- **Altitude moyenne :** L'altitude moyenne  $H_m$  se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la carte (Fig.22) et peut être définie comme suit :

$$H_m = \frac{\sum S_l H_l}{S} \quad (2.2)$$

$H_m$  : Altitude moyenne du bassin versant [m]

Si : Aire comprise entre deux courbes de niveau [km<sup>2</sup>]

Hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]

S : Superficie totale du bassin versant [km<sup>2</sup>]

Ainsi, l'altitude moyenne du sous-bassin avoisine les 231.28m

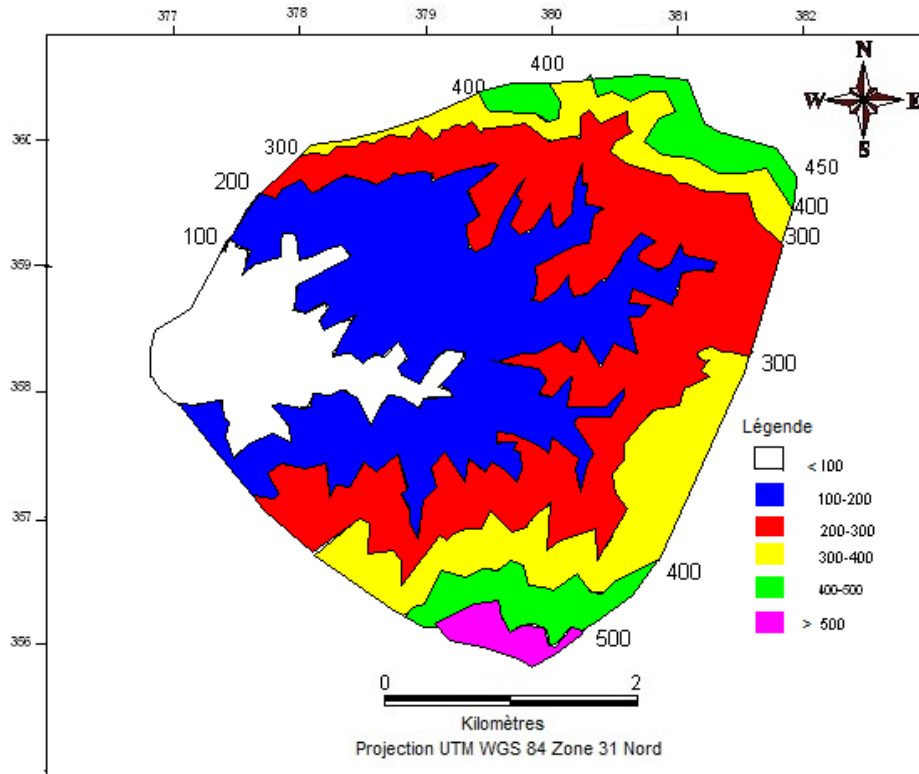


Figure 23. Carte des altitudes et des surfaces

- **Altitude médiane :** L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique (Fig.22). Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. L'altitude médiane dans le sous bassin de Tifiles est égale à 242.85 m.

**A- Indice de pente globale  $I_G$**

$$I_G = \frac{D}{L} \quad (2.3)$$

D : Dénivelée =  $H_{5\%} - H_{50\%}$

$$D = 428.57 - 242.85 = 185.72 \text{ m}$$

$$I_G = \frac{185.72}{7.400} = 25.09 \text{ m / Km}$$

**B- Dénivelée spécifique :** La dénivelée est donnée par la relation suivante :

$$Ds = I_G \cdot S^{0.5} \quad (2.4)$$

$$Ds = 100.36$$

$100 \leq D_s \leq 250$  correspond à un relief assez fort.

### 2.2.3- Réseau d'écoulement

#### A. Classification de Schum

La classification de Schum est définie par un ordre de tronçon des talwegs à partir d'une règle simple et sans ambiguïté. Le principe est de donner l'ordre  $x+1$  à tout tronçon formé par la réunion de deux cours d'eau de l'ordre  $x$ . Ainsi, le micro bassin de notre étude a une classification d'ordre 5 comme il est montré dans la figure 24 et le tableau 2.

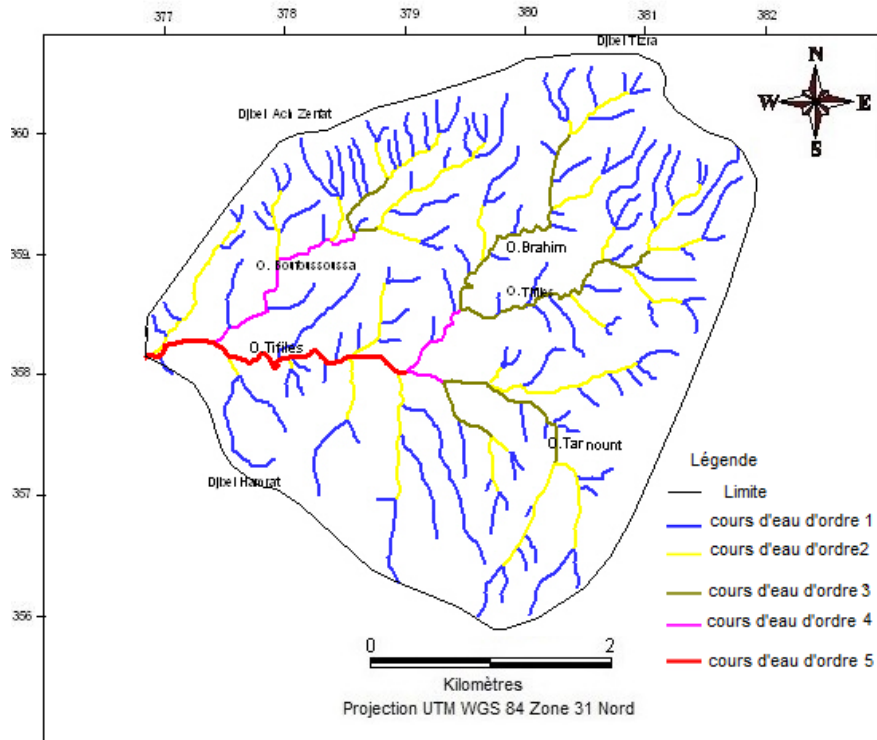


Figure 24. Réseau hydrographique du micro bassin de l'Oued Tifiles

Tableau 02. Caractéristiques du réseau hydrographique				
Ordre du talweg	Nombre des talwegs $N_i$	Longueur des talwegs $L_i$ (km)	$Rc = N_i/N_{i+1}$	$RL = L_{i+1}/L_i$
1	124	42.29	4.59	0.42
2	27	18.13	4.5	0.37
3	6	6.75	2	0.39
4	3	2.64	3	0.91
5	1	2.41	/	/

#### B. Rapport de confluence

Le rapport de confluence selon le nombre de cours d'eau est exprimé par la relation suivante :

$$Rc = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (2.5)$$

$N_i$  : le nombre de cours d'eau d'ordre i

$N_{i+1}$  : le nombre de cours d'eau d'ordre i+1

Le rapport de confluence est égal à 3.52

### C. Rapport des longueurs

Le rapport des longueurs est exprimé par la formule suivante:

$$RL = L_{i+1}/L_i \quad (2.6)$$

$L_i$  : longueur de cours d'eau d'ordre i

$L_{i+1}$  : longueur de cours d'eau d'ordre i+1

Le rapport de longueur est égal à 0.52

### D. Densité de drainage Dd

La densité de drainage : C'est le rapport de la longueur des canaux d'écoulement à la superficie du bassin, c'est-à-dire la longueur totale du cours d'eau d'un bassin divisée par la superficie de celui-ci.

$$Dd = \sum_{i=1}^5 L_i \frac{1}{S} \quad (2.7)$$

$$L_t = \sum_{i=1}^5 L_i : \text{la longueur totale du cours d'eau}$$

S = Superficie du bassin.

$$Dd = \frac{72.22}{16} = 4.51$$

$$Dd = 4.51 \text{ Km} / \text{Km}^2$$

### E. Densité hydrographique

Le coefficient de drainage ou densité hydrographique est le nombre de canaux d'écoulement (cours d'eau) au kilomètre carré.

$$N = \frac{n}{A} \quad (2.8)$$

n = le nombre de canaux d'écoulement,

A = la superficie du bassin en  $\text{Km}^2$ .

$$N = \frac{n}{A} = \frac{161}{16} = 10.06 \text{ canaux} / \text{Km}^2$$

### F. Temps de concentration des eaux (Tc)

Le temps de concentration Tc est défini par le temps que met une particule d'eau provenant de la partie de bassin versant la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Il est exprimée par la formule de Giondotti :



$$T_c = \frac{4\sqrt{S+1.5L}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (2.9)$$

Tc (heure)

S : la surface en K m<sup>2</sup>

H : l'altitude en mètre

L : la longueur de cours d'eau principale = 7.4 km

$$T_c = \frac{4\sqrt{16+1.5 \times 7.4}}{0.8\sqrt{254.4-10}} = 2.17$$

**Tc = 2.17 heures**

Vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement est exprimée par la relation suivante :

$$V_e = \frac{L}{T_c} \quad (2.10)$$

Ve : la vitesse d'écoulement

L : la longueur de cours d'eau principale en m

Tc : le temps de concentration en seconde

$$V_e = \frac{6280}{9720} = 0.64$$

**Ve = 0.64m/s**

#### 2.2.4. Profil en long

Le tracé du profil en long de l'Oued Tifiles (Fig.25) permet d'apporter des éléments complémentaires à la densité du drainage, au vu du rôle déterminant des pentes sur le ruissellement superficiel et surtout sur l'écoulement lors des crues.

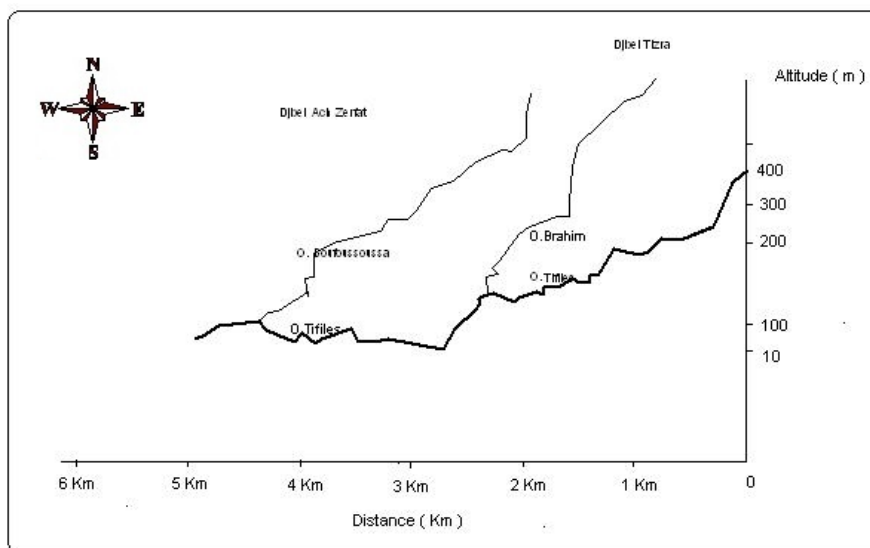


Figure 25. Profil au long du cours d'eau

### A. Coefficient de sinuosité

$$C_s = \frac{l}{L} \quad (2.11)$$

l : la longueur mesurée par la règle

L : la longueur du cours d'eau principale

$$C_s = \frac{6.28}{11} = 0.57$$

### 2. 3. Le climat

Pour l'étude du climat de la zone d'étude, on a utilisé les données de la station de Ténès pour sa localisation la plus proche de la zone d'étude (Tab. 3) et la disponibilité suffisante de données.

Tableau 3. Coordonnées de la station météorologique de Ténès (ANRH, 2013)			
Station	Latitude N (X)	Longitude E (Y)	Altitude (m)
Ténès	36°30' N	1°20' E	17

#### 2.3.1. La pluviométrie

Ce facteur primordial conditionne et agit directement sur le sol et la végétation en favorisant leur maintien et leur développement. La quantité de pluie diminue du Nord au Sud selon l'altitude, de l'Est à l'Ouest selon la longitude et elle est plus importante sur les versants exposés au Nord et aux vents humides.

Les pluies en Algérie proviennent d'une part des vents pluvieux qui abordent le Maghreb par le littoral durant la saison froide (Seltzer, 1946) et d'autre part, des orages dus aux perturbations atmosphériques engendrées par les dépressions en provenance des régions sahariennes surtout en fin du printemps (Dubief, 1959).

#### A. Pluviométrie moyenne annuelle

La pluviométrie moyenne mensuelle est présentée dans la figure suivante :

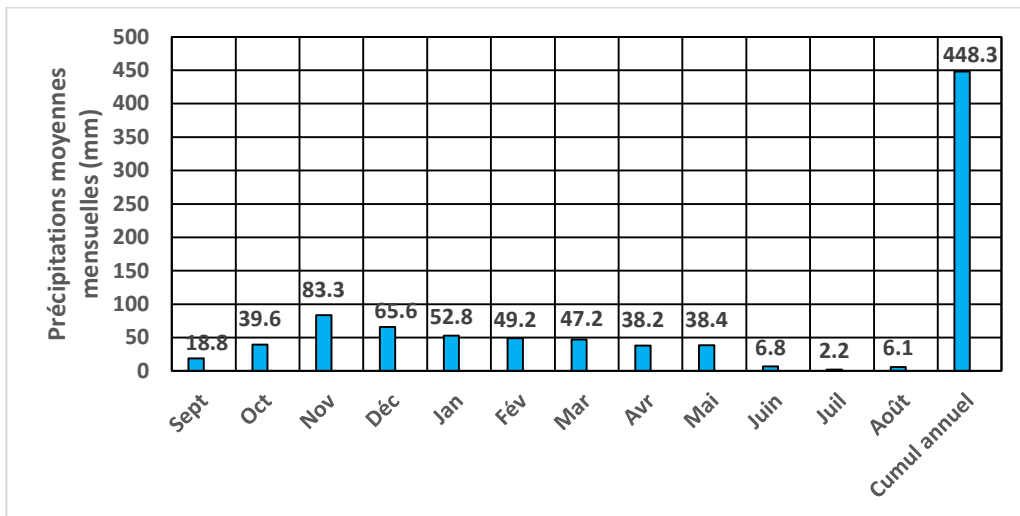


Figure 26. Précipitations moyennes mensuelles (1982-2012)

- Répartition mensuelle et saisonnière des précipitations

La répartition saisonnière de la zone d'étude est de type HAPE (Tab.4). Elle est caractérisée par un été de faible quantité ne dépassant pas 5%, un hiver avec un taux de 37.38 % et un automne avec un pourcentage de 31.61% qui se caractérise par des averses plus dangereuse et surtout lors de cette période où les sols se trouvent généralement tassés, encroûtés et dénudés.

Les précipitations mensuelles sont également très irrégulières, se concentrent sur quelques jours des mois les plus pluvieux, laissant apparaître des périodes de sécheresse relative au cours de la saison pluvieuse.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Cumul
Pluie (mm)	18,8	39,6	83,3	65,6	52,8	49,2	47,2	38,2	38,4	6,8	2,2	6,1	448,3
Répartition saisonnière	141.7			167.6			119.3			15.1			448,3
Pluie (%)	31.61			37.38			26.61			3.37			100

### B. Courbe : Intensité - Durée - Fréquence

Les courbes *intensités-durées-fréquences* sont importantes dans plusieurs applications notamment en érosion hydrique. Deux lois sont utilisées pour le traçage de ces courbes. La loi de Montana pour les pluies de longues durées et la loi du Talbot pour les pluies de courte durée.

En hydrologie agricole, la plus part de cas des études concernant des petits bassins versants allongés, les études de la pluviométrie se basent sur les pluies de courtes durées

(Gasper, 1971). Le micro bassin de notre étude est un exemple de ces cas. Pour l'étude des courbes IDF on a utilisé les données indiquées dans le tableau suivant.

<b>Tableau 05. Pluies maximales journalières</b>	
Année	Pluies maximales journalières
1990	27.3
1991	15.1
1992	47.6
1993	49
1994	56.5
1995	33.4
1996	24.6
1997	60.4
1998	24.2
1999	63.3
2000	71.4
2001	204.5
2002	40.7
2003	21.9
2004	36.2
2005	39.6
2006	73.2
2007	68.3
2008	25.8
2009	34.9
2010	52.1

Les courbes IDF des pluies de courtes durées peuvent être établies statistiquement selon les étapes suivantes :

- La détermination des pluies journalières maximales de différentes fréquences par l'ajustement des lois statistique comme la loi de Guembel.
- La détermination des pluies de courtes durées par la formule suivante :

$$P_{t\%} = P_{J \max \%} \left( \frac{t}{24} \right)^b \quad (2.12)$$

La détermination des pluies de courte durée pour différentes fréquences permet de mettre en relation :

- ✓ La hauteur de *pluie-durée-fréquence* (PDF),
- ✓ L'intensité de *pluie-durée-fréquence* (IDF).

Pour notre étude, on a utilisé les pluies maximales journalières pour une période de vingt ans (1990-2010) dans laquelle, on a pu distinguer deux moyennes ascendantes l'une linéaire variant de 35mm à 60mm et une autre, mobile sur deux périodes (Fig.25). Pour la détermination des courbes IDF on suit les étapes citées au-dessus.

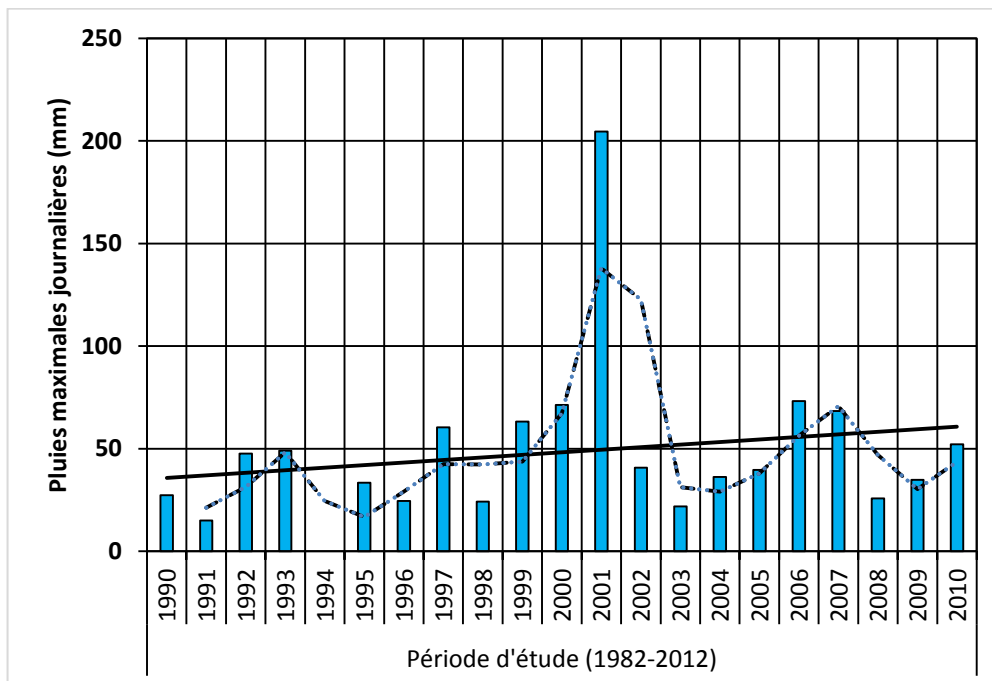


Figure 27. Précipitations moyennes annuelles (1990-2010)

La détermination des pluies journalières maximales de différentes fréquences par la loi de Guembel est faite selon la démarche suivante :

- Préparation de la série de données pluies annuelles maximales par le triage des valeurs par ordre croissant et l'attribution d'un rang pour chaque valeur.
- Calcul de la fréquence empirique pour chaque rang (équation 2.16).
- Calcul de la variable réduite « Y » de Guembel (équation 2.17).
- Calcul des valeurs empiriques (cf. tabl.7).
- Représentation graphique des couples (Yi, Xi) de la série à ajuster (Fig. 28).
- Détermination des valeurs extrêmes

<b>Tableau 6. Fréquences empiriques des précipitations maximales</b>				
<b>N° d'ordre</b>	<b>Année</b>	<b>Hauteur de la pluie maximale (mm)</b>	<b>F(x)</b>	<b>Y=-Ln(-Ln f(x))</b>
1	1991	15.1	0.03271028	-1.22707812
2	2003	21.9	0.07943925	-0.93149749
3	1998	24.2	0.12616822	-0.72826013
4	1996	24.6	0.1728972	-0.56216322
5	2008	25.8	0.21962617	-0.41483952
6	1990	27.3	0.26635514	-0.26951809
7	1995	33.4	0.31308411	-0.15801433
8	2009	34.9	0.35981308	-0.02142019
9	2004	36.2	0.40654206	0.11473979
10	2005	39.6	0.45327103	0.22501067
11	2002	40.7	0.50000000	0.36651292
12	1992	47.6	0.54672897	0.51443714
13	1993	49.0	0.59345794	0.6393548
14	2010	52.1	0.64018692	0.80679281
15	1994	56.5	0.68691589	0.99138158
16	1997	60.4	0.73364486	1.15610133
17	1999	63.3	0.78037383	1.39246794
18	2007	68.3	0.8271028	1.68023825
19	2000	71.4	0.87383178	1.97139774
20	2006	73.2	0.92056075	2.48432751
21	2001	204.5	0.96728972	3.49136695

La méthode consiste à classer les valeurs extrêmes annuelles par ordre croissant ensuite on calcule pour chaque valeur la fréquence expérimentale au non dépassement à l'aide de l'équation (2.13) et on détermine par la suite les valeurs de la variable réduite de Guembel par la formule suivante :

$$F(x) = \frac{n - 0.3}{N + 0.4} \quad \text{avec } n : \text{est le rang de la série et } N : \text{la taille de l'échantillon} \quad (2.13)$$

$$Y = - [\ln (-\ln f(x))] \quad (2.14)$$

➤ Représentation graphique de l'équation de Guembel

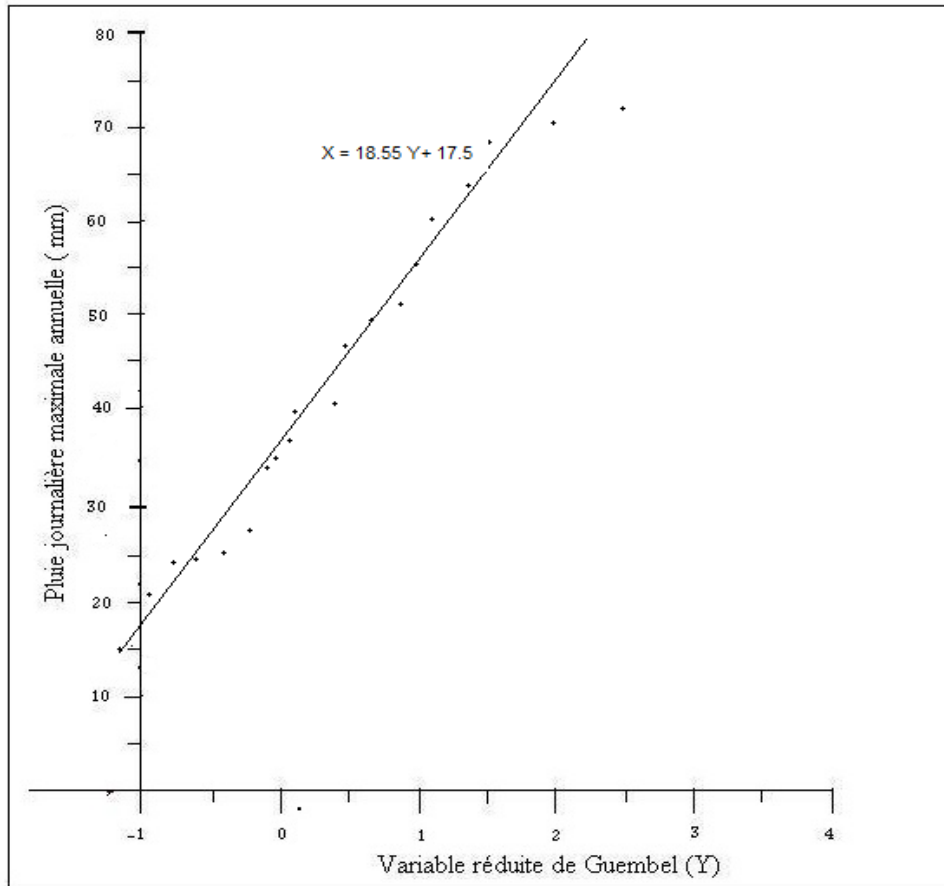


Figure 28 : Précipitations journalières maximales

$X_0$  extrait du graphe 17.5 mm

L'équation de régression s'écrit :

$$X = 18.55 Y + 17.5 \quad (2.15)$$

➤ Estimation des pluies de fréquence : 50 %, 75%, 80% et 90 %.

L'estimation des pluies fréquentielles est faite avec l'équation (2.15).

✓ Fréquence 50 % ;  $F(x) = 0.5$ ,  $T = 2$ ans et  $Y = 0.36$

$$P_{Jmax50\%} = 18.55 \times 0.36 + 17.5$$

$$P_{Jmax50\%} = 24.178$$

✓ Fréquence 75% ;  $F(x) = 0.75$ ,  $T = 4$ ans et  $Y = 1.24$

$$P_{Jmax75\%} = 18.55 \times 1.24 + 17.5$$

$$P_{Jmax75\%} = 40.5\text{mm}$$

✓ **Fréquence 80% ; F(x) = 0.8, T = 5 ans et Y = 1.49**

$$P_{J_{\max 80\%}} = 18.55 \times 1.49 + 17.5$$

$$P_{J_{\max 80\%}} = 45.14 \text{ mm}$$

✓ **Fréquence 90% ; F(x) = 0.9, T = 10 ans et Y = 2.25**

$$P_{J_{\max 90\%}} = 18.55 \times 2.25 + 17.5$$

$$P_{J_{\max 90\%}} = 59.24 \text{ mm}$$

Le temps du retour T est exprimé par la relation suivante (Kiefer et al. 1997)

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (2.16)$$

➤ **Estimation des pluies de courte durée** : Les pluies de courte durée sont estimées par la formule suivante :

$$P_t = P_{J_{\max \%}} \left( \frac{t}{24} \right)^b \quad (2.17)$$

$P_t$  : La pluie de courte durée en heure de fréquence donnée.

b : L'exposant climatique en Algérie (b = 0,28).

$P_{J_{\max \%}}$  : La pluie journalière maximale de fréquence donnée.

Le calcul fait par cette équation a abouti aux résultats indiqués dans le tableau 7.

<b>Tableau 7. Pluie en millimètre en fonction des durées et des fréquences</b>				
<b>Durée (heure)</b>	<b>Fréquence</b>			
	<b>F 50%</b>	<b>F 75%</b>	<b>F 80%</b>	<b>F 90%</b>
<b>0.5</b>	08.18	13.70	15.27	20.04
<b>1</b>	09.93	16.63	18.54	24.34
<b>2</b>	12.06	20.20	22.51	29.54
<b>3</b>	13.51	22.62	25.22	33.09
<b>4</b>	14.64	24.52	27.33	35.87
<b>5</b>	15.58	26.10	29.09	38.18
<b>6</b>	16.40	27.47	30.62	40.18
<b>12</b>	19.91	33.35	35.52	48.78
<b>24</b>	24.18	40.50	45.14	59.24

➤ La détermination de l'intensité (i) est faite par la relation suivante (Tab.8) :

$$i = \frac{h}{t} \quad (2.18)$$

h : La pluie de courte durée (mm)

t : Le temps en une heure



Tableau 8. Intensité des pluies en fonction des durées et des fréquences				
Durée (Heure)	Fréquence			
	F 50%	F 75%	F 80%	F 90%
0.5	16.36	27.4	30.54	40.08
1	9.93	16.63	18.54	24.34
2	6.03	10.1	11.25	14.77
3	4.50	7.54	8.42	11.03
4	3.66	6.13	6.83	8.97
5	3.116	5.22	5.818	7.64
6	2.73	4.58	5.10	6.7
12	1.66	2.78	2.96	4.065
24	1.007	1.69	1.88	2.47

➤ **Représentation des courbes IDF et PDF**

La courbe PDF montre que la pluie de courte durée augmente avec l'augmentation de la fréquence et la durée (Fig.29). Cependant, la courbe IDF montre que l'intensité diminue avec la durée. Elle est plus importante avec les pluies de courtes durées et diminue avec l'augmentation de la durée (Fig.30).

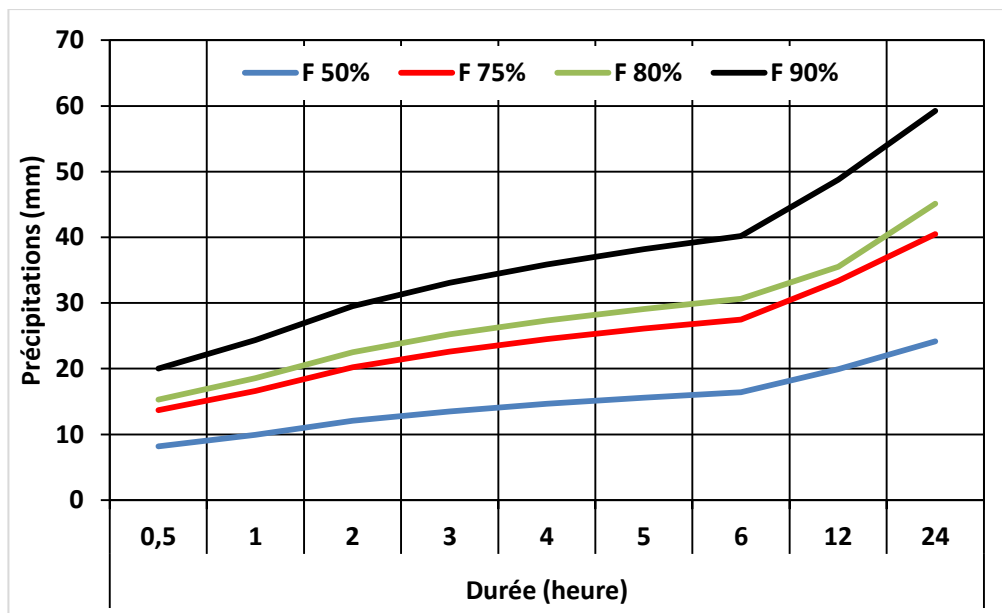
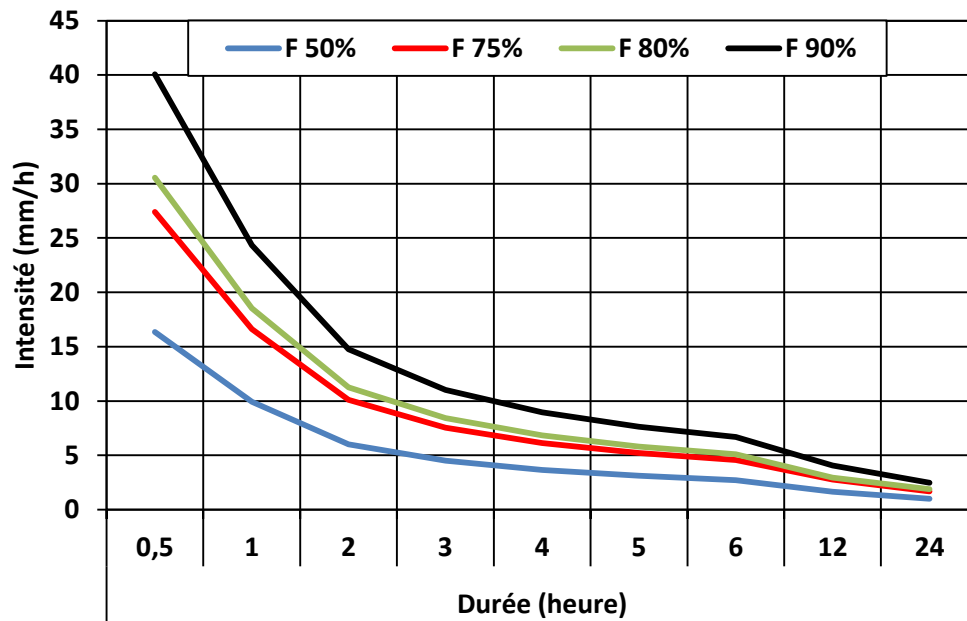


Figure 29. Courbe PDF de la station de Ténès (1990-2010)

Les valeurs maximales journalières de 24 heures de la pluie dans la zone d'étude varient pour les périodes de 2 ans, 4 ans, 5 ans et 10 ans successivement de 24.18mm, 40.5 mm,

45.14mm et 59.24 mm. Ces valeurs montrent l'importance variation des pluies maximales et que plus la période de retour est élevée plus la pluie maximale est élevée.



**Figure 30. Courbe IDF de la station de Ténès (1990-2010)**

L'analyse de l'intensité de pluie sur une période de 10 années montre que cette intensité varie de 1.07 mm/ heures à 40.08mm / heure et que l'intensité maximale probable  $I_{30}$  peut atteindre 40.08 mm / heures pour  $T = 10$ ans, 30.54 mm/heures pour  $T = 5$ ans, 27.4 mm / heure pour  $T = 4$  ans et 16.36 mm/heures pour  $T = 2$ ans. Ces valeurs montrent que les averses de courte durée dans la zone d'étude sont importantes. Par ailleurs, les pluies de courtes durées peuvent provoquer un apport de sédiments et pouvant représenter plus de 50% de l'apport solide annuel (Touabia et *al.*, 1999).

### 2.3.2. La température

La température est un élément écologique fondamental en tant que facteur climatique vital et déterminant dans la vie des végétaux. Elle en effet, la durée de la période de végétation et la répartition géographique des espèces. Elle a un effet considérable sur l'érosion hydrique des sols. Les températures moyennes annuelles et mensuelles réagissent directement en interaction avec les autres facteurs météorologique (insolation, vitesse, et turbulence du vent, précipitation), biogéographique (le phénomène d'évapotranspiration).

Les observations recueillies aux différentes stations voisines à la zone de l'étude (Mostaganem et Chlef), stations qui présentent les mêmes caractéristiques climatiques que notre bassin projeté, sur plus de 30 années observées, on a pu situer la température moyenne annuelle à 18.5°C. En terme saisonnier, les températures varient entre 11.9°C au mois de décembre, généralement accentuées par la proximité des effets maritimes et 29.9°C aux mois d'août dont les entrées marines régulent pratiquement l'ensemble de la région en été (Tab.09).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Ann
T °C	25,1	19,2	15,1	11,9	12,1	12,8	14,0	15,2	18,9	22,3	25,5	29,9	18,5

### 2.3.3. Autres caractéristiques climatiques

#### A. Le vent

Le vent accentue les effets des éléments du climat (températures, humidité et précipitations). Il est fortement influencé par les conditions topographiques locales. Le vent peut être également responsable du façonnement du relief, de l'évapotranspiration et de la formation de la végétation. L'espace étudié est fortement influencé par la présence de la mer. Les vents dominants sont souvent humides. La vitesse moyenne mensuelle du vent varie entre 2,52 à 3,79 m/s (Tab. 10). La direction des vents venant de Nord-Est est plus dominée en été, et celle venant de l'Ouest est dominée en hiver voire le tableau en annexe.

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
V (m/s)	3,97	3,768	3,778	3,41	3,03	2,75	2,52	2,639	2,791	2,68	3,747	3,92

#### B. L'évaporation

L'évaporation intervient dès le moment où les précipitations atteignent la surface du sol. C'est un facteur essentiel pour établir un bilan hydro climatique d'un bassin versant. (Tab.11).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul
ETP (mm)	61	63	65	70	71	78	78	81	74	74	65	63	843

%	7,24	7,47	7,71	8,30	8,42	9,25	9,25	9,61	8,78	8,78	7,71	7,41	100
---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----

## 2.4. Synthèse climatique

### 2.4.1. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme préconisé par Bagnouls et Gaussen (1953) fait ressortir l'influence simultanée des températures et des précipitations, par la formule  $P \leq 2T$ . Le croisement de la courbe des températures et celle des températures délimite la période de sècheresse, donc le diagramme permet de visualiser la saison sèche ou la courbe des températures passe au-dessous de celle des précipitations (Fig. 33). Le diagramme ombrothermique représenté par la figure 30, exprime que sur les 30 ans (1982-2012), la période humide dure 6 mois environ du mois mi-octobre jusqu'à la mi-avril.

La période sèche qui persiste 6 mois environ, s'étale du début mai jusqu'à la fin de septembre.

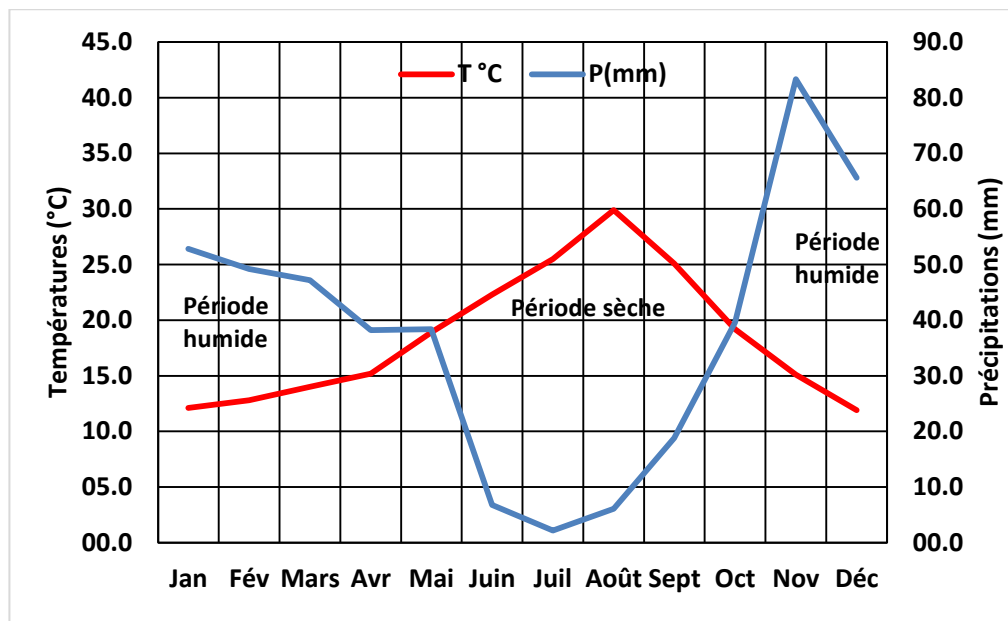


Figure 31. Diagramme ombrothermique de la zone de Ténès (1982-2012)

### 2.4.2. Climatogramme d'EMBERGER

Le climatogramme d'Emberger (Fig.34) permet de caractériser le climat d'une région et de la classer par rapport aux climats des autres régions grâce au quotient pluviométrique qui se calcule par la formule de Stewart (Stewart, 1968) comme suit :

$$Q = 3,43 * P / M - m \quad (2.19)$$

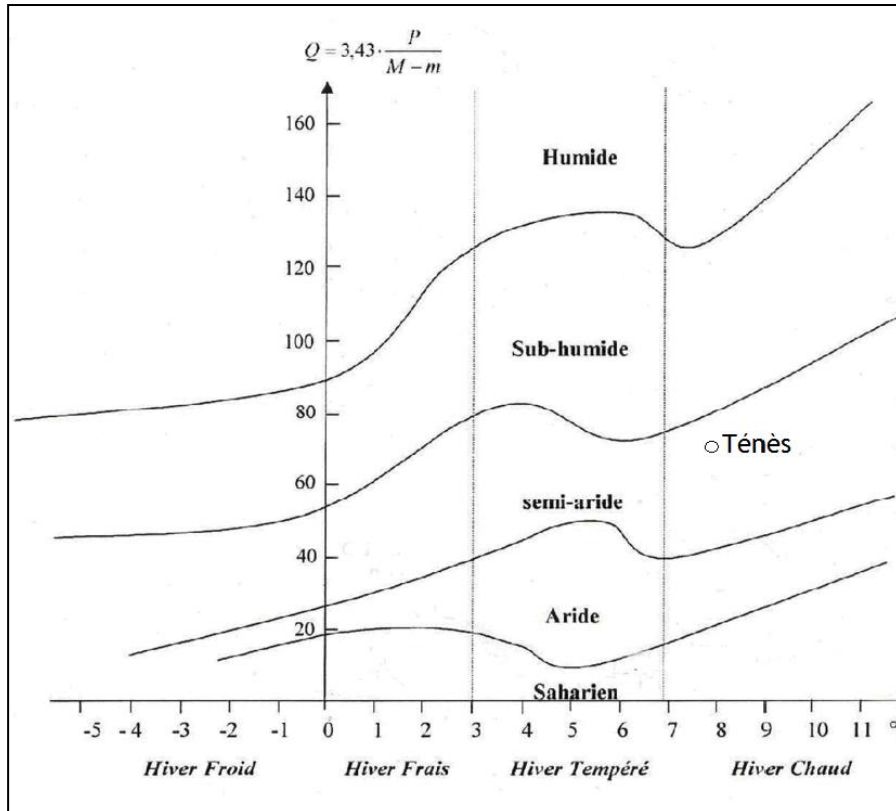
**M** : Température moyenne des maximums du mois le plus chaud.

**m** : Température moyenne des minimums du mois le plus froid.

**P** : Pluviométrie annuelle.

Pour la période allant de 1982 à 2012, **P** = 448,8 mm ; **M** = 29,9°C ; **m** = 8°C, ce qui donne un quotient pluviométrique d'après la formule (2.19) est égal à **72,28**.

Partant de cela, la région de Ténès (Chlef-Nord) se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride.



**Figure 32 : Situation de la zone de Ténès dans le climatogramme d'Emberger (1982-2012)**

En plus, aux conditions physiques et climatiques, la zone d'étude se caractérise par la présence d'une population rurale importante répartie en douar comme le douar de Tifiles, le douar de Tizi. La zone d'étude se caractérise aussi par des forêts publiques appartenant au domaine forestier et des forêts non cadastrés appartenant aux paysans. Ces forêts ont été exposées à plusieurs incendies qui ont engendré des pertes considérables de surfaces de forêt. Parmi les incendies les plus dévastatrices selon les responsables forestiers du district de la circonscription de Ténès (communication personnelle), on cite les incendiés de 1986 qui ont touché la partie nord du micro bassin, de 1993 qui a touché le coté Est du micro bassin vers Alger, de 1994 - 1995, de 2004 qui a touché la partie de milieu de la zone et celles de 2006 et 2007 qui ont touché une plus grande surface du micro bassin.

En outre, la plus-part de la surface est utilisée par l'agriculture de montagne surtout la céréaliculture dans les terres à pente, l'élevage bovine et particulièrement l'élevage du caprin de fait de sa faible exigence en aliment et quelques surfaces d'arboriculture (figuier, pommier et l'olivier).

L'utilisation des terres est réalisée dans la majorité des surfaces sans tenir compte des mesures de conservation du sol comme la culture sur des fortes pentes, l'élevage dans des zones sans l'existence des aliments nécessaires ce qui pousse les paysans à chercher d'autres sources d'alimentation comme le pâturage à l'intérieur des forêts.

Les systèmes d'utilisation des terres dans le micro bassin est généralement installés selon la pente et basés sur trois types d'utilisation de terre ; terre mixte, terre forestière et terre de maquis et terre de forêt de l'après incendié. Les cultures sont faites sur des terrains fragiles et sensibles à l'érosion et même dans des endroits des forêts brûlées.

Les différents facteurs caractérisant la zone d'étude ; facteurs physiques( des reliefs accidentés) et des facteurs climatiques ( pluies irrégulières et torrentielle durant certaines période de l'année ), les facteurs anthropiques (utilisation des terres sans mesures de conservation , mauvaise répartition des système d'utilisation des terres dans le micro bassin conjugué à la répétition des incendies) ont rendu les terres de cette zone de plus en plus exposés aux divers aléa érosifs que ce soit à l'aval où à l'amont du micro bassin.

Les photos prises en 2012 (Fig. 33, 34 et 35) montrent que la zone se caractérise par des parcelles fortement incendiées et la répétition des incendies a empêché la régénération naturelle. En outre, l'utilisation de certaines parcelles des zones incendiées caractérisées initialement par ses reliefs accidentés et ses sols sensibles à l'érosion ont augmenté remarquablement les risques érosifs en installant des cultures sur des sites fragiles (forte pente, sol sensible à l'érosion).

Ces dernières années, la zone d'étude a connu des événements pluviométriques importants caractérisés par des pluies torrentielles qui sont traduites sur les zones situées à l'amont du micro bassin par des pertes de sol et la formation des différentes figures de l'érosion hydrique et à l'amont par des inondations destructives caractérisées par le transport de débit solide et envasement (Fig.36, 37 et 38).



- **Etat de l'occupation du sol dans le sous bassins versant**



**Figure 33 : Forêt complètement incendiée (Kessaissia décembre 2012)**



**Figure 34 : Régénération naturelle empêchée par la répétition des incendies (Kessaissia décembre 2012)**





**Figure 35 : Occupation des terres dans le sous bassins versant (Kessaissia, décembre 2012)**

**- Formes de l'érosion linéaire**



**Figure 36 : Une ravine à l'intérieure d'un site incendié ( Kessaissia, Novembre 2012)**





**Figure 37 : Ravine à l'intérieure d'un site forestier (Kessaissia, Novembre 2012)**



**Figure 38 : Ravine à l'intérieure d'un site mixte (Kessaissia, Novembre 2012)**

- **Domages enregistrés à l'aval du sous bassins versant**

Les différentes figures apparues dans les sous bassins ont contribué aux dégâts enregistrés à l'aval comme il est montré dans les figures (39, 40 et 50).





Figure 39 : Enlèvement de l'envasement d'une piste (Kessaissia, Novembre 2012).



Figure 40 : Sapement des berges du cours d'eau principal (Kessaissia, Novembre 2012).



Figure 41 : Envasement de la cour d'une cité habitée (Kessaissia Novembre 2012)

- **Bilan des inondations à l'aval du micro bassin de Tifiles**

Les inondations les plus marquées dans la partie avale du micro bassin sont indiqués dans le tableau suivant :

<b>Tableau 12. Bilan des inondations enregistrées à l'aval du micro bassin (1990-2012)</b>	
<b>Date</b>	<b>Dégâts</b>
28 Novembre 1999	Pluies torrentielles qui a provoqué des débordements de l'oued Tifiles. Le cours d'eau, qui longe la cité « la cave », a inondé plusieurs habitations, des établissements scolaires et une station-service.
11 Novembre 2001	Des dégâts provoqués par les crues de 2 oueds (Oued Tifiles et Oued Boufessoussa) sortie à leurs lits.
27 Octobre 2007	Pluies intenses : Forte chutes de pluie et les défauts de curage des oueds (Oued Tifiles et Oued Boufessoussa qui ont provoqué l'inondation de la cite de la cave de Ténès.
12 Novembre 2012	Le cours d'eau, qui longe la cité « la cave », a inondé plusieurs habitations. L'eau a atteint plus d'un mètre de hauteur .Il faut rappeler qu'en 2001, les même cours d'eau avaient causé des dégâts humains et matériels importants,



## **Chapitre III : Matériels et méthodes**



## Introduction

L'évaluation de la dégradation du sol par l'érosion hydrique s'est faite à l'échelle d'un micro bassin selon trois manières :

- **Evaluation qualitative** par le suivi de la variation de la fragilité et de la sensibilité potentielle des sols à l'érosion.
- **Evaluation quantitative** sur la base de la technique du césium-137 pour évaluer le bilan de l'érosion et l'approche du maillage pour évaluer l'érosion linéaire.
- **Evaluation de l'infiltration** et du pouvoir hydrofuge de l'eau dans le sol à l'aide du mini infiltromètre disque test.

### 3.1. Echelle de l'évaluation

L'évaluation de la dégradation du sol s'effectue à l'échelle du micro bassin de l'Oued Tifiles.

### 3.2. Critères de choix de micro bassin

Le micro bassin de l'Oued Tifiles a été choisi pour cette étude :

- Pour son originalité : Une étude originale (Première étude dans la région),
- La représentativité : Le micro bassin est l'un des exemples des bassins versants qui sont caractérisés par la répétition des inondations dans les zones situées à l'aval,
- La répétition des incendies,
- La proximité,
- Caractérisée par la présence d'une population rurale exerçant des activités rurales.

### 3.3. Organigramme du travail

Ce travail a été réalisé selon l'organigramme suivant :

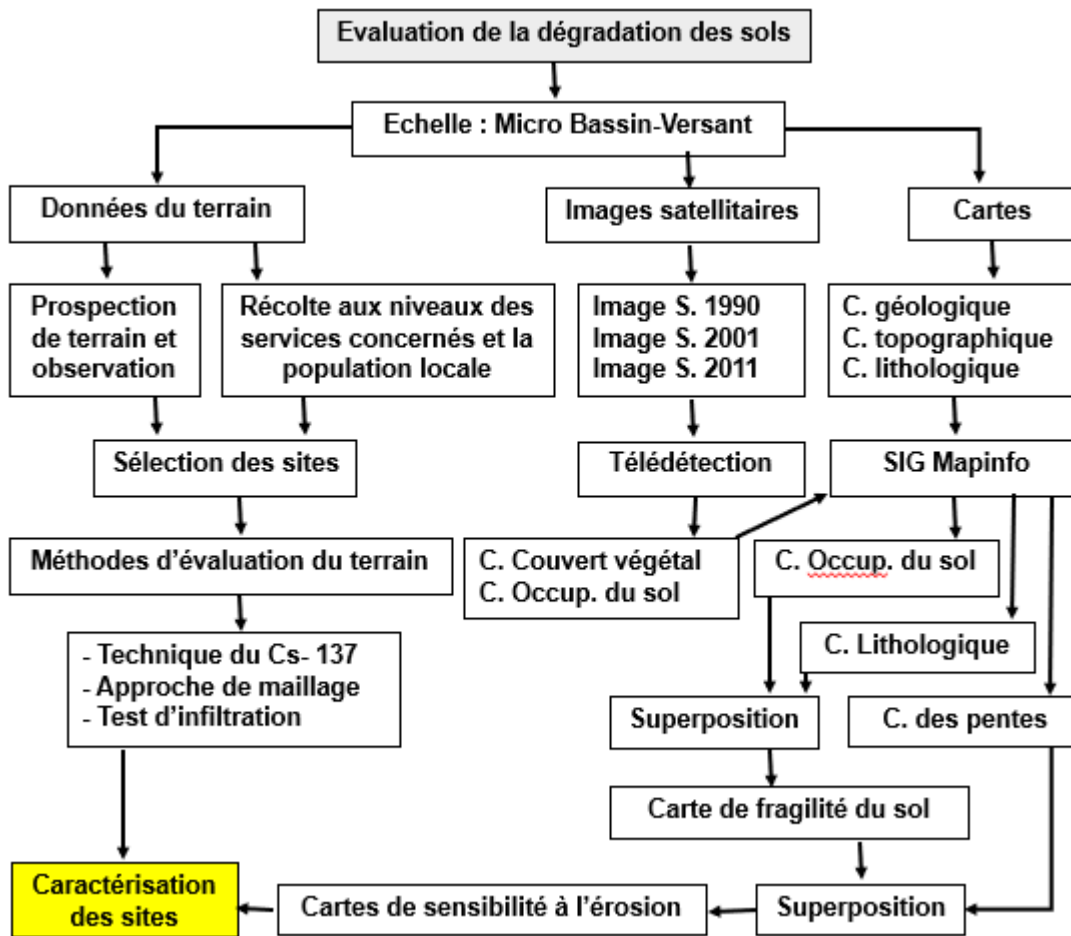


Figure 42. Organigramme de la méthodologie du travail

### 3.4. Evaluation qualitative

L'évaluation qualitative est faite par l'évaluation de la fragilité et de la sensibilité potentielle à l'érosion hydrique.

#### 3.4.1. Matériels

##### A. Logiciels utilisés

- **MapInfo Professional V 8.0** : Le logiciel MapInfo est un outil de type système d'Information Géographique qui sert à créer les informations géographiques, à traiter les informations et à les cartographier. Il compile, assemble, croise des données thématiques professionnelles avec des données génériques vecteur ou raster.
- **Vertical Mapper V 3.0** : Utilisé pour la rastérisation des tables de MapInfo ainsi que pour l'interpolation et pour l'élaboration du MNT.

- **Le logiciel ENVI (Environnement for Visualising Images) :** Le logiciel ENVI (Environnement for Visualising Images) a été utilisé pour traiter les images. Il permet la visualisation et l'analyse des données de grandes tailles et de la plupart des formats.

### B. Outils de prospection

- **G.P.S (Global Positioning System) :** Le but principal d'un G.P.S est de déterminer la position tridimensionnelle (altitude, latitude et longitude) de manière continue et instantanée. Pour notre cas, le G.P.S a été utilisé pour localiser l'existence des travaux antiérosifs réalisés, ainsi pour repérer les points où existent les différents types d'érosion, les points d'échantillonnage et les endroits où il y a eu des aménagements.
- **Appareil photos numérique :** Il est utilisé pour photographier les différents types d'érosion et les travaux d'aménagements qui ont été réalisés.

### C. Données

Les données sont sous formes de données cartographiques et d'images satellitaires :

- **Données cartographiques (Tab.13) :**

<b>Tableau 13. Données cartographiques de la région de Ténès en coordonnées UTM.</b>		
<b>Typologie</b>	<b>Source</b>	<b>Objectif</b>
Carte topographique 1/50000	INCT	La carte de réseau hydrographique Limite de sous bassin versant
Carte géologique 1/50000	ANRH	Obtenir la carte lithologique du sol

- **Images satellitaires :** Les images satellitaires constituent un outil important dans la cartographie de l'occupation du sol ainsi que dans la planification et la gestion des ressources. Elles sont rattachées à des données descriptives qui donnent des informations sur la structure, les conditions d'acquisition nécessaires pour pouvoir lire et traiter l'image. Le processus d'interprétation, qu'il soit visuel ou automatique, transforme les données contenues dans ces images en éléments d'informations attachés à une localisation géographique.

Tableau 14. Caractéristiques des images landsat	
Type d'image	Caractéristiques
Bandes spectrales ( $\mu\text{m}$ )	TM1 0.45-0.5 $\mu\text{m}$ Bleu
	TM2 0.52-0.6 $\mu\text{m}$ Vert
	TM3 0.63-0.69 $\mu\text{m}$ Rouge
	TM4 0.75-0.9 $\mu\text{m}$ IR proche
	TM5 1.5-1.7 $\mu\text{m}$ IR moyen
	TM6 10,4-12,5 $\mu\text{m}$ IR moyen
	TM7 20.9-23.5 $\mu\text{m}$ IR lointain
	B 8 520-900 nm panchromatique
Résolution	30 m
Projection	Universal Transverse Mercator (UTM)
Nombre de pixels (lignes x Colonnes)	8951 x 7949

### 3.4.2. Méthodes

#### A. Elaboration des cartes thématiques

Les différentes cartes thématiques, de la lithologie, des pentes et d'occupation du sol sont déterminées à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) qui s'effectue par :

- **La numérisation** : Nous avons, en premier lieu, scanné la carte topographique de la région de Ténès à l'échelle 1/50000 de 1922.
- **Le calage de la carte** : Cette phase représente la définition des points de calage (4 points choisis aux quatre extrémités de la carte scannée). Cette opération est appelée le géo référencement.
- **La digitalisation** : La digitalisation est préparée par rapport au géo référencement (en coordonnées Lambert ou coordonnées géographiques). En général, les SIG ne prennent en compte que les éléments de surfaces ramenées dans un plan.
- **L'interpolation** : Après on utilise le logiciel Vertical Mapper qui nous donne un MNT et finalement une présentation du terrain en 3D sous forme de couleurs qui varient selon l'altitude.

De même les cartes d'occupation du sol pour les dates de 1987, 2001 et 2011 sont déterminées à partir des images satellitaires en suivant les étapes suivantes :

- **Prétraitement des données** : L'imagerie LandSat TM (thématique mapper) couvre une plus large portion du spectre électromagnétique. Le capteur TM enregistre des réflectances dans le visible (TM1, TM2, TM3), dans le moyen infrarouge (TM5 et TM7) et dans le proche infrarouge (TM4). Il est reconnu que la prise en compte d'une



bande au moins de chacune de ces trois zones du spectre permet une bonne discrimination générale de l'occupation du sol. Il est en outre généralement admis que l'utilisation d'un grand nombre de bandes spectrales n'apporte guère plus de discrimination entre les objets au sol que celle de quelques bandes judicieusement choisies (Beaudoin et *al.* 1995).

Pour cela l'étude de l'évolution du couvert végétal de la forêt de Tifiles est basée sur trois images satellitaires prises au mois de mai :

- Image Landsat TM      mai 1987 ;
  - Image Landsat TM      mai 2001 ;
  - Image Landsat TM      mai 2011.
- **Géoréférencement des images :** Les données satellitaires ont été géo référencées (système de la projection UTM du fuseau 31) et ont subi une correction géométrique et radiométrique.
  - **La détection et l'identification des mutations** de l'occupation du sol dans la forêt de Tifiles entre 1987, 2001 et 2011 s'appuient sur l'exploitation des trois images de référence obtenues.
  - **Classification :** La classification d'une image de télédétection consiste en une reconnaissance automatique des réflectances. Elle permet d'identifier et de regrouper les pixels similaires d'une image dans une classe. Cette similarité peut être déterminée par rapport à la signature spectrale ou à la proximité spatiale. Le but est de créer des images thématiques qui correspondent à des catégories d'objets. Les pixels sont, dans un premier temps, identifiés à partir de leurs signatures spectrales et, dans un deuxième temps, regroupés en classes thématiques.
  - **Classification par la méthode de maximum vraisemblance :** La méthode de maximum de vraisemblance est ici utilisée pour classer nos images en fonction de la nature de l'occupation du sol. Cette méthode est considérée comme une technique puissante de classification. La règle de décision de cette méthode est basée sur la probabilité qu'a un pixel d'appartenir à une classe particulière. La transformation de l'occupation du sol est sous forme vectoriel par le Map info.

## B. Elaboration des cartes de fragilité et de sensibilité potentielle à l'érosion

L'approche utilisée pour la cartographie de la fragilité et la sensibilité du sol à l'érosion est une évaluation qui s'appuie sur la pondération de chaque facteur avant d'effectuer leur superposition, ainsi :

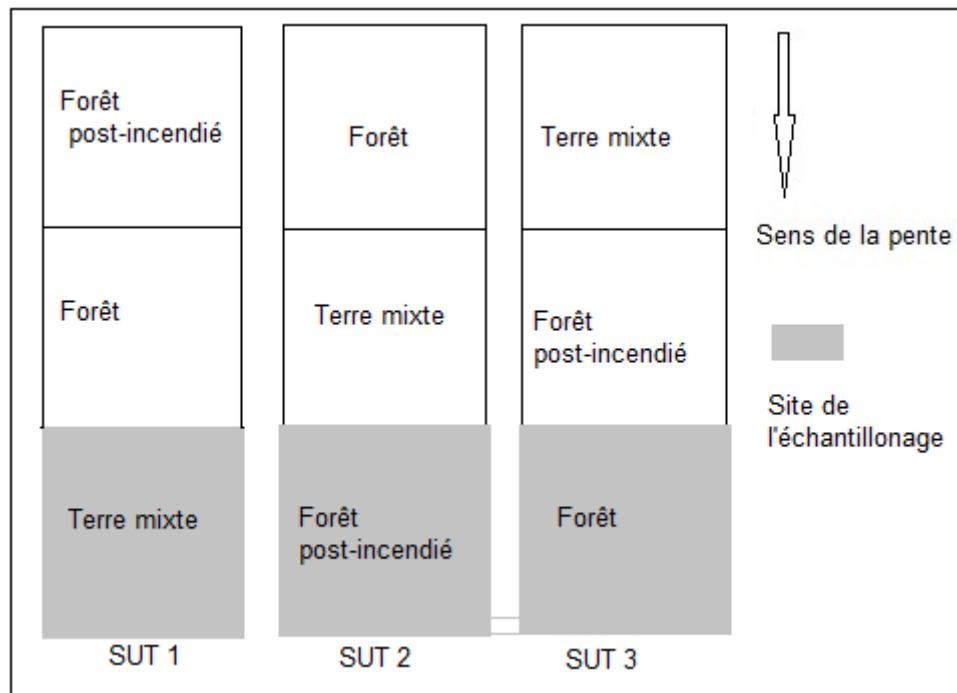
- **Pour la fragilité du sol à l'érosion**, on fait une superposition des cartes de lithologie avec les cartes d'occupation du sol.
- **Pour la sensibilité potentielle du sol à l'érosion**, on fait la superposition les cartes de fragilité avec la carte des pentes pour l'évaluation de la variation de la sensibilité potentielle à l'érosion.

### 3.5. Evaluation quantitative

L'évaluation quantitative est faite à la suite de la désignation des sites de suivi qui sont choisis selon :

- **La représentativité** : Chaque site choisis représente les sites ayant les mêmes caractéristiques selon l'utilisation de sol du micro bassin.
- **La proximité** : Afin de permettre de suivre la dégradation des sols et de faire la comparaison des résultats pour savoir l'effet des différentes actions, les sites sont proches l'un de l'autre.
- **La même exposition** : Les sites choisis sont sélectionnés selon l'exposition nord qui est la plus exposé aux pluies et au ruissellement et l'exposition la plus préfère pour le calcul de l'érosion par la technique de césium-137 car cet élément est arrivé au sol par les pluies venant de l'hémisphère nord où se sont déroulés la plupart des essais nucléaires.
- **La même surface** : La surface utilisée pour le suivi est égale à 2 hectares, c'est la surface idéale qui permet de marcher sur tout le site, d'observer, de suivre et prendre les données pour ce type des études.
- **L'occupation du sol** : Pour évaluer la dégradation des sols dans la zone étudiée on a sélectionné trois sites situés à l'aval de trois systèmes d'utilisation des terres (SUT) en pentes dominés dans la région comme il est indiqué dans la figure suivante :
  - **Site de terre mixte** à l'aval de SUT1 composé de forêt post-incendié, forêt et terre mixte
  - **Site de forêt post-incendie** à l'aval de SUT2 composé de forêt, terre mixte et forêt post-incendié

- **Site de forêt** à l'aval de SUT3 composé de terre mixte, forêt post-incendié et terre mixte



**Figure 43. Sites de l'échantillonnage et du suivi**

### 3.5.1. Technique du césium-137

La technique de l'isotope césium-137 ne demande pas beaucoup de matériel. Elle demande que quelques outils et instruments pour effectuer l'échantillonnage, la préparation des échantillons et l'appareil de spectrogamma (Fig.39) pour l'inventaire de la radioactivité du césium-137.

#### A. Matériels

- Matériel de l'échantillonnage
  - Un GPS pour la prise des points de prise des échantillons
  - Une tarière
- Matériel pour la préparation des échantillons
  - Un broyeur
  - Une étuve
  - Une tamiseuse
- Matériel pour l'inventaire
  - Appareil détecteur gamma (spectrogamma)



Figure 44. Appareil de détection de l'activité des isotopes

## B. Méthodes

- **Echantillonnage :** Pour l'étude de la redistribution du sol, on a fait un échantillonnage selon la profondeur du sol allant de la surface à 20 cm de profondeur avec un pas de 5 cm.
- **Analyse de l'activité de césium-137 :** Les échantillons prélevés sont ramenés au laboratoire du centre de recherche nucléaire et atomique (CRNA) situé à Alger pour l'analyse de l'activité du césium-137.

Chaque échantillon est pesé puis subit un séchage à  $105^{\circ}$ , ensuite pesé de nouveau et homogénéisé avec un broyeur à cylindre. Le comptage Gamma de chaque échantillon se fait au moyen d'un détecteur Gamma (Fig. 40).

Le flacon pour l'analyse gamma est rempli avec la fraction fine. Chaque échantillon nécessite au moins 24 heures de comptage. Les spectres sont sauvegardés, le dépouillement manuel ou automatique de chaque spectre est effectué de manière à avoir une valeur de l'activité de Cs-137.

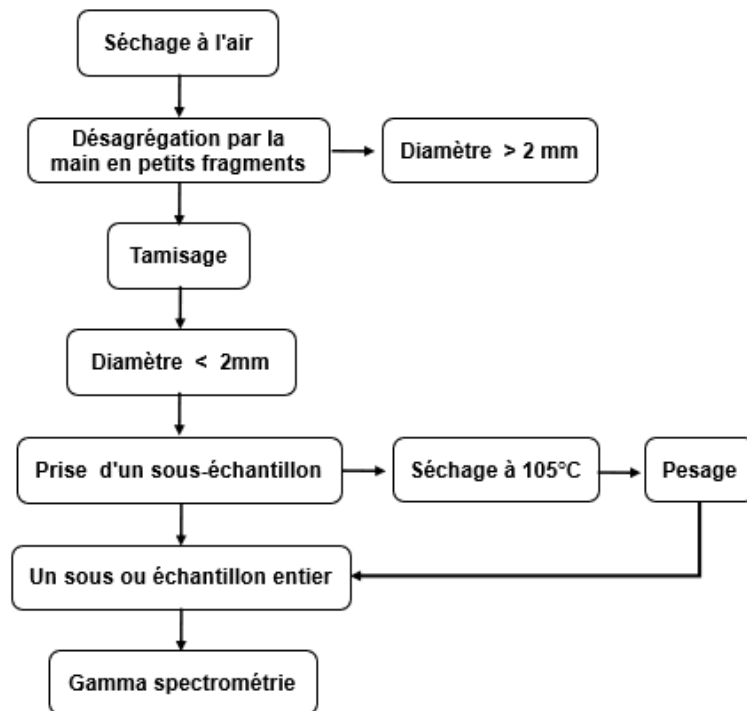


Figure 45. Etapes de détermination de l'activité du césium-137

• **Calcul de l'érosion**

➤ **Site mixte** : Le calcul de l'érosion se fait selon les modèles spécifiques des sites remaniés pour notre étude on utilise le modèle des bilans simplifiés selon les étapes suivantes :

- ✓ Calcul de l'activité du césium-137
- ✓ Calcul de l'érosion par le modèle des bilans de masses simplifiés
- ✓ Modèle du bilan des masses simplifié (Simplified Mass Balance Model 1 : SMBM) (Zhang et al. 1990).

$$Y = 10 \frac{dB}{P} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{X}{100} \right)^{1/(t-1963)} \right] \quad (3.1)$$

Y : la perte annuelle moyenne de sol (kg / m<sup>2</sup>)

d = la profondeur de la culture (m),

B = la densité volumique du sol (kg.m<sup>-3</sup>),

X = le pourcentage de réduction du total de césium-137

t = la période depuis l'initiation des accumulations, en générale depuis 1963.

P = la fraction de la concentration de <sup>137</sup>Cs de sédiments mobilisés.

➤ **Sites non remaniés** : Il s'agit de site post- incendié et site forestier. Le site post-incendié et le site forestier sont considérés comme des sites non remaniés, le calcul

de l'érosion se fait selon les modèles spécifiques aux sites remaniés : Le modèle de distribution du profile (The profile distribution model (PDM)), suivant (Li et *al.*, 2003 ; Porto et *al.*, 2003)

$$Y = \frac{-10}{t - 1963} h_0 \operatorname{Ln} \left( 1 - \frac{X}{100} \right) \quad (3.2)$$

Y : perte du sol ( t / ha / an )

t : l'année de l'échantillonnage)

$$X : \text{pourcentage de réduction dans le site de référence } (A_{ref} - A_u / A_{ref}) * 100 \quad (3.3)$$

$A_{ref}$  : Activité de césium-137 dans le site de référence

$A_u$  : Activité de césium-137 dans le point échantillonné.

$h_0$  : coefficient décrit la forme du profile ( $\text{Kg/m}^2$ ) ; profondeur de pénétration du césium-137 dans le sol.

Le facteur  $h_0$  est obtenue par la dérivation de fonction exponentielle suivante du profile du césium-137 (Walling and He, 1997 ; Porto et al, 2001) :

$$A(x) = A(0) * e^{-x/h_0} \quad (3.4)$$

### 3.5.2. Approche de maillage

Pour suivre l'effet de la dégradation du sol dans les différents sites par l'érosion linéaire, on a sélectionné une ravine de chaque site et on a procédé par des mesures des dimensions des ravines en trois dimensions (3D) au niveau de plusieurs points avant et après la campagne pluviométrique 2012 - 2013.

#### A. Matériels

La mise en place du dispositif de mesure de cette approche ne demande pas beaucoup du matériel, son installation sur le terrain se fait par :

- Quatre piquets de fer
- Deux fils gradués
- Un fil portant à son extrémité un morceau de fer de sorte qu'il ressemble à une pendule pesante.

#### B. Méthodes

- La réalisation de maillage s'effectue par :

- L'implantation dans le sol de quatre piquets de fer aux quatre coins de la ravine. Ces piquets sont placés en parallèles les uns par rapport aux autres.
- La liaison entre ces piquets par un fil portant des graduations ayant un pas de 10 cm de l'axe Y et 10 cm de l'axe X. Pour mesurer la profondeur, on utilise un fil gradué portant à son extrémité un morceau de fer jouant le rôle de pendule pesant.

La méthode utilisée dépend de l'outil informatique, elle permet la détermination du volume des différentes figures d'érosion (griffes, rigoles et ravines) sur la base de la règle de Simpson's et la règle trapézoïdale. Elle permet aussi de suivre ces figures après les événements pluviaux, ce qui facilite le calcul des sédiments transportés par le ruissellement.

Cette méthode s'applique aux formes de trois dimensions, c'est-à-dire on donne à la rigole ou ravine la forme en 3D. Pour cela, on procède par un maillage de la rigole qui se fait par le quadrillage de toute la rigole en coordonnées X, Y et Z.

### 3.5.3. Méthode de mini-disque infiltration test (MDIT)

Les propriétés hydrauliques du sol sont des paramètres importants utilisés souvent dans plusieurs modèles physiques qui décrivent les processus de l'infiltration et du ruissellement. Elles peuvent aussi être utilisées comme des indicateurs pour avoir des informations utiles à la conservation des sols et la gestion de l'eau.

Le taux d'infiltration du sol et le pouvoir hydrofuge sont deux paramètres qui affectent directement le mouvement de l'eau du sol notamment l'infiltration ce qui pourrait justifier leur utilisation comme des indicateurs de la qualité physique des sols.

Le taux d'infiltration est le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Il dépend du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol. C'est un paramètre qui peut avoir des effets sur l'alimentation des nappes, les eaux de surface, l'érosion des sols et la compaction du sol. Cependant, le pouvoir hydrofuge est généralement observé comme étant la réduction de la quantité d'infiltration de l'eau dans le sol (Tillman et al 2000). Elle est définie par l'incapacité de l'eau de mouiller ou de s'infiltrer dans le sol (Doerr et al 2000), c'est un phénomène instable, elle est plus marquée surtout lorsque le sol est plus sec et elle peut arriver naturellement ou bien après les incendies de forêt (Robichaud et al. 2000).

## A. Matériel

Le matériel utilisé pour effectuer les différentes mesures est un mini infiltromètre à disque type Decagon Devices version 2014 (Fig. 41). C'est un outil conçu pour mesurer la conductivité hydraulique des sols au voisinage de la saturation pour des potentiels de l'eau compris entre -7 et -0,5 cm. Il permet d'explorer le fonctionnement hydrodynamique de la macroporosité du sol dans la gamme de diamètre de pore supérieur à 0,12 mm.

- **Caractéristiques :**

- Longueur Totale – 32,7 cm
- Diamètre de tube (mètre) – 3,1 cm
- Disque en acier inoxydable fritté : 4,5cm diamètre et 3 mm d'épaisseur
- Longueur de tube (mètre) de règlement de succion : 10,2 cm
- Gamme de succion : 0.5 à 7cm de succion
- Longueur de réservoir d'eau : 21,2 cm

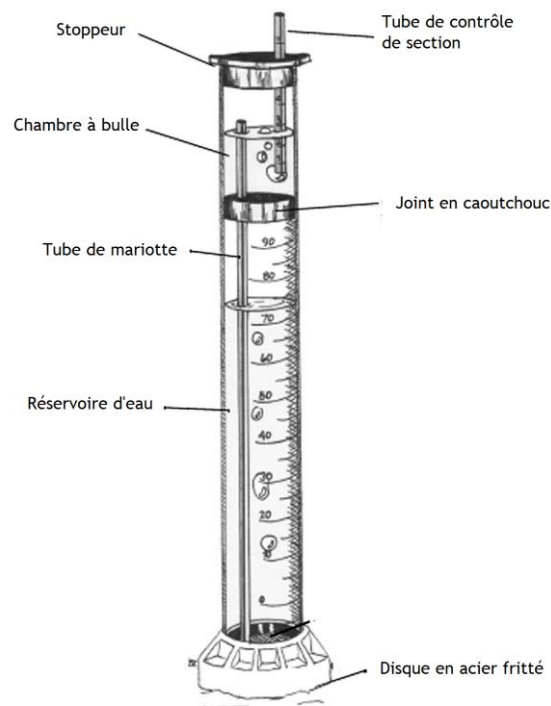


Figure 46. Mini infiltromètre à disque Decagon Devices version 2014

## B. Méthodes

- **Le taux d'infiltration :** Le taux d'infiltration est déterminé le long de trois transects parallèles de 100 mètres de longueur et de 10 mètres d'écartement. Après le remplissage des deux chambres, on procède à mesurer le taux d'infiltration par minute au niveau de 1 et 3 centimètres de profondeur.



- **Le pouvoir hydrofuge des sols :** La détermination du pouvoir hydrofuge des sols est inspirée de la méthode utilisée par (Robichaud et al, 2002). Elle consiste à mesurer la quantité de l'eau infiltrée dans le sol pendant une minute (test de l'infiltration par le mini infiltromètre à disque). Le test est appliqué en trois répétitions au niveau des points 0, 10, 30, 60 et 100 mètres le long du transect. La prise de ces mesures est faite en tenant compte des études précédentes qui ont montré que le pouvoir hydrofuge est limité surtout dans les premiers centimètres de la surface du sol (Robichaud et al 2002).



**Chapitre IV : Résultats et  
discussions**

## IV. Résultats et discussions

### 4.1. Evaluation qualitative

#### 4.1.1. Elaboration des cartes thématiques

Les différentes cartes thématiques sont déterminées par la digitalisation des cartes disponibles : la carte lithologique à partir de la carte géologique, la carte de pente à partir de la carte topographique et les cartes d'occupation du sol de 1987, 2001 et 2011 à partir des images satellitaires.

#### A. Carte lithologique

La carte lithologique (Fig. 42 et Tab.15) montrent que les marnes occupent la plus grande superficie au niveau du micro bassin versant avec une superficie égale à 9.12Km<sup>2</sup> (57%) suivi de la classe Grés poudingues avec une superficie égale à 4.48 Km<sup>2</sup> (28%).

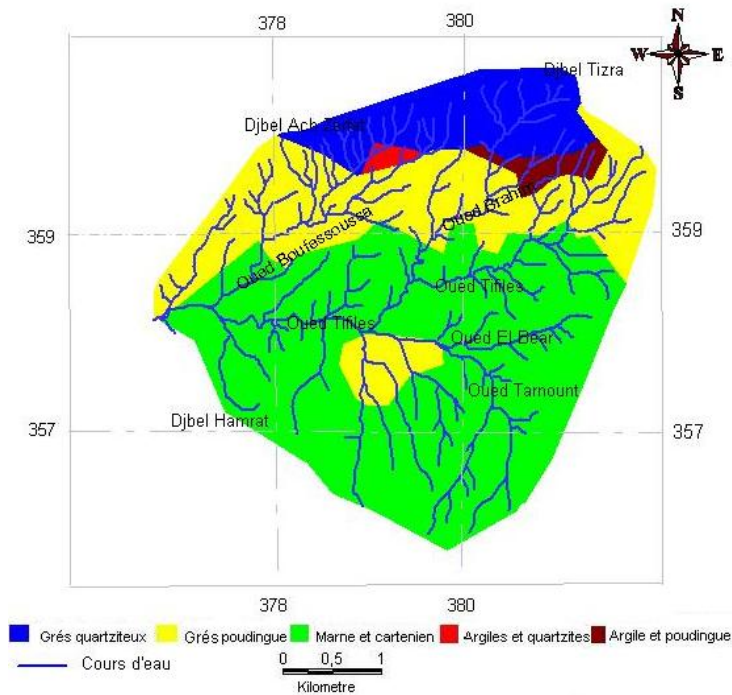


Figure 47. Carte lithologique du mico bassin

Tableau 15. Classes lithologiques		
	Surface (Km <sup>2</sup> )	Surface (%)
Marnes et carténien	09.21	57.56
Grés poudingues	04.42	27.62
Argiles et poudingues	00.54	03.37
Argiles et quartzites	01.75	10.94
Grés quartzeux	00.13	00.81

## B. Carte des pentes

L'élaboration de la carte des pentes a été faite à la suite de la détermination du MNT d'une résolution 20 mètres par la digitalisation des courbes de niveau de la carte topographique du micro bassin (Fig.43). Elle est faite sur la base du regroupement des pentes selon la classification américaine qui regroupe les pentes en cinq classes de sensibilité à l'érosion hydrique (Hudson, 1993).

La carte des pentes (Fig. 44et Tab.16) montre que la classe de 15% à 30% occupe la plus grande surface avec une surface égale à 6.72 Km<sup>2</sup> ( 42%) suivi par la classe de 8% à 15% avec une surface égale à 4.96 Km<sup>2</sup> ( 31% ), la classe de 2% à 8% par une surface égale à 1.76 Km<sup>2</sup> ( 11% ) et la classe de pente supérieure à 30% par une surface égale à 1.6 Km<sup>2</sup>(10%) et la classe de pentes inférieure à 2% par une surface égale à 0.96 Km<sup>2</sup>(6%). L'observation des surfaces des différentes classes montre que 73% de la surface du micro bassin est caractérisée par des pentes fortes à très forte, ce qui pourrait indiquer que le relief est très accidenté et constitue un risque potentiel à l'érosion hydrique.

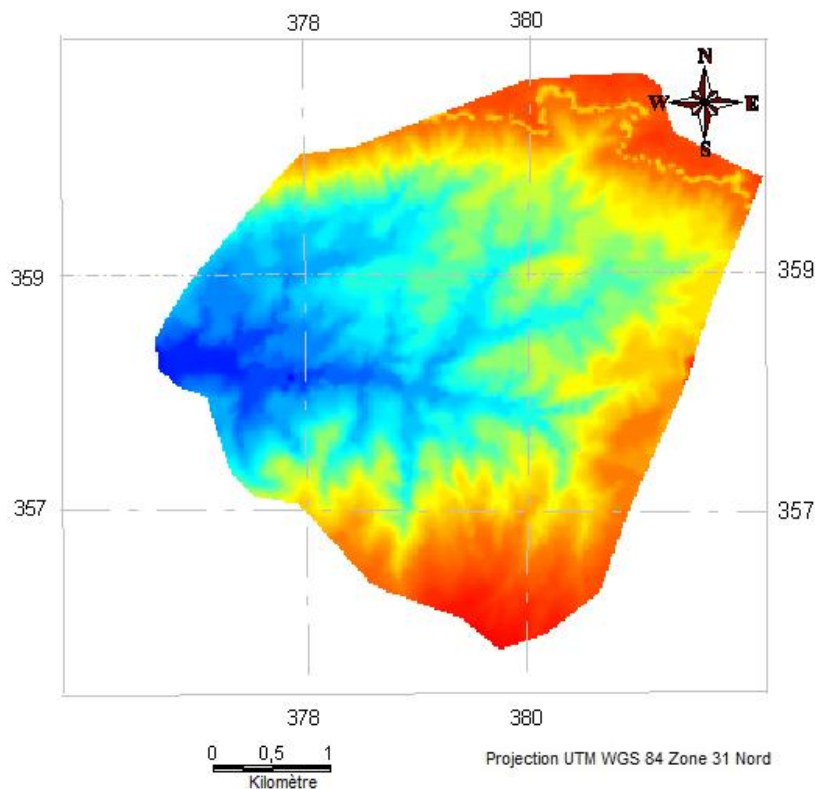


Figure 48. MNT du micro bassin de l'Oued Tifiles

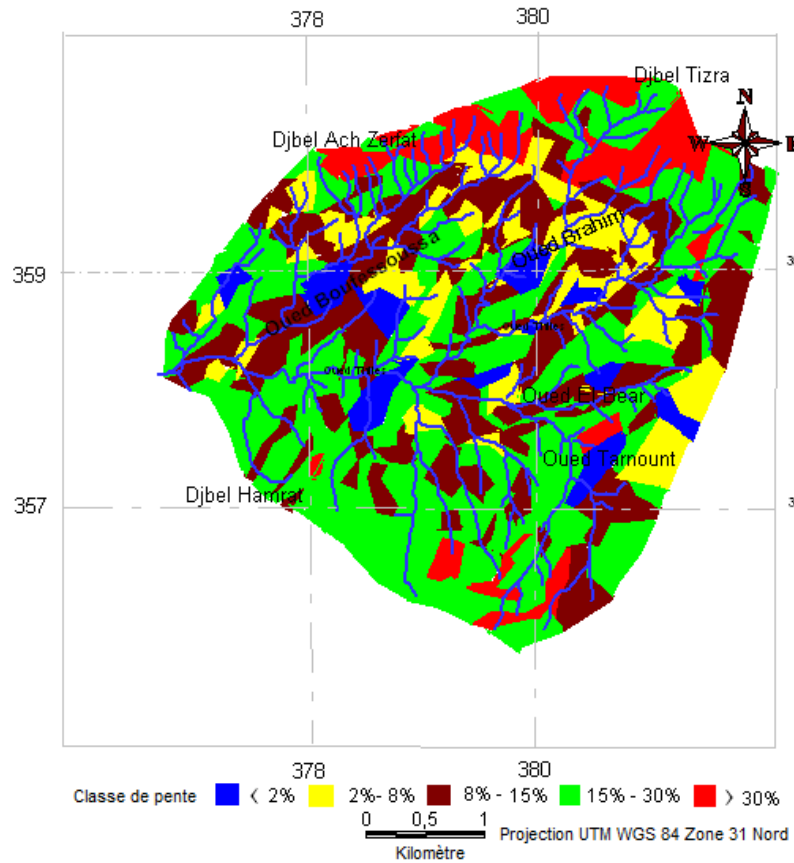


Figure 49. Carte des classes de pente

Classes des pentes	Surface Km <sup>2</sup>	Surface (%)
< 2%	0.94	5.87
2%-8%	1.84	11.5
8%-15%	5.15	32.19
15%-30%	6.85	42.81
>30%	1.62	10.12

### C. Cartes d'occupation du sol

Les cartes d'occupation du sol pour les années 1987, 2001 et 2011 sont réalisées par l'analyse des images satellitaire selon trois scènes du satellite Landsat TM (Thématique mapper : Fig. 45).

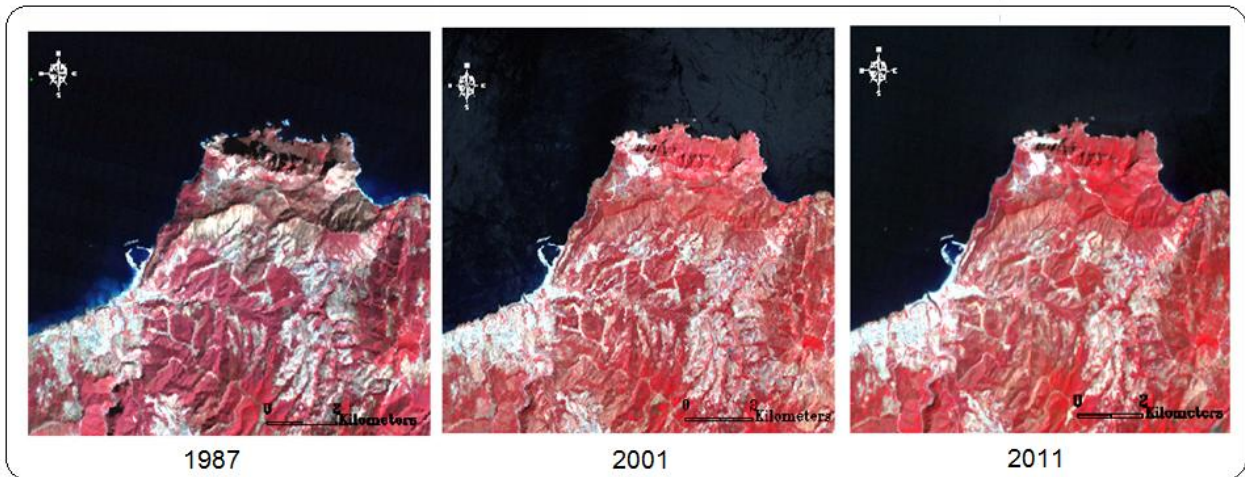


Figure 50. Images brutes du satellite Landsat TM

- **Classification de couvert végétal :** La classification supervisée est l'une des techniques de classification automatique où l'on cherche à produire automatiquement des règles pour regrouper des individus en un certain nombre de classes à partir d'une base de données d'apprentissage contenant « des échantillons ».
  - **Classification supervisée :** Avant de procéder à la classification, on a choisi au préalable des régions homogènes (région d'intérêt) dont on connaît sa nature de l'occupation de sol à l'aide de Google Earth et des missions de reconnaissance de terrain. Ces échantillons représentent des régions de références délimitées par des polygones de pixels sur l'image à classer (Fig.46) dont les caractéristiques spectrales vont être utilisées par la suite pour réaliser la classification.

Après avoir sélectionné les régions d'intérêt, on a lancé la classification. Ainsi, pour chaque date on a effectué une classification supervisée par la méthode de « maximum vraisemblance » qui consiste à assigner chaque pixel à la classe pour laquelle la probabilité d'appartenance est la plus élevée. De ce fait, on a abouti à une typologie des principales occupations de sols retenues dans cette étude : Forêts des conifères, maquis ou végétations régénérées après les incendies, sols nus, sols cultivés comme il est présenté par les cartes indiquées par la figure 47.

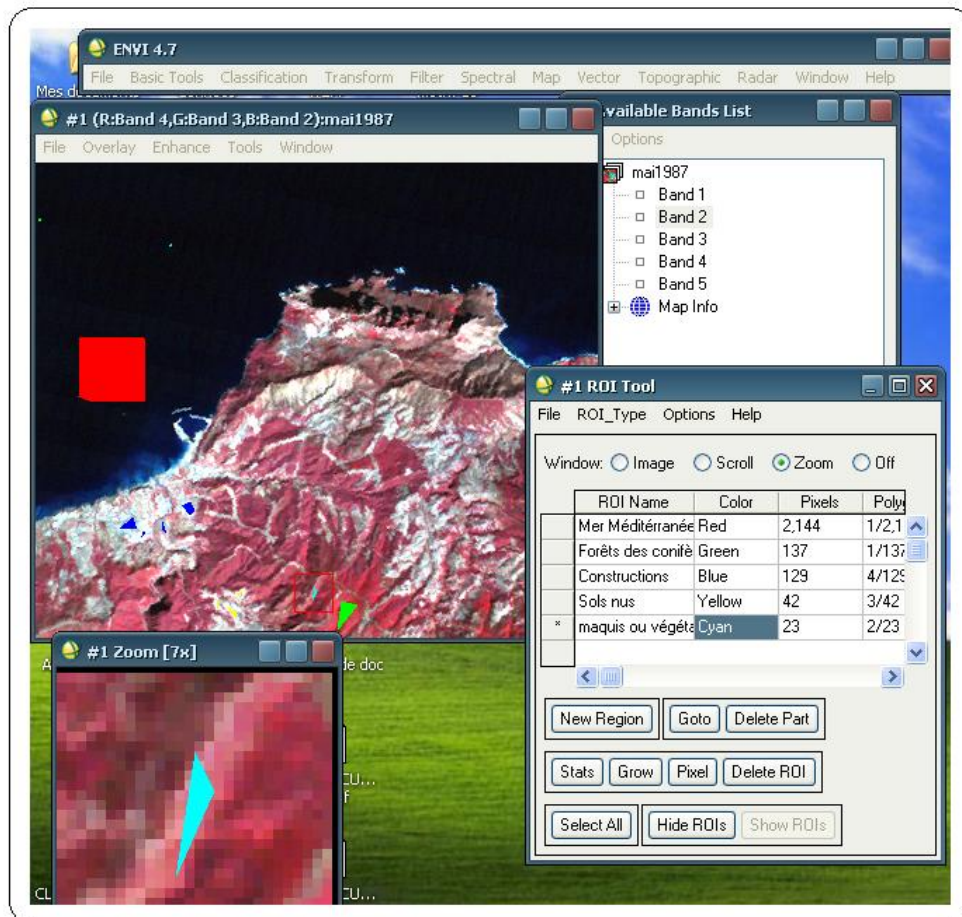


Figure 51. Exemples des régions d'intérêt (Region Of Interest : ROI)

- **Validation de la classification par la matrice de confusion :** La classification maximum vraisemblance donne les matrices de confusion indiquées dans les tableaux (Tab.17, 18 et 19) dans lesquels, les lignes correspondent à l'affectation des pixels de chaque thématique de classification et les colonnes correspondent à la répartition réelle des thèmes dans chaque thématique.

L'examen de ces matrices dégage que les unités (classes) sont assez bien reconnues dans l'ensemble allant de 90% à 100% pour la période de 1987, de 80 à 99.11 pour la période de 2001 et de 91.11 à 100% pour la période de 2011.



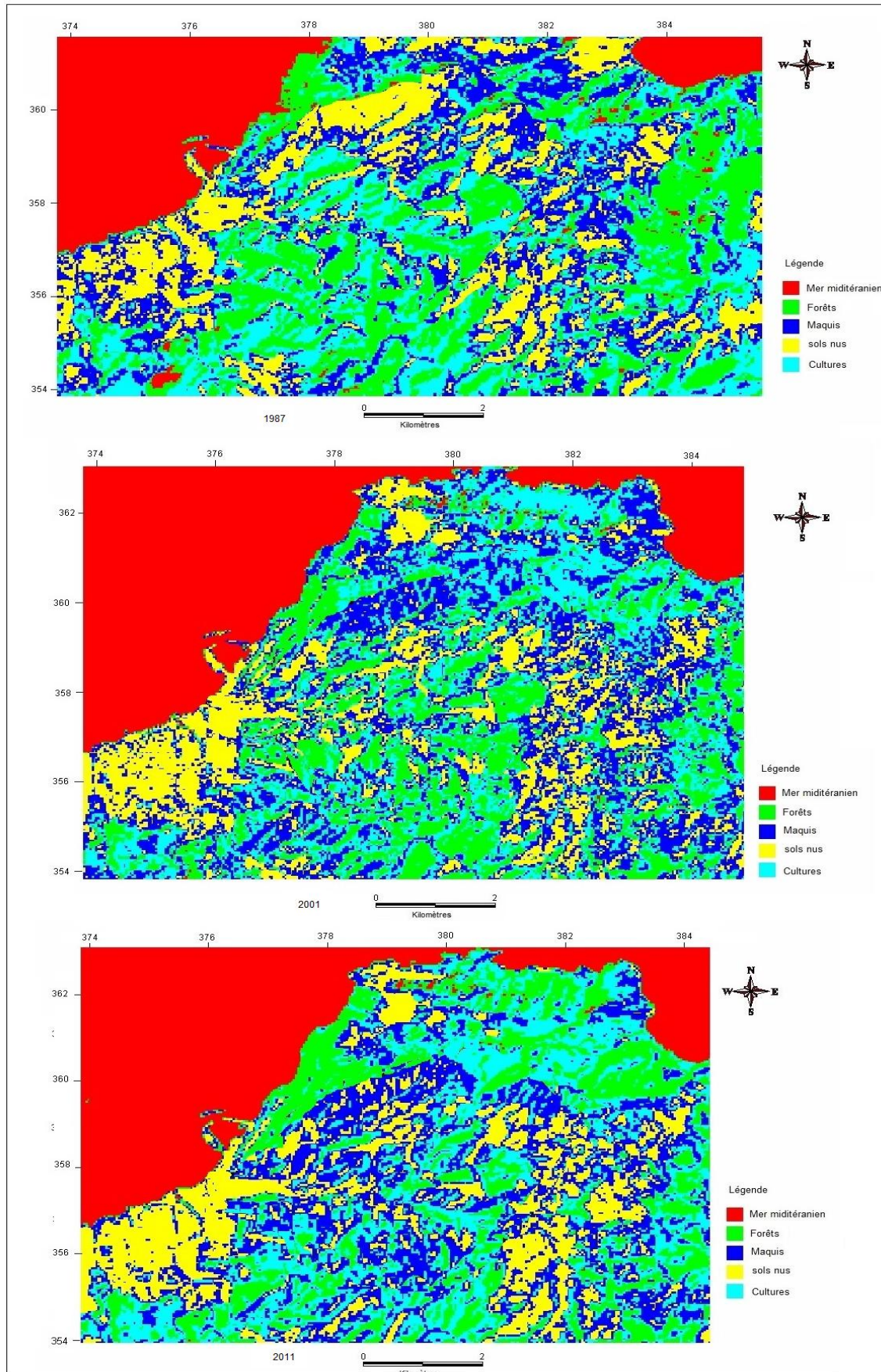


Figure 52. Typologie des principales occupations du sol



Classes	Mer	Forêts des conifères	Maquis ou forêt incendiée	Cultures	Sols nus ou constructions
Mer Méditerranée	100	00	00	00	00
Forêts des conifères	00	95,22	3,70	00	00
Maquis ou forêt incendiée	00	4,78	90,74	5,77	00
Cultures	00	00	5,56	92,31	3,70
Sols nus ou constructions	00	00	00	1,92	96,3

Classes	Mer	Forêts	Maquis ou végétations régénérées	Cultures	Sols nus ou constructions
Mer Méditerranée	99,91	00	00	00	00
Forêts des conifères	00	92,63	11,25	1,37	00
Maquis ou végétations régénérées	00	7,37	80,0	9,59	00
Cultures	00	00	8,75	87,67	2,86
Sols nus ou constructions	0,09	00	00	1,37	97,14

Les matrices de confusion pour les années de 1987, 2001 et 2011 montrent que les coefficients du Kappa qui correspondent à la performance de la classification sont respectivement égaux à 0,96 en 1987, 0,92 en 2001 et 0,94 en 2011.

En 1987, la forte confusion enregistrée se trouve entre les cultures et les maquis ou forêts incendiées et varie de 5,77 à 5,66 suivis des maquis ou forêts incendiés et les forêts avec une variation de 4,78 à 3,70.

Classes	Mer Méditerranée	Forêts des conifères	Maquis ou forêt incendié	Cultures	Sols nus ou constructions
<b>Mer Méditerranée</b>	100	00	00	00	00
<b>Forêts des conifères</b>	00	93,22	3,33	00	00
<b>Maquis ou forêts incendiés</b>	00	6,78	91,11	5,77	00
<b>Cultures</b>	00	00	5,56	93,27	00
<b>Sols nus ou constructions</b>	00	00	00	0,96	100

En 2001, la confusion est plus élevée entre maquis ou forêts incendiées et la forêt avec un coefficient varie de 11,25 et 7,35 suivis maquis ou forêts incendiées et les cultures avec une variation entre 9,59 – 8,75.

En 2011, la confusion est plus élevée entre la zone de forêts et la zone de maquis ou forêts incendiées avec une variation entre 7,33 – 6,78 suivis des cultures et maquis ou forêts incendiées 7,77 – 5,56. Ces observations montrent que le changement est plus marqué entre la forêt et les sites poste incendiés ce qui pourrait expliquer l'effet des incendies dans la réduction du couvert végétal.

La classification a permis de distinguer l'occupation du sol durant les trois dates comme il est indiqué dans les figures et les tableaux suivants.

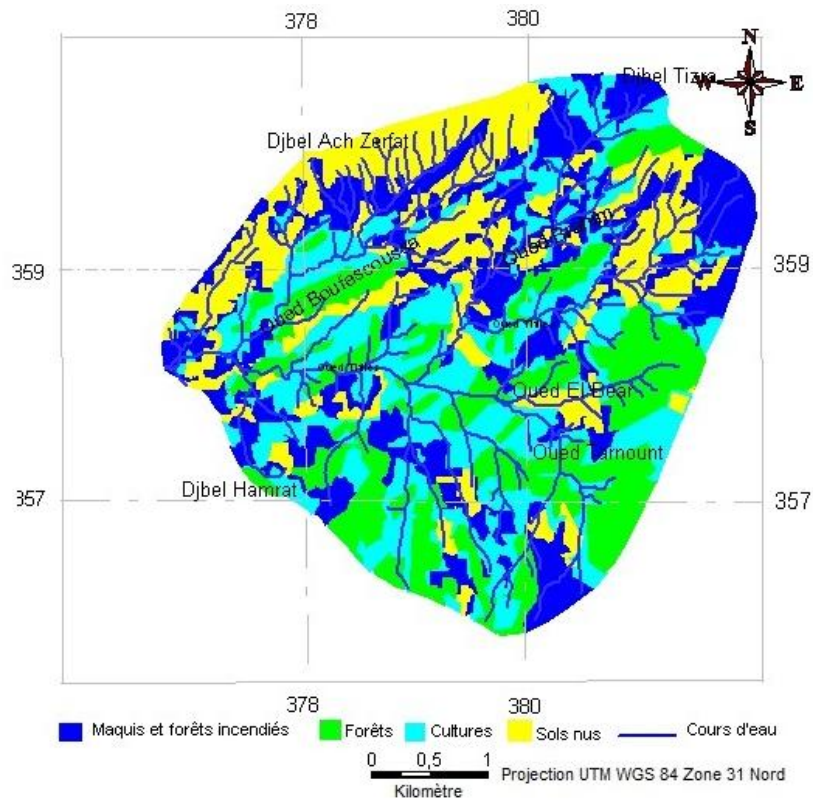


Figure 53. Carte d'occupation du sol en 1987

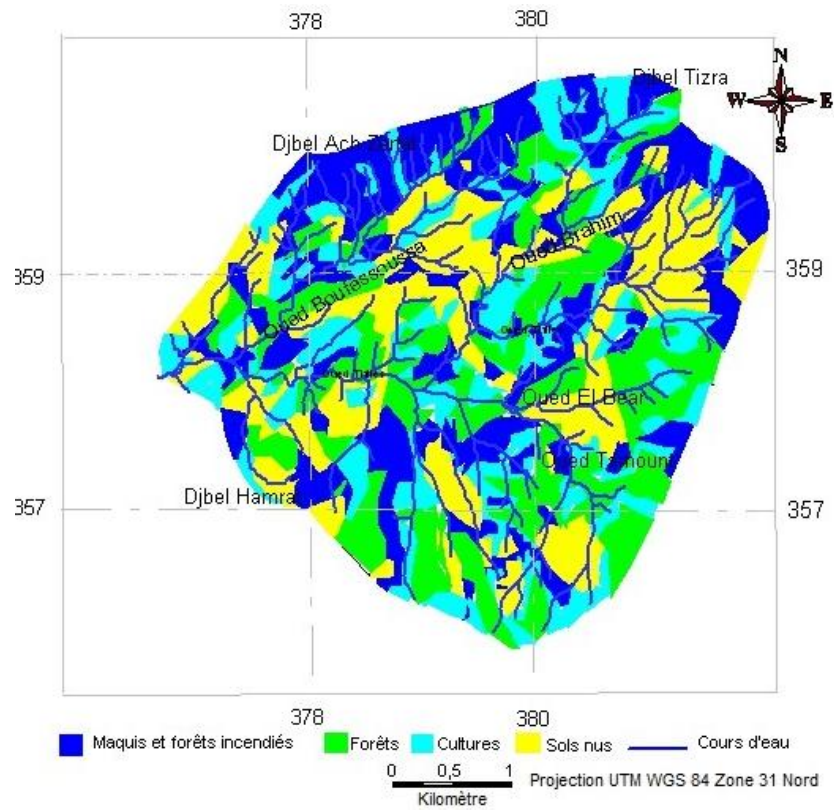


Figure 54. Carte d'occupation du sol en 2001

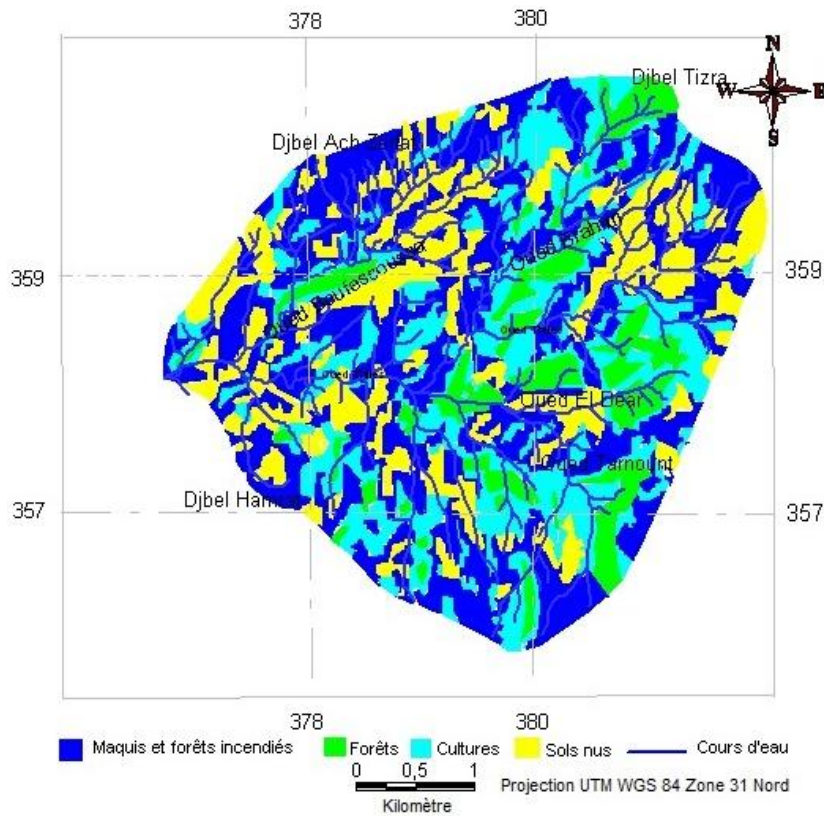


Figure 55. Carte d'occupation du sol en 2011

Date	Forêt	Maquis et forêt incendiée	Terre de culture	Terre nue
1987	3.68	4.32	4.48	3.52
2001	4.16	5.16	3.52	4.32
2011	1.76	6.08	4.32	3.84

Les surfaces indiquées dans les figures 46, 47 et 48 et le Tableau 22 montrent que la surface des forêts incendiées et la surface des sols nus ont enregistré une augmentation de 1987 au 2011, en passant respectivement de 3.68 Km<sup>2</sup> à 4.16 Km<sup>2</sup> et de 3.52 Km<sup>2</sup> à 3.82 Km<sup>2</sup>. Par contre, la surface des forêts et des cultures ont enregistré respectivement une réduction de 3.68 Km<sup>2</sup> à 1.76 Km<sup>2</sup> et 4.48 Km<sup>2</sup> à 4.32 Km<sup>2</sup>.

En outre, la répartition spatiale des différentes surfaces d'occupation du sol enregistre de forte variation spatiale en fonction des différentes dates :

- En 1987, la surface des forêts s'est limitée surtout dans la partie centre et la partie sud du micro bassin. Par contre, la surface des sols nus se localise surtout dans la partie nord et les surfaces de maquis se concentrent dans la partie nord de côté de Djbel Tizra et diminue en allant vers le sud du micro bassin.
- En 2001, on a enregistré l'apparition de nouveau site de forêt surtout dans le nord du micro bassin au niveau de la rive droite de O. Brahim et prennent la place de certaines surfaces de maquis.
- En 2011, la surface du maquis enregistre une augmentation de 33%. Cette augmentation est observée sur toute la surface du micro bassin. En revanche, on enregistre une réduction remarquable des surfaces des forêts équivalent à 23% repartaient en petites surface au milieu de micro bassin près de l'oued Boufoussoussa et de l'oued Brahim. Ainsi, on observe le remplacement de certaines surfaces de forêts par des surfaces de maquis. Ce remplacement est plus visible sur les cartes au niveau de la limite sud et Sud- Est du micro bassin à proximité d'Oued Ternoun.

#### 4.1.2. Cartes de fragilité et de sensibilité potentielle

Compte tenu du couvert végétal dominant dans la zone d'étude, de son rôle dans la réduction de l'érosion hydrique et en s'inspirant des différentes classifications (Roose, 1977 ; Bonflis, 1989 ; Le Bissonnais *et al.*, 1998 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002 et Bouchetata, 2006), on a pu classer le type d'occupation du sol selon le couvert végétal de la zone d'étude et selon son importance à réduire l'érosion hydrique. D'où on a pu distinguer entre :

- Le couvert végétal permanent complet constitué uniquement de forêts,

- Le couvert végétal permanent incomplet composé par les maquis, les forêts claires et les forêts pos-incendiées et enfin,
- Le couvert végétal temporaire où les sols sont dénudés (nus) ou couverts par une culture temporaire.

### A. Cartes de fragilité

Les cartes de fragilité des terres à l'érosion sont réalisées sur la base de la matrice effectuée entre les classes d'occupation du sol et les classes de la lithologie après avoir pondérer les différentes classes de lithologies selon leur degré d'érodabilité et les classes de l'occupation du sol selon leurs sensibilité comme il est indiqué dans les tableau suivants .

Classe de lithologie	Sensibilité	Poids
Grés quartzeux	Faible	04
Grés poudingues	Moyenne	03
Argiles et quartzites	Moyenne	03
Argiles et poudingues	Forte	02
Marnes et carténnien	Très fortes sensibilité	01

Cultures et sols nus	Très faible protection	01
Maquis et forêt incendié	Moyenne	02
Forets	Forte	03

A la suite de la pondération de ces deux types de classes on obtenu la matrice indiquée dans le tableau suivant :

La fragilité des terres		Lithologie du Sol (degré d'érodabilité)			
		01	02	03	04
Couvert végétal	01	01	01	02	02
	02	01	02	03	04
	03	03	03	04	04

La superposition des cartes d'occupation du sol avec la carte de lithologie a donné les résultats sous forme de cartes de fragilité (Fig.56, 57 et 58) :

- Carte de fragilité correspondant à la date 1987

- Carte de fragilité correspondant à la date 2001
- Carte de fragilité correspondant à la date 2011

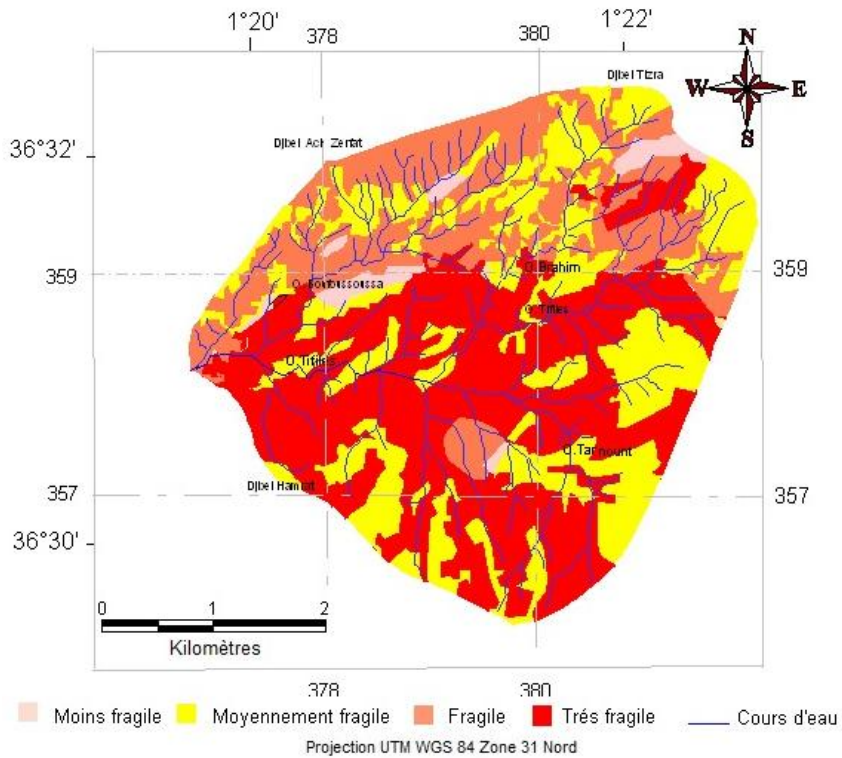


Figure 56. Carte de fragilité du sol en 1987

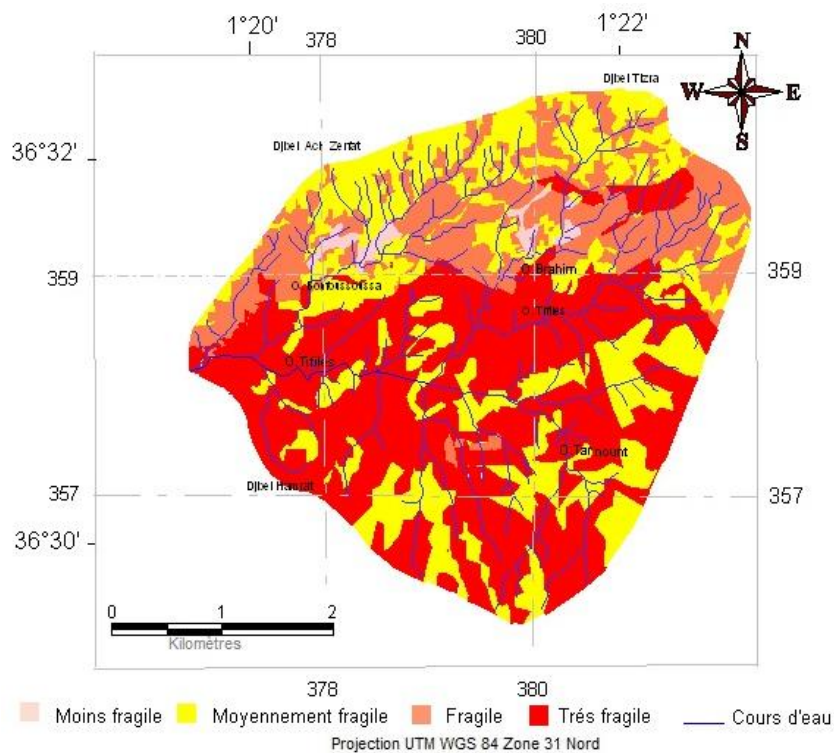


Figure 57. Carte de fragilité du sol en 2001



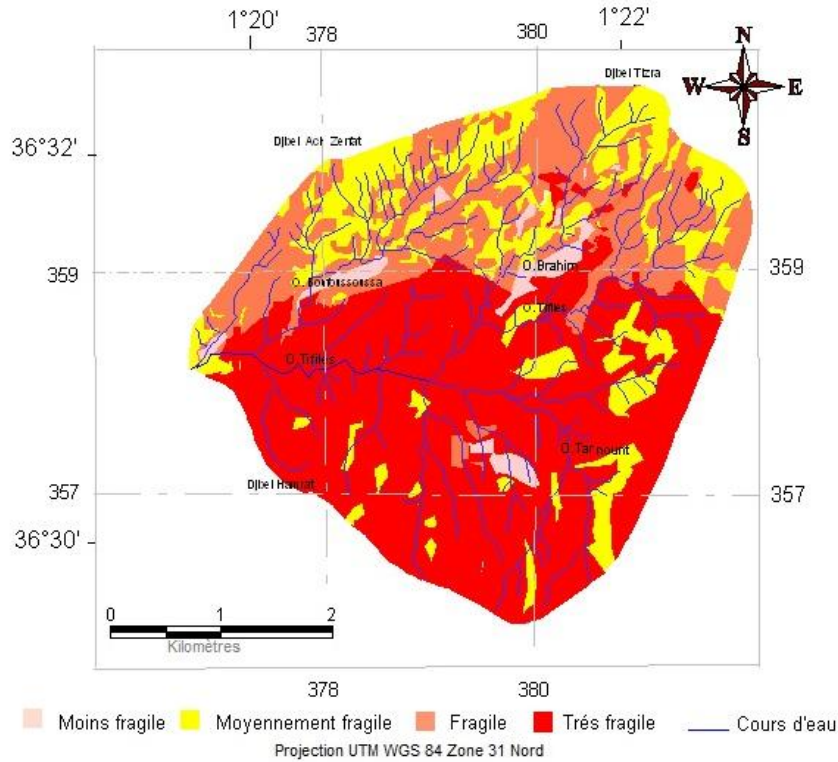


Figure 58. Carte de fragilité du sol en 2011

Les cartes de fragilité (Fig.56, 57, 58) et (Tab. 24) montrent que les différentes classes ont enregistré des changements spatiotemporels.

Classes	1987	2001	2011
Très fragile	44	41	52
Fragile	21	21	24
Fragilité moyenne	32	37	21
Moins fragile	3	1	3

En effet, les surfaces des classes très fragile et fragiles ont enregistré une augmentation entre 1987 et 2011. La première a augmenté de 44% à 52 % et la deuxième a augmenté de 21 % à 24%. Cependant, la surface de la classe de terre moyennement fragile a enregistré une augmentation de 5% entre 1987 à 2001, en passant de 32% à 37% puis une réduction de 16% en passant de 37% à 21% entre 2001 à 2011. Par contre, la surface de la classe moins fragile a

enregistré une réduction de 3% à 1% entre la période de 1987 à 2011 et une augmentation de nouveau de 1% à 3% entre 2001 et 2011.

Concernant la variation dans l'espace, les différentes classes ont enregistré des changements. En 1987, la classe très fragile s'est concentrée dans la partie sud du bassin jusqu'au milieu, la classe fragile se répartie en petite surface sur l'ensemble du bassin, la classe moyennement fragile est localisée au nord de bassin près de Djbel Ach Zarfat jusqu'au Djbel Tizi et la classe moins fragile s'est limitée près des cours d'eau de l'oued Befessoussa et Oued Tifilis. Cependant, en 2001, la classe très fragile a occupé certains endroits de la classe fragile et s'est concentrée surtout à la partie amont de l'oued Brahim et l'oued Tifiles. On enregistre que durant cette période, la transformation de certains endroits de la classe très fragile et la classe fragile en classe moyennement fragile surtout au coté de Djebel Ach Zafat et Djebel Tizi (partie nord du bassin). En 2011, on observe la disparation de certain endroit de la classe moyennement fragile en se transformant en surfaces très fragiles dans la partie sud et en surface fragile dans la partie nord du bassin

### **B. Cartes de sensibilité**

Les cartes de sensibilité potentielle des sols à l'érosion hydrique issues de la superposition entre les cartes de fragilité et la carte des pentes et ce, après avoir fait un classement selon leur importance à l'érosion (Tab. 25).

- Classes des pentes (0 à 2% : 00 ; 2 à 8 % : 01 ; 8 à 15 % : 02 ; 15 à 30% : 03 et > 30% : 04).
- Classe de fragilité (Très fragile : 01, Fragile : 02, Moyennement fragile : 03 et peu fragile : 04)

<b>Tableau 25. Matrice entre les classes de pente et les classes de fragilité du sol</b>					
<b>Sensibilité des sols à l'érosion hydrique</b>		<b>Classes de Fragilité des terres</b>			
		04	03	02	01
<b>Classe des pentes</b>	00	03	03	03	02
	01	03	03	02	02
	02	02	02	02	01
	03	02	01	01	01
	04	01	01	01	01



Le croisement met en évidence trois classes de sensibilité du sol à l'érosion (Classe 1 : sensibilité forte à l'érosion, Classe 2 : sensibilité moyenne à l'érosion et Classe 3 : sensibilité faible à l'érosion), comme il est indiqué dans les cartes de sensibilité (Fig. 59, 60 et 61) :

- Cartes de sensibilité potentielle à l'érosion correspondant à la date 1987
- Cartes de sensibilité potentielle à l'érosion correspondant à la date 2001
- Cartes de sensibilité potentielle à l'érosion correspondant à la date 2011

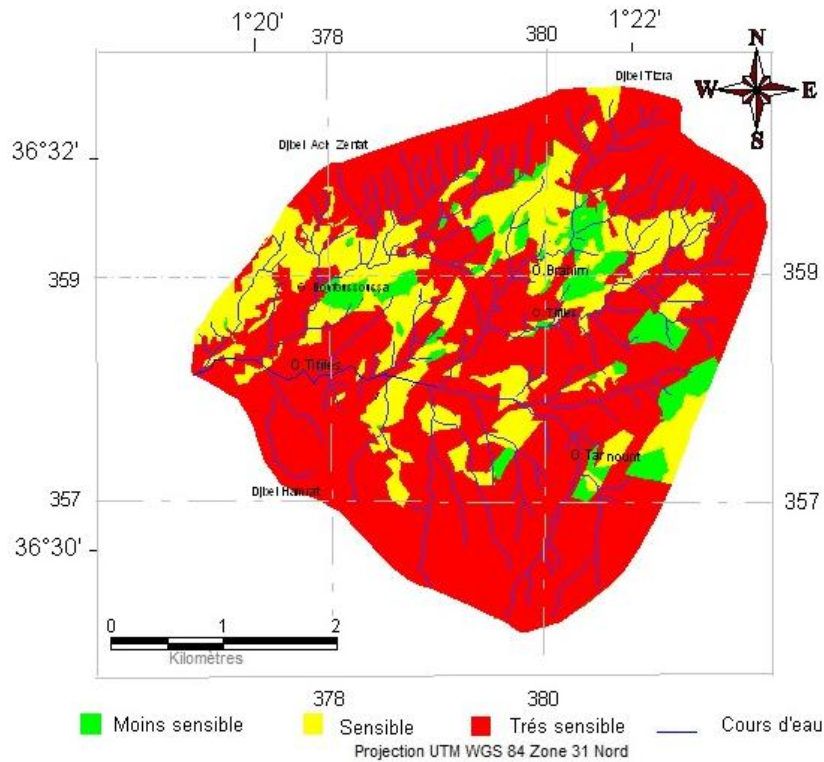


Figure 59. Classes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion en 1987

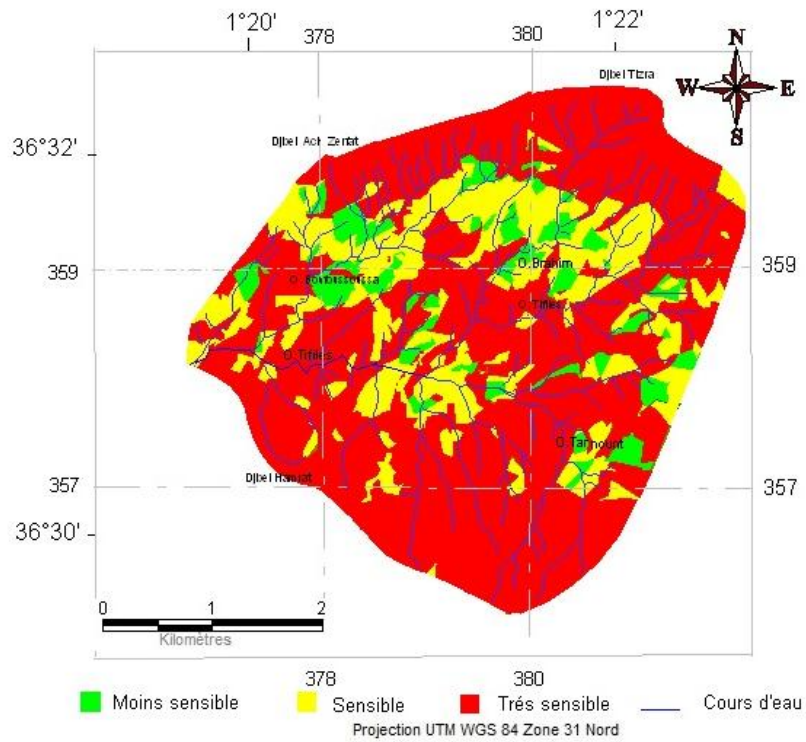


Figure 60. Classes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion en 2001

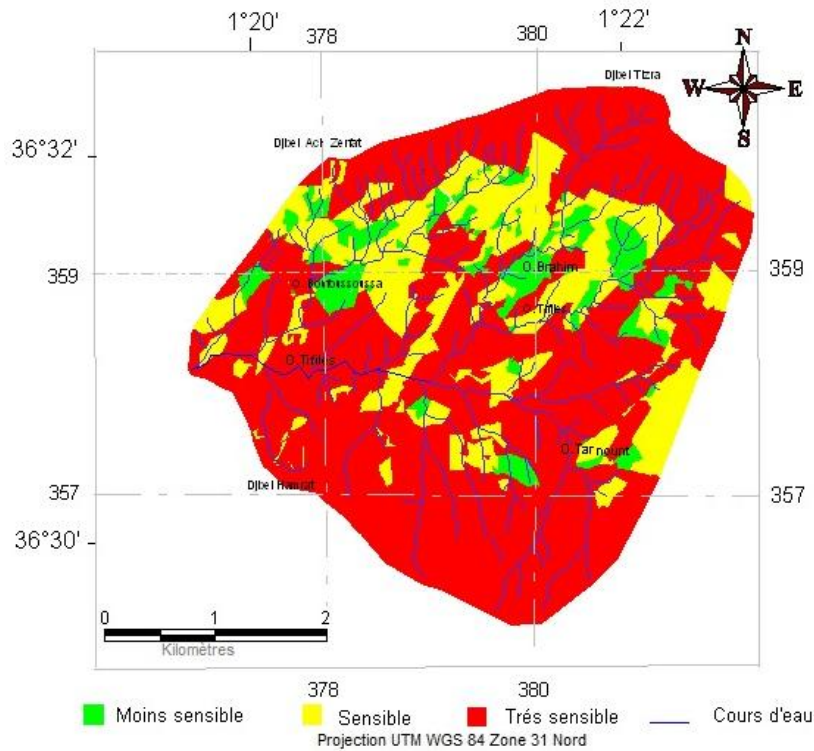


Figure 61. Classes de sensibilité potentielle du sol à l'érosion en 2011

Le tableau 24 montre que la surface de la classe très sensible occupe la plus grande partie du micro bassin, elle est estimée à 71 % en 1987 et 2001 et à 70% en 2011. Par contre, la classe sensible et la classe moins sensible ont enregistré des surfaces largement inférieures à la surface de la classe très sensible. La surface de la classe sensible varie entre 22 % et 23% cependant la surface de la classe moins sensible varie entre 8%et 7%. Ces résultats montrent que la zone est devenue de plus en plus très potentiellement sensible à l'érosion.

L'augmentation de la sensibilité potentielle du sol à l'érosion pourrait être expliquée par la réunion de conditions favorables telles que la présence d'une lithologie dominée par les marnes qui présente une faible résistance à l'érosion hydrique et leur localisation sur des pentes supérieures à 15 %. En plus, la dégradation du couvert végétal a rendu le milieu de plus en plus sensible à l'érosion hydrique.

## **4.2. Evaluation quantitative**

### **4.2.1. Evaluation du bilan d'érosion par la technique du césium-137**

#### **A. Activité du césium-137**

L'évaluation de l'érosion est faite par l'analyse de l'activité du césium-137 par spectrogramme et leur intégration dans les modèles de conversion. Les résultats de l'activité du césium-137 sont indiqués dans les tableaux suivants :

<b>Profondeur du sol</b>	<b>Activité (Bq / kg)</b>
<b>0 - 5 cm</b>	22,04±1,11
<b>5 - 10 cm</b>	8,9±0,31
<b>10 - 15 cm</b>	6,07±0,29
<b>15 - 20 cm</b>	2,66±0,13

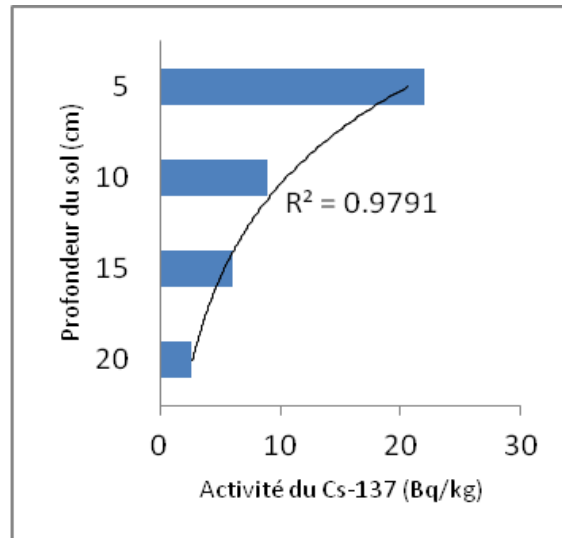
Profile	P1	P2	P3
0 - 5 cm	20,29±1,54	20,53±1,04	16,77±0,85
5 - 10 cm	13,52± .65	9,9±0,50	4,7±0,25
10-15 cm	13,52±0,65	9,15±0,46	2,43±0,15
15-20 cm	2,22±0,11	4,56±0,23	2,31±0,14

Profile	P1	P2	P3
0 - 5 cm	3,14±0,19	7,25±0,37	5,93±0,31
5 - 10 cm	3,57±0,19	5,99±0,31	6,13±0,32
10 - 15 cm	3,31±0,16	5,55±0,29	6,74±0,35
15 - 20 cm	3,03±0,18	5,03±0,37	6,23±0,33

Profile	P1	P2	P3
0 - 5 cm	24.42±2.5	41,59±2,10	31,56±0,56
5 - 10 cm	10.11±2.3	18,03±0,91	11,99±0,61
10 - 15 cm	3.45±0.8	3,82±0,22	4,51±0,21
15 - 20 cm	3.02±0.31	2,4±0,13	2,51±0,14

Les résultats de l'activité du césium-137 montrent que la redistribution de césium-137 varie d'un site à l'autre et d'un profile à l'autre.

- **Sites de référence :** L'activité du césium-137 trouvée dans le site de référence est plus importante à la surface et diminue vers la profondeur du sol (figure 62). Cette observation converge avec les résultats des travaux de (Walling et *al.*, 1995) et (He et Walling, 1997) qui ont montré que dans les sites de référence, le césium-137 se concentre à la surface et diminue sous forme exponentielle en fonction de la profondeur. La forme réduction de l'activité du césium-137 et la valeur du coefficient de détermination  $R^2 = 0.98$  pourraient justifier l'utilisation du se site comme un site de référence pour calculer l'érosion par le césium-137 dans la zone d'études.

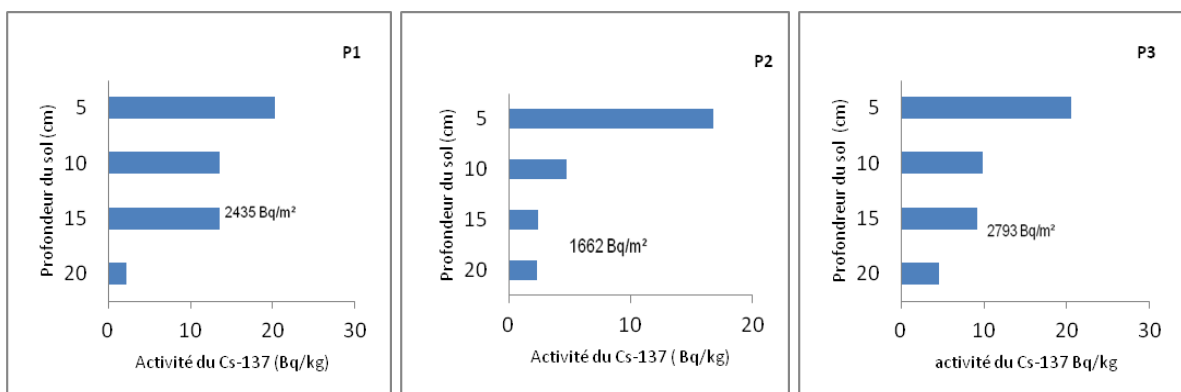


**Figure 62. Variation de l'activité du césium-137 dans le site de référence**

La valeur de l'activité du césium inventoriée dans le site de référence est comme suit :

$A_{réf} = 2574 \text{ Bq m}^{-2}$ . Cette valeur est proche aux valeurs trouvées dans quelques pays de la région de la méditerranée 2430 Bq m<sup>-2</sup> en Portugal (Carvalho, 1990), 2530 Bq m<sup>-2</sup> en France (Mabit *et al.*, 1998), 2456 Bq m<sup>-2</sup> en Italy (Porto *et al.*, 2003) et 2582 Bq m<sup>-2</sup> au Maroc (Damnati *et al.*, 2007).

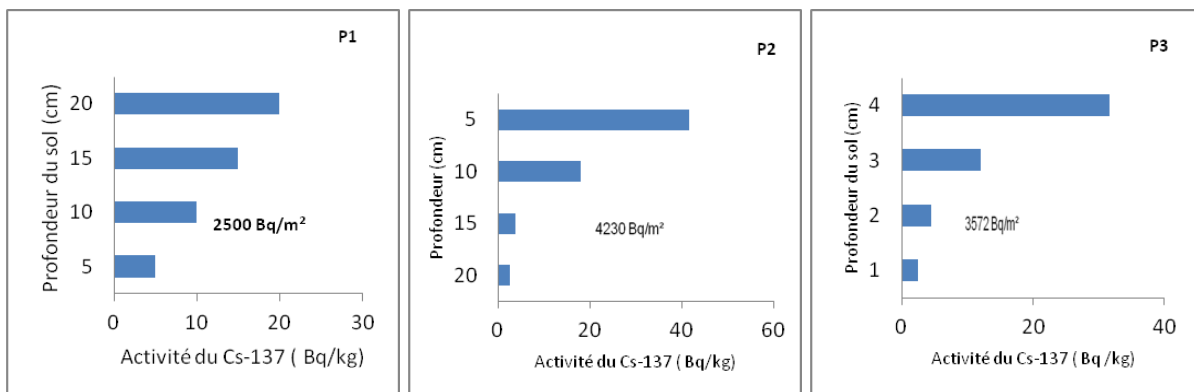
- **Site forestier :** Les valeurs de l'activité de césium-137 trouvées dans le site forestier (Fig.63) sont proches aux valeurs du site de référence et se caractérisent presque par la même forme de réduction en profondeur du sol, elles sont concentrées près de la surface du sol et diminuent vers la profondeur du sol. Cela, pourrait indiquer que le site forestier se considère comme un site non remanié.



**Figure 63. Variation de l'activité du césium-137 dans le site forestier**

Les valeurs de l'activité du césium-137 enregistrées le long du transect varient au niveau de chaque profile. Elles sont inférieures à la valeur de site de référence au niveau des profiles P1, et P2 et supérieures au niveau de P3. Elles sont égales respectivement à  $2435 \text{ Bq m}^{-2}$ ,  $1662 \text{ Bq m}^{-2}$  et  $2793 \text{ Bq m}^{-2}$ . Cette variation peut être expliquée par un léger déplacement du sol au niveau des segments des profiles P1 et P2 et par une accumulation du sol en P3.

- Site de forêt post-incendié :** La redistribution verticale césium-137 (Fig.59) est similaire à celle du site de référence et le site forestier, avec une réduction de la concentration du césium-137 sous une forme exponentielle mais avec une forte concentration aux niveaux des dix premiers centimètres de la surface du sol. Cette observation converge avec les travaux de (Zhang et Walling, 2005) au niveau des sols non remaniés. De même, la redistribution spatiale est caractérisée par des valeurs supérieures à la valeur trouvée dans le site de référence. Elles sont estimées à  $2500 \text{ Bq m}^{-2}$  dans le profile P1,  $4320 \text{ Bq m}^{-2}$  en P2 et  $3572 \text{ Bq m}^{-2}$  en P3. Ces augmentations sont probablement dues aux accumulations du césium-137 venant des parties situées au dessus de ce site comme il a été montré par (Walling, 2004) ou bien aux quantités du sol ajoutées lors des opérations utilisées pour éteindre les feux.



**Figure 64. Variation de l'activité du césium-137 dans le site post-incendié**

La redistribution de Cs-137 dans les trois profiles du site pourrait être expliquée par la stabilité de ce site par le fait de la régénération de diverses espèces forestières après les incendies et qui pourrait augmenter la matière organique et par suite augmenter la stabilité des sols

- Site mixte :** La redistribution de l'activité du Cs-137 est différente à celle trouvée dans les sites précédents. Elle est typique à la distribution de cet élément dans les champs

agricoles. En effet dans les terres agricoles, les travaux du sol pourraient provoquer le mélange du Cs-137 dans les couches du profiles (Walling and He, 1999 ; Ritchie and McCarty, 2003).

Les valeurs de l'activité inventoriée varient de 907 Bq m<sup>-2</sup> dans P1, 1668 Bq m<sup>-2</sup> dans P2 et 1726 Bq m<sup>-2</sup> dans P3. Ces valeurs sont inférieures à la valeur du site de référence par des pourcentages respectivement égales à 65%, 35% et 33% et elles diminuent de la partie supérieure du site vers sa partie inférieure. Cette diminution pourrait être expliquée par le déplacement des particules du sol contenant certaines concentrations du Cs-137. Cela, converge avec les explications de (Rogowski et Tamura,1970) et confirmée par suite par (Walling et Quine, 1992) qui ont indiqué que 99% de perte du césium-137 pourraient être dus à l'érosion.

Contrairement aux sites précédents, la redistribution de l'activité du Cs-137 dans le site mixte (Fig.60) est faible à la surface et enregistre des variations de la surface vers la profondeur ce qui peut être expliquée par le mélange des particules du sol et par le travail du sol.

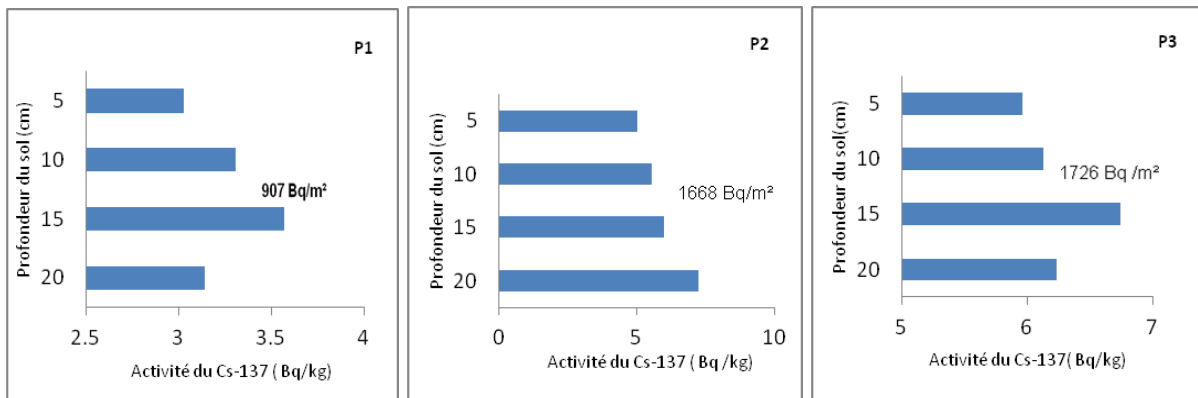


Figure 65. Variation de l'activité du césium-137 dans le site mixte

La comparaison de la redistribution des valeurs de l'activité du Cs-137 montre que l'activité du Cs-137 change d'un site à l'autre. Malgré que les sites ont presque la même pente variant de 10 à 14%, la concentration du Cs-137 est plus élevée dans le site post-incendie et dans le site forestier et moins élevée dans le site mixte. Cela, pourrait être expliqué par l'importance de l'utilisation des terres dans la redistribution de césium. Ces résultats sont en accord avec les résultats de (Navis and Waling, 1992) qui ont indiqué que l'utilisation de terre est un facteur plus significative dans la détermination du césium-137 inventorié que la

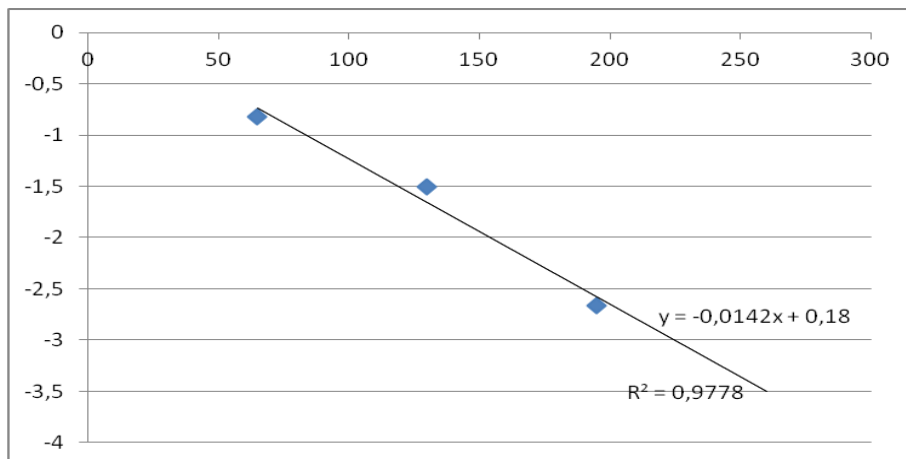
topographie où la concentration du Cs-137 est élevée sur des pentes de 15% avec une végétation naturelle que sur des pentes de 5% cultivées .

**B. Bilan de l'érosion**

**Site forestier et site post-incendié :** Le calcul de perte de sol dans ces deux sites est fait par le modèle spécifique aux sols non remaniés. Le calcul est fait après avoir déterminé le coefficient de la forme de distribution du césium-137  $h_0$  au niveau du site de référence à partir du graphe comme il est montré dans le tableau 31 et la figure 66. Avec  $M_p$  : la masse du sol par rapport à la masse du sol en profondeur (kg /m<sup>2</sup>).

$$\text{Ln} \left( 1 - \sum_{i=1}^n A_x / A_{réf} \right) = f(M_p)$$

Profondeur du sol (cm)	Densité volumique Kg m <sup>-3</sup>	Masse en profondeur Kg	$A_x$ Bq / kg	$A_x$ Bq /m <sup>2</sup>	$(1 - \sum_{i=1}^n A_x / A_{réf})$	$\text{Ln} (1 - \sum_{i=1}^n A_x / A_{réf})$
5	1300	65	22,04	1432,6	0,44	-0,82
10	1300	130	8,9	578,5	0,22	-1,5
15	1300	195	6,07	393,9	0,07	-2,66
20	1300	260	2,66	169	1	



**Figure 66. Graphe utilisé pour la détermination de  $h_0$  dans la zone d'étude**

La valeur de  $h_0$  est égale à 70,42 kg /m<sup>2</sup>. Cette valeur est proche à la valeur trouvée par (Li et al.,2003 ; Porto et al., 2003). Les résultats du bilan de l'érosion calculés par



l'équation 3 sont indiqués dans les tableaux suivants. Les valeurs précédées par le signe (-) expriment des pertes du sol et celles précédées par le signe (+) expriment les dépôts du sol.

Profile	Activité Bq/m <sup>2</sup>	Bilan de l'érosion (t/ha)	Erosion nette	Dépôt moyen
1	2435	0,82	2	1.19
2	1662	6,46		
3	2793	+1,26		

Profile	Activité	Bilan de	Erosion nette	Dépôt
1	2500	-0.386	0.02	7.7
2	4230	8.509		
3	3672	5.128		

- **Site remanié (Site mixte) :** Les résultats du bilan de l'érosion indiqués dans le tableau suivant montrent que le site mixte se caractérise que par des pertes de sol.

Profile	Activité	Bilan de	Erosion nette
1	907	- 55.71	37.69
2	1668	- 23.63	
3	1726	- 33.74	

Les résultats du bilan de l'érosion montrent que les dépôts sont enregistrés dans le site post-incendié et le site forestier avec un dépôt moyen estimé respectivement à 7.7 t/ha/an et à 1.19 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Par contre, les pertes de sol sont enregistrées au niveau du site mixte et le site forestier avec un taux d'érosion nette estimée respectivement à 37.69 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et 2 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. L'augmentation de la quantité de perte du sol dans le site mixte converge avec les résultats de Quine et al (1994) qui ont montré que les pertes du sol accroissent dans les sites remaniés par rapport aux sites non remaniés.

Ces résultats confirment ainsi, l'utilité de la technique dans les études du processus de l'érosion hydrique notamment dans l'identification des zones d'érosion et des zones de dépôts. Selon Campbell et al. (1998), ces deux composantes sont plus difficiles à quantifier

dans un bilan de sédiments, leur détermination serait très utile dans les mesures de conservation des sols.

La variation du bilan d'érosion est probablement liée aux modes d'utilisation des terres et leur répartition dans le micro bassin versant. En effet, dans le site mixte, l'absence de mesures de conservation a rendu ce site plus exposé à l'érosion et au ruissellement. De ce fait, au cours d'une période de 49 ans, il est enregistré une érosion nette de  $37.69 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . En outre, la redistribution de l'érosion est faite selon la réduction du césium de la partie supérieure à la partie inférieure. Cette redistribution est en accord avec les résultats de la redistribution de bilan de l'érosion trouvés dans les sols des sites mixtes des versants (Li et al. 2001).

Contrairement au site mixte, le site post-incendié présente deux zones du dépôt avec une quantité moyenne de  $7.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  et une zone d'érosion d'une érosion nette de  $0.02 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . L'augmentation des dépôts dans ce site pourrait être liée à la diversité des espèces forestières régénérées dans le site et qui peuvent piéger les particules du sol venant des zones supérieures. L'espace régénéré pourrait jouer ainsi le rôle d'une zone riparienne. Selon (Van der Perk et al., 2002), la zone riparienne peut piéger les particules du sol qui pourraient contenir du Cs-137 venant des zones supérieures. Également, ces accumulations pourraient être dues à la quantité de sol ajouté lors des opérations utilisées pour éteindre les feux à cause du manque d'eau.

Cependant, le site forestier présente deux zones d'érosion égale à  $0.82 \text{ t/ha/an}$  dans le segment supérieure et à  $6.46 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  dans le segment du milieu et une zone de dépôt dans le segment inférieure égale à  $1.26 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . La redistribution de perte de sol dans ce site peut être expliquée par la redistribution du Cs-137 selon la pente avec un taux de réduction par rapport au site de référence de 5% dans le segment supérieure et de 35% dans le segment du milieu. Cette redistribution converge avec les résultats de Sutherland, (1994) sur la redistribution aléatoire du césium dans les sites naturels non remaniés (site forestier) par rapport à la redistribution du Cs-137 dans les sites cultivés.

#### 4.2.2. Evaluation par l'approche de maillage

Le suivi du profil en trois dimensions des trois ravines par l'approche de maillage (Kessaissia et Maheddine, 2007) a permis de réaliser les formes des ravines avant et après la

saison pluvieuse 2012/2013 figures ci-après, de déterminer le volume et d'estimer par suite la quantité annuelle du sol détachée au niveau de chaque ravine.

**A. Ravine du site forestier**

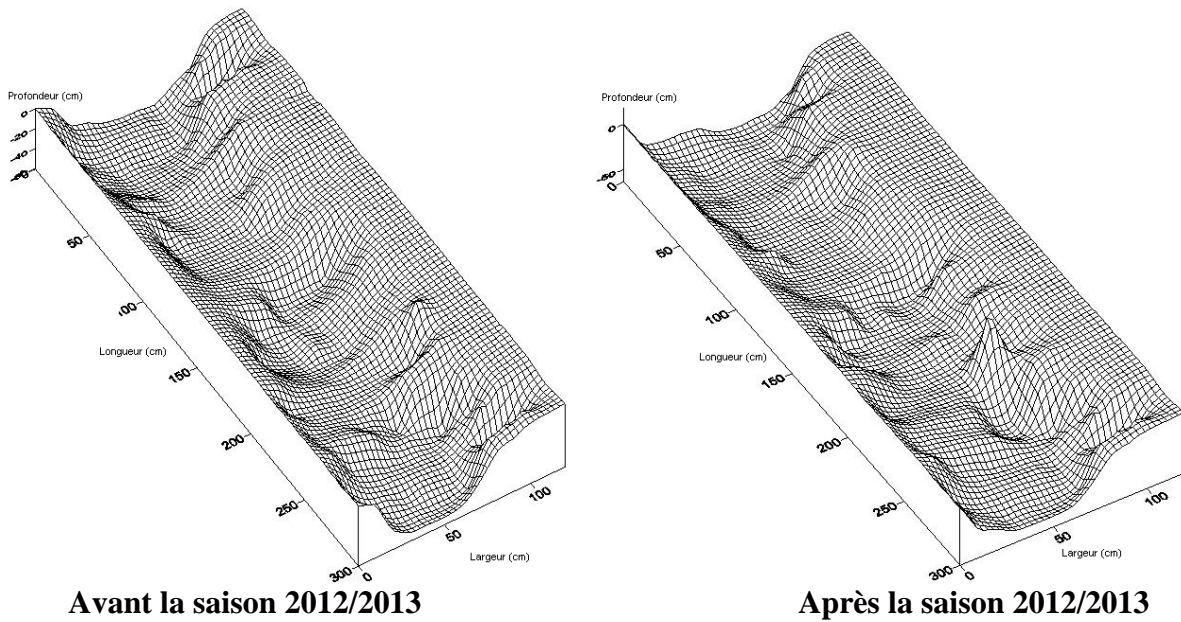


Figure 67. Profile en 3D de la ravine du site forestier

Tableau 35. Volume en m <sup>3</sup> de la ravine du site forestier		
Règle de calcul	Avant la saison 2012-2013	Après la saison 2012-2013
Trapezoidal	0.878908	0.912681
Simpson's Rule	0.879261	0.913054
Simpson's 3/8	0.879361	0.913106

**B. Ravine du site mixte**

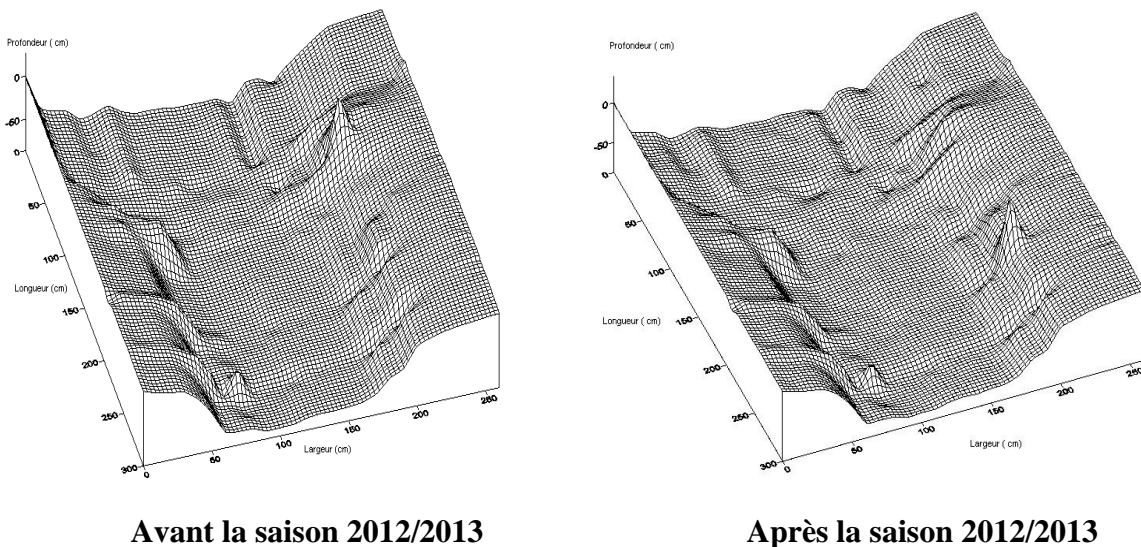


Figure 68. Profile en 3D de la ravine du site mixte

Tableau 36. Volume en m <sup>3</sup> de la ravine du site mixte		
Règle de calcul	Avant la saison 2012-2013	Après la saison 2012-2013
Trapezoidal	3.633012	3.694065
Simpson's Rule	3.633412	3.694411
Simpson's 3/8	3.633330	3.694379

### C. Ravine du site post-incendié

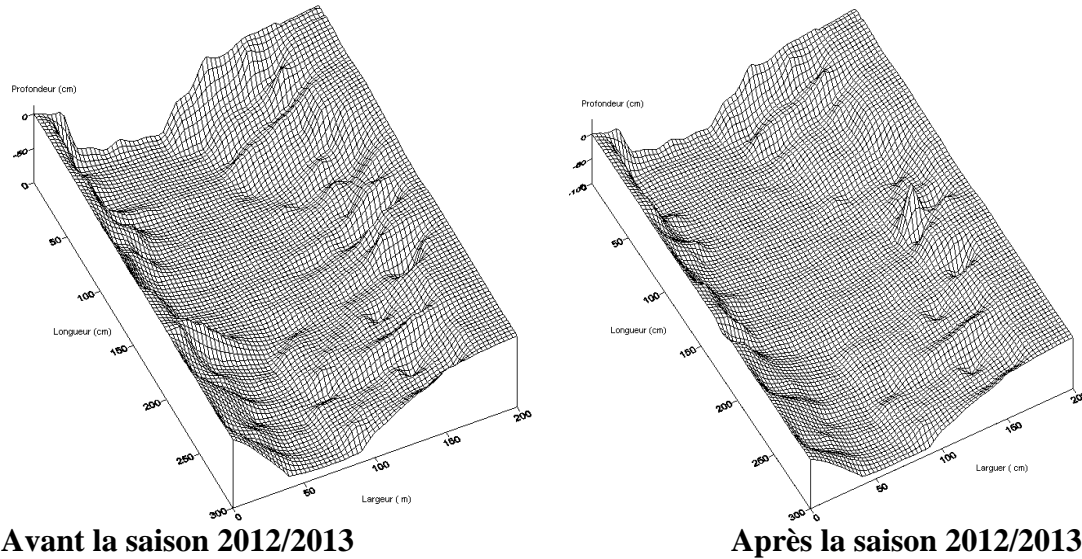


Figure 69. Profile en 3D de la ravine du site post-incendié

Tableau 37. Volume en m <sup>3</sup> de la ravine du site post-incendié		
Règle de calcul	Avant la saison 2012-2013	Après la saison 2012-2013
Trapezoidal	3.253388	3.301392
Simpson's Rule	3.254076	3.302173
Simpson's 3/8	3.254041	3.302084

### D. Quantification de transport solide

Le calcul de matériaux solides a été effectué par la formule suivante :

$$d = \frac{m}{v} \text{ où :}$$

d : Densité du sol ( $kg/m^3$ )

v : Volume moyen du sol ( $m^3$ ).

Le volume moyen du sol (tableau 36) est la moyenne arithmétique des volumes issus selon les trois règles.

<b>Ravine</b>	<b>Volume moyen avant la saison 2012-2013</b>	<b>Volume moyen après la saison 2012-2013</b>	<b>Différence des deux volumes)</b>
<b>Site mixte</b>	3.633251	3.694285	0.061034
<b>Site post-incendié</b>	3.253835	3.301883	0.048047
<b>Site forestier</b>	0.880194	0.912947	0.035870

Le calcul des quantités de sol détachées à l'aide de l'équation a donné les valeurs indiquées dans le tableau suivant :

<b>Ravine</b>	<b>Différence du volume D (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densité du sol d (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masse de sol (kg)</b>
<b>Site mixte</b>	0.061034	1600	97.654
<b>Site post-incendie</b>	0.048047	1300	62.462
<b>Site forestier</b>	0.035870	1300	46.631

La quantité annuelle du sol détachée des trois tronçons sont respectivement égales à 97.650 Kg au niveau du site mixte, 62.462 Kg au niveau du site pos- incendié et 46.631 Kg au niveau du site forestier.

Sur de grandes superficies, ces quantités pourraient atteindre des valeurs très élevées. Par exemple si on suppose un site d'un hectare avec 5 ravines ayant une longueur moyenne de 30 m. La valeur des sédiments déplacés pourrait atteindre 14.648 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans le site mixte, 9.369 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans le site post-incendié et 6.994 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans le site forestier. Ces valeurs montrent l'importance de l'érosion linéaire en présence des facteurs limitant dans la région telle que l'irrégularité de la pluie, la présence de fortes pentes, la fragilité des sols et l'utilisation des terres sans les mesures de conservation. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés dans les région de la Méditerranée (Descroix et *al.*, 2002; Castillo et *al.*, 2003; Bou Kheir et *al.*, 2007 et Capra et *al.*, 2012) .

### **4. 3. Evaluation de l'infiltration et du pouvoir hydrofuge des sols**

#### **4.3.1. Infiltration**

L'infiltration de l'eau dans le sol est un paramètre important qui peut indiquer la qualité du sol et son comportement vis-à-vis à l'érosion hydrique et la dégradation des sols.

Les valeurs de l'infiltration varient de 0.5 à 4 mL par minute comme il est indiqué dans les tableaux suivants (39 - 44) avec 1mL par minute = 1ml (Robichaud *et al.* 2008) :

**Tableau 40. Infiltration en mL mn<sup>-1</sup> enregistrée dans le site forestier au niveau de 1 cm**

Essais	Transect 1				Transect 2				Transect 3			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
0	0.5	1	2	1.75	0.5	0.8	2.5	1.27	3.1	7	3.5	4.54
10	0.1	2	1	1.55	3	2.2	4	3.07	0.9	2	1.2	1.37
30	1.5	1.5	0.5	1.75	1	1.5	2	1.5	4	3	3	3.33
60	0.5	2	1.5	2	1.5	1.5	0.8	1.27	1	1	0.5	0.83
100	3.5	0.5	1.5	2.75	1.5	0.8	1.2	1.17	2	1	1	1.3

**Tableau 41. Infiltration en mL mn<sup>-1</sup> enregistrée dans le site forestier au niveau de 3 cm**

Essais	Transect 1				Transect 2				Transect 3			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
0	2	1	0.1	1.03	4	1.5	1.5	2.33	1	2	1	1.33
10	2	1	0.2	1.07	1	0.7	1	0.9	3	2	3.5	2.83
30	1	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3	2.5	1.5	2.33
60	0.5	1	1.5	1	1	3	1.5	1.83	4	3.5	2	3.17
100	1	2	1	1.3	0.5	1	1.5	1	3	1.5	1	1.83

**Tableau 42. Infiltration en mL mn<sup>-1</sup> enregistrée dans le site mixte au niveau de 1 cm**

Essais	Transect 1				Transect 2				Transect 3			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
0	2	3.5	1.5	2.33	0.2	1	0.5	0.57	1	0.5	0.3	0.6
10	3.8	0.5	1	1.77	0.2	0.5	1	0.57	1	1	0.3	0.77
30	3	2	3	2.67	1	1	1	1	2	1	1	1.33
60	1	1.5	0.3	0.93	1.2	1	0.5	0.9	0.5	1	3.5	1.67
100	1	1	1.5	1.17	0.2	0.3	1	0.5	1.2	1.5	1.5	1.4

**Tableau 43. Infiltration en mL mn<sup>-1</sup> enregistrée dans le site mixte au niveau de 3cm**

Essais	Transect 1				Transect 2				Transect 3			
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
0	2	1	2.5	1.83	0.3	0.4	0.3	0.33	0.5	1	0.5	0.67
10	0.2	0.6	0.7	0.5	1	0.2	0.5	0.57	2	0.5	1.5	1.33
30	1.5	1	1	1.17	3	3	3	3	2	2	1	1.67
60	1	1	0.5	0.83	1	3	3	2.33	1	0.2	0.8	0.67
100	1.5	1	0.5	1	0.1	2.4	1.2	1.23	0.1	0.4	1	0.5

**Tableau 44. Infiltration en mL mn<sup>-1</sup> enregistrée dans le site post-incendié au niveau de 1cm**

	Transect 1				Transect 2				Transect 3			
Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
<b>0</b>	1	2.2	0.8	1.33	0.2	1	0.5	0.57	0.8	1.5	0.5	0.93
<b>10</b>	2.5	4	1	2.5	0.2	0.5	1	0.56	0.2	1.8	0.2	0.73
<b>30</b>	1	0.8	1.3	1.03	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>60</b>	0.3	0.5	0.5	0.43	1.2	1	0.5	0.9	0.5	0.2	0.3	0.33
<b>100</b>	0.2	0.3	0.2	0.23	0.2	0.3	1	0.5	0.5	1.5	1	1

**Tableau 45. Infiltration en mL mn<sup>-1</sup> enregistrée dans le site post-incendié au niveau de 3 cm**

	Transect 1				Transect 2				Transect3			
Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
<b>0</b>	0.5	0.2	1.2	0.63	0.3	0.4	0.3	0.33	1.5	1.5	0.2	1.07
<b>10</b>	1	0.5	1	0.83	1	0.2	0.2	0.47	0.5	0.2	0.1	0.27
<b>30</b>	0.5	0.7	1	0.73	3	3	3	3	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>60</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	1	2	1	1.33	0.5	0.2	0.1	0.27
<b>100</b>	0	0.2	0.7	0.3	0.1	1.6	1.2	0.97	0.5	0.5	1	0.67

L'observation des valeurs moyennes de l'eau infiltrée déterminées au niveau des trois transects (Fig. 70 et Fig.71) montre que les taux d'infiltration sont plus importants dans le site forestier par rapport au site de forêt post- incendié et au site mixte. Cela pourrait dévoiler la couche superficielle du site post-incendié est plus caractérisée par la réduction du taux d'infiltration. Il est à noter que la capacité d'infiltration du sol au niveau des sites incendiés diminuerait si les pores de la surface du sol sont scellés par les cendres ou les sédiments fins qui causent la destruction de la structure du sol (réduction de la stabilité des sols) par l'effet de la projection de pluie qui provoque la dispersion de l'argile et la fermeture des pores (Amezketta et al, 2004). De même, la formation de composés hydrophobes à la surface du sol à la suite des feux pour provoquer la réduction de l'infiltration (DeBano et al., 1998; Martin and Moody 2001; Shakesby and Doerr, 2006).

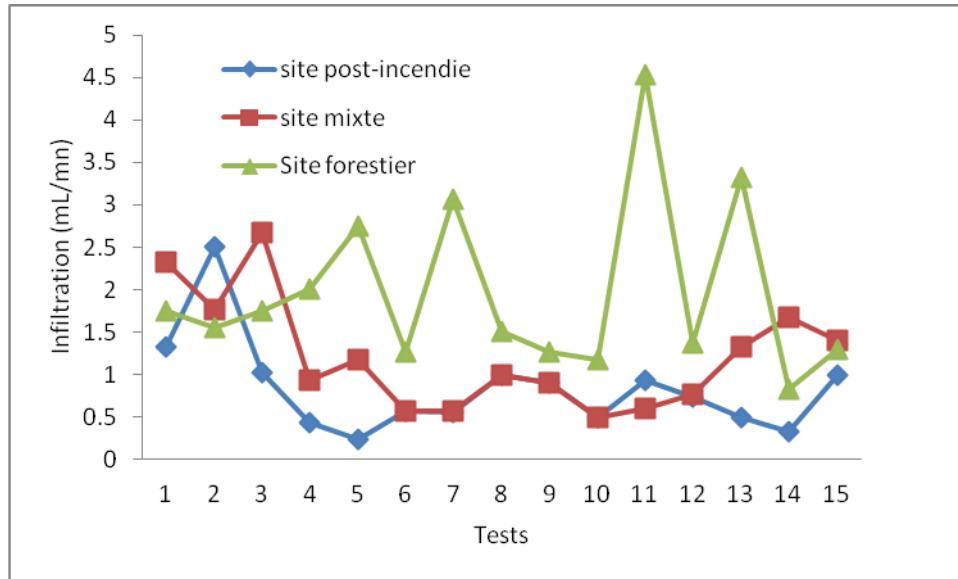


Figure 70. Variation de l'infiltration moyenne au niveau de 1cm de profondeur

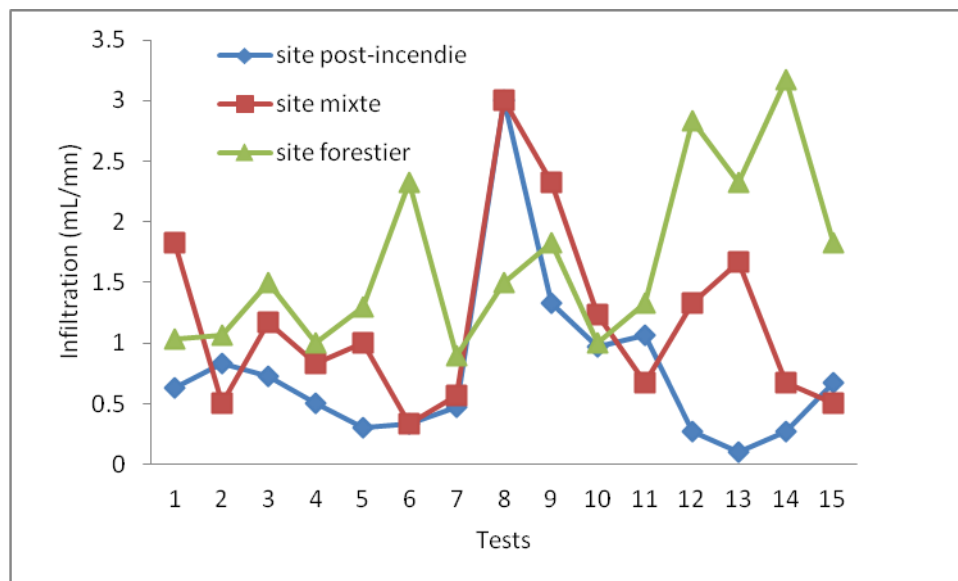


Figure 71. Variation de l'infiltration moyenne au niveau de 3 cm de profondeur

Les valeurs du coefficient de variation (CV) à 1 cm de profondeur varient entre 0.62 à 0.93 dans le site post-incendié, de 0,55 à 0,73 dans le site forestier et de 0,49 à 0,67 dans le site mixte. Cependant, au niveau de 3cm de profondeur, elles varient de 0,55 à 0,98 dans le site post-incendié, de 0,54 à 0,80 dans le site mixte et de 0,40 à 0,51 dans le site forestier comme il est montré dans les tableaux suivants.



Profondeur du sol	1cm			3cm		
Transects	Transect 1	Transect 2	Transect 3	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Nombre de mesure	15	15	15	15	15	15
Infiltration moyenne	1.31	1.65	2.28	1.19	1.51	2.3
Ecart-type	0.84	0.92	1.66	0.61	0.86	0.92
Coef. de variation	0.64	0.55	0.73	0.51	0.57	0.4

Profondeur du sol	1cm			3cm		
Transects	Transect 1	Transect 2	Transect 3	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Nombre de mesure	15	15	15	15	15	15
Infiltration	1.77	0.71	1.15	1.06	1.49	0.96
Ecart type	1.05	0.35	0.77	0.58	1.19	0.62
Coef. de variation	0.59	0.49	0.67	0.54	0.80	0.54

Profondeur du sol	1cm			3cm		
Transects	Transect 1	Transect 2	Transect 3	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Nombre de	15	15	15	15	15	15
Infiltration	1.11	0.77	0.7	0.6	1.22	0.47
Ecart type	1.01	0.48	0.5	0.33	1.03	0.46
Coef. de variation	0.91	0.62	0.71	0.55	0.84	0.98

Les valeurs de CV montrent que le taux d'infiltration sont hétérogènes dans les trois sites en particulier au niveau de 1 cm de profondeur du site post-incendie. L'hétérogénéité de l'infiltration au niveau du site post-incendié peut être liée à l'incendie qui provoque l'apparition des couches imperméables selon une répartition irrégulière.

#### 4.3.2. Le pouvoir hydrofuge

Les résultats du pouvoir hydrofuge selon la classification américaine (Robichud et *al.*, 2008) indiqués dans les tableaux suivants :

Transects	Longueur du transect (m)	Test 1	Test 2	Test 3	Moy	Pouvoir hydrofuge		
						Fort < 3	Faible 3-8	Sans ≥ 8
Transect 1	0	0.5	1	2	1.75	+		
	10	0.1	2	1	1.55	+		
	30	1.5	1.5	0.5	1.75	+		
	60	0.5	2	1.5	2	+		
	100	3.5	0.5	1.5	2.75	+		
Transect 2	0	0.5	0.8	2.5	1.27	+		
	10	3	2.2	4	3.07		+	
	30	1	1.5	2	1.5	+		
	60	1.5	1.5	0.8	1.27	+		
	100	1.5	0.8	1.2	1.17	+		
Transect 3	0	3.1	7	3.5	4.54		+	
	10	0.9	2	1.2	1.37	+		
	30	4	3	3	3.33		+	
	60	1	1	0.5	0.83	+		
	100	2	1	1	1.3	+		
Nombre des échantillons caractérisés par le pouvoir hydrofuge						12	03	00
Pourcentage						80	20	00

Transects	Longueur du transect (m)	Test 1	Test 2	Test 3	Moy	Pouvoir hydrofuge		
						Fort < 3	Faible 3-8	Sans ≥ 8
Transect 1	0	2	1	0.1	1.03	+		
	10	2	1	0.2	1.07	+		
	30	1	2	1.5	1.5	+		
	60	0.5	1	1.5	1	+		
	100	1	2	1	1.3	+		
Transect 2	0	4	1.5	1.5	2.33	+		
	10	1	0.7	1	0.9	+		
	30	1.5	1.5	1.5	1.5	+		
	60	1	3	1.5	1.83	+		
	100	0.5	1	1.5	1	+		
Transect 3	0	1	2	1	1.33	+		
	10	3	2	3.5	2.83	+		
	30	3	2.5	1.5	2.33	+		
	60	4	3.5	2	3.17		+	
	100	3	1.5	1	1.83	+		
Nombre des échantillons caractérisés par le pouvoir hydrofuge						14	01	00
Pourcentage						93 %	7%	00

Transects	Longueur du transect (m)	Test 1	Test 2	Test 3	Moy	Pouvoir hydrofuge		
						Fort < 3	Faible 3-8	Sans ≥ 8
Transect 1	0	2	3.5	1.5	2.33	+		
	10	3.8	0.5	1	1.77	+		
	30	3	2	3	2.67	+		
	60	1	1.5	0.3	0.93	+		
	100	1	1	1.5	1.17	+		
Transect 2	0	0.2	1	0.5	1.27	+		
	10	0.2	0.5	1	3.07		+	
	30	1	1	1	1.5	+		
	60	1.2	1	0.5	1.27	+		
	100	0.2	0.3	1	1.17	+		
Transect 3	0	1	0.5	0.3	0.6	+		
	10	1	1	0.3	0.77	+		
	30	2	1	1	1.33	+		
	60	0.5	1	3.5	1.67	+		
	100	1.2	1.5	1.5	1.4	+		
Nombre des échantillons caractérisés par le pouvoir hydrofuge						14	01	00
Pourcentage						93 %	7%	00

Transects	Longueur du transect (m)	Test 1	Test 2	Test 3	Moy	Pouvoir hydrofuge		
						Fort < 3	Faible 3-8	Sans ≥ 8
Transect 1	0	2	1	2.5	1.83	+		
	10	0.2	0.6	0.7	0.5	+		
	30	1.5	1	1	1.17	+		
	60	1	1	0.5	0.83	+		
	100	1.5	1	0.5	1	+		
Transect 2	0	0.3	0.4	0.3	0.33	+		
	10	1	0.2	0.5	0.57	+		
	30	3	3	3	3	+		
	60	1	3	3	2.33	+		
	100	0.1	2.4	1.2	1.23	+		
Transect 3	0	0.5	1	0.5	0.67	+		
	10	2	0.5	1.5	1.33	+		
	30	2	2	1	1.67	+		
	60	1	0.2	0.8	0.67	+		
	100	0.1	0.4	1	0.5	+		
Nombre des échantillons caractérisés par le pouvoir hydrofuge						15	00	00
Pourcentage						100%	0%	0%

Tableau 53. Pouvoir hydrofuge au niveau de 1 cm, site post-incendié (MDI test en ml)								
Transects	Longueur du transect (m)	Test 1	Test 2	Test 3	Moy	Pouvoir hydrofuge		
						Fort < 3	Faible 3-8	Sans ≥ 8
Transect 1	0	1	2.2	0.8	1.33	+		
	10	2.5	4	1	2.5	+		
	30	1	0.8	1.3	1.03	+		
	60	0.3	0.5	0.5	0.43	+		
	100	0.2	0.3	0.2	0.23	+		
Transect 2	0	0.2	1	0.5	0.57	+		
	10	0.2	0.5	1	0.56	+		
	30	1	1	1	1	+		
	60	1.2	1	0.5	0.9	+		
	100	0.2	0.3	1	0.5	+		
Transect 3	0	0.8	1.5	0.5	0.93	+		
	10	0.2	1.8	0.2	0.73	+		
	30	0.5	0.5	0.5	0.5	+		
	60	0.5	0.2	0.3	0.33	+		
	100	0.5	1.5	1	1	+		
Nombre des échantillons caractérisés par le pouvoir hydrofuge						15	00	00
Pourcentage						100%	0%	0%

Tableau 54. Pouvoir hydrofuge au niveau de 3cm, le site post-incendié (MDI test en ml)								
Transects	Longueur du transect (m)	Test 1	Test 2	Test 3	Moy	Pouvoir hydrofuge		
						Fort < 3	Faible 3-8	Sans ≥ 8
Transect 1	0	0.5	0.2	1.2	0.63	+		
	10	1	0.5	1	0.83	+		
	30	0.5	0.7	1	0.73	+		
	60	0.5	0.5	0.5	0.5	+		
	100	0	0.2	0.7	0.3	+		
Transect 2	0	0.3	0.4	0.3	0.33	+		
	10	1	0.2	0.2	0.47	+		
	30	3	3	3	3	+		
	60	1	2	1	1.33	+		
	100	0.1	1.6	1.2	0.97	+		
Transect 3	0	1.5	1.5	0.2	1.07	+		
	10	0.5	0.2	0.1	0.27	+		
	30	0.1	0.1	0.1	0.1	+		
	60	0.5	0.2	0.1	0.27	+		
	100	0.5	0.5	1	0.67	+		
Nombre des échantillons caractérisés par le pouvoir hydrofuge						15	00	00
Pourcentage						100%	0%	0%

Les résultats du pouvoir hydrofuge indiqués dans les tableaux précédents montrent que les trois sites se caractérisent par un fort pouvoir hydrofuge. Il varie de 20% à 80% dans le site forestier, de 7% à 93% dans le site mixte et à 100% dans le site post-incendié. Cela, montre que le site post-incendie présente un fort pouvoir hydrofuge suivi du site mixte et du site forestier. Cette caractérisation pourrait être due à l'apparition des couches hydrophobes à la suite de la combustion de la matière organique. De même, la répétition des incendies pourrait augmenter la formation des couches hydrophobes qui peuvent durer une longue période ce qui laisse ces sites de plus en plus hydrophobes et deviennent des zones propices à la formation du ruissellement surtout lors des pluies torrentielles. Par conséquent, les zones situées à l'aval du micro bassin de Tifiles enregistrent des inondations remarquables lors des pluies importante notamment juste après les incendiés. Par contre, la réduction du pouvoir hydrofuge dans le site forestier pourrait être expliqué par le rôle que pourrait jouer les différents parties des arbres allant des parties aériennes (les branches, les feuilles) dans la dissipation de l'énergie des gouttes de pluie et empêchant leur chute directe sur le sol et par le système racinaire et qui favorise l'infiltration de l'eau. En effet, cette observation converge avec les travaux de Boelhouwers, et *al.*, (1996) qui ont indiqué que les zones incendies sont les zones les plus hydrophobes et les plus exposées à la formation du ruissellement.

### **Conclusion**

L'évaluation quantitative selon trois approches donne des indicateurs importants sur la dégradation des sols : Le bilan de l'érosion par la technique de césium-137, l'érosion linéaire par l'approche de maillage et le taux d'infiltration et le pouvoir hydrofuge par MDIT.

Le bilan d'érosion déterminé par la technique du césium-137 montre que le site mixte présente que de perte du sol et le site post-incendie présente que les zones du dépôt. Cependant la masse du sol détaché au niveau des ravines calculé par l'approche de maillage montre que l'érosion linéaire est plus importante dans le site mixte. De même, le taux d'infiltration de l'eau dans le sol et le pouvoir hydrofuge déterminés par l'approche MDIT montre que le site mixte est le site le moins perméable à l'eau et le site post-incendie est le site le plus hydrophobe.

Ces résultats montrent que le site mixte est le site le plus affecté par l'érosion hydrique et le site post-incendie est le site le plus caractérisé par les dépôts du sol. En effet, le premier site se caractérise par un taux d'érosion plus élevé, une forte quantité de sol détachée

par l'érosion linéaire et un faible taux d'infiltration. Cependant le secondsite se caractérise par une forte accumulation du sol et une forte hydrophobicité.

Donc, chaque méthode a permis de donner des informations complémentaire à l'autre ce qui augmente la fiabilité des résultats et qui permettent par suite de proposer des méthodes de lutte selon le type d'érosion et les zones de risque à l'érosion.

### **Conclusion générale**

L'évaluation de la dégradation du sol par l'érosion hydrique en combinant deux approches (approche qualitative et l'approche quantitative) a permis de faire une évaluation complémentaire ou chaque approche donne des informations spécifiques de la dégradation des sols par l'érosion hydrique.

Ainsi, les résultats de l'évaluation qualitative montrent que le micro bassin enregistre des variations importantes dans le temps est dans l'espace au niveau du couvert végétal, de la fragilité des sols et de la sensibilité potentielle des sols à l'érosion hydrique.

En tenant compte de caractéristiques topographiques et lithologiques, le sol de la zone d'étude qui est initialement fragile, avec la répétition des incendies des forêts et l'utilisation des espaces post-incendiés pour les différents usages ont conduis à la réduction du couvert végétal et ont engendré par contre, à l'augmentation des surfaces des classes fragiles surtout la classe très fragile en passant d'une surface de 42% enregistrée en 1987 à 52 % en 2011.

La zone d'étude présente une surface de la classe de forte sensibilité potentielle à l'érosion variant de 71% en 1987 à 70% 2011. Celle-ci pourrait être dû à la nature du relief qui représente plus de 42 % de terres située sur la classe de pente de 15 – 30 %.

La dégradation du couvert végétal et la variation de la fragilité à rendu le milieu de plus en plus fragile et sensible à l'érosion hydrique.

De même, les résultats de l'évaluation quantitative par les trois méthodes à savoir : La technique du césium-137, l'approche du maillage et la méthode MDIT montrent aussi l'ampleur de la dégradation où chaque technique donne des résultats intéressants pour l'évaluation de la dégradation du sol et qui permettent de donner des informations complémentaires à l'évaluation qualitative nécessaires pour les opérations de lutte antiérosives.

La technique du césium-137 a permis de dégager les points suivants :

- La redistribution verticale du césium-137 dans le site de référence est similaire à celle trouvée dans le site forestier et le site post- incendié. Ces deux sites sont considérés donc comme des sites non remaniés.

- La quantité de perte du sol enregistrée dans le site mixte est plus élevée que les deux autres sites non remaniés. Cela, pourrait exprimer la fragilité et la sensibilité des sites mixtes à l'érosion hydrique
- Le site forestier se caractérise par des zones d'érosion et des zones du dépôt du sol. Cela peut montrer que les sites forestiers présentent des zones d'érosion et des zones d'accumulation ce qui nécessite un suivi permanent pour aménager les zones affectées par le reboisement.
- Le site post- incendié enregistre une forte accumulation. Ceci pourrait être expliqué d'une part par la régénération naturelle de certaines espèces forestières et d'autre part par l'ajout des quantités du sol lors des opérations utilisées pour éteindre les feux. Il est à noter que les zones post-incendiées lorsqu'elles se situent dans les parties basses des versants peuvent jouer un rôle important dans le piégeage des sédiments venant des parties supérieures mais ces endroits pourraient être un danger et sources de coulées boueuses si elles seraient soumises de nouveau à des incendies et les événements de pluie torrentielle viennent juste après les incendies.

L'approche du maillage a permis de donner des résultats sur l'érosion linéaire. Ainsi, par la simplicité de son installation sur le terrain et la facilité dans le traitement des données, cette approche pourrait très bien être utilisée pour la quantification de ce type d'érosion par le biais du suivi des différentes figures de l'érosion comme les ravines dans notre étude, ce qui permettrait de suivre et de contrôler leur évolution et de sélectionner les techniques qui permettent de les maîtriser.

La méthode du mini disque d'infiltration test (MDIT) a donné des résultats qui ont montré que la réduction de l'infiltration est plus importante dans le site post-incendié. Cela, pourrait être justifié par le plus fort pouvoir hydrofuge enregistré dans cette zone et pourrait indiquer également que ce type de sites est le plus propice à l'apparition des couches hydrophobes et à la formation du ruissellement.

Enfin, cette étude a permis d'évaluer qualitativement la variation de la sensibilité et de la fragilité du sol dans le temps et dans l'espace et la détermination d'une manière quantitative par trois approches de la dégradation du sol par l'érosion hydrique ce qui pourrait avoir plus d'informations utiles pour la proposition des mesures adaptées dans des zones bien ciblées.



## **Références Bibliographiques**



## Références Bibliographiques

- Achite M., Touaibia B. & Ouillon S. (2006). Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives , 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO 2006).
- Amezketta E. Aragüés R. & Gazol R. (2004). Infiltration of water in disturbed soil columns as affected by clay dispersion and aggregate slaking, *Span J Agric Res* 2 (3), p. 459-471.
- Arrabi M. (1991). Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard Tèranien , Médéa Algérie , thèse du doctorat ,240p.
- Auzet A.V. (1987). L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Centre d'études et recherches éco-géographiques, ministère de l'Environnement /ministère de l'Agriculture, 60 p.
- Arnalds O. (2008). Types and Assessment of Land Degradation. PowerPoint Presentation, April 2008. Land Restoration Program (LRT), May 2008. Iceland.
- Arnold J.G. , Srinivasan R. , Muttiah R.S. & Williams J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34 (1), pp. 73-89.
- Bagnouls F. & Gaussen H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique. *Bull.Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 88, p.193-239.
- Beaudoin Y., Cavayas F. et Marois C. (1995). Vers une nouvelle méthode d'inventaire et de mise à jour de l'occupation/utilisation du sol en milieu urbain. *Journal Canadien de Télédétection, Canadian aeronautics and space Institute (Ottawa)*, vol. 21, n° 1, p. 28-42
- Bernard C., Mabit L., Laverdière MR, Wicherek S. Césium 137 et érosion des sols (1998). *Cahiers Agricultures* ; 7: P.179-86.
- Blanchart E. et Martial B. (2005). Détermination des stocks de carbone des sols des petites antilles (Martinique, Guadelupe), programme Gessol, INRA France
- Boiffin J. (1984). La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, Thèse pour le titre de Docteur ingénieur, Sciences Agronomiques, INA-PG, Paris Grignon, p. 320.
- Bonfils P. (1989). Une évaluation du risque d'érosion dans les pays du sud de la communauté européenne *SCIENCE DU SOL* 27 (1), p. 33-36

- Bouchettata A. & Bouchettata T. (2006). Proposition d'aménagement du sous bassins versant de l'oued Fergoug ( Algérie) fragilité par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique . *Revue sécheresse*, 17 ( 03), p. 415-424
- Bou Kheir R., Wilson J., Deng Y., (2007). Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surf. Process. Landforms* 32, p.1770-1782.
- Boelhouwers J.C., De Graaf P.J. & Samsodien M.A., (1996). The influence of wildfire on soil properties and hydrological response at Devil's Peak, Cape Town, South Africa: *Zeitschrift fur Geomorphologie, Suppl.-Bd.* 107, p.1-10.
- Capra A., Ferro, V., Porto P. & Scicolone B. (2012). Quantifying interrill and ephemeral gully erosion in a small Sicilian basin. *Z. Geomorphol., Suppl. Issues* 56, P.9–25.
- Carvalho F. (1990) - Contribution à l'étude du cycle du polonium 210 et du Plomb 210 dans l'environnement. Thèse de l'université Sophia-Antipolis, Nice, 120 p.
- Castillo V.M., Gómez-Plaza A., Martínez-Mena M. (2003). The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. *J. Hydrol.* 284, p.114–130.
- Campbell B.L., Loughran R.J. & Elliott G.L. (1988). A method for determining sediment budgets using caesium-137. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 174. P.171–179.
- CORINE (1994). Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community. EUR 13233, Luxembourg Mirco Grimm, Robert Jones & Luca Montanarella , 2000-soil erosion risk in Europe, European Soil Bureau Institute for Environment & Sustainability JRC Ispra, p.12-14 .
- Damnati B., Ibrahim S. et Radakovitch O. (2007). Utilisation du césium-137 pour l'estimation de taux de l'érosion dans un bassin versant au nord du Maroc. *Science et changement planétaires / sécheresse*. Volume 15, Numéro 2, p. 195-199, Avril –Mai-Juin, note méthodologique.
- De Bano L.F. Neary D.G. Elliott P.F. (1998) . *Fire's Effects on Ecosystems*. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0-471-16356-5, New York. 333 p.
- 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.
- Doerr S.H., Shakesby R.A., and Walsh, R.P.D. 1998, spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone Eucalyptus and pine forests, Portugal: *Soil Science*, v. 163, no.4, p. 313-324.

- Dubief J. (1959). *Le climat du Sahara*. Inst. Rech. Sahara. Mém. Inst. Rech. Sahar. Alger, 2 tomes, 314p.
- Descroix, L., Nouvelot, J.F.& Vauclin, M., (2002). Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-West Mexico). *J. Hydrol.* 263, p.114–130.
- Eckelmann W., Baritz R. Bialousz S., Bielek P., Carré F., Houšková B., Jones R.J.A., Kibblewhite M., Kozak J., Le Bas C., Tóth G., Tóth T., Várallyay G., Yli Halla, M.& Zupan M. (2006). Common criteria and approaches to identify risk areas for the threats Soil Organic Matter (SOM) Decline, Soil Erosion, Soil Compaction, Salinization and Landslides. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN, p.94. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- EEA (2000). *Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe*, environmental Issues Series, Number 16, 32 p. European Environment Agency.
- FAO (1994). *Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people*. World Soil Resources Reports. 78. Rome. 100 p.
- FAO (2000). *Participatory diagnostics of constraint and opportunities for soil and plant nutrient management*, Rome.
- FAO (2002). *Data sets, indicators and methods to assess land degradation in drylands*. LADA Email Conference, October 9 to 4 November.
- FAO (2005). *Agro-Ecological Zoning and GIS application in Asia with special emphasis on land degradation assessment in drylands (LADA)*. Proceedings of a Regional Workshop, Bangkok, Thailand 10–14 November 2003.
- Fangmeier D.D. Elliot, W.J. Workman S.R. Huffman R.L. & Schwab, G.O. (2005). *Soil and Water Conservation Engineering*, New York, USA: Thomson Delmar Learning.
- 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, IN 47907-1194.
- Fournier F. (1969). *L'érosion hydrique et le climat*, bulletin technique d'information. *Météorologie et agriculture* n° 237, p. 111 – 115.
- Giordano Andrea, 1994. *L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne*. *Forêt méditerranéenne*, t. xv, n° 1.
- Gril J.J. et Duvoux B. (1991). *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion : conditions d'adaptation des méthodes américaines*. CEMAGREF, 157 p.

- Grimm M. Jones, R. & Montanarella L. (2000). soil erosion risk in Europe, European Soil Bureau Institute for Environment & Sustainability JRC Ispra, p. 26-31
- He Q. & WALLING D. (1997) - The distribution of fallout cesium-137 and Plomb-210 in undisturbed and cultivated soils. *Application of Radiation. Isotopes* 48: P.677– 690.
- Hjulstrom F. (1935) in Auzet A.V (1987). L'érosion des sols par l'eau dans la région de grandes cultures. *Aspects agronomiques*. Ed. CEDEX.: P.23-31.
- Horn R., Domzal, H., Slowinska-Jurkiewicz, A. & van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35, P.23-36 ISO (1996).
- Hudson D. (1971) . *Sol Conservation*. BT bats ford limited , 213p
- Julien P. Y. & Simons, D. B. (1985). Sediment transport capacity of overland flow, *Transactions of ASAE*, 28 (3): P.755–762.
- Kessaissia A. (1993). Quantification de perte du sol par le modèle mathématique, mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme d'ingénieur, INESA de Chlef, 1993, 73p.
- Kessaissia A. & Mohieddine M. (2007). Application d'une approche de maillage pour le suivi et la quantification de l'érosion linéaire. *Annales de la recherche forestière de l'INRF* n° 13, p.79 - 89.
- Kessaissia A. (2010) . Utilisation de quelques élément radioactifs principalement le césium-137 dans le suivi de la dynamique de dégradation du sol. Cas de Sidi Ahmed Cherif Tlemcen, mémoire de magister, université de Abou bekr blkaid , Tlemcen, 108p .
- Kessaissia A., Moresli B, Mazour M. Hammoudi A. Belamri, M. & Azbouche A. (2013). Comparaison de perte du sol estimée par la technique de l'isotope césium-137 et la méthode des parcelles. Cas de micro bassin de Sidi Ahmed Cherif Tlemcen Algérie. *Numero spetial N°8, la forêt Algérienne*, p . 13- 20
- Kieffer A. 1 Bois P. (1997). Variabilité des caractéristiques statistiques des pluies extrêmes dans les Alpes françaises, *revue des sciences et de l'eau Rev . Sci. Eau* 2 (1997): P.199-216
- King P.M. 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assesment of some factors that affect its measurement, *Aust. J. Soil Res.*, 19, 275– 285, doi:10.1071/SR9810275
- Kouri L. (1993). L'érosion hydrique des sols dans le bassin-versant de l'Oued Mina (Algérie). Etude des processus et types de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires. Université de Louis Pasteur, Strasbourg I, France.

- Larid M., 1994. Rôle du Machinisme Agricole dans l'Erosion des Sols : Cas du Plateau de Mostaganem (Algérie). Thèse de Doctorat en Géographie Physique, Université Louis - Pasteur de Strasbourg I – France. 109 p.
- Loughran R.J., Pennock D.J. & Walling D.E. (2002). Spatial Distribution of Caesium-137. In: Zapata, F. (Ed). Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. P. 97-109.
- Layth Ismail (1984) – مديرة التربة، مديرية دار الكتب للطباعة و النشر ، جامعة الموصل ص ص 308.
- Le Bissonais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J.& King D., (1998) . Aspects cartographiques de l'érosion des sols en France – Compte-rendu Acad. Agri. Fr., 84, n°7, p .117-130.
- Le Bissonais Y., Thorette J., Bardet C.& Daroussin J. ( 2002 ) . L'érosion hydrique des sols en France. INRA Orléans – IFEN, 108 p
- Li, Y., Landstom M., Frielinghaus M. & Bork H. (2001). Quantifying spatial pattern of soil redistribution & soil quality on two contrasting hill slopes. In Stott D., Mohtar, R and Steinhardt G. ed 2001, p.556- 563.
- Li Y., Poesen J., Yang J.C., Fu B. & Zhang J.H. (2003). Evaluating gully erosion using the cesium-137 and plomb-210 ratio in a reservoir catchment. Soil and tillage research 69, p. 107–115
- Li, Z.G., Fu, S.H. & Liu, B.Y. (2012). Sampling program of water erosion inventory in the first national water resource survey. Sci. Soil Water Conserv. 2012, 10, P.77–81.
- Liu B.Y., Guo S.Y., Li Z.G., Xie Y., Zhang K.L.& Liu X.C. 2013, Sampling survey of water erosion in China. Soil Water Conserv. China 2013, 01, p. 26–34.
- Lozet J., Mathieu C. & jamagne m. (1986). dictionnaire de science du sol avec index anglais-français. technique et documentation (tec & doc) - lavoisier, paris (france). 269p
- mabit I. & Bernard C. (1998) - Spatialisation et cartographie des risques érosifs à l'échelle d'un bassin versant agricole par un radio-isotope. Étude et gestion des sols, 5,3 :P.171-180.
- Martin, D.A. & Moody J.A. (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. Hydrol. Proc., 15: P. 2893-2903.
- Mazour M. (1991). Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser Tlemcen Algérie, Communication 8<sup>ème</sup> Réunion Réseau Erosion Grenoble 12 et 13 Sept.

- Mazour M. (2004). Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser, Tlemcen, Algérie. Université de Tlemcen, Thèse de doctorat d'Etat en foresterie. 184 p.
- McGarry D. (2006). A methodology of a visual soil - field assessment tool. FAO.
- Morgan R. P. , Quinton J. N. , Smith R.E. , Govers G. , Poesen J. W. , Auerswald K. , Chisci G. , Torri D. AND Styczen M. E. 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. (2015). Soil Erosion and Conservation; John Wiley & Sons: New Jersey, NJ, USA,.
- Morsli B., Mazour, M., Mededjel, N., Hamoudi A. & Roose ,E. (2004) . Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord –ouest de l'Algerie ; science et changement planétaire /secheresse, volume15 , numero 1 : 96-104 , janvier – fevrier 2004 , note de recherche.
- Nusser S. & Goebel J. (1997).The national resources inventory: A long-term multi-resource monitoring programme. Environ. Ecol. Stat. 4, p. 181–204.
- Navis A.& Walling D.E. (1992) . Using caesium-137 to assess sediment movement on slopes in a semiarid upland environment in Spain. Chengdu Symposium: Erosion, Debris Flows, and Environment in Mountain Regions. IAHS, p. 129–138
- OECD (1994) . Environmental indicators. OECD Core Set, Paris.
- Oldeman L, Hakkeling R & Sombroek W. (1991). World map on the status of human induced soil degradation, with explanatory note (second revised edition). ISRIC Wageningen, UNEP, Nairobi.
- Pimentel D. (1993). World Soil Erosion and Conservation; Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Porto P., Walling D. & Ferro V. (2001). Validating the use of cesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria southern Italy. Journal of hydrology 248, p. 93 – 108.
- Porto P., Walling D., Ferro V. & Di Stefano C. (2003). Validating erosion rate estimates provided by cesium-137 measurements for two small forested catchments in Calabria, Southern Italy. Land Degrad. Develop. 14, p.389–408.
- Posen J. (1985). An improved splash transport model. Zeitschrift fur geomorphologic, 29, 2: P.373-382.

- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D. K. & Yoder D. C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Handbook 703, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Reynolds JF, Stafford Smith DM, and Lambin E. (2003). ARINnet: seeking novel approaches to desertification and land degradation. *Global Change Newsletter* 54: P. 5-9.
- Ritchie J.C. & Mc Carty G.W. (2003). Using cesium-137 to understand soil carbon redistribution on agricultural watersheds. *Soil and tillage research* 69:45-51.
- RIVM (1992). The environment in Europe: A global perspective. Report 481505001, RIVM, Bilthoven, the Netherlands
- Robichaud P.R. Beyers J.L.& Neary D.G.( 2000). Evaluating the effectiveness of post fire rehabilitation treatments. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-63. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture,Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 85 p.
- Robichaud P. R., Lewis S.A. & Ashmun L.E. (2008). New procedure for sampling infiltration to assess post-fire soil water repellency. Res. Note. RMRS-RN-33. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 14 p.
- Rogowski A.S. & Tamura, T. (1970). Erosional behaviour of Caesium-137. *Health Physics* 18:467-477.
- Soil Survey Staff, 1975. Soil Taxonomy, U. S .D.A. Agric. Handbook No 436.
- Roose E. (1977) Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en parcelles expérimentales. Édit. ORSTOM, Paris, collection Travaux et Documents, n° 78, 108 p.
- Roose E. (1981). Dynamique Actuelle de Sols Ferrallitiques et Ferrugineux Tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et Documents ORSTOM 130, ORSTOM, Paris.
- Rosen S. (2009). Soil physical properties and erosion risk at smallholder farms in Embu, Kenya, Undergraduate Thesis, p. 4-7.
- Quine T., Walling, D. & Machin J. (1994). Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Lasbardenas in the stral Ebro river basin Spain . Land degradation and rehabilitation. P. 41-55.
- Seltzer P. (1946). Le climat de l'Algérie. Institut de météorologie et de physique du globe. Univ. Alger. 219 p.

- Shakesby R.A. & Doerr S.H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Sci. Rev.*, 74:P. 269-307.
- Sutherland R.A., (1994). Spatial variability of <sup>137</sup>Cs and the influence of sampling on estimates of sediment redistribution. *Catena* 21, 57–71.
- Shepherd T.G. (2000). Visual soil assessment. Volume 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. [horizons.mw/Landcare](http://horizons.mw/Landcare) Research, Palmerston North. 84 p.
- SWCS (1993). User's guide. Revised Universal Soil Loss Equation, version 1.03. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA.
- UNEP 1986. Farming systems principles for improved forest production and the control of soil degradation in the arid, semi-arid and humid tropics. Expert meeting, sponsored by UNEP, 20–30 June 1983. ICRISAT
- Tillman W. Scotter D.R., Wallis M.G. & Clothier B.E. (1989). Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Aust. J. Soil Res.* 27: 637-644.
- Touabia B., Dautrebande S., Gomer D. & Aidouni A. (1999). Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina *Hydrological Sciences- Journal-des Sciences Hydrologiques*, 44(6).
- UNCCD. (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. United Nations, New York, USA. Available at: <http://www.unccd.int/convention/text/convention.php>
- UNEP (1992). World atlas of desertification. Arnold, London.
- Van Lynden G. & Oldeman L. (1997). The Assessment of the Status of Human-induced Soil Degradation in South and South East Asia. UNEP, FAO and ISRIC, Wageningen.
- Van der Perk vik M. & Fulajta E. (2002). Assessment of Spatial Variation of Cesium-137 in Small Catchments, *J. Environ. Qual.* 31: p1930–1939.
- Walling D. & Quine T. (1992)0. The use of cesium-137 measurement in soil erosion surveys. *International Association of Hydrological Sciences Publication No. 210*:p.143-152.
- Walling D., He Q. & Quine T. (1995). Use of cesium-137 and lead-210 as tracers in soil erosion investigations. *IAHS publication 229* (p. 163–172). Wallingford: IAHS Press.
- Walling D. & He Q. (1997). Use of fallout <sup>137</sup>Cs in investigations of over bank deposition on river floodplains. *Catena*, vol. 29, P. 263-282.
- Walling D. & He Q. (1999). Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, vol. 28, P. 611-622.



- Walling D. (2004). Using environmental radionuclides to trace sediment mobilization and delivery in river basins as an aid to catchment management. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation October, P.18-21, 2004, Yichang, China
- Ward R.C. & Robinson M. (1990). Principals of hydrology. McGraw-Hill book company, London, 365 p.
- Williams J. & Berndt H. (1977). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the ASAE 20: P. 1100-1104
- Wischmeier W.H. et Smith D.D. (1958). Run fall energy and its relationship to soil loss, trans., Amer., Geophys. Union : P. 285-291.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Handbook, 537, 58 p.
- Woodruff C.M. (1948). Erosion in relation to rainfall, crop cover and slope on a greenhouse plot. Soil Sci. Proc. 12: 475p.
- Zapata F. & García-Agudo E. (2000). Future prospects for the <sup>137</sup>Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates. Acta Geologica Hispanica, 35: P.197–205.
- Zhang X., Higgitt D. et Walling D. (1990). A preliminary assessment of the potential for using cesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. Hydrological Science Journal, vol. 35, p. 267–276.
- Zhang X.B. & Walling D.E. (2005). Landscape and Watershed Processes Characterizing Land Surface Erosion from Cesium-137 Profiles in Lake and Reservoir Sediments J. Environ. Qual. Rd., Madison, WI 53711 USA 34: P. 514–523

#### Sites Web

<http://www.fao.org/NEWS/2002/020205-e.htm>

<http://magazine.geotunis.org/wp-content/uploads/2011/>

[http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNADB238.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADB238.pdf)

internet website: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/misc38e.pdf>,

<http://www.fao.org/ag/agl/agll/lada/emailconf>

<http://ftp.fao.org/agl/agll/docs/landglos.pdf>

<http://www.fao.org/DOCREP/005/Y4609E/y4609e07.htm#TopOfPage>, accessed August 31, 2008

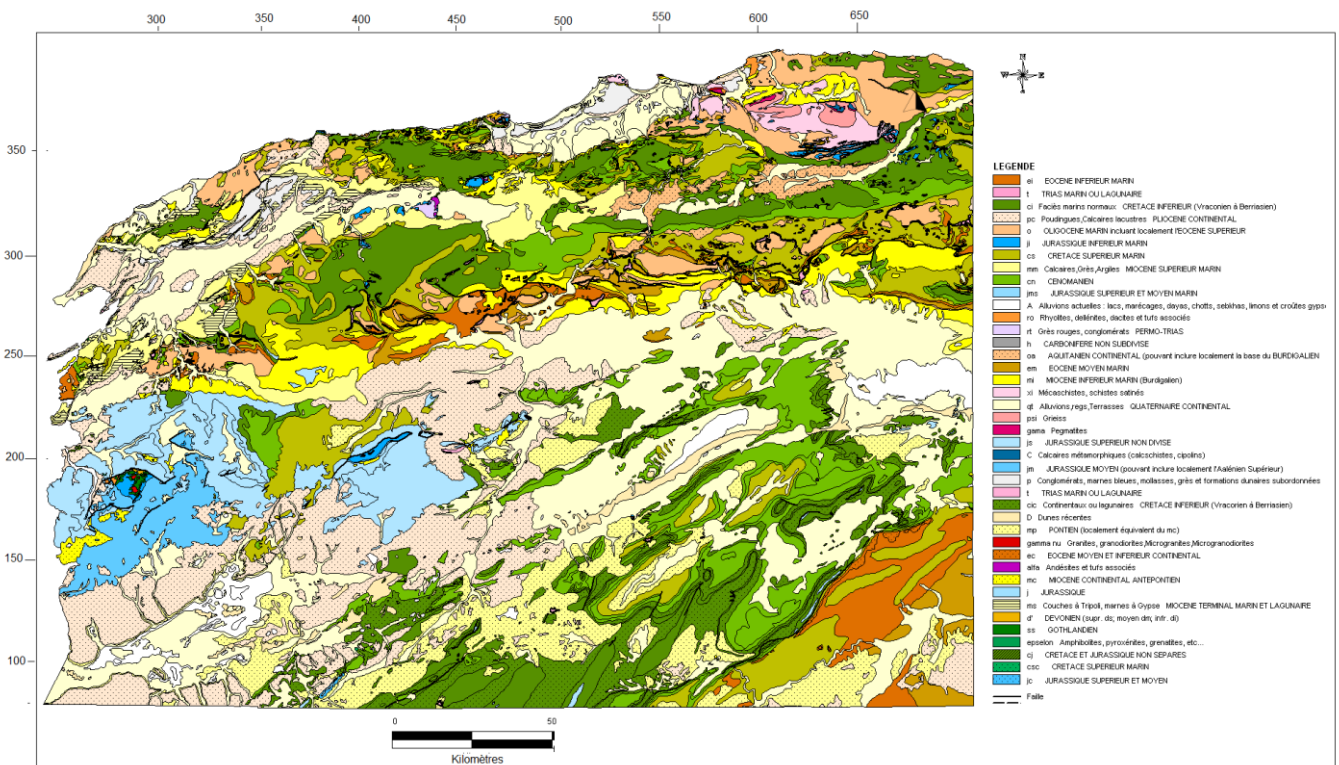


**Annexe**

## Annexe 01. Cartes topographique et géologique de la zone d'étude



Carte topographique de la zone d'étude  
(Extrait de la carte d'Algérie\_1/50000\_Type 1922)



Carte géologique (Extrait de la carte géologique d'Algérie)