

SOMMAIRE

PROBLEMATIQUE.....	01
INTRODUCTION GENERALE	03
CHAPITRE I. EROSION HYDRIQUE	06
CHAPITRE II. PRESENTATION DU CADRE GENERAL.....	26
CHAPITRE III. MATERIELS ET METHODES.....	62
CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION.....	74
CHAPITRE V. SYNTHESE.....	143
CONCLUSION GENERALE.....	152
BIBLIOGRAPHIE.....	155
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES	
SIGLES ET ABREVIATIONS	

TABLE DES MATIERES

PROBLEMATIQUE	01
INTRODUCTION GENERALE	03
CHAPITRE I : EROSION HYDRIQUE	06
I.1. DIVERSITE DES PROCESSUS ET DES FACTEURS	06
1.1 Processus d'érosion	06
1.2. Forme d'érosion	09
1.2.1. Erosion hydrique	09
1.2.1.1. Erosion de rejaillissement (effet splash)	09
1.2.1.2. Erosion en nappe	10
1.2.1.3. Erosion linéaire	10
1.2.1.4. Erosion en masse	12
1.2.2. Erosion mécanique sèche ou aratoire	14
1.3. Facteurs naturels agissant sur l'érosion et le ruissellement	15
1.3.1. Climat	15
1.3.2. Sol	16
1.3.3. Topographique	17
1.3.4. Couvert végétal	18
1.3.5. Facteur humain	18
I.2. EVOLUTION DES METHODES DE RECHERCHES SUR L'EROSION HYDRIQUE	19
I.2.1. Approche par les parcelles expérimentales / approche quantitative	19
I.2.2. Spatialisation des risques érosifs / télédétection et SIG	20
I.2.3. Utilisation des marqueurs radio-actifs	21
I.2.4. La modélisation	22
CHAPITRE II : PRESENTATION DU CADRE GENERAL	26
II.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	27
II.2. CLIMAT	28
2.1. Précipitations	29
2.1.1. Précipitations interannuelles	29
2.1.2. Précipitations mensuelles	30
2.1.3. Fréquence et intensités des précipitations torrentielles	31

2.2. Température	32
2.3. Données climatiques synthétiques.....	33
2.3.1. Diagramme ombrothermique.....	33
2.3.2. Quotient pluviothermique de Bagnouls et Gausсен.....	33
II.3. LITHOLOGIE	35
3.1. Lithostratigraphie.....	35
3.2. Description des formations.....	35
II.4. SOL	37
II.5. TOPOGRAPHIE	43
II.6. COUVERT VEGETAL	46
II.7. FACTEUR HUMAIN	47
II.8. SPECIFICITES DE L'AGRICULTURE DES MONTS DE BENI CHOUGRANE	48
II.9. DYNAMIQUE D'OCCUPATION DES SOLS ET DES SYSTEMES DE PRODUCTION.....	50
II.10. GRAVITE DE L'EROSION ET ENJEUX	51
II.11. BILAN DES TRAVAUX DE CONSERVATION DANS LES MONTS DE BENI CHOUGRANE	54
11.1. Stratégie DRS / Le bilan de la DRS	54
11.2. Aménagement intégré	56
11.3. Stratégies actuelles	57
11.4. Stratégies traditionnelles	59
II.12. CONCLUSION	60
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES	62
III.1. Quantification de l'érosion en nappe et en rigole et l'analyse des systèmes de gestion sous pluies naturelles sur des parcelles de 100 m ²	64
1.1. Dispositif expérimental.....	64
1.2. Descripteurs de fonctionnement	67
III.2. Analyse de l'effet du sol, de la jachère (couverture du sol) et du travail du sol (rugosité)/ Sous pluies simulées.....	68
2.1. Etude du comportement du sol (effet sol)	69
2.2. Effet du travail du sol / effet de la rugosité du sol.....	70
2.3. Effet des jachères / effet de couverture du sol.....	70
2.4. Description du simulateur de pluie	71
CHAPITRE IV : RESULTATS DISCUSSION.....	74
IV.1. RESULTATS	74
1.1. Ruissellement et érosion sur parcelles expérimentales de 100 m ² sous pluies naturelles	74
1.1.1. Précipitations.....	74
1.1.2. Effet du sol	77
1.1.2.1. Ruissellement	77
1.1.2.2. Erosion en nappe et en rigole	79
1.1.3. Influence des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion.....	81

1.1.3.1. Effet de la culture traditionnelle la plus pratiquée / Céréaliculture...	81
1.1.3.2. Effet de la Jachère	83
1.1.3.3. Effet du billonnage / Cultures en billons	84
1.1.3.4. Effet des cultures de légumineuses / Culture du pois chiche.....	85
1.1.4. Effet des systèmes de gestion et de l'érosion sur la dynamique du carbone : dynamique de la fertilité du sol.....	86
1.1.4.1. Stock, perte et évolution du carbone organique	86
1.4.1.1. Effet des systèmes de gestion sur les stocks du carbone	87
1.4.1.2. Effet de l'érosion sur les pertes en carbone sous différents systèmes.....	89
1.2. Ruissellement et érosion sur parcelles de 1 m ² sous pluies simulées	91
1.2.1. Comportement du sol / effet sol).....	91
1.2.1.1. Paramètres mesurés.....	92
2.1.1.1. Pluie d'imbibition	92
2.1.1.2. Ruissellement	95
2.1.1.3. Infiltration finale	97
2.1.1.4. Transports solides / Détachabilité.....	98
1.2.2. Effet du travail du sol / Effet de rugosité	99
1.2.3. Effet des jachères / effet de couverture du sol.....	101
1.3. Erodibilité des sols.....	104
IV.2. DISCUSSION	105
2.1. Ruissellement et érosion sur parcelles de 100 m ²	105
2.1.1. Précipitations et indice d'agressivité.....	105
2.1.2. Effet sol	106
2.1.2.1. Ruissellement et érosion	106
2.1.2.2. Recherche des paramètres explicatifs de la variation du ruissellement et de l'érosion	107
2.1.3. Impact des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion.....	113
2.1.4. Impact des systèmes de gestion et de l'érosion sur la dynamique du carbone	116
2.2. Ruissellement et érosion sur parcelles de 1 m ² sous pluies simulées	121
2.2.1. Analyse du comportement du sol / effet sol.....	121
2.2.2. Effet du travail du sol / Effet de la rugosité.....	133
2.2.3. Effet des jachères / Effet de couverture du sol	136
2.3. Erodibilité des sols.....	139
CHAPITRE V : SYNTHÈSE.....	143
CONCLUSION GENERALE.....	152
BIBLIOGRAPHIE	155
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES	
SIGLES ET ABBREVIATIONS	

Liste des figures

Figure 1 : diversité des processus d'érosion diversité des logiques et des acteurs	7
Figure 2 : déterminisme des processus érosifs	8
Figure 3 : phénomène de rejaillissement « splash » et de déplacement des particules	9
Figure 4 : évolution de l'érosion hydrique	11
Figure 5 : évolution des ravines en V sur matériau homogène (marne) par surcreusement	12
Figure 6 : schéma de quelques exemples de mouvements en masse	13
Figure 7 : érosion mécanique sèche	14
Figure 8 : carte de situation du bassin versant de l'oued Fergoug et des parcelles expérimentales	28
Figure 9 : irrégularité des précipitations (station de Mascara, d'Ain fares et de Fergoug)	29
Figure 10 : irrégularité des précipitations mensuelles - Station d'Ain-Fares	30
Figure 11 : courbes IDF pour la station d'Ain Fares	31
Figure 12 : Digramme ombrothermique de la station d'Ain Fares (période 1985-2005)	33
Figure 13 : modification sur le climagramme d'Emberger. Position de Mascara et de quelques localités d'Oranie	34
Figure 14 : carte lithologique du bassin versant de Fergoug	37
Figure 15 : carte pédologique d'un micro bassin versant situé dans le bassin versant de Fergoug	38
Figure 16 : localisation de la zone cartographiée (localisation de la zone où l'étude pédologique a été réalisée)	39
Figure 17 : variation pédologique le long d'un versant due aux processus érosifs - toposéquence sur grés ou sur calcaire	40
Figure 18 : variation pédologique le long d'un versant due aux processus érosifs - toposéquence type sur marne	41
Figure 19 : schéma de dégradation des ressources pédologiques dans les monts de Beni chougrane	42
Figure 20 : carte hypsométrique des monts de Beni Chougrane et du bassin versant de Fergoug	43
Figure 21 : carte des pentes du bassin versant de Fergoug	44
Figure 22 : carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Fergoug	45
Figure 23 : carte d'occupation des sols du bassin versant de Fergoug	49
Figure 24 : facteurs d'accélération des phénomènes de dégradation et d'érosion du sol	51
Figure 25 : carte de sensibilité des sols à l'érosion dans le bassin versant de Fergoug	52
Figure 26 : répartition spatiale des techniques traditionnelles en Algérie	59
Figure 27 : dispositif expérimental, constitué d'une parcelle limitée artificiellement et équipé d'un système de stockage	64
Figure 28 : Simulateur de pluie et ses accessoires (modèle ORSTOM)	71
Figure 29 : Diagramme théorique d'une pluie simulée	72
Figure 30 : organigramme de la méthode suivie	74
Figure 31 : classes des hauteurs de pluies	76
Figure 32 : coefficient de ruissellement moyen annuel et maximal enregistré sur les parcelles de 100 m ² pendant la période 1993 – 2013 (sol SBL)	78
Figure 33 : coefficient de ruissellement moyen annuel et maximal enregistré sur les parcelles de 100 m ² pendant la période 1993 – 2011 (sol SAV)	78
Figure 34 : taux d'érosion en nappe et en rigole enregistré sur les parcelles de 100 m ² durant la période 1993 – 2013 (sol SAV)	79
Figure 35 : taux d'érosion en nappe et en rigole enregistré sur les parcelles de 100 m ² durant la période 1993 – 2011 (sol SBL)	80

Figure 36 : évolution du stock de carbone en fonction des systèmes de gestion sur le sol SBL	88
Figure 37 : évolution du stock de carbone en fonction des systèmes de gestion sur le sol SAV	88
Figure 38 : variations saisonnières de la masse de terres érodées et de la teneur en carbone des sédiments sur le sol SBL	90
Figure 39 : pluie d'imbibition (P_i) nécessaire pour le déclenchement du ruissellement pour différentes situations sur sol SAV	92
Figure 40 : pluie d'imbibition (P_i) nécessaire pour le déclenchement du ruissellement pour différentes situations sur sol SBL	93
Figure 41 : influence d'intensité de pluie sur le déclenchement du ruissellement (Sol SAV)	94
Figure 42 : influence de l'intensité de pluie sur le déclenchement du ruissellement (sol SBL)	94
Figure 43 : influence de la pente sur le déclenchement du ruissellement (sol SAV)	95
Figure 44 : influence de la pente sur le déclenchement du ruissellement (sol SBL)	95
Figure 45 : durée de la phase de transition (T_m). Vitesse d'évolution des états de surface entre le déclenchement du ruissellement et sa stabilité proprement (phase de R_x).	96
Figure 46 : caractéristiques de l'état de surface (rugosité : dimension des mottes) des différents types de travail de sol	99
Figure 47 : effet de l'évolution des jachères sur le déclenchement du ruissellement - pluie d'imbibition (sol SAV; pente 20%; I 30mm/h)	103
Figure 48 : effet de l'évolution des jachères sur le déclenchement du ruissellement - pluie d'imbibition (sol SBL; pente 20%; I 30mm/h)	103
Figure 49 : nomographe permettant une évaluation rapide du facteur K d'érodibilité du sol	104
Figure 50a : relation entre l'érosion et la pluie annuelle – Sol SBL	108
Figure 50b : relation entre l'érosion et la pluie annuelle – Sol SAV	108
Figure 51 : irrégularité de l'érosion au cours de l'année	110
Figure 52 : relation entre l'érosion et la masse du carbone des terres érodées	117
Figure 53 : relation entre l'érosion et la teneur du carbone des terres érodées	118
Figure 54 : relation entre états de surface (surfaces fermées (S_f)) et pluie d'imbibition (seuil de pluie nécessaire pour déclencher le ruissellement) – Sol SAV	122
Figure 55 : relation entre états de surface (surfaces fermées (S_f)) et pluie d'imbibition (seuil de pluie nécessaire pour déclencher le ruissellement) – Sol SBL	123
Figure 56 : Rôle des pluies < IM30 dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion	126
Figure 57 : suivi des déplacements du sol (dynamique structurale) en fonction de l'humidité du sol SAV	129
Figure 58 : variabilité de l'érosion (détachabilité et exportation des particules de sol) en fonction des états de surfaces du sol - Erosion (kg/ha) obtenues après 15 mm de pluie	131
Figure 59 : Classement des sols étudiés -Triangle textural du GEPPA renseigné en classe de stabilité	140

Liste des tableaux

Tableau 1 : pluies torrentielles – Station Mascara et Fergoug (pluies observées de 1913 à 1938)	31
Tableau 2: caractéristiques climatiques du bassin versant de Fergoug	32
Tableau 3 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Fergoug	32
Tableau 4 : morcellement des terres dans le Bassin versant de Fergoug	33
Tableau 5: envasement rapide des retenues – exemple de quelques retenues collinaires envasées ou emportées, implantées dans les monts de Beni chougrane	46
Tableau 6 : travaux réalisés dans le cadre de la DRS dans la zone de Mascara	48
Tableau 7 : caractéristiques analytiques du sol brun calcaire vertique – Sol SAV.	54
Tableau 8: caractéristiques analytiques du sol brun calcaire – Sol SBL.	56
Tableau 9: dispositif de traitements sur sol SBL	63
Tableau 10 : dispositif de traitements sur sol SAV	63
Tableau 11 : écart des pluies annuelles par rapport aux moyennes annuelles déterminées sur trois périodes de mesures pour la zone étudiée	66
Tableau 12: variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles standard (sol nu)	76
Tableau 13: érosion et ruissellement pour quelques averses particulièrement agressives sur sol nu (parcelle standard)	77
Tableau 14 : effet des améliorations sur les rendements pour quelques campagnes de mesures	80
Tableau 15: variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles cultivées en céréales	81
Tableau 16: variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles en jachère	83
Tableau 17: variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles traitées en billons avec culture de petit pois – Sol SBL	83
Tableau 18 : variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles cultivées en légumineuse (pois chiche sur SAV)	86
Tableau 19 : teneurs en carbone organique (CO %) sur 10, 30 et 45 cm de profondeur du sol pour les types de sols étudiés sur différentes situations et au niveau des parcelles de 100 m ²	87
Tableau 20 : perte annuelle du carbone organique (CO) par érosion en nappe sur système agropastoral	89
Tableau 21: paramètres mesurés lors des simulations de pluies- Sol SAV	90
Tableau 22: paramètres mesurés lors des simulations de pluies- Sol SBL	92
Tableau 23 : effet du travail du sol (effet de la rugosité) sur le ruissellement et l'érosion	92
Tableau 24 : résultats du suivi du comportement des jachères (effet de la couverture du sol) sous pluies simulées	101
Tableau 25 : relations trouvées entre l'érosion, la lame d'eau écoulée et les facteurs explicatifs - Sol	102
Tableau 26 : relations trouvées entre la lame d'eau ruisselée, l'érosion et les facteurs explicatifs – Sol SAV	103
Tableau 27 : Impact des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion – Sol SAV	105
Tableau 28: Impact des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion – Sol SBL	114
Tableau 29 : effet de l'exposition sur les teneurs en carbone organique sur sol nu, sol cultivé et sol couvert sur sol SAV	114
Tableau 30 : modification des caractéristiques de l'état de surface du sol et du comportement hydrodynamiques suite au phénomène de retrait-gonflement des argiles (suivi par décade).	116

Tableau 31 : Coefficients de détermination (R^2) trouvées entre C et K_r par le modèle linéaire (Sol SAV)	122
Tableau 32 : Coefficients de détermination (R^2) trouvées entre C et K_r par le modèle linéaire (Sol SBL)	132
Tableau 33 : érodibilité des sols	140
Tableau 34: coefficients de corrélation obtenus entre des paramètres mesurés avec la méthode de Henin (1956) et les caractéristiques du sol	141

Liste des planches photographiques

Planche 1 : Formes et indicateurs d'érosion hydrique

Planche 2 : Erosion sur terrain marneux

Planche 3 : Erosion sur sols rouges et sols calcimagnésiques (sol brun calcaire)

Planche 4 : Conséquences de l'érosion

Planche 5 : Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et du sol

Planche 6 : Travaux de DRS

Planche 7 : Evolution de l'état de surface du sol sous pluies simulées

Planche 8 : Sites d'expérimentations

Planche 9 : Systèmes analysés et améliorations expérimentées dans le cadre de la GCES

Sigles et abréviations

ANAT : Agence Nationale de l'Aménagement du territoire (Algérie)

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Algérie)

CES : Conservation de l'Eau et du Sol

CF : Conservation des Forêts

DRS : Défense et Restauration des Sols

INRF : Institut National de Recherche Forestière (Algérie)

IRD : Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)

GCES : Gestion Conservatoire de l'Eau, de la biomasse et de la fertilité des Sols

OAMV : Office d'Aménagement et de Mise en Valeur des monts de Beni chougane

ONM : Office National de la Météorologie (Algérie)

ORSTOM : Office de Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-Mer (France)

RTM : Restauration des Terrains de Montagnes

USLE : Universal Soil Loss Equation (Equation universelle de perte de terre)

RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation (Equation universelle de perte de terre révisée)

RUISSELLEMENT ET EROSION EN ZONE DE MONTAGNE :
ANALYSE DES FACTEURS CONDITIONNELS
CAS DES MONTS DE BENI CHOUGRANE

RESUME

Les études menées sous pluies naturelles et sous pluies simulées ont apporté des éléments de réponses utiles à la compréhension du déclenchement du ruissellement et de l'érosion dans les monts de Beni Chougrane, zone très représentative du Nord-ouest algérien, ainsi qu'à la lutte antiérosive. L'étude et le suivi des parcelles expérimentales, sur lesquelles les dynamiques érosives et les différentes situations culturales ont été analysées sur deux types de sols les plus représentatifs, le sol brun calcaire vertique de texture argileuse (SAV) et le sol brun calcaire de texture limoneuse (SBL) montre que l'érosion en nappe et en rigole reste inférieure à 10 t/ha/an et qu'il existe des différences de comportement entre les situations et entre les sols étudiés. Les résultats obtenus durant plusieurs années de mesures et d'observation montrent que l'érosion annuelle est de 1,5 à 8,6 sur sols nus, de 0,3 à 2,7 sur les sols en jachère, de 0,1 à 3,8 sur les sols plantés et de 0,04 à 0,7 t/ha/an sur les systèmes améliorés. Les taux d'érosion obtenus sont proches de ceux obtenus au niveau maghrébin. Toutefois l'érosion moyenne annuelle ne traduit pas les extrêmes qui se traduisent à l'échelle de quelques événements pluvieux intenses. Les risques majeurs sont liés aux averses exceptionnelles, soit aux orages très violents, soit aux pluies saturantes provoquant une érosion pouvant dépasser pour certains événements 2 t/ha et où le Kr dépasse les 30 %. Les taux les plus élevés sont enregistrés en automne où les conditions optimales du ruissellement sont réunies. Le facteur d'érodibilité varie de 0,002 à 0,008 pour le sol SAV et de 0,018 à 0,04 pour le sol SBL.

Même si l'érosion en nappe reste en général modérée, la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol, source essentielle de la fertilité des sols, est continuellement éliminée par l'érosion sélective ($1,3 < \text{indice de sélectivité} < 3,9$). Les pertes en carbone organique ont atteint 15 % en cinq ans.

Les systèmes de gestion traditionnels analysés, montrent que l'utilisation continue des sols ne présente pas de grand risque comme celui des sols nus et/ou abandonnés et des jachères prolongées et pâturées. La culture en billons, l'amélioration et la mise en défens de la jachère et des parcours s'avèrent intéressantes pour la réduction de l'érosion (une réduction de 7 à 63 fois). L'hypothèse émise qui considère que les modes d'utilisation des terres jouent un rôle important sur l'évolution de l'érosion est vérifiée. Mais ce rôle peut être négatif comme il peut être positif, ils peuvent aggraver comme ils peuvent l'atténuer le phénomène.

Les résultats obtenus sous pluies simulées ont montré l'effet positif du travail grossier (effet de la rugosité) et des jachères mises en défens (effet de la couverture du sol) sur l'amélioration de l'infiltration et la réduction de l'érosion et l'effet négatif des jachères pâturées et des sols abandonnés, caractérisés par une faible couverture et une dominance de surfaces fermées.

La relation entre ruissellement et érosion n'est pas stable durant l'année, elle varie au cours des saisons. La pluie et l'humidité peuvent expliquer que partiellement la variabilité du ruissellement et de l'érosion. Les résultats montrent l'importance du rôle des propriétés de l'horizon superficiel dans la régulation des flux d'eau et dans la détermination du comportement des sols vis-à-vis de l'érosion. Le déclenchement du ruissellement et de l'érosion est en relation avec les états de surface. Ces états sont aussi en relation avec les systèmes de gestion et les caractéristiques du sol. Le déclenchement du ruissellement dépend beaucoup de la surface ouverte du sol. Les surfaces fermées accélèrent et augmentent significativement le ruissellement. Les surfaces ouvertes sont plus élevées sur les sols travaillés que sur les jachères et les parcours et sur sol SAV pendant la période sèche que sur sol SBL. A l'échelle saisonnière, le ruissellement et l'érosion dépendent en premier lieu de l'évolution des états de surfaces et en second lieu du développement du couvert végétal.

Mots clés : Ruissellement - Erosion - Sol - pluie - Carbone- Systèmes de gestion -Parcelles d'érosion -Simulation de pluies - Facteurs conditionnels - Zones cultivées de montagne - Monts de Beni chougrane.

ملخص

السيلان و الانجراف في المناطق الجبلية: دراسة العوامل الشريطية

حالة جبال بني شقران

أدت الدراسات حول السيلان و الانجراف في منطقة بني شقران الأكثر تمثيلا للشمال الغربي الجزائري إلى مينا بمعطيات ضرورية لتفهم وقوع السيلان و الانجراف و كذا محاربتهم .

أثبت نتائج الدراسات المتحصل عليها خلال عدة سنوات من قياس الانجراف في قطع تجارب الانجراف ذات 100 م² أن الانجراف السطحي في الأراضي المزروعة يبقى أقل من 10 طن/ هكتار/ سنة و أن هناك فروق حسب الحالات و نوعية التربة المدروسة.

تقدر نسبة الانجراف سنويا من 1,5 إلى 8,5 في التربة العارية و من 0,3 إلى 2,7 في التربة البور و من 0,1 إلى 3,8 من 0,1 و من 0,04 إلى 0,7 طن/ هكتار/ سنة بالنسبة لتحسين أساليب. تتقارب نسب الانجراف السطحي المحصل عليها مع تلك المحصلة على المستوي المغربي.

إن النسبة السنوية للانجراف لا تفسر ما يحدث في حالة التهاطلات المطرية الغزيرة. ترتبط إمكانية حدوث الانجراف بصورة أكثر عند التهاطلات الاستثنائية عند الرعود الاستثنائية الموسمية و عند تساقط الأمطار بكثرة و لمدة طويلة و هذا يؤدي إلى تسارع الانجراف التي يفوق بعضها نسبة 2/طن/هكتار عندما يفوق السيلان 30 %.

سجلت النسب الأكثر في فصل الخريف عندما تجتمع الظروف المؤدية للسيلان. حتى و إن كانت قيمة الانجراف السطحي بصفة عامة متوسطة، يؤدي ذلك مع مرور الزمن إلى زوال الطبقة السطحية الغنية بالمواد العضوية. و تعتبر هذه الطبقة والتي هي مصدر خصوبة التربة معرضة للإتلاف و الزوال عن طريق الانجراف الانتقائي و قد يصل فقدان الكربون العضوي إلى 15 %.

تبين أساليب التسيير التقليدية المدروسة أن الاستعمال المتواصل للتربة لا يمثل خطر كبير عكس ما هو الحال في التربة العارية، أو البورية و المهملة.

و قد أدى تحسين بعض أساليب تسيير الأراضي إلى التقليل من ظاهرة الانجراف و تحسين التربة و زيادة الإنتاج.

بينت النتائج المحصل عليها تحت الأمطار الاصطناعية فعالية خدمة الأرض (قلب التربة) و تحسين الأراضي البورية.

إن العلاقة بين الانجراف و السيلان غير مستقرة خلال السنة و هي تختلف من فصل لآخر. الأمطار و الرطوبة تشرح إلا نسبيا الانجراف و السيلان.

أثبتت النتائج أهمية خصائص سطح التربة (أسطح مفتوحة، أسطح مغلقة و غطاء التربة ...) في تنظيم السيلان و تحديد سلوك التربة تجاه الانجراف. إن حالة سطوح التربة متعلقة بنسبة كثيرة بأنظمة تسيير الأراضي.

إن انطلاق السيلان مربوط بصورة كبيرة بالمساحة المغلقة التي تزيد بصورة تباينيه مع السيلان. المساحات المفتوحة نجدها أكثر على التربة المقلوبة مقارنة بالتربة البور أو الرعوية .

أما بالنسبة للفصول يبقى السيلان و الانجراف مربوطين بتطور حالة سطح التربة أولا و ثانيا بنمو الغطاء النباتي.

الكلمات المفتاحية: سيلان - انجراف - تربة - مطر - كربون - أساليب تسيير - قطعة انجراف - الأمطار الاصطناعية - عوامل ضرورية - مناطق جبلية - جبال بني شقران.

**RUNOFF AND EROSION IN MOUNTAIN AREA:
CONDITIONAL FACTOR ANALYSIS
CASE OF THE MOUNTAINS OF BENI CHOUGRANE**

SUMMARY

The studies conducted under natural rainfall and under simulated rainfall brought some useful answers for understanding the initiation of runoff and erosion in the mountains of Beni Chougrane, very representative of the north-western Algeria, as well as for the erosion control. The results obtained for about twenty years of observation and measurements at the runoff plots of 100 m² show that sheet erosion and rill on cultivated soils remained below 10 t / ha / year and that there are differences in behavior between situations and between the soils studied. The annual erosion is 1.5 to 8.6 on bare soil, from 0.3 to 2.7 on fallow soil, 0.1 to 3.8 on planted soils and from 0.04 to 0.7 t / ha / year on improved systems. The rate of sheet erosion and rill obtained are close to those obtained in the Maghreb. However the average annual erosion does not reflect the extremes that result in the scale of a few intense rainfall events. The major risks are related to exceptional storms or very violent storms during the seasons, or to long and saturating rains causing ablations for certain events that may exceed 2 t / ha and where runoff exceeds 30%. The highest rates are recorded in autumn when the optimum conditions of runoff are met.

Although sheet erosion is generally moderate, the thin organic-mineral of the soil surface, essential source of soil fertility, is continuously removed by selective erosion. Organic carbon losses can reach 15%.

The traditional management systems analyzed, show that using continuous soil presents no risk as that of bare soil and / or abandoned and prolonged fallow and grazed. The rough work, culture ridges, improvement and deferred grazing of fallow and rangelands are of interest both to reduce erosion and to produce biomass. Improved management systems have greatly reduced the risk of erosion and runoff.

The results obtained under simulated rainfall showed the positive effect of the rough work and fallow land resting on improving infiltration and reducing erosion and the negative effect of grazed fallow and abandoned land.

The relationship between runoff and erosion is not stable during the year, it varies during the seasons. The rain and humidity can only partially explain the variability of runoff and erosion. The results show the importance of properties of the surface horizon in the regulation of water flow and in determining the behavior of soil regarding the erosion. The outbreak of runoff and erosion is related to surface states. These states are also related to management systems and soil characteristics. The outbreak of runoff depends largely on the open surface of the ground. Closed surfaces faster and significantly increase the runoff. The open areas are higher on tilled soils than on fallow and grazing land and SAV during the dry ground than SBL. At the seasonal scale, runoff and erosion depend primarily on the evolution of surface states and secondly the developments of vegetation cover.

Keywords: Runoff - Erosion - Soil - Rain - Carbon - management systems - Plots of erosion-Simulation of rain - conditional factors - Areas cultivated of mountains - Beni Chougrane Mountains.

PROBLEMATIQUE

PROBLEMATIQUE

L'eau et le sol constituent le capital le plus précieux pour l'homme. Ces ressources fragiles subissent aujourd'hui une dégradation qualitative et quantitative sans précédent. Le problème de la dégradation du sol qu'aucun pays ne semble y échapper, affecte dangereusement la production agricole et donc la sécurité alimentaire.

Près de 2 milliards d'hectares dans le monde (22% des sols agricoles) ont subi une dégradation depuis 1950 et 10 millions d'hectares de terres cultivables sont perdus chaque année (GLASOD, 1990). A ce rythme, il sera impossible de nourrir 12 milliards d'hommes dans un siècle (Antoine, 2002). L'érosion hydrique est l'une des causes essentielles de la dégradation des sols agricoles mondiaux (Mabit et al, 1998).

La zone méditerranéenne a la réputation d'être sujet à des risques érosifs très élevés (Hudson, 1987). Au Maghreb, les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées (Heush, 1971; Demmak, 1982; Meddi, 1992; Lahlou, 1994; Morsli, 1996; Chebbani et al, 1999; Roose et al., 1996; Laouina et al., 2000; Touaibia et al., 2001; Mazour et Roose, 2002; Terfous et al., 2003; Morsli et al., 2004; Achite et Meddi, 2005; Morsli et al., 2012; Roose et al., 2012). En Algérie, le problème de la dégradation de l'eau et du sol demeure une préoccupation majeure. Parmi les principales causes, il convient de citer l'érosion et la désertification (Heddadj, 1997). Avec une érosion spécifique annuelle moyenne variant entre 2 000 et 4 000 t/km² (Demmak, 1982), l'Algérie est classée parmi les pays aux sols les plus érodibles du monde (Touaibia, 2010). Environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à l'érosion active et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux (Heddadj, 1997). Le ministère de l'Agriculture (1984) chiffre la perte de terres entre 20 000 et 40 000 hectares par an. Les pertes annuelles des eaux dans les barrages, dues à l'envasement, sont estimées à 20 millions de m³ (Remini, 2000). Les quantités de terres transportés en suspension susceptibles de se déposer dans le littoral méditerranéen des côtes algériennes sont estimées à 47 millions tonnes par an (Probst et al., 1992). La subsistance des populations est de plus en plus menacée par l'accélération de l'érosion (Sari, 1977), principalement dans les montagnes où se concentrent plus de 8 millions d'habitants (Taabni, 1998).

Qu'en est-il au juste dans le Nord-ouest algérien où le problème de l'érosion hydrique ne cesse de s'amplifier et de retenir l'attention des aménagistes et des chercheurs qui se posent encore des questions sur les solutions susceptibles de juguler aux mieux ce grave phénomène ?

Les monts du Nord-ouest algérien qui constituent un enjeu socio-économique important et représentent un grand potentiel de production agricole sont affectés par une dynamique de dégradation dangereuse et restent les plus exposés aux diverses formes d'érosion (Morsli et al, 2004). L'ouest algérien, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays (MAT, 2000). Les problèmes d'érosion se sont aggravés et étendus à des zones jusqu'ici épargnées. Les équilibres entre la végétation, le sol et l'eau se trouvent perturbés sur ces zones de montagne (Benchetrit, 1972). L'érosion continue de poser de sérieux problèmes aux collectivités locales et aux populations rurales : dégradation des terres, envasement des barrages, destructions d'infrastructures et inondations. L'érosion hydrique est devenue un phénomène très répandu et tellement grave qu'on peut le médiatiser de catastrophe. La maîtrise du ruissellement et de l'érosion est devenue donc un enjeu prioritaire.

Pour faire face à ces graves problèmes d'érosion, de grands moyens ont été déployés. Mais ces efforts en matière d'aménagement et de protection n'ont pas toujours atteint leurs objectifs (Aubert, 1986; Arabi et Roose, 1989; Hamoudi et *al.*, 1989; Taabni et Kouti, 1993; Hamoudi et *al.*, 2006; Morsli et Habi, 2007; Morsli, 2008) et les efforts fournis sont loin de l'ampleur du phénomène. L'érosion ne cesse de s'intensifier et les conséquences de s'amplifier. Les aménagements actuels s'attachent surtout à combattre les effets de l'érosion sans s'attaquer aux causes. Les enjeux liés au phénomène érosif sont essentiellement perçus à deux niveaux : en amont, où l'érosion se traduit par la dégradation des sols et l'amenuisement de la productivité des terres et en aval, où l'érosion provoque l'envasement et la destruction des infrastructures.

L'importance des enjeux, a fait apparaître la nécessité d'un diagnostic sur le dynamisme des divers processus d'érosion. L'étude des processus d'érosion et des facteurs en cause présente un intérêt considérable en vue d'une utilisation optimale et durable des sols. Sous le terme érosion se cache une grande diversité de formes, de processus et de facteurs modérateurs avec lesquels on peut jouer pour réduire l'érosion, d'où la nécessité d'un diagnostic sur le dynamisme des divers processus d'érosion.

De nombreuses études (Demmak, 1982; Arabi et *al.*, 1991; Mazour, 1992, Meddi, 1992; Morsli, 1996; Roose et *al.*, 1996; Touaibia et *al.*, 1999; Terfous et *al.*, 2003) ont été engagées surtout à l'échelle du bassin versant et qui ont fait appel à différentes approches: méthodes de turbidimétrie, de bathymétrie, de cartographie des risques d'érosion, etc. Malgré ces travaux de recherche, l'Algérie se caractérise encore par la faiblesse de sa connaissance sur l'érodibilité des sols et l'érodabilité des milieux et sur leurs évolutions sur les versants. Bien que l'érosion hydrique a été étudiée pendant de longues années en Algérie, cela n'a pas empêché que beaucoup de choses restent inconnues, les problèmes déterminants de l'érosion sont multiples (Achite et *al.*, 2006). L'Algérie n'est que partiellement étudiée et les dispositifs expérimentaux de suivi sont insuffisants. L'insuffisance ou l'absence de données de jaugeage et de teneurs en sédiments rend plus complexes la connaissance et l'identification du phénomène (Touaibia, 2010). Les mesures réalisées à l'exutoire des bassins versants sont des bilans, qui intègrent différents phénomènes dont la distinction n'est pas toujours aisée (Le Bissonnais et *al.*, 1998). Aussi la cartographie des manifestations de l'érosion, ne permet pas d'intégrer les lents décapages affectant la surface du sol (érosion en nappe) et nécessite des indicateurs demandant une validation à l'échelle des parcelles d'érosion.

Pour réaliser un bon diagnostic des risques de ruissellement et d'érosion sur les versants cultivés, il est nécessaire d'observer le comportement hydrodynamique du sol au cours de la saison des pluies soumis à diverses utilisations. Les observations sur de courtes périodes permettent certes d'étudier certains mécanismes, mais ne permettent pas de distinguer les évolutions liées aux activités anthropiques et aux fluctuations climatiques. Les variabilités climatiques imposent des résultats sur plusieurs années (Mabit et *al.*, 1998).

INTRODUCTION GENERALE

Rapport-Getuit.com

INTRODUCTION GENERALE

Une lutte antiérosive efficace doit passer par une bonne connaissance du comportement hydrodynamique des sols soumis aux fluctuations climatiques et à diverses utilisations du sol et en particulier de l'origine de la naissance du ruissellement. Depuis peu de temps seulement, des efforts pareils sont faits en Algérie surtout sur l'érosion naissante (Arabi et Roose, 1992; Mazour, 1992; Morsli, 1996 ; Chebbani, 1996 ; Roose et *al*, 1996; Morsli et *al.*, 2004) et il n'y a pas encore des données suffisantes. D'importants efforts restent à accomplir pour comprendre et appréhender les processus érosifs à l'échelle du versant.

Vu le manque ou l'absence de données chiffrées sur l'ampleur des processus et l'insuffisance sur la connaissance et la hiérarchisation de l'influence des facteurs en cause, il s'est manifesté un besoin de recherche de quantification des processus et d'analyse des facteurs conditionnels de l'érosion et en particulier des systèmes de gestion au niveau des versants. Conscient de ce besoin en recherche et de l'évolution de la gravité de certaines conséquences de l'érosion qui en résultent, nous avons orienté notre recherche vers la compréhension des processus érosifs en sols cultivés de montagne et l'analyse des facteurs conditionnels, en vue de mieux les contrecarrer.

Les monts de Beni chougane, zone représentative des monts du tel occidental, sont l'objet d'étude. La nature et l'intensité des processus dans cette zone ne sont pas suffisamment étudiées tandis que leurs causes ne sont pas examinées. Les travaux réalisés ont essentiellement consisté à faire un état des lieux du phénomène. Les travaux menés sur l'étude de trois micro bassins représentatifs des monts de Beni chougane (Morsli et *al*, 1988) et sur la susceptibilité des sols à l'érosion dans ces monts (Morsli, 1996), ont permis de mieux connaître les éléments qui composent ce milieu et de souligner le problème de l'érosion qui constitue l'une des contraintes majeures de ce milieu montagneux. Ces études qui revêtent un caractère préliminaire ont montré la manifestation des différentes formes d'érosion (érosion en nappe, mouvement en masse et surtout érosion linéaire) et les principaux types de sols affectés. Mais ces travaux n'ont pas permis de répondre aux questions fondamentales suivantes : quelle est l'ampleur des processus ? Quels sont les facteurs d'érosion discriminants ? Et quelles sont les périodes critiques de l'année ? Ces travaux ont fait ressortir la nécessité de mieux connaître l'intensité des risques pour chacun des processus et des facteurs en cause.

Sur les terrains cultivés qui occupent des surfaces importantes au niveau des versants des monts de Beni chougrane, les traces laissées au sol par les divers types d'érosion traduisent l'efficacité locale des processus. L'érosion en nappe entraîne l'apparition de rigoles qui évoluent en ravines, si rien n'est entrepris pour limiter le ruissellement. C'est à ce niveau et plus particulièrement au niveau parcellaire que les sols se dégradent de plus en plus et que les pointes de crue se forment. Il est devenu donc indispensable de connaître l'ampleur de ce processus (érosion en nappe et en rigole) qui se manifeste au niveau de ces zones et d'établir les causes et la part des facteurs au niveau des versants et plus particulièrement au niveau parcellaire.

Dans ces zones cultivées de montagne, on peut émettre l'hypothèse que les modes d'utilisation des terres jouent un rôle important sur l'évolution de l'érosion. Le phénomène de l'érosion hydrique est un processus naturel dont l'ampleur s'est aggravée avec l'utilisation des sols par l'homme (Remy et le Bissonnais, 1998; Maïllo, 1999). C'est sur la base de ce postulat que nous avons mené ce travail de recherche. Notre objectif visait la quantification de l'ampleur de l'érosion naissante (érosion en nappe et en rigole) et l'analyse de l'influence des systèmes de gestion dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion à l'échelle parcellaire et leur conséquence sur la fertilité des sols.

Il faut rappeler tout d'abord que les études concernant le ruissellement et l'érosion s'heurtent en zone de montagne à d'importantes contraintes liées à une grande variabilité spatiale et temporelle de l'état, des unités du milieu et des précipitations. A ceci, il faut ajouter que certaines études doivent durer une décennie et même plus, en raison de l'absence d'événements pluvieux suffisamment considérables, soit pour obtenir l'événement pluviométrique qui permettra de bien caractériser le ruissellement et l'érosion, soit même pour pouvoir suivre une saison durant laquelle le milieu permet à la végétation d'exprimer ses potentialités. Face à une telle situation, le spécialiste aborde les études à différentes échelles d'espaces et de temps.

Pour atteindre notre objectif, nous avons choisi la méthode qui est basée sur l'utilisation de parcelles expérimentales de 100 m² sur lesquelles les dynamiques érosives et les différentes situations ont été analysées durant plusieurs années. Les principaux systèmes de gestion des zones cultivées des monts de Beni chougrane, préalablement identifiés, ont été analysés sur deux types de sols les plus représentatifs et affectés par l'érosion. Cette approche est complétée par l'utilisation de la simulation de pluies pour analyser certaines situations et états de surface qu'il n'a pas été possible d'analyser sur des parcelles expérimentales de 100 m². Hudson (1993), souligne que les courants

de la recherche sur le ruissellement et l'érosion suivent trois types d'approches qui se distinguent par les échelles (kilométrique pour les bassins versants, décamétrique ou hectométrique pour les parcelles expérimentales et métrique pour les simulations de pluie) et estime que les échelles hectométriques et métriques constituent d'excellent support pour évaluer ces phénomènes à l'échelle de la parcelle paysanne (la parcelle cultivée).

Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité des travaux que nous avons menés précédemment (Morsli et *al.*, 1988; Morsli, 1996 ;). Les parcelles de quantification que nous avons installées au niveau des monts de Beni chougrane en 1992 faisaient partie d'un réseau de quantification implanté dans différents sites écologiques (Beni Slimane-Médéa, Oued Mina-Rélizane et Oued Isser-Tlemcen). Ce réseau implanté dans le cadre d'un projet de recherche et de développement (Projet: INRF/IRD) qui avait comme objectifs l'étude de l'érosion et l'expérimentation d'une nouvelle stratégie basée sur la Gestion Conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).

Nous avons conçu ce travail sur cinq chapitres distincts. Le premier chapitre est consacré au cadre théorique, où nous abordons la description des processus d'érosion hydrique et des principaux facteurs qui l'affectent ainsi que les méthodes d'étude de l'érosion. Le cadre expérimental fait l'objet du deuxième chapitre, dans lequel nous présentons la zone d'étude ainsi qu'un bref aperçu sur les stratégies de conservation de l'eau et du sol appliquées dans la zone. Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail. L'ensemble des résultats ainsi que la discussion des résultats sont illustrés dans le quatrième chapitre. Le dernier est consacré à une synthèse.

CHAPITRE I

EROSION HYDRIQUE

CHAPITRE I

EROSION HYDRIQUE

I.1. DIVERSITE DES PROCESSUS ET DES FACTEURS

1.1. Processus d'érosion

Le capital sol, véritable ressource, s'érode naturellement, il se dégrade aussi et de façon accélérée du fait des activités humaines. Un sol naît et s'enrichit, mais il peut aussi s'appauvrir et mourir (Breton, 1997). La dégradation des sols, c'est la perte des qualités essentielles des sols pour remplir ses fonctions naturelles de stockage de l'eau et des nutriments, de milieu de soutien des plantes, de réservoir de la biodiversité et de séquestration du carbone. La dégradation des sols peut avoir diverses origines : épuisement des nutriments des sols, salinisation, pollution, érosion des sols (squelettisation et décapage du sol) etc.

L'érosion du sol est l'un des processus les plus actifs de la dynamique actuelle des couvertures pédologiques. L'érosion est un processus variable dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions écologiques et de gestion des terres (fig. 1).

L'érosion peut être un processus lent et insoupçonné, ou encore peut prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de terre arable. On distingue généralement l'érosion normale ou géologique, celle qui façonne lentement la forme des versants ($E = 0.1$ à 1 t/ha/an) tout en permettant le développement d'une couverture pédologique (Roose, 1994). Les paysages sont stables quand il y a équilibre entre la vitesse d'altération des roches et l'érosion (Kilian, 1974). Cependant, l'érosion géologique peut agir de façon soudaine et catastrophique à l'occasion des averses de fréquence rare, ou encore lors d'activités sismiques ou volcaniques et lors de la fonte des neiges. En Algérie, Flotte (1984) a décrit la coulée de lave torrentielle de Mechtas en Grande Kabylie (environ 150 millions de m^3) qui s'est étendue sur 18 km^2 , sur une pente de 7%.

L'autre type d'érosion qui nous concerne, c'est l'érosion accélérée par l'homme (érosion anthropique), suite à une exploitation imprudente du milieu, elle est de 10 à 1000 fois plus rapide que l'érosion normale. Il suffit d'une perte en terre de 12 à 15 t/ha/an, soit 1 mm/an ou 1m en 1000 ans, pour dépasser la vitesse de l'altération des roches : celle-ci varie de 100 ans pour altérer 1(un)

mètre de marne à plus de 100 000 ans pour un mètre de granite en conditions tropicales humides (Roose, 1994). De plus, la couche arable s'appauvrit en particules légères par érosion sélective (squelettisation des horizons de surface) et s'amincit par décapage (Roose, 1977). En une génération, l'horizon humifère du sol cultivé peut-être dégradé ou décapé, entraînant la réduction ou la perte du potentiel de production agricole du sol. L'érosion a une influence néfaste sur la production immédiate des cultures en place, mais elle peut aussi modifier progressivement les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, surtout par érosion sélective des particules de sols et réduire les potentialités à long terme de certains sols (Morsli, 2005).

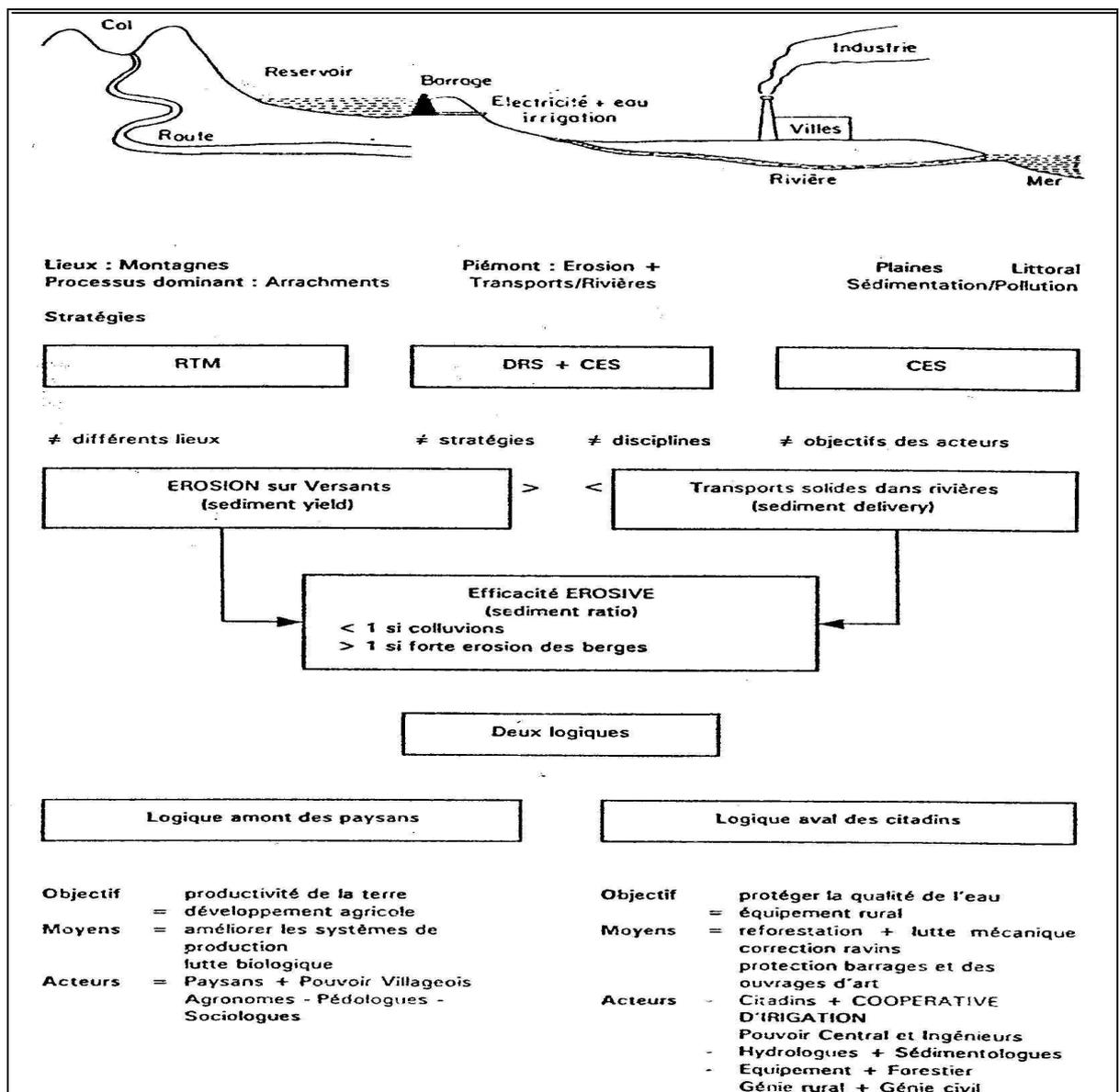


Figure 1 : diversité des processus d'érosion \implies diversité des logiques et des acteurs (Roose, 1994)

Dans l'érosion hydrique, l'eau est l'agent causal et le mécanisme est toujours identique : le détachement des particules, le transport solide et enfin la sédimentation. Les différentes phases du processus d'érosion sont bien identifiées (Eimberck, 1990). La figure 2, montre les phases du processus de l'érosion hydrique.

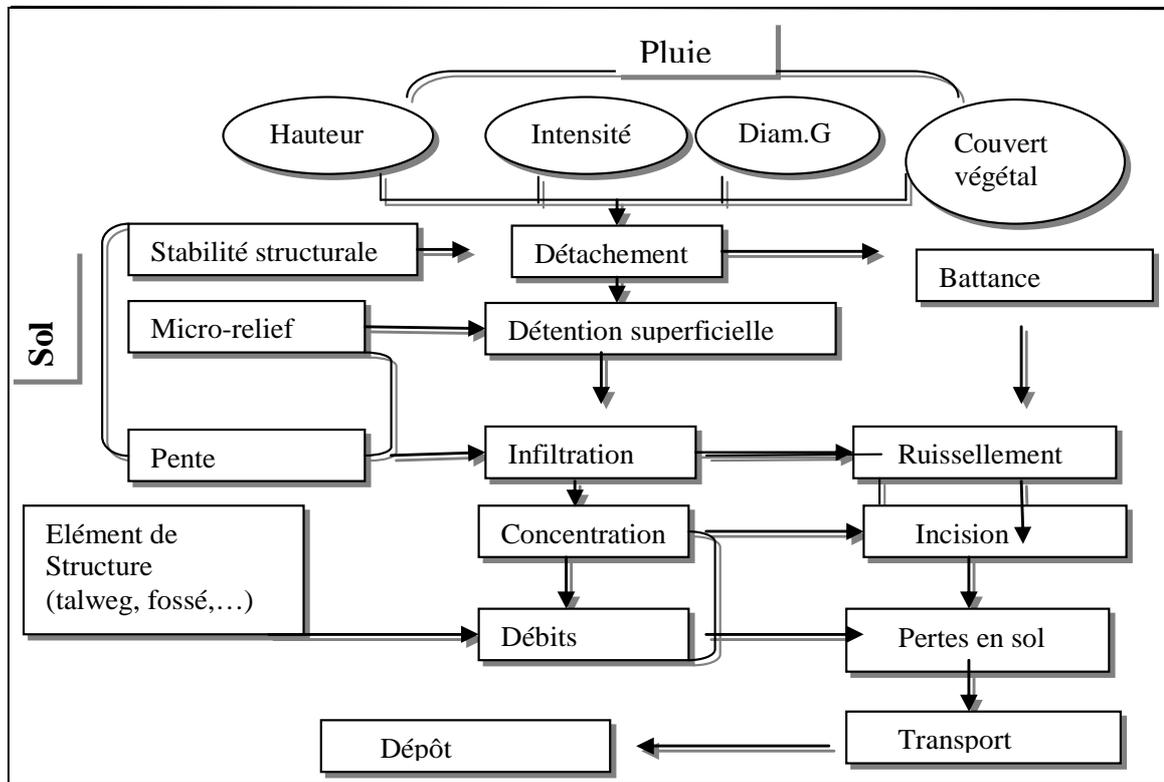


Figure 2 : déterminisme des processus érosifs d'après Eimberck, 1990

La tolérance en érosion est définie comme la perte de sol acceptable, car elle est compensée par l'altération des roches gardant ainsi une profondeur du sol constante. Les seuils de tolérance de l'érosion sous un climat humide tempéré varient entre 2,5 t/ha/an pour un sol superficiel et 12,5 tonnes/ha/an pour un sol profond, de texture équilibrée et moyennement perméable (USDA, 1951 ; Klingebiel et Montgomery, 1966). Cependant, cette approche ne tient pas compte de l'importance de l'érosion sélective des nutriments et des matières organiques des horizons humifères superficiels des sols. Les sédiments qui proviennent de l'érosion des horizons superficiels des sols sont plus riches en carbone (Albergel et al., 2006; Roose et al., 2012). Elle a été encore définie comme l'érosion qui ne provoquerait pas de baisse sensible de la productivité des terres et de dégâts intolérables à l'aval (pollution, inondation, envasement des barrages...). Dans la tolérance, on doit tenir compte de trois aspects : la vitesse de restauration des sols, le maintien de la productivité des terres et le respect de la qualité des eaux de ruissellement (Stocking, 1978 ; Mannering, 1981).

1.2. Formes d'érosion

L'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace.

1.2.1. Erosion hydrique

Les phénomènes érosifs les plus gênants apparaissent plutôt provoqués par les forces développées par l'eau. Le principal facteur de cette érosion est le ruissellement dont la répartition spatiale est contrôlée par celle des précipitations et des caractéristiques de la surface du sol. La dynamique de l'érosion est fonction de l'influence des facteurs mis en jeu.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (Cros-Cayot, 1996). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : érosion diffuse, en rigoles parallèles et érosion linéaire.

1.2.1.1. Erosion de rejaillissement (effet splash)

C'est l'érosion élémentaire causée par le choc de la goutte d'eau douée d'une certaine énergie cinétique. Les gouttes de pluie brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées (fig. 3).

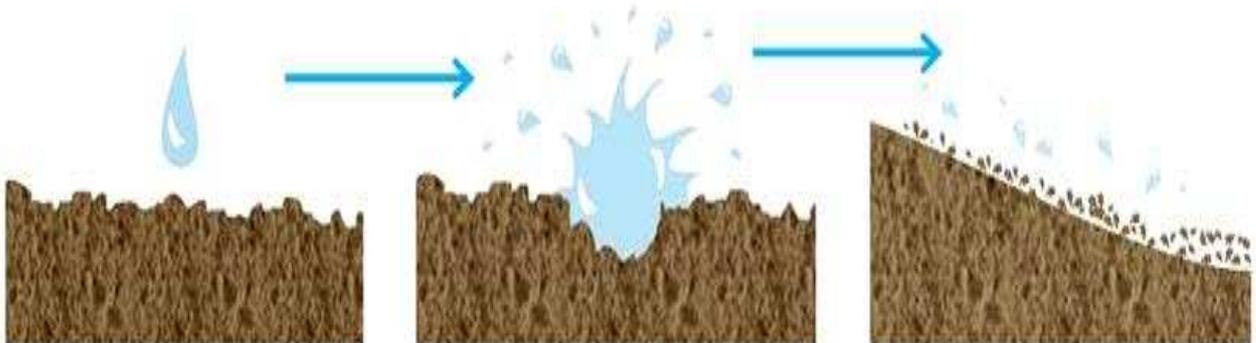


Figure 3 : phénomène de rejaillissement « splash » et de déplacement des particules

Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou « splash », déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépend de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol perd de sa capacité d'infiltration et sur certains sols, il apparaît une croûte de battance ce qui facilite le déclenchement du processus de ruissellement et de l'érosion du sol.

1.2.1.2. Erosion en nappe

On parle d'érosion en nappe lorsque l'énergie des gouttes de pluie s'attaque à toute la surface du sol et que le transport des matériaux arrachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique (Roose, 1994). Ce type d'érosion se traduit par le décapage plus ou moins uniforme de la couche superficielle du sol par l'eau de ruissellement. L'eau qui ne s'infiltré pas ruisselle sur le sol sous forme d'une lame d'eau ou de filets diffus. Ce ruissellement diffus ou en nappe se manifeste par une force de cisaillement et arrache les particules. C'est la forme d'érosion la plus courante bien que ses effets symptomatiques paraissent moins perceptibles puisqu'elle concerne les particules fines du sol (argiles, limons et matière organique). Les conséquences de cette érosion sont la squelettisation et le décapage des horizons superficiels. Si des mesures ne sont pas prises pour corriger cette érosion naissante, elle va alors évoluer vers l'érosion linéaire : griffes, rigoles et ravines (Roose et *al.*, 1996; Morsli et *al.*, 2004).

Les traces laissées au sol par les divers types d'érosion traduisent l'efficacité locale des processus qui font appel à des sources d'énergie variées et à divers facteurs qui modifient leur expression. Les indicateurs de l'érosion en nappe faciles à repérer à la surface du sol sont les plages de couleurs claires, les nappes de sable clair, le décapage (demoiselles coiffées et microfalaises) et la remontée des cailloux à la surface du sol.

1.2.1.3. Erosion linéaire

Lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltration de la surface du sol ou lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe, il se forme dans un premier temps des flaques d'eau, qui en débordant vont communiquer entre elles par des filets qui prennent de la vitesse et développent une énergie propre capable de creuser le sol. Ce sont les forces de cisaillement de l'eau chargée de sables et graviers qui arrachent des agrégats au fond et

sur les flancs des rigoles (fig. 4). La résistance d'un profil de sol au ruissellement sera donc différente de la sensibilité d'un sol à la battance des gouttes de pluie. Il se forme d'abord de simples griffes puis des rigoles décimétriques qui peuvent évoluer en ravines métriques. Hjulström (1935) a montré que lorsque les filets dépassent la vitesse de 25cm/s, ils acquièrent une énergie suffisante pour arracher et mobiliser les particules (argiles, limons, graviers, cailloux et blocs).

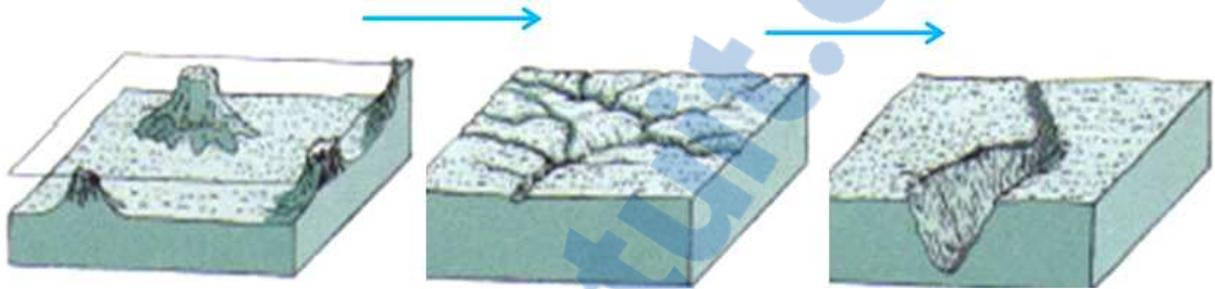


Figure 4 : évolution de l'érosion hydrique

La cause de l'érosion linéaire est à chercher dans l'énergie du ruissellement, laquelle dépend à la fois de la masse de ruissellement (M) et du carré de sa vitesse (V) au niveau des parcelles. Au niveau du bassin versant, l'énergie du ruissellement dépend de la masse du ruissellement (M), de la force d'attraction (G) et de la différence d'altitude (H) entre le haut et le bas du bassin versant.

Energie du ruissellement = $\frac{1}{2} M \times V^2$ à la parcelle ou = $\frac{1}{2} .M.G.H.$ sur bassin versant.

Lorsque le ruissellement s'organise, il creuse des formes évidentes de plus en plus profondes suivant les lignes de moindre résistance. On parle de griffes « stream erosion » lorsque les petits canaux ou microfilets ont moins de 10 cm de profondeur et de rigoles « channel erosion » lorsque celles-ci dépassent les 10 cm (Roose, 1994). Toutes ces deux formes d'érosion peuvent être effacées par les instruments aratoires. Lorsque les creux atteignent les 50 cm de profondeur et plus qu'ils ne peuvent plus être effacés par les techniques culturales, on parle alors de ravines « gully erosion ».

Lorsque les ravins et les ravines se joignent les uns aux autres par des crêtes et provoquent un effleurement de la roche mère, on arrive au stade ultime du ravinement « badland ». A ce stade de ravinement généralisé, tout aménagement n'est plus envisageable. Le badland se développe souvent sur les substrats tendres.

Dans la nature, on observe différents types de ravines, le plus souvent des ravines en forme de V qui s'impriment dans un matériau homogène, plus ou moins meuble (sablo-argileux, argileux, marneux ou schisteux). Les ravines évoluent par l'érosion et l'altération de la roche (fig. 5). En

milieu méditerranéen l'altération des marnes et des schistes peut atteindre 4 à 10 mm par an. Les ravines de forme U. s'observent fréquemment dans la nature sur des matériaux hétérogènes et/ou résistants. Lors des crues, l'eau exerce une poussée latérale sur le bas du versant jusqu'à ce que celui-ci s'effondre et le canal de la ravine s'élargi latéralement par l'affouillement et l'effondrement des berges.

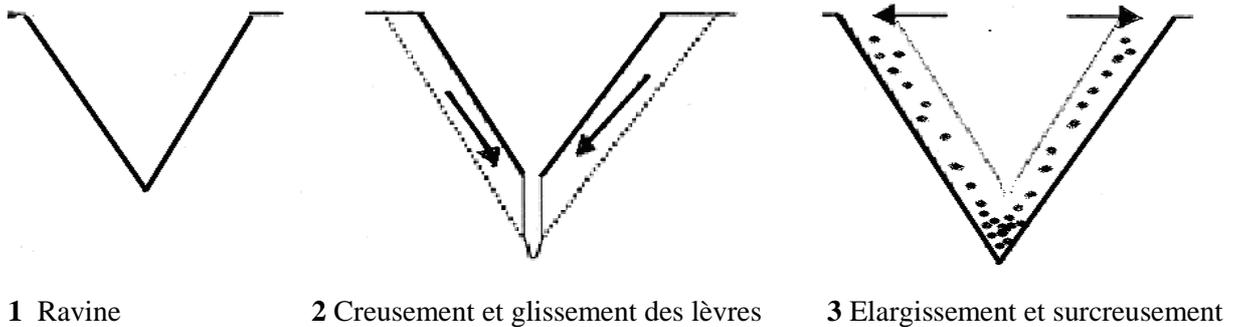


Figure 5 : évolution des ravines en V sur matériau homogène (marne) par surcreusement (Morsli, 1996)

Des ravines en tunnel « Tunneling », appelées encore suffosion, peuvent se développer dans un matériau fissuré en surface, soit sur des sols riches en argiles gonflantes, soit sur des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles. Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique (circulation des eaux dans les fissures du sol et les poches de dissolution du gypse) vont se transformer progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui progressent rapidement au cours des grosses averses. Cette forme de ravinement est difficile à traiter.

1.2.1.4. Erosion en masse

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique et des formations géologiques. L'eau agit cette fois non pas par décapage, mais par détérioration des qualités physiques en profondeur et peut alors provoquer soit des glissements de terrain, soit des décrochements. L'érosion en masse (glissement de terrain) ou écoulement (coulées boueuses) est un processus fréquemment observé sur les versants pentus, de roches peu cohérentes (argiles, marnes, schistes) lorsque le substrat est porté à saturation (Avenard, 1990). Beaucoup de glissements ont été observés en Algérie (Bellatrache, 1988). On peut observer plusieurs types de glissements:

- Les glissements lents « creeping » : ce sont des glissements plus ou moins lents des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers. Dans les zones pastorales, la circulation des animaux le long des versants peut entraîner également des glissements sous forme d'escaliers (Moeyersons, 1989).

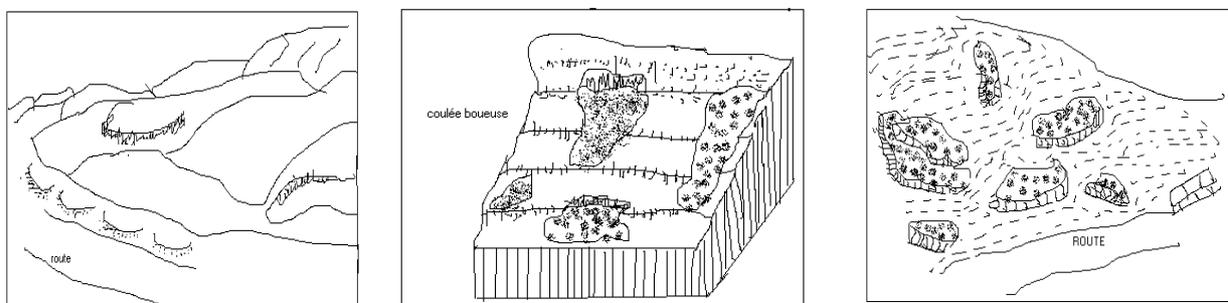
- Les glissements rapides : ce sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact, servant de plan de glissement.

- Les versants moutonnés : ce sont des formes molles apparaissant dans des conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, entre la trame des racines qui retient l'horizon de surface et l'horizon compact imperméable que représente l'altérité des marnes ou des argilites par exemple.

- Les coulées boueuses (fig.6) : ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante.

- Les glissements rotationnels en "coups de cuillère" : ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contrepente sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage un aspect moutonné.

- Les formes locales : il s'agit d'éboulements rocheux, de sapements de berges ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine. Ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive.



1. Mouvement en masse: paysage moutonné 2.Coulée boueuse 3.Décollement au bord des routes

Figure 6 : schéma de quelques exemples de mouvements en masse

1.2.2. Erosion mécanique sèche ou aratoire

Ce phénomène, très peu connu, très peu quantifié n'est pas dû à l'intervention de l'eau ni à celle du vent. C'est le résultat des pressions répétitives exercées par la simple poussée des instruments aratoires qui se solde par le décapage des horizons superficiels des hauts des pentes (fig. 7). Ce qui a pour effet de transporter les masses de terre vers l'aval des toposéquences où elles vont s'accumuler soit en talus en bordure des parcelles ou en colluvions concaves de texture peu différente des horizons d'origine.

Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont : le type d'outil, la fréquence des passages, l'orientation du travail, la pente. Ce type d'érosion additionnel, souvent sous-estimé, peut entrer en phase avec l'érosion hydrique. Raison pour laquelle on a souvent tendance à confondre l'érosion en nappe et l'érosion mécanique sèche en expliquant les taches blanches en haut de pente et en rupture de pente comme étant la preuve d'une érosion en nappe alors que l'érosion mécanique sèche peut être plus importante que l'érosion en nappe (Wassmer, 1981 ; Nyamulinda, 1989). Les matériaux déplacés ne sont pas triés (non sélective).

Les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux et sont de ce fait complexes à appréhender. Ces facteurs étant principalement des données naturelles au sens large, la réponse hydrologique d'un bassin versant relève des caractéristiques liées au climat du milieu, au sol, à la topographie, aux différentes propriétés du bassin versant et aux actions anthropiques.

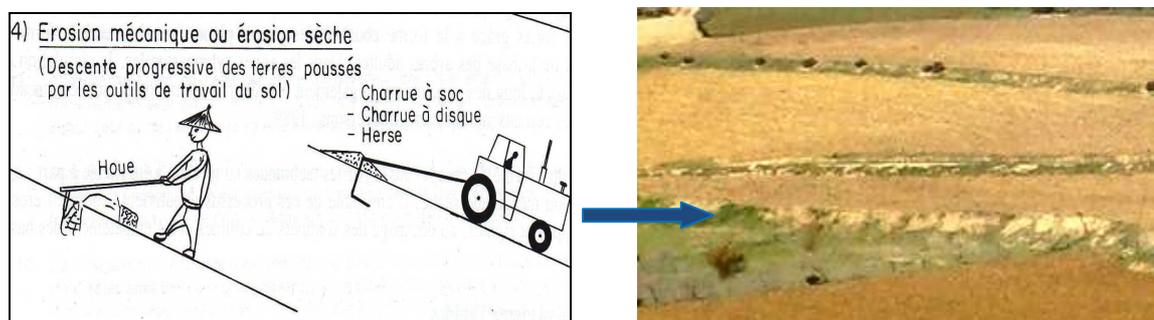


Figure 7 : érosion mécanique sèche - Par gravité et par simple poussée des instruments aratoires, ce type d'érosion décape les horizons superficiels du sol des hauts de pente vers le bas de la toposéquence où elles s'accumulent en formant des bourrelets.

1.3. Facteurs naturels agissant sur l'érosion et le ruissellement

Les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion sont les données naturelles au sens large à prendre en compte pour étudier les phénomènes érosifs. Le climat, la lithologie, le sol, la pente, le couvert végétal et les techniques culturales sont les facteurs qui régissent l'érosion du sol (Roose, 1994).

1.3.1. Climat

Le climat est un facteur important qui conditionne d'une façon directe le mécanisme de l'érosion. En plus de l'influence du vent de la température, la pluie représente le facteur climatique le plus déterminant de l'érosion hydrique. Plus les pluies sont abondantes et intenses, plus elles libèrent une énergie cinétique et développent une agressivité destructrice des agrégats : ceux-ci seront d'autant plus fragiles que le sol est très sec (explosion des agrégats) ou très humide (faible cohésion) : l'impact des gouttes de pluie peut briser et disperser les agrégats, les particules les plus fines de sol (sables fins, limons, argiles et matières organiques) peuvent facilement être emportées par le ruissellement.

Les paramètres climatiques doivent être considérés lors de l'évaluation du problème de l'érosion hydrique. Il s'agit principalement des caractéristiques des précipitations : répartition spatiale et temporelle des pluviosités, intensité, durée et fréquence des précipitations, temps écoulé entre deux événements, forme. L'érosivité de la pluie appelée aussi indice d'agressivité climatique (R_{usa}) tient compte des interactions entre ces caractéristiques.

$$R \text{ (Erosivité)} = E \text{ (l'énergie cinétique)} \times I_{30} \text{ (intensité maximale de la pluie en 30 minute)}$$

L'indice d'agressivité de Wischmeier (R_{usa}), varie de 20 à 650 aux Etats-Unis, de 20 à 150 en Europe, de 100 à 500 en zone tropicale et de 50 à 350 unités américaines en région méditerranéenne (Roose, 1994).

Le dépouillement du pluviogramme de chaque averse est une opération minutieuse et demande beaucoup de temps, et comme on ne dispose pas toujours de toutes les informations sur l'intensité des pluies, de nombreux auteurs (Fournier, 1960; Arnoldus, 1980; Roose, 1981; Rango et Arnoldus, 1987) ont tenté de simplifier l'estimation de l'indice d'érosivité des pluies. En dépouillant des stations d'Afrique de l'Ouest pendant plus d'une vingtaine d'années, Roose (1981) a

constaté que l'indice d'érosivité de Wischmeier est lié directement à la pluviosité annuelle moyenne (Ham). Et il proposa une formule empirique simple qui permettra d'estimer la variabilité interannuelle de l'érosivité.

La formule est : $R_{am} = H_{am} \cdot a \pm 0,05$

Où "a" est estimé à 0,5 en plaine, à 0,6 en bordure de l'océan, de 0,2 à 0,3 en montagne tropicale, à 0,1 en zone méditerranéenne algérienne et à moins 0,1 en zone tempérée océanique

Il existe un seuil d'intensité au-dessous duquel le ruissellement ne se forme pas. L'indice classique de Wischmeier pour quantifier l'érosion des sols aux U.S.A., place cette limite pour une intensité moyenne de 25 mm/h pendant au moins 30 minutes (Wischmeier, 1959). Les auteurs ne font pas tous l'unanimité sur l'intensité limite du ruissellement. Cette valeur a été remise en question par les auteurs européens qui ont montré que le ruissellement pouvant apparaître pour des valeurs seuils bien plus faibles (2 à 10 mm/h). Cette intensité limite trouve sa variabilité dans le degré d'humectation du sol et de la dégradation de la surface du sol avant le début de la pluie ainsi que des caractéristiques des situations locales (Lafforgue et Naah, 1976; Boiffin, 1984; Raheliarisoa, 1986; Casenave et Valentin, 1989). Lal (1976) pense que l'intensité maximale instantanée en 7 mn ou en 15 mn, est encore mieux corrélée avec l'érosion que l'intensité en 30 mn. Ceci peut être vrai localement mais pas forcément partout (De Noni et Viennot, 1991).

Même si les pluies ne sont pas toutes ruisselantes, elles laissent tout de même des traces en dégradant la surface du sol, favorisant la naissance de croûtes peu perméables et accélèrent le ruissellement lors des prochaines averses. Les précipitations peuvent se faire sous forme d'averses violentes qui entraînent un ruissellement important. En climat méditerranéen, les précipitations journalières peuvent atteindre ou dépasser les 100 mm et des intensités instantanées de 5 mm/minute (Roose, 1994). Les pluies d'orage peuvent s'accompagner de fortes intensités.

1.3.2. Sol

Les sols influent sur les processus de ruissellement et d'érosion essentiellement par leurs propriétés hydrodynamiques et structurales. L'infiltrabilité d'un sol donné dépend de la succession et des caractéristiques physiques des horizons qui le constituent. D'une manière générale, plus le sol présente une succession d'horizons aux caractéristiques physiques contrastées, avec de faibles conductivités hydrauliques et de faible capacité de rétention en eau, plus l'infiltration sera limitée (Stengel, 1988).

L'érodibilité d'un sol est sa résistance en tant que matériaux plus ou moins cohérent à deux sources d'énergie : la battance des gouttes de pluie à la surface du sol et le cisaillement du ruissellement entre les mottes et dans les griffes ou les rigoles. De nombreux essais furent réalisés sur le terrain sous pluie simulée. Par exemple, Dumas (1965) en Tunisie a montré que sur des parcelles de 50 m², l'érodibilité des sols est fonction du taux de cailloux, du taux de la matière organique et de l'humidité équivalente du sol, laquelle est fonction de la texture. Le taux de cailloux en surface du sol est en relation avec l'infiltration et le ruissellement (Blavet et *al.*, 2004). L'indice d'érodibilité varie de K= 0.01 pour les sols les plus résistants à K = 0.4 pour les sols moyennement fragiles et 0.70 pour les sols les plus fragiles. Plus les sols sont riches en matières organiques, en argile, en calcaire et en macroagrégats stables > 200 µ, plus la couverture pédologique est résistante à l'agressivité des pluies. Et plus les sols sont riches en sables fins et en limons, en sodium échangeable ou en sel, plus les agrégats sont instables. La résistance du sol reste fonction des caractéristiques intrinsèques du sol et de son état de surface.

1.3.3. Topographie

La pente influence puissamment l'importance de l'érosion, mais l'existence d'érosion et de ruissellement intense sur des pentes douces indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une forte pente pour déclencher ce phénomène : l'action pluviale y suffit (Fournier, 1967). La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur. Dans le domaine des pentes faibles, l'inclinaison des pentes augmente le volume ruisselé, mais sur forte pente on observe un meilleur drainage interne et la formation plus lente des pellicules de battance, lesquelles sont détruites au fur et à mesure de leur formation par l'énergie du ruissellement (Heusch, 1970 ; Roose, 1973 et 1977 ; Valentin, 1981).

Dans le modèle USLE, le facteur topographique (SL) tient compte essentiellement de la longueur (L) et surtout de l'inclinaison de la pente (S):

$$SL = (0.76 + 0.53 S + 0.076 S^2) \times L^{0.5} / 100$$

Dans ce modèle, SL varie de 0.1 à 20 sur des pentes de 1 à 25 %, pentes les plus souvent cultivées. Pour les cultures sur des pentes plus fortes, le modèle a été prolongé, mais il s'avère que dans bon nombre de cas l'érosion n'augmente plus de façon exponentielle. L'effet de la longueur de pente est complexe. Sur 580 parcelles couplées en fonction de la longueur de pente, Wischmeier

(1966) a observé dans 40 % des cas, une augmentation de l'érosion. Cela remet en cause l'utilisation systématique du facteur pente pour déterminer les risques de dégradation des sols. La forme de la pente a aussi son importance. Wischmeier (1966) a montré que les pertes en terre sur une pente concave sont inférieures à celle d'une pente convexe.

La position topographique de la parcelle dans le paysage, en particulier méditerranéen, peut aussi avoir un rôle majeur (Heusch, 1970 ; Roose, 1994).

1.3.4. Couvert végétal

Pour arrêter l'érosion, un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant des périodes où les pluies sont les plus agressives de l'année, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité à la surface du sol. Cependant, il est difficile d'évoquer l'action protectrice d'un couvert végétal sans préciser les techniques culturales au sens le plus large.

Parmi les facteurs conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important. Il faut encore ajouter le rôle frein joué par les tiges des plantes, par les racines et surtout par la litière sur les nappes ruisselantes. En diminuant la vitesse de ruissellement, on augmente le temps d'infiltration et aussi son volume. Ce freinage par les végétaux est cependant plus efficace sur le piégeage de la charge solide que sur la réduction du volume ruisselé. Lorsque le sol est couvert de matoral ou d'herbes, l'érosion ne dépasse pas 0,2 à 2 t/ha/an (Laouina, 1992). Quelles que soient la pente, les techniques culturales, la fragilité du sol et l'agressivité climatique, un couvert végétal complet assure une excellente conservation de l'eau et du sol. Son influence prime celle de tous les autres facteurs. Le couvert végétal est le paramètre le plus important à notre disposition pour réduire les risques d'érosion (Roose, 1977; Hudson, 1992). C'est donc aux méthodes biologiques favorisant ce couvert, qu'il faut s'adresser en priorité pour assurer l'économie de l'eau, améliorer l'infiltration et la production et évidemment, la conservation du sol.

1.3.5. Facteur humain

L'explication anthropique est souvent invoquée pour interpréter l'état dégradé du milieu et l'exagération actuelle des phénomènes érosifs. Des postulats sont avancés faisant état d'un rythme d'évolution rapide ou catastrophique. En milieu méditerranéen, l'espace subit de fortes pressions de la part de l'homme, notamment dans les zones montagneuses (Dufaure, 1984). Le phénomène de

l'érosion hydrique est un processus naturel dont l'ampleur s'est aggravée avec l'utilisation des sols par l'homme (Remy et le Bissonnais, 1998; Maillo, 1999)

Les aspects socio-économiques et l'effet des pratiques culturelles ont un grand impact sur l'érosion et la conservation des sols. Autant l'homme peut par des sages techniques culturelles et aménagements, stopper presque complètement l'érosion des sols, autant il peut la précipiter de manière effarante au point de ruiner totalement des régions entières. Avec les utilisations non contrôlées du sol, l'homme se situe au premier plan des facteurs de dégradation du sol. Les effets portent à la fois sur la végétation et sur le sol en détruisant le couvert végétal et la structure superficielle du sol.

I.2. EVOLUTION DES METHODES DE RECHERCHES SUR L'EROSION HYDRIQUE

Diverses méthodes d'évaluation des risques d'érosion sont utilisées. Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles de travail. En général, trois types d'approches existent pour identifier les zones à risque (Eckelmann et *al.*, 2006): une approche qualitative, une approche quantitative et une approche par modèle, toutes ces méthodes varient dans leurs caractéristiques et applicabilité.

I.2.1. Approche par les parcelles expérimentales / approche quantitative

Après une longue phase de description des processus d'érosion, les chercheurs ont lancé des études de quantification de l'érosion à diverses échelles, de la parcelle d'une centaine de m² ou des micro-bassins de quelques hectares, à de grands bassins versants de milliers de km². Les parcelles d'érosion qui permettent une caractérisation du comportement du sol à l'échelle de l'averse ou de l'année, connaissent un succès notable depuis plusieurs décennies (Mutchler et *al.*, 1988; Roose et Sarrailh, 1989; Hudson, 1993). Pour accélérer l'étude des facteurs du ruissellement et de l'érosion hydrique au niveau des champs, des générations de simulateurs de pluies ont été développées.

Les études dominantes abordent la compréhension des mécanismes aux échelles plus ou moins fines, de la « placette » expérimentale de quelques centaines de cm², sous pluie simulée, à la parcelle cultivée (Boiffin, 1984; Farres, 1987; Eimberck, 1990), en allant jusqu'aux bassins versants (Auzet et *al.*, 1993). Ces travaux s'intéressent principalement à l'identification des facteurs

intervenant sur l'ensemble des processus érosifs, ainsi qu'à leur classification au sein d'un système hiérarchique (Mathieu *et al.*, 1993). De nombreuses études ont permis d'identifier les principaux facteurs incriminés dans les déclenchements du ruissellement et de l'érosion et leurs localisations à l'intérieur des bassins versants. Ces facteurs sont la pluie, les états de surface du sol, la pente et le couvert végétal. Leur interaction est à l'origine de la genèse des ruissellements induisant les pertes en terre (Eimberck, 1990; Le Bissonnais et King, 1993; Roose *et al.*, 1996). La compréhension des processus de déclenchement et la localisation des surfaces à forte susceptibilité de ruissellement se sont faites à travers une approche par secteur fonctionnel dépendant entre autres de la morphologie du bassin, mais aussi des pratiques culturelles.

I.2.2. Spatialisation des risques érosifs / télédétection et SIG

De nos jours, les techniques de cartographie numérique, depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'aux systèmes d'information géographique (SIG) en se fondant sur l'équation universelle de pertes en sols de Wischmeier sont de plus en plus utilisées. Elles permettent d'une part, d'estimer les pertes en sols et d'autre part, d'identifier et de cartographier les surfaces des sols nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection des sols. L'intérêt grandissant des études à échelle pluri-kilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection dans les études des ressources naturelles, de l'environnement et en pédologie (Bonn et Escadafal, 1996).

L'utilisation des SIG et de la télédétection rend l'estimation de l'érosion des sols et sa distribution spatiale possible avec des coûts raisonnables et une meilleure précision dans les grandes régions (Millward et Mersey, 1999; Wang *et al.*, 2003).

La mesure de l'érosion sur parcelles au fil des années, qui constitue une nécessité, permet de comparer les risques sous diverses conditions de sols, pentes, occupation des terres, mais pas de spatialiser les risques sur les versants (car on isole les parcelles et supprime donc les effets cumulatifs) et encore moins sur les bassins versants (car l'énergie du ruissellement, agent du transport, peut être cumulée le long du versant ou absorbée par le couvert végétal et la rugosité du sol).

Les SIG constituent un outil précieux pour spatialiser les risques d'érosion en prenant tout à la fois en compte les facteurs et les indicateurs de l'érosion (Tribak *et al.*, 2008; Mlaouhi, 2001). Tout l'art consiste à trouver les indicateurs signifiants et à valider les résultats par une analyse détaillée du terrain (Cheggour *et al.*, 2006). En réalité, la prévision des risques par le SIG n'est bonne que si toutes les couches d'information sont cohérentes. Il faut donc développer une méthode permettant de sélectionner les bons indicateurs (simulation de pluies et étude des états de surface des sols) et mettre en place des mesures pour valider les modèles de risques dans l'espace (Boudjemline et

Benamara., 2008). En combinant les pertes en terre mesurées sur les parcelles d'érosion et par le simulateur de pluie, on peut arriver à valider les exportations de sédiments en suspension observées à la sortie du bassin versant (Simonneaux *et al.*, 2006). Enfin, il faut indiquer les possibilités offertes par la télédétection (Guettouche, 1992; El Garouani *et al.*, 2005).

Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km² grâce à des modèles spatiaux (King et Le Bissonnais, 1992). Si cette approche ne peut en aucun cas remplacer les études de terrain pour établir une compréhension du phénomène, de par son caractère spatial et temporel, elle reste la méthode de régionalisation et de mise à jour la plus rapide et la moins coûteuse.

I.2.3. Utilisation des marqueurs radioactifs

La quantification de l'érosion par l'utilisation des marqueurs radioactifs prend le pas actuellement sur les modèles empiriques. Cette innovation de techniques rapides devient une nécessité vu les investissements consentis par les organismes chargés de la lutte antiérosive pour réaliser les diagnostics qui précèdent l'établissement des schémas d'aménagement.

C'est une technique qui permet une estimation assez rapide de l'érosion et capable de prendre en compte les variations temporelles et spatiales à l'échelle du bassin-versant. L'étude des taux d'érosion à l'aide du césium 137 (¹³⁷Cs), est bien développée depuis une vingtaine d'années. Le césium 137 est un radio-isotope anthropique qui permet de quantifier les déplacements de sol à des échelles spatiales variant de la parcelle au bassin versant (Bernard *et al.*, 1998). On procède à des prélèvements ponctuels de sol, pour déterminer l'activité spécifique en ¹³⁷Cs. 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). Comme hypothèse, on assume que les retombées des radio-isotopes sont homogènes à l'échelle du km² et qu'elles ont été culminantes au début des années 60. Il est possible d'apprécier l'homogénéité initiale de la teneur des sols en radioélément grâce à la valeur du coefficient de variation des sites référentiels.

La mesure de la redistribution spatiale de l'isotope depuis son introduction majeure dans l'environnement en 1963, permet de distinguer, de quantifier et de localiser les superficies érodées,

stables et de dépôts, au sein des terres cultivées (Bernard et *al*, 1998; Mabit, 1999; Sogon, 1999). Cependant le problème vient de la répartition hétérogène des vents porteurs de radioéléments en fonction du relief et des pluies, ainsi que du choix arbitraire du modèle transformant la différence de radioactivité en perte de terre (Roose et De Noni, 2004).

I.2.4. La modélisation

Il ressort que les phénomènes d'érosion sont le résultat d'interactions complexes variables dans le temps et l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagement pour la conservation des sols, le recours à la modélisation peut constituer un outil d'aide à la décision.

1. Les modèles empiriques : cas du model empirique de prévision de l'érosion de Wishmeier et Smith

De nombreuses études sur l'érosion ont été conduites aux Etats-Unis par différents auteurs, dès 1932 sous la direction du service de la conservation du sol et du ministère de l'agriculture. Wishmeier et Smith (1960) ont finalement abouti au modèle USLE (Universal Soil Loss Equation). Cette équation est utilisée aux Etats-Unis depuis cette date en agriculture. Son principe est de comparer l'érosion d'un site quelconque à l'érosion d'une parcelle témoin ayant une longueur de 22 m et une pente de 9% sur jachère nue, c'est à dire labourée périodiquement de manière à ce qu'aucune végétation ne puisse se développer et que le sol ne puisse former une croûte superficielle. Ce modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs selon la formule :

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

A est la perte de sol due à l'érosion et constatée par unité de surface pendant une période de temps déterminée.

R est appelé facteur pluie ou indice d'érosivité. Il a été défini comme le produit de l'énergie de la pluie par son intensité maximum en 30 minutes. Il peut aussi être considéré comme l'indice moyen annuel d'érosion par la pluie. Deux seuils empiriques ont été adoptés aux Etats-Unis, l'un associé à une hauteur de pluie de 12.7 mm au-dessous duquel on ne considère pas les précipitations, en considérant que leur indice d'érosivité est faible, et l'autre qui retient les pluies de 6.35 mm tombées en 15 minutes, donc d'intensité supérieure à 25.4 mm/h sur une période de 15 minutes.

K est appelé le facteur sol et caractérise l'érodibilité du sol. Il peut être défini comme la susceptibilité du sol à l'érosion et est établi par rapport à une parcelle standard. Il est évalué en tenant compte de la texture, de la teneur en matière organique, de la structure et de la perméabilité du sol. Pour le calculer, on utilise des abaques prévus à cet effet.

S est le facteur pente et déclivité, il tient compte à la fois de la longueur de la pente (L) et de son inclinaison (S). Dans la pratique, les deux facteurs de pente, L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Des formules, tables et abaques permettent de quantifier les valeurs de ce facteur.

C est le facteur de couverture végétale, il est défini dans l'USLE comme le rapport entre la perte de sol d'une parcelle cultivée dans des conditions définies et la perte de sol correspondante d'une parcelle cultivée en jachère nue continue. C'est une mesure de l'efficacité relative des systèmes de gestion des sols et des cultures dans la prévention ou la réduction de la perte de sol. La valeur du facteur C est conditionnée par plusieurs variables et leurs interactions.

P est le facteur des pratiques culturales et des techniques antiérosives. L'influence des techniques culturales (travail du sol, billonnage, mulch...) peut être importante sur l'érosion (P varie de 1 à 0,1).

L'équation a été réactualisée en 1978 et rendue plus accessible aux utilisateurs grâce notamment à des tables de données ainsi qu'à des graphes rendant son utilisation plus conviviale.

Ce modèle présente un certain nombre de points faibles :

- Inaptitude à estimer les pertes en terre sur une courte période;
- Il considère les facteurs de l'érosion comme indépendants, alors qu'il existe de nombreuses interactions entre eux-ci ;
- Il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie

Ce modèle empirique est basé sur un grand nombre de résultats répétés dans le temps et dans l'espace car il vise le comportement moyen à long terme (20 ans) des terres cultivées. L'usage de simulateurs de pluies (données ponctuelles pour chaque situation) peut compenser le manque de données sur parcelles sous pluies naturelles, mais ne peut pas les remplacer. Il est toujours difficile

de comparer des résultats particuliers obtenus en simulation avec des données moyennes sur plusieurs années sur parcelles. Les expérimentations en station sont longues et coûteuses. Il est à noter qu'il est bien difficile de prévoir de manière fiable le risque érosif sans mesures aux champs (Roose, 1994). Néanmoins l'équation reste un outil intéressant dans certaines conditions mais qu'il convient d'utiliser avec précaution sans vouloir l'extrapoler systématiquement.

Il faut reconnaître non seulement l'utilité pratique de cette équation sur le terrain pour rationaliser l'aménagement de l'espace rural, mais aussi son intérêt scientifique pour définir l'influence relative de chacun des facteurs en cause. Cette équation répond donc bien à sa vocation qui est de déterminer les techniques antiérosives à mettre en œuvre dans chaque situation. Dans la pratique, l'USLE et plus tard le RUSLE (Charte révisée Universal Soil Loss Equation) restent le modèle le plus largement utilisé pour prédire la perte de l'érosion des sols. Malgré diverses tentatives de modélisation, on n'a pas encore trouvé un modèle physique plus robuste et applicable dans la majorité des pays où l'érosion est très préoccupante (Roose, 2004).

2. Les modèles déterministes (physiques)

Les limites de l'USLE n'ont pu être entièrement dépassées. Les études plus récentes sur les processus de l'érosion ont notamment mis en avant la variabilité spatiale et temporelle des paramètres d'érodibilité. Pour pouvoir prendre en compte cette variabilité, les recherches en modélisation se sont tournées vers une approche plus déterministe basée sur la description des processus physiques à travers de modèles mathématiques. Les études de Horton (1938) et Ellison (1947) dans les années 1940, ont fourni les principaux fondements de la modélisation dite « à base physique ». Cependant ces modèles n'ont émergé qu'après les années 1970, avec le développement du calcul numérique (Foster, 1990). Depuis, beaucoup de modèles ont été développés: CREAMS (Knisel, 1980), ANSWERS (Beasley et *al.*, 1980), EUROSEM (Morgan et *al.*, 1998), LISEM (De Roo et *al.*, 1996), etc.

Ces modèles nécessitent une phase importante de calibration remettant en cause leur base physique (De Roo, 1998). Il est peut-être encore un peu trop tôt pour juger les performances des approches à base physique. Cependant, il est clair que la demande abondante en données restera une limitation sérieuse. Selon certains auteurs ((Nearing et Nicks, 1998; Favis-Mortlock, 1998; Boardman et Favis-Mortlock, 1998; Ambroise et *al.*, 1998; Takken et *al.*, 1999 ; Folly et *al.*, 1999 ; Jetten et *al.*, 1999), l'utilisation de ces modèles en tant qu'outils effectifs de prédiction de l'érosion est à prendre avec précaution, d'autant plus que les données sont censées représenter une variabilité

spatiale toujours plus complexe avec l'avancée des recherches. Il n'est pas du tout évident que tous les processus et interactions impliqués dans l'érodibilité des sols puissent un jour être modélisés physiquement (Bryan, 2000). Si les modèles basés sur les processus physiques permettent d'améliorer nos connaissances sur les mécanismes de l'érosion, il n'est cependant peut être pas réaliste de vouloir les utiliser comme outil de prédiction de l'érosion des sols (Parsons et *al.*, 1997).

Finalement, on peut dire qu'à partir de cette analyse comparative, il ressort qu'il n'existe pas de méthode parfaite mais des configurations techniques, souvent encore en cours de mise au point, que l'on tente d'adapter à un espace particulier et à un questionnement spécifique. Dès lors, le recours à l'une ou l'autre des méthodes est d'abord fixé par les ambitions du projet en terme d'objectifs scientifiques, d'échelle spatio-temporelle, et bien sûr, de moyens techniques et financiers consentis.

Les différentes méthodologies présentées, qui ont chacune leurs domaines d'applications et leurs limites, apparaissent complémentaires. Le choix de l'une d'entre elles et/ou leur couplage doit être fait en fonction de la problématique et des objectifs de recherche.

CHAPITRE II
PRESENTATION DU
CADRE GENERAL

CHAPITRE II

PRESENTATION DU CADRE GENERAL

En Algérie, la généralisation et l'accélération de l'érosion révèlent des aspects de plus en plus inquiétants, voire catastrophiques. Les zones des montagnes restent les plus touchées par ce phénomène. Celles de l'Ouest en particulier restent les plus exposées aux diverses formes de dégradation. Elles subissent une dégradation accélérée entraînant la diminution des capacités de production et l'usure des conditions de la vie des riverains. Environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active (Heddaj, 1997) et la dégradation spécifique atteinte dans les bassins versants varie entre 2 000 et 4 000 t/km² (Demmak, 1982).

Les monts de Béni Chougrane représentent un bon exemple du Tell occidental pour l'analyse des problèmes d'érosion. Dans cette zone, l'érosion est très préoccupante et la subsistance des populations montagnardes est de plus en plus menacée par l'accélération de l'érosion. Beaucoup d'espaces cultivés disparaissent pour laisser place à la roche altérée et au pâturage extensif. La dégradation de ce massif est profonde et l'érosion accélérée menace le devenir des populations concernées et perturbe complètement l'agriculture des plaines par les inondations catastrophiques, la perturbation des infrastructures et l'envasement des barrages (Benchetrit, 1972; Taabni et Kouti, 1993, Morsli et *al*, 2004).

De nombreux facteurs, tant physiques qu'humains, font des monts de Béni Chougrane et des chaînons telliens des régions de forte érosion. Sur le plan physique, la sensibilité du massif est particulièrement bien soulignée par la topographie et sa dissection par un réseau hydrographique très ramifié et par la lithologie. Tout cela resterait atténué si les oscillations des précipitations étaient minimales. Ces dernières, comme nous les verrons plus tard, sont très irrégulières et concentrées dans le temps.

Mais cette prédisposition du milieu au déclenchement de l'érosion est relative. Elle peut être atténuée par certains facteurs tels que la couverture végétale, l'occupation du sol et les techniques culturales, d'où l'intérêt accordé à ces facteurs et par voie de conséquence aux rapports de l'homme avec le milieu.

La sensibilité du milieu est aggravée par le relief, le climat, la lithologie et les modes d'utilisation des terres inadéquats. Pour bien cerner ce phénomène, ce chapitre est consacré à la caractérisation des différents facteurs d'érosion.

II.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Les monts de Beni-Chougrane se situent dans le Nord-ouest algérien. Ils sont l'un des principaux chaînons du tell occidental d'Oranie, avec une superficie de 2860 km² (BNEDER, 1982). Ils sont à cheval sur trois wilayat : Mascara, Sidi Bel Abbes et Relizane.

Les monts de Beni Chougrane sont situés entre l'Ouarsenis et les monts de Tessala. Si les limites avec ces derniers sont confuses, en revanche au Nord et au Sud l'individualité du massif est bien soulignée. Compris entre deux compartiments bas (la plaine de l'Habra au Nord et celle de Ghriss au Sud), ils se présentent comme une aire de surélévation bien individualisée et avec un aspect montagneux orienté du Sud-ouest au Nord-est. Le bassin versant de l'Oued Fergoug, partie intégrante et représentatif des monts de Beni-Chougrane est un meilleur exemple de ces monts et des chaînons du tell occidental d'Oranie. Le bassin versant de l'Oued Fergoug représente plus ou moins la diversité des monts de Beni chougrane et constitue un meilleur exemple pour l'étude des problèmes d'érosion. Ce bassin est retenu, par l'Etat, comme bassin prioritaire sur le plan d'intervention. Pour la caractérisation du milieu de la zone, nous nous sommes limité au bassin versant de l'Oued Fergoug et où nos parcelles expérimentales sont implantées (fig. 8). Le micro bassin versants où sont situées les parcelles d'érosion a été choisis par l'équipe INRF/IRD/ OAMV comme micro bassins représentatifs de la zone.

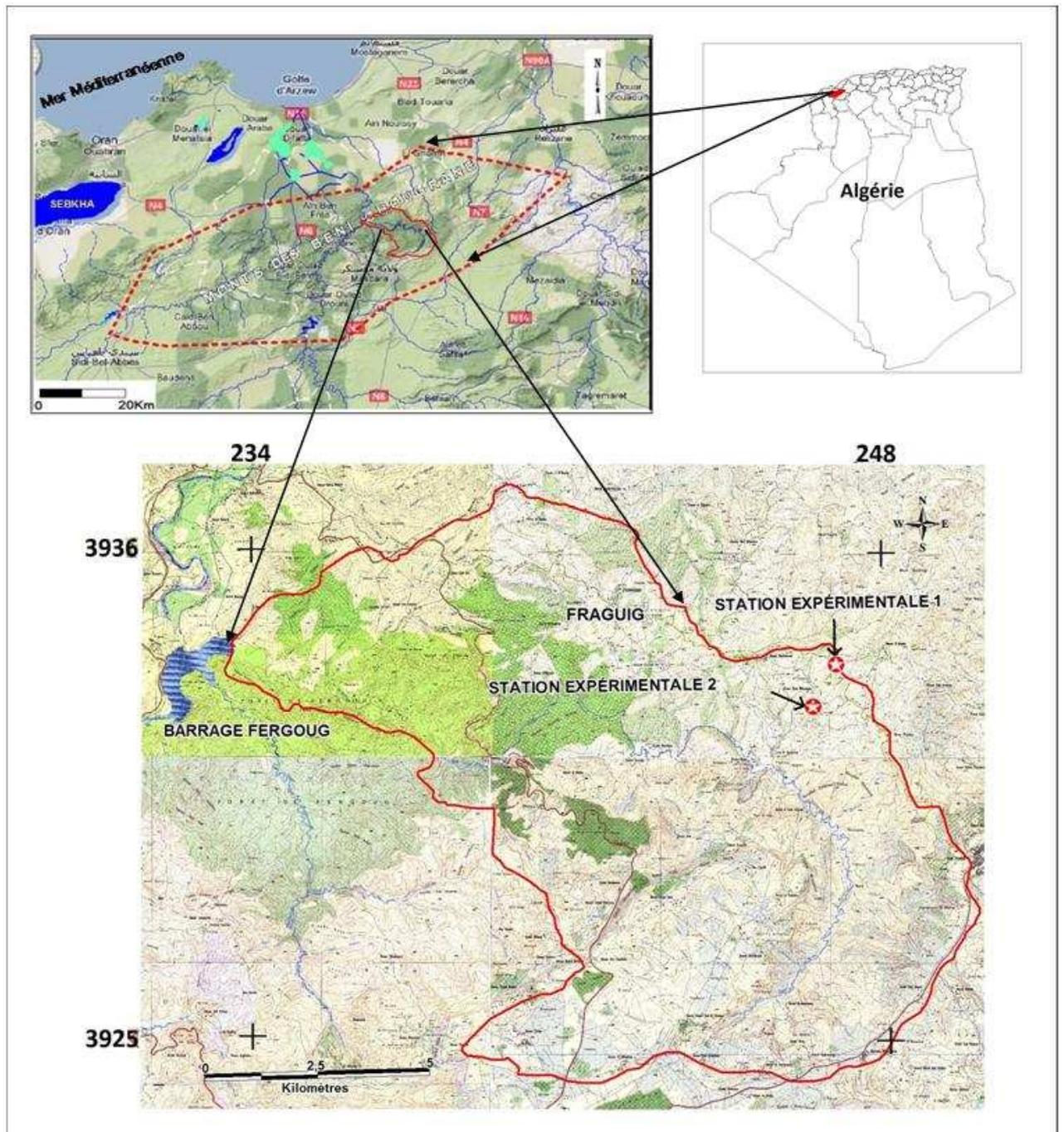


Figure 8 : carte de situation du bassin versant de l'Oued Fergoug et des parcelles expérimentales

II.2. CLIMAT

Pour étudier le régime climatique et assurer une représentation de la zone d'étude, nous avons retenu trois stations pluviométriques : Ain Fares (la plus arrosée et la plus proche des sites expérimentaux), Fergoug (la moins arrosée qui se situe à l'aval du bassin) et Mascara, station de

référence qui se situe à l’amont du bassin. L'analyse climatique a été réalisée à partir des données de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de la station d'Ain Fares et de l'ONM d'Oran.

2.1. Précipitations

2.1.1. Précipitations interannuelles

La pluie moyenne annuelle est de l’ordre de 428 mm pour la station d’Ain Farès. L’irrégularité de la pluviosité est exprimée par des oscillations à la fois annuelles et interannuelles. Les hauteurs enregistrées peuvent varier du simple au double et même plus. La pluviométrie est extrêmement variable d’une saison à une autre. Cette variabilité influe directement sur la production agricole.

La figure 9 montre la grande irrégularité des précipitations. Les variations d’une campagne à l’autre sont importantes.

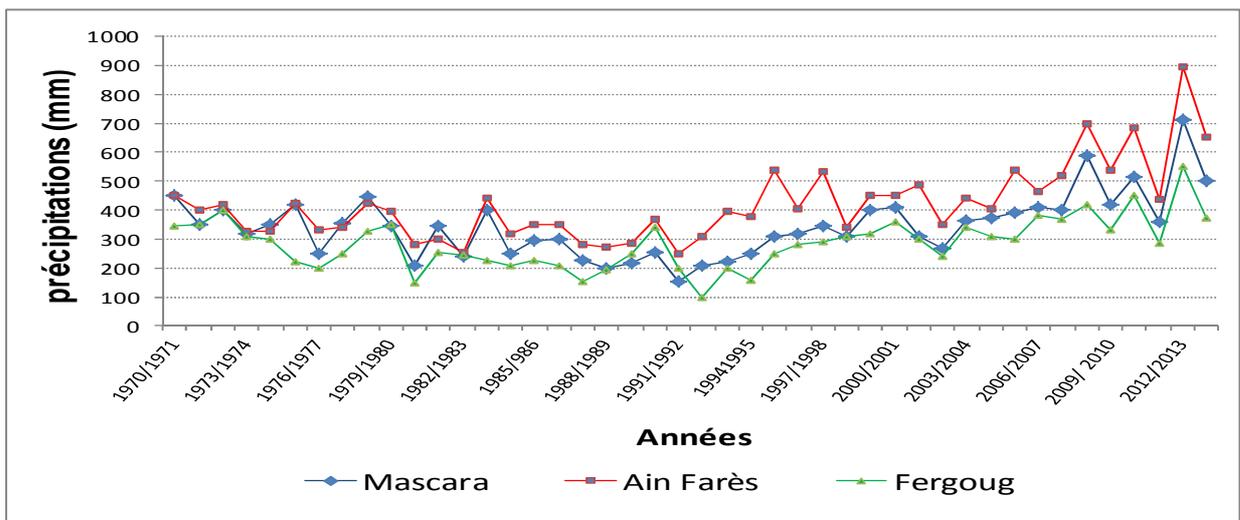


Figure 9 : irrégularité des précipitations (station d'Ain fares (ANRH), de Mascara et de Fergoug (ONM d'Oran))

Ainsi aux années relativement sèches succèdent des années humides sur un rythme quasi anarchique. Cette évolution est très irrégulière d’année en année, avec des pointes de très grande amplitude lors de certaines années de pluviométrie exceptionnellement concentrée. Pour la station d’Ain Fares, la variation des précipitations interannuelles est très importante : pour la campagne 2012-2013, la pluviométrie est de 900 mm, alors que pour les campagnes de 1982//1983 et de

1991/1992 elle est respectivement de 254 et 251 mm seulement (fig. 9). Pour la station de Mascara, Pan est de 700 mm en 2012-2013 et seulement de 129 mm en 1981.

2.1.2. Précipitations mensuelles

Les précipitations mensuelles sont irrégulières avec un maximum absolu en mars (fig. 10), et le minimum est situé en juillet et août. Cette irrégularité des pluies exerce une influence particulière à la fois sur la vie rurale et sur les principales ressources naturelles à savoir l'eau, le sol et le couvert végétal.

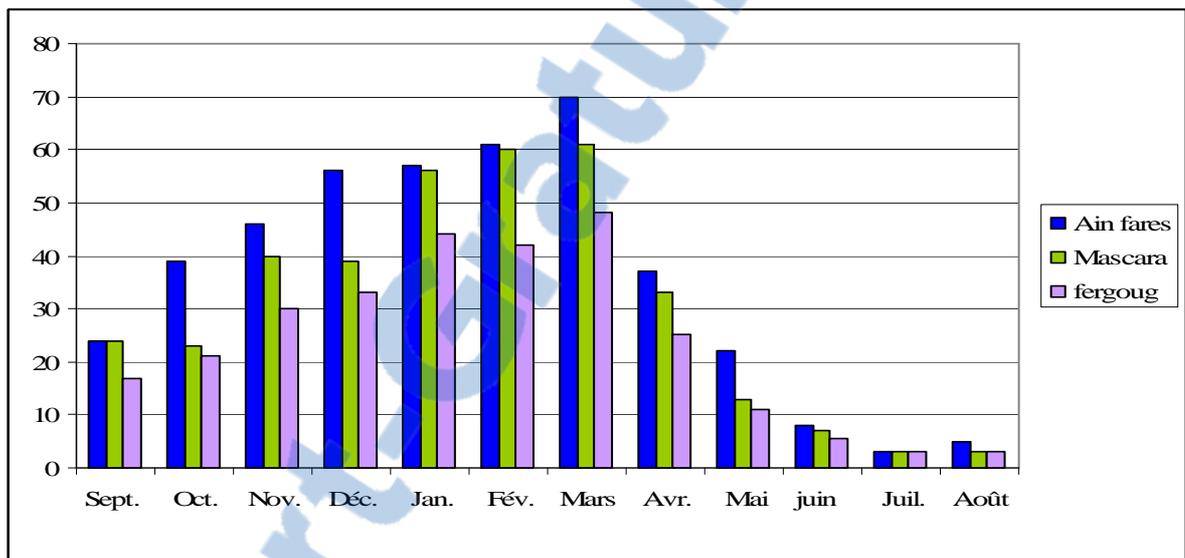


Figure 10 : irrégularité des précipitations mensuelles

Les précipitations sont concentrées en quelques mois et le nombre de jours de pluies est relativement restreint. La moitié environ des précipitations annuelles tombe en 25 à 30 jours de pluie. Ces pluies ne durent jamais plus que quelques heures et constituent donc presque toutes les pluies torrentielles dont l'intensité dépasse 30 mm en 24 heures ou 20 mm en 2 heures (Benchetrit, 1972).

Les pluies maximales journalières s'observent généralement en automne, en hiver et en printemps. Celles d'automne tombent généralement sous forme d'orages. La pluie journalière maximale observée pendant la période de mesure (1992/2013) est de 130 mm. Elle a dépassé aussi les 100 mm pour la période 1913/1938 (Seltzer, 1946). La pluviosité journalière de fréquence décennale pour la partie aval du bassin versant de l'Oued El Hammam y compris le bassin versant de Fergoug est estimée à 62 mm d'après TESCULT, (2004).

2.1.3. Fréquence et intensité des précipitations torrentielles

On peut dire que l'une des caractéristiques de la pluviosité dans la zone d'étude réside dans sa grande variabilité annuelle, saisonnière et mensuelle. C'est une caractéristique du climat méditerranéen avec une concentration de la totalité des précipitations sur quelques mois de l'année, d'octobre à avril, au cours desquels les précipitations mensuelles dépassent les 30 mm. Les grandes averses s'observent pendant cette période, mais elles peuvent intervenir également pendant d'autres mois, notamment en septembre et en mai. Les précipitations les plus dangereuses pour les sols apparaissent en grande partie au début de la campagne agricole. Ces chutes de pluie intenses et de courte durée, sous forme d'orage, sont plus érosives parce qu'elles tombent au moment où les sols sont peu couverts par la végétation. Les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) que nous avons établis pour la station d'Ain Fares pour différentes périodes de retour montrent que les fortes intensités sont de courtes durées (fig. 11a et b).

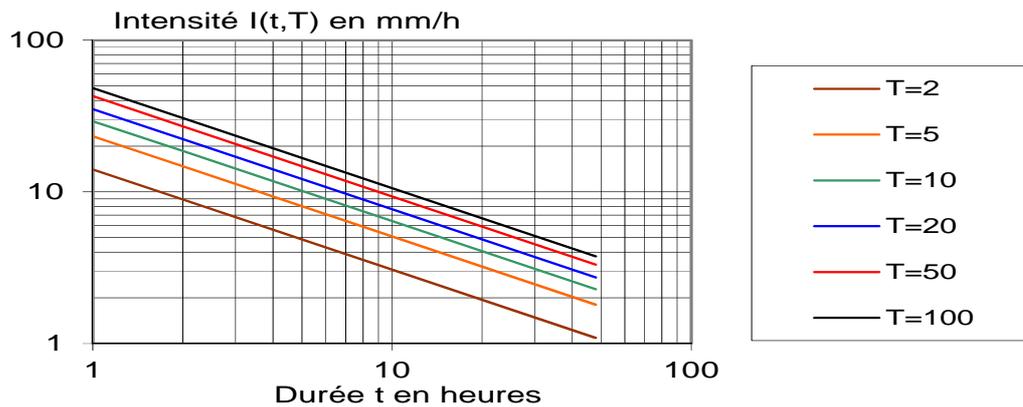


Figure 11a: courbes Intensité – Durée - Fréquence (IDF) pour la station d'Ain Fares

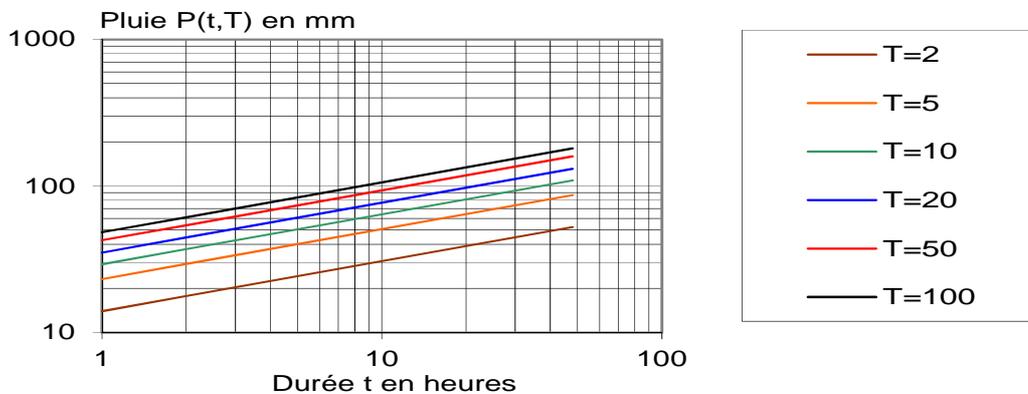


Figure 11b: courbes Intensité – Durée - Fréquence (PDF) pour la station d'Ain Fares.

Les pluies torrentielles tombent souvent en hiver : sur 57 pluies torrentielles (pluies > 30 mm en 24 h) observées à Fergoug de 1913 à 1938, 29 sont tombées en hiver (tabl. 1). Par observation visuelle, on a déjà constaté que des phénomènes d'érosion se produisent même à de faibles intensités. Les précipitations journalières de plus de 30 mm sont qualifiées de pluies érosives. Cette limitation n'est qu'approximative pour l'estimation de l'érosion. Pendant un laps de temps de 24 heures, par exemple, plusieurs pluies peuvent se succéder pendant lesquelles aucun processus d'érosion ne se produit. Toutefois, on peut considérer qu'à partir de 30 mm par jour l'érosion peut se manifester. Les pluies consécutives ayant lieu pendant 24 heures peuvent mutuellement augmenter leurs puissances érosives. Les pluies dont l'intensité dépasse les 30 mm en 24 heures ou 20 mm en deux heures constituent souvent des pluies torrentielles (Benchetrit, 1972).

Tableau 1 : pluies torrentielles – Station Mascara et Fergoug (pluies observées de 1913 à 1938 (Seltzer, 1946))

Caractéristiques	Nombre de pluies torrentielles Pluie > 30 mm/24h												Répartition par classe mm/24h				Hauteur maximale mm/24h
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	30- 50	50 - 70	70-100	>100	
Mascara	11	3	4	5	5	2	0	0	1	3	17	19	53	10	5	2	157
Fergoug	7	5	1	3	7	2	0	0	0	5	10	17	44	7	4	2	160

2.2. Température

La température moyenne annuelle est de 16,9°C. Les valeurs mensuelles maximales et minimales moyennes sont respectivement de 26 °C et 9 °C. Le mois de janvier présente les plus basses températures, alors que le mois d'août est le mois le plus chaud (tabl. 2). L'insolation journalière moyenne est de 8 heures/jour et les valeurs varient de 5,3 heures/jour en décembre à 10,5 heures/jour en juillet et août. L'humidité relative moyenne annuelle est de 71 %. Les vents de direction Ouest et Nord-ouest sont les plus fréquents. L'évapotranspiration potentielle varie de 45 mm (Décembre) à 230 mm (Juillet).

Tableau 2: caractéristiques climatiques du bassin versant de Fergoug (TESCULT, 2004)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	juin	Juil.	Août	Ann.
Temp. °C	23,0	18,5	14,0	11,0	9,0	10,0	12,0	14,0	18,0	21,5	25,5	26,0	16,9
Humid. %	68,0	74,0	77,0	81,0	81,0	76,0	72,0	68,0	66,0	65,0	63,0	64,0	71,0
Insol. h/jr	9,4	7,8	6,4	5,3	5,4	6,0	6,8	7,7	9,6	10,3	10,5	10,5	8,0
ETP mm	150	100	60	45	50	60	110	135	175	200	230	215	1530

2.3. Données climatiques synthétiques

2.3.1. Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Le diagramme ombrothermique montre que la courbe des températures passe au-dessus de la courbe des précipitations, définissant ainsi une période sèche qui s'étale sur cinq (5) mois et demi par an s'échelonnant du mois de Mai à mi-octobre (fig. 12).

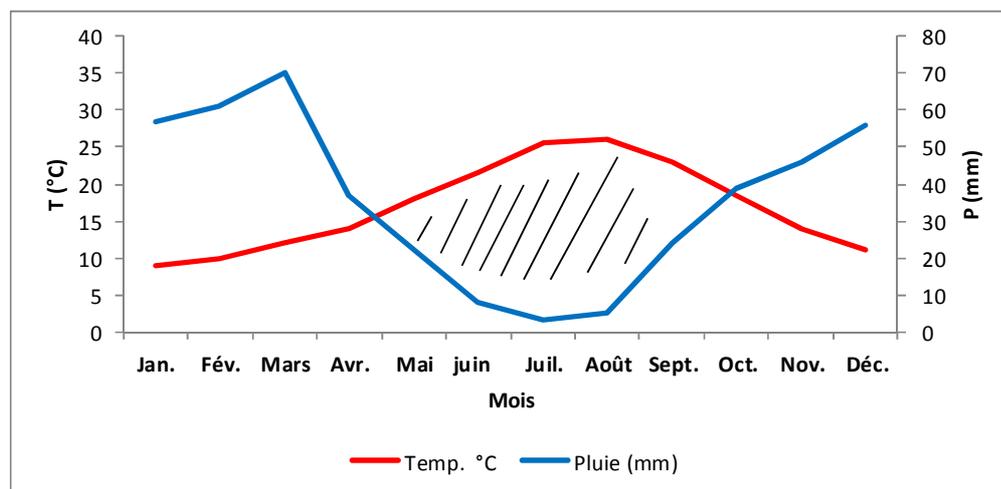


Figure 12 : Diagramme ombrothermique de la station d'Ain Fares

2.3.2. Quotient pluviométrique d'EMBERGER

Le quotient pluviométrique d'Emberger (Q_2) reflète l'aridité du climat. En effet, une région est d'autant plus sèche que « $M-rn$ » est plus élevée (Halimi, 1980). Le Q_2 est de 42,4 pour la station d'Ain Fares, indiquant que le climat de la zone étudiée est semi-aride.

Des travaux synthétiques réalisés au cours des dernières décennies ont montré certaines modifications climatiques. Bouazza (1991) dans le Sud oranais et Aime (1991) sur le littoral oranais ont montré l'importance des modifications de certains paramètres climatiques et surtout des précipitations. Ces changements ont conduit généralement à un décrochement d'un niveau

bioclimatique au sens d'Emberger (1945) sur des pas de temps climatiquement significatifs (Barbero et al., 1990).

La figure 13 montre que Mascara est passée entre les périodes 1934/46 et 1947/76 de la limite subhumide/semi-aride supérieur au semi-aride inférieur. Ce phénomène devrait faire l'objet d'études particulières, car il est important de savoir s'il s'agit d'un phénomène de désertification irréversible ou de l'effet d'un simple cycle de sécheresse caractéristique de notre climat.

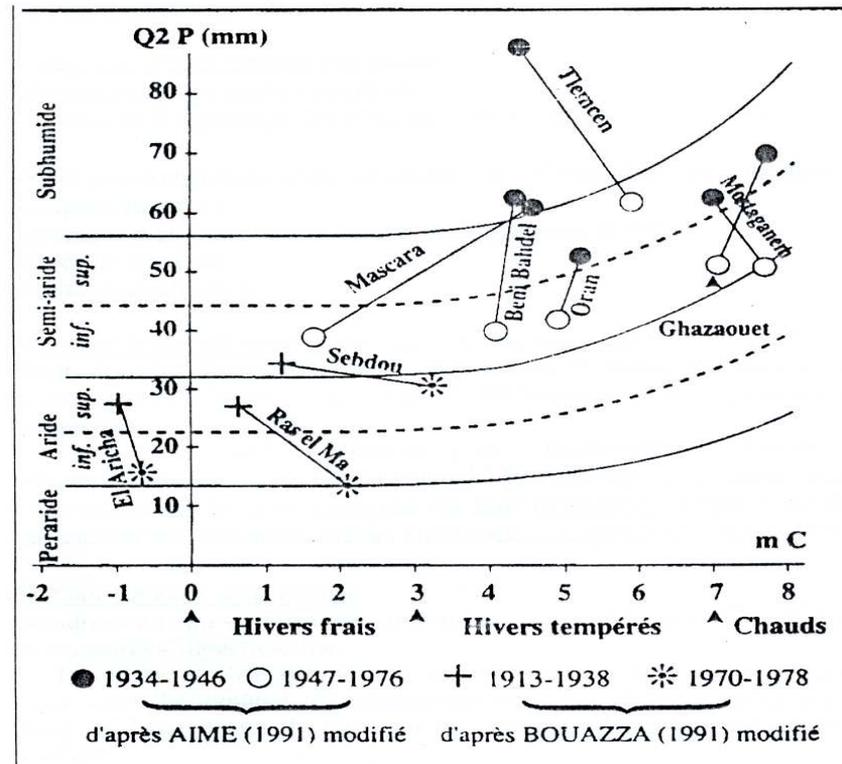


Figure 13 : modification sur le climagramme d'Emberger. Position de Mascara et de quelques localités d'Oranie (Bouazza, 1991)

La sensibilité générale du milieu physique est particulièrement aggravée par les oscillations thermiques, partout les amplitudes sont très accusées et surtout brusques au cours de certaines années. En été s'opère surtout un actif travail de désagrégation sur place par insolation et dessiccation. L'insolation détruit la structure colloïdale du sol, l'humus disparaît sous l'action photochimique de cette insolation et l'activité microbienne est énergiquement stimulée (Benchetrit, 1972). Aux chaleurs et aux vents desséchants de l'été succèdent les averses ruisselantes de l'automne.

Cette zone de climat semi-aride est caractérisée par des pluies violentes en automne et plus abondantes en printemps. Cependant, l'irrégularité et le caractère torrentiel des pluies mettent de

plus en plus en cause l'équilibre du milieu et rendent la conservation du sol de plus en plus difficile, notamment quand le couvert végétal est très faible.

II.3. LITHOLOGIE

Le massif de Beni-chougrane est allongé suivant la direction S. SW à N.NE, très plissé à ossature crétacé et recouvrement tertiaire très épais (Benchetrit, 1972). Ce sont les vestiges de l'ancien sillon méditerranéen, effondrés et transportés par charriage en deux ensembles principaux : le Crétacé moyen et supérieur et le Nummulitique (Eocène et Oligocène). Il est compris entre deux compartiments effondrés, la plaine de l'Habra et celle d'Eghris, qui l'encadrent au nord et au sud. Les formations qui le constituent sont presque les mêmes que celles qu'on rencontre dans les zones environnantes mais nous pouvons noter la faible extension du Trias, l'absence du Jurassique et la prédominance du Crétacé supérieur et moyen sur le terme inférieur, et celle de l'oligocène sur l'Eocène (Dalloni, 1952). Quant aux formations néogènes, elles sont bien représentées sur le massif.

L'ossature du bassin versant de Fergoug est constituée principalement de marnes hévétienne et tortoniennes de 4 à 500 m d'épaisseur (Benchetrit, 1972). Les marnes constituent la formation qui domine largement dans la zone (fig. 14), elles présentent des teintes différentes d'un site à un autre souvent avec des lambeaux de grès intercalés. A cette unité s'ajoutent des roches peu cohérentes telles que les grès tendres et les calcaires. Les roches cohérentes et résistantes ont une faible extension dans la zone.

3.1. Lithostratigraphie de la zone d'étude (bassin versant de Fergoug)

Dans la zone d'étude, quatre grands ensembles géologiques sont distincts :

- Des marnes d'âge crétacé, très fracturée et des affleurements éocènes qui forment le soubassement.
- Un ensemble de couches marneuses et gréseuses miocènes.
- Des témoins sablo-gréseux d'âge pliocène.
- Des alluvions et des dépôts de pente quaternaires, d'épaisseur faible par rapport aux autres ensembles.

3.2. Description des formations sédimentaires

Marne d'âge crétacé : c'est la formation la plus ancienne. Elle constitue le substratum général de la zone. C'est un faciès marneux dans l'ensemble avec intercalation de bancs de grès ou

de calcaire. Elle est représentée par le sénonien qui est en grande partie marneux. Des lentilles de gypse cristallin (1 cm d'épaisseur environ) s'intercalent souvent dans ces marnes. Ces dernières diffèrent beaucoup des argiles et des marnes du miocène par leur dureté.

Marnes d'âge éocène: C'est un ensemble très épais à prédominance de marnes bleues et grises avec intercalation de banc de grés. Il est transgressif et discordant sur les formations antérieures.

Marnes et grés d'âge miocène (marnes et grés de l'Aquitainien): ce faciès est composé de marnes jaunes et quelques fois sableuses, alternant avec des bancs de grés et de calcaire. En plus, il est mêlé de cailloutis peu cimentés associés à des limons rubéfiés.

Grés en banc massif de l'Helvétien : cet étage affleure de part et d'autre de l'oued Fergoug au-dessus duquel il forme des corniches spectaculaires. Il a un fort pendage vers le nord dans la zone d'étude. C'est l'horizon rocheux le plus répandu dans les Beni-chougrane. Il est constitué de grés jaunes, sableux et tendres.

Marnes tortoniennes: elles sont grises et meubles. Elles se caractérisent par une grande instabilité et sont soumises à un ravinement généralisé du fait de l'absence de végétation. Elles sont très affectées par les glissements de terrain.

Les faciès les plus représentés dans le bassin versant de Fergoug sont les marnes et les grés. En fonction de la cohésion des matériaux, on peut distinguer quatre classes : les faciès résistants de calcaires durs, les faciès cohérents (gréseux), les faciès plastiques (marnes et argiles) et les faciès meubles (sables quartzeux). D'après Demmak (1982), il y a une relation étroite entre le type d'érosion, les transports de sédiments et la lithologie. Là où les roches sont résistantes, on trouve les pentes les plus fortes et des couverts végétaux denses et des transports de sédiments faibles ; mais sur les roches argileuses et les marnes, on trouve des pentes relativement modérées, des activités humaines intenses, une végétation peu dense et des transports abondants de sédiments (Heusch, 1970).

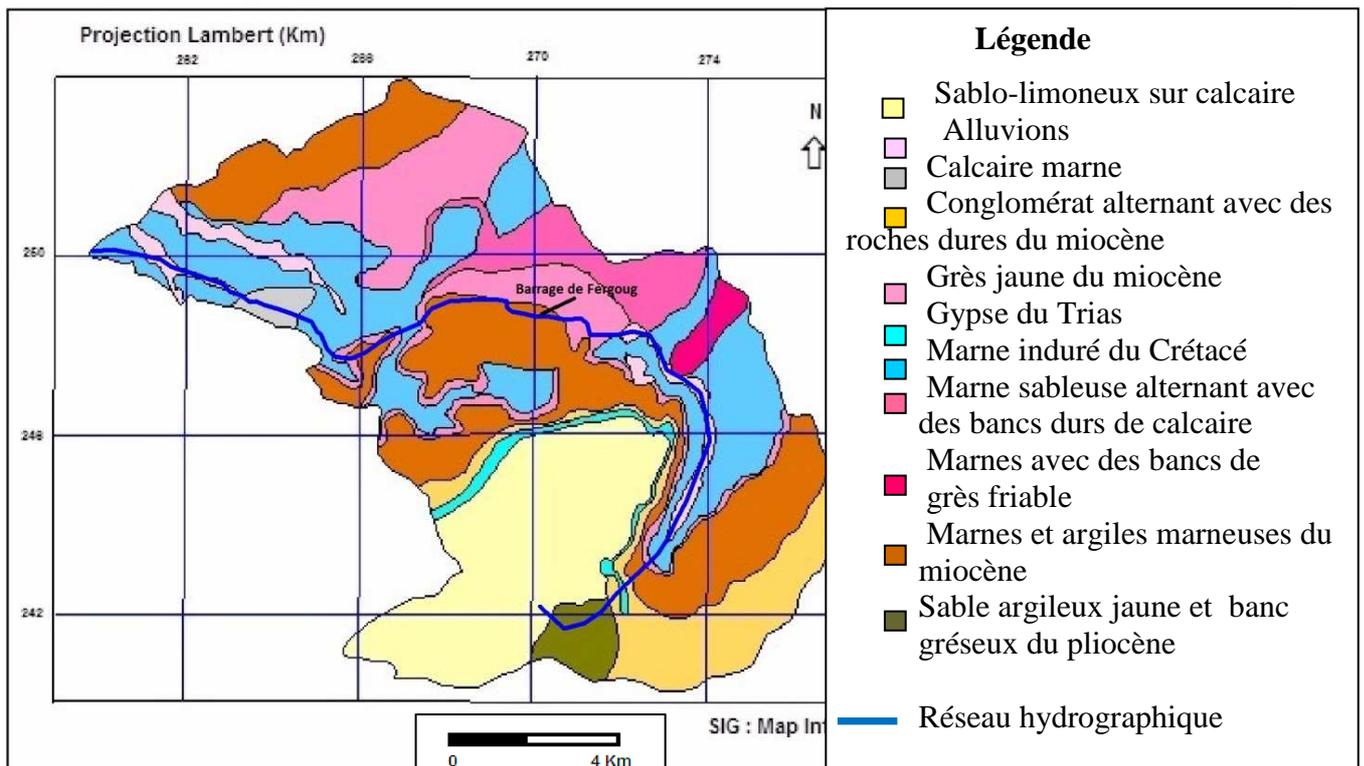


Figure 14 : carte lithologique du bassin versant de Fergoug (d'après la carte géologique de Perréaux (183), de Mascara (212) et d'Ain Fares (184) au 1/50 000)

II.4. SOL

A travers le massif de Béni Chougrane, on distingue différents types de sols. La carte pédologique (fig. 15), qui est réalisée dans un micro bassin versant au niveau du bassin de l'oued Fergoug (fig.16), montre de différents types de sol.

Les sols sont souvent jeunes et peu évolués, encore liés à la roche mère et possédant le plus souvent les propriétés de cette dernière.

Les sols formés sur les marnes (les marnes couvrent des surfaces importantes) sont essentiellement des sols vertiques : bruns calcaires, peu évolués, régosols et vertisols.

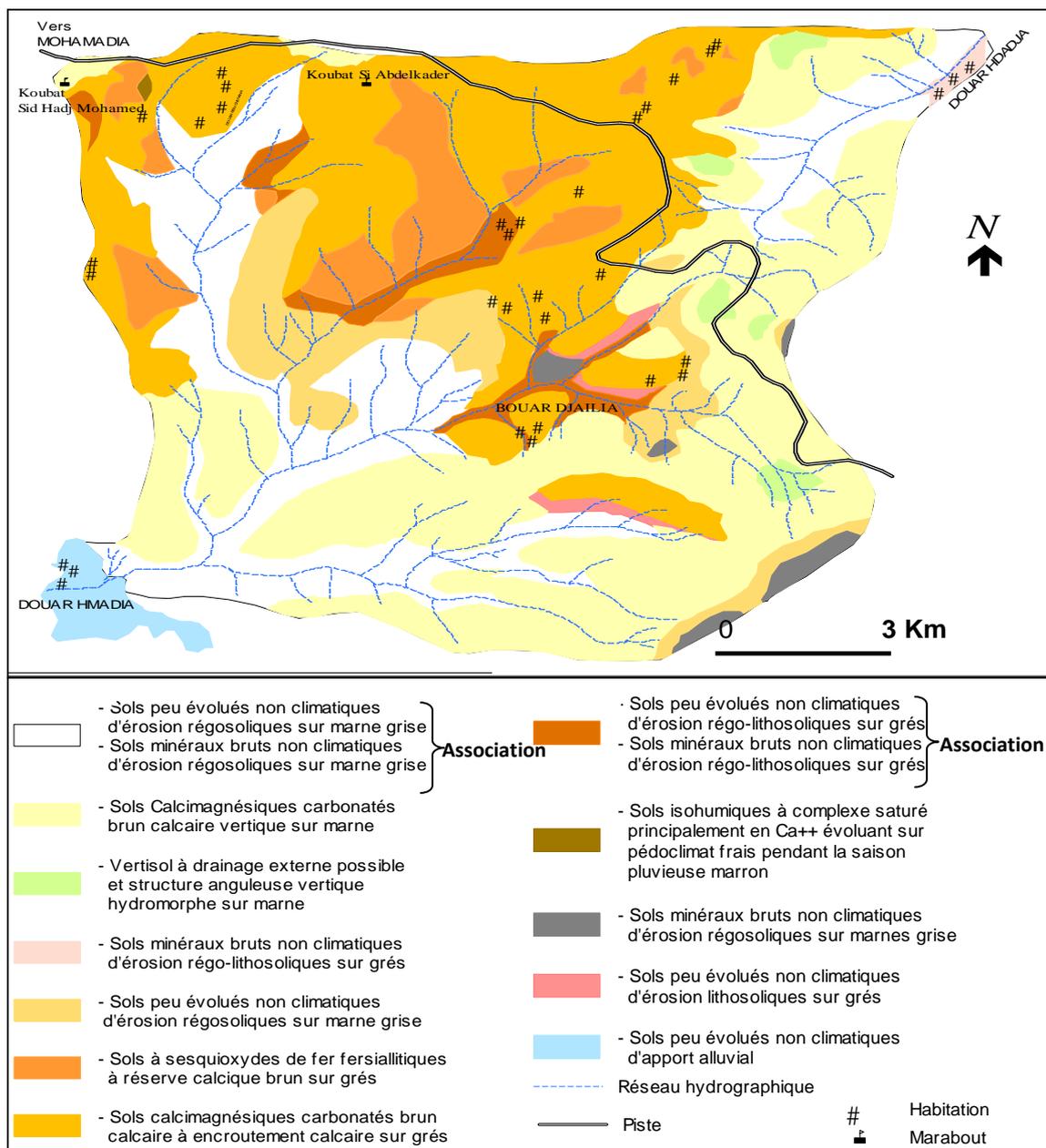


Figure 15 : carte pédologique d'un micro bassin versant situé dans le bassin versant de Fergoug (Morsli, 1996)

Les sols vertiques les plus profonds sont toujours situés en bas de pente. Leurs caractères deviennent de plus accentués et plus typiques à mesure qu'on progresse vers les zones de moins en moins drainées. Le caractère essentiel des sols vertiques est leur homogénéité liée au brassage constant des horizons par les mouvements vertiques. Ils sont riches en calcaire. Le complexe absorbant est saturé et dominé par le calcium et le magnésium. Les argiles gonflantes par l'alternance de gonflement et de retrait, provoquent des mouvements vertiques et l'apparition fréquente de fentes de retrait

Sur tout cet ensemble, l'érosion est assez forte, en rigoles et en ravinement et parfois sous forme de glissement de terrains. L'érosion, dans certains secteurs, est extrêmement forte allant jusqu'à la dénudation de la roche mère et aux « badlands » et parfois au glissement de terrain. La présence de gypse et de sel (NaCl) dans quelques marnes augmente beaucoup la fragilité des sols (suffosion, érosion en masse et ravinements).

Les propriétés mécaniques des marnes sont telles que la dégradation du sol n'interdit pas les cultures qui se poursuivent sur les marnes météorisées et ameublées superficiellement par des labours. Les marnes présentent un horizon d'altération important. Cet horizon est le résultat de l'interaction d'agents d'altération météorique (gel, degel, humectation, dessiccation). Ce manteau d'altérés se caractérise par une structuration progressive qui s'accompagne d'une augmentation de la porosité. Cela va faciliter l'infiltration des eaux pluviales par un écoulement hypodermique.

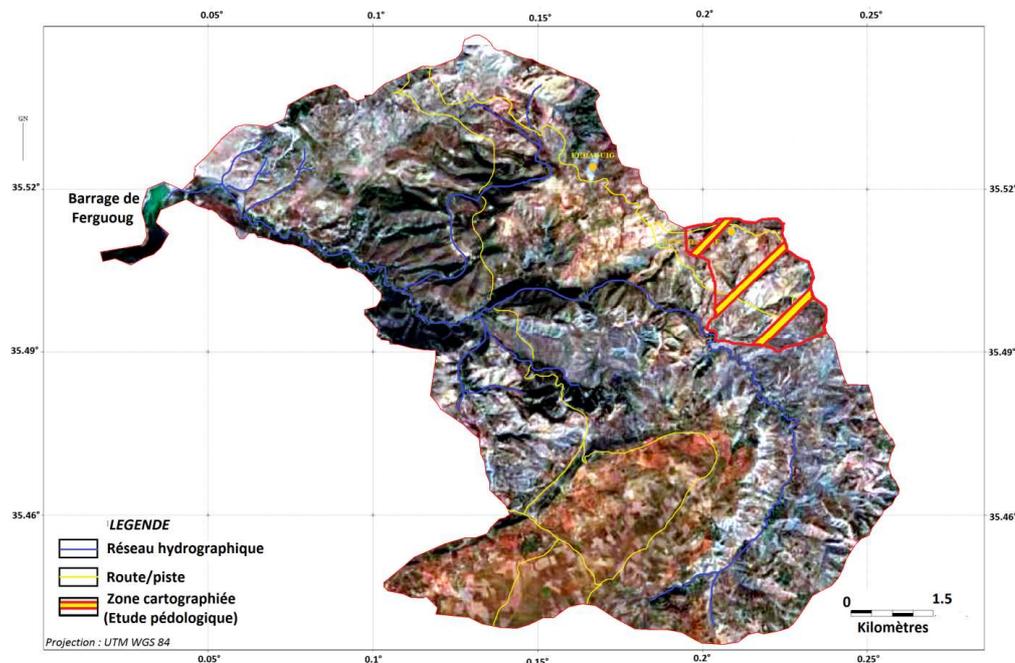


Figure 16: localisation de la zone cartographiée (localisation de la zone où l'étude pédologique a été réalisée)

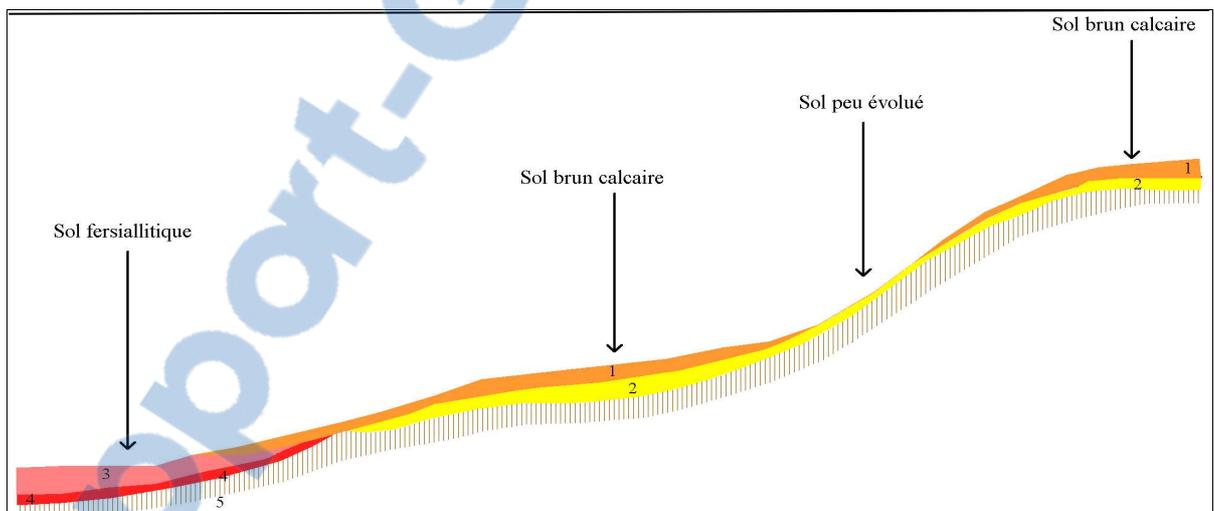
Sur les grès et les calcaires, les sols sont suivant le cas, des sols fersiallitiques, des sols calcimagnésiques carbonatés brun calcaire, des sols peu évolués et des sols minéraux bruts. Sur tout cet ensemble, l'érosion est assez forte allant jusqu'au décapage des horizons de surface.

Les sols fersiallitiques peu lessivés sont très remaniés par la mise en culture dans l'horizon A, parfois très peu épais et parfois fortement accumulés par colluvionnement sur près de 01 mètre ou même plus. Ils sont limono-argilo-sableux en surface, et argilo-sableux en profondeur. Le taux de

calcaire est faible dans les horizons de surface. En profondeur, il peut apparaître un encroûtement calcaire. Le complexe absorbant est moyennement saturé.

Les sols calcimagnésiques carbonatés brun calcaires sur encroûtement calcaire ou sur grés sont très remaniés et fréquemment érodés lorsqu'ils sont en pentes et quelque fois recouverts par colluvionnement après avoir été tronqués. Le complexe absorbant est saturé et riche en calcium, le pH est généralement légèrement alcalin. Le rapport C/N (10 %) montre une bonne évolution de la matière organique. Le calcaire s'accumule souvent en profondeur, sous forme d'amas friables, de nodules et d'encroûtement feuilleté. L'accumulation de calcaire en profondeur, constitue parfois une contrainte pour les racines. Ces sols couvrent une grande partie de la zone (25%) et ils sont très utilisés pour l'agriculture.

A l'échelle du versant, les variations de la couverture pédologique s'ordonnent selon la pente. Dans la zone d'étude, nous avons repéré un nombre de toposéquences, le long desquelles la succession des horizons reste toujours presque la même. Les figures 17 et 18 montrent des exemples de chaîne de sols caractéristiques sur marnes et sur grés.



Volume 1 : Brun ; limoneux ; structure polyédrique fine ; poreux ; présence de racine ; nombreuses galeries ; organique ; peu compact ; effervescence à l'HCL forte ; présence de cailloux calcaire (5%)

Volume 2 : Brun jaunâtre ; limoneux ; structure polyédrique ; activité biologique faible ; compact ; présence de cailloux calcaire ; effervescence à l'HCL forte.

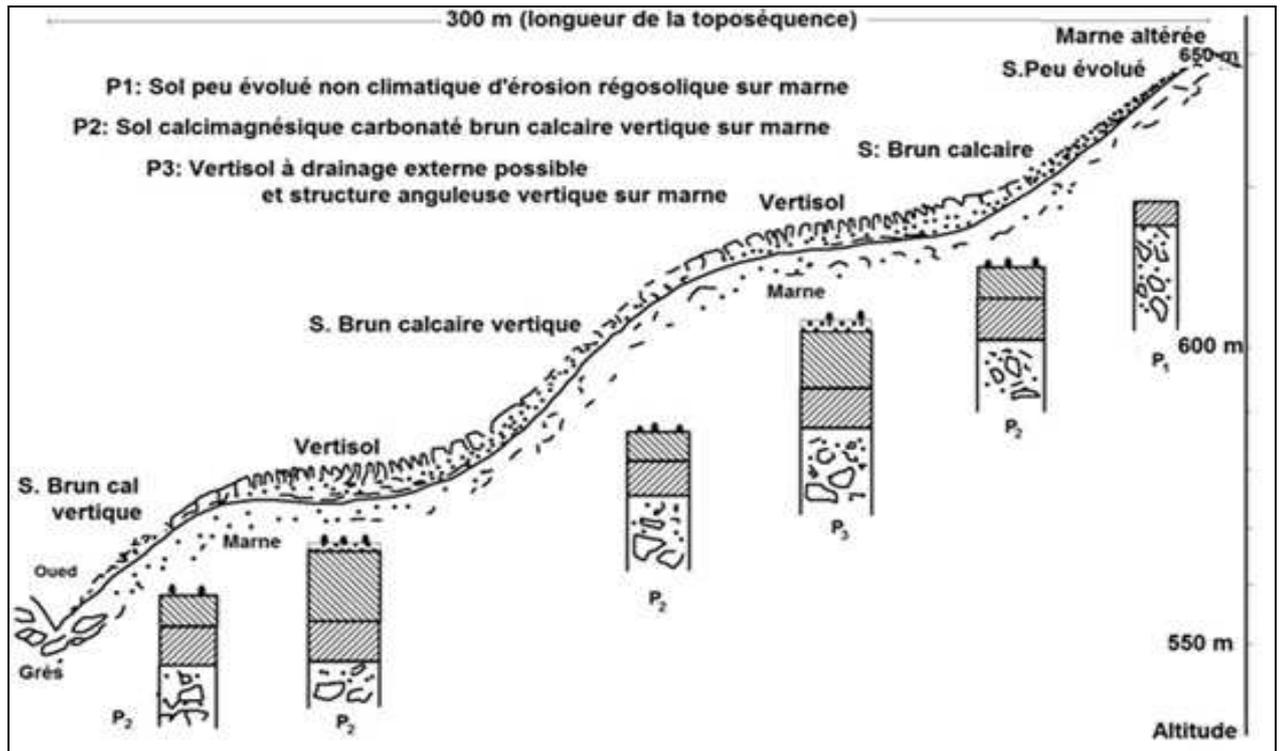
Volume 3 : Brun rougeâtre ; limono-argilo-sableux ; structure polyédrique moyenne ; nombreuses racines ; organique ; présence de cailloux calcaire ; effervescence à l'HCL moyenne à faible.

Volume 4 : rougeâtre ; argilo-sableux ; structure polyédrique ; peu compact ; activité biologique faible ; calcaire sous forme de pseudo-mycélium.

Volume 5 : Grés calcaire jaunâtre ; tendre.

Il faut noter que souvent on rencontre, dans ces types de sols, des accumulations de calcaire à la base du profil, sous forme de nodules calcaires et d'encroûtement feuilleté.

Figure 17 : variation pédologique le long d'un versant due aux processus érosifs - toposéquence sur grés ou sur calcaire (Morsli, 1996)



P1 Sol peu évolué non climatique d'érosion régosolique sur marne

0 – 30 cm : Sec; gris; argileux; structure polyédrique; tassé; effervescence à l'HCL forte; porosité faible; présence de cailloux (5%); transition diffuse et irrégulière

> 30 cm : Roche altérée.

P2 Sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire vertique sur marne

0 – 20 cm : Sec ; gris ; argileux ; structure polyédrique ; fentes de retrait ; activité biologique forte ; organique ; effervescence à l'HCL forte ; transition diffuse

20-45 cm : Sec ; gris ; argileux ; structure polyédrique grossière; cohérent ; effervescence forte ; compacte ; transition diffuse

> 45 cm : marne altérée

P3 Vertisol à drainage externe possible et structure anguleuse vertique sur marne

0 – 7 cm : Sec ; noir ; argileux ; structure polyédrique fines; cailloux (5%) calcaire ; meuble ; très poreux ; nombreuses racines fines ; effervescence à l'HCL forte ; fentes de retrait ; organique ; transition diffuse irrégulière

7 – 40 cm : Sec ; noir ; argileux ; structure polyédrique moyenne à grossière ; très cohérent ; effervescence à l'HCL forte ; fentes de retrait ; organique ; transition diffuse

40 – 70 cm : Même description avec une structure prismatique

> 70 cm : Marne altérée.

Figure 18 : variation pédologique le long d'un versant due aux processus érosifs – toposéquence type sur marne (Morsli, 1996)

Si la pédogenèse est favorisée par les substrats (marnes et grés tendre) et la végétation quand cette dernière est conservée, la topographie et surtout l'utilisation des sols dans la conjoncture actuelle paraissent entraver de plus en plus l'évolution pédogénétique et dans la plupart du temps c'est la morphogenèse qui l'emporte. La topographie, dans une telle conjoncture, ne peut avoir

qu'un effet négatif dans l'ensemble même si elle peut jouer un rôle important dans la pédogenèse par l'orientation qu'elle donne au sol et aussi à la végétation. Elle accélère le plus souvent le décapage des sols par suite de la forte déclivité.

L'équilibre morphodynamique, fragile en conditions naturelles, a été et continue à être fréquemment rompu par l'impact de l'homme (fig.19). Les sols sont d'autant plus fragiles, que la topographie et la mise en cultures les exposent gravement aux effets des processus d'érosion.

L'observation des profils complets et réguliers est rare. On note l'existence de zones d'appauvrissement superficiel du sommet de croupe et de pente et une concentration en éléments dans les parties basses. L'érosion accélérée se pose donc ici non seulement en perte de terre, mais encore en perte de fertilité et d'eau. Une hétérogénéité des rendements des céréales s'observe d'ailleurs le long des toposéquences. Sur tous les sols de la zone, l'érosion s'est largement développée sous ses diverses formes allant jusqu'à la formation de « bad lands ».

Si ces sols présentent des avantages agronomiques certains et expliquent avec d'autres facteurs la fixation de l'homme dans la montagne, ils restent directement soumis à différents processus de dégradation. Là où l'érosion est intense, il peut ne rester que des sols peu évolués lithiques ou régosoliques.

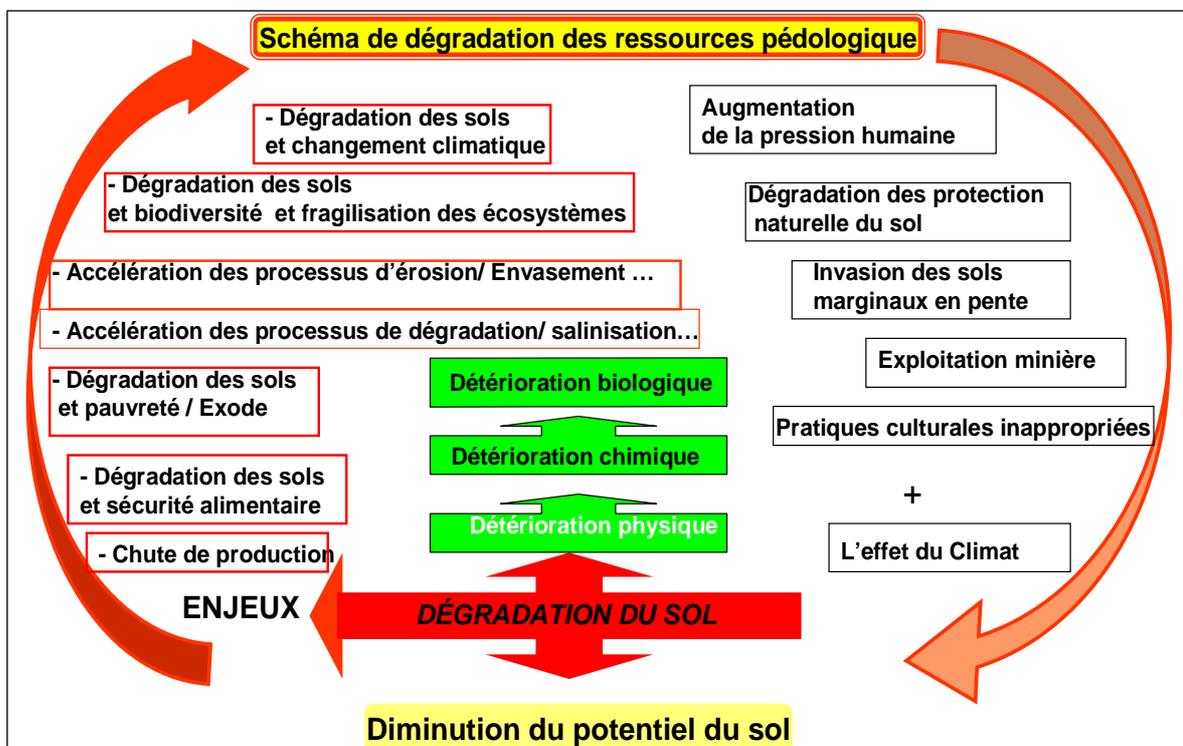


Figure 19 : schéma de dégradation des ressources pédologiques dans la zone d'étude

II.5. TOPOGRAPHIE

Les monts de Beni-Chougrane se caractérisent par une topographie extrêmement confuse où se mêlent les sommets des massifs en dômes, les hautes surfaces en plateaux et les vallées profondément encaissées. Leurs altitudes s'élèvent en général du Sud-ouest au Nord-est et passent de 300 à 900 mètres (fig. 20).

Le massif est fortement disséqué, il est extrêmement accidenté et fortement raviné. Le relief est vigoureusement entaillé par le réseau hydrographique qui est fortement hiérarchisé avec des oueds et des ravines.

Les versants rescapés sont constitués par une succession de vallons creusés dans les roches tendres. Ces versants sont longs et présentent des pentes fortes. L'ossature des monts de Béni-Chougrane est déchiquetée en toutes directions par un réseau de ravines qui se rattachent aux différents oueds de la région. En cas de précipitation de forte intensité, ce qui est souvent le cas, ces cours d'eau se transforment en torrents dévastateurs.

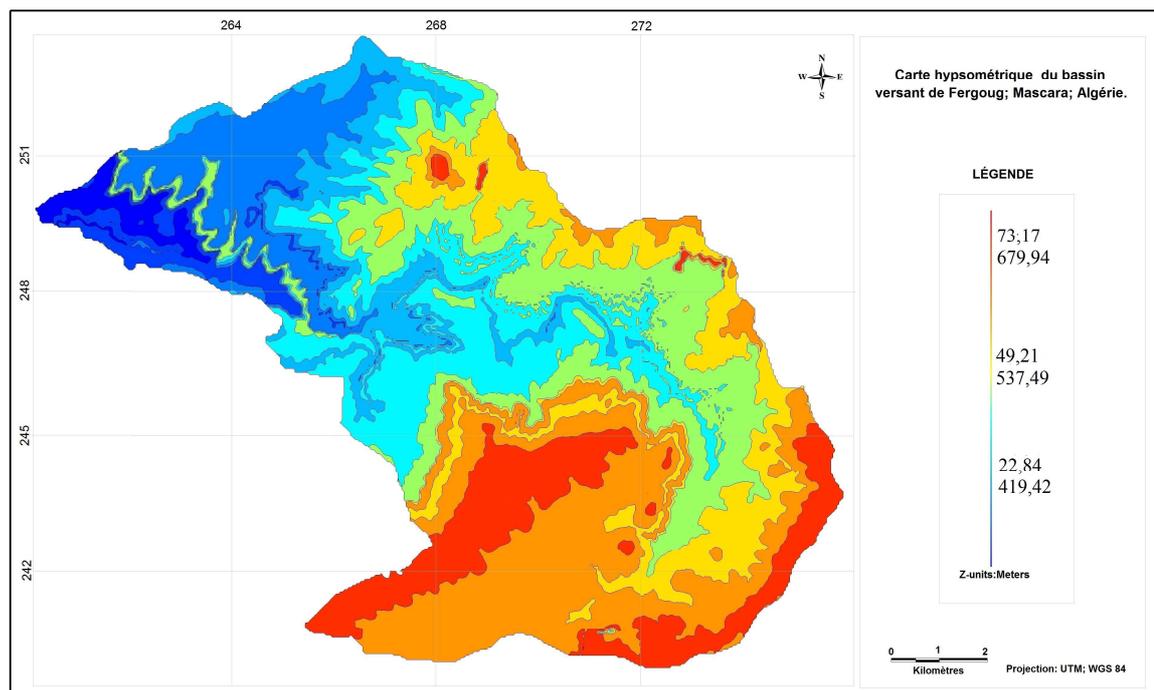


Figure 20 : carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Fergoug

La carte des pentes (fig. 21) réalisée à partir du Modèle Numérique du Terrain (MNT), montre que les pentes supérieures à 12.5 % représentent 60 % de la surface du bassin versant.

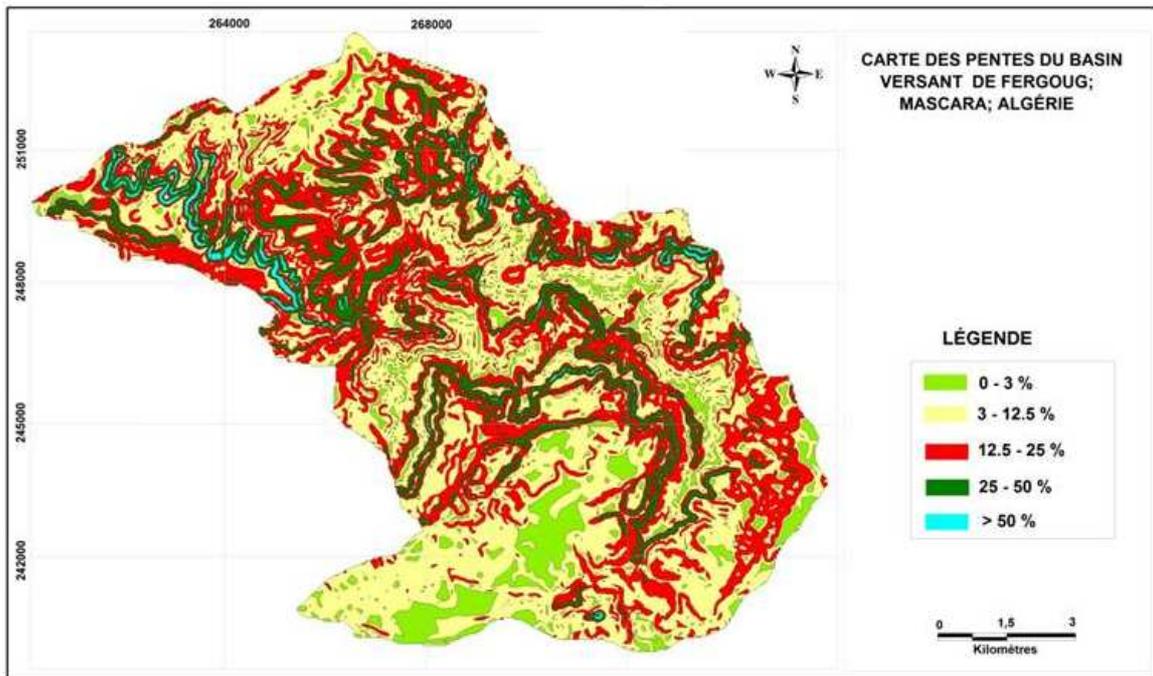


Figure 21 : carte des pentes du bassin versant de de l'Oued Fergoug

5.1. Caractéristiques physiographiques

Les différents paramètres morphométriques interviennent, et souvent de façon combinée dans les modalités de l'écoulement (Mebarki, 1984). L'utilisation des différents types de paramètres morphométriques a pour but la quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant. Les différentes caractéristiques du bassin versant de Fergoug sont reportées dans le tableau 5.

Réseau hydrographique

Les monts de Beni Chougrane sont fortement découpés par un réseau hydrographique dense (fig. 22). La plupart des cours d'eau atteignent la mer malgré les barrières montagneuses qu'ils franchissent par des gorges étroites. L'oued El-Hammam, artère principale, après avoir drainé à son amont tous les monts de Saïda et la plaine de Ghris, franchit le massif des Beni Chougrane grâce à un système de fractures, en empruntant de nombreux méandres et suivant une pente très faible de l'ordre de 2 à 3 %. Le réseau hydrographique de forte densité de drainage est composé du cours d'eau principal, Oued El Hammam et d'une série de tributaires dont les ramifications s'étendent vers les parties les plus hautes du bassin versant. Le débit de l'oued El Hammam est très irrégulier.

Plusieurs barrages recueillent l'eau de ces montagnes qui constituent un vaste impluvium (surfaces de réception des eaux de pluie) pour alimenter les périmètres irrigués. Les eaux superficielles du bassin de l'Oued El-Hammam sont régularisées par les barrages d'Ouizert (101 hm^3), Bouhanifia (72 hm^3) et Fergoug (17 hm^3) (Rémini, 2000).

L'Oued Fergoug fait partie des tributaires de l'Oued El Hammam. Le bassin de l'Oued Fergoug est caractérisé avec une forte densité de drainage ($0,81 \text{ km/km}^2$). Les paramètres indiquant la sensibilité à l'érosion linéaire du bassin versant de l'oued Fergoug sont la densité de drainage et le coefficient de torrencialité (tabl. 3). Les cours d'eau prennent naissance au niveau des versants par des ravins et ravines qui convergent vers les collecteurs principaux drainant ainsi tout le bassin. Les ravins constituent autant de drains de ruissellement donc de transport solide des produits de l'érosion.

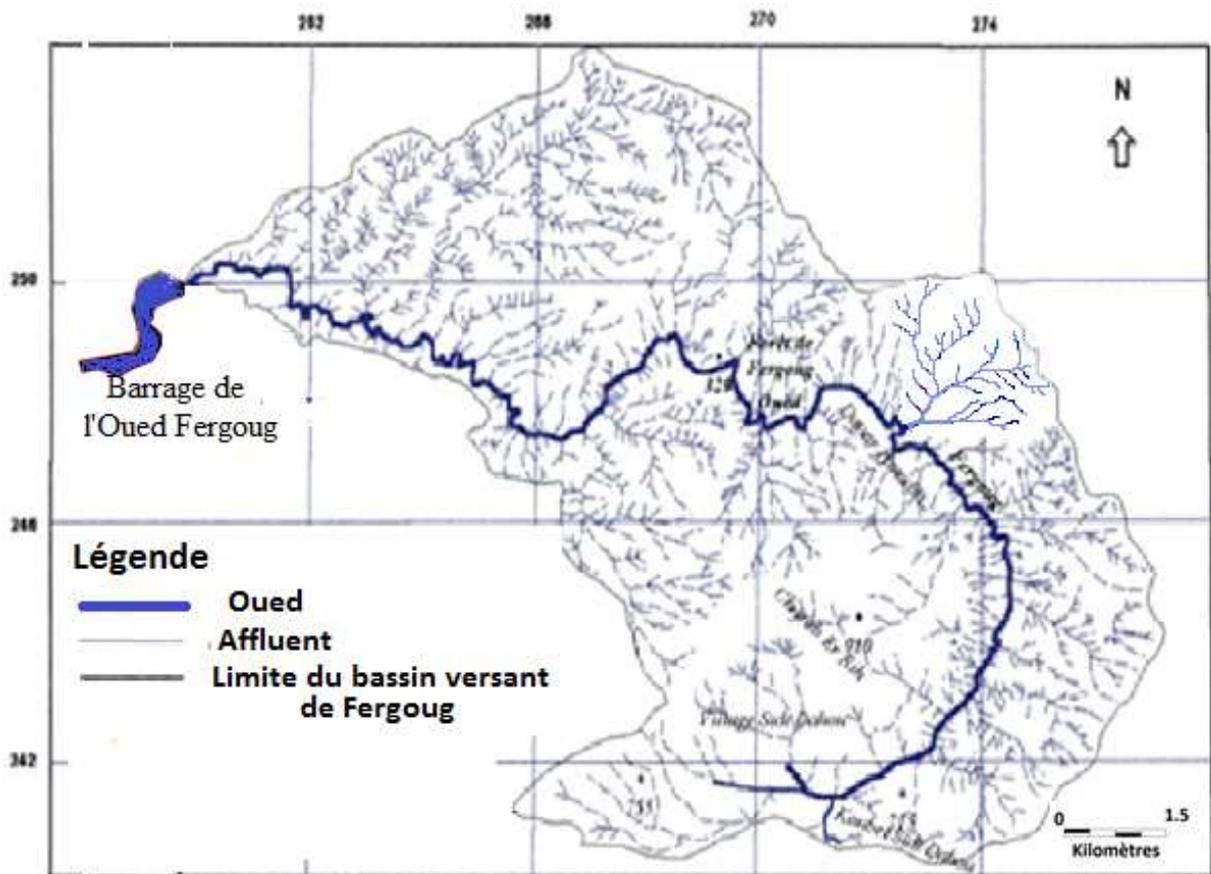


Figure 22 : carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Fergoug

Tableau 3 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Oued Fergoug

Caractéristiques		Symbole	Unité	Valeur
Superficie		A	Km ²	566
Périmètre		P	Km	107
Indice de compacité		Kc	---	1.26
Rectangle Equivalent	Longueur	L	Km	39.03
	Largeur	L	Km	14.50
Indices de pente	De Roche	Ip	%	1.35
	Globale	Ig	%	1.50
Altitude	Maximale	H max	M	840
	Minimale	H min	M	50
	Médiane	H med	M	382.5
	Moyenne	H moy	M	400.4
Pente moyenne		Imoy	%	2.02
Dénivelée spécifique		Ds	m	356.58
Classe du relief		-	-	Fort
Longueur du thalweg principal		Lo	Km	56.2
Densité de drainage		Dd	Km/Km ²	0.81
Coefficient de torrentialité		CT	-	0.085
Temps de concentration		Tc	heures	11 ^H 59'

II.6. COUVERT VEGETAL

Les formations végétales arborées (forêts et maquis) couvrent environ 16 % (BNEDER, 1982). Cette couverture naturelle, très dégradée, présente de mauvaises qualités de densité de recouvrement et de régénération (Benchetrit, 1972; Miloudi, 1998).

Les parcours issus de forêts dégradées et des terrains appauvris, jadis cultivés, sont caractérisés par une végétation très clairsemée, avec un envahissement de plantes épineuses et non palatables (Morsli et *al.*, 1988). Cette végétation est loin de protéger les sols de l'érosion.

La dégradation et la disparition progressive du couvert végétal sont attribuées beaucoup plus aux activités anthropiques (défrichement, surpâturage, incendies...). L'effet cumulé des différentes pressions humaines a des répercussions non négligeables sur le plan environnemental et socio-économique.

On assiste actuellement au recul de la forêt par la surexploitation, le défrichement et l'incendie. Le tapis végétal de l'Algérie entière a subi des modifications importantes dans le sens parfois d'une dégradation irréversible (Quezel, 1974).

Les formations forestières de la zone d'étude, comme toutes les forêts du Tell oranais, connaissent des problèmes de dégradation (Benchetrit, 1972). Ce patrimoine forestier a connu,

depuis des décennies, une continuelle régression due principalement à l'impact conjugué de l'homme et du climat. Les superficies boisées, autrefois riches et denses, deviennent désormais clairsemées et dégradées. Situées dans un milieu fragile profondément perturbé par des utilisations multiples, les forêts se trouvent confrontées à de mauvaises conditions édaphoclimatiques (sécheresse prolongée et dégradation des couvertures pédologiques) et à une pression anthropique. Ces conditions concourent à une évolution régressive et à une accélération des processus de dégradation de ces couverts forestiers.

Sur le plan écologique et phytoécologique, de nombreux travaux (Quezel, 1974, Bouazza, 1991) consacrés à ces formations forestières de l'Ouest algérien ont constaté une dégradation de la végétation. Sous cette pression permanente, les forêts se transforment en matorrals. Ces derniers sont clairsemés et détruits à leur tour pour céder la place aux espèces épineuses (Morsli et al, 1988). Les risques d'une aggravation de l'appauvrissement du patrimoine floristique de cette région sont donc réels. Les conditions climatiques et la pression anthropique ont conduit dans certains endroits à un changement de la nature de la végétation par une modification de la composition floristique : la disparition de certaines espèces subhumides et l'apparition d'autres d'espèces arides et la disparition de strates arborées au profit des strates buissonnantes (Bouazza, 1991).

II.7. FACTEUR HUMAIN

Les aspects socio-économiques et l'effet des pratiques culturelles ont un grand impact sur l'érosion et la conservation des sols. Les enquêtes effectuées dans cette zone (Morsli et al, 1988) ont révélé que la densité de certains bassins versants est trop élevée pour un système de production très extensif (100 habitants/ha de surface agricole utile). Ces fortes densités localisées s'expliquent par la relative richesse des potentialités de ces bassins. La densité joue un rôle non négligeable sur l'érosion par la masse humaine qui exerce une grande pression sur un terroir dont l'exiguïté et les lacunes sont évidentes. La nécessité de produire plus sans intensifier a poussé les paysans à cultiver de grandes surfaces dans des zones de plus en plus fragiles. Le paysan a une stratégie basée sur le court terme qui se conçoit aisément lorsque l'on considère ses conditions de vie. Le souci d'en tirer le plus vite possible des revenus sans investissement contraste avec le souci de la préservation et de l'adaptation des modes d'exploitation des ressources plus adéquats.

La population totale vivant dans les monts de Béni-Chougrane s'élevait à 275 310 habitants, soit 39 330 ménages avec une densité moyenne de 96 habitants au km² et 16 % des ménages (6365)

sont considérés urbains du fait qu'ils ne vivent pas directement de l'agriculture et qu'ils sont installés dans les chefs-lieux des communes.

Comme pour le reste du pays, la population des monts de Béni-Chougrane est jeune dans son ensemble, environ 57 % de la population a moins de 25 ans. La tranche de la population ayant entre 15 et 24 ans est élevée et représente 25 % de la population totale. Dans la région des Béni Chougrane, les principales ressources sont l'agriculture de subsistance et l'élevage extensif.

L'explosion démographique a entraîné un partage excessif de la terre entre les héritiers. D'après les enquêtes que nous avons réalisées dans trois micro bassins versant (Morsli et *al.*, 1988), en moyenne une exploitation est faite de six parcelles éparpillées, avec des variations allant de 1 à plus de 60 parcelles (tabl. 4).

Tableau 4 : morcellement des terres dans le Bassin versant de Fergoug

Localité	Surface de l'exploitation (ha)			Nombre de parcelles par exploitation		
	Mini	Maxi	Moy.	Mini	Maxi	Moy.
Hdadja	01	15	04	01	20	07
Ouled-Seghir	0.5	35	04	01	60	06

La parcellisation est aggravée par le partage des terres en pente qui se fait du haut vers le bas des collines. Ce partage aboutit, souvent à des lopins de terre étroits et longs, rendant difficile la pratique de labours en courbe de niveau. Il existe une mauvaise distribution de la terre puisque 50 % des exploitations possèdent une exploitation de 0.5 à 5 ha se partageant ainsi 24 % de la surface agricole utile (SAU) alors que seulement 5 % possèdent une exploitation de plus de 15 ha et contrôlent 18.5 % de la S.A.U. Cette situation est d'autant plus grave que les terres sont de mauvaises qualités et que l'érosion est intense.

II.8. SPECIFICITES DE L'AGRICULTURE DES MONTS DE BENI CHOUGRANE

L'agriculture dans les zones de ces monts se pratique dans le cadre d'un système agro-sylvo-pastoral. Les cultures occupent des surfaces importantes (fig. 23). L'activité purement agricole demeure dominée par la céréaliculture. Les paysans défrichent et labourent les terres sur les versants marneux ou calcaire, souvent sur des pentes fortes. Avec le temps, le sol s'appauvrit et devient de plus en plus sensible à l'érosion et même les terres laissées en jachère mais souvent pâturées, n'apportent pas autant en repos. Sans aucune forme d'investissement sur ces terres qui

sont exploitées d'une façon continue, la baisse des rendements suite à l'appauvrissement et à la dégradation des sols et le désir d'augmenter le revenu, oblige les paysans à labourer de nouvelles terres.

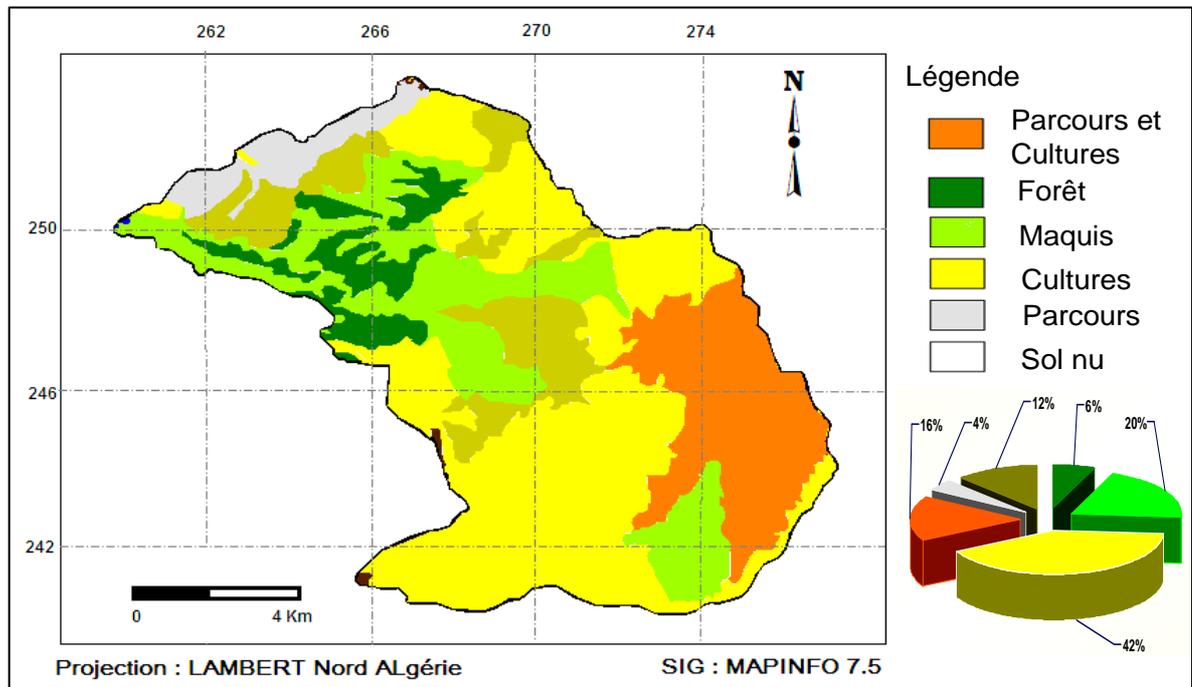


Figure 23 : carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Oued Fergoug

Les sols labourés sont mis à nu au début de la saison pluvieuse et sont livrés à l'agressivité des pluies, surtout ceux des pentes qui sont continuellement érodées par les eaux de ruissellement. Le travail du sol est ressenti parfois comme un moyen efficace contre l'érosion.

Les cultures par leur taux de recouvrement et leur calendrier d'occupation ont un grand impact sur l'érosion. Durant la première période des pluies (septembre-décembre), le sol est presque nu. C'est à partir de janvier que certaines cultures commencent à couvrir le sol, mais la densité de recouvrement pour la plupart des cultures est faible. Ces conditions ne font qu'accroître la sensibilité des sols à l'érosion.

L'élevage extensif est une autre composante essentielle de l'activité agricole. Il constitue une soupape de sécurité pour équilibrer le budget familial. Il s'appuie sur différentes ressources fourragères : les parcours des espaces des collines, les jachères et la forêt. Cette activité très ancienne, qui occupe une bonne place dans la vie économique de la population, semble un élément déterminant de la dégradation de la couverture végétale. Le surpâturage entraîne la réduction du couvert végétal et le tassement du sol et par conséquent le ruissellement et l'érosion. Mais il

faudrait savoir si la dégradation provient de la présence des troupeaux ou bien si on ne laisse aux troupeaux que les terres trop dégradées par l'agriculture.

Les systèmes de production en vigueur dans ces zones de montagne ont cependant du mal à assurer leur pérennité. Les montagnes sont en effet soumises à un déséquilibre qui les condamne à plus de marginalisation. Les ressources naturelles de ces monts sont en effet mal utilisées et quelquefois surexploitées et ne peuvent à elles seules subvenir à l'ensemble des besoins d'une population de plus en plus exigeante. Ce massif de montagnes est relativement enclavé et sous-équipé et très peu pourvu en services sociaux de base.

L'agriculture est en pleine mutation. Les pressions excessives exercées sur ces monts sont à l'origine de la dégradation des écosystèmes forestiers et pastoraux. Cette dégradation a comme conséquence une régression du niveau de vie des populations montagnardes. Il en résulte l'accélération de l'appauvrissement du milieu, la marginalisation des populations et l'exode rural.

II.9. DYNAMIQUE D'OCCUPATION DES SOLS

La démographie, les changements climatiques et la nouvelle politique agricole ont créé une nouvelle dynamique d'occupation des sols. Celle-ci évolue dans le sens de la diminution des certaines cultures et l'extension ou l'introduction d'autres cultures. On assiste actuellement à un regain d'intérêt pour l'arboriculture, en particulier pour les arbres rustiques (Morsli et *al*, 1988). L'extension de cette spéculation est encouragée par les nombreux projets de plantations et d'aménagements. Pour ce qui est des céréales, nous assistons à une tendance à la reconversion des systèmes. Les changements anticipés en matière de systèmes de culture ne manqueront pas d'affecter le secteur de l'élevage. Cette reconversion constitue un saut qualitatif important en matière de lutte contre la pauvreté et de protection de l'environnement et une adaptation appropriée de l'agriculture aux défis actuels.

Des risques réels sont toutefois associés à cette évolution. Certains ont déjà fait leur apparition, à savoir une exploitation excessive des ressources en eau qui hypothèque leur durabilité. Cette tendance nécessite une adéquation entre « les vocations agricoles » des terres et les productions qui y sont réalisées et doit être orientée vers des spéculations plus adaptées et plus rentables et qui possèdent encore un avantage compétitif. Les atouts de la diversité du milieu naturel confèrent à cette zone de grandes opportunités de diversification de sa production agricole. Celle-ci doit favoriser une évolution progressive des systèmes de culture conventionnels, dominés par la

céréaliculture, vers des systèmes plus rémunérateurs qui valorisent au mieux les vocations et les aptitudes des ressources naturelles.

II.10. GRAVITE DE L'ÉROSION ET ENJEUX

L'accélération de l'érosion ne cesse de s'amplifier avec le temps et risque de compromettre le dynamisme et la durabilité de l'agriculture dans cette zone (Morsli et *al*, 2004). La dégradation des terres est profonde (planches 1, 2 et 3) et l'érosion accélérée menace le devenir des populations concernées et continue de poser de sérieux problèmes aux collectivités locales. Dans le scénario de la persistance de ces phénomènes, la situation devient de plus en plus préoccupante et même critique. La maîtrise du ruissellement et de l'érosion est devenue donc un enjeu prioritaire.

Cette zone qui constitue un enjeu socio-économique important pour la région est très affectée par l'érosion. L'accélération de l'érosion ne cesse de s'amplifier avec le temps et risque de compromettre le dynamisme et la durabilité de l'agriculture dans cette zone (Morsli et *al*, 2004). Si les facteurs physiques ont un rôle important, principalement à cause de la fragilité du milieu physique et de l'agressivité climatique, nous remarquons que l'action anthropique devient de plus en plus déterminante. L'augmentation de la population, le défrichement, le surpâturage et l'utilisation des techniques inadaptées sont autant de facteurs liés à l'homme qui ont accentué le phénomène de l'érosion et de la dégradation des ressources naturelles. L'interaction entre tous ces facteurs (fig. 24) ne peut donc qu'engendrer des processus érosifs dont les actions iront dans le sens d'un déséquilibre écologique et social.

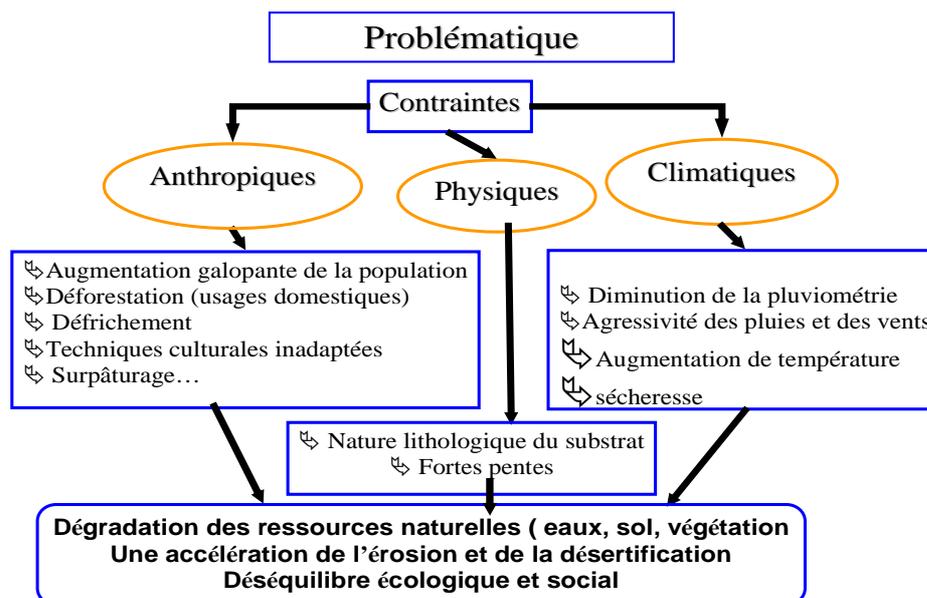


Figure 24 : facteurs d'accélération des phénomènes de dégradation et d'érosion du sol

L'accélération de l'érosion ne cesse de s'amplifier avec le temps et risque de compromettre le dynamisme et la durabilité de l'agriculture dans cette zone (Morsli et al, 2004). La dégradation des terres est profonde (planches 1, 2 et 3) et l'érosion accélérée menace le devenir des populations concernées et continue de poser de sérieux problèmes aux collectivités locales. Dans le scénario de la persistance de ces phénomènes, la situation devient de plus en plus préoccupante et même critique. La maîtrise du ruissellement et de l'érosion est devenue donc un enjeu prioritaire.

La carte de sensibilité à l'érosion (fig. 25) qui est réalisée en croisant la carte lithologique avec la carte des pentes et de l'occupation du sol, montre que plus de 80 % des terres présentent une sensibilité moyenne (63,3 %) à forte (19,9 %).

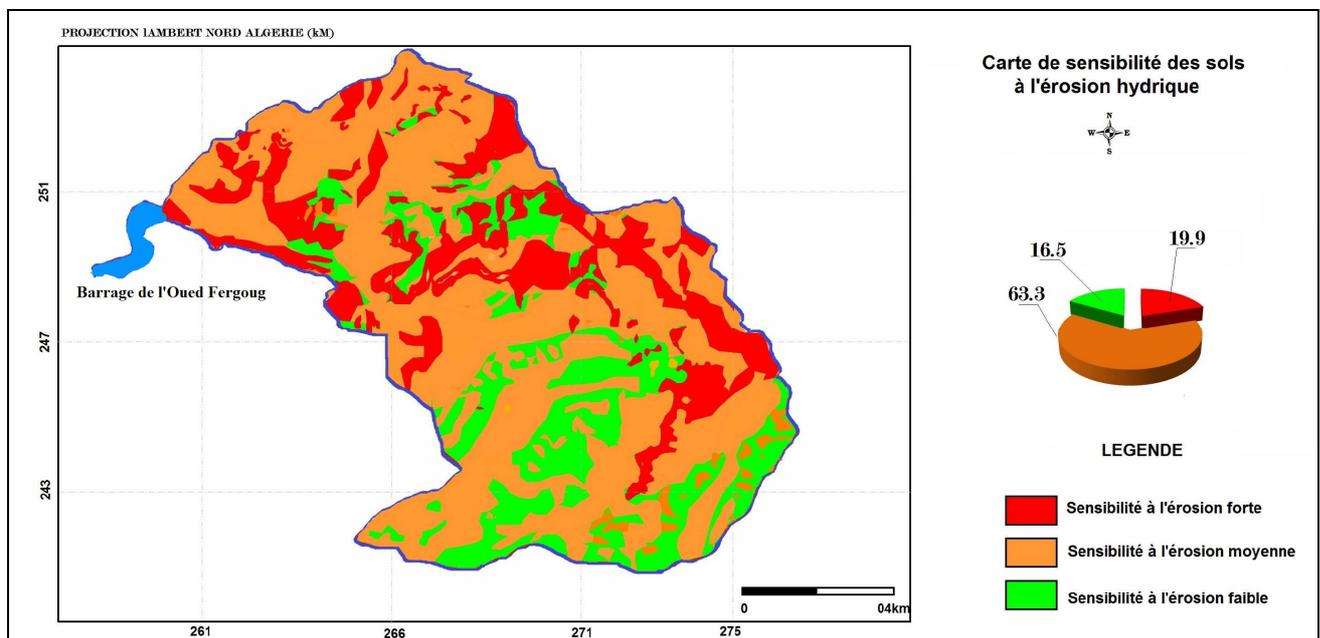


Figure 25 : carte de sensibilité des sols à l'érosion dans le bassin versant de Fergoug

Il s'agit d'une zone où l'érosion est apparente, de nombreuses ravines denses et profondes entaillent le relief. Les terres très dégradées et très ravinées sont généralement perdues pour toute pratique agricole. Les sols sont pratiquement érodés et les oueds en période de crue charrient de grandes quantités de sédiments et menacent en aval sérieusement les ouvrages hydrauliques (barrages, retenues collinaires) par l'envasement.

Les conséquences sont donc très importantes tant sur le plan physique que sur le plan humain (planche 4). Les effets néfastes de l'érosion sont nombreux:

- Diminution de la fertilité et de la productivité du sol qui résulte de la détérioration des qualités du sol. L'érosion est très apparente : décapage du sol, déchaussement et arrachement des

plants, ensevelissement des semis, hétérogénéité des rendements, formation de ravines denses et profondes qui entaillent le relief et rendant quelquefois les terres perdues pour toute pratique agricole.

- Envasement des barrages et des retenues collinaires par l'entraînement des matériaux du sol lors des fortes averses vers les retenues (tabl. 5). Outre le problème de la diminution des réserves en eau, l'envasement pose le problème de stabilité des ouvrages et de comblement et de colmatage des canaux d'irrigation. Dans le cas du barrage de Fergoug, l'envasement du réservoir présentement près de 98%. En effet, sa capacité en 2004 est d'environ 0,12 hm³ (TESCULT, 2004), alors qu'elle était de 18 hm³ lors de sa mise en eau en 1970. En plus, un dragage effectué en 1989 a permis de redonner 6 hm³ à la capacité utile

- Destruction des infrastructures : endommagement des routes par l'eau qui provient des terres arables (les profondes ravines qui se forment en bordure des routes résultent souvent de l'action des eaux qui viennent des champs situés en bordure du chemin), inondation des terrains et des villes et destruction des ouvrages de travaux publics comme les ponts. Actuellement avec le tracé de l'autoroute Est-Ouest, beaucoup de massifs montagneux sont traversés. Cette grande infrastructure routière a provoqué beaucoup de perturbations (glissement de terrain, instabilité...) et la création de surfaces imperméables qui favorisent le ruissellement. Si des mesures appropriées ne sont pas prises pour gérer le ruissellement, ces eaux de surface contribueront encore plus à l'accélération du phénomène érosif.

Du fait de l'érosion accélérée qui affecte les sols et de ses conséquences très néfastes sur différents plans (socioéconomique et environnemental), leur conservation est devenue un enjeu :

Enjeux agricoles : la conservation du potentiel agricole (l'activité agricole est d'une importance économique majeure dans ces monts) constitue un enjeu pour le maintien de la structure sociale et économique ;

Enjeux territoriaux : la dégradation des terres marginales peut mener à leur abandon et à la migration de populations rurales, ce qui pose de graves problèmes économiques et sociaux en termes d'aménagement du territoire et d'emplois ;

Enjeux paysagers et enjeux environnementaux: l'érosion a des impacts majeurs sur tous les autres compartiments et porte atteinte au maintien de la production et à la composition et à la diversité de la flore et de la faune, ainsi qu'aux cycles de l'eau et des nutriments.

La prise en compte de l'érosion des sols dans une politique environnementale et agricole durable représente donc une priorité, car elle revêt un caractère d'irréversibilité. L'érosion provoque des dégâts aux terres agricoles, mais a aussi des conséquences au-delà du sol lui-même, puisqu'elle entraîne des dégâts importants sur différents plans et où certains dégâts peuvent faire même l'objet de demandes d'indemnités surtout lors des catastrophes naturelles liées à des pluies exceptionnelles.

Tableau 5 : envasement rapide des retenues – exemple de quelques retenues collinaires envasées ou emportées, implantées dans les monts de Beni chougrane (Habi et Morsli, 2011)

Retenue collinaire	Année de réalisation	Capacité (m ³)	Superficie du B.V. (km ²)	Envasement (%)	Année
Sidi lakhdar	1988	60 000	03,17	100	1989
Sidi A. Djebbar	2002	40 000	15,72	Emportée	2002
Bouhanifia	2002	20 000	06,93	Emportée	2002
Sidi Droni	1988	25 000	17,68	100	1990
El Hammar	1988	30 000	3,13	100	1990
Bouziri	1988	50 000	1,25	100	1996
Grara	1987	20 000	0,48	100	1992
Brame	1992	400 000	28,92	25	2007

II.11. STRATEGIES DE CONSERVATION DE L'EAU ET DU SOL DANS LES MONTS DE BENI CHOUGRANE

Les stratégies de CES dans cette zone, sont de deux types : traditionnelles (planche 5), menées par la population locale et modernes ou étatiques (planche 6).

Dans les monts de Beni Chougrane comme c'est le cas de tous les monts de l'Ouest algérien, la conservation et la gestion des bassins versants a obéi à différentes politiques qui ont abouti à des résultats mitigés depuis la création du service de la défense et restauration des sols (DRS) en 1941 (INRF, 1994; Taabni et Kouti, 1993; Roose et al., 1996; Arabi et al., 2004; Morsli, 2008).

11.1. Stratégie DRS/ bilan de la DRS

La Défense et Restauration des Sols (DRS) s'est développée en Algérie, puis autour du bassin méditerranéen pour faire face à de graves problèmes d'envasement des barrages et de dégradation d'infrastructures. Cette stratégie d'équipements hydrauliques lourds fut développée par l'administration des eaux et forêts pendant la période 1940 et 1978 (Putod, 1956 ; Plantié, 1961 ; Monjauze, 1964 ; Gréco, 1979) et tient à la fois de la Restauration des Terrains de Montagne

(RTM) et de la Conservation de l'Eau et du Sol (CES). La préoccupation des forestiers était d'abord de conserver les sols et de régénérer l'agriculture, et cela s'est fait dans le cadre de la « Rénovation rurale » (Monjauze, 1964). Cette stratégie de DRS comprend :

- Le terrassement des champs cultivés (350.000 ha de banquettes (à un coût de 5 000 à 10 000 FF l'hectare ; Heusch, 1986).
- La correction torrentielle dans le périmètre de protection des barrages.
- La reforestation (800 000 ha depuis 1962 (Mazour, 1992).

Mais ces actions se sont déroulées dans un contexte politique autoritaire et l'action sociale de lutte contre le chômage est devenue rapidement prioritaire (creusement de fossés) (Mura, 1992).

En fin 1966, plus de 45 000 ha sont traités par la DRS (Gréco, 1966), ce sera 350 000 ha selon Heusch (1986) et 450 000 ha selon Kadik (1987). Jusqu'en 1980, l'état prenait en charge l'inscription et la réalisation des travaux de DRS, mais suite à la crise économique de 1980 et comme l'heure était aux bilans sur les techniques antiérosives utilisées jusque-là de par le monde, beaucoup de controverses accompagnaient l'efficacité des traitements de la DRS particulièrement la banquette, appliquée en réseau au niveau du versant. Cette situation était suffisante pour installer le doute au sein des instances chargées de l'inscription et la réalisation de tels projets. En 1986, les traitements en banquettes ont été arrêtés et une enquête sur la DRS en Algérie fut lancée par l'équipe d'érosion de l'INRF (Institut National de Recherche forestière) en collaboration avec l'IRD (ex ORSTOM-France) et la DGF (Direction générale des Forêts), en vue d'une évaluation administrative et scientifique quant à l'efficacité de ces aménagements.

L'enquête sur la DRS (INRF, 1994) a permis de mettre le point sur cette stratégie de DRS. Les résultats obtenus dans la zone de Beni chougane ont permis de recenser plusieurs types d'aménagements couvrant de grandes superficies (tabl. 6). Considérée comme une technique sûre qui a fait ses preuves aux Etats-Unis, la banquette n'a pas fait l'objet de recherche d'adaptation locale, mais a souvent été utilisée en dehors de son domaine de validité (Roose, 1987). Or, une grande partie des aménagements a été réalisée sur roche tendre, et sur des terres privées. La majorité des paysans ont rejeté cette technique et ont refusé d'entretenir les banquettes, car elles consomment plus de la surface agricole utile (5 à 15 %) sans pour autant améliorer les rendements des cultures.

Tableau 6 : travaux réalisés dans le cadre de la DRS dans la zone de Mascara (INRF, 1994)

Types d'aménagements Rencontrés	Surfaces en Has	Pentes Altitude		Lithologie dominante	Etat ouvrage		Valorisation 1 à 3
		CL	M		bq 1 à 5	inter bq 1 à 3	
Banquettes	300	2/3	400 à 600	Argile+Grés+Cal	1	1	1 vigne+arbo
Banquettes	100	3	400 à 600	Grés +sable	2	1	3 forêt nat.
Banquettes	600	2	400 à 600	Marne+Calcaire	1	1	2 (grés)
Banquettes	500	2	200 à 400	Calcaire	1	1	3 (forêt nat.)
Banquettes	600	33	200 à 400	Marne + Cal.	1	1	1 (forêt)
banquettes + Correction torrentielle	762		400 à 600	Argile + Calcaire	1	1	1 céréale/arbo
Banquettes + Reforestation	250	1	400 à 600	Argile + sable	1	1	1 (forêt)
banquettes	150	2	200 à 400	Grés +sable	2	1	1 (forêt)
Banquettes + Reforestation	638	2	400 à 600	Grés +sable	1	1	1 céréales+forêt
Grand aménagement mixte (banquettes + RTM+Végétalisation)	2. 964	1/2/3	400 à 600	Calcaire			
(banquettes + Végétalisation)	4503	2	200 à 400	Calcaire tendre			
(banquettes +RTM + Végétal.)	3. 500		400 à 600	Calcaire + grés			
Correction torrentielle 8000 m3	2. 000 s	2	200 à 400	Marne + argil.			
Correction torrentielle 8000 m3	1. 000 s		200 à 400	Calcaire			

Bq : banquette ; CL : pente faible à forte (1,2,3) ; Etat ouvrage 1 à 5 (fonctionnel à détruite).

La lutte contre l'érosion a été perçue par l'administration comme un problème purement technique, d'où la diffusion généralisée d'ouvrages mécaniques sur de vastes surfaces sans pour autant associer les paysans à leur prise en charge ni à leur entretien. Le coût des aménagements est très élevé (Roose et *al*, 1996).

11.2 Aménagement intégré

Après l'arrêt de la stratégie de DRS, une nouvelle démarche a été mise. Cette approche d'aménagement intégré, visant à la fois la protection des milieux naturels, la reconversion des systèmes de culture et de production et l'amélioration du niveau de vie de la population.

Cette approche s'est traduite par des actions de conservation du sol et de développement (développement de l'arboriculture et de la vigne, amélioration foncière, réalisation des retenues collinaires, aménagement de pistes...)

Les actions de CES (lutte contre l'érosion, l'amélioration des pâturages, la mobilisation et la gestion des eaux pluviales...) ont été intégrées dans un processus d'aménagement rural intégré. Les programmes ont été élaborés sur la base d'un plan d'aménagement agro-sylvo-pastoral auquel devraient être rattachées des réalisations d'infrastructures et d'équipements pour l'amélioration des conditions de vie des populations

Contrairement au service de la DRS qui était un service distinct et indépendant et qui avait une mission claire et limitée, l'administration forestière algérienne a eu en mission, beaucoup de charges (Taabni, 1998). Ainsi, les problèmes d'érosion n'avaient plus la priorité comme ils l'avaient à l'époque de la DRS. Les actions de gestion conservatoire de l'eau et du sol étaient devenues de simples opérations ponctuelles d'aménagement sans effet dynamique sur les comportements et les pratiques agraires. Et on a continué à appliquer des démarches fondées sur des modèles techniques à forte composante forestière. On n'a agi que de façon marginale sur l'amélioration des techniques culturales de CES.

Les échecs sont dus en grande partie à la non concertation avec les populations paysannes installées dans les bassins versants. Ces communautés n'ont été associées ni à la conception ni à la réalisation des programmes d'aménagement. Les insuffisances des études de base relatives aux processus érosifs et leur spatialisation ont induit des interventions empiriques et mal ciblées. Le contenu des programmes apparaît marqué par la vision forestière et techniciste. Le manque d'intégration des actions au niveau de l'espace agricole, la gestion déficiente des réalisations et le délaissement de la vulgarisation de techniques au niveau des exploitations dans un contexte agricole en crise- sont les autres facteurs importants des échecs de projets qualifiés par leurs promoteurs d'agro-sylvo-pastoraux (Taabni, 1998).

11.3. Stratégies actuelles

L'expérience montre que les politiques descendantes ne sont plus appropriées à la situation actuelle et contribuent à l'aggravation des problèmes. Ces politiques ont déterminé la prise de conscience de la nécessité de réinventer les outils de développement de politique rurale et de poursuivre des stratégies de création de moyens d'existence sûrs et diversifiés, de responsabilisation de la population, de protection de l'environnement et d'adaptation aux spécificités locales.

Actuellement, la protection et la maîtrise des milieux physiques et la lutte contre l'érosion constituent un objectif national. Il s'agit de préserver les ressources naturelles (eaux, sols, ressources végétales), restaurer les terrains dégradés, reboiser et améliorer les conditions de vie des populations rurales et leurs revenus par la mutation des systèmes de culture et leur diversification.

La stratégie actuelle de développement rural durable (SDRD), nouvelle stratégie nationale de développement rural sur un horizon décennal (2005/2015) et le plan de renouveau rural (août 2006), s'articulent autour de :

- l'amélioration des conditions de vie des populations rurales
- l'emploi et des revenus par la diversification des activités économiques,
- renforcement de la cohésion sociale et territoriale,
- la protection de l'environnement et de la valorisation des patrimoines ruraux.

Outre la définition des fondements de la politique de renouveau rural, la commission nationale de développement rural a récemment validé le Système d'Aide à la Décision pour le Développement Rural (SADDR) et le Projet de Proximité de Développement Rural Intégré (PPDRI) en tant que démarches et outils d'intégration des interventions sectorielles au niveau d'un territoire.

La nouvelle stratégie nationale de développement rural sur un horizon décennal (2005/2015) s'articule autour de ces composantes, menée avec une approche participative et ascendante dans l'identification et la réalisation des actions. La composante CES occupe une grande place et de grands moyens substantiels lui ont été consacrés

On ne peut pas parler d'une véritable stratégie de CES. Les actions de CES sont plutôt intégrées dans les grandes stratégies environnementales, dans un processus de développement rural. Elles se focalisent sur la lutte contre l'érosion, la mobilisation et la gestion de l'eau, le contrôle de la désertification et l'adoption d'une approche participative.

Actuellement, il est difficile de faire la part des choses en ce qui concerne la conservation des eaux et sols (CES) dans tous les programmes qui se chevauchent, comme il est encore tôt de faire un bilan sur les programmes qui lui sont principalement consacrés à savoir : le programme national de reboisement (PNR), le programme de développement des zones de parcours et de développement rural à travers la mise en œuvre de projets de proximité de développement rural.

11.4. Stratégies traditionnelles

Par le passé, la société rurale a toujours su mettre en œuvre des formes de gestion communautaires de l'espace, de l'eau et des terres. Les témoignages de cette organisation collective sont multiples pour celui qui veut les découvrir.

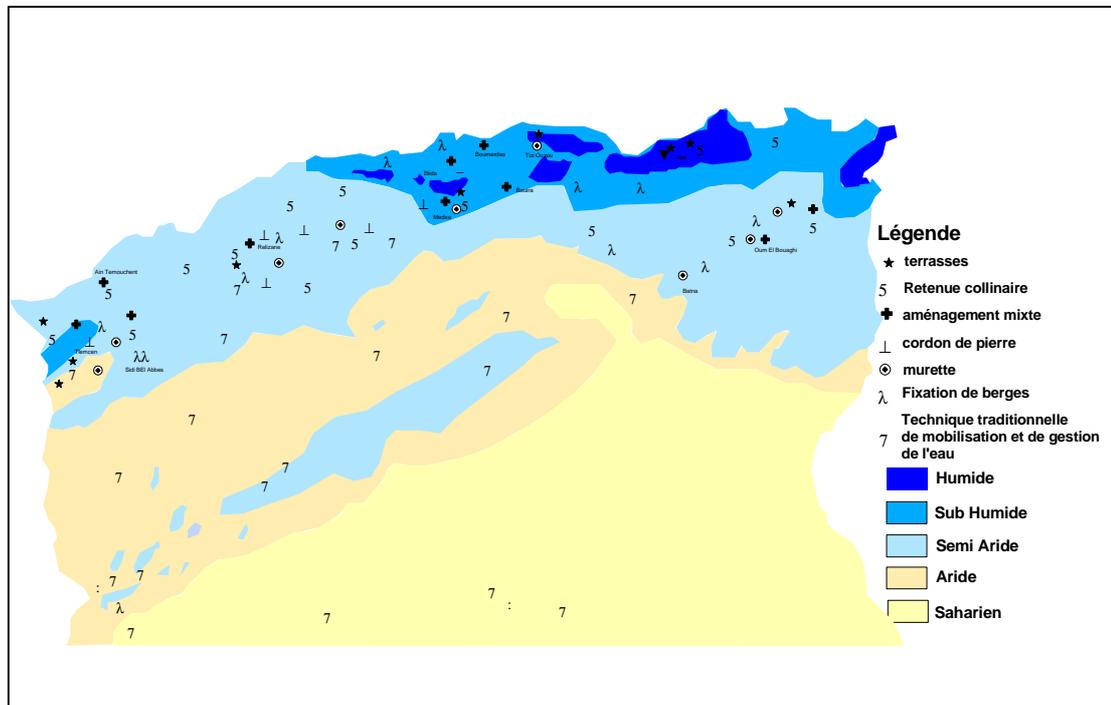


Figure 26: répartition spatiale des techniques traditionnelles en Algérie

Les populations locales ont pu mettre en place et développer certaines techniques traditionnelles permettant de gagner des aires cultivables et de réduire les processus de dégradation et d'érosion. Ces aménagements restent, malgré leur grande variété (fig. 26), émiettés et peu répandus dans l'espace (Mazour et *al.*, 2008; Morsli et *al.*, 2008; Habi et Morsli, 2011a). A partir de l'inventaire que nous avons réalisé, nous pouvons les grouper, en fonction de leur mode de confection en deux grands ensembles : des ouvrages construits (techniques de talus, de cordons, de murets et de terrasses...) et des pratiques mécaniques, biologiques et culturelles.

Certains aménagements sont très localisés, d'autres très éparpillés dans l'espace (terrasses, terrassettes, murettes, talus, cordons pierreux, haies vives, cuvettes, madjen...). Ces aménagements sont élaborés souvent sur les bas de versant et sur les rives des oueds. L'appréciation et l'évaluation de l'état actuel de ces aménagements montrent que certains sont en faible voie de disparition qui n'est pas due à leur faible efficacité, mais seulement au changement socio-économique. Par contre,

d'autres sont encore largement utilisés (cordons, cuvettes, madjen, haies vives...). Certaines techniques bien qu'elles soient destinées d'origine à délimiter ou à protéger les parcelles (talus, clôture en haies vives ou en pierre suivant les courbes de niveau). Elles ont aussi un rôle très positif dans la conservation de l'eau et du sol : Ces structures permettent de piéger des quantités importantes d'eau et de sédiments.

De nos jours, la pérennité des techniques traditionnelles n'est plus assurée. Certains systèmes traditionnels sont en voie de disparition, non pas parce qu'ils sont incapables de préserver les ressources naturelles, mais les conditions humaines ont changé. Les paysans sont confrontés à deux impératifs : augmenter la production agricole pour subvenir à des besoins de plus en plus incessants ou investir dans des aménagements dont le coût dépasse leurs moyens.

CONCLUSION

Les monts de Beni Chougrane sont très affectés par les phénomènes érosifs. Les processus d'érosion sont nombreux et leurs formes et leurs causes sont diverses. Les facteurs déterminants sont variés et leur efficacité est variable dans le temps et dans l'espace de telle sorte qu'il ne peut y avoir des recettes universelles pré établies et que chaque cas exige un diagnostic approprié.

La sensibilité du milieu est aggravée par le climat. L'irrégularité et le caractère torrentiel des pluies mettent en cause l'équilibre du milieu et rendent la conservation et la valorisation des terres de plus en plus difficiles. Les conséquences sont donc très importantes tant sur le plan physique que sur le plan humain, d'autant plus que la subsistance des paysans dépend étroitement de la pluviosité. La sécheresse a introduit des contraintes sévères. La fréquence des années de grandes sécheresses est de 20 % (Bensaad, 1993). La lithologie qui est représentée par des roches moyennement résistantes et souvent tendres, prédispose largement la région aux différents processus érosifs. Le relief est très escarpé et fortement disséqué, ayant souvent de fortes pentes et un réseau drainage très dense.

Les parcours qui sont issus des forêts épuisées et des terrains appauvris, jadis utilisés, sont caractérisés par une faible densité de peuplement et par l'envahissement des plantes épineuses non palatables. Le couvert végétal, assez dégradé et caractérisé par un faible taux de recouvrement et des mauvaises conditions de régénération est loin de protéger les sols de l'érosion.

Le facteur anthropique n'est pas étranger au rythme accéléré du phénomène de dégradation des ressources naturelles, bien qu'il ne soit pas toujours facile d'évaluer de façon précise la part de responsabilité qui lui revient dans le déroulement de ce processus. L'occupation du sol et les activités humaines ont une influence certaine sur les phénomènes érosifs. Les incendies, le surpâturage, le défrichement et la mise en culture ont réduit les espaces originellement boisés. La croissance de la population et l'abandon des terres déjà épuisées ont poussé les gens à la recherche des meilleures opportunités de vie dans les centres urbains.

Ces phénomènes sont à la base de la dégradation rapide des sols dans ces montagnes. L'interaction entre toutes ces différentes variables ne peut donc qu'engendrer des processus érosifs dont les actions iront dans le sens d'une instabilité générale du milieu.

Malgré tous les efforts engagés sur le terrain, la dégradation des ressources se poursuit à un rythme effréné. Cela tient d'une part à la modestie des programmes face à l'ampleur des phénomènes de dégradation et d'autre part à la faible intégration d'une démarche de conservation des eaux et des sols au niveau des terres agricoles et pastorales. Les actions de la conservation du sol étaient devenues de simples opérations ponctuelles d'aménagement sans effet dynamique sur les comportements et les pratiques agraires. Et on a continué à appliquer des démarches fondées sur des modèles techniques à forte composante forestière. On n'a agi que de façon marginale sur l'amélioration des techniques culturales de CES. Une véritable conservation du sol ne suppose pas seulement des structures antiérosives mais doit allier différents pratiques et techniques agricoles qui permettent d'accroître la production, le revenu, tout en protégeant le sol et en maintenant sa fertilité et même si possible en l'augmentant.

La généralisation des techniques sans études préalables, vu la diversité des conditions physiques et des processus de dégradation, les aménagistes n'accordent que très peu d'intérêt à l'étude du phénomène de l'érosion et à sa dynamique. La nature et l'intensité des processus ne sont pas suffisamment étudiées tandis que leurs causes ne sont pas bien examinées. L'importance des enjeux pour la sécurité des biens et des personnes pour la productivité agricole et pour la protection des ressources naturelles et des infrastructures. a fait apparaître la nécessité d'un diagnostic sur le dynamisme des divers processus d'érosion et sur les facteurs explicatifs. Une lutte antiérosive efficace doit passer par une bonne connaissance du comportement hydrodynamique des sols soumis aux fluctuations climatiques et à diverses utilisations du sol et en particulier de l'origine de la naissance du ruissellement.

PLANCHE 1
FORMES ET INDICATEURS D'EROSION HYDRIQUES



TERRAIN SUR SOL BRUN LIMONEUX TRES AFFECTE PAR L'EROSION EN NAPPE



EROSION LINEAIRE : EVOLUTION EN RAVINES SUR SOL ARGILEUX

SUFFOSION



EROSION REGRESSIVE (REMONTANTE)



DECHAUSSEMENT

CROTUES SUPERFICIELLES

PLANCHE 2
EROSION SUR TERRAIN MARNEUX



PAYSAGE D'UN TERRAIN MARNEUX DES MONTS DE BENI CHOUGRANE



TERRAIN MARNEUX RAVINE OCCUPE PAR LA CEREALICULTURE



EROSION EN SUFFOSION



RAVINEMENT ACCELERE



MOUVEMENT EN MASSE (GLISSEMENT)



TERRAIN TRES RAVINE « BAD LANDS »

Photo 2/1 à 2/6. [Clichés : B. MORSLI]

PLANCHE 3
EROSION SUR SOL BRUN CALCAIRE ET SOL ROUGE



TERRAIN SUR SOL ROUGE TRES SENSIBLE A L'EROSION



TERRAINS TRES AFFECTES PAR L'EROSION EN NAPPE



TERRAIN AFFECTE PAR L'EROSION EN NAPPE : SOL BRUN CALCAIRE SUR GRES



TERRAIN AFFECTE PAR L'EROSION EN NAPPE ET TRES CAILLOUTEUX : SOL BRUN CALCAIRE

Photo 3/1 à 3/6. [Clichés : B. MORSLI]

PLANCHE 4
CONSEQUENCES DE L'EROSION



4/1

ENVASEMENT DE BARRAGE – BARRAGE DE FERGOUG (PLUS DE 90% D'ENVASEMENT)



4/2

INONDATIONS DES VILLAGES PAR LES EAUX DE VERSANTS



4/3

DESTRUCTION DES OUVRAGES



4/4

RUPTURE DE DIGUES



4/5

ENVASEMENT RAPIDE DES RETENUES COLLINAIRES



4/6

DEGATS DES INONDATIONS PAR LES CRUES DES OUEDS



4/7

ENVASEMENT DES DIGUETTES

Photo 4/1 à 4/7. [Clichés : B. MORSLI]

PLANCHE 5
STRATEGIES TRADITIONNELLES DE CONSERVATION DE L'EAU ET DU SOL



TERRASSES AVEC TALUS ENHERBE



CUVETTES RENFORCEES EN PIERRES



VERSANT AMENAGE EN TERRASSES AVEC DES TALUS ENHERBE ET RENFORCEE PAR DES ARBRES



VERSANT : TERRASSES + INTENSIFICATION



TERRASSES AVEC MURETTES



AMENAGEMENT DE VERSANT : PLANTATION D'OPUNTIA



AMENAGEMENT EN TERRASSES ET APPORT DE FUMIER

**PLANCHE 6
TRAVAUX DE DRS**



RESEAU DE GRADINS



BANQUETTE SUR MARNE



RUPTURE DE BANQUETTE --- RAVINEMENT



ANCIEN RESEAU DE BANQUETTES QUI A EVOLUE EN TERRASSES PROGRESSIVES



BANQUETTE PLANTES



GRADINS PLANTES

CHAPITRE III.

MATERIELS

ET

METHODES

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

Conscient de l'évolution et de la gravité des conséquences de l'érosion qui en résultent dans ces zones cultivées de montagne, notre recherche a été donc orientée vers la compréhension de l'ampleur de l'érosion naissante et l'analyse des facteurs conditionnels. En particulier l'influence des systèmes de gestion dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion à l'échelle parcellaire et leurs effets sur la dynamique de fertilité des sols. L'étude et le suivi du comportement de ces facteurs de façon continue, événement après événement durant plusieurs années et l'analyse de leurs effets a nécessité une approche expérimentale et quantitative

L'approche est basée sur l'utilisation de parcelles expérimentales de 100 m² sur lesquelles les dynamiques érosives et les différentes situations culturales ont été analysées pendant plusieurs années. Les principales utilisations du sol des zones cultivées des monts de Beni chougane, préalablement identifiées, ont été analysées. Cette approche est complétée par l'utilisation de la simulation de pluies pour analyser certaines situations et états de surface qu'il n'a pas été possible d'analyser sur les parcelles expérimentales de 100 m².

Dans les travaux antérieurs (Morsli *et al.*, 1988; Morsli, 1996), la caractérisation des monts de Beni chougane sur le plan écologique, pédologique et socioéconomique a constitué un préalable et a orienté notre recherche. Ces travaux ont permis de ressortir les principaux types de sols et d'identifier les principales utilisations du sol des monts de Beni chougane. Sur la base de ces travaux, deux principaux types de sols de la région sont l'objet d'étude : le sol de type brun calcaire vertique (SAV), de texture argileuse, développée à partir des marnes et le sol de type brun calcaire (SBL), de texture limoneuse. Ces sols qui témoignent d'une érosion active, couvrent des surfaces importantes et sont très exploités. Les principales caractéristiques de ces deux types de sols sont données aux tableaux 7 et 8.

Deux sites de station (fig. 8) correspondant à ces situations ont été choisis.

- La station 1, correspondant au sol brun calcaire vertique (SAV), est installée dans le bassin versant de l'oued Fergoug.

- La station 2, correspondant au sol brun calcaire (SBL), est installée aussi dans le bassin versant de l'oued Fergoug.

Le choix des stations s'est porté sur les versants cultivés de profil rectiligne et régulier et là où l'érosion est plus active. Les cultures, sur ces versants, se succèdent dans le temps (rotation) et dans l'espace (assolement) avec une période de repos pour le sol (jachère). Les sols restent nus durant une grande partie de l'année.

Tableau 7 : caractéristiques analytiques du sol brun calcaire vertique (Morsli, 1996) – Sol SAV.

Sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire vertique sur marne (C.P.C.S) Vertic xérochrept thermic fine clay (U.S.D.A)				
Profondeur (cm)		0 – 15	15 – 35	35 – 50
Symbole		Ap	B	B/C
Calcaire total %		19,60	22,87	28,70
pH	Eau	8,20	8,20	8,10
CARACTERES BIOCHIMIQUES	C.O %	1,37	1,22	1,18
	N %	0,117	0,123	0,134
	M.O %	2,46	2,12	2,05
	C/N %	11,70	9,90	8,80
GRANULOMETRIE %	Argiles	57,4	59,25	57,2
	Limons Fins	28,6	30,1	32,25
	Limons Grossiers	8,6	6,93	5,68
	Sable Fin	2,9	2,22	2,45
	Sable Grossier	2,5	1,5	2,42
CLASSE TEXTURALE		A	A	A
COMPLEXE ABSORBANT Méq / 100g de terre	Ca ⁺⁺	28,45	26,10	26,40
	Mg ⁺⁺	12,50	9,50	8,40
	K ⁺	1,10	1,05	1,02
	Na ⁺	0,28	0,26	0,22
	S	42,33	36,91	36,20
	T	41,10	37,60	37,10
	V = S/T (%)	102,9	98,16	97,57
P ₂ O ₅ (Assimilable) ppm		18	15	4

Tableau 8 : caractéristiques analytiques du sol brun calcaire (Morsli, 1996) – Sol SBL.

Sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire à encroûtement calcaire (C.P.C.S) Typic xérochrept termic loamy (U.S.D.A)				
Profondeur (cm)		0 - 20	20 – 40	40 – 55
Symbole		Ap	B	Cca
Calcaire total %		30,50	40,60	60,70
pH	Eau	8,20	8,30	8,40
CARACTERES BIOCHIMIQUES	C.O %	1,04	1,01	0,97
	N %	0,099	0,099	0,096
	M.O %	1,79	1,74	1,07
	C/N %	10,72	10,20	10,10
GRANULOMETRIE %	Argiles	17,74	18,73	16,2
	Limons Fins	29,52	36,2	37,35
	Limons Grossiers	26,89	20,45	21,4
	Sable Fin	20,43	20,42	22,22
	Sable Grossier	5,42	4,2	2,83
CLASSE TEXTURALE		L.S.A	L.S.A.	L.S.A.
COMPLEXE ABSORBANT Méq / 100g de terre	Ca ⁺⁺	22,45	23,80	24,54
	Mg ⁺⁺	2,78	2,60	2,07
	K ⁺	0,98	1,07	0,86
	Na ⁺	0,36	0,33	0,30
	S	26,57	27,80	27,77
	T	25,70	26,60	27,80
	V = S/T (%)	103	106	99,89
P ₂ O ₅ (Assimilable) ppm		10	8	4

III.1. Quantification de l'érosion en nappe et en rigole et analyse des systèmes de gestion sous pluies naturelles sur des parcelles de 100 m²

1.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une parcelle limitée artificiellement de tôles. Les parcelles expérimentales sont situées sur un versant et à l'intérieur d'une exploitation agricole. Chaque parcelle de 100 m² (22,22m x 4,5m) est isolée et délimitée par des tôles métalliques enfoncées dans le sol à une profondeur de 15 cm, isolant ainsi la parcelle de tout écoulement ou infiltration de l'extérieur. En aval de la parcelle, un canal de réception en béton large de 45 cm et d'une pente de 2% dirige les eaux et les terres érodées vers un système de stockage (fig.27 et planche 8).

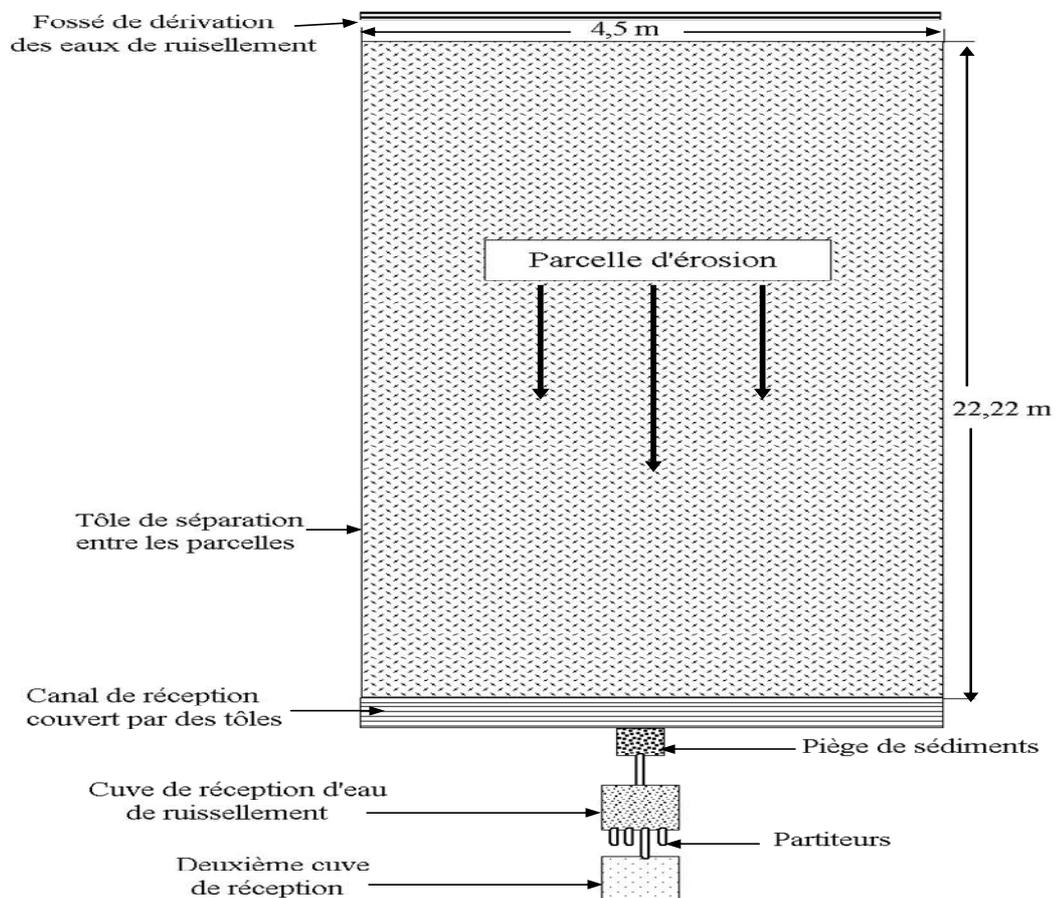


Figure 27 : dispositif expérimental, constitué d'une parcelle limitée artificiellement et équipé d'un système de stockage

La parcelle expérimentale de type wischmeier est composée de :

- Un piège à sédiments grossiers, large de 40 cm, long de 90 cm et profond de 40 cm, d'où un volume de stockage de près de 0.141 m³.

- Une cuve de 0.147 m³ de volume, reliée au piège à sédiments. Cette cuve est munie de quatre partiteurs, rigoureusement égaux est reliée à une deuxième cuve de stockage de 1 m³ de volume par un des partiteurs. Un fossé protège la parcelle du ruissellement venant de l'amont.

En 1992, nous avons implanté dix parcelles de quantification de 100 m² sur les deux principaux types de sols de la région. Les parcelles ont été groupées sous forme de stations qui sont utilisées comme site d'expérimentation : une station de cinq parcelles sur le sol brun calcaire vertique (SAV) et une autre de cinq parcelles sur le sol brun calcaire (SBL). Ces parcelles sont localisées dans le bassin versant de l'Oued Fergoug. Chaque parcelle expérimentale est représentative d'une situation bien définie du milieu montagnard.

Dans chaque station, le plan expérimental prévoit le suivi du ruissellement et de l'érosion après chaque événement pluvieux le long des saisons et durant plusieurs années pour quantifier l'ampleur de l'érosion en nappe et en rigole et étudier l'influence des systèmes de gestion.

Les parcelles ont été installées en mars 1992. Des mesures de ruissellement et de transports solides ont été réalisées, de mars à juin pour l'année 1992, sur toutes les parcelles sans traitements pour tester l'homogénéité des sites. Les mesures ont bien montré l'homogénéité de chaque station.

Caractéristiques des stations expérimentales et protocoles expérimentaux

La station de mesure correspondant au sol brun calcaire vertique (SAV) a été installée sur un versant de 40 % de pente et d'exposition Nord. Dans ce type de station, les paysans cultivent principalement du blé et du pois chiche et pratiquent un pâturage extensif. Cette station est composée de cinq parcelles expérimentales sur lesquelles les principales utilisations du sol pratiquées ont été étudiées. Le protocole expérimental est comme suit :

- Une parcelle représente le témoin international, appelée parcelle standard (PS). Elle représente un sol nu durant toute l'année (parcelle standard ou de référence qui correspond aux normes de Wischmeier). Cette parcelle doit être nue durant toute l'année, dépouillée de tous débris végétaux, sans engrais depuis trois ans et avec un binage à la houe sur 2 à 5 cm de profondeur (au maximum une fois par mois pluvieux), afin de casser les croûtes de surface. Cette parcelle est maintenue durant toute la période de mesure comme parcelle standard.

- Des parcelles qui représentent des systèmes traditionnels (témoins régionaux):

- Parcelle qui représente le système cultivé en céréales, culture de blé.
- Parcelle qui représente le système cultivé en légumineuses, culture de pois chiche.

- Des parcelles qui représentent des systèmes améliorés (utilisation des engrais, jachère protégée, amélioration fourragère) :

- Parcelle qui représente le système cultivé en céréales amélioré (engrais, travail du sol, semences sélectionnées).

- Parcelle qui représente une jachère améliorée et mise en défens (amélioration par des légumineuses (Hedysarum (sulla) + médicago) (planche 9).

La station de mesure correspondant au sol brun calcaire (SBL) a été installée sur un versant de 20 % de pente et d'exposition Nord-ouest. Dans ce type de station, les paysans cultivent

principalement de l’orge et du petit pois et pratiquent de la jachère et un pâturage extensif. Cette station est composée de cinq parcelles expérimentales sur lesquelles les principales utilisations du sol, pratiquées sur ce type de sol, ont été étudiées. Le protocole expérimental est comme suit:

- Une parcelle représentant le témoin international, appelée parcelle standard (PS). Elle représente un sol nu durant toute l’année (parcelle standard ou de référence qui correspond aux normes de Wischmeier). Cette parcelle est maintenue durant toute la période de mesure comme parcelle standard.
 - Des parcelles représentant des systèmes traditionnelles (témoins régionaux):
 - Parcelle représentant le système cultivé en céréales, culture en orge.
 - Parcelle représentant le système cultivé avec billons, culture en petit pois.
 - Des parcelles représentant des systèmes améliorés (utilisation des engrais, semences sélectionnées, jachère mise en défens) :
 - Parcelle représentant le système cultivé en céréales améliorés (engrais, travail du sol, semences sélectionnées).
 - Parcelle représentant une jachère non pâturée (mise en défens), laissée sans intervention particulière (JNP).

Ces dispositifs (tabl. 9 et 10) ont été maintenus pendant cinq ans sans aucun changement pour faire coïncider une grande variabilité de pluies et pour faciliter la comparaison entre les traitements.

Depuis, nous avons introduit des rotations de cultures telles quelles sont pratiquées sur ces types de sol. Avec l’introduction des rotations des cultures, nous avons introduit un autre traitement, c’est celui de la jachère non travaillée et pâturée (JP), système très pratiqué dans la zone.

Tableau 9 : dispositif de traitements (Analyse des systèmes de gestion sur sol SBL)

		Année de mesure 93/94 au 2012/2013																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Parcelle Standard		Sol nu (témoin)																					
Parcelle n°02		C.O.		J.P.		C.O.		J.P.		C.O.		J.M.D.		C.O.		J.P.		C.O.					
Parcelle n°03		J.M.D.		J.P.		J.M.D.		J.P.		J.M.D.		J.P.		J.M.D.		J.P.		J.M.D.		J.P.		J.M.D.	
Parcelle n°04		B.P.		C.O.		B.G.P.		C.O.		B.G.P.		C.O.		B.G.P.		C.O.		B.G.P.		C.O.			
Parcelle n°05		C.O.		J.P.		C.O.		J.P.		C.O.		J.P.		C.O.		J.P.		C.O.		J.P.		C.O.	

Sol nu (témoin régional pour le sol SBL ; C.O. : système traditionnel (céréales, orge); J.P. : jachère pâturée ; J.M.D. : jachère mise en défens (système amélioré); P.P. : culture légumineuse traditionnelle avec billon (petit pois, effet rugosité) ; B.G.P.: culture légumineuse traditionnelle avec grand billon (système avec rugosité amélioré)

Tableau 10 : dispositif de traitements (Analyse des systèmes de gestion sur sol SAV)

	Année de mesure 93/94 au 2010/2011																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
Parcelle Standard	Sol nu (témoin)																							
Parcelle n°02	C. O.			J. P.			C. B.			J. P.			C. B.			J. A.			C. B.					
Parcelle n°03	J. A.			J. P.			J. A.			J. P.			J. A.			J. P.								
Parcelle n°04	L. P.			C. B.			L. P.			C. B.			L. P.			C. B.			J. A.			C. B.		
Parcelle n°05	C. B.			J. P.			C. B.			J. P.			C. B.			L. P.			C. B.			L. P.		

Sol nu (témoin régional pour le sol SBL ; C.O. : système traditionnel (céréales, blé); J.P. : jachère pâturée ; J.M.D. : jachère améliorée (système amélioré); L.P. : culture légumineuse traditionnelle (culture de pois chiche).

1.2. Descripteurs de fonctionnement

Les descripteurs de fonctionnement sont : la pluie (paramètre déterminant dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion), le ruissellement, les pertes en terre (suspensions fines et sédiments grossiers) et le carbone (évaluation de la dynamique de la fertilité du sol). Les rendements et la biomasse produite ont été quantifiés pour certaines compagnes.

Le ruissellement est la fraction des eaux de pluie qui n'est pas infiltrée dans le sol et qui s'est écoulée jusqu'au bas de la parcelle expérimentale. Le volume d'eau ruisselé est calculé après chaque averse. On considère que deux averses sont séparées s'il pleut moins d'un millimètre en un intervalle de temps de 6 heures. En effet si V_1 est le volume du piège à sédiment, V_2 celui du premier fût, V_3 celui du second et puisque le deuxième fût (V_2) est constitué de 4 partiteurs, alors le volume d'eau total ruisselé (V) est calculé par l'expression suivante :

$$V \text{ (volume d'eau total ruisselé)} = V_1 + V_2 + 4V_3$$

Ces quantités sont ramenées à la surface de la parcelle et par comparaison avec la pluviométrie, on calculera le coefficient de ruissellement (Kr):

$$Kr (\%) = (\text{Volume ruisselé (litres)} \times 100) / (\text{Pluie (mm)} \times \text{surface de la parcelle (m}^2\text{)})$$

Le ruissellement et les pertes en terre ont été mesurés après chaque pluie, à l'aide de dispositifs de cuves installés en aval de chaque parcelle. Les pertes en terre englobent les matières en suspensions (MES) et les sédiments lourds. La précision des mesures est de l'ordre de 10 % pour la détermination de l'érosion.

Pour étudier la dynamique de la fertilité des sols, les stocks de carbone organique ont été calculés sur la base de densités apparentes (prélèvement au cylindre avec trois répétitions) et des analyses d'échantillons de sol prélevés (huit échantillons ont été prélevés pour chaque parcelle pour les 10, 30 et 45 premiers centimètres du sol. Les prélèvements ont été effectués en fin d'été (septembre). Pour connaître les pertes de carbone organique par érosion, des prélèvements sur les terres fines érodées et sur les matières de suspension (MES) ont été effectués. Le carbone organique

des terres érodées analysé regroupe celui des éléments fins de la fosse à sédiments et des suspensions (MES) dans les cuves. La détermination du carbone organique est faite par la méthode Anne.

III.2. Analyse de l'effet du sol, de la jachère (couverture du sol) et du travail du sol (rugosité) / Sous pluies simulées (parcelle de 1 m²)

L'objectif principal du travail de cette thèse est de quantifier l'érosion et d'analyser l'influence des principaux systèmes de gestion au niveau des parcelles expérimentales de 100 m². Mais certains aspects sont difficilement perceptibles à l'échelle de la parcelle de 100 m² où sont associés les effets de plusieurs paramètres, les résultats expriment l'effet combiné de plusieurs variables et il n'est pas possible de dissocier les effets de chacun des facteurs. Du fait du nombre de paramètres qui exercent une influence sur l'infiltration et le ruissellement ainsi que leur interaction, il est difficile, sous pluies naturelles, de mettre en évidence leur rôle respectif (Casenave, 1990). L'analyse de l'effet du sol, du travail du sol (effet de rugosité) et des jachères (effet de la couverture du sol) s'est révélé utile pour une bonne compréhension de facteurs conditionnels de l'érosion et a justifié le recours à l'emploi de la simulation des pluies. Sur les parcelles expérimentales de 100 m², Il n'a pas été possible d'analyser tous ces paramètres. Ces parcelles nécessitent beaucoup de moyens et ne peuvent pas être très nombreuses.

La simulation de pluie est une méthode qui permet d'obtenir sur le terrain, de façon expérimentale dans un temps relativement court, de nombreuses données mesurées sur le comportement de l'eau en surface et dans le sol sous des averses artificielles effectuées et contrôlées à l'aide de simulateur de pluie (fig. 28). Ce dernier est un moyen approprié pour apprécier la naissance du ruissellement sur une placette de 1 m² et permet aussi d'isoler les facteurs. La simulation de pluie est couramment utilisée dans les études expérimentales d'érosion et de ruissellement, elle permet l'analyse du rôle des différents facteurs de ruissellement, d'infiltration et d'érosion (Chevalier et *al.*, 1982, Albergel, 1987) et elle permet de compléter les données issues des parcelles expérimentales de 100 m² (De Noni et *al.*, 1990).

Bien sûr, il n'est pas possible d'étudier tous les paramètres, dans cette investigation on s'est limité à étudier le comportement du sol (effet sol), l'effet du travail du sol (effet de rugosité) et l'effet de la jachère (effet de couverture du sol). Au niveau des parcelles de 100 m², il n'a pas été possible de distinguer le poids de chacun de ces facteurs.

2.1. Etude du comportement du sol (effet sol)

Protocole expérimental

Effet sol

Afin de pouvoir apprécier au mieux le comportement du sol sur la naissance du ruissellement et le déclenchement de l'érosion et pour faciliter la comparaison des résultats à ceux obtenus sur la parcelle standard de 100 m² maintenu nue, nous avons retenu la situation du sol nu qui correspond à la situation de la parcelle standard. Les simulations ont été effectuées sur des parcelles de 1 m² où les caractéristiques du sol sont presque homogènes à celles des parcelles de 100 m².

Les techniques de simulation de pluie permettent de répéter à volonté des événements pluvieux et de mesurer le ou les effets de chaque paramètre sur l'infiltration, le ruissellement et le stockage d'eau, en fournissant aussi des informations sur la prédisposition du sol à l'érosion.

Pour évaluer le risque du ruissellement et de l'érosion et analyser les facteurs conditionnels, nous avons mené plusieurs campagnes de simulation de pluie sur différents états. Le choix des états a nécessité, surtout pour le sol argileux qui a un comportement très particulier, un suivi de l'évolution structurale et de l'infiltration à l'échelle de l'année.

Pour le choix des intensités de pluies à reproduire, nous nous sommes basés sur l'analyse des données des précipitations disponibles. Nous avons pris en considération les données enregistrées au niveau de la station d'Ain-Farès (Mascara) et au niveau de notre station expérimentale de Beni-Chougrane. L'analyse des pluies, les caractéristiques du type de simulateur de pluie utilisé et les objectifs de l'étude, nous ont conduits à travailler avec des intensités de 30, 50 et 80 mm/h. L'intensité maximale a été choisie pour tester les limites de résistance du sol.

Nous avons appliqué trois pluies consécutives pour étudier le déclenchement ruissellement et l'érosion et pour suivre leurs évolutions en fonction de l'état de surface du sol. Trois états de sol ont été retenus:

- Etat 1: sol sec travaillé et n'ayant pas reçu de pluie depuis 25 jours ou d'avantage. Il représente ainsi l'état d'un sol se trouvant dans des conditions sèches, relativement proches de celles rencontrées en été et au début de l'automne lors des orages. Les campagnes de simulation de pluie ont été effectuées en septembre, lorsque le sol est très sec

- Etat 2: il s'agit d'un sol humide ayant reçu une pluie et 24 heures doivent être écoulées après la dernière pluie. On reproduit ainsi une pluie qui intervient après une période de ressuyage.

- Etat 3: il s'agit d'un sol très humide ayant reçu récemment une ou plusieurs pluies. La dernière s'étant produite au plus une heure auparavant. Dans notre cas la pluie simulée est appliquée après une heure de la pluie précédente. On reproduit ainsi l'état d'un sol se trouvant dans des conditions très humides (proche de la saturation de l'horizon de surface), situation qui se produit généralement dans la nature après plusieurs jours de pluie (pluies consécutives).

Pour faire intervenir l'effet pente, l'expérimentation prévoit des simulations sur différentes pentes. Les classes de pentes de 12.5 - 25.0 % et 25 – 50 % représentent plus de 50% de la surface totale des monts de Beni Chougrane. Ces données avec le type de pentes cultivées et certaines contraintes liées au terrain et au simulateur de pluie nous ont conduits à choisir quatre pentes à savoir 12.5, 17, 25 et 30 %.

2.2. Effet du travail du sol / effet de la rugosité du sol

Cinq situations de travail du sol ont été étudiées sous pluies simulées :

- Sol travaillé à l'araire (TA). Ce type de travail du sol traditionnel est couramment utilisé.
- Sol travaillé avec la charrue à soc (D). Ce type de travail du sol est utilisé surtout pour le défoncement (préparation du sol aux plantations arboricoles).
- Sol travaillé avec matériel à dents (TM). Le travail du sol est effectué avec le chisel (matériel à dents). Cette situation est testée seulement pour le sol SAV.
- Sol nu et pâturé (SNTP), qui n'a pas été travaillé depuis la récolte précédente. Cette situation représente les sols qui sont régulièrement cultivés et qui restent nus du mois de juin à octobre.
- Sol nu avec des mottes brisées et ratissées, parcelle qui correspond aux normes de Wischmeier. Situation qui correspond à l'état du sol de la parcelle standard (PW).

Ces deux dernières situations ont été étudiées à titre de comparaison.

2.3. Effet des jachères / effet de couverture du sol

Sur les jachères qui servent de terrains de parcours, la couverture du sol et en particulier celle de la couverture végétale, caractérisée par une grande différenciation selon les saisons, joue un rôle essentiel sur le déclenchement du ruissellement et d'érosion. Afin de mieux comprendre l'effet de la couverture végétale du sol sur les phénomènes de ruissellement diffus et d'érosion en nappe. Les comportements de deux types de couvertures ont été testés : la jachère pâturée depuis plus de 5 ans (JP) qui est caractérisée par une couverture du sol faible et la jachère protégée (JNP) dont la couverture du sol est importante (mise en défens de 4 ans). Les comportements ont été analysés au cours de trois campagnes :

- Campagnes d'automne, période où le sol est sans couverture végétale. Presque toutes les situations se ressemblent, le sol est nu, sans couvert végétal, plus ou moins tassé, les seules couvertures qui peuvent exister sont celles des litières. Le taux de couverture diffère d'une situation à une autre selon le mode de gestion du sol.
- Campagnes de début d'hiver où le sol est quasiment aplani, fermé et plus ou moins saturé après une succession de pluies. Le taux du couvert végétal est encore faible.
- Campagnes de printemps lorsque le développement du couvert végétal atteint le maximum.

Toutes les mesures ont été effectuées sur des microparcelles de 1m² dont le gradient de pente étant identique et sous une même intensité. Pour étudier l'effet de la couverture du sol, nous avons choisi comme paramètre principal la pluie d'imbibition et secondairement l'infiltration

finale (F_n) et la détachabilité (érosion). A l'échelle de la parcelle, la pluie d'imbibition correspond à ce qu'on appelle pour un bassin versant la précipitation limite du ruissellement.

Avant chaque simulation, l'état de surface des parcelles est caractérisé. Nous avons relevé le taux de surfaces fermées (pellicule, croûte, zones tassées et cailloux inclus dans la masse du sol) et de surfaces couvertes (adventices, litière et cailloux) à travers l'observation régulière par la méthode des points quadrats (Roose, 1996), la rugosité (nombre et taille de mottes) ainsi que l'humidité du sol (des échantillons prélevés avant et après la simulation dans l'horizon de surface sont pesés et placés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures). Ces mesures sont complétées par un suivi photographique (prise de photos numériques et leur traitement par le logiciel ENVI) pour caractériser l'évolution des processus et de l'évolution de l'état de surface.

III.3. Description du simulateur de pluie

L'appareil est constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour en forme de tronc de pyramide de 3.8 mètres de haut et 16 m² à la base (fig. 28) susceptible de recevoir une bâche pour la protection contre le vent.

Cette structure est supportée par 4 pieds télescopiques afin de pouvoir être convenablement placée sur les terrains en pente. Le simulateur de pluie que nous avons utilisé est de type ORSTOM (fig. 28). Il est acquis dans le cadre du projet de recherche INRF/IRD.

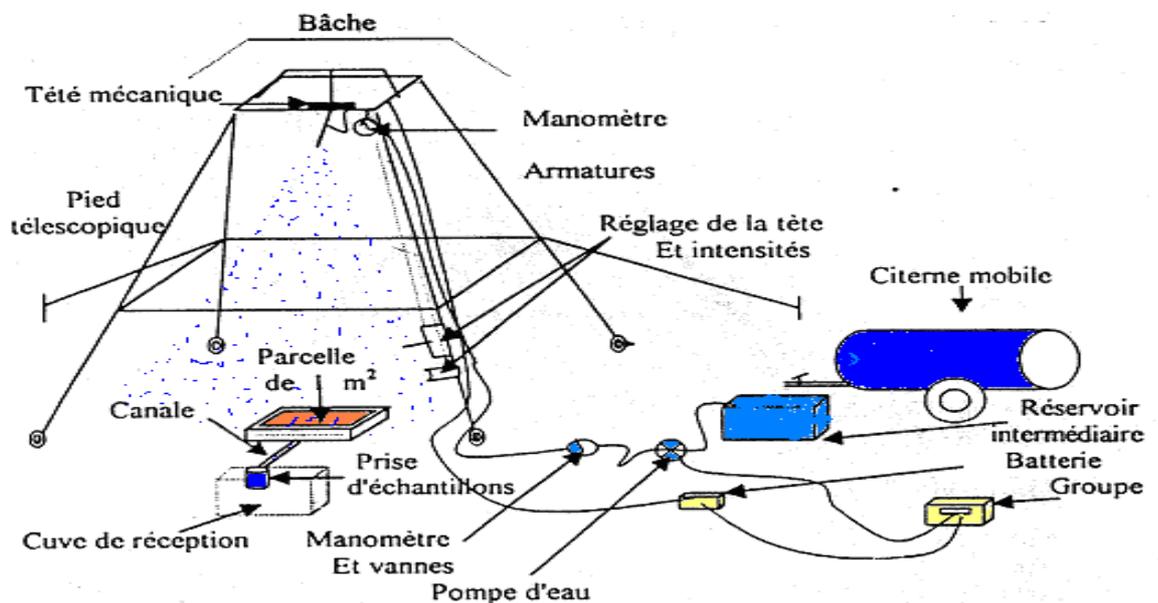


Figure 28 : Simulateur de pluie et ses accessoires (modèle ORSTOM)

D'après Lafforgue (1977), le processus du ruissellement et d'infiltration, sous averse simulée, peut se décomposer chronologiquement en quatre phases :

La phase d'imbibition

Durant laquelle aucun ruissellement n'est observé depuis le début de la pluie (T_0) jusqu'au début du ruissellement (T_i). Au début de cette période, l'intensité de l'infiltration est supérieure à celle de la pluie. Ensuite, des flaques d'eau (D_m) commencent à se former au fur et à mesure que le sol s'humidifie et la capacité d'infiltration diminue.

La phase de transition

Le début de ruissellement apparaît au terme du temps (T_i), tout d'abord sous la forme d'une goutte à goutte et ensuite en un filet d'eau. Au fur et à mesure que le ruissellement augmente, l'intensité de l'infiltration diminue. Nous appelons régime transitoire la phase qui va du début du ruissellement (T_i) jusqu'au commencement de la stabilité du ruissellement (T_m).

La phase du régime permanent

Durant cette phase, le ruissellement enregistré dans la cuve de réception représente une certaine régularité, les volumes ruisselés par unité de temps sont presque constants. Cette phase va du temps (T_m) jusqu'à la fin de la pluie (T_u). Cette stabilité du régime fournit deux données essentielles : l'intensité maximale du ruissellement (R_x) et l'intensité minimale de l'infiltration (F_n). A chaque changement d'intensité de la pluie, le régime du ruissellement change aussi. Les intensités de ruissellement et d'infiltration vont varier jusqu'à retrouver un nouvel équilibre.

La phase de vidange

Cette phase commence depuis le temps de fin de la pluie (T_u) jusqu'à la fin de la goutte à goutte ou de la disparition des flaques d'eau (T_f). La détention mobilisable (D_m) caractérise la rugosité de la surface du sol (Lafforgue, 1977)

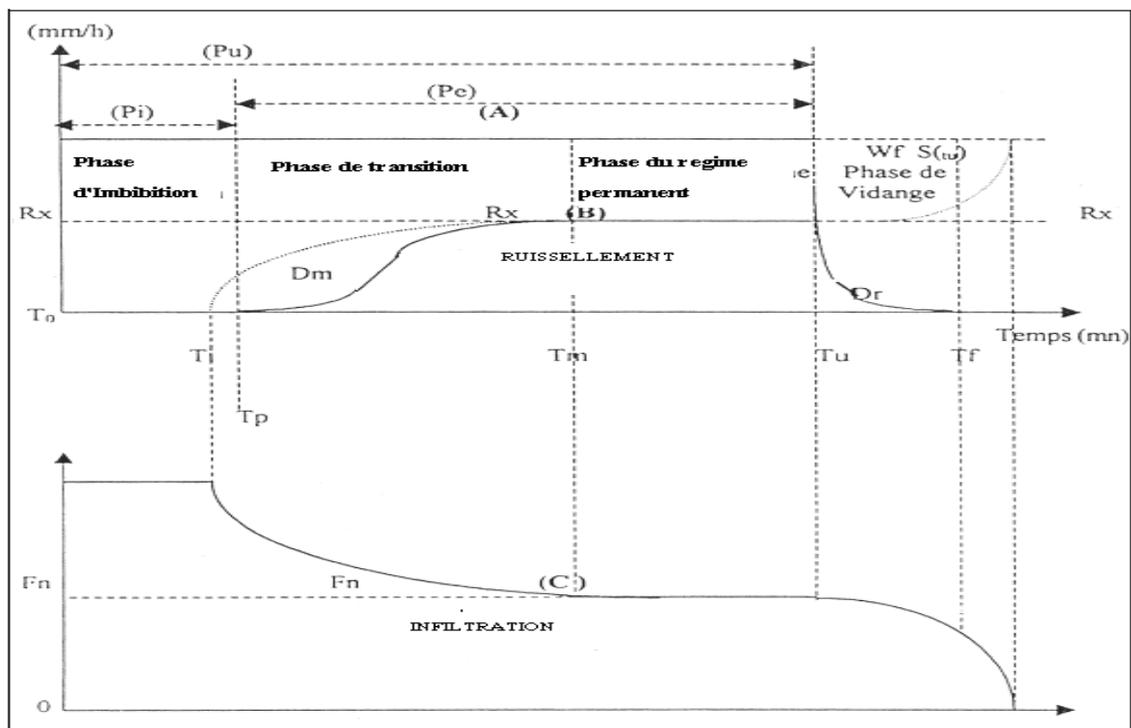


Figure 29 : Diagramme théorique d'une pluie simulée (Lafforgue, 1977)
Les paramètres mesurés

La procédure habituelle consiste, avant chaque averse simulée, à placer sur la parcelle un bac en tôle de 1 m² (ruissellement 100 %), sur lequel on procède au réglage des intensités de pluie choisies. Une fois l'intensité choisie est stable, on enlève le bac (pluviomètre de 1 m²) et l'expérimentation commence. Les descripteurs de fonctionnement quantifiés sont :

- Le ruissellement : des mesures manuelles de ruissellement sont réalisées au cours des pluies (suivi temporel du ruissellement).

- Les charges solides (les concentrations) : des prélèvements manuelles d'eau ruisselée sont effectués à l'exutoire de la parcelle permettant ainsi de quantifier la charge solide.

Les variables explicatives qui ont été retenues pour l'appréciation de la naissance du ruissellement sont : la pluie d'imbibition (P_i), exprimée en mm, le ruissellement en mm h⁻¹, l'intensité minimale d'infiltration (F_n) en mm h⁻¹ et les charges solides exportées en suspension dans l'eau et exprimées en kg/h⁻¹ (érosion due au détachement des agrégats).

- La pluie d'imbibition (P_i) : elle exprime d'une part la hauteur d'eau qui s'infiltré dans le sol sans produire d'écoulement superficiel et d'autre part la capacité de l'eau à pouvoir s'accumuler dans les petites dépressions superficielles (flaques) dont la taille est fonction de la rugosité du sol.

- Le ruissellement (R) : il est mesuré au cours des essais à partir de prélèvements d'eau effectués à des pas de temps réguliers à l'exutoire de la micro parcelle.

- L'intensité minimale d'infiltration (F_n) : elle permet d'apprécier la capacité minimale du sol à infiltrer lorsque ce dernier est saturé et que le ruissellement a atteint son régime permanent. Considérant cette manière de calculer F_n dans un état proche de la saturation, on peut dire que cette valeur traduit une intensité d'infiltration sous un gradient de charge hydraulique unitaire qui est assimilable à la conductivité hydraulique ou coefficient de Darcy en sol saturé (Hillel, 1974).

- Les sédiments exportés : ils expriment l'érosion due au détachement des agrégats de sol sous l'impact des gouttes de pluie (effet "splash" ou détachabilité).

Transfert des résultats d'une échelle à une autre

a été réalisé dans une perspective de Transfert des résultats d'une échelle à une autre (de la parcelle au versant). L'approche des marqueurs radioactifs (isotopes nucléaires) a été utilisée.

La connaissance de la dynamique érosives et des facteurs déterminants passe par une meilleure compréhension et modélisation des mécanismes en jeu depuis les zones sources (parcelles) jusqu'aux zones de dépôt des sédiments (versants et oued). Dans une perspective de Transfert des résultats d'une échelle à une autre (de la parcelle au versant), nous avons jugé utile de comparer les résultats obtenus dans les parcelles à ceux des versants. Pour cela l'approche des marqueurs radioactifs (isotopes nucléaires) a été utilisée. Dans ce travail complémentaire, l'érosion est estimée par le Césium 137 au niveau des versants étudiés.

La figure 30 résume l'approche suivie dans ce travail.

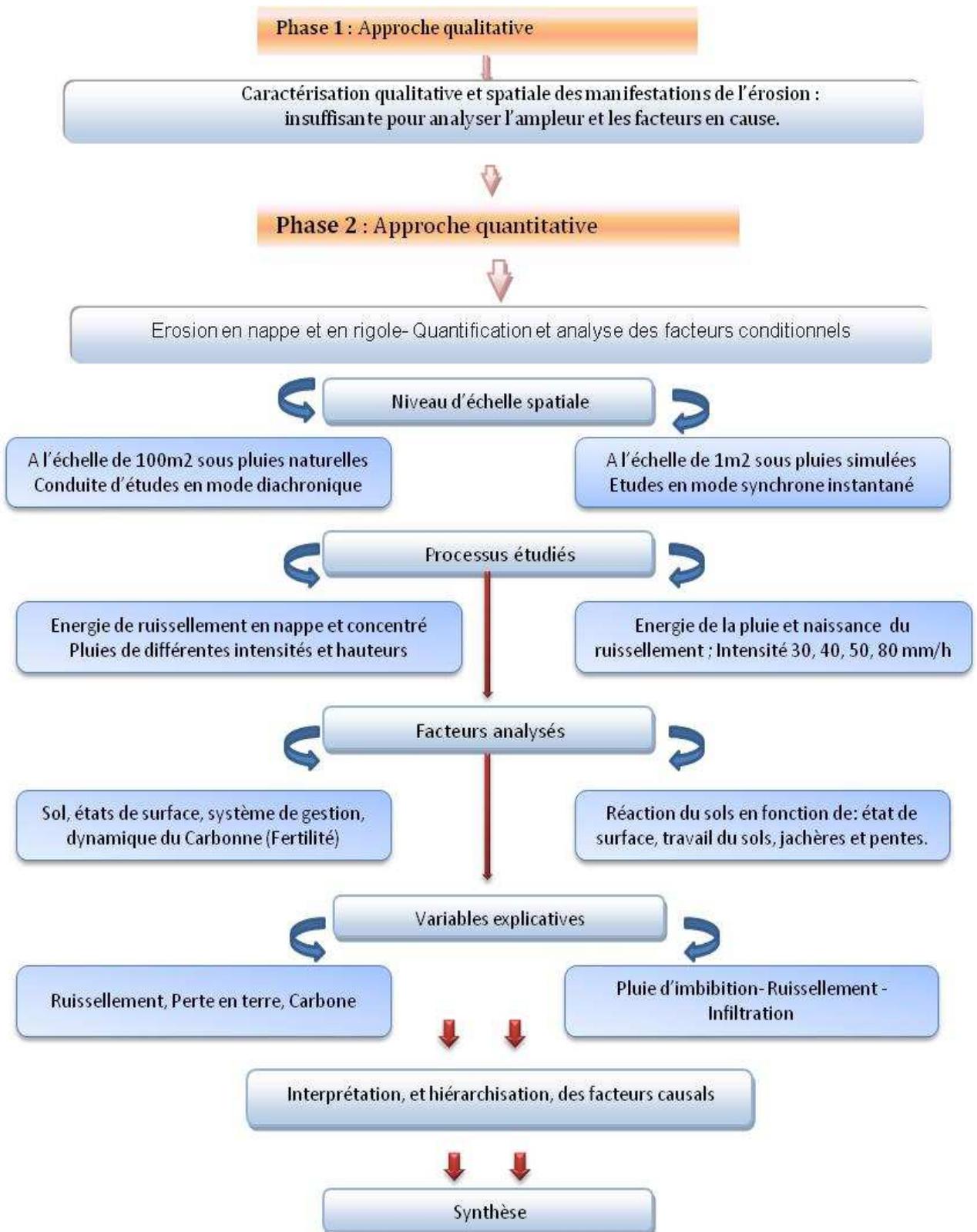


Figure 30 : organigramme de la méthode suivie

CHAPITRE IV.

RESULTATS

ET

DISCUSSION

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. RESULTATS

IV.1.1. Ruissellement et érosion sur parcelles expérimentales de 100 m² sous pluies naturelles

IV.1.1.1. Précipitations

Les précipitations annuelles (Pan) enregistrées dans cette zone de montagne, pendant la période d'étude (92/93 à 12/13), varient de 242 à 900 mm. La campagne 1993/1994 présente la période la plus sèche (242 mm) et celle de 2012/2013, la campagne la plus pluvieuse (900 mm). Les pluies sont caractérisées par une variabilité interannuelle (coefficient de variation = 0,36).

Le tableau 11 donne, à titre de comparaison, les valeurs moyennes des pluies déterminées sur trois périodes distinctes: la période de 1943-2004 (période plus longue), la période 1971-2001 (période récente) et période 92/93-12/13 (période de mesure). Il en ressort une augmentation pour la période de mesure dont la moyenne pluviométrique annuelle est de 436 mm (CV=0,36 à 42).

Si on compare les précipitations annuelles de la période d'étude aux précipitations annuelles moyennes des périodes anciennes, on constate que 33 % des précipitations annuelles de la période de mesure sont déficitaires par rapport à la moyenne annuelle de la période de 1971-2001 (tabl. 11).

Les variations pluviométriques interannuelles paraissent ainsi importantes (coefficient de variation de 0,36 à 0,42 pour les trois périodes) avec une alternance des années humides et des années sèches d'une manière anarchique. La répartition des pluies à l'échelle annuelle est aussi très irrégulière. Durant la saison des pluies, ils se présentent plusieurs épisodes dont la durée est suffisante pour provoquer le stress hydrique aux espèces végétales.

Tableau 11 : écart des pluies annuelles par rapport aux moyennes annuelles déterminées sur trois périodes de mesures pour la zone étudiée

Pluies /Années de mesures	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	11/12	12/13
Pluies annuelles (mm) Station expérimentale (Ain Fares)	242	262	356	476	247	435	297	387	416	403	341	380	385	374	463	500	700	490	680	430	900
Station Ain Fares 92/93-12/13 ; Pam = 436 mm ; CV = 0,36																					
Ecart/moyenne (%)	-44	-40	-18	9	-43	0	-32	-11	-5	-8	-22	-13	-12	-14	6	15	61	12	56	-1	106
Station Ain Fares 1971-2001 ; Pam = 380 mm ; CV = 0,41																					
Ecart/moyenne (%)	-36	-31	-6	25	-35	14	-22	2	9	6	-10	0	1	-2	22	32	84	29	79	13	137
Station Ain Fares 1943-2004 ; Pam = 395 mm ; CV = 0,40 ; P annuelle minimale : 171 ; P annuelle max. 809 mm																					
Ecart/moyenne (%)	-39	-34	-10	21	-37	10	-25	-2	5	2	-14	-4	-3	-5	17	27	77	24	72	9	128
Station. Mascara 1943- 2004 ; Pam = 370 mm ; CV = 0,42 ; P annuelle minimale : 198 ; P annuelle max. 595 mm																					
Ecart/moyenne (%)	-35	-29	-4	29	-33	18	-20	5	12	9	-8	3	4	1	25	35	89	32	84	16	143

CV : coefficient de variation ; Pam : moyenne pluviométrique annuelle

Les cumuls de quelques pluies les plus fortes de l'année (trois ou quatre pluies), peuvent dépasser les 30 % des précipitations annuelles. Les pluies les plus fortes ont la même probabilité d'apparition dans les années de sécheresse que dans celles d'excédent pluviométrique. Parmi les grandes averses, les pluies de novembre 2001 (pluies de 104 mm en deux jours).

Les précipitations durant ces années de mesures sont en général faibles. Les pluies tombées dont la hauteur est inférieure à 10 mm représentent 52,36 % (fig. 31).

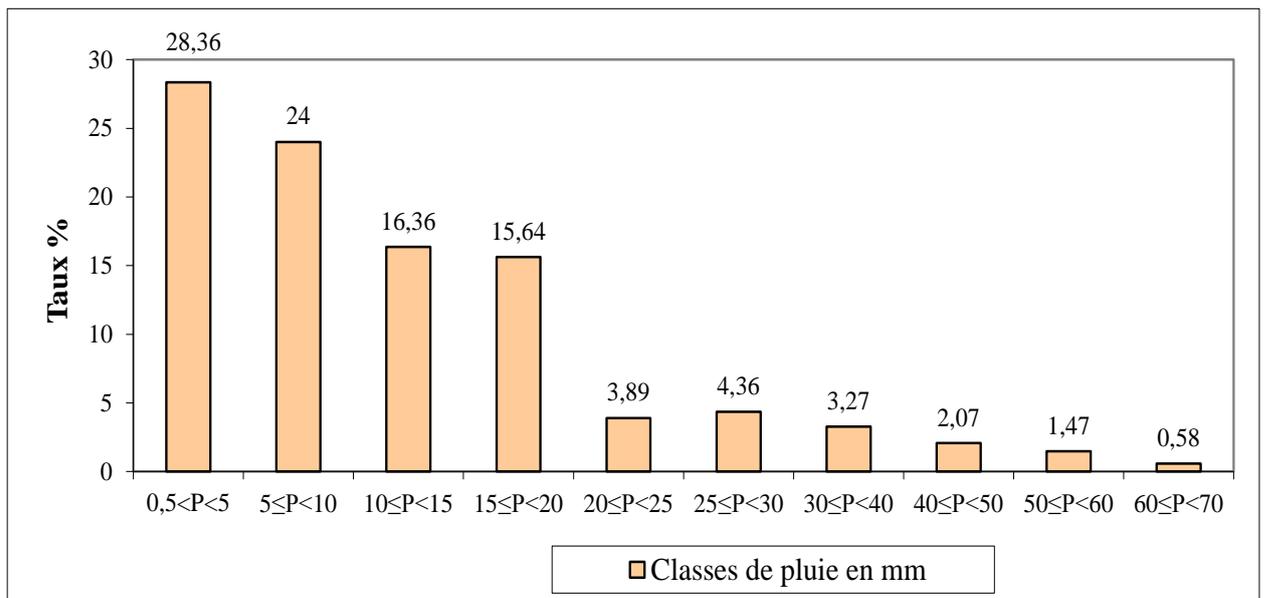


Figure 31: classes des hauteurs de pluies

Les pluies intenses que nous avons enregistrées sur notre station expérimentale d'Ain-Fares sont les suivantes: IM5=150 mm/h (intensité maximale pour une durée de 5 minutes), IM10 = 120 mm/h, IM15 =100 mm/h, IM30 =30 mm/h et IM60 = 20 mm/h.

Les pluies maximales journalières s'observent généralement en automne, en hiver et en printemps. Celles d'automne tombent généralement sous forme d'orages. La pluie journalière maximale observée pendant la période d'étude est de 70 mm, le 10/11/2001.

En utilisant la formule de Roose ($R_{am} = P_{am} \times a \pm 0,05$), l'indice d'agressivité annuel moyen pour la période de mesure est de 52,32. Le calcul de l'indice d'agressivité annuel moyen est obtenu en multipliant la hauteur annuelle moyenne des pluies avec la valeur de "a". La valeur de "a" est de l'ordre de 0,1 à 0,12 dans le Nord-ouest algérien (Morsli et *al.*, 2004).

IV.1.1.2. Effet du sol

Pour analyser l'effet du sol, seules les données issues des parcelles standards (sol nu) sont prises en compte.

1.1.2.1. Ruissellement

Le coefficient de ruissellement moyen annuel (K_{ram}) était modeste durant les années de mesure. Il est de 2,6 à 9,3 % sur sol brun calcaire vertique (SAV) et de 4,1 à 12,4 % sur sol brun calcaire de texture limoneuse (SBL). Les résultats révèlent des variations du K_{ram} d'une année à une autre (fig. 32 et 33). Cependant, le ruissellement maximum lors d'une averse ($K_{r\ max}$) a atteint des valeurs relativement élevées, 32,6 % sur SAV et 35,5 % sur SBL. C'est lors des événements exceptionnels (fréquence supérieure à 0,1) que se déclenchent les graves manifestations de ruissellement et d'érosion.

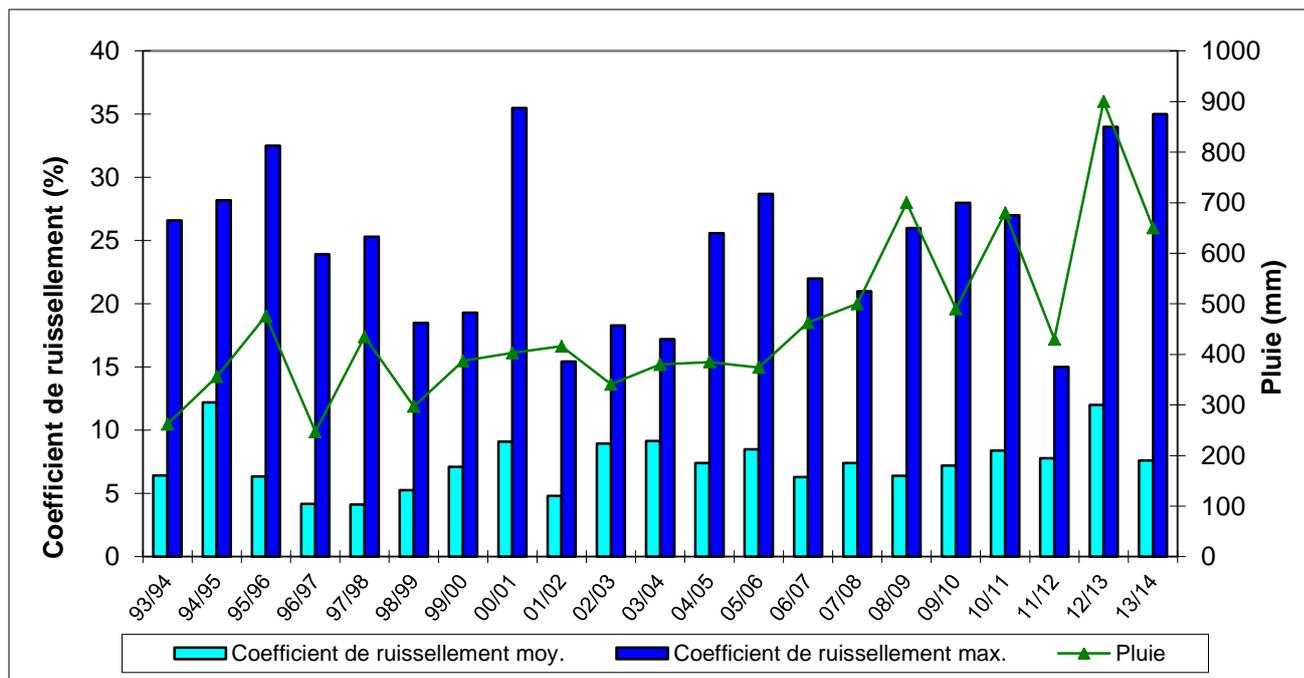


Figure 32 : coefficient de ruissellement moyen annuel et maximal enregistré sur les parcelles de 100 m². (93/94 à 12/13 ; sol SBL)

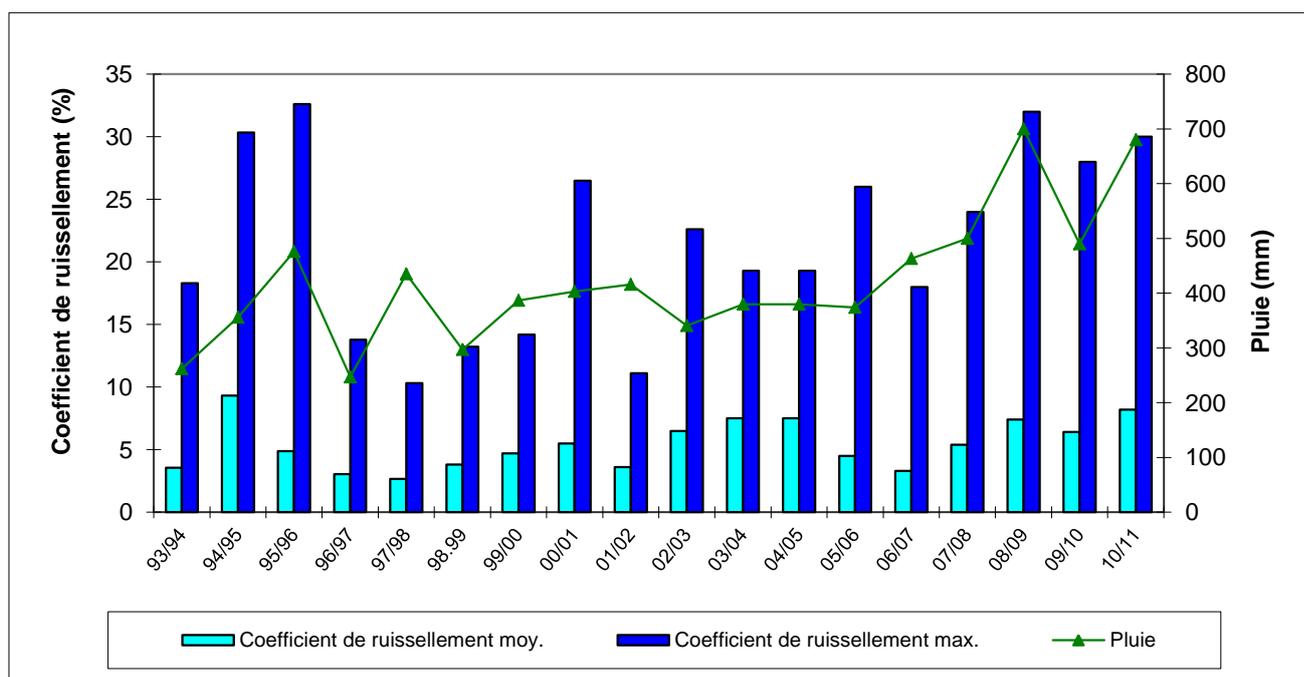


Figure 33 : coefficient de ruissellement moyen annuel et maximal enregistré sur les parcelles de 100 m². (93/94 à 10/11 ; sol SAV)

Les pluies qui ont entraîné du ruissellement sur les parcelles standards (PS) représentent 60 % du nombre total des averses. Même si les pluies ne sont pas toutes ruisselantes, elles laissent tout de même des traces en dégradant la surface du sol, favorisant ainsi la naissance du ruissellement lors des prochaines averses.

Le déclenchement du ruissellement a nécessité en moins 20 mm lorsque le sol est sec: au début de l'automne le déclenchement du ruissellement nécessite un cumul pluviométrique de plus de 22mm sur sol sec. Par contre, lorsque le sol est humide et dégradé par les gouttes de pluie, le ruissellement peut se déclencher même pour des pluies de hauteur ou d'intensité très faible. Les risques majeurs de ruissellement sont observés lors des averses exceptionnelles, soit des orages très violents lors des saisons, soit des pluies longues et saturantes provoquant des ruissellements pouvant atteindre 35%. Le ruissellement le plus intense est observé lors de la pluie saturante et agressive d'avril 2013 et surtout celle de novembre 2001 où plusieurs retenues collinaires de la zone ont été emportées (retenue de Sidi abdejabar, Bouhanifia...).

1.1.2.2. Erosion en nappe et en rigole

Les pertes en terre (érosion en nappe et en rigole) mesurées sur sol nu (parcelle standard) varient de 1500 à 6800 sur le sol SAV et de 2600 à 8500 kg/ha/an sur le sol SBL (fig. 34 et 35).

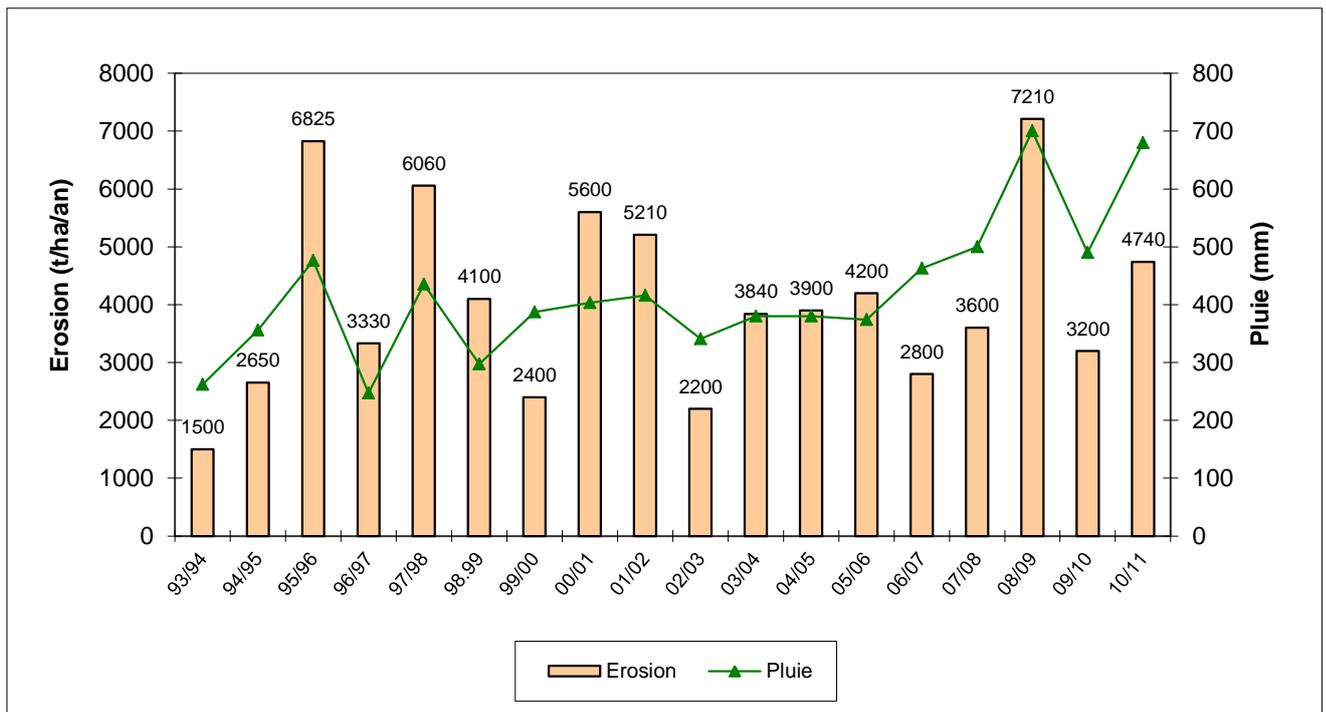


Figure 34 : taux d'érosion en nappe et en rigole enregistré sur les parcelles de 100 m2. (93/94 à 10/11 ; sol SAV)

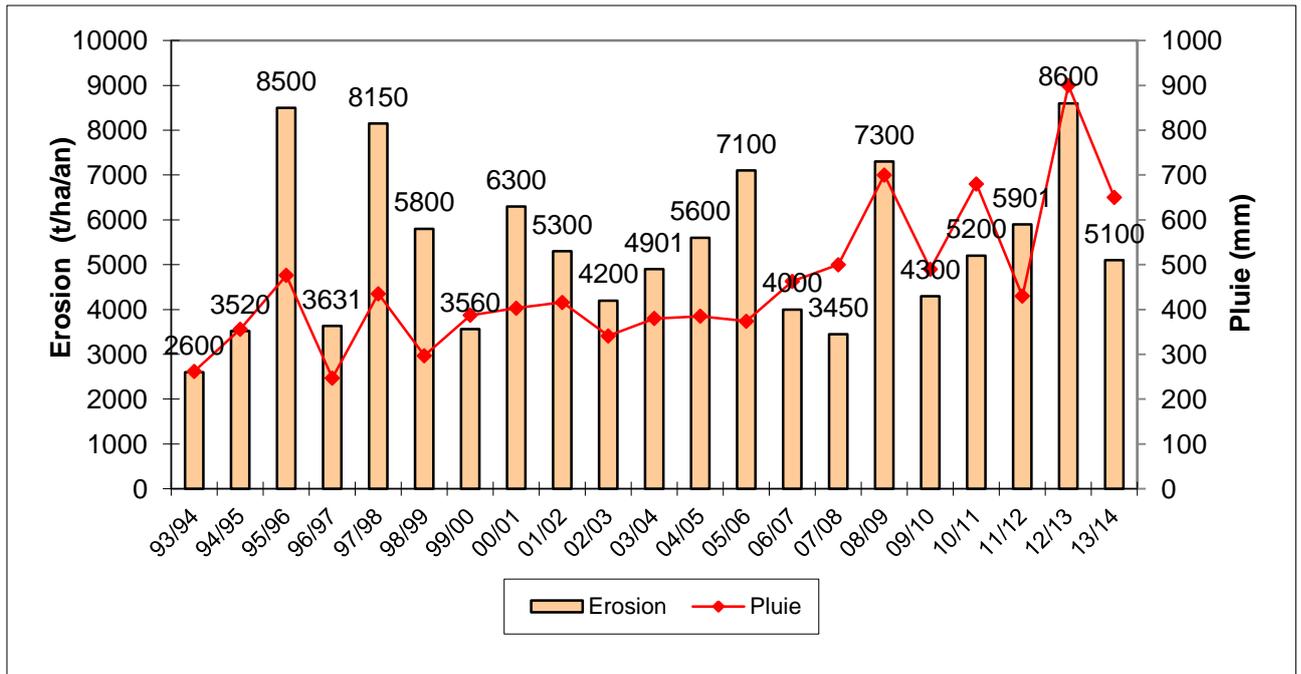


Figure 35: taux d'érosion en nappe et en rigole enregistré sur les parcelles de 100 m². (93/94 à 12/14 ; sol SBL).

Les figures 34 et 35 et le tableau 12 montrent une irrégularité du ruissellement et des pertes en terre d'une année à une autre, le coefficient de variation est de 0,3 pour SBL et de 0,4 pour le SAV (tabl. 12).

Tableau 12: variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles standard (sol nu)

Sol	Kram %				Kr max %			Erosion t/ha/an				
	Min.	Max.	Moy.	CV	Min.	Max.	Moy.	C V	Min.	Max.	Moy.	CV
SBL	4,1	12,2	6,8	0,3	17	35	23	0,3	2,6	8,6	5,7	0,3
SAV	2,7	9,3	5,0	0,4	10	32	19	0,4	1,5	7,2	3,9	0,3

CV : coefficient de variation

L'érosion moyenne annuelle ne traduit pas les extrêmes. Certains événements pluvieux intenses ont produit 20 à 42 % de l'érosion annuelle. Ce type d'événement intense ou exceptionnel entraîne en quelques jours, voire en quelques heures des pertes en terres et des dégâts importants. Parmi les averses les plus agressives, les pluies du 10 et 11 novembre 2001, avec plus de 100 mm en deux jours. La pluie saturante (64 mm / 24 h) de novembre 2001 a provoqué une érosion de 1,1 sur SAV et de 1,7 t/ha sur SBL (tabl. 13), sur la parcelle standard. Comme elle a provoqué la rupture de trois retenues collinaires dans la zone ainsi que le balayage de tous les résidus organiques

accumulés au niveau de la surface du sol (l'épaisseur des accumulations des résidus organiques à l'aval d'un versant a dépassé les 20 cm).

Tableau 13: érosion et ruissellement de quelques averses particulièrement agressives sur sol nu (parcelle standard)

Saison	Caractéristiques des pluies		Etat du sol Humidité préalable	Ruissellement (%)		Erosion (kg/ha)	
	hauteur (mm)	durée (h)		Sol SBL	Sol SAV	Sol SBL	Sol SAV
Automne	64	24	H	28	23	1720	1100
	26	6	H	26	28	650	950
	15	12	H	17	10	350	420
	45	10	H	19	29	980	1223
	10	1	Th	25	32	756	948
	30	6	H	19	26	1300	1473
	19	4	H	22	18	700	752
Hiver	15	4	Th	25	31	300	400
	30	24	H	10	12	190	320
	10	2	H	28	33	487	543
	26	12	H	18	21	452	490
	31	22	H	26	29	632	543
	8	2	Th	25	33	573	703
	23	9	H	4	7	228	322
	38	24	H	18	19	532	672
Printemps	15	2	Th	16	25	400	600
	52	14	H	9	12	300	327
	67	40	H	12	19	425	320
	16	10	Th	18	22	328	378

H: sol humide; Th: sol très humide

IV.1.1.3. Influence des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion

1.1.3.1. Effet de la culture traditionnelle la plus pratiquée / Céréaliculture

La céréaliculture extensive est la culture traditionnelle la plus pratiquée dans les monts de Béni Chougrane comme dans toutes les régions montagneuses du Nord-ouest algérien. Elle est pratiquée en rotation avec la jachère pâturée et les cultures légumineuses (pois chiche, petit pois et fève). La végétation naturelle dans les monts de Beni Chougrane est essentiellement herbacée et annuelle avec présence parfois de formations arbustives et arborées. Les sols cultivés en céréales sont pratiquement nus pendant l'été et au début de l'automne

Le sol labouré et cultivé en céréales (effet conjoint des techniques culturales et du couvert végétal) présente un Kram de 0,4 à 3 % pour le sol SAV et de 1 à 3 % pour le sol SBL (tab. 14). Le Kram, lors de la campagne 2003/2004, a été réduit de 8 (SBL) à 12 fois (SAV) sur la parcelle

cultivée en céréales par rapport à la parcelle standard qui représente le sol nu. Le Kr max annuel a atteint des valeurs de 2,4 à 13 % pour le sol SBL et de 2,6 à 22 % pour le sol SAV.

Les pertes en terres annuelles varient entre 400 et 1190 kg/ha/an pour la culture en orge sur SBL et entre 400 et 1300 kg/ha/an pour la culture de blé sur SAV (tab. 14). L'érosion a été réduite de 4 à 12 pour le sol SBL et de 2 à 13 fois pour le sol SAV par rapport à la parcelle standard (sol nu).

La différence entre le traitement traditionnel et amélioré n'est pas nette. Les taux du ruissellement et de l'érosion sont très proches entre deux traitements. Par contre l'effet des améliorations (semences sélectionnées et fertilisation) sur la production était positif (tab. 15).

Les mesures obtenues sur ces parcelles (parcelles cultivées en céréales) montrent une irrégularité du ruissellement et des pertes en terre d'une année à une autre, le coefficient de variation est de 0,3 et 0,4 (tab. 14).

Tableau 14: variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles cultivées en céréales

Traitements	Sol	Kram %				Kr max %				Erosion t/ha/an			
		Min.	Max.	Moy.	CV	Min.	Max.	Moy.	C V	Min.	Max.	Moy.	CV
Témoins sol nu	SBL	4,1	12,2	6,8	0,3	17	35	23	0,3	2,6	8,5	5,7	0,3
	SAV	2,7	9,3	5,0	0,4	10	32	19	0,4	1,5	6,8	3,9	0,3
Céréales blé - orge	SBL	1,0	3,3	1,8	0,4	3	15	7	0,6	0,4	1,1	0,6	0,3
	SAV	1,1	3,1	1,4	0,3	4	23	6	0,8	0,3	1,3	0,7	0,3

Tableau 15 : effet des améliorations sur les rendements pour quelques campagnes de mesures

Traitements	Rendement (q/ha)					
	A		B		C	D
	Moy	CV	Moy	CV	Moy	Moy
Cultures sur sol brun calcaire sur grès (SBL)						
Système traditionnel						
Culture traditionnelle d'orge + engrais	11	0,17	7	0,16	5	2
Culture traditionnelle du petits pois en billon (petit pois local + engrais)	20 en vert	0,42	13 en vert	0,32	15 en vert	8 en vert
Jachère pâturée	++					
Système amélioré						
Culture d'orge (orge sélect. + engrais +Tc + désherbage)	12	0,22				
Culture du petit pois (petits pois + engrais + grand billon)	31 en vert	0,29				
Jachère protégée (mise en défens)	++++					
Cultures sur sol brun calcaire vertique sur marne (SAV)						
Système traditionnel						
Culture traditionnelle du blé + engrais	10	0,24	5,5	0,34	4,2	< 2
Culture traditionnelle du pois chiche	6,5	0,34	4,8	0,09	2,5	< 1
Jachère pâturée	++					
Système amélioré						
Culture de blé (blé sélec. + engrais +Tc + désherbage)	12,5					
Jachère améliorée (hédysarum (Sulla) + Médicago) et mise en défens	++++					

A : Rendement dans la parcelle d'expérimentation ; B : Rendement moyen des parcelles des paysans proches de la parcelle d'expérimentation sur le même sol ; C : Rendement moyen de la zone des Beni Chougrane; D : rendement lors d'une année déficitaire. +++++ : forte couverture du sol et grande production de biomasse ; ++ : faible couverture et production faible.

1.1.3.2. Effet de la Jachère

La jachère pâturée présente un Kram de 2,2 à 5,3 % pour le sol SBL et de 2,1 à 4,7 % pour le sol SAV (tabl. 16). Cependant, le Kr max a atteint la valeur de 22 % sur le sol SBL et de 17 % sur le sol SAV en jachère. La jachère peut être la source de beaucoup de ruissellement, mais son effet reste toujours positif par rapport au sol nu. Le Kram a été réduit de 2 (SAV) à plus de 3 fois (SBL) sur les parcelles en jachère mise en défens (jachère MD) par rapport au sol nu.

Les pertes en terres enregistrées, sur SBL, sont de l'ordre de 350 à 1600 kg/ha/an sur les jachères pâturées et de 64 à 300 kg/ha/an sur les jachères mise en défens. Sur SAV, les pertes en terre sont relativement élevées (374 à 2700 kg/ha/an), mais sur jachère améliorée, elles n'ont pas dépassé les 1000 kg/ha/an (242 à 775 kg/ha/an).

La comparaison annuelle des traitements montre que l'érosion a été réduite de 2 à 10 fois sur la jachère pâturée par rapport au sol nu. La mise en défens et l'amélioration de la parcelle en jachère a réduit l'érosion de 2 à 60 fois pour le sol SBL et de 3 à 25 fois sur le sol SAV et ceci après cinq ans de mise en défens. L'amélioration de la jachère a pu réduire l'érosion de 132 fois par rapport au sol nu pour la campagne 1995/1996 qui a connu de grands événements pluvieux (P=476 mm). Les ruissellements enregistrés durant cette campagne ont provoqué de grandes pertes de terre sur la parcelle standard (8500 kg/ha/an), alors que sur la parcelle en jachère mise en défens, les pertes étaient de 64 kg/ha/an sur sol SBL. La diminution de l'érosion est due au taux de couverture du sol par une biomasse importante (taux de recouvrement > 90 %) et à l'accumulation des résidus et des litières sur la surface du sol durant les années de mise en défens.

La variabilité de l'érosion (coefficient de variation entre 0,3 et 0,4) à l'échelle interannuelle est importante (tabl. 16)

Tableau 16 : variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles en jachère

Traitements	Sol	Kram %				Kr max %				Erosion t/ha/an			
		Min.	Max.	Moy.	CV	Min.	Max.	Moy.	C V	Min.	Max.	Moy.	CV
Témoins nus	SBL	4,1	12,2	6,8	0,3	17	35	23	0,3	2,6	8,5	5,7	0,3
	SAV	2,7	9,3	5,0	0,4	10	32	19	0,4	1,5	6,8	3,9	0,3
Jachères pâturées	SBL	2,2	5,3	3,2	0,4	9	22	14	0,1	0,3	1,6	0,9	0,5
	SAV	2,1	4,7	2,2	0,2	6	17	12	0,2	0,3	2,7	1,2	0,8
Jachères améliorées	SBL	1,2	4,2	2,3	0,5	8	15	9	0,4	0,06	0,3	0,1	0,6
	SAV	1,3	2,7	2,2	0,6	6	12	10	0,6	0,3	0,7	0,5	0,4

1.1.3.3. Effet du billonnage / Cultures en billons

Le billonnage, technique couramment employée et qui s'effectue sur plusieurs cultures semble être efficace dans la réduction de l'érosion. Les résultats obtenus sur des parcelles en billons, sur sol limoneux, montrent une réduction significative du ruissellement par rapport à celles non traitées en billons. Les pertes en terres sont relativement faibles par rapport aux autres traitements et varient d'une année à une autre. L'érosion est de l'ordre de 160 à 800 kg/ha/an sur les billons traditionnels et de 48 à 160 kg/ha/an sur les billons améliorés (billons avec micro relief accentué) (tabl. 17).

Tableau 17 : variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles traitées en billons avec culture de petit pois – Sol SBL

Traitements	Sol	Kram %				Kr max %				Erosion t/ha/an			
		Min.	Max.	Moy.	CV	Min.	Max.	Moy.	C V	Min.	Max.	Moy.	CV
Témoins nus	SBL	4,1	12,2	6,8	0,3	17	35	23	0,3	2,6	8,5	5,7	0,3
Billonnage	SBL PB	1,3	2,5	1,5	0,2	6	12	6	0,2	0,16	0,8	0,4	0,6
Billonnage	SBL GB	0,4	1,2	0,8	0,4	2	5	4	0,6	0,04	0,16	0,09	0,6

Le billonnage a réduit l'érosion de 3 à 50 fois. L'amélioration effectuée sur cette technique (microrelief accentué des billons) a réduit encore plus l'érosion. L'érosion a été réduite de 40 à 110 fois par rapport au sol nu (parcelle standard).

La parcelle traitée en billons (PP) s'est comportée, au début de la saison des pluies, presque comme celle de la parcelle de sol nu (parcelle standard). Mais depuis la réalisation des billons, qui se fait tardivement (en janvier), la différence est devenue très significative, le ruissellement et l'érosion ont sensiblement diminué. Le micro relief formé par les billons diminue significativement le ruissellement, il permet de piéger l'eau et d'augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol. Les cultures en billons sont fréquemment entretenues ce qui favorise encore plus la régénération de la rugosité du sol. D'autre part, nous avons constaté que les billons non entretenus ou mal faits peuvent accentuer le ruissellement. Lors des fortes pluies, les billons peuvent être rompus et donnent naissance à des rigoles qui peuvent évoluer vers des ravineaux.

1.1.3.4. Effet des cultures de légumineuses / Culture du pois chiche

La culture du pois chiche qui est très répandue dans la zone se fait très tardivement. Le comportement des parcelles occupées par la culture du pois chiche n'est pas très différent des sols nus durant la période qui précède l'installation de la culture. Depuis la récolte et après le ramassage de tous les résidus de culture, le sol est laissé nu jusqu'au mois de Mars. Mais depuis le semis qui se fait au mois de Mars, les parcelles subissent beaucoup de travaux d'entretien qui aboutissent quelques fois à la formation de sillons perpendiculaires à la pente.

Les pertes en terres annuelles sur les parcelles destinées au pois chiche sont relativement élevées de 780 à 3800 kg/ha/an. Mais si on analyse le système de culture qu'après le semis, l'impact sera encore plus positif dans la réduction du ruissellement et de l'érosion.

Sur les parcelles occupées par la culture de pois chiche (effet conjoint de la culture et des techniques culturales), l'érosion a été réduite de 1,3 à 4 fois par rapport à la parcelle standard, mais reste élevée par rapport aux autres traitements. Les terres destinées aux pois chiche restent nues plus de 7 mois de l'année.

Les résultats obtenus sur le ruissellement et l'érosion montrent aussi, comme tous les autres traitements, une variabilité interannuelle (tabl. 18).

Tableau 18 : variabilité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle sur les parcelles cultivées en légumineuse (pois chiche sur SAV)

Traitements	Sol	Kram %				Kr max %				Erosion t/ha/an			
		Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Moy	C V	Min	Max	Moy	CV
Témoins nus	SAV	2,7	9,3	5,0	0,4	10	32	19	0,4	1,5	6,8	3,9	0,3
Culture légum. P. chiche	SAV	1,09	3,1	2,3	0,6	4,5	23,5	9,79	0,6	0,7	3,8	1,5	0,6

IV.1.1.4. Effet des systèmes de gestion et de l'érosion sur la dynamique du carbone : dynamique de la fertilité du sol

1.1.4.1. Stock, perte et évolution du carbone organique

Après avoir analysé l'effet des systèmes de gestion traditionnels, couramment employés, sur le ruissellement et l'érosion, il est apparu l'intérêt d'évaluer leur influence sur la dynamique du carbone du sol (dynamique de la fertilité du sol).

Variabilité spatiale des teneurs en carbone des sols

L'étude pédologique réalisée sur un micro bassin représentatif des monts de Beni Chougrane et plus particulièrement du bassin de l'oued Fergoug a montré une certaine variabilité spatiale du carbone organique du sol (SOC) au niveau des versants, la teneur du carbone varie de 0,6 à 3,3 % sur l'horizon de surface (Morsli, 1996).

Les teneurs en carbone organique des dix premiers centimètres pour les deux types de sols étudiés, sous différentes situations (au niveau des parcelles de 100 m²), sont globalement faibles, de 1 à 1,23 % (tabl. 19). Ces faibles taux s'expliquent en partie par l'érosion et l'exploitation continue des sols. Les systèmes de gestion des sols jouent un rôle dans la variabilité et l'évolution des teneurs

en carbone. Les plus fortes valeurs se retrouvent dans le sol à couvert végétal permanent ou à taux élevé de biomasse.

Pour les deux types de sol étudiés, sous différentes situations culturales, les teneurs du carbone organique diminuent de la surface vers le bas du profil. Sur le sol SBL, la diminution est relativement importante, diminution de 66 à 77 % sur une profondeur de 45 cm (tabl. 19). Par contre dans le sol SAV, la diminution n'est que de 33 à 40 %, ceci est dû probablement au brassage constant des horizons par les mouvements vertiques. Les teneurs sont relativement plus élevées sur le sol SAV de texture argileuse que sur le sol SBL de texture limoneuse. Les teneurs du carbone au niveau mondial varient selon la texture et la minéralogie (Batjes, 1996).

Tableau 19 : teneurs en carbone organique (CO %) sur 10, 30 et 45 cm de profondeur du sol pour les types de sols étudiés sur différentes situations et au niveau des parcelles de 100 m²

	Sol SBL					Sol SAV				
	SN	SC	SPP	SJP	SJNP	SN	SC	SP	SJP	SJNP
C % 10cm	1	1,03	1,03	1,03	1,23	1,02	1,2	1,1	1,13	1,23
Ecart type	0,04	0,10	0,13	0,13	0,16	0,03	0,08	0,10	0,20	0,22
Da (g/cm³)	1,51	1,52	1,50	1,53	1,44	1,35	1,35	1,32	1,36	1,31
C % 30 cm	0,65	0,75	0,74	-	0,9	0,75	0,9	0,82	0,88	1,05
Ecart type	0,02	0,05	0,05	-	0,10	0,06	0,08	0,08	0,10	0,12
Da (g/cm³)	1,66	1,65	1,66	-	1,58	1,40	1,39	1,41	1,43	1,39
C % 45cm	0,23	0,34	0,33	-	0,41	0,65	0,72	0,70	0,72	0,82

SN: sol nu ; SC: sous céréale ; SPP: sous culture de légumineuse en billon (petit pois) ; SJP: sous jachère pâturée ; SJNP: sous jachère mise en défens ; SP : sous culture de légumineuse (pois chiche) ; Da : densité apparente

1.4.1.1. Effet des systèmes de gestion sur les stocks du carbone

Les stocks en carbone ont été évalués en parcelles sur différentes profondeurs pour les deux types de sols étudiés et pour chaque système de gestion. Chaque parcelle a subi le même traitement continu pendant plusieurs années

Le suivi temporel de l'évolution du carbone organique du sol, pendant 5 à 7 ans, montre que le stock du carbone du sol (SOC) dans la couche 0 -10 cm change en fonction du système de gestion (fig. 36 et 37).

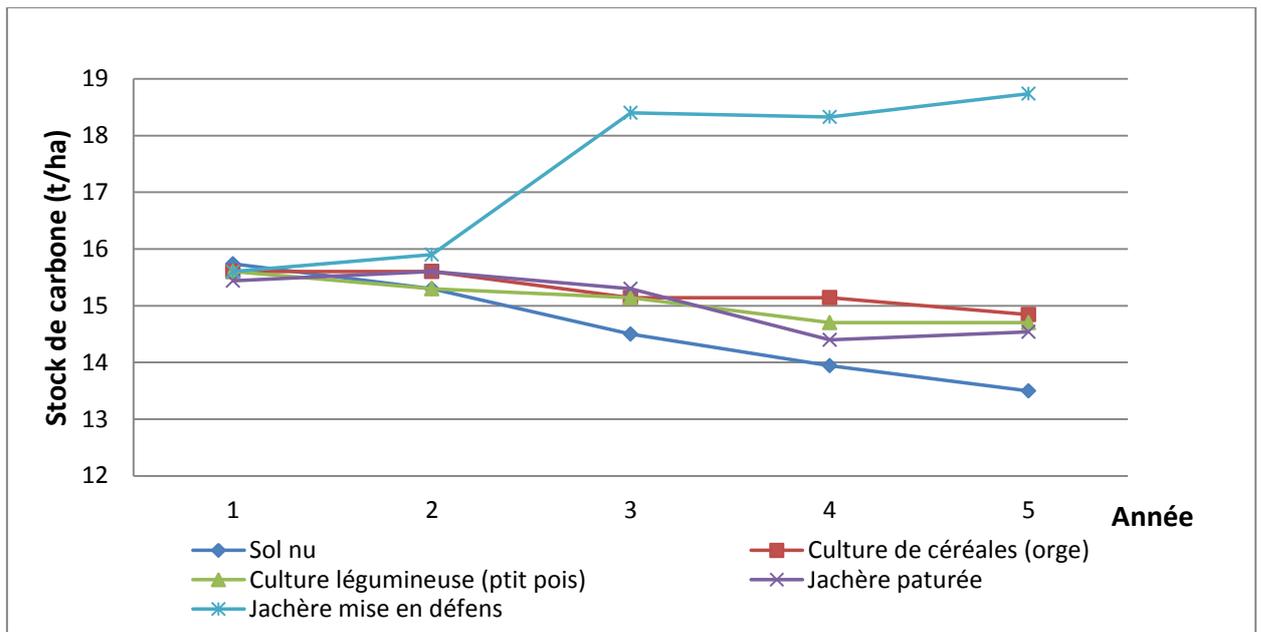


Figure 36 : évolution du stock de carbone en fonction des systèmes de gestion sur le sol SBL

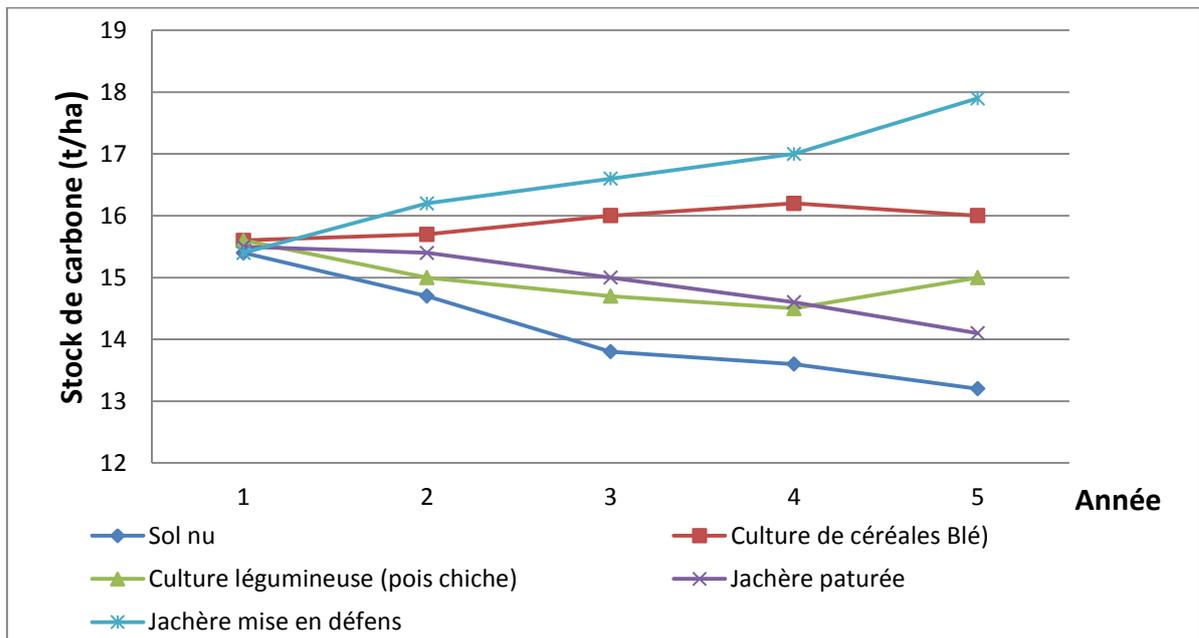


Figure 37 : évolution du stock de carbone en fonction des systèmes de gestion sur le sol SAV

Les stocks ont diminué de 10 à 15 % sur les sols nus, de 5 à 8 % sur les systèmes traditionnels et de 8 à 10 % sur les parcelles laissées en jachères pâturées. Par contre, sur les systèmes améliorés (jachère en défens et/ou améliorée), les stocks ont augmenté de 15 % (SAV) à 18 % (SBL). L'influence de la jachère mise en défens s'est faite sentir dès la 2^{ème} année. Elle a permis d'améliorer le SOC de 15% (SBL) à la troisième année.

1.4.1.2. Effet de l'érosion sur les pertes en carbone sous différents systèmes

Les pertes en carbone par l'érosion en nappe, mesurées sur les parcelles d'érosion, varient de 17 à 136 kg/ha/an et sont fonction des systèmes de gestion (tabl. 20). Ces pertes restent faibles par rapport aux stocks. Mais, les pertes totales peuvent être élevées. Le risque devient plus grand pour les sols peu profonds et nus.

Tableau 20 : perte annuelle du carbone organique (CO) par érosion en nappe sur système agropastoral

Sol	Sol SBL					Sol SAV				
	SN	SC	SPP	SJP	SJNP	SN	SC	SP	SJP	SJNP
Teneur du CO du sol en parcelle (%)	1,00	1,03	1,03	1,02	1,23	1,02	1,16	1,10	1,13	1,23
Teneur du CO des terres érodées (sédiments) (%)	1,60	2,80	2,90	2,60	4,80	1,40	2,30	2,70	2,60	3,50
Indice de sélectivité	1,6	2,71	2,81	2,54	3,90	1,37	1,98	2,45	2,30	2,84
Pertes en CO (kg/ha/an)	136,0	22,4	17,4	41,6	19,2	95,2	30,2	41,8	33,0	21,0

SN: sol nu ; SC: sous céréale ; SPP: sous culture de légumineuse en billon (petit pois) ; SJP: sous jachère pâturée ; SJNP: sous jachère mise en défens ; SP : sous culture de légumineuse (pois chiche) ; L'indice de sélectivité du carbone est le rapport entre le CO % des terres érodées (sédiments) et le CO % du sol de la parcelle d'érosion.

Erosion sélective (comparaison du CO de la couche 0-10 cm du sol avec celui des terres érodées (sédiment))

En plus du décapage de l'horizon de surface, nous avons remarqué que l'érosion en nappe entraîne des pertes sélectives en carbone organique et en éléments minéraux. La comparaison de CO de l'horizon superficiel (0 -10 cm) de chaque parcelle avec celui des terres érodées (sédiments), montre que la teneur de CO des terres érodées est de 2 à 4 fois plus que celle du sol de la parcelle expérimentale. La matière organique est l'élément le plus léger et par conséquent la première à être transportée en grande quantité par le ruissellement. Le bilan est généralement sous-estimé puisqu'on n'a pas pris en considération les éléments en solution. L'indice de sélectivité du carbone (CO% des terres érodées (sédiments) / CO% du sol de la parcelle d'érosion) varie selon le mode de gestion. Il varie de 1.3 à 1,6 sur un sol nu et de 1,9 à 3,9 sur un sol cultivé ou en jachère (tabl. 20). L'érosion est d'autant plus sélective que le sol est bien couvert. Cette sélectivité est relativement plus élevée sur les parcelles en jachère améliorée où la surface du sol est couverte par une mince litière. Cette dernière réduit la vitesse du ruissellement et le transport est limité aux particules fines et légères de l'horizon de surface. Les sédiments sont très riches en débris végétaux.

La figure 38 montre les variations saisonnières de l'érosion et des teneurs en carbone des sédiments en fonction de trois utilisations de sols : la jachère nue, la jachère améliorée et le système céréalier.

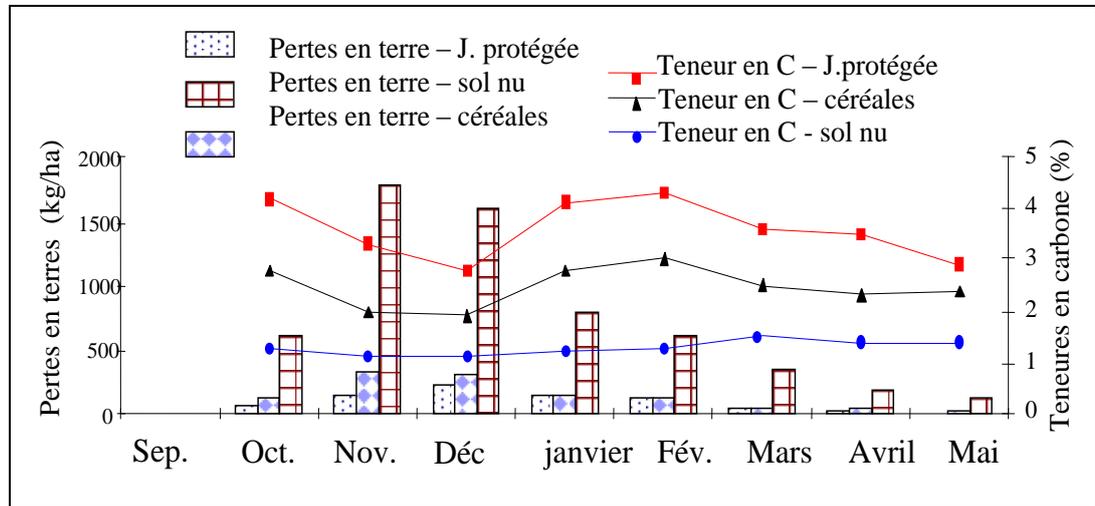


Figure 38 : variations saisonnières de la masse de terres érodées et de la teneur en carbone des sédiments sur le sol SBL

Au début de l'automne, la plus part des systèmes de gestion étudiés favorisent l'érosion des sols avec un appauvrissement en surface d'éléments fins qui sont riches en CO. Les pertes en CO sont relativement plus importantes et même l'indice de sélectivité est quelquefois élevé lors des premières pluies dues au balayage des matières organiques accumulées en surface. En novembre 2001, lors d'une série de pluies saturantes de plus de 100 mm, des sédiments de 30 cm d'épaisseur de 10 à 30 % de MO ont couvert de grandes superficies en aval d'un micro bassin versant dans les monts de Beni Chougrane. En hiver, les eaux de ruissellement de fortes énergies creusent le sol en profondeur (formation des rigoles) et emportent les terres des horizons profonds pauvres en carbone.

IV.1.2. Ruissellement et érosion sur parcelles de 1 m² sous pluies simulées

Comme nous l'avons expliqué précédemment dans le chapitre III, certains aspects sont difficilement perceptibles à l'échelle de la parcelle de 100 m² où sont associés les effets de plusieurs paramètres. Les résultats obtenus sur ces parcelles de 100 m² expriment l'effet combiné de plusieurs variables et il n'est pas toujours possible de dissocier les effets de chacun des facteurs. L'analyse de l'effet du sol, du travail du sol (effet de rugosité) et des jachères (effet de couverture du sol) s'est révélée utile pour une bonne compréhension de facteurs conditionnels de l'érosion et a justifié le recours à l'emploi de la simulation des pluies.

Les simulations de pluie, qui permettent d'isoler les facteurs et d'observer leurs comportements, ont été effectuées sur différentes stations et sur différentes situations (sol nu, sol labouré et sol en jachère). Au total, en incluant les répétitions, des centaines de pluies ont été simulées sur plusieurs dizaines de micro parcelles de 1m². Elles se répartissent de la façon suivante :

- 180 pluies simulées sur différentes stations qui représentent le sol nu. Les états de surface sont presque les mêmes que ceux de la parcelle standard de 100 m² et ceci pour apprécier le comportement du sol et la naissance du ruissellement en fonction des facteurs physiques : état de surface du sol, intensité de pluie et pente.

- 159 pluies simulées pour apprécier l'effet des jachères et de certaines techniques culturales (travail du sol). Les expérimentations ont été réalisées sur le sol SAV et SBL.

IV.1.2.1. Comportement du sol / effet sol)

La simulation de pluie a permis d'isoler le facteur sol et d'analyser son comportement. Pour apprécier le déclenchement et l'intensité du ruissellement et les transports solides (détachabilité) du sol nu (sol anciennement labouré, identique au sol de la parcelle standard), différentes intensités d'averses de pluie, comprises entre 30 et 80 mm h⁻¹ ont été simulées sur des micro parcelles de 1m². Sur chaque micro parcelle, trois pluies successives ont été appliquées pour tester les limites de résistance du sol.

Les résultats sont exprimés par des histogrammes ou des tableaux synthétiques.

1.2.1.1. Paramètres mesurés

2.1.1.1. Pluie d'imbibition

La pluie d'imbibition (P_i) correspond à la phase d'humectation du sol durant laquelle le volume d'infiltration est supérieur à la pluie tombée et où aucun ruissellement n'est observé. *Elle permet de déterminer le seuil de pluie nécessaire pour déclencher le ruissellement et d'apprécier la réaction du sol.*

Les valeurs de P_i , mesurées sur différentes situations de sol et sous diverses intensités de pluie simulées, sont reportées sur les figures 39 et 40.



P_i : Pluie d'imbibition; S : sol sec (sol sec n'ayant pas reçu de pluie depuis 25 jours ou d'avantage); H : sol humide (sol humide ayant reçu une pluie et 24 heures doivent être écoulées après la dernière pluie. On reproduit ainsi une pluie qui intervient après une période de ressuyage); TH : sol très humide (sol très humide ayant reçu récemment (quelques heures) une ou plusieurs pluies. La dernière s'étant produite au plus une heure auparavant) ; P : pente en % ; I30 : intensité de pluie de 30 mm/h; I50 : intensité de pluie de 50 mm/h; I80 : intensité de pluie de 80 mm/h.

Figure 39: pluie d'imbibition (P_i) nécessaire pour le déclenchement du ruissellement pour différentes situations sur sol SAV

Pour les différentes simulations de pluie que nous avons réalisées sur le sol SAV (sol nu et anciennement labouré), la pluie d'imbibition des premières pluies varie de 8 à 35 mm de pluie (sols secs et rugueux), de 1.6 à 2.6 mm lors de la deuxième pluie (sols dégradés et humides) et de 0.5 à 1.3 mm lors de la troisième pluie (sols très humides et aplanis par les pluies). Une infiltration préférentielle attribuable à des macropores se produit lors de la première pluie dans la plupart des cas. A ce stade, le sol absorbe rapidement l'eau et à mesure que l'eau s'infiltré le mouvement d'eau diminue et devient de plus en plus lent. Lorsque le micro relief (la rugosité) s'estompe et les croûtes se forment, les pluies ultérieures, même si elles sont de faibles intensités, engendrent facilement du

ruissellement. Lors de la deuxième et la troisième pluie, les P_i ont beaucoup chuté pour arriver à des P_i de 1mm.

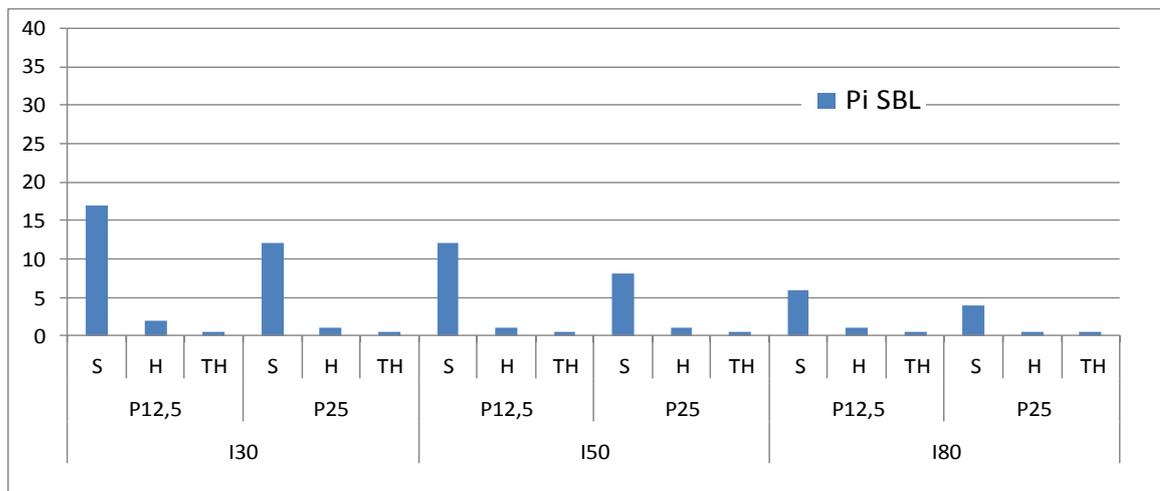
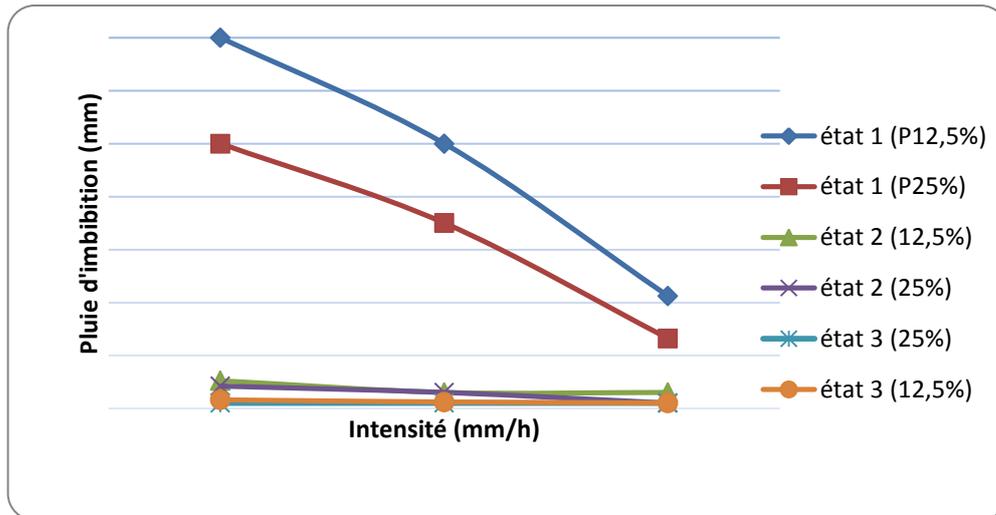


Figure 40: pluie d'imbibition (P_i) nécessaire pour le déclenchement du ruissellement pour différentes situations sur sol SBL

Pour le sol SBL, la pluie d'imbibition des premières pluies varie de 4 à 17 mm de pluie (sols secs et plus ou moins rugueux), de 2 à 0,5 mm lors de la deuxième pluie (sols dégradés et humides) et de 0,5 mm lors de la troisième pluie (sols très humides et aplanis par les pluies). Ces P_i restent relativement faibles à celles obtenues sur le sol SAV lorsque le sol est sec. Mais une fois le sol est humidifié par les premières pluies et l'état de surface est dégradé, les P_i sont presque égales.

La rapidité d'apparition du ruissellement et son importance sont d'autant plus considérables que l'état de surface est dégradé et que le sol est plus humide. Lors de la troisième pluie où la surface du sol est totalement fermée et aplanie, le ruissellement se déclenche même pour des pluies de hauteur très faible (0,5 à 1 mm).

Le déclenchement du ruissellement est plus rapide quand l'intensité de la pluie augmente (fig. 41 et 42). Lorsqu'on passe de 80 à 30 mm/h d'intensité, la pluie d'imbibition peut augmenter jusqu'à plus de trois fois lorsque le sol est sec et non dégradé. Les différences sont autant plus élevées que le sol est sec et rugueux. Mais pour les sols dégradés et humides, c'est l'effet de l'état du sol qui l'emporte.



Etat 1: sol sec ; Etat 2: sol humide ; Etat3: sol très humide ; P : pente en % ; I30 : intensité de pluie de 30 mm/h; I50 : intensité de pluie de 50 mm/h; I80 : intensité de pluie de 80 mm/h

Figure 41 : influence de l'intensité de pluie sur le déclenchement du ruissellement (Sol SAV)

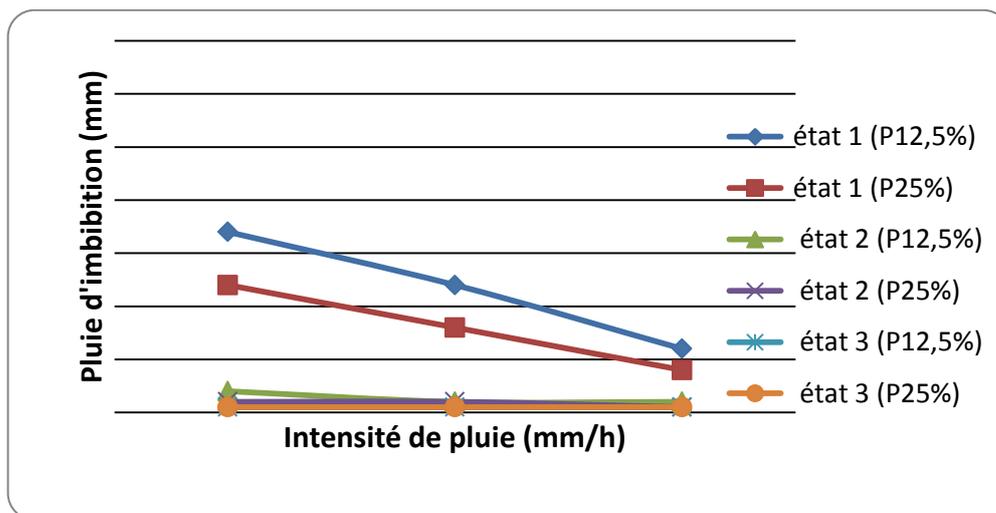


Figure 42 : influence de l'intensité de pluie sur le déclenchement du ruissellement (sol SBL)

L'effet de la pente n'est pas négligeable. En passant de 12.5 à 30 %, les pluies d'imbibition ont beaucoup diminué. Les différences entre les P_i sont plus élevées quand le sol est sec et rugueux (fig. 43 et 44). Une fois le sol est humidifié et dégradé (disparition de rugosité et formation des croûtes) par l'énergie de pluie, le rôle de la pente devient négligeable. L'effet état de surface l'emporte sur l'effet pente.

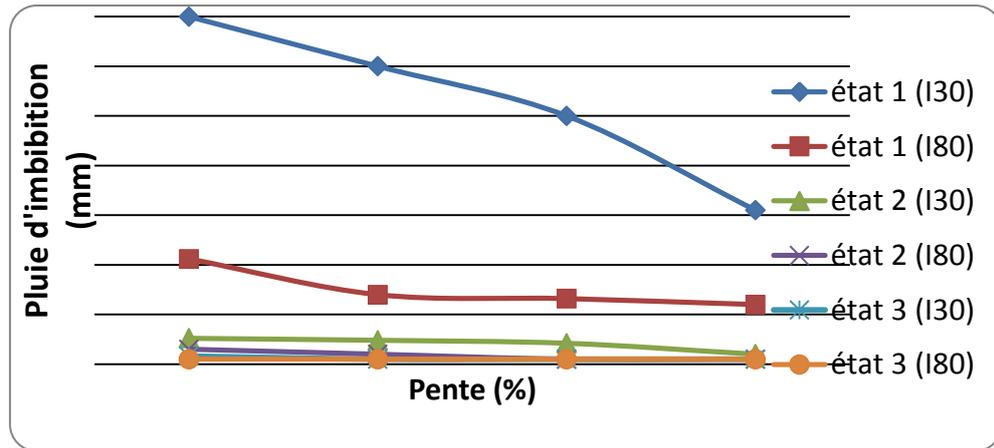


Figure 43 : influence de la pente sur le déclenchement du ruissellement (sol SAV)

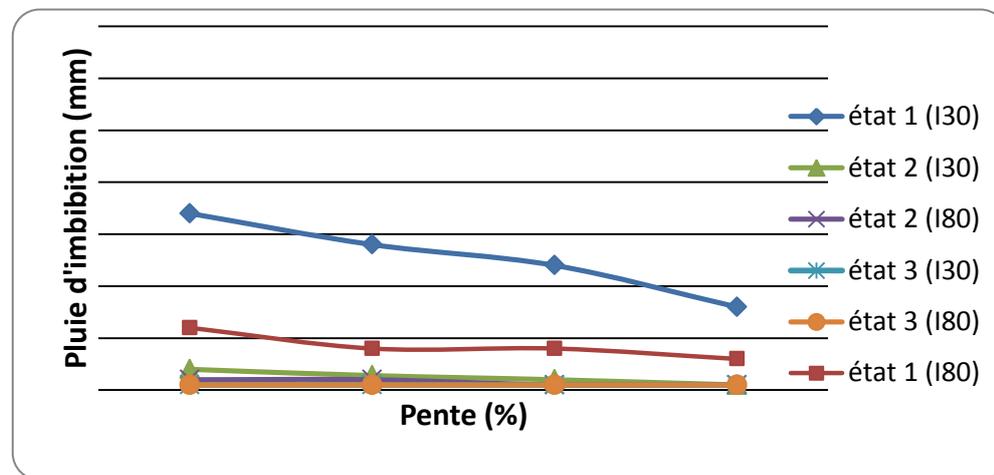


Figure 44 : influence de la pente sur le déclenchement du ruissellement (sol SBL)

2.1.1.2. Ruissellement

Lors d’une simulation de pluie, on constate que l’infiltration décroît au cours du temps au fur et à mesure que le front d’infiltration pénètre à l’intérieur du sol et que la structure se dégrade. Au cours du temps, des filets d’eau commencent à se former et à se réunir en bas de la parcelle expérimentale et le ruissellement fait son apparition sous forme de goutte à goutte puis il évolue vers un régime transitoire pour atteindre un régime permanent. Durant la simulation de pluie, le ruissellement ne cesse d’accroître, jusqu’à atteindre un ruissellement maximal qui est la valeur plancher du régime permanent du ruissellement. L’évolution du ruissellement, pour tous les essais de simulation de pluie réalisés, a presque la même allure que celle enregistrée par Lafforgue (fig. 29).

Le ruissellement de surface, lorsqu'il prend assez d'importance, il finit par se concentrer et acquérir une certaine énergie érosive capable de creuser le sol et de former des petites griffes. Les observations montrent que l'énergie érosive de creusement augmente avec la pente et l'intensité de pluie.

Phase de transition

La phase de transition (T_m), durée entre le déclenchement du ruissellement et sa stabilité proprement dite. Elle correspond à l'augmentation progressive du ruissellement, en nappes et en filets et à la diminution corrélative de la capacité d'infiltration du sol. *Elle exprime la vitesse d'évolution des états de surface.*

Cette phase varie surtout en fonction de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. Lorsqu'on passe de 30 à 80 mm/h d'intensité de pluie, la durée de la phase de transition « T_m » diminue (fig. 45) et l'accroissement du ruissellement est plus rapide. Pour un sol sec et rugueux, la phase de transition est de 2 à 3 fois plus grande que pour un sol humide et dégradé: plus le sol est ouvert et sec, plus il retarde le ruissellement. L'évolution des états de surface suit un cycle bien connu, à savoir : désagrégation et fonte des agrégats et formation d'une croûte structurale, puis accroissement du ruissellement jusqu'à son régime permanent. L'évolution importante et rapide des états de surface consiste à une dégradation des agrégats et une redistribution des particules détachées sous l'effet des pluies (Casenave et Valentin, 1989).

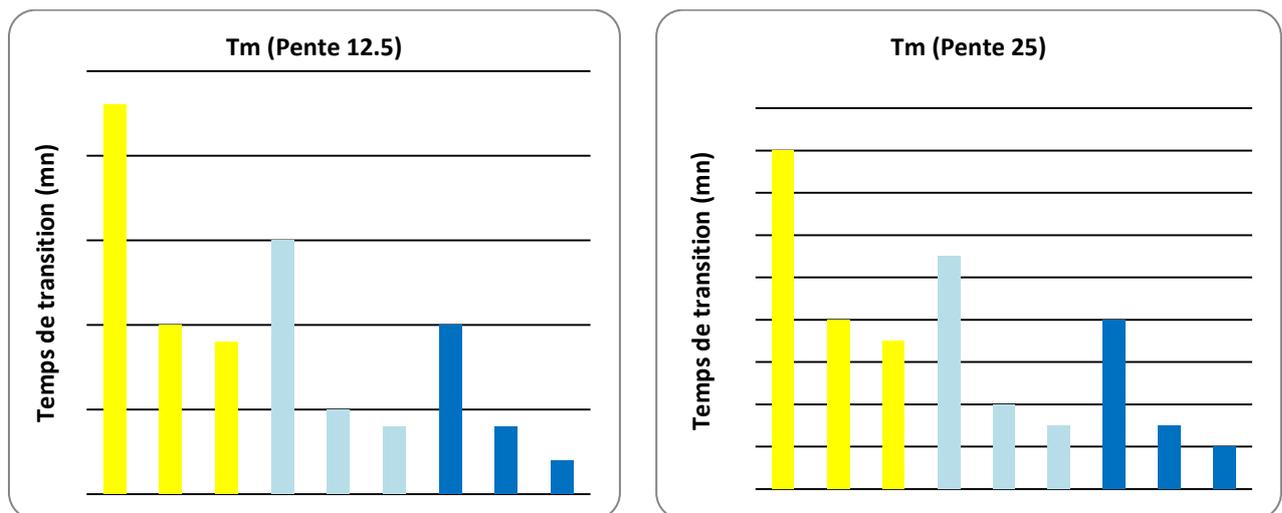


Figure 45 : durée de la phase de transition (T_m). Vitesse d'évolution des états de surface entre le déclenchement du ruissellement et sa stabilité proprement (phase de R_x).

Coefficient du ruissellement

Le coefficient de ruissellement maximal (R_x), déterminé au cours de la période à régime permanent, traduit un équilibre entre le ruissellement et l'infiltration. L'intensité de ruissellement se stabilise à son niveau le plus élevé au moment où l'intensité d'infiltration est minimale (F_n).

Les coefficients de ruissellement sont plus élevés sur les sols humides, moyennement dégradés ou très dégradés par la succession des pluies et peuvent atteindre ou dépasser les 90% (tabl. 24 et 25). Pour les sols secs, les coefficients sont moindres, ils demandent des pluies importantes pour arriver à des valeurs planchers (ruissellement stabilisé). Par contre pour les sols dégradés et humides, les coefficients de ruissellement sont élevés dès le déclenchement du ruissellement et les valeurs planchers sont facilement atteintes. Des pluies très faibles peuvent facilement atteindre des valeurs planchers avec des R_x de plus de 90 %.

L'intensité de la pluie, la pente et l'état de surface ont un grand effet sur la réduction ou l'augmentation du coefficient de ruissellement. L'évolution du ruissellement est plus rapide avec l'augmentation de l'intensité de la pluie et de la pente (tabl. 24 et 25). Les états de surface moins rugueux et les pentes fortes réduisent l'effet de freinage de l'écoulement de l'eau.

2.1.1.3. Infiltration finale

L'infiltration finale (F_n) correspond à la différence entre le volume de ruissellement et le volume d'eau de la pluie tombée durant la phase de régime permanent. Elle correspond au coefficient de ruissellement maximal et représente la capacité du sol à infiltrer lorsqu'il est proche de la saturation. F_n varie de 4 à 17 mm/h pour les sols secs et de 1 à 11 mm/h pour les sols humides et dégradés (tabl. 24 et 25). L'infiltration finale varie en fonction de l'état de surface du sol et de l'intensité de pluie.

Les essais de simulation comportent trois pluies. Le taux d'humidité du sol est relativement plus élevé lors de la pluie réalisée après 30 mn de la première (état TH). Alors que la valeur la plus faible de F_n n'est obtenue que lors de la pluie effectuée après 24 h de la première pluie (état H) et où le taux d'humidité du sol est relativement faible et l'état de surface du sol est totalement dégradé (sol fermé et aplani). Ceci indique que F_n reste dépendante de l'évolution des états de surface plus que l'état d'humidité du sol.

2.1.1.4. Transports solides / Détachabilité

La collecte des particules solides à l'exutoire des parcelles expérimentales permet de quantifier l'érosion, bien qu'on ne puisse pas parler d'érosion à l'échelle d'une parcelle d'un mètre carré. Les filets d'eau n'ont pas encore assez de vitesse et d'énergie au bout d'un mètre pour entailler la surface du sol et cisailer les mottes comme sur les champs (Roose, 1989). Valentin (1981) propose le terme de détachabilité et la définit comme l'aptitude d'un sol à être fractionné en particules susceptibles d'être transportées.

Les résultats des différents essais montrent que la charge solide varie de 16 à plus de 100 g/l: 16 à 54 g/l sur les sols secs et de 20 à plus de 100 g/l sur les sols humides, sous différentes intensités de pluies et pentes du sol (tabl. 21 et 22). C'est lors des fortes pluies (80 mm/h) que la charge solide est très élevée, la concentration a dépassé les 100 g/l. Vu l'importance du volume ruisselé, lors de ces pluies fortes, le ruissellement devient plus érosif. Nous avons remarqué, qu'au cours de la simulation, les exportations tendent vers la diminution pour les sols secs, surtout pour le sol SAV.

L'effet de la pente n'est pas négligeable. En passant de 12.5 à 25%, les concentrations ont relativement augmenté surtout lors de fortes pluies. La pente faible, tout en contraignant la force et la vitesse du ruissellement, peut favoriser l'accumulation des particules du sol. Par contre, une pente plus accentuée engendre une abondante lame ruisselée chargée du maximum de particules de sol.

Tableau 21: paramètres mesurés lors des simulations de pluies- Sol SAV

Intensité	30 mm/h						50 mm/h						80 mm/h					
Pente %	12.5			25			12.5			25			12.5			25		
État du sol	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH
Pi (mm)	35	2,6	0,5	30	2,1	0,5	25	1,5	0,5	17	1,5	0,5	10,6	1,5	0,5	8,5	1	0,5
Fn (mm/h)	17	11	10	14	7.8	6.2	11.4	7.1	3.8	8.5	4.3	3.3	6.4	2.8	1.2	5.2	2.7	1.2
Kr max (%)	42	62	66	52	74	79	77	85	92	82	91	93	91	96	98	93	96	98
Cm (g/l)	38	29	26	42	30	28	39	38	32	47	37	36	51	45	44	54	90	107

S: sol sec; H: sol humide; TH: sol très humide.

Tableau 22: paramètres mesurés lors des simulations de pluies- Sol SBL

Intensité	30 mm/h						50 mm/h						80 mm/h					
Pente %	12.5			25			12.5			25			12.5			25		
Etat du sol	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH	S	H	TH
Pi (mm)	17	2	0,5	12	1	0,5	12	1	0,5	8	1	0,5	6	1	0,5	4	0,5	0,5
Fn (mm/h)	13, 4	8,1	6,6	8,9	5,3	3,2	8,1	4,2	2,6	6,5	4,1	2,1	5,1	2,4	1,0	4,2	2,1	1,0
Kr max (%)	55	73	78	70	82	89	83	91	95	86	91	96	93	97	99	95	97	99
Cm (g/l)	16	20	26	16	20	33	32	40	51	35	40	53	36	55	62	50	80	80

S: sol sec; H: sol humide; TH: sol très humide.

IV.1.2.2. Effet du travail du sol / Effet de rugosité

Trois situations de travail du sol ont été étudiées sous pluies simulées : trois pour le sol de type brun calcaire vertique (SAV) et deux pour le sol brun calcaire de texture limoneuse (SBL).

Pour pouvoir comparer les différents traitements entre eux, nous avons appliqué trois pluies consécutives de même intensité (30 mm/h). Une première pluie sur sol sec travaillé, une deuxième pluie sur le même sol se trouvant dans des conditions très humides (proche de la saturation de l'horizon de surface) et une troisième pluie sur le même sol humide après 24 h (pluie qui intervient après une période de ressuyage).

La figure 46 présente les caractéristiques de l'état de surface des différents types de travail de sol.

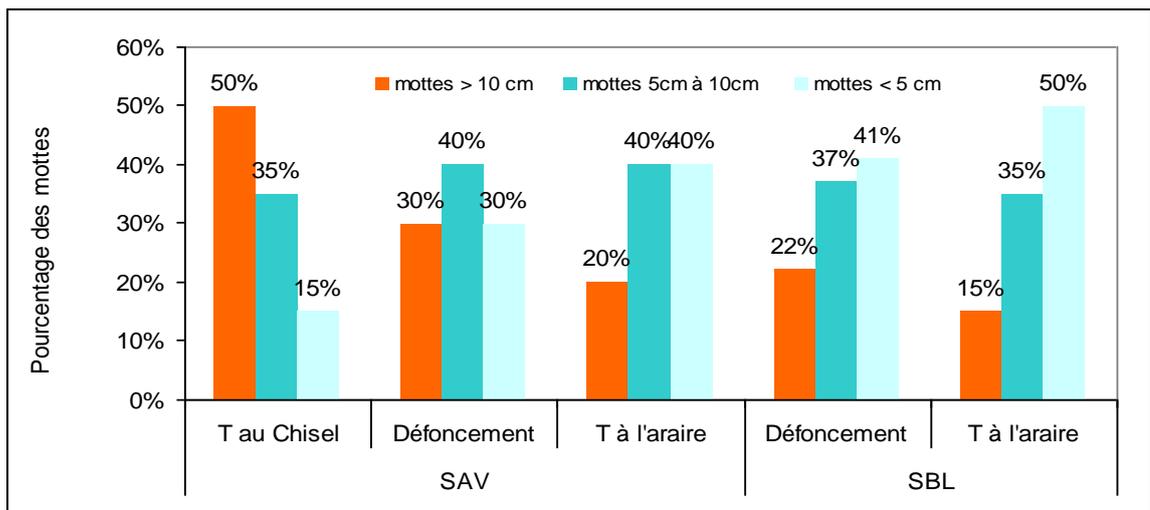


Figure 46 : caractéristiques de l'état de surface (rugosité : dimension des mottes) des différents types de travail de sol

Caractéristiques des différentes situations de travail du sol

TA : travail traditionnel effectué à l'araire avec une rugosité moyenne;

D : travail de défoncement effectué avec la charrue à soc, travail avec une rugosité moyenne à grossière avec retournement des horizons de profondeur;

TM : travail du sol effectué au chisel (matériel à dents), travail grossier sans retournement (grosses mottes non brisées qui préservent encore leur végétation);

SNTP : sol nu et pâturé, qui n'a pas été travaillé depuis la récolte précédente (de juin à octobre), situation caractérisée par une faible rugosité, un tassement et une présence de croûtes de surface. Il représente un labour ancien.

PW : sol nu, qui correspond à l'état du sol de la parcelle témoin (les mottes ont été brisées et ratissées, parcelle qui correspond aux normes de Wischmeier).

Les pluies d'imbibitions (Pi), lors de la première pluie, sont élevées (35 à 42 mm) pour les sols secs et travaillés (tabl. 23). Les Pi sont plus élevées sur sol fraîchement travaillé (TM, TA et D) que sur sol avec labour ancien (SNTP). Le retard d'apparition du ruissellement et son importance sont d'autant plus considérables que la rugosité et la porosité sont importantes. Lors de la troisième pluie (sol très humide et très dégradé), les valeurs de Pi ont chuté de 5 à 9 fois sur sol travaillé de type SAV et de 30 à 36 fois sur sol travaillé de type SBL. Lors de la troisième pluie, le sol SBL s'est comporté comme le sol SNTP. Alors que sur le sol SAV, les Pi sont encore élevées.

Tableau 23 : effet du travail du sol (effet de la rugosité) sur le ruissellement et l'érosion

I = 30 mm/h 3 pluies consécutives		TM	TA		D		SNTP		P Wischmeier	
		SAV	SAV	SBL	SAV	SBL	SAV	SBL	SAV	SBL
Pluie d'imbibition Pi (mm)	1 ^{ère} Pluie (sol sec)	42	35	30	40	36	18	12	20	15
	2 ^{ème} Pluie (sol humide)	26	21	16	22.4	17	2.2	2	4.6	3
	3 ^{ème} Pluie (sol très humide)	8	4.8	1	4.5	1	2	0,5	2	1
Infiltration finale FN (mm/h)	1 ^{ère} Pluie (sol sec)	23	20	15	20	16	10	8	10	8
	2 ^{ème} Pluie (sol humide)	18	15	9	17	11	2,4	3	5	3
	3 ^{ème} Pluie (sol très humide)	11	9	4	9.1	5	2	2	2,4	2
Charge solide (g/1)	1 ^{ère} Pluie (sol sec)	22	29	40	32	39	38	18	36	20

Les résultats obtenus sous pluies simulées (tabl. 26) ont montré l'effet positif du travail du sol par le chisel (travail grossier sans retournement avec beaucoup de grosses mottes qui préservent

encore de la végétation et de résidus de culture en surface) sur la réduction et surtout sur le retardement du déclenchement du ruissellement et de l'érosion. L'état de surface laissé par le TM a permis, après trois pluies consécutives, d'avoir une Pi deux fois plus que celle résultant d'un défoncement avec la charrue à soc

La même chose a été observée pour l'infiltration finale (Fn) qui reste élevée pour les sols travaillés et secs (15 à 23 mm/h) et faible pour le sol avec labour ancien (8 à 10 mm/h). Lors de la troisième pluie, Fn a chuté (4 à 11 mm/h) pour les sols travaillés mais reste toujours élevées par rapport au SNTP.

Les concentrations moyennes en sédiments restent du même ordre pour tous les sols travaillés (29 à 40 g/l), sauf pour le TM (22 g/l). Il semble que l'état motteux du TM et surtout la perturbation réduite de la surface du sol ont joué un grand rôle dans la diminution des pertes en terre.

IV.1.2.3.. Effet des jachères / effet de couverture du sol

Sur les jachères, les états de surfaces et en particulier les surfaces couvrantes, caractérisées par une grande différenciation selon les saisons, jouent un rôle essentiel sur le déclenchement et l'intensité du ruissellement et d'érosion. Afin de mieux comprendre l'effet de ces états de surfaces sur les phénomènes de ruissellement diffus et d'érosion en nappe, les comportements hydrodynamiques des jachères ont été testés au cours des campagnes d'automne, d'hiver et de printemps. Les valeurs des paramètres mesurés sur les différentes microparcelles, sont reportées sur le tableau 24.

Au début d'automne, sur les deux types de sols étudiés, presque toutes les situations se ressemblent, le sol est nu, sans couvert végétal, plus ou moins tassé. Les seules couvertures qui peuvent exister pendant cette période sont celles des litières pour les sols en jachère et des pailles pour les sols cultivés (taux de couverture par les pailles très faible). Le taux de couverture diffère d'une situation à une autre selon le mode de gestion du sol.

A la suite d'un assèchement estival profond, le sol brun calcaire vertique (SAV) est caractérisé par un réseau de fissures profond et dense. Le sol est fortement asséché surtout en surface. Les premières pluies ont donné du ruissellement après 10 à 26 mm sur les jachères non pâturées et après 7 à 20 mm sur les jachères pâturées. Les Pi des jachères sur SAV diffèrent beaucoup des Pi des jachères sur SBL (fig. 47 et 48). Cette différence n'est pas due seulement à la

couverture du sol (les taux de couverture ne sont pas très différents à cette époque), mais surtout au réseau de fissures du sol SAV qui a permis de véhiculer l'eau rapidement en profondeur. Sur le sol SAV, l'écoulement hypodermique l'emporte sur le ruissellement de surface tant que les fissures sont ouvertes.

Tableau 24 : résultats du suivi du comportement de quelques parcelles en jachères sous pluies simulées (effet de la couverture du sol)

Sol	Période	Traitement	Ordre de pluie	Pi (mm)	Fn (mm/h)	C (g/l)	Sc (%)	Sf (%)
Sol Brun calcaire vertique (SAV)	Septembre (automne)	JNP	1 ere pluie	26	14	18	58	10
			2eme pluie	10	10	16	44	50
			3eme pluie	3	7	18	35	90
		JP	1 ere pluie	20	9	18	32	30
			2eme pluie	6	6	16	26	70
			3eme pluie	2	3	22	23	90
	Décembre (hiver)	JNP	1 ere pluie	16	10	16	80	55
			2eme pluie	6	6	18	76	90
		JP	1 ere pluie	8	6	20	60	75
			2eme pluie	2	2	17	55	94
	Mars (printemps)	JNP	1 ere pluie	18	18	10	98	45
			2eme pluie	8	12	8	90	86
JP		1 ere pluie	12	10	10	70	60	
		2eme pluie	4	8	7	67	90	
Sol brun calcaire (SBL)	Septembre (automne)	JNP	1 ere pluie	10	8	12	50	45
			2eme pluie	4	4	17	45	70
		JP	1 ere pluie	7	6	18	30	60
			2eme pluie	2	3	20	26	96
	Décembre (hiver)	JNP	1 ere pluie	6	6	16	80	75
			2eme pluie	2	3	17	80	87
		JP	1 ere pluie	4	3	18	56	79
			2eme pluie	0,5	2	19	56	96
	Mars (printemps)	JNP	1 ere pluie	15	14	13	97	70
			2eme pluie	8	10	12	97	94
		JP	1 ere pluie	10	12	15	68	84
			2eme pluie	4	9	17	68	97

JP : jachère pâturée ; JNP : jachère non pâturée; Pi pluie d'imbibition; Fn : infiltration finale; C: charge solide des eaux de ruissellement; Sc: surfaces couvertes; Sf : surfaces fermées.

Lors de la campagne du début d'hiver (sol quasiment aplani, fermé et plus ou moins saturé après la succession de pluies), le développement du couvert végétal est encore faible. Les Pi enregistrées sont relativement faibles par rapport à celles de l'automne et ce quelle que soit la situation et le type de sol (fig. 47 et 48).

En printemps, lorsque le développement du couvert végétal atteint le maximum (couverture du sol est de 68 à 98 %), les P_i sont relativement plus élevées pour les jachères sur SAV par rapport à celles obtenues en hiver. Pour les jachères sur SBL, les P_i enregistrées restent les plus élevées par rapport à celles d'hiver et d'automne.

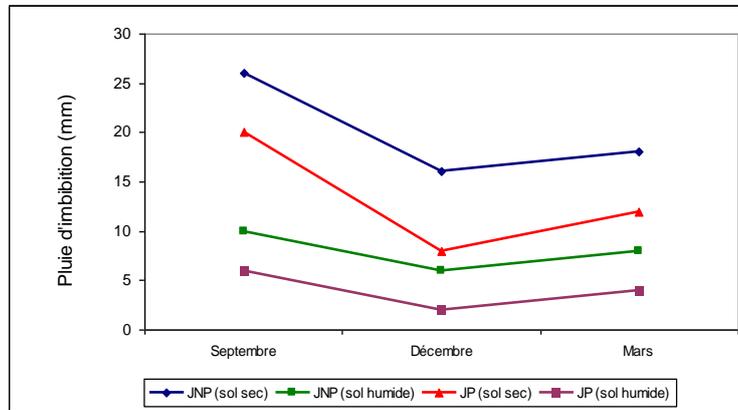


Figure 47: effet de l'évolution des jachères sur le déclenchement du ruissellement - pluie d'imbibition (sol SAV; pente 20%; I 30mm/h)

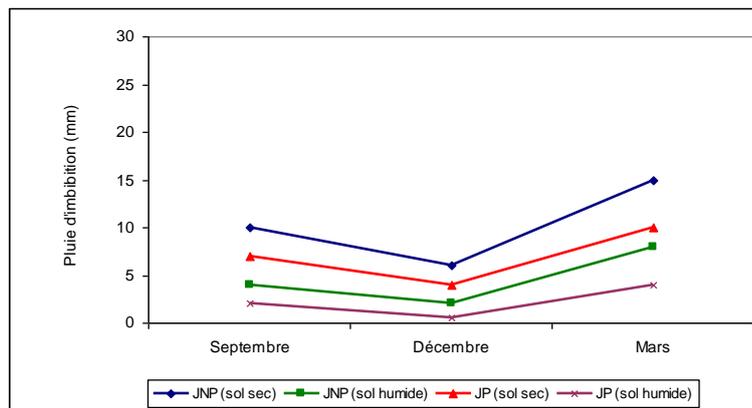


Figure 48: effet de l'évolution des jachères sur le déclenchement du ruissellement - pluie d'imbibition (sol SBL; pente 20%; I 30mm/h)

La comparaison entre les jachères pâturées et les non pâturées montre bien l'effet de la couverture du sol. Les P_i les plus élevées sont observées sur les jachères non pâturées où le ruissellement prend beaucoup de temps pour se déclencher. Les P_i restent toujours élevées sur le sol SAV que sur le sol SBL lors des deux premières pluies.

L'irrégularité que connaît la pluie d'imbibition au niveau de chaque situation, peut être expliquée en partie, par la couverture du sol qui est constituée par le couvert végétal et les débris organiques. Ces derniers, protègent la surface du sol, constituent de petits barrages et retardent ainsi le ruissellement.

IV.1.3. Erodibilité des sols

Le facteur d'érodibilité des sols (K) exprime la résistance propre du sol à l'érosivité des pluies, il est calculé à partir de l'équation de Wischmeier et Smith (1978) et peut être estimé par le nomographe de Wischmeier et *al* (1971).

L'érodibilité (K_{USA}) des deux types de sols étudiés (sols nus soumis aux pluies naturelles durant plusieurs années de mesures) a été calculée d'après l'équation de Wischmeier et Smith (1978):

$$K_{USA} = E/R_{USA} \times SL \times 2,24$$

Et par le nomographe de Wischmeier (fig. 49) pour les deux types de sols étudiés.

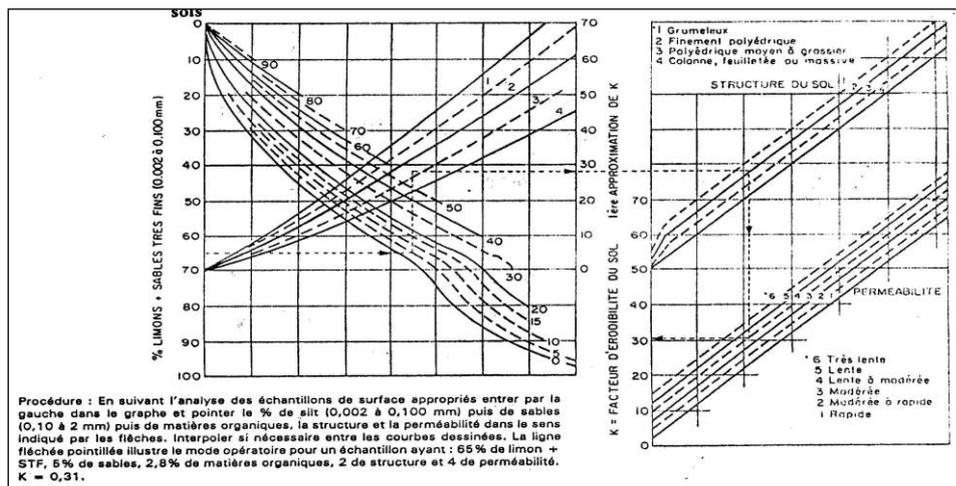


Figure 49 : nomographe permettant une évaluation rapide du facteur K d'érodibilité du sol (Wischmeier et *al.*, 1971)

D'après l'équation de Wischmeier et Smith (1978), le facteur d'érodibilité varie de 0,002 à 0,008 pour le sol SAV et de 0,018 à 0,04 pour le sol SBL. Les valeurs estimées du facteur d'érodibilité par le nomographe de Wischmeier et *al* (1971) sont de 0,11 à 0,15 pour le sol SAV et de 0.26 à 0.40 pour le sol SBL.

Estimation de l'érosion au niveau du versant - Utilisation des radionucléides

Versant 1		Versant 2		Versant 3	
Code d'échantillon	Perte du sol modèle MBM (t/ha/an)	Code d'échantillon	Perte du sol modèle MBM (t/ha/an)	Code d'échantillon	Perte du sol modèle MBM (t/ha/an)
SAV 01	14.1	SAV 08	14.78	SAV 13	21.18
SAV 02	27.93	SAV 09	72.21	SAV 14	14.25
SAV 03	25.85	SAV 10	66.85	SAV 14	34,45
SAV 04	20.01	SAV 11	64.25		
SAV 05	26,8	SAV 12	37.01		
SAV 06	29.66				
SAV 07	16.05				
SAV V1	49.49	SAV V2	68.81	SAV V3	45.35

IV. 2. DISCUSSION

IV.2.1. Ruissellement et érosion sur parcelles de 100 m²

2.1.1. Précipitations et indice d'agressivité

Les pluies tombées pendant la période de mesure (1993/1994 à 2012/2013) sont de faibles hauteurs (52 % de pluies tombées ont une hauteur de 0,5 à 10 mm). La moyenne annuelle des précipitations de la période de mesure reste un peu élevée par rapport aux précipitations annuelles moyennes des périodes anciennes, celles de 1971-2001 et de 1943-2004.

Le tableau 11 montre que 33 % des précipitations annuelles (Pan) de la période de mesure sont déficitaires par rapport à la moyenne annuelle de la période de 1971-2001. Dans le Nord-ouest algérien, les précipitations enregistrées depuis 1930 montrent de nombreuses années déficitaires pendant la décennie 40, puis sur l'ensemble des décennies 80 et 90 (Talia, 2003). Les lames d'eau annuelles écoulées des bassins versants de l'oued El Hammam ont diminué de 28 à 36 % en moyenne par rapport à la période 1949-76 (Meddi et Meddi, 2005).

L'indice d'agressivité annuel moyen ($R_{am} = P_{am} \times 0.12$) pour la période de mesure est de 52,3. Les valeurs de R_{am} , varient de 20 à 100 dans le Nord-ouest algérien (Zekri, 2002; Kouadri, 2012). En région méditerranéenne, l'indice d'agressivité des pluies varie entre 50 et 350 et entre 20 et 100 au Maghreb (Roose et al., 2012). Au bassin versant de l'Oued Mina, zone limitrophe des monts de Beni chougane, l'indice d'érosivité (R_{usa}), calculé sur la base de dépouillement de 902 pluies enregistrées à 7 pluviographes sur 2 années consécutives, est estimé à 16 (Touaibia et al., 2000). Il y a donc une situation paradoxale. D'une part, les climats méditerranéens sont réputés agressifs : paysages très dégradés, versants ravinés et inondations catastrophiques très fréquentes, mais d'autre part, beaucoup d'auteurs (Arabi et Roose, 1991; Gomer, 1992; Mazour, 1992; Gomer et Vogt, 1993; Roose et al., 1996; Touaibia et al., 2000) constatent de modestes indices d'agressivité des pluies dans cette région en comparaison avec les pluies des régions tropicales humides où R_{usa} varie entre 500 et 1200 (Kalmann, 1976; Pihan, 1979; Roose, 1972 et 1994). Cela semble indiquer que les séries de pluies saturantes, les systèmes de gestion, les sols et leur interaction sont à l'origine des phénomènes catastrophiques plus que l'agressivité des pluies orageuses. La conjugaison des caractéristiques morphopédoclimatiques engendre des ruissellements et des érosions considérables aux exutoires des bassins versants (Lacosta, 1993). La question qui se pose est de savoir s'il convient de fonder la lutte antiérosive sur les valeurs moyennes de l'agressivité des pluies.

2.1.2. Effet sol

1.2.1. Ruissellement et érosion

Le coefficient de ruissellement moyen (Kram) est relativement modéré. Les taux modérés du ruissellement s'expliquent en partie par les pluies où 52 % des pluies tombées n'ont pas dépassé 10 mm de hauteur. Mais le coefficient de ruissellement maximum (Kr max) par contre a atteint 35 % sur le sol nu. Le Kr max a atteint 60 % pendant les averses exceptionnelles sur les sols dégradés, nus et tassés (Morsli et *al.*, 2012) et a atteint même 80 % sur sol encroûté et tassé à Médéa (Roose et *al.*, 1996). C'est lors des événements exceptionnels (fréquence supérieure à 0,1) que se déclenchent les graves manifestations de ruissellement. Les événements pluviométriques exceptionnels sont à l'origine de la dégradation spectaculaire qui marque souvent le paysage pour plusieurs années. Les pluies d'avril 2013 et surtout celles du 10 et 11 novembre 2001 ont provoqué une érosion de plus de 2 t/ha sur la parcelle standard.

Les mesures sur les parcelles d'érosion de 100 m² indiquent que l'érosion en nappe et en rigole sur les sols cultivés de ces zones de montagne reste inférieure à 10 t/ha/an et qu'il existe des différences de comportement entre les situations et entre les sols étudiés. L'érosion annuelle est de 1,5 à 8,5 sur sols nus, de 0,3 à 2,7 sur les sols en jachère, de 0,1 à 3,8 sur sols plantés et de 0,04 à 0,7 t/ha/an sur les systèmes améliorés. Les taux d'érosion en nappe et en rigole obtenus sont proches de ceux obtenus au niveau maghrébin par Arabi et Roose (1991), Gomer (1992), Roose et *al* (1996) et Mazour (2004) en Algérie et aussi par Laouina et *al* (2000) et Mouffadal (2001) au Maroc.

Toutefois l'érosion moyenne annuelle ne traduit pas les extrêmes qui se traduisent à l'échelle de quelques événements pluvieux intenses. Les taux d'érosion les plus élevés et les dégâts spectaculaires sont liés aux pluies exceptionnelles. Les risques majeurs sont liés à des averses exceptionnelles, soit des orages très violents, soit des pluies longues et saturantes provoquant des ruissellements pouvant dépasser 30 % de ruissellement et une tonne par hectare d'érosion sur les sols nus. Un événement pluvieux intense peut produire plus de 30 % de l'érosion annuelle.

Ces mesures d'érosion sur parcelles expérimentales de 100 m² sur les sols représentatifs des montagnes méditerranéennes du Nord-ouest de l'Algérie, confirment l'hypothèse défendue par certains auteurs, selon laquelle l'érosion en nappe sur les versants n'apporte qu'une petite contribution (0,2 à 10 t/ha/an) aux sédiments transportés par les oueds aux barrages. Selon Gomer et Vogt (1992), l'érosion diffuse ne contribue que peu dans la charge évacuée à l'exutoire des bassins versants. Dans la zone tellienne de l'Algérie, la plus grande partie des sédiments des barrages

provient des ravinements (Kouri, 1993). Cependant, le ruissellement provenant des versants a dépassé les 30 % pour certains événements intenses, sur sol nu. Ce sont ces ruissellements exceptionnels qui constituent les pointes de crue qui à leur tour contribuent à l'exportation des terres vers l'aval et vers les barrages. Le ruissellement intense formé au niveau des versants provoque des pertes en terres considérables au niveau des ravines.

Les premières mesures de ravinement effectuées dans les monts de Beni Chougrane sont de l'ordre de 100 t/ha/an dans les zones ravinées de la zone d'étude (Morsli et Malla, 1995). L'érosion ravinante peut atteindre 300 t/ha/an dans les zones marneuses (Roose et *al*, 2000). L'érosion dans le nord-ouest algérien, peut être insignifiante dans de nombreux cas, comme elle peut atteindre 54 t/ha/an, comparables à ceux des bad-lands (Benchetrit, 1972). L'érosion globale peut atteindre des chiffres records à l'échelle du Maghreb.

Selon les résultats obtenus, nous pouvons dire que l'érosion dangereuse pour les infrastructures d'aval (envasement de barrages, inondation...) est due principalement aux ruissellements exceptionnels qui viennent des versants. Mais pour les zones d'amont, tous les ruissellements qui occasionnent des exportations de terres au niveau des versants présentent des risques et participent continuellement au décapage du sol et à la dégradation de sa fertilité. Si le ravinement produit nettement plus d'érosion à l'hectare que l'érosion en nappe, l'érosion en nappe touche des surfaces beaucoup plus grandes que le ravinement, donc l'érosion en nappe apporte finalement beaucoup de sédiments en aval surtout lors des années moyennes ou sèches où les pluies exceptionnelles sont absentes. Le ravinement et les glissements de terrain dominant largement en années excédentaires ou lors d'averses exceptionnelles.

L'érosion en nappe obtenue, comparée au seuil de tolérance, reste modérée à moyennement forte. Mais dans une zone comme la nôtre où les sols sont moins profonds et où la pédogenèse est défavorisée par l'aridité, ces seuils de tolérance doivent être revus. Les seuils de tolérance de l'érosion sous un climat humide tempéré varient entre 2,5 t/ha/an pour un sol superficiel et 12,5 tonnes/ha/an pour un sol profond, de texture équilibrée et moyennement perméable (USDA, 1951 ; Klingebiel et Montgomery, 1966). La tolérance doit être moindre dans l'Ouest algérien : la pédogenèse est beaucoup plus lente sous climat à aridité estivale accentuée et à saison sèche très longue et le sol est le plus souvent superficiel, caractérisé par une exploitation continue. En plus, ces seuils ne prennent pas en considération le phénomène de sélectivité de l'érosion en nappe.

1.2.2. Recherche des paramètres explicatifs de la variation du ruissellement et de l'érosion

Ce qui ressort de l'examen des résultats obtenus sur les parcelles de 100 m², c'est l'irrégularité des pertes en terre à l'échelle interannuelle, quel que soit le mode d'utilisation du sol. Les pluies annuelles n'expliquent que 24,8 % (SBL) à 32,7 % (SAV) de la variation de l'érosion à l'échelle interannuelle (fig. 50a et 50b). Le risque d'érosion ne dépend pas seulement du cumul pluviométrique annuel mais dépend surtout des caractéristiques de l'averse et du milieu.

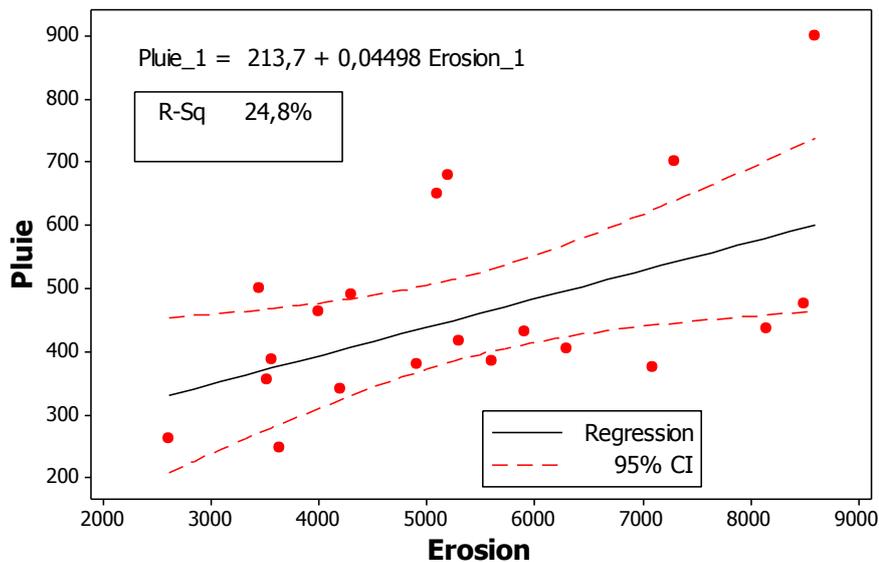


Figure 50a: relation entre l'érosion et la pluie annuelle – Sol SBL

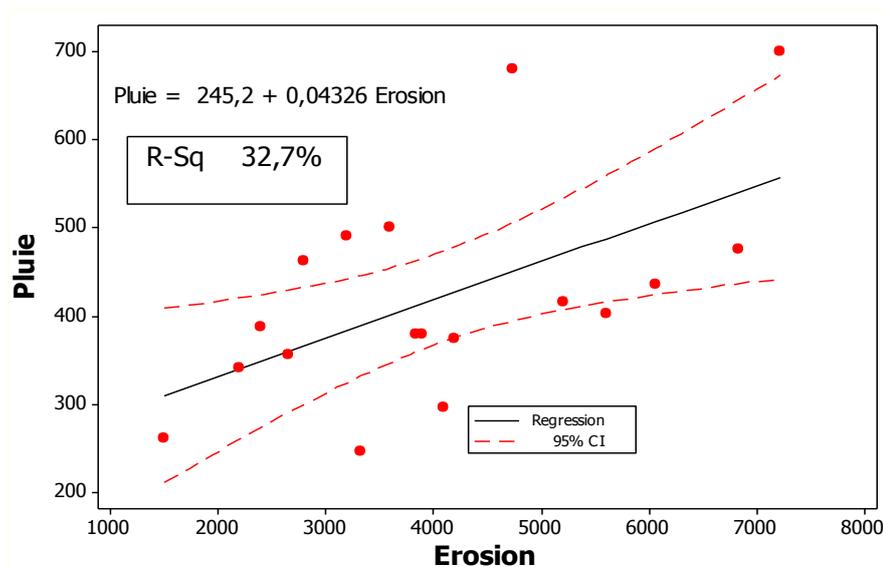


Figure 50b: relation entre l'érosion et la pluie annuelle – Sol SAV

L'érosion annuelle ne traduit pas l'effet des pluies surtout celles des extrêmes qui se traduisent à l'échelle de quelques événements pluvieux. L'érosion reste très variable d'un événement à un autre. Pour tenter d'expliquer les variations de l'érosion et du ruissellement, nous avons essayé de rechercher l'existence de relations possibles entre l'érosion, le ruissellement, la pluie et l'état du sol à l'échelle de l'évènement pluvieux. Les méthodes de régressions simples, multiples et pas-à-pas sont les plus utilisées (Tomassone, 1987).

Le traitement des données (n=102 observations) a permis l'obtention des expressions suivantes :

- Sol SBL

$Lr = 0,42 + 0,308 \text{ Pluie} + 0,237 \text{ IAP}$	$R^2 = 46,0 \%$		$p = 0,000$
$Eros = 49,02 + 27,16 Lr$	$R^2 = 50,5\%$	$r = 71,0 \%$	$p = 0,000$
$Eros = 37,94 + 16,22 \text{ Pluie}$	$R^2 = 49,8 \%$	$r = 70,5 \%$	$p = 0,000$
$Eros = - 75,2 + 15,3 \text{ Pluie} + 8,59 \text{ IAP}$	$R^2 = 63,6 \%$		$p = 0,000$

- Sol SAV

$Lr = 0,012 + 0,279 \text{ Pluie} + 0,170 \text{ IAP}$	$R^2 = 44,5 \%$		$p = 0,000$
$Eros = 15,02 + 29,53 Lr$	$R^2 = 53,2 \%$	$r = 72,9 \%$	$p = 0,000$
$Eros = - 8,70 + 14,80 \text{ Pluie}$	$R^2 = 51,1 \%$	$r = 71,4 \%$	$p = 0,000$
$Eros = - 97,2 + 14,1 \text{ Pluie} + 6,72 \text{ IAP}$	$R^2 = 61,5 \%$		$p = 0,000$

Corrélations hautement significatives au niveau d' α 0,05 ; p: coefficient p

Où R^2 : coefficient de détermination ; r = coefficient de corrélation ; p : coefficient p (la valeur p indique si la relation est statistiquement significative au niveau d'alpha présélectionnée. La relation est significative si $p < \alpha$ (seuil de signification); $\alpha = 0,05$ pour toutes les analyses statistiques effectuées);

Lr : lame d'eau ruisselée; $Eros$: érosion; IAP : indice représentant l'état d'humidité du sol (cet indice est basé sur les précipitations tombées au cours d'une certaine période précédant un événement, pour notre cas pluies des cinq jours précédant le jour considéré), l'utilisation de ce paramètre a déjà donné de bons résultats au niveau du bassin versant de l'Oued Mina à l'ouest de l'Algérie (Meddi, 1992).

En ce qui concerne l'érosion, la pluie et l'état d'humidité du sol arrivent à expliquer 63% (SBL) à 61 % (SAV) de la variabilité de l'érosion. L'humidité du sol joue un rôle important sur le déclenchement du ruissellement et par conséquent sur l'érosion. La lame d'eau ruisselée (Lr) explique 50 % pour le premier type de sol et 53 % pour le second. Pour la lame ruisselée, la pluie et l'humidité du sol expliquent 44 à 46 % de la variance de l'écoulement. Ces résultats montrent que ces facteurs ont un poids dans la variation du ruissellement et de l'érosion.

Ces différentes expressions montrent que l'état d'humidité (IAP) et la pluie ne peuvent expliquer le ruissellement eux seuls. La même chose pour l'érosion où l'état d'humidité, la pluie et le lame ruisselé n'ont expliqué que 49 à 63 % de la variance. Le choix est porté sur ces facteurs pour montrer si le processus du ruissellement et d'érosion dans la zone d'étude retombe dans les cas classiques qui supposent une dépendance entre ces facteurs.

Le suivi du ruissellement et de l'érosion montre aussi une irrégularité au cours de l'année (fig. 51). Les taux les plus élevés de l'érosion sont enregistrés durant la période de l'automne et de l'hiver.

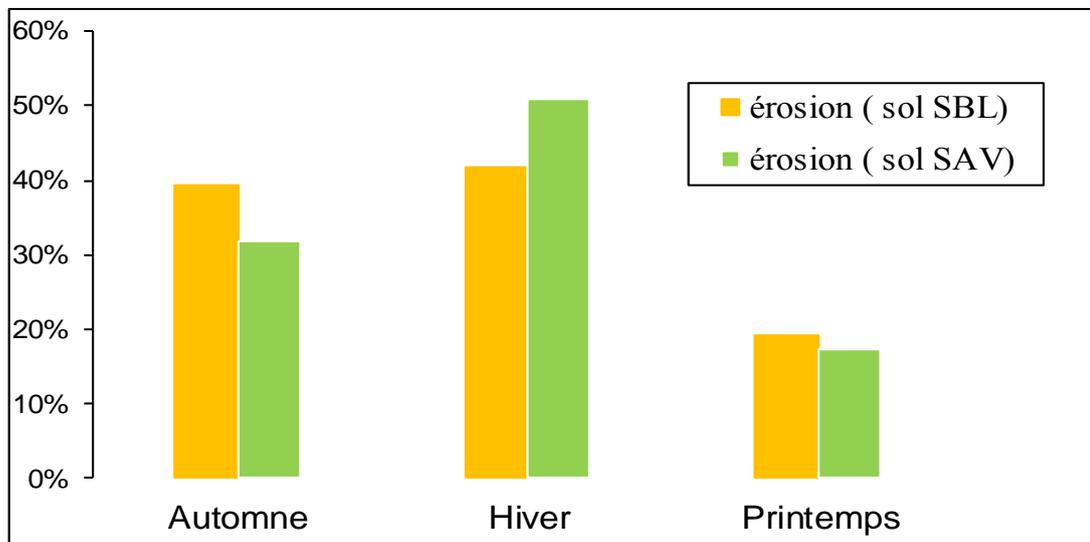


Figure 51: irrégularité de l'érosion au cours de l'année

Pour le sol SBL, la grande quantité d'érosion est observée en automne et en hiver. Mais le taux d'érosion par averses est relativement élevé en automne. Ceci peut être expliqué par les pluies agressives d'automne (orages). En hiver le taux d'érosion par averse est moindre (les pluies sont moins agressives (pluie fines)), mais le taux d'érosion de cette saison reste proche de celui de l'automne car le nombre et la hauteur de pluies tombées en hiver sont supérieures à celui d'automne et du printemps: 40 % en hiver; 34 % en automne et 24 % en printemps).

Pour le sol SAV, les taux les plus élevés sont observés en hiver. En automne, le sol étant fissuré (fentes de retrait), les premières pluies ont peu de chance de ruisseler. Une partie des matériaux transportés par les premiers ruissellements est dirigée vers les fentes de retrait, ainsi une grande quantité de matériau n'arrive pas à l'aval de la parcelle où les sédiments sont mesurés. En

hiver lorsque le ruissellement en nappe s'amplifie, il évolue facilement vers un ruissellement linéaire et l'érosion est relativement importante. Le sol argileux étant sensible aux forces de cisaillement, la formation des griffes et rigole s'amplifie.

D'après ces résultats, on remarque que le ruissellement et l'érosion n'évoluent pas de la même façon au cours de l'année. Pour cela, nous avons jugé utile de faire une étude à l'échelle saisonnière afin d'affiner les relations entre l'érosion, le ruissellement, la pluie et l'humidité du sol. L'étude a été faite sur la répartition suivante : automne, hiver et printemps. Les relations trouvées sont présentées dans les tableaux 25 et 26.

Tableau 25 : relations trouvées entre l'érosion, la lame d'eau écoulée et les facteurs explicatifs - Sol SBL

Saison	Expression	N	R ²	R	coefficient p
Automne	Lr = - 0,06 + 0,40 P + 0,21 IAP	35	0,60		p = 0,000
	Eros = - 147 + 15,8 P + 16,2 IAP	35	0,87		p = 0,000
	Eros = - 70,5 + 20,9 Lr + 14,5 IAP	35	0,73		p = 0,000
Hiver	Lr = 0,91 + 0,27 P + 0,34 IAP	40	0,51		p = 0,000
	Eros = - 22,1 + 14,9 P + 6,86 IAP	40	0,53		p = 0,000
	Eros = 48,48 + 24,12 Lr	40	0,48	0,69	p = 0,000
Printemps	Lr = 2,55 + 0,16 P	25	0,47	0,68	p = 0,000
	Eros = 40,86 + 10,66 P	25	0,57	0,75	p = 0,000
	Eros = 41,63 + 32,36 Lr	25	0,31	0,55	p = 0,003

Corrélations hautement significatives au niveau d' α 0,05 ; p: coefficient p

Tableau 26 : relations trouvées entre la lame d'eau ruisselée, l'érosion et les facteurs explicatifs – Sol SAV

Saison	Expression	N	R ²	R	coefficient p
Automne	Lr = - 0,55 + 0,362 P + 0,094 IAP	35	0,70		p = 0,030
	Eros = - 110 + 24,7 Lr + 10,9 IAP	35	0,77		p = 0,000
	Eros = - 160 + 12,5 P + 11,9 IAP	35	0,84		p = 0,000
Hiver	Lr = 0,06 + 0,27 P + 0,272 IAP	40	0,46		p = 0,000
	Eros = 41,86 + 27,97 Lr	40	0,53	0,73	p = 0,000
	Eros = - 39,60 + 16,0 P + 5,57 IAP	40	0,53		p = 0,000
Printemps	Eros = - 40,36 + 11,67 P	25	0,68	0,82	p = 0,000

Corrélations hautement significatives au niveau d' α 0,05 ; p: coefficient p; N: nombre d'observations; R² Coefficient de détermination ; r: coefficient de corrélation

Il ressort des expressions trouvées que de meilleurs coefficients de corrélation sont obtenus selon le découpage saisonnier par rapport à l'échelle annuelle. Ce découpage donne un ensemble de données plus homogènes et caractérise également la variabilité d'une saison à une autre de la pluviométrie et du ruissellement ainsi que de l'état d'humidité du sol. Il ressort également que de meilleures relations entre l'érosion et les variables explicatives (pluie, état d'humidité du sol et ruissellement) ont été obtenues.

En automne et en saison chaude, la pluie et l'IAP explique mieux l'érosion ($84 < R^2 < 87$) que le ruissellement (le facteur pluie prédomine et conditionne le phénomène érosion). Cela est dû au fait qu'après une longue saison sèche caractérisée par de fortes températures, les pluies intenses de cette saison, liées à une circulation du Nord-ouest, provoquent la destruction des agrégats du sol. Les pluies de ces mois, souvent sous forme d'orage, sont d'intensité très importante. L'énergie de la pluie est relativement plus importante que celle du ruissellement. Les particules détachées par les pluies sont facilement transportées par le déclenchement du ruissellement. Les crues de cette saison sont très chargées en sédiments.

En hiver, le ruissellement explique mieux le phénomène érosion (le facteur de ruissellement prédomine et conditionne le phénomène érosion). Les pluies sont d'intensité modérée, tombant sur un sol saturé et quelquefois aplani, elles provoquent un ruissellement important avec des concentrations modérées. En hiver et en printemps, les eaux sont relativement moins chargées (Kouidri et al., 1993; Meddi, 1994; Meddi et Morsli, 2001). En printemps, les expressions montrent aussi une liaison entre l'érosion et les facteurs explicatifs. Mais cette liaison reste moindre par rapport à celle trouvée en automne.

De ces différentes expressions, on peut conclure que la pluie et l'état d'humidité (IAP) ne peuvent expliquer eux seuls le ruissellement et l'érosion. Dans ses relations avec l'eau, le sol ne joue pas uniquement le rôle d'un réservoir, mais également un facteur déterminant dans le contrôle du ruissellement et de l'érosion. Ceci nous a conduits à affiner encore plus l'étude en analysant l'effet des états de surface sur le ruissellement et l'érosion sous pluies simulées.

2.1.3. Impact des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion

Les terres labourables occupent des surfaces importantes dans les monts de Beni Chougrane. L'essentiel de l'espace labourable est consacré aux céréales (blé, orge) qui laissent peu de place aux légumineuses. La jachère occupe aussi une proportion assez importante. A chaque type de sol correspond une utilisation caractéristique. Sur le sol SAV est pratiquée le plus souvent une céréaliculture extensive de blé en rotation avec quelques cultures de légumineuses (pois chiche) et jachère pâturée. Sur le sol SBL est pratiquée le plus souvent une céréaliculture extensive d'orge en rotation avec quelques cultures de légumineuses (petit pois) et jachère pâturée. On trouve aussi de l'arboriculture qui commence à prendre de l'ampleur ces dernières décennies.

L'analyse des systèmes traditionnels de gestion des sols montre que les sols labourés ne présentent pas de grand risque comme celui des sols nus et des jachères prolongées et pâturées. Les terrains labourés et cultivés s'érodent moins rapidement que les terrains nus. L'effet conjoint des techniques culturales et du couvert végétal sur les sols cultivés a pu réduire considérablement l'érosion par rapport à celle observée sur sol nu (tabl. 27 et 28).

Tableau 27 : Impact des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion – Sol SAV

Traitements	Kram %		Kr max %	Erosion t/ha/an		Réduction de l'érosion par rapport au sol nu
	Moy.	CV	Max.	Moy.	CV	
Témoins - Sol nu	5,0	0,4	32	3,9	0,3	
Culture de Céréales (blé)	1,4	0,3	23	0,7	0,3	Cinq fois et demie
Jachères pâturées	2,6	0,2	17	1,2	0,8	Plus de trois fois
Culture traditionnelle de légumineuse (Pois Chiche)	2,3	0,6	23	1,5	0,6	Plus de deux fois et demie
Système amélioré						
Jachère non pâturée: J. mise en défens et améliorée (hédysarum (sulla) + médicago)	2,2	0,6	12	0,5	0,4	Plus de sept fois et demie

Tableau 28: Impact des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion – Sol SBL

Traitements	Kram %		Kr max %	Erosion t/ha/an		Réduction de l'érosion par rapport au sol nu
	Moy.	CV	Max.	Moy.	CV	
Témoins - sol nu	6,8	0,3	35	5,7	0,3	
Culture de céréales (Orge)	1,8	0,4	13	0,6	0,3	Neuf fois et demie
Jachères pâturées	3,2	0,4	22	0,9	0,5	Six fois
Billonnage + Culture de P. Pois - (billons traditionnels)	1,5	0,2	12	0,4	0,6	Plus de 14 fois
Systèmes améliorés						
Jachères améliorées (mises en défens)	2,3	0,5	15	0,1	0,6	57 fois
Billonnage + C. Petit Pois : confection de billons de grandes dimension)	0,8	0,4	5	0,09	0,6	63 fois

A l'échelle parcellaire, l'apparition du ruissellement et le déclenchement d'érosion sont souvent la conséquence d'une modification des états de surface du sol (rugosité, croutes superficielles et taux de couverture). Les pratiques culturales (travail du sol, billonnage et sarclage) et le développement du couvert végétal sur les sols cultivés ont un rôle important dans la dynamique érosive. D'une part, ils réduisent le ruissellement et améliorent l'infiltration et d'autre part, ils limitent la dégradation de l'état de surface du sol grâce à la couverture du sol.

L'examen des valeurs obtenues sur les parcelles cultivées, indique l'irrégularité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle interannuelle. Le caractère saisonnier des cultures annuelles (céréales et légumineuses) fait que les risques d'érosion sur les zones cultivées sont variables d'une saison à une autre. Au début de la saison pluvieuse, en automne, la différence entre le sol nu et les parcelles cultivées en céréale n'est pas importante, car le sol n'est pas encore labouré et souvent non couvert. A cette époque, sur les deux types de sols étudiés, presque toutes les situations se ressemblent, les états de surface ne sont pas très différents (sol nu et sans couverture). De ce fait, les premières pluies d'automne, souvent agressives tombant sur des sols nus et compactés, permettent d'engendrer des pertes en terres très élevées et par conséquent, des incisions (apparition des griffes et des rigoles).

Les cultures ne commencent à couvrir le sol qu'à partir du mois de janvier, ce qui fait que les zones cultivées restent nues pendant une bonne partie de l'année et directement exposées aux agents dégradants. Ce n'est qu'après le travail du sol et le recouvrement par la végétation que la différence devient nette entre les traitements vis à vis du ruissellement et de l'érosion.

L'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent l'aptitude du sol au ruissellement et à l'érosion. Les taux d'érosion les plus élevés sont enregistrés au début d'automne où le sol est presque nu quel que soit le traitement. Depuis, c'est l'évolution de la couverture végétale et de l'état de surface qui conditionnent plus l'érosion. Des tentatives de régressions pour évaluer l'existence éventuelle d'une relation entre le ruissellement, l'érosion et la pluie n'ont donné aucune relation satisfaisante et ceci peut être dû à l'interaction de plusieurs facteurs qui régissent l'érosion et aux modifications des états de surfaces par les techniques culturales et le développement du couvert végétal.

L'analyse du système de billon, technique traditionnel très pratiqué dans les zones de montagne du Nord-ouest algérien a bien montré les grandes possibilités de maîtrise de l'érosion par ce système simple (tabl. 28). Le billonnage est une technique très efficace dans la lutte antiérosive (Azontondé, 1996). Cette technique, si elle est bien entretenue et améliorée (billons isohypses, entrecoupés, microrelief accentué...), peut diminuer encore plus le ruissellement et l'érosion par le stockage de l'eau de ruissellement dans l'inter billons. L'amélioration de la technique par l'accentuation du micro relief a diminué l'érosion jusqu'à 63 fois par rapport au sol nu.

L'effet des jachères est lié à leurs états de surface et de couverture. Les jachères pâturées, caractérisées par un taux de couverture faible (tapis herbacé clairsemé) et une dominance des états fermés et tassés, présentent un risque surtout pour le ruissellement. Par contre l'érosion en nappe reste relativement modeste, environ 1t/ha/an. Le risque de ruissellement devient plus grand sur les zones de surpâturages: les piétinements réduisent la surface couverte et augmentent le tassement des premiers centimètres du sol comme ils créent beaucoup de cheminements tassés et dénudés par les sabots des animaux. La pression des sabots est de 2 à 3 kg/cm² pour les chèvres à 7 kg/cm² pour les vaches (Sabir et Roose, 2004). Les jachères et les parcours pâturés constituent des sources de ruissellement abondant.

L'amélioration de la jachère (mise en défens et amélioration par des espèces fourragères) a réduit beaucoup l'érosion (réduction jusqu'à 57 fois) et a amélioré la productivité des sols. La jachère améliorée (amélioration du taux de couverture du sol) présente moins de risque que les deux traitements précédents (jachères pâturées et sols cultivés). Ceci est dû à l'augmentation de la production de la phytomasse et à l'accumulation des matières organiques au niveau de la surface du sol. Les résultats ont montré que quelques années de protection peuvent suffire pour restaurer la couverture du sol. La mise en défens (traitement effectué sur la parcelle JNP) peut être encore plus efficace si la jachère est améliorée par des légumineuses. C'est donc les méthodes favorisant le

maintien et le développement d'un couvert qu'il faut encourager en priorité pour améliorer la gestion conservatoire de l'eau et du sol dans ce type de milieu. Mais la question qui se pose est de savoir comment dans un contexte de forte pression foncière les paysans vont-ils accepter de renoncer à surexploiter, d'une façon continue ces terres pentues et fragiles ?

La jachère mise en défens et le billonnage présentent le moins de risque que les traitements précédents : céréales (effet conjoint des techniques culturales et du couvert végétal), jachère pâturée et sol nu. Mais les jachères peuvent être la source de beaucoup de ruissellements. Selon Tribak (1988), la jachère réduit efficacement l'érosion, cependant, elle ne reste pas sans effet négatif sur le ruissellement. Il existe donc un antagonisme entre le ruissellement et les pertes en terre sur les sols en jachère.

2.1.4. Impact des systèmes de gestion et de l'érosion sur la dynamique du carbone/dynamique de la fertilité du sol

Le sol constitue le plus grand réservoir superficiel du carbone et apparaît ainsi comme potentiellement important dans le contrôle de l'érosion et des stocks et des flux du carbone. Le stock du carbone peut être fortement modifié, dégradé ou amélioré par l'érosion et les modes d'utilisation du sol. Les terres du Maghreb font l'objet de modifications majeures d'usage des sols (Coelho et al, 2002) et en particulier celles de l'Algérie. Avec le plan national de développement rural, on assiste à beaucoup de modifications d'usage du sol et de reconversion des systèmes de culture dans les monts de Beni Chougrane. Les reconversions des systèmes et l'érosion qui ne cesse de s'amplifier peuvent beaucoup modifier les stocks du carbone.

Les stocks du carbone organique au niveau des sols étudiés varient en fonction des systèmes de culture et de la densité de la couverture végétale, mais aussi en fonction de l'érosion. Les systèmes traditionnels, caractérisés par une exploitation continue, ont diminué les stocks dans la couche superficielle du sol (0 à 10 cm), de 5 à 15 %. Par contre dans les systèmes améliorés (jachère en défens et/ou améliorée) les stocks ont augmenté de 15 % (SAV) à 18 % (SBL) pendant cinq ans de mise en défens.

Parfois il est possible de restaurer les sols au moindre coût en laissant faire la nature, mais tout en la contrôlant. Une technique, comme la mise en défens a donné des résultats positifs sur la régénération et la production de biomasse qui a permis d'une manière significative d'entretenir la fertilité du sol et de renforcer la résistance à l'érosion. La jachère longue est très efficace pour

restaurer les propriétés chimiques, physiques et biologiques de la couche humifère du sol (Greenland et Nye, 1959; Floret et Serpantié, 1991; roose et *al.*, 2012), mais généralement la pression humaine empêche d'attendre plusieurs années entre deux cycles culturaux. Dans ces zones cultivées, les jachères sont pâturées et durent rarement plus de 2 à 3 ans, trop peu pour restaurer complètement les propriétés du sol très dégradé. La mise en défens sur la parcelle JNP pendant 5 ans a donné de bons résultats sur la réduction de l'érosion et l'amélioration de la fertilité.

L'effet de l'érosion sur les pertes en carbone organiques n'est pas négligeable. Les pertes varient de 17 à 42 kg/ha/an sur les systèmes cultivés, de 19 à 41 sur les jachères et de 95 à 136 sur les sols nus. Les grandes pertes de carbone se produisent pendant les plus grandes averses, celles-ci produisent de grandes quantités de terres érodées.

La figure 52 montre que la relation entre la masse du carbone des sédiments et l'érosion est hautement significative ($R^2 = 80\%$; niveau alpha = 0.05). Les pertes en carbone sont liées à la quantité des terres érodées (sédiments). Par contre, une faible liaison ($R^2 = 23\%$) a été obtenue entre la teneur du CO des sédiments et l'érosion (fig. 53). Les pertes en carbone par érosion dépendent plus des volumes de terres érodées que des variations des teneurs au cours des saisons (Bep et al, 2002).

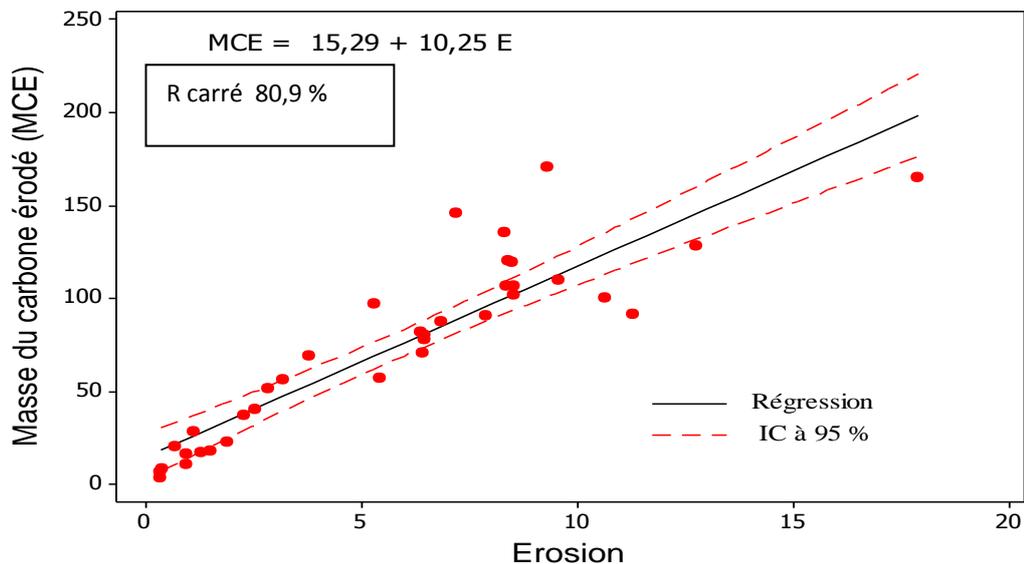


Figure 52 : relation entre l'érosion et la masse du carbone des terres érodées

SAV comme tous les sols vertiques, ont une forte potentialité de séquestration du carbone et peuvent ainsi constituer un grand réservoir pour le carbone (Morsli et *al.*, 2005).

Ces résultats montrent que même si les pertes en terre (érosion en nappe) restent en général modérées, cette érosion altère fortement et constamment la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol qui est la source essentielle de la fertilité et un élément de résistance à l'érosion. Les matières organiques du sol jouent un rôle prépondérant dans la fertilité des sols et dans la réduction du gaz à effet de serre en tant que source de carbone vis à vis de l'atmosphère (Hien, 2002) et ont un grand impact sur l'érosion et le bilan hydrique (Sentis, 2002).

Bien que l'érosion soit décapante, l'analyse des terres érodées (sédiments) révèle une sélectivité des particules fines et surtout du carbone organique, l'indice de sélectivité est de 1,3 à 3,9 suivant les traitements. Dans le monde, l'indice de sélectivité du carbone varie de 0,5 à 14 suivant les modes d'utilisation de terres et tend à décroître lorsque l'érosion est intense (Roose et Sabir, 2002). Les pertes en CO par l'érosion en nappe sont liées significativement à l'érosion (fig. 52).

Les pertes en carbone sont faibles par rapport aux stocks des dix premiers centimètres, mais les pertes totales ont atteint 15 % en cinq ans. Le risque devient encore plus grand pour les sols peu profonds s'il n'y a pas d'améliorations des pratiques de gestion de la biomasse, de la fertilité du sol et de l'eau. Les quantités importantes des matières organiques surtout fraîches sont transportées en automne. La diminution des stocks, associée à une exploitation continue sans restitution (systèmes traditionnels), risque d'entraîner à moyen et à long terme une baisse de fertilité et une modification profonde de la dynamique de l'eau au niveau des horizons superficiels qui auront des conséquences sur le plan écologique, économique et environnemental.

Ces résultats montrent que les systèmes de gestion pratiqués jouent un rôle important dans la variabilité du carbone organique dans le sol. L'étude pédologique réalisée sur un micro bassin de l'oued Fergoug a montré une certaine variabilité spatiale du carbone organique du sol au niveau des versants (Morsli, 1996). Cette variabilité est liée généralement aux systèmes de gestion, à un degré moindre à la texture ($r = 0,65$) et surtout à la position sur le versant (Morsli, 1996). En pente, les teneurs sont de l'ordre de 1%, par contre dans les replats et les bas-fonds (zones de ralentissement du ruissellement), la teneur de carbone est élevée et peut dépasser les 3%. L'exposition des versants semble avoir aussi un effet sur les taux de matière organique (tabl. 29). Les teneurs sur les versants nord sont relativement élevées et diffèrent selon les systèmes d'utilisation des terres (Morsli et *al.*, 2005). Nous observons une nette opposition des versants entre les faces sud où des traces de ravinement sont mieux exprimées et les versants exposés au nord. Les

versants sud, les moins arrosés et les plus érodés, sont exposés à des conditions favorables de minéralisation de la matière organique du sol (MOS). La minéralisation des MOS est le facteur principal de la variation du stock du carbone dans le sol (Blanchart et *al.*, 2002).

Tableau 29 : effet de l'exposition sur les teneurs en carbone organique sur sol nu, sol cultivé et sol couvert sur sol SAV (Morsli et *al.*, 2005).

Exposition	Sol nu		Sol cultivé		sol couvert par la végétation	
	Teneur CO %	CV %	Teneur CO %	CV %	Teneur CO %	CV %
Exposition Nord	1,2	0,4	2,1	0,5	2,8	0,6
Exposition Sud	0,7	0,5	0,9	0,6	1,5	0,6

Les terres arrachées des versants sont redistribuées dans les champs ou entraînées dans les talwegs. Une partie des matériaux érodés reste piégée dans le versant. La quantité de terre retenue dans le versant dépend des conditions topographiques et des modes de gestion des sols. Des dépôts importants sont observés dans les zones de ralentissement (replat, concavité...). La compréhension de cette dynamique peut aider à une meilleure gestion de cette hétérogénéité des potentialités et à restaurer les stocks du Co dans le sol tant pour des questions de durabilité que pour des objectifs environnementaux.

Transfert des résultats d'une échelle à une autre – de la parcelle au versant

Les mesures obtenues ne sont transposables que sur des sites, versants et éventuellement micro bassin versant, qui présentent les mêmes conditions de milieu que nos stations de mesures. L'érosion a fait aussi l'objet d'évaluation par la méthode du Césium-137 dans les versants où sont implantées les parcelles, pour la comparaison des résultats entre la parcelle et le versant et pour aboutir à un bilan de l'érosion à l'échelle du versant et pour une éventuelle extrapolation. Les taux d'érosion obtenus sur les parcelles pendant une longue durée ne sont pas loin de résultat obtenus au niveau des versants par la méthode du Césium-137 (Morsli et *al.*, 2012; Mansouri et *al.*, 2010).

Les estimations de l'érosion par le Césium 137 au niveau de ces versants cultivés donnent des valeurs qui varient de 1 à 30 t/ha/an suivant le modèle utilisé (Morsli et *al.*, 2012). Le Model de Waling (1995) le plus utilisé dans le monde (Mass balance model) donne des valeurs un peu supérieures que celles qu'on a obtenu au niveau des parcelles. Les écarts observés entre la parcelle et le versant (modèle Walling) peuvent être expliqués par le fait que les parcelles expérimentales ne tiennent compte que de l'érosion en nappe et en rigole, alors que la méthode du Césium-137 donne un bilan global de l'érosion au niveau du versant où dominant l'érosion linéaire et surtout l'érosion

aratoire (érosion sèche). En montagnes méditerranéennes, l'érosion aratoire varie de 10 à 50 t/ha/an (Roose *et al.*, 2000).

Néanmoins, il convient de garder un sens critique vis-à-vis des résultats obtenus sur l'utilisation des isotopes et d'avancer les perspectives éventuelles pour améliorer ce travail. L'utilisation de la méthode des isotopes en Algérie est encore à l'état embryonnaire, des études plus fines sur différentes situations et le choix du modèle transformant la différence de radioactivité en perte de terre peuvent nous éclairer encore plus sur le cheminement des sédiments et le transfert des données d'une échelle à une autre. Le transfert des données d'une échelle à une autre reste encore une préoccupation à ce jour. Les nouvelles techniques (télétection, SIG, indicateurs, modélisation) sont de plus en plus utilisées, mais elles exigent une validation locale par des mesures de pertes de terre à différentes échelles. En combinant les pertes de terre mesurées sur les parcelles d'érosion et par le simulateur de pluie, Simonneaux *et al* (2008) sont arrivés à valider les exportations de sédiments en suspension observées à la sortie du bassin versant. La lutte contre l'érosion hydrique passe par une meilleure compréhension des mécanismes en jeu depuis les zones « source » jusqu'aux zones de dépôt des sédiments.

IV.2.2. Ruissellement et érosion sur parcelles de 1 m² sous pluies simulées

2.2.1. Analyse du comportement du sol / effet sol

Les résultats obtenus sous les pluies simulées révèlent en général que l'infiltration est très élevée sur un sol sec et plus ou moins rugueux, le risque de ruissellement est minime. Par contre, lorsque le sol est humide et surtout quand l'état de surface est dégradé sous l'effet des gouttes de pluie (dégradation de structure, colmatage des pores...), le risque de ruissellement est élevé. On passe souvent d'une P_i de 30 ou 35 mm en sol sec et rugueux à moins de 2 mm en sol très dégradé et humide, les P_i peuvent diminuer de cinquante fois et plus.

L'état de surface initial du sol influence directement la durée de la pluie d'imbibition et par conséquent le déclenchement du ruissellement et de l'érosion. Pour le sol SAV sec, caractérisé par un réseau dense de fissures, les premières pluies ont peu de chance de donner un ruissellement. Le réseau de fissures permet de véhiculer l'eau rapidement en profondeur, ce qui permet quelquefois une exportation interne de matériaux, tant que les fissures sont ouvertes. Les phénomènes de suffosion (érosion interne) peuvent ainsi s'expliquer.

Les résultats montrent une relation hautement significative entre la pluie d'imbibition et la fermeture du sol (fig. 54 et 55). Les relations obtenues entre les surfaces fermées (Sf) et les Pi ($R^2 = 0,89$ (SAV); $R^2 = 0,75$ (SBL); $\alpha = 0.05$) montrent que les surfaces fermées (croûtes superficielles, traces de compaction et cailloux pris dans la masse) et ouvertes (fissures et galeries) conditionnent pour une large part le comportement des sols vis à vis du ruissellement et de l'érosion.

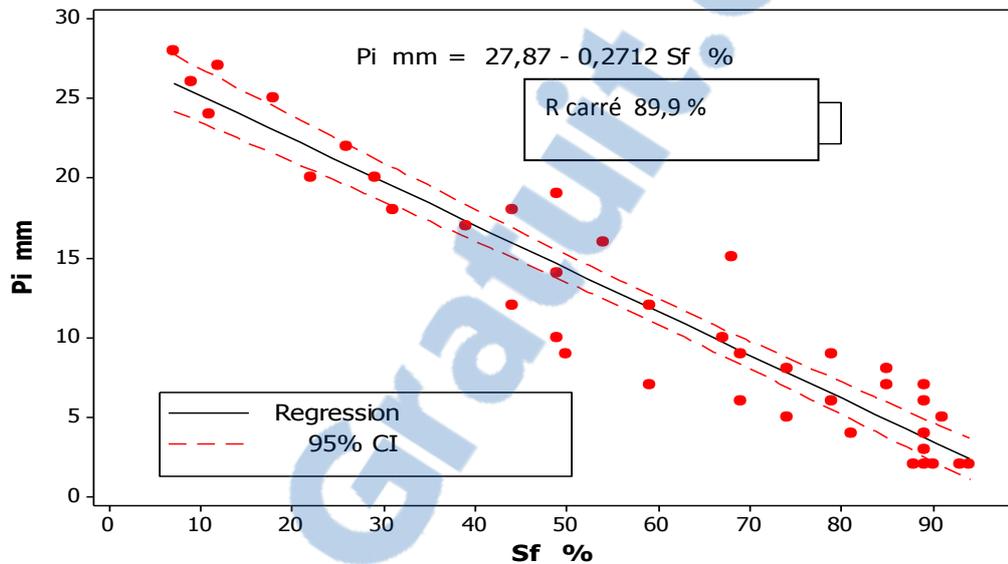


Figure 54: relation entre états de surface (surfaces fermées (Sf)) et pluie d'imbibition (seuil de pluie nécessaire pour déclencher le ruissellement) – Sol SAV

Le retard d'apparition du ruissellement et son importance sont d'autant plus considérables que le sol est ouvert. Au cours de la phase de Pi, l'impact de gouttes de pluie (l'effet splash) attaque les agrégats terreux et les mottes fondent en colmatant les pores (planche7). Ce colmatage provoque la fermeture du sol (les surfaces fermées sont importantes (Sf >70%) par la formation de croûtes superficielles) réduisant ainsi l'infiltration à quelques mm/h ($Pi < 2$ mm).

Planche 7. Evolution de l'état de surface du sol sous l'action des pluies - La surface du sol passe d'un état fragmentaire poreux et meuble à un état plus continu et compact, l'infiltration peut passer des dizaines de mm par heure à moins de 1 mm/h.

	<p>Rôle de la rugosité de surface sur la détention et le ruissellement. Plus les mottes sont grosses, plus le sol reste ouvert longtemps, plus il infiltre l'eau et moins il s'érode. P_i est élevée.</p> <p>Les gouttes de pluie brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment progressivement le sol.</p>
	<p>Lorsque la surface du sol se dégrade, les mottes fondent et forment à leur surface une pellicule structurale de faible épaisseur, réduisant ainsi l'infiltration à quelques mm/h. Le ruissellement et les flaques envahissent le terrain.</p>
	<p>Lorsque les pluies sont abondantes, les mottes fondent et l'eau ruisselle sur le sol tassé facilement sous forme d'une lame d'eau, de filets diffus ou d'un écoulement concentré. La capacité d'infiltration devient de plus en plus faible. Le ruissellement d'une parcelle va donc dépendre de la surface couverte par les différents types de pellicules et par les macro pores qui restent ouverts.</p>
	<p>Etat très dégradée par les pluies, caractérisé par une formation de croûtes superficielles, réduisant ainsi l'infiltration à quelques mm/h. Le ruissellement en s'intensifiant, exerce sur le sol une force de cisaillement qui arrache les particules puis les transporte et développe une énergie propre capable de creuser des griffes ou des rigoles.</p>
	<p>Après dessèchement, l'état de surface se fragmente.</p>

Les résultats ont montré aussi que les valeurs limites de K_{max} et F_n sont obtenues sur les sols très dégradés par les pluies et pas nécessairement sur les sols très humides. On peut admettre que le risque du ruissellement et de l'érosion reste dépendant surtout de l'évolution des états de surface du sol.

L'effet de la pente sur la pluie d'imbibition n'est pas négligeable. Pour une pente très forte, le déclenchement du ruissellement est relativement plus rapide, ne laissant pas un temps suffisamment long pour l'imbibition du sol. Par contre, pour une pente plus faible, le déclenchement du ruissellement est retardé laissant place à une imbibition prolongée.

Le seuil de la hauteur minimale de pluie requise pour déclencher le ruissellement sur le sol nu et sec, pour les différentes situations étudiées, est compris entre 8 et 35 mm pour le sol SAV et entre 4 et 17 mm pour le sol SBL. Cette variabilité est due en partie aux caractéristiques des pluies (intensité, hauteur et fréquence (succession des pluies)) et surtout aux états de surface du sol. Il existe des hauteurs et des intensités limites de pluie en dessous desquelles le milieu perméable ne peut ruisseler (Rahéliarisoa, 1986; Casenave et Valentin, 1989).

L'indice classique de Wichmeier (1959) pour quantifier l'érosion des sols aux U.S.A., place cette limite pour une intensité moyenne de 25 mm/h pendant au moins 30 minutes. . Plusieurs auteurs ont montré que IM 30 conditionne le déclenchement du ruissellement (Wischmeier et Smith 1978, Roose 1994) Cette valeur a été remise en question par les auteurs européens qui ont montré que le ruissellement pouvant apparaître pour des valeurs seuils bien plus faibles (2 à 10 mm/h). De Noni et Viennot (2001) montrent le rôle essentiel de IM15 dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion, alors que Lal (1988) admet que IM 30 n'est forcément significative partout et il a obtenu de bons résultats avec IM 15 et même IM 7. Les résultats obtenus sur les parcelles de 100 m² et de 1m² montrent que les valeurs seuils sont plus basses. Des pluies de moins de 10 mm, avec une intensité de 30 mm/h, ont pu déclencher du ruissellement et de l'érosion. Cette dernière reste liée à la pluie et à l'état de surface. Nous avons constaté que les pluies naturelles de fortes intensités instantanées sont accompagnées par des forts ruissellements et d'érosion.

La figure 56 montre que pour le sol vertical, les seuils de déclenchement du ruissellement sont conditionnés par son comportement hydrodynamique particulier (dynamique hydrique et structural). Dans les conditions sèches, on note l'absence d'événements ruisselants avec les pluies d'IM30 avec une intensité de 30mm/h, pluie de référence du déclenchement de l'érosion. Ces résultats sont donc en concordance avec les auteurs qui considèrent qu'IM30, référence standard, conditionne la naissance du ruissellement.

Mais les résultats sous pluies simulées montrent qu'avec des pluies d'intensité de 80 mm/h, sur sol sec, l'érosion s'est déclenchée pour une durée d'environ 10 mn (IM10). La pluie intense enregistrée sur la station expérimentale d'Ain-Fares pour cette durée (IM10) est de 120 mm/h et qui a déclenché de l'érosion sur les parcelles d'érosion de 100 m². Ces résultats confirment ceux obtenus par certains auteurs (De Noni et Viennot, 2001 et LAL, 1988) et qui ont montré que l'érosion peut apparaître pour des seuils plus bas.

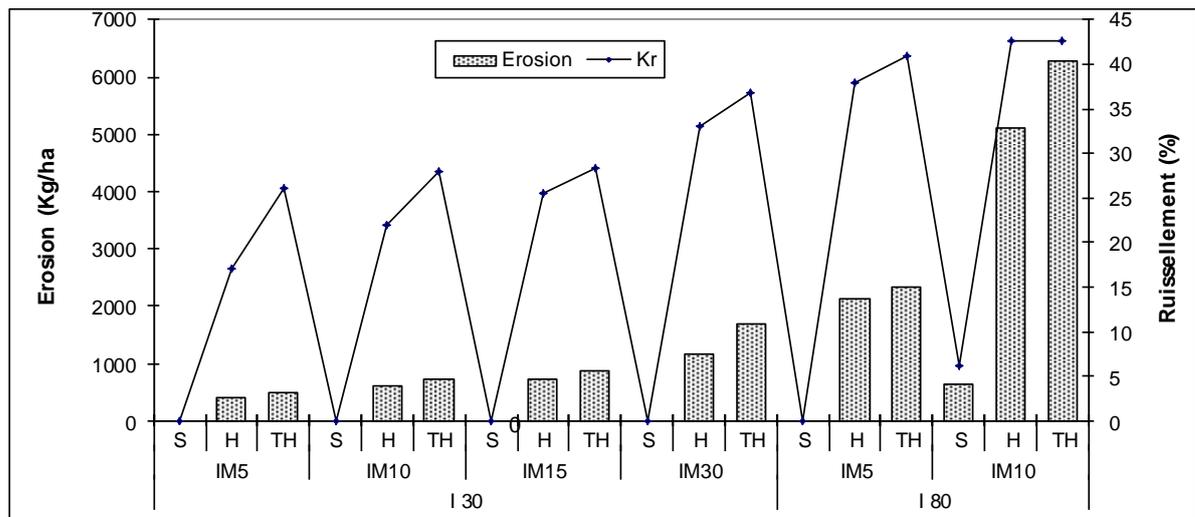


Fig. 56. Rôle des pluies inférieures à IM30 dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion

Mais à l'état fermé plus ou moins saturé, la figure 56 montre que le ruissellement et l'érosion se sont déclenchés avec des seuils plus bas que la référence standard (I30). Des pluies d'IM5 d'intensité de 30 mm/h et d'intensité de 80 mm/h ont provoqué le déclenchement du ruissellement et de l'érosion. Ces résultats ont fait ressortir l'influence des pluies intenses de courtes durées. La pluie intense que nous avons enregistrée sur la station expérimentale d'Ain-Fares pour IM5 (intensité maximale pour une durée de 5 minutes) est de 180 mm/h. Avec ces types de pluies lorsque le sol est humide et fermé (période humide), le risque d'érosion est élevé. Ces résultats rejoignent les auteurs qui ont montré que le ruissellement pouvant apparaître pour des valeurs seuils bien plus faibles

Si on compare les résultats obtenus par les essais de simulation à la pluie conventionnellement retenue (25 mm/h pendant 30 mn) pour le déclenchement du ruissellement et de l'érosion, on trouve que cette limite est très proche de celle qu'on a trouvée que ce soit pour le SAV ou le SBL, lorsque le sol est sec. *Par contre une fois le sol humidifié et son état de surface dégradé, cette limite est très basse. Des pluies de moins de 5 mm ont pu déclencher du ruissellement et de l'érosion.*

Le risque du ruissellement et d'érosion est plus élevé sur sol saturé ou humide que sur sol sec. Les pluies d'imbibition pour les sols humides (19 à 23 % d'humidité pour le sol SAV et 10 à 15 % pour le SBL) et très humides (31 à 36 % pour le sol SAV et 23 à 27 % pour le SBL) sont faibles à très faibles dans ensemble.

Le déclenchement du ruissellement est assez rapide lors de la deuxième (sol très humide) et la troisième pluie (sol humide). Les P_i sont presque égales, alors que l'humidité du sol est différente, l'humidité du sol lors de la deuxième pluie est très élevée. Ceci montre que le déclenchement du ruissellement n'est pas toujours en relation avec le taux de saturation du sol. Le déclenchement du ruissellement pour le sol SBL peut se produire très tôt, avant la saturation du sol et avant que le front d'humidification dépasse 5 à 10 cm de profondeur. L'effet de la teneur en eau du sol n'intervenait parfois que partiellement dans le déclenchement du ruissellement (Osburn et Renard, 1973; Albergel, 1987). Pour le sol SAV, la teneur en eau du sol détermine en grande partie le comportement hydrodynamique des sols.

La texture est un autre facteur important dans la différenciation du comportement de l'eau dans le sol et des résultats obtenus. Si on compare le sol SAV de texture argileuse avec le sol SBL de texture limoneuse, on remarque bien le rôle essentiel de l'argile dans le processus de naissance du ruissellement. Les plus fortes pluies d'imbibition sont enregistrées sur les sols argileux vertiques secs. Le comportement très particulier des sols vertiques, caractérisé par le phénomène retrait-gonflement, distingue le sol SAV du sol SBL. Ces caractéristiques des sols argileux vertiques influencent fortement l'infiltration du sol et par conséquent le déclenchement du ruissellement. La dynamique hydrique des sols vertiques est très particulière, l'infiltration est très liée à l'état hydrique et structural du sol (Hallaire, 1988).

Le suivi des modifications des caractéristiques de l'état de surface du sol et du comportement hydrodynamiques suite au phénomène de retrait-gonflement des argiles a permis aussi d'expliquer les variations du comportement du sol SAV vis-à-vis de l'érosion à l'échelle de l'année. Ce suivi de l'infiltration en parallèle au suivi du fonctionnement structural du sol SAV a permis de suivre la variation de l'infiltration en fonction de la dynamique structurale qui est liée à l'humidité du sol (fig. 57 ; tabl. 30). Les premières fissures sont décelables à l'observation en dessous d'une humidité d'environ 27%. Le dessèchement provoque l'apparition d'un réseau serré de fissures fines, puis le retrait continue avec le temps et on observe l'élargissement de certaines fissures aux dépens d'autres. Des fissures fines peuvent aussi se former aux seins des blocs pris en masse tandis que les fissures résiduelles sont de plus en plus espacées. Il en résulte un réseau plus lâche de fissures larges

et profondes. Le retrait atteint son maximum aux environs d'une humidité pondérale de 14%. Les fissures restent ouvertes jusqu'à l'automne (début de la saison des pluies). Par l'évaporation intense, il se produit un retrait qui se traduit horizontalement par l'ouverture de fissures de retrait qui dépasse les 5cm de large. Les mouvements verticaux du sol depuis le début du suivi ont dépassé les 5 cm au niveau des couches les plus superficielles. En profondeur, ils perdent de l'importance (2 cm de large à plus de 1m de profondeur). En été, lorsque le sol est sec et fissuré, l'infiltration est très élevée (526 à 1153 mm/h) et peut atteindre des valeurs plus basses (66 mm/h) sur les blocs pris en masse. Lors des orages d'été, toutes les eaux s'écoulent et se dirigent vers les fissures (écoulement préférentiel) et peuvent provoquer de l'érosion interne et des mouvements de sol surtout au niveau des exutoires naturels. En automne, l'humidification du sol par les pluies d'automne provoque un gonflement du sol qui fait disparaître progressivement les fissures (les traces restent encore visibles), l'infiltration est relativement faible. En hiver, le sol étant très humide, totalement fermé et presque imperméable, l'infiltration est plus faible (tabl. 30). Les valeurs de l'infiltration ont baissé de 11 à 60 fois par rapport à celles obtenues en été. Ces résultats sont en concordance avec les résultats obtenus sous pluies simulées.

Tab. 30 : modification des caractéristiques de l'état de surface du sol et du comportement hydrodynamiques suite au phénomène de retrait-gonflement des argiles (suivi par décade).

Mois	Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Aout		Septembre		Octobre		Novembre	
Période	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q	1 q	2 q
Précipitations	20	9	90	25	10	90	42	0	0	0	0	7	6	0	6	120	30	120
T. moy. (°C)	12,0		14,0		18,0		21,5		25,5		26,0		23,0		18,5		14,0	
Insol. h/jour	6,8		7,7		9,6		10,3		10,5		10,5		9,4		7,8		6,4	
Hdt.% -20cm	35	34	37	37	35	37	36	26	20	19	14	15	14	14	16	30	30	35
Hdt. % -40cm	36	36	37	37	36	37	37	29	23	23	18	18	16	16	15	29	29	35
So % (Moy.)	-	-	-	-	-	-	-	15	25	27	33	30	26	30	28	6	-	-
So% (Médiane)	-	-	-	-	-	-	-	14	23	26	30	30	28	29	27	8		
Ecart max des fentes (cm) T1	-	-	-	-	-	-	-	1	2	4	5	5	5	5	5	1	-	-
Ecart max des fentes (cm) T2	-	-	-	-	-	-	-	1	2	5	5	7	7	7	7	2	-	-
Infilt. mm/h	<15	<15	<15	<15	<25	<25	<25	<60	>200	>400	>500	>500	>500	>500	>500	<100	<30	<15

Insol: ensoleillement; T. moy: température moyenne annuelle; Hdt: humidité du sol à -20cm et à -40 cm; So: taux de surfaces ouvertes; T1: transect transversal sur sol brun vertique (en pente); T2: transect transversal sur vertisol (sur replat); Infil: infiltration mesurée par la méthode de Piogger; 1q : première quinzaine; 2q : deuxième quinzaine

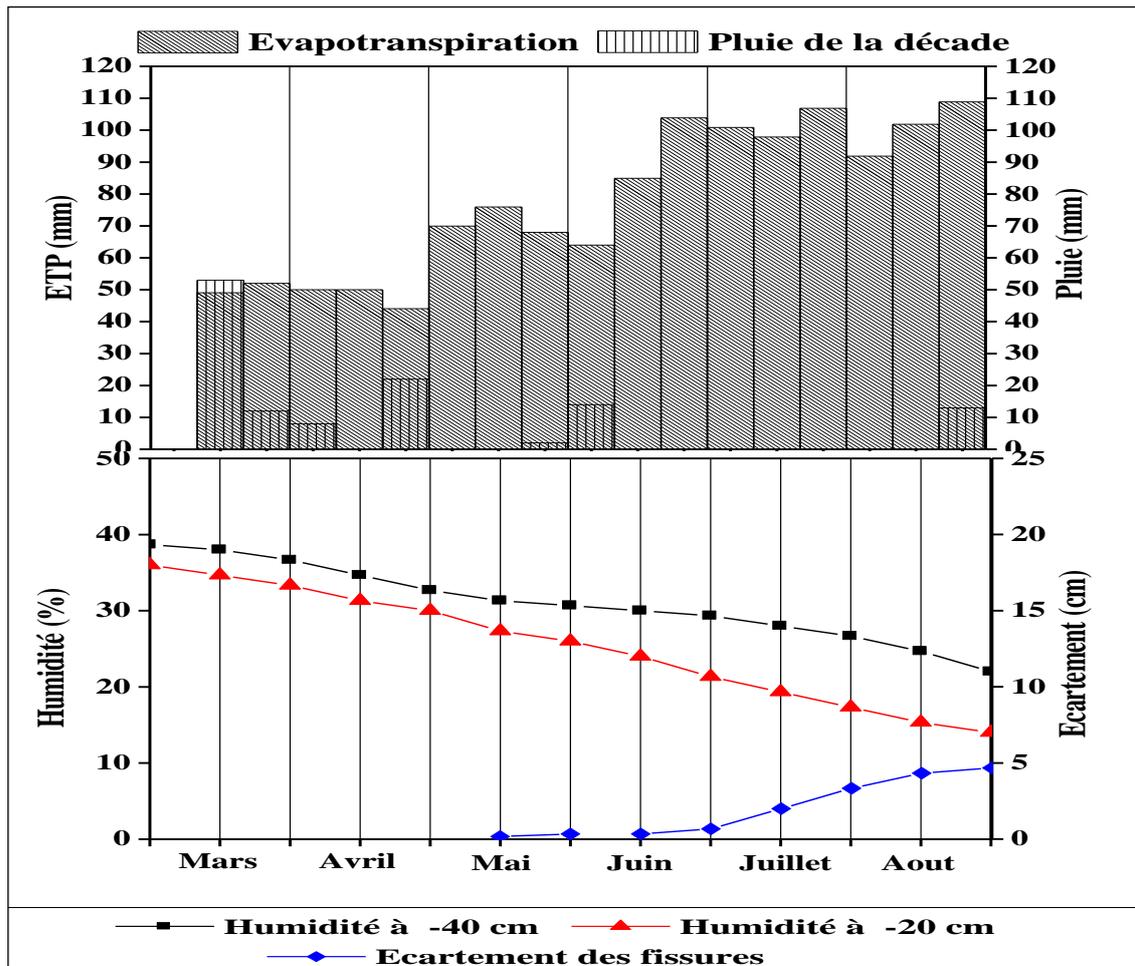


Figure 57 : suivi des déplacements du sol (dynamique structurale) en fonction de l'humidité du sol SAV (Morsli, 1996)

L'ampleur du phénomène retrait-gonflement est liée à la composition minéralogique de la phase argileuse. Les sols argileux étudiés, formés sur marne, se caractérisent par une richesse en argile qui dépasse les 50 %. Les résultats de la diffraction des rayons X, réalisés au laboratoire de l'IRD de Paris, montrent que la composition minéralogique des argiles est de type 2:1 (Morsli, 1996). Ce type d'argile gonflante est sensible à la dispersion et à la fissuration. L'ampleur de la fissuration est liée au taux d'argile et surtout à la nature cristallographique de certaines argiles (Collinet et Zante, 2002).

Détachabilité / transports solides

Les résultats des différents essais montrent que la charge solide des eaux de ruissellement varie de 20 à 112 g/l. Les valeurs maximales ont été enregistrées lors des fortes pluies (intensité de 80 mm/h).

Le suivi de l'évolution des pertes en terre au cours des essais de simulation montre que sur sol SAV, la détachabilité diminue avec le temps. À l'état sec, le sol se caractérise par un réseau très serré de fissures et d'une complète désagrégation en fines particules de l'horizon de surface. Les petites particules désagrégées qui se détachent facilement sont immédiatement emportées par les eaux de ruissellement. Et au fur et à mesure du ruissellement, les exportations tendent vers la diminution : après l'entraînement des particules fines désagrégées et avec le tassement progressif du sol par les gouttes de pluie, la détachabilité diminue. Mais si la pluie persiste, le ruissellement en nappe s'intensifie et peut générer de l'érosion linéaire et augmente ainsi les exportations par le cisaillement du sol.

A l'état humide et après la dégradation de la structure superficielle et la compaction du sol par les pluies, les concentrations deviennent de plus en plus faibles. Le sol étant relativement fermé et aplani par les pluies, les eaux de ruissellement sont relativement moins chargées au début des essais. Mais une fois que le ruissellement commence à entailler le sol, en créant des griffes, le ruissellement devient plus érosif et les exportations tendent vers l'augmentation suite au cisaillement des lèvres des griffes et des rigoles.

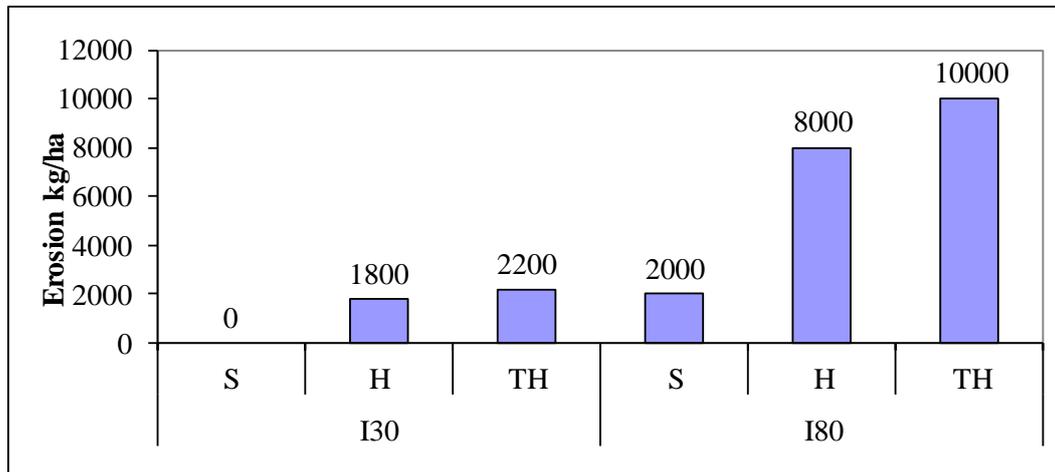
Les concentrations, lors des fortes pluies (80 mm/h), sont très élevées. Lors de ces fortes pluies, le ruissellement s'intensifie et engendre un développement d'une érosion en griffes et en rigole, donc un cisaillement par les eaux de ruissellement et par conséquent une augmentation de la charge solide. Cette augmentation peut être due aussi à l'énergie des gouttes des pluies qui met plus de particules fines susceptibles à être transportées.

Le suivi de l'évolution de l'érosions (détachabilité) à l'échelle de la parcelle de 1m^2 , montre que le mécanisme commence avec le ruissellement en nappe, mais si le ruissellement persiste surtout dans le cas des pentes relativement fortes ($P=25\%$) et sous fortes intensité de pluie ($I=80\text{ mm/h}$), se créent des griffes et des rigoles où le rôle érosif du ruissellement peut devenir très important.

Pour le sol SBL, à l'état sec, la surface du sol est encroutée, l'érosion est relativement faible. Avec la succession des pluies, le ruissellement s'intensifie et engendre une érosion plus élevée que celui du SAV. La détachabilité est proportionnelle à l'intensité de pluie. De nombreux auteurs ont montré le rôle de l'intensité de la pluie sur la détachabilité (Wischmeier et Smith, 1978 ; Keith et Cooley, 1980; Henensal, 1986).

Dans les conditions sèches, le sol SAV fournit plus de sédiments, alors que le sol SBL, en raison de la compacité du sol asséché, enregistre des volumes de ruissellement importants mais avec une turbidité moindre. A l'état humide et dégradé par la succession de chutes de pluie, les concentrations augmentent sur SBL. Par contre sur le sol SAV, la turbidité peut augmenter (développement d'une érosion en griffes et en rigole) comme elle peut diminuer (tassement du sol par les pluies) en fonction de l'intensité de pluie.

Le graphe de la figure 58 montre bien la différence de l'érosion (détachabilité et exportation des particules de sol) entre les trois états du sol et pour des intensités de pluie de 30 et 80 mm/h. Pour faciliter la comparaison, nous avons calculé l'érosion pour une même hauteur de pluie (15mm), quelle que soit l'intensité: une durée de 30 mn pour l'intensité de 30 mm/h et de 11 mn et 25 secondes pour une intensité de 80 mm/h.



S: sol sec; H:sol humide; TH: sol très humide; I30: intensité de 30 mm/h; I80: intensité de 80 mm/h

Figure 58: variabilité de l'érosion (détachabilité et exportation des particules de sol) en fonction des états de surfaces du sol - Erosion (kg/ha) obtenues après 15 mm de pluie

Le suivi de l'évolution des pertes en terre au cours des simulations de pluies montre qu'il existe des relations entre la charge solide (C) et le coefficient de ruissellement (Kr). Pour spécifier la relation qui existe entre C (g/l) et Kr (%), nous avons procédé à un traitement de données. Ce traitement consiste à chercher le modèle régressif le plus significatif entre les deux caractéristiques: le ruissellement (apport liquide) et les concentrations en éléments fins (sédiments). Plusieurs modèles mathématiques ont été testés. Le modèle linéaire semble mieux ajuster les données. Les relations trouvées avec leurs coefficients de corrélation sont regroupées dans les tableaux 31 et 32.

Tableau 31 : coefficients de détermination (R^2) trouvés entre C et Kr par le modèle linéaire (Sol SAV)

Intensité	Pente	Etat du sol	Expression	R^2	R	Coefficient p
30 mm/h	12.5 %	S	$Kr = 371,4 - 7,88 C$	67,8	-82,3*	0,000
		H	$Kr = 108,2 - 0,79 C$	23,1	-48,0*	0,037
		T.H	$Kr = 215,9 + 4,69 C$	11,3	33,6 ^{ns}	0,187
	25.0 %	S	$Kr = 429,1 - 8,78 C$	67,2	-66,7*	0,000
		H	$Kr = 137,0 + 1,97 C$	82,8	90,9*	0,000
		T.H	$Kr = 211,3 + 4,81 C$	44,5	66,7*	0,009
80 mm/h	12.5 %	S	$Kr = 117,8 - 1,10 C$	21,6	-46,4*	0,010
		H	$Kr = -0,09 + 1,67 C$	77,7	88,1*	0,000
		T.H	$Kr = 14,65 + 1,44 C$	21,5	46,3*	0,051
	25 %	S	$Kr = 120,0 - 0,94 C$	76,9	-87,6*	0,000
		H	$Kr = -544,8 + 5,74 C$	67,8	82,3*	0,000
		T.H	$Kr = 14,15 + 0,79 C$	70,2	83,7*	0,000

*Corrélations linéaires significatives au niveau d' α 0,05 ; ns: corrélations non significatives; R^2 : coefficient de détermination; R: coefficient de corrélation

Tableau 32 : coefficients de détermination (R^2) trouvés entre C et Kr par le modèle linéaire (Sol SBL)

Intensité	Pente	Etat du sol	Expression	n	R^2	R	Coefficient p
30 mm/h	12.5 %	S	$Kr = 8,55 + 1,64 C$	25	88,1	93,8*	0,000
		H	$Kr = 15,13 + 1,28 C$	9	93,7	96,7*	0,000
	25.0 %	S	$Kr = - 5,76 + 3,51 C$	22	86,3	92,8*	0,000
		H	$Kr = 6,59 + 1,98 C$	8	93,9	96,9*	0,000
80 mm/h	12.5 %	S	$Kr = 14,92 + 1,10 C$	20	87,1	93,3*	0,000
		H	$Kr = 27,92 + 0,47 C$	9	72,5	85,1*	0,002
	25 %	S	$Kr = 6,150 + 0,92 C$	26	76,1	87,2*	0,000
		H	$Kr = - 30,21 + 1,25 C$	9	94,8	97,3*	0,000

- Corrélations linéaires significatives pour $\alpha = 0,05$

Le tableau 32, montre une corrélation positive entre le ruissellement et les concentrations des sédiments. Pour le SBL, cette augmentation des sédiments est due à l'énergie des gouttes de pluies qui met de plus en plus de particules fines susceptibles à être transportées (la désagrégation est relativement rapide, la structure du SBL est instable).

Pour le SAV (tabl. 31), la relation est significative entre le ruissellement et les concentrations des sédiments ($r = 0.90$ à 0.46 ; $\alpha = 0.05$) sauf pour un essai. Les relations entre K_r et C montrent que les pertes en terre ne sont pas toujours proportionnelles avec le volume ruisselé, la relation peut être positive comme elle peut être négative. Mais elle est toujours positive lorsque le sol est sec. Le sol SAV, à l'état sec, est caractérisé par un horizon superficiel désagrégé, de quelques centimètres d'épaisseur. Un sol avec un état désagrégé favorise le transport solide. Une fois le ruissellement déclenché, les particules désagrégées sont facilement transportées. Et au fur et à mesure que la pluie tombe, le sol se tasse progressivement et la charge solide tend vers la diminution. Mais si la pluie persiste, surtout lors de fortes intensités ($I=80$ mm/h), l'augmentation du volume ruisselé (augmentation de l'énergie du ruissellement) engendre une élévation des pertes en sol. Cette augmentation des pertes en terre est dû à l'énergie des gouttes de pluies mais surtout à l'énergie du ruissellement qui engendre un développement d'une érosion en griffes et en rigole, donc un cisaillement du sol par les eaux de ruissellement. Les sols argileux sont sensibles aux forces de cisaillement (TUAN LONG 2008) qui arrachent le sol au fond et sur les flancs des griffes et des rigoles. Et de cet effet, la relation entre K_r et C peut être variable même au cours d'une pluie.

A l'état humide et sous fortes intensités de pluies, la relation entre K_r et C est toujours positive. L'énergie des gouttes de pluies et du ruissellement provoque une augmentation des pertes en terre. A la fin on peut dire que les relations entre K_r et C montrent que les pertes en terre ne sont pas toujours proportionnelles avec le volume ruisselé. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par les mesures de l'érosion sur les parcelles de 100 m^2 .

2.2.2. Effet du travail du sol / Effet de la rugosité

Les paysans, dans cette zone, travaillent une partie de leurs terres et laissent l'autre partie en jachère qui est souvent pâturée. Le premier travail se fait en octobre ou en novembre et quelquefois même en décembre. La plus grande partie travaillée est réservée aux céréales et le reste aux légumineuses. Les outils les plus utilisés sont l'araire et la charrue à soc ou à disque qui ouvre le sol et le retourne.

Les résultats ont bien montré l'effet du travail du sol dans le retardement de la naissance du ruissellement et surtout celui du TM. La rugosité de la surface du sol, associée à la présence de végétation encore liée aux mottes, distingue nettement TM des autres situations. TM confère au sol une capacité d'infiltration plus élevée et une disponibilité à rester ouvert plus longtemps et corrélativement une susceptibilité plus faible au ruissellement et à l'érosion.

Le seuil d'intensité de la pluie au-delà duquel le ruissellement se déclenche est relativement élevé ($35 < P_i < 42$), car l'ameublissement du sol favorise le maintien d'une bonne infiltrabilité. Par contre, sous une pluie de forte intensité, le ruissellement entraîne facilement le sol ameubli. Une fois le ruissellement déclenché, les charges solides peuvent dépasser les 40 g/l .

L'effet du défoncement qui s'effectue généralement avec la charrue à soc, n'est pas différent du TM lors des premières pluies. Avec la succession des pluies (troisième pluie), la rugosité a fortement diminué, surtout pour le sol SBL qui restent très vulnérables à l'éclatement. Le sol SBL paraît plus sensible à la battance ($1,2 < I_s < 30$) alors que le sol SAV est plus résistant, I_s est inférieure à 0,8 (Morsli et *al.*, 2004). La diminution de la rugosité facilite le déclenchement du ruissellement. Le défoncement retourne le sol et met en surface les horizons de profondeur, très fragiles. Ceci rend le sol encore plus sensible, surtout pour les sols peu profonds et en forte pente. Les horizons du bas du profil du sol SBL, généralement peu épais, sont constitués en général par des encroûtements calcaires ou par des altérations de grés tendres (Morsli, 1996). Sur ce type de sol et en forte pente, le défoncement peut provoquer des dégâts considérables lors des grandes averses. La durée de l'apparition du ruissellement est relativement courte et la charge solide est élevée par rapport au TM. Le défoncement en pente, qui se fait surtout pour les plantations d'arbres et de vignes, est dangereux, il est préférable pour les plantations arboricoles d'ouvrir tout simplement des pôtets avec la confection des cuvettes en demi-lune pour profiter encore plus du report hydrique.

Le travail grossier par le chizel (travail qui ouvre le sol sans le retourner) laisse beaucoup de mottes très grossières et des résidus de cultures en surface. Cette rugosité importante s'oppose à l'écoulement de l'eau et les pluies prennent beaucoup de temps pour détruire les mottes. Les Pluies d'imbibition (P_i) sont relativement plus élevées même lors de la troisième pluie (sol très humide). Un travail du sol, réalisé avec un matériel à dents après les récoltes est bénéfique, il permet de régénérer la rugosité et de garder une quantité de résidus en surface du sol tout en enfouissant une quantité appréciable de résidus. Ce premier travail, après les récoltes, limite les risques du ruissellement tout en prolongeant la résistance du sol, jusqu'au prochain labour qui ne s'effectue généralement qu'au mois d'octobre. Comme il permet de réduire l'ampleur de la fissuration du sol pour les sols de type SAV.

Le travail traditionnel à l'araire, très fréquent en zone de montagne, s'effectue généralement juste après le ressuyage des eaux de pluie (le travail à l'araire est plus facile sur un sol plus ou moins humide). La rugosité est toujours élevée, mais avec un état motteux relativement faible. Ce type de travail retarde aussi le déclenchement du ruissellement, les P_i sont supérieurs à 30 mm ; mais les mottes créées sont relativement de petites dimension ce qui affaiblit la résistance du sol et augmente le risque d'érosion.

Le travail du sol apparaît, à l'issue de ces premières expériences comme une méthode très utile, il permet de régénérer la rugosité, d'augmenter l'infiltration et de minimiser le ruissellement et



l'érosion. L'effet du travail du sol reste significatif pour les deux premières averses, les P_i sont relativement élevés et le risque de ruissellement et d'érosion est minime.

Mais cet effet significatif sur le ruissellement et l'érosion est temporaire et se fait ressentir uniquement pour les premières pluies, c'est à dire pour des conditions initiales à déficit de saturation important et des états de surfaces très rugueuses. Lors de la troisième pluie, le sol étant plus ou moins saturé et dégradé (les mottes fondent et les particules détachées imperméabilisent la surface du sol), le ruissellement se déclenche rapidement surtout pour le sol SBL ($P_i=1\text{mm}$) et le risque d'érosion devient très grand. Les concentrations sont relativement élevées. Le travail du sol permet une bonne conservation dans les montagnes marneuses mais peut aussi accélérer les pertes en terres (GTZ, 1996).

Un labour récent enregistre des taux d'infiltration élevés et des coefficients de ruissellement très faibles voire nuls dans certains cas. Cependant, plus le labour vieillit plus les taux de ruissellement augmentent du fait de la diminution de la rugosité du sol et de la formation de croûtes superficielles. Si aucun travail ou entretien du sol n'est réalisé à la suite d'une succession des pluies qui suivent la période de labour, lors des épisodes suivants la surface du sol réagira presque de la même manière qu'une surface non travaillée. Lors de la troisième pluie, où l'état de surface du sol ressemble à un labour ancien (sol presque aplani avec formation en surface des pellicules de battance), le ruissellement s'est rapidement déclenché.

Les résultats obtenus ont montré l'effet positif du travail du sol et l'effet négatif des sols non travaillés et plus ou moins abandonnés (SNTTP). La rugosité créée par le travail du sol permet de stocker une partie des précipitations à la surface du sol d'autant plus importante que l'état de surface est motteux. La comparaison de différents traitements a montré l'effet positif du travail grossier et sans retournement, surtout pour les sols limoneux et peu profonds, sur le retardement de la naissance du ruissellement et de l'érosion. Le travail du sol ne doit être affiné dans ces zones en pentes et ne doit pas être retourné pour les sols superficiels, surtout pour les sols de type SBL.

Le travail du sol sur les zones cultivées, de pente inférieure à 20 %, a une influence très marquée sur le risque du ruissellement et d'érosion, il retarde le début du ruissellement et augmente la capacité d'infiltration. Lorsque la pente augmente, les volumes stockés entre la rugosité communiquent facilement entre eux par l'effet pente ce qui accélère le ruissellement.

Le travail du sol est ressenti dans la région étudiée comme un moyen efficace contre la dégradation des sols. Reste à savoir le type de travail du sol approprié à chaque situation ainsi que

l'époque du travail du sol et sa durée de résistance. Des recherches (Lal, 1975; Boli et al., 1993; Mrabet et al., 2004; Diallo et al., 2008; Duchemin et al., 2008) sur certains types de travail de conservation du sol (travail grossier, travail du sol réduit à la ligne de plantation, combinées avec les résidus maintenus en surface...), ont montré que les risques de ruissellement et d'érosion ont beaucoup baissé avec ce type de travail du sol.

2.2.3. Effet des jachères / Effet de couverture du sol

Les jachères qui servent de terrains de parcours jouent un rôle important dans la dynamique érosive par leurs états de surface et l'évolution de leurs couverts végétaux. Le suivi des jachères et les expérimentations de simulations de pluies effectuées au cours de différentes campagnes (automne, hiver et printemps) ont montré une différenciation de comportement à l'échelle de l'année (fig. 55 et 56).

En été et au début de l'automne, les terrains en jachère, dépourvus de toute végétation, durcissent et se compactent. Les fentes de dessiccation, très nombreuses en particulier sur le sol SAV en jachère, favorisent l'infiltration en début de pluie. Mais suite à l'imbibition et la dégradation de la surface du sol par la pluie, le sol se colmate, facilitant ainsi le déclenchement du ruissellement. Les résultats ont montré qu'à l'automne les P_i , une fois le sol est fermé, peuvent diminuer jusqu'à 10 fois pour les jachères pâturées sur sol SAV. De ce fait, les pluies d'automne, souvent agressives, permettent d'engendrer des coefficients de ruissellement très élevés une fois le sol est fermé et peuvent créer des incisions sur le sol, phénomènes que nous avons bien pu observer sur les parcelles expérimentales. Néanmoins, la densité des incisions ainsi que les pertes en terre sont sensiblement inférieures à celles observées sur les parcelles labourées en cas de pluies très intenses. Mais les incisions qui s'y développent sur les sols en jachère évoluent avec le temps et peuvent enregistrer des taux plus élevés en perte en terre en raison de la forte fréquence des ruissellements le long de l'année. Alors que sur les terres cultivées, les incisions sont souvent effacées par les labours. L'abandon d'un terrain cultivé à la jachère pâturée et prolongée favorise l'apparition de l'érosion linéaire et l'extension des ravines.

Sur les jachères pâturées, souvent le siège d'un surpâturage, ce sont les croûtes superficielles qui y prédominent. La porosité superficielle est assurée surtout par les fentes de retrait sur le sol SAV. Dans le cas du sol SBL, caractérisé par des surfaces fermées et une faible porosité, les premières pluies sont susceptibles de colmater rapidement la surface du sol et de provoquer du ruissellement qui augmente rapidement. Les P_i , déjà très basses, ont passé de 7 à 2 mm seulement

lors de la deuxième pluie. Par contre les jachères protégées, présentent une infiltration relativement élevée, la porosité reste ouverte grâce à la couverture du sol et à la présence d'une litière plus ou moins permanente et couvrante.

En hiver où le sol est faiblement couvert plus ou moins couvert et saturé et totalement fermé, les pluies d'imbibitions ont atteint les valeurs les plus basses rendant le sol plus vulnérable au ruissellement et à l'érosion. Par contre au printemps, les Pi ont relativement augmenté suite à l'augmentation de la couverture du sol par le développement du couvert végétal. Ces résultats sont en concordance avec ceux des parcelles de 100 m².

Le risque de ruissellement et d'érosion reste toujours élevé sur les jachères pâturées quel que soit le type de sol. Mais le risque reste encore plus élevé sur le sol limoneux.

Il s'avère que la couverture du sol et les états de surface du sol jouent un rôle prépondérant dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion. Beaucoup d'auteurs (Wischmeier et Smith, 1978; Hudson, 1992; Laouina, 1992; Mouffadel, 2001; Roose et *al.*, 2012) ont montré l'effet positif de la couverture du sol sur la réduction de l'érosion. L'analyse des facteurs explicatifs de la différenciation de comportement a mis en relief l'aspect prépondérant des états de surface : surfaces fermées (Sf) et surfaces couvrantes (Sc). La relation est hautement significative entre Pi et les surfaces fermées et couvrantes. L'infiltration finale (Fn) est aussi liée à ces deux états de surface. Les expressions expliquant cette relation sont données ci-dessous :

- Sol SBL

$$Pi = 14,8 - 0,190 Sf + 0,0916 Sc \quad R^2 = 77,1 \% \quad p = 0,000$$

$$Fn = 8,31 - 0,101 Sf + 0,0990 Sc \quad R^2 = 50,8 \% \quad p = 0,000$$

- Sol SAV

$$Pi = 23,5 - 0,268 Sf + 0,0759 Sc \quad R^2 = 95,3 \% \quad p = 0,000$$

$$Fn = 9,79 - 0,106 Sf + 0,104 Sc \quad R^2 = 75,7 \% \quad p = 0,000$$

Corrélations hautement significatives au niveau d' α 0,05 ; p: coefficient p

La bonne relation entre ces surfaces (Sf et Sc) et la pluie d'imbibition montre l'importance du rôle des états de surfaces dans la régulation des flux d'eau et dans la détermination du comportement des sols vis-à-vis de l'érosion. Ces surfaces (Sf et Sc) sont de bons indicateurs de ruissellement surtout pour les sols non travaillés (jachères et parcours). Dans les situations étudiées, les surfaces

fermées oscillent entre 10 et 97 %, suivant les saisons et le type de sol. Les surfaces fermées sont aussi liées à la texture du sol. Suivant les types de sols de structure et texture données, l'état de surface et le comportement hydrodynamique diffèrent. Les sols argileux vertiques diffèrent beaucoup des sols limoneux en période sèche où les surfaces ouvertes (fentes de retrait) sont très importants. A l'état sec, le comportement hydrodynamique du sol SAV est plus influencé par les surfaces ouvertes (fissuration) que par les Sc. La relation entre Pi et les surfaces ouvertes est très forte ($R^2 > 90 \%$), alors que la relation entre Pi et Sc est relativement faible ($R^2 < 40 \%$). En été et au début de l'automne, l'effet des surfaces ouvertes sur la pluie d'imbibition l'emporte sur celui de la couverture du sol.

Les mesures effectuées pendant le début de la saison des pluies (saison sèche) se sont révélées très intéressantes pour expliquer la différence de comportement hydrodynamique entre le sol SAV et SBL. Le taux des surfaces ouvertes est très important pour le sol SAV, le déclenchement du ruissellement a nécessité des Pi importantes. Par contre le sol SBL, caractérisé par un taux de surfaces fermées important, le déclenchement du ruissellement n'a nécessité que moins de 50 % des Pi du sol SAV.

Il est important de signaler que les terrains en jachère ne se comportent pas tous de la même manière. Leur comportement reste contrôlé par plusieurs paramètres. En plus des caractéristiques des états de surface et du sol, leur comportement vis à vis de l'érosion reste aussi lié à la pente et aux aspects géomorphologiques des versants.

Les jachères qui occupent de grandes surfaces peuvent constituer un lieu de prédilection pour le ruissellement. Les états de surface sans micro relief et tassés, comme ceux des jachères assurent une forte cohésion des agrégats du sol limitant ainsi les départs de terre, mais les volumes ruisselés peuvent être très importants. Lors des pluies saturantes, les jachères, avec des Pi inférieur à 2 mm, constituent le lieu de formation des pointes de crue dont les dégâts sont considérables en aval. Lors des pluies exceptionnelles, les pertes en terre qui sont occasionnellement faibles par rapport aux terrains travaillés, enregistrent en revanche des taux plus élevés par creusement du sol (érosion linéaire) par les grandes masses ruisselantes. Si ces terrains en jachère sont abandonnés, l'évolution des entailles continue pendant les années qui suivent, favorisant l'apparition de ravines. Dans certains cas, ces terrains évoluent malheureusement en paysage de bad-lands. Les longues jachères et les terres abandonnées peuvent donc être fortement incisées, évoluant dans ces milieux de simples rigoles à des ravines et à des ravins profonds.

IV.2.3. Erodibilité des sols

Les valeurs du facteur d'érodibilité obtenues par l'équation de Wischmeier et Smith (1978), varient entre 0,002 et 0,008 pour le sol SAV et entre 0,018 et 0,04 pour le sol SBL (tabl. 33), classant ainsi les deux principaux sols des monts de Beni Chougrane comme étant des sols résistants à moyennement sensibles à l'érosion.

Les valeurs obtenues par le nomographe de Wischmeier et *al* (1971) classent aussi le sol SAV (sol brun calcaire vertique) comme sol résistant ($0,11 < K < 0,15$). Par contre elles classent le sol SBL (sol brun calcaire limoneux) comme sol moyennement fragile à fragiles (0.26 à 0.40). L'indice d'érodibilité (K) des sols à l'échelle mondiale varie de 0.01 pour les sols les plus résistants à 0.4 pour les sols moyennement fragiles à fragiles et de 0.70 pour les sols les plus fragiles. A titre de comparaison, l'érodibilité des sols, au Maroc, est de 0.01 pour les lithosols caillouteux et les vertisols calciques, de 0.2 à 0.3 pour les sols bruns calcaires et les sols rouges fersiallitiques lessivés et de 0.3 à 0.4 pour les sols sableux dégradés, décapés sur grès (Roose et Sarrailh, 1989).

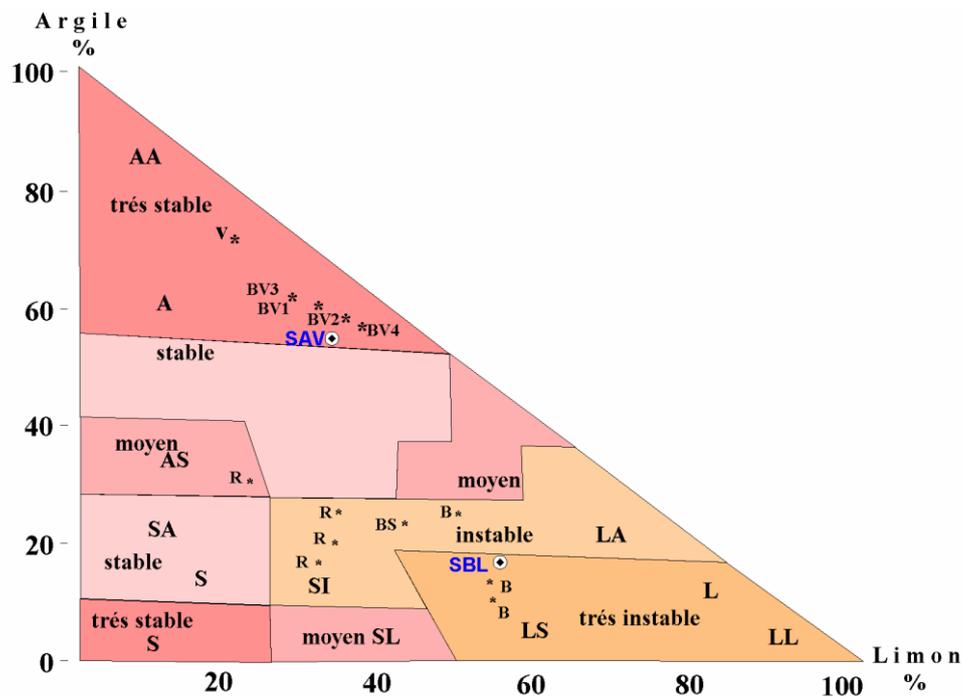
Plus le sol est riche en argile, en matières organiques et en calcaire plus il est résistant. Et plus le sol est riche en sables fins et en limons, en sodium échangeable et pauvre en matières organiques plus il est sensible. Les sols de type SBL avec un taux élevé en limon, en sable fin et avec peu de matière organique dans l'horizon de surface apparaissent les plus sensibles, l'indice d'instabilité varie entre 2,9 et 3,2 (Morsli, 1996). L'indice d'instabilité structurale (Is) varie entre 0,3 et 4 environ pour certains sols des monts de Beni Chougrane (Morsli, 1996) (tabl. 33).

Les sols argileux, comme le sol SAV, sont très stables, mais une fois le profil humecté et les argiles gonflées, ils deviennent peu perméables et le ruissellement se déclenche facilement. Le sol SBL reste le plus instable. Le rôle de la texture apparaît déterminant dans la variabilité de l'érodibilité. En effet sur le triangle textural du GEPPA (fig. 59) renseigné en classe de stabilité, on constate que le sol SAV à texture argileuse se situe au pôle le plus stable. Par contre, le sol SBL à texture limoneuse se situe au pôle le plus instable du triangle.

Tableau 33 : érodibilité des sols

Types de sols	Ruissellement		Erosion (t/ha/an)	Indice d'instabilité	Erodibilité Kusle	Erodibilité (nomogramme)
	Kram %	Krmax				
Brun calcaire vertique (SAV)	2,6 à 9,3	32,62	1,5 - 6,8	0,4 - 0,8*	0,002 – 0,008	0,11 - 0,15*
Brun calcaire (SBL)	4,1-12,2	32,20	2,6 - 8,5	2,9 - 3,2*	0,018 – 0,04	0,26 - 0,40*
Rouge fersiallitique				1,2 - 4,2*		0,21 - 0,34*
Vertisol				0,3 - 0,8*		0,04 - 0,15*
Brun calcaire colluvial				0,8 - 1,8*		0,15 - 0,20*
Peu évolué sur grés						0,32 - 0,39*
Peu évolué sur marne						0,14 - 0,23*
Peu évolué d'ap. alluv.						0,17 - 0,25*
Isohumique						0,13*

* résultats obtenus par Morsli en 1996



SAV : sol brun calcaire vertique ; **SBL** : sol brun calcaire de texture limoneuse.

* (BV1, BV2, BV3, BV4 : différentes situations de sol brun calcaire vertique (SAV) ; B : différentes situations de sol brun calcaire (SBL), R : différentes situations de sol rouge fersiallitique

* résultats obtenus par Morsli (1996) et présentés à titre de comparaison.

Figure 59 : Classement des sols étudiés - Triangle textural du GEPPA renseigné en classe de stabilité (d'après Monnier et Stengel, 1982)

Les facteurs d'érodibilité calculés par l'équation de Wischmeier et Smith (1978) et par le nomographe de Wischmeier et les indices d'instabilité structurale sont en concordance. Ils montrent que le sol SAV, présente une bonne stabilité structurale et reste le plus résistant et le moins érodible ($K_{usle} \leq 0.002$). Cette stabilité est plus liée à la texture. Les corrélations entre l'indice d'instabilité

structurale et les paramètres de la susceptibilité des sols à l'érosion et au ruissellement (texture et matière organique) montrent des relations significatives (Morsli, 1996).

Les résultats obtenus par Morsli (1996) montrent une corrélation significative entre l'indice d'instabilité (Is) et le rapport L/A ($r = 0.88$) et entre le taux d'argile et les taux d'agrégats stables ($r = 0.9$) (tabl. 34). Ceci montre le rôle déterminant de la texture sur la stabilité structurale et plus particulièrement de l'argile. Cette caractéristique de constitution (argile) est essentielle puisqu'elle détermine en grande partie la rétention en eau et la cohésion à l'état humide (Le Bissonnais, 1988). Le rôle de la matière organique n'est pas négligeable ($r = 0.74$) (Tabl. 36). La matière organique ne commence à influencer la stabilité structurale de façon sensible que lorsque le rapport MO/A est égal ou supérieur à 7% (Monnier et Stengel, 1982).

Tableau 34: coefficients de corrélation obtenus entre des paramètres mesurés avec la méthode de Henin (1956) et les caractéristiques du sol (Morsli, 1996)

	Aga	Agb	Age	Is
Limon / Argile	-0.68	-0.67	-0.68	0.90
Argile	0.96	0.97	0.96	0.60
Limons	-0.40	-0.39	-0.40	-0.52
Matière Organique	0.74	0.74	0.67	0.37
Matière Organique/Argile	-0.33	-0.33	-0.32	0.02

Pour conclure on peut dire que les résultats montrent que les sols vertiques de type SAV sont résistants à l'énergie des pluies. Ils présentent une bonne stabilité structurale et l'infiltration est très élevée sur sol sec à cause de leur comportement hydrodynamique très particulier (phénomène de retrait-gonflement des argiles). Les sols argileux étudiés possèdent plus de 50 % d'argile de type 2:1.

En réalité, si les sols vertiques de type SAV sont résistants à l'énergie des pluies, une fois réhydratés, le ruissellement est si fort qu'il provoque du ravinement. Malgré leur bonne stabilité structurale, les sols vertiques restent très sensibles à l'érosion du fait de leur comportement hydrodynamique particulier. Lorsqu'ils sont fissurés, l'infiltration est très élevée et une érosion interne peut être engendrée. Ces infiltrations peuvent favoriser des phénomènes de suffosion et des mouvements de masse antérieurs. L'amplitude des mouvements du sol observés est très variable selon l'état de dessiccation du sol qui est très liée à la variation des précipitations à l'échelle de l'année (Morsli et Habi, 2014). A l'état du plus au moins saturé, la pluie d'imbibition devient très faible (1 à 2 mm), ce qui déclenche facilement le ruissellement. Les eaux de ruissellement abondantes caractérisées par de fortes énergies creusent le sol et provoquent un cisaillement du sol.

Les sols argileux sont sensibles aux forces de cisaillement qui arrachent le sol au fond et sur les flancs des griffes et des rigoles. Si ces sols sont résistants à l'érosion en nappe, ils restent sensibles au ravinement. En pente, l'énergie du ruissellement l'emporte sur celle des pluies. La résistance d'un profil de sol au ruissellement est différente de « l'érodibilité » d'un sol à la battance des gouttes de pluie.

Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus sur parcelles d'érosion et sous pluies simulées. Lorsque les pluies sont abondantes et la pente est forte, le ruissellement peut se déclencher rapidement. A l'état humide, l'infiltrabilité des sols bruns calcaires vertiques (SAV) peut atteindre des valeurs très faibles: à cette période, le ruissellement peut se déclencher facilement, même avec des pluies de faible hauteur. Une fois déclenché, le ruissellement en nappe se hiérarchise, se concentre en filets, prend de la vitesse et développe une énergie propre capable de creuser des griffes ou des rigoles profondes, la production des sédiments est liée surtout aux incisions.

La résistance du sol SBL (sol à texture limoneuse) est variable d'une situation à une autre, mais en général, elle reste faible. Ils sont instables et l'infiltration est relativement faible. Ils sont caractérisés par la présence des croûtes de battance qui ne font que diminuer le délai d'apparition du ruissellement. Ces sols, surtout ceux qui sont continuellement exploités de façon continue sans aucune amélioration, sont pauvres en matières organiques et très instables. L'impact des gouttes de pluie attaque facilement les agrégats terreux, provoquant une diminution de rugosité, un colmatage des pores et une formation d'une croûte superficielle réduisant ainsi l'infiltration et augmentant le ruissellement. Sur les sols bruns limoneux (SBL), l'érosion se traduit par un appauvrissement des horizons humifères et par un amincissement du sol. Les croupes des collines blanchissent : les horizons supérieurs en général de couleur plus foncée, sont érodés les premiers et les horizons inférieurs, plus claires, apparaissent en surface. C'est l'aspect classique des terres érodées et régulièrement cultivées

**PLANCHE 8
SITES
D'EXPERIMENTATIONS**



8/1

BATTERIE CLOTUREE CONSTITUEE DE CINQ PARCELLES D'EROSION DE 100 m²



8/2



8/3

EQUIPEMENT D'UNE STATION EXPERIMENTALE PARCELLES D'EROSION DE 100 m² AVEC SYSTEME DE RECEPTION



8/4



8/5

PETITES PARCELLES D'EROSION

SYSTEME DE RECEPTION ET DE STOCKAGE DES SEDIMENTS



8/6



8/7

EXPERIMENTATION SOUS PLUIES SIMULEES : SIMULATEUR DE PLUIE ET PARCELLE DE 1M2

Photo 8/1 à 8/7. [Clichés : B. MORSLI]

PLANCHE 9

**EFFICACITE DES SYSTEMES AMELIORES EXPERIMENTES DANS LE CADRE DE LA GCES
(FERTILISATION, SEMENCES SELECTIONNEES, TECHNIQUES CULTURALES, MISE EN DEFENS...)**



9/2

PARCELLE AMELIOREE (CEREALES)



9/1

PARCELLE TRADITIONNELLE (CEREALES)



9/3

SYSTEME TESTE (SYSTEME BILLON +P POIS)



9/4

SYSTEME TRAD. CULTURE DE LEGUMINEUSE P CHICHE



9/5

**DEVELOPPEMENT DES PLANTATIONS EN COURBES TESTE
DE NIVEAU + AMELIORATION DES TECHNIQUES**



9/6

Jachère améliorée

**JACHERE AMELIOREE PAR DES
LEGUMINEUSE : BIOMASSE IMPORTANTE**



9/7

INTEGRATION DE L'AGROFORESTERIE AMELIORATION DES PARCOURS : MEDICAGO



9/8

**→ AMELIORATION DE LA BIOMASSE ET DES RENDEMENTS AU DOUBLE, REDUCTION SENSIBLE DE
L'EROSION ET AUGMENTATION DES STOCKS DU CARBONE DANS LE SOL.**

Photo 9/1 à 9/8. [Clichés : B. MORSLI]



CHAPITRE V.

SYNTHESE

CHAPITRE V

SYNTHESE

Les études menées sous pluies naturelles et sous pluies simulées ont apporté des éléments de réponses utiles à la compréhension du déclenchement du ruissellement et de l'érosion dans les monts de Beni Chougrane, zone très représentative du Nord-ouest algérien, ainsi qu'à la lutte antiérosive. A travers ce travail, plusieurs aspects ont été abordés.

Dans une première étape, l'érosion a été appréhendée par une caractérisation qualitative et spatiale de ses manifestations. Cette étape nécessaire a permis de mieux connaître les éléments qui composent ce milieu et de souligner le problème de l'érosion qui constitue l'une des contraintes majeures de ce milieu montagneux. Les études antérieures (Morsli et al, 1988; Morsli, 1996) qui revêtent un caractère préliminaire ont montré la manifestation des différentes formes d'érosion (érosion en nappe, mouvement en masse et surtout érosion linéaire) et les principaux types de sols affectés, mais elles n'ont pas permis de répondre aux questions fondamentales concernant l'ampleur des processus, les facteurs d'érosion discriminants et les périodes critiques. Ces questionnements ont orienté notre travail dont l'objectif était de quantifier l'ampleur de l'érosion naissante (érosion en nappe et en rigole) et d'analyser principalement l'influence des systèmes de gestion (activités humaines) dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion à l'échelle parcellaire et leurs effets sur la fertilité des sols. Dans ces zones cultivées de montagne, l'hypothèse que nous avons émise est que les systèmes de gestion jouent un rôle important sur l'évolution de l'érosion. Beaucoup d'auteurs ont montré que l'érosion hydrique est un processus naturel dont l'ampleur s'est aggravée avec l'utilisation des sols.

La méthode des parcelles de 100 m², conduites sous pluies naturelles durant plusieurs années, a permis de mieux appréhender le phénomène du ruissellement et de l'érosion. Cette approche a permis l'appréciation de l'ampleur de l'érosion par la quantification du ruissellement et de l'érosion en nappe et en rigole sur deux types de sols représentatifs de la zone et l'analyse des principaux systèmes de gestion traditionnels. Nos mesures indiquent que l'érosion en nappe (sous pluies naturelles) pour les sols étudiés ne dépasse pas les 10 t/ha/an, mais ces mesures dépassent souvent

ce que la pédogenèse peut produire dans les conditions actuelles. Comme il existe des différences de comportement entre les situations culturales pour un même type de sol et entre les sols. Les résultats ont bien montré l'impact de des systèmes de gestion dans la dynamique érosive dans ces zones cultivées de montagne.

En plus de l'étude de l'érosion et de l'analyse des effets de différents systèmes de gestion pratiqués, cette méthode a permis de tester l'efficacité de certaines améliorations dans la réduction de l'érosion et l'amélioration de la productivité des sols. L'impact négatif de certains systèmes peut être corrigé de façon à ramener les effets de l'érosion à des normes admissibles comme il a été démontré par les améliorations que nous avons effectuées. Les systèmes de gestion pratiqués dans cette zone ne doivent pas être qualifiés systématiquement comme systèmes dégradants. Certaines sont efficaces (réduction du ruissellement et de l'érosion, maintien ou augmentation de la fertilité et de la production) et d'autres nécessitent des améliorations.

La première approche est complétée par l'utilisation de la simulation de pluies pour analyser certaines situations et états de surface qu'il n'a pas été possible d'analyser sur des parcelles expérimentales de 100 m². Certains aspects sont difficilement perceptibles à l'échelle de 100 m² où sont associés les effets de plusieurs paramètres, les résultats expriment l'effet combiné de plusieurs variables et il n'est pas possible de dissocier les effets de chacun des facteurs. Les campagnes de simulation de pluie ont permis d'étudier l'effet sol et de montrer l'intérêt du rôle prépondérant des états de surface. A cette échelle, d'après les résultats obtenus, les indicateurs pertinents du ruissellement, sont de deux sortes: ceux qui sont relatifs au sol et aux états de surface du sol (caractéristiques du sol (effet de la texture et de la structure), rugosité (effet travail du sol), organisations superficielles (effet des états de surface) et couvertures du sol) et ceux relatifs à l'événement pluvieux (intensité et hauteur et fréquence de la pluie). Nous avons constaté qu'une variation d'un de ces facteurs entraîne une variation de la pluie d'imbibition et du déclenchement du ruissellement et par conséquent de l'érosion.

Les résultats obtenus par les deux approches ont abouti à des résultats convergents. L'échelle des parcelles d'érosion de 100 m² qui permet une certaine concentration du ruissellement (érosion linéaire) a permis de mettre en évidence non seulement l'érosion en nappe mais aussi l'énergie de ruissellement (érosion linéaire : formation des rigoles). Les micro parcelles de 1 m² ont permis surtout d'apprécier le comportement du sol à l'énergie des pluies. La simulation de pluie est un moyen approprié pour apprécier la naissance du ruissellement et de la détachabilité sur une placette de 1 m².

Les éléments qui ressortent de ce travail peuvent être résumés comme suit :

- L'érosion en nappe annuelle est de 1,5 à 8,6 sur sols nus, de 0,3 à 2,7 sur les sols en jachère, de 0,1 à 3,8 sur les sols plantés et de 0,04 à 0,7 t/ha/an sur les systèmes améliorés.

- L'érosion en nappe est modérée sur les diverses situations. Les taux les plus élevés sont enregistrés sur les sols nus (7,5 (SAV) à 8,6 t/ha/an (SBL)). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par des mesures de l'érosion sur parcelles de 100 m² au niveau maghrébin.

- Si le Kram a été modeste, en revanche, le ruissellement maximum (Kr max) a atteint des valeurs relativement élevées : 32 à 35 %. Les risques majeurs sont liés aux averses exceptionnelles, soit aux orages très violents lors des saisons, soit aux pluies longues et saturantes provoquant des ablations pouvant dépasser pour certains événements 2 t/ha d'érosion en nappe et en rigole.

- Le ruissellement et l'érosion sont irréguliers à l'échelle annuelle et interannuelle, quelles que soient les traitements (utilisation du sol). Les taux les plus élevés sont enregistrés en automne où les conditions optimales du ruissellement sont réunies (pluies relativement intenses, sous forme d'orage, sol nu, présence de croûte et taux de couverture du sol presque nul). Les résultats ont permis de montrer qu'au début de la saison pluvieuse, la différence n'est pas importante entre les différents traitements, ce n'est que lorsque le sol est labouré et la végétation commence à le couvrir, que la différence de fonctionnement devient nette. L'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent l'aptitude du sol au ruissellement et à l'érosion. Donc, c'est au début de l'automne qu'on observe l'érosivité maximale des orages et la fragilité maximale du milieu cultivé

- Même si les pertes en terre pour ce type d'érosion (érosion en nappe) restent en général modérées par rapport aux seuils de tolérance (2 à 12 t/ha/an), la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol, source essentielle de la fertilité des sols, est continuellement éliminée par l'érosion sélective (1,3 < indice de sélectivité < 3,9; réduction de 15 % du SOC en cinq ans)). Cela modifie profondément la dynamique de l'eau au niveau des horizons superficiels et réduit l'infiltration. On observe par conséquent une réduction du stockage des eaux de pluie dans les sols, un déficit du bilan hydrique, une réduction de la productivité des sols et par conséquent une augmentation de vulnérabilité des sols à l'érosion.

- Le risque de ruissellement est minime lorsque le sol est sec et rugueux. Par contre, lorsque le sol est humide et surtout quand l'état de surface est dégradé sous l'effet des gouttes de pluie (dégradation de structure, colmatage des pores...), le risque de ruissellement augmente. Ce risque reste dépendant encore plus des conditions pluviométriques, topographiques et culturales.

- Le seuil d'hauteur minimale de pluie requis pour déclencher le ruissellement et l'érosion sur sol nu sec et non dégradé dépasse les 20 mm. Par contre pour les sols saturés dégradés (état de surface du sol dégradé), ce seuil est très bas, quelques millimètres de pluie suffiront pour déclencher le ruissellement. Ces seuils d'hauteur limite dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité et hauteur de la pluie), de la pente et surtout de l'état de la surface du sol. Le seuil de hauteur minimale de pluie requise pour déclencher le ruissellement et l'érosion est plus élevé sur les sols travaillés et couverts. Les résultats ont bien montré l'effet du travail du sol dans le retardement de la genèse du ruissellement et surtout celui du travail grossier et sans retournement. La grande rugosité confère au sol une capacité d'infiltration plus élevée et une disponibilité à rester ouvert plus longtemps et corrélativement, une susceptibilité plus faible au ruissellement et à l'érosion.

- Les systèmes de gestion traditionnels analysés, montrent que l'utilisation continue des sols ne présente pas de grand risque comme celui des sols nus et/ou abandonnés et des jachères prolongées et pâturées. Le travail grossier, la culture en billons, l'amélioration et la mise en défens de la jachère et des parcours s'avèrent intéressantes à la fois pour la réduction de l'érosion et pour la production de la biomasse.

- Généralement, un sol cultivé présente moins de risques qu'un sol nu tassé. Le travail du sol et le billonnage sur les zones cultivées, de pente inférieure à 25 %, ont une influence très marquée sur le risque de ruissellement : ces techniques retardent le déclenchement du ruissellement et augmentent l'infiltration. Le billonnage en courbes de niveau effectué sur plusieurs cultures semble bénéfique dans cette région.

- La jachère pâturée, les parcours et les sols abandonnés tassés présentent un grand risque pour le ruissellement et l'érosion. En revanche, la jachère améliorée présente moins de risque et permet l'enrichissement du sol notamment en carbone. Ces modes de gestion peuvent être encore plus efficaces s'ils sont améliorés par des légumineuses et si le pâturage est réglementé. Mais ces modes d'utilisation qui produisent toujours un fort ruissellement doivent être associés à des structures antiérosives adaptées pour réduire la vitesse de ruissellement et diminuer les masses

d'eau qui se concentrent en aval, et qui sont à l'origine de l'aggravation des ravines existantes et du départ de nouvelles ravines

- L'amélioration des systèmes de gestion a réduit plus ou moins fortement les risques d'érosion et de ruissellement. La mise en défens a réduit de 2 à 25 fois le ruissellement et de 7 à 57 fois l'érosion, et a amélioré la productivité. L'amélioration de la production de biomasse a contribué de manière significative à l'entretien de la fertilité des sols et à la stabilité de la structure du sol, et donc à sa résistance à l'érosion. Le suivi temporel de l'évolution de la fertilité au niveau des stations expérimentales a montré que les stocks du carbone organique dans la couche 0-10 cm du sol ont augmenté sur les systèmes améliorés.

- Les résultats obtenus sous pluies simulées ont montré l'effet positive du travail grossier par le chisel (TM), du travail à l'araire (TA) et des jachères mises en défens (JNP) sur l'amélioration de l'infiltration et la réduction de l'érosion et l'effet négatif du défoncement des sols en pente (D), des jachères pâturées (JP) et des sols abandonnés (SNTTP).

- La relation entre ruissellement et érosion n'est pas stable durant l'année, elle varie au cours des saisons. De bons coefficients de corrélation ont été obtenus selon le découpage saisonnier. La pluie et l'humidité (IAP) peuvent expliquer que partiellement la variabilité du ruissellement et de l'érosion.

- Le suivi du ruissellement et de l'érosion a permis de distinguer trois périodes en termes de comportement érosifs. En automne, sur les sols qui sont généralement nus, les eaux de ruissellement sont très chargées. Après un cumul de pluie supérieure à 20 mm, de très fortes concentrations en sédiments peuvent être observées mais les volumes érosifs restent modérés du fait de volumes écoulés faibles. En hiver, sur les sols peu couverts et après un grand cumul de pluie, de forts volumes ruisselés sont observés, relativement moins chargés et associés à de grands volumes érosifs. En printemps, une fois le sol est couvert, les eaux de ruissellement deviennent relativement moins chargées.

- Les résultats montrent l'importance du rôle des propriétés de l'horizon superficiel dans la régulation des flux d'eau et dans la détermination du comportement des sols vis-à-vis de l'érosion. Le déclenchement du ruissellement et de l'érosion est en relation avec les états de surface. Ces états sont aussi en relation avec les systèmes de gestion et les caractéristiques du sol. Le déclenchement du ruissellement dépend beaucoup de la surface ouverte du sol. Les surfaces fermées accélèrent et augmentent significativement le ruissellement. Les surfaces ouvertes sont plus élevées sur les sols

travaillés que sur les jachères et les parcours et sur sol SAV pendant la période sèche que sur sol SBL. A l'échelle saisonnière, le ruissellement et l'érosion dépendent en premier lieu de l'évolution des états de surfaces et en second lieu du développement du couvert végétal.

- L'hypothèse émise qui considère que les modes d'utilisation des terres jouent un rôle important sur l'évolution de l'érosion est vérifiée. Mais les résultats ont montré que ce rôle peut être négatif comme il peut être positif : les modes d'utilisation peuvent aggraver le phénomène érosif comme ils peuvent l'atténuer.

Sur le plan pratique

Notre démarche en la voulant avoir des incidences pratiques, la dimension socio-économique a été prise en compte puisque toutes les expérimentations ont été effectuées sur des parcelles de paysans en pleine montagne : en plus de la représentativité du milieu où les conditions physiques et de culture sont plus représentatives, notre dispositif et tous nos essais ont été réalisés en conditions réelles de terrain et où toutes les améliorations ont été menées en concertation avec les paysans.

Les résultats issus de ces travaux sont encourageants dans la perspective d'une meilleure conservation et amélioration de ces terres de montagne. Ils indiquent qu'un ensemble de mesures, simples, possibles sur le plan technique et adaptées à l'environnement physique et humain peuvent diminuer l'érosion et améliorer les sols.

Les besoins croissants de la population à fort essor démographique, le désir de s'approprier des terres, le manque d'emploi ainsi que les avantages de la politique actuelle de développement agricole ont conduit à une extension des terres cultivées et à l'attachement à la terre. L'homme est impliqué directement dans la dynamique des processus de dégradation du sol. L'exploitation inappropriée des terres a généré quelquefois l'accélération de l'érosion à des normes inadmissibles. Ainsi, la protection des terres contre l'érosion est devenue une préoccupation nationale. Par contre, dans certains cas les agriculteurs ont su développer depuis très longtemps des méthodes et des techniques parfois simples, mais efficaces leur permettant de contrôler les eaux de ruissellement et qui sont souvent utilisées plus en tant que pratique d'amélioration de production, de protection contre les animaux qu'en tant que pratique de conservation du sol.

Les résultats ont montré que l'impact négatif de l'homme peut être corrigé de façon à ramener les effets de l'érosion à des normes admissibles par l'utilisation appropriée du sol et par

l'application de techniques simples. Le système de gestion est un facteur important où l'homme peut intervenir pour protéger et améliorer la productivité des ressources. Sur ces zones cultivées de montagne, une véritable conservation de sols ne suppose pas seulement des structures antiérosives, mais doit allier différentes pratiques et techniques agricoles qui permettent d'accroître la production et le revenu, tout en protégeant le sol et en maintenant sa fertilité et même si possible en l'augmentant. Une maîtrise complémentaire par ces pratiques culturelles simples, à la portée des paysans, présente une opportunité et apparaît nécessaire.

L'analyse des techniques très pratiquées dans les zones de montagne du Nord-ouest algérien a bien montré les grandes possibilités de maîtrise de l'érosion par ces pratiques culturelles simples. Certaines sont efficaces et d'autres nécessitent des améliorations. Une organisation spatiale « assolement » judicieuse de ces pratiques culturelles au sein des versants ou d'une même exploitation, combinées avec d'autres aménagements aura encore plus d'impact.

Dans le contexte socio-économique actuel, il est difficile de changer tout un mode de gestion, comme il est très difficile de se concentrer que sur les grands aménagements très coûteux et où les moyens ne permettent pas de traiter l'ensemble des terres menacées (leur intérêt est limité en raison de leur coût très élevé et de leur nécessaire entretien). C'est pour cette raison que nous avons orienté notre travail sur l'analyse des techniques culturelles couramment employées, qui ne nécessitent pas de grands moyens et sur les améliorations qui sont possibles et réalisables.

En jouant sur la complémentarité des deux types de solutions, il est par conséquent possible de limiter les risques de manière significative. D'une part, ces pratiques culturelles bien menées et bien organisées dans l'espace permettent de limiter le ruissellement produit, en amont, sur les parcelles agricoles ainsi que l'érosion diffuse. D'autre part, les aménagements permettent de limiter la vitesse du ruissellement et les dégâts causés en aval qui sont quelquefois catastrophiques. Ces solutions ne suffiront pas si elles ne sont pas englobées dans un processus général d'amélioration de la production agricole et de la durabilité de l'agrosystème.

La lutte antiérosive n'est qu'un aspect du développement d'une zone. La conservation des sols, seule sans pour autant augmenter la production, le revenu, ne peut satisfaire le paysan, car elle ne valorise pas le travail. Le paysan a une stratégie basée sur le cours terme qui se conçoit aisément lorsqu'on considère ses conditions de vie. L'intérêt des aménagements antiérosifs dont l'effet ne joue qu'à moyen et long terme et donc souvent mal compris. Le relèvement du niveau de vie doit

accompagner les actions de conservation et de valorisation des ressources naturelles qui elles-mêmes doivent être compatibles avec les conditions écologiques et socio-économiques.

Dans le cadre de ces principes et compte tenu de notre analyse et des résultats obtenus, la lutte antiérosive devra donc s'organiser différemment. D'abord elle devra se faire en fonction de l'origine du ruissellement et de l'érosion. Les techniques préconisées dans ces espaces dans les différents programmes ne tiennent pas assez compte des processus en cours et de la complexité et de la diversité des micros milieux physiques. Les interventions techniques s'attachent surtout à combattre les effets de l'érosion sans s'attaquer aux causes et peuvent parfois même amplifier le phénomène érosif.

Sur les versants cultivés étudiés, les résultats ont montré que l'énergie de la pluie affecte la surface du sol et la prépare à l'érosion en nappe. Mais sur les versants raides, l'énergie du ruissellement seule est suffisante pour arracher et transporter des mottes entières. Dans ces zones cultivées, la lutte contre l'érosion en nappe sur les zones cultivées doit être abordée différemment.

Si les risques proviennent de l'énergie du ruissellement qui est suffisante pour arracher et transporter des mottes entières et des cailloux (décapage du sol par les griffes rigoles), la conservation du sol et de l'eau devra donc s'attacher à rechercher les techniques de diminution de l'énergie du ruissellement pour qu'elle soit mieux dispersée sans entraîner de dégradation de la surface du sol et de transport solide. L'amélioration de la rugosité de la surface du sol, sur les versants de pentes moyennes, diminue l'énergie du ruissellement et augmente la résistance du sol. La rugosité créée par le travail grossier, le billonnage, s'est avéré efficace pour réduire le risque de l'érosion (les pluies d'imbibitions sont très élevées sur les sols rugueux). Tout aménagement de versants pentus doit viser l'étalement des eaux en nappe afin d'augmenter leur infiltration et de réduire leur capacité de dégradation (par dissipation de l'énergie du ruissellement sur la rugosité du sol et des cultures). Mais il faut aussi s'attaquer à l'origine du ruissellement.

Si le ruissellement et l'érosion proviennent de la dégradation de l'état de la surface du sol, la lutte antiérosive devra s'organiser autour des pratiques qui peuvent absorber l'énergie des pluies. Notre travail a bien montré le rôle de la couverture du sol et du travail grossier (motteux) dans l'augmentation de la résistance du sol à l'énergie des pluies et dans la protection de la surface du sol. Sur les surfaces en jachère et de parcours, il suffit de favoriser la régénération et le développement du couvert végétal sur les versants. En effet après quelques années (5 ans) de protection, il est apparu une très bonne régénération spontanée du couvert végétal.

Il s'agit avant tout de développer les systèmes qui couvrent le sol le mieux possible : semis dense, gestion des résidus de culture au niveau de la surface du sol, amélioration des jachères... L'amélioration de la fertilité peut aussi favoriser une croissance rapide et une bonne couverture du sol. Mais le problème est de développer des systèmes de production qui maintiennent le sol couvert durant les périodes sensibles (début d'automne) où les pluies sont agressives et le couvert est quasi nul.

Une amélioration apparemment insignifiante des techniques culturales peut changer profondément l'état de la surface des sols et modifier considérablement les risques de ruissellement et d'érosion. Ces modifications ou améliorations sont efficaces, mais elles seront encore bien plus efficaces si elles sont combinées à des structures perméables antiérosives favorisant la culture en bandes perpendiculaires à la pente.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés, sous pluies naturelles et simulées durant plusieurs années sur les versants du nord-ouest de l'Algérie ont permis de mieux appréhender le phénomène du ruissellement et de l'érosion et de mieux apprécier l'influence des systèmes de gestion. Les résultats ont montré que l'érosion en nappe est relativement modérée ($E < 10$ t/ha/an). Ces résultats sont proches de ceux obtenus au niveau maghrébin. Toutefois l'érosion moyenne annuelle ne traduit pas les extrêmes qui se traduisent à l'échelle de quelques événements pluvieux intenses. Quelques événements pluviométriques exceptionnels ont été à l'origine de dégradations importantes. Si le Kram est relativement modéré, en revanche le Kr max a atteint 35 % lors des averses exceptionnelles (orages violents et pluies longues et saturantes). Les risques majeurs sont liés aux ruissellements exceptionnels qui sont enregistrés surtout en automne où les conditions optimales du ruissellement sont réunies. Ces ruissellements qui génèrent beaucoup de griffes et de rigoles surtout sur les sols argileux sont à l'origine de dégradations spectaculaires qui marquent souvent le paysage pour plusieurs années. Un événement pluvieux intense peut produire plus de 30 à 40 % de l'érosion annuelle. Le facteur d'érodibilité varie de 0,002 à 0,008 pour le sol SAV et de 0,018 à 0,04 pour le sol SBL.

Ces mesures confirment l'hypothèse, selon laquelle l'érosion en nappe sur les versants n'apporte qu'une petite contribution (0,2 à 10 t/ha/an) aux sédiments transportés aux barrages. Cependant, les masses d'eau ravinante proviennent dans une large proportion des versants et constituent les pointes de crue qui à leur tour contribuent à l'exportation des terres vers l'aval et vers les barrages. L'érosion dangereuse pour les infrastructures d'aval (envasement de barrages, inondation...) est due principalement aux ruissellements exceptionnels qui viennent des versants. Tout aménagement de versants pentus doit viser l'étalement des eaux en nappe afin d'augmenter leur infiltration et de réduire leur capacité de dégradation (par dissipation de l'énergie du ruissellement sur la rugosité du sol et des cultures).

Mais pour les zones d'amont, tous les ruissellements qui occasionnent des exportations de terres au niveau des versants présentent des risques et participent continuellement au décapage du sol et à la dégradation de sa fertilité. L'érosion en nappe altère fortement et constamment la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol qui est la source essentielle de la fertilité et un

élément de résistance à l'érosion. Bien qu'elle soit décapante, l'érosion révèle une sélectivité surtout du carbone organique ($1,3 < \text{indice de sélectivité} < 3,9$) et les pertes totales ont atteint 15 % en 5 ans.

L'analyse des systèmes de gestion a montré qu'il existe des différences de comportement entre les situations culturales. Les résultats montrent le rôle majeur des systèmes de gestion dans la dynamique érosive. Ceux-ci ne doivent pas être qualifiés systématiquement comme systèmes dégradants. Certains sont efficaces (réduction du ruissellement et de l'érosion, maintien ou augmentation de la fertilité et de la production) et d'autres nécessitent des améliorations. L'exploitation continue et rationnelle des sols ne présente pas de grand risque érosif. Ce sont surtout les sols nus et/ou abandonnés et les jachères surpâturées qui causent les dommages les plus importants. L'impact négatif de certains systèmes de production peut être corrigé de façon à ramener les effets de l'érosion à des normes admissibles comme il a été démontré par les améliorations des systèmes (jachères mise en défens et améliorée par des légumineuses, billonnage avec relief accentué, travail du sol grossier et sans retournement). Donc l'hypothèse émise qui considère que les modes d'utilisation des terres jouent un rôle important sur l'évolution de l'érosion est vérifiée. Mais ce rôle peut être négatif comme il peut être positif : les modes d'utilisation peuvent aggraver le phénomène érosif comme ils peuvent l'atténuer.

On observe une irrégularité des pertes en terres à l'échelle annuelle, quelle que soient les traitements. C'est au début de l'automne qu'on observe l'érosivité maximale des orages et la fragilité maximale du milieu cultivé, de très fortes concentrations en sédiments peuvent être observées ($C > 100$ g/l à la parcelle). L'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent l'aptitude du sol au ruissellement et à l'érosion. La relation entre ruissellement et érosion n'est pas stable durant l'année, elle varie au cours des saisons. La pluie et l'humidité du sol (IAP) ne peuvent expliquer que partiellement la variabilité du ruissellement et de l'érosion.

Les résultats obtenus sous pluies simulées ont montré l'effet positif du travail grossier (effet de la rugosité) et des jachères mises en défens (effet de la couverture du sol) sur l'amélioration de l'infiltration et la réduction de l'érosion et l'effet négatif des jachères pâturées et des sols abandonnés, caractérisés par une faible couverture et une dominance de surfaces fermées.

Les indicateurs du ruissellement et de l'érosion, sont de deux sortes: ceux relatifs au sol et aux états de surface du sol (caractéristiques du sol, rugosité, organisations superficielles et couvertures du sol) et ceux relatifs à l'événement pluvieux (intensité et hauteur de la pluie). Nous avons

constaté qu'une variation d'un de ces facteurs entraîne une variation de la pluie d'imbibition et du déclenchement du ruissellement et par conséquent de l'érosion. Les états de surface constituent l'indicateur le plus pertinent dans la régulation des flux d'eau et dans la détermination du comportement des sols vis-à-vis de l'érosion. Ces états sont aussi en relation avec les systèmes de gestion et les caractéristiques du sol. A l'échelle saisonnière, le ruissellement et l'érosion dépendent en premier lieu de l'évolution des états de surfaces et en second lieu du développement du couvert végétal.

Un certain nombre de perspectives peut être envisagé concernant le travail présenté. Après avoir identifié les indicateurs pertinents liés aux systèmes de gestion il serait intéressant d'étudier également de manière plus précise leurs évolutions dans l'espace et dans le temps. Un traitement des images satellitaires couvrant le bassin versants pourrait fournir l'inventaire et la localisation des états de surface par une approche spatiale à haute résolution et un suivi temporel à l'échelle saisonnière avec des satellites de grande répétitivité temporelle.

Dans le cas de l'extrapolation des résultats à l'ensemble du bassin versant, il serait intéressant d'utiliser les marqueurs radioactifs qui permettent une estimation assez rapide de l'érosion. Une étude comparative entre les résultats obtenus et ceux des isotopes sera intéressante à mener pour améliorer l'évaluation quantitative et pour faciliter l'extrapolation des résultats. L'utilisation de la simulation de pluie sur le terrain permet aussi la validation des résultats en un temps acceptable à l'échelle du bassin.

Une détermination des états de surface à partir des systèmes de gestion ou des caractéristiques du sol (taux d'argile par exemple) et une analyse de l'humidité du sol, avant et après des événements pluvieux, pourront nous renseigner encore plus sur le fonctionnement des sols vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion.

Notre modeste contribution montre que la compréhension des processus de déclenchement du ruissellement et de l'érosion et la localisation des surfaces à forte susceptibilité de ruissellement nécessite encore des études plus poussées à différentes échelles.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achite M. et Meddi M., 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin de l'oued Mina (nord-ouest Algérien Rev. Sci. Eau. 18 (spécial) : 37-56.

Achite M., Touaibia B. et Ouillon S., 2006. Erosion hydrique en Algérie du Nord : ampleur, conséquences et perspectives, Proc. 14ème Conférence de l'Organisation Internationale de la Conservation des Sols ISCO 2006, Marrakech, Maroc, 15-19 mai : 71-76

Aimé S., 1991. Etude écologique de la transition entre les bioclimats sub-humide, semi-aride et aride dans l'étage thermo-méditerranéen du tell Oranais (Algérie Nord occidentale). Thèse Doct. Es-Sci. Univ. Aix Marseille III. 185p + annexes

Albergel J., 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso, du m² au Km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat sc. Nat. Université Paris VI. 341p.

Albergel J., Mansouri T., Zante P., Ben Mamou A. et Abdeljaoued S., 2006. Organic carbon in the sediments of hilldams in a semiarid Mediterranean area. In : *Soil erosion and carbon dynamics*, É. ROOSE, R. LAL, C. FELLER, B. BARTHÈS et B.A. STEWARD édit., Édit. CRC Press, Advances in Soil Science, vol. 15, p. 289-300.

Ambroise et Bruno A., 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant-Processus, Facteurs, Models. Editions H.G.A. Bucarest. 200p.

Antoine Ph., 2002. L'approche biographique de la nuptialité : application à l'Afrique, in Démographie : analyse et synthèses. Volume II : Les déterminants de la fécondité sous la direction de G. Caselli, J. Vallin et G. Wunsch, INED, Paris : 51-74.

Arabi M. et Roose E., 1991. Influence du système de production et du sol sur le ruissellement dans la station Ouzera, Algérie. Bulletin Réseau Erosion n° 9, ORSTOM : 123 – 129.

Arabi M. et Roose E., 1989. Influence de quatre systèmes de production en zone méditerranéenne de moyenne montagne en Algérie. Bulletin Réseau Erosion, n° 9 : 39-51.

Arabi M. et Roose E., 1992. Water and Soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains ». In : 7th ISCO Conference Proc. 3 : 341-347.

Arabi M., Kedaid O., Bourougaa L. Aslaa T. et Roose E., 2004. Bilan de l'enquête sur la DRS en Algérie. *Sécheresse*, vol. 15, n° 1, p. 87-95.

Arnoldus H.M.J., 1980. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss équation. In: De Boodt M, Gabriels D, eds. Assessment of erosion. New York : John Wiley et Sons : 127- 132.

Aubert G., 1986. Réflexions sur l'utilisation de certains types de banquettes de "Défense et Restauration des Sols" en Algérie. Cah. Orstom, sir. Pédol., 22 (2) : 147-151.

Auzet AV., Boiffin J., Papy F., Ludwig B., Maucorps J., 1993. Rill erosion as a function of characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena* ; 20 : 41-62.

Avenard J.M., 1990. Sensibilité des terres aux mouvements de masse. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. 25, n° 1 : 119-130.

Azontonde A., 1996. Dégradation et restauration des terres de barre au Benin Cahiers ORSTOM série Pédol. Vol. 28 n°2 : 17-226

Barbero M., Loisel R. et Quézel P., 1990. Les apports de la phytoécologie dans l'interprétation des changements et perturbation induite par l'homme sur les écosystèmes forestiers méditerranéens. *Forêt Méd.* XII (3) : 194 – 216.

Batjes N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of soil science* 47 : 151 – 163.

Beasley D.B., Huggins L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. Transactions, American Society of Agricultural Engineers. Vol. 23: 397-312.

Bellatreche A., 1988. Érosion et perspective des sols dans les bassins sédimentaires de Médéa et Béni Slimane, *Algérie*. Thèse de l'Université de Paris VII, 276 p.

Benchetrit M., 1972. L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement de l'Algérie. Pub Univ. Poitiers XI PUF Paris 1972 ; 216p.

Bensaad A., 1993. Climat et potentiel hydrologique en Algérie, Trav. Inst. *Géogr.* Reims, n° 85-86 : 5 - 14.

Bep A., Boli Z. et Roose E., 2002. Pertes de carbone par érosion hydrique et évolution des stocks de carbone sous rotation intensive coton / maïs sur des sols ferrugineux sableux du Nord Cameroun. Résumés des actes du Coll. International : gestion de la Biomasse et Erosion du Carbone, Montpellier. IRD ; 9 p.

Bernard C., Mabit L., Laverdière MR. et Wicherek S., 1998. Césium 137 et érosion des sols. *Cahiers Agricultures* ; 7 : 179-86.

Blanchart E., Roose E., Khamsouk B., Dorrel M., Laurent J.Y., Larre-Larroui Ch., Rangan L., Tisot JP. et Louri J., 2002. Comparaison des pertes de carbone par érosion et drainage aux variations du stock de C du sol en deux années : Cas d'une rotation bananiers-cannes-ananas-sol nu sur un nitisol argileux sur cendres volcaniques de Martinique. Actes du Coll. International : gestion de la Biomasse et Erosion du Carbone, Montpellier ; 9 p.

Blavet D., De Noni G., Roose E., Maillo L., Laurent JY. et Asseline J., 2004. Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en ardeches (France). *Sècheresse* 15 (1): 111-120.

BNEDER 1982. Etude de développement intégré des monts de Beni-chougrane. Algérie. Rapport . Tome 1. 64 p.

- Boardman, J., Favis-Mortlock, D., 1998.** Modelling Soil Erosion by Water. NATO ASI Series « Global Environmental Change », Vol. 55, Springer ; 531 p.
- Boiffin J., 1984.** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies –Thèse Doc-Ing. INA Paris ; 320 pages + annexes.
- Boli Z., Roose E., Bep A., Ziem B., Sanon K., Waechter F., 1993.** Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton /maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux : recherches de systèmes intensifs et durables en région Soudanienne du Nord Cameroun (Mbissiri, 1991-1992). Cah. ORSTOM. Pédol., 282 : 309 – 325.
- Bonn, F, Escadafal G., 1996.** La télédétection appliquée aux sols. In : Bonn F, éd. Précis de télédétection, vol. 2 (Applications), Chapitre 3. Paris : Puq/Aupelf, : 91-135.
- Bouazza M., 1991.** Etude phyto-écologique de la steppe à stipa tenacissima au sud de Sebdou - Oranie- Algérie).Thèse en sciences, Université Aix – Marseille III ;108p +Annexes .
- Boudjemline D. et Benamara L., 2008.** Comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels. Étude expérimentale sous pluies simulées et sous plan d'eau. In : *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*, É. ROOSE, J. ALBERGEL, G. DE NONI, A. LAOUINA et M. SABIR édit., Édit. AUF-IRD-ENFI, Paris, p. 343-347.
- Breton F., 1997.** La dégradation des sols, ou les sols ne sont pas éternels. *Emission* ; 11 p.
- Bryan R. B., 2000.** Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 1 : 385-415
- Casenave A. et Valentin C., 1989.** Les états de surface de la zone sahéenne. Influence sur l'infiltration. Edit. ORSTOM Paris; 229 p.
- Casenave A., 1990.** Etude du ruissellement et de l'infiltration : la technique des pluies simulées. *Bull. Réseau Erosion* 10, ORSTOM : 28 – 37.
- Chebbani R., 1996.** Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser (Tlemcen).Thèse de magister. INA. Alger. 135p.
- Chebbani R., Djili K., Roose E., 1999.** Etude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'isser, Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 19: 85-95.
- Cheggour A., Simonneaux V., Asma S., Yaro Y., Sadik E., Sabir M. et Roose E., 2006.** Recherche d'indicateurs de ruissellement et des risques d'érosion au moyen de tests d'infiltrométrie dans le bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 21, n° 3 : 311-322.
- Chevallier P., 1982.** Simulation de pluie sur deux bassins-versants sahéens (Mare d'oursi-Haute-Volta). Cah. ORSTOM. s&. Hydrol. XIX n° 4 : 253-297.

- Coelho C.O.A., Laouina A., Ferreira, A.J.D., Regaya, K.Chaker, M., Nafaa, R., Naciri, R, Boulet, A., Carvalho, T., 2002.** The dynamics of land use changes in Moroccan and Tunisian sub-humid and semi-arid regions and the impact on erosion rates and overland flow generation. Résumés des actes du Coll. Intern gestion de la Biomasse, Erosion et Séques. du Carbone, Montpellier ; 85 p.
- Collinet J. et Zante P., 2002.** Le ravinement sur marnes gypseuses en Tunisie semi-aride. *Bulletin du Réseau Érosion*, vol. 21 : 301-319.
- Cros-Cayot, S., 1996.** Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte Armoricaïn, thèse de doctorat, Sciences de l'environnement, Rennes ; 223 p.
- Dalloni M., 1952.** L'atlas tellien occidental. XIX^{me} Congrès géologique international, Alger. Monographie régionales. Algérie, n° 2.
- Demmak A., 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie. Thèse de Doc. Ing. Paris VI ; 323p.
- De Noni G. et Viennot M., 1991.** L'érosion agricole dans les Andes de l'Equateur . *Bull. Réseau Erosion* 11 : 205-209.
- De Noni G., Viennot M. et Trujillo G., 1991.** Mesures de l'érosion dans les Andes d'Equateur, cah. ORSTOM, Sér. Pédol. 25, 1-2 : 183-196.
- De Noni G., Viennot M., Asseline J., Trujillo G., 2001.** Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. IRD Editions, Paris, Collection Latitude 23 : 224 p
- De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J., 1996.** LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes* 10 (8): 1107-1117.
- De Roo A.P.J., 1998.** Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. *Hydrol. Process.* 12 : 905–922.
- Diallo D., Boli Z., E. Roose., 2008.** Influence of no-tillage on soil conservation, Carbon sequestration and yield of intensive maize-cotton rotation: research on sandy Alfisols of Northern Cameroon and Mali. In “no-till farming systems”Goddard, Zoebisch, Gan, Ellis, Watson, Sombatpanit S.(eds)Special publication3 by WASWC, Bangkok : 383-392.
- Duchemin B., Hadria R., Jarlan L., Dedieu G., Baup F., Khabba S., Oliosio A., 2008.** Potentiality of optical and radar satellite data at high spatio-temporal resolutions for the monitoring of irrigated wheat crops in Morocco. *International of applied earth observation and geoinformation* ,12 (1) : S32 – S37.
- Dufaure J.J., 1984.** La mobilité des paysages méditerranéens. Hommage à Pierre Birot, Toulouse ; 387 p.

Dumas, J., 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM Pédol. 3, 4 : 307-333.

Eckelmann, W., Baritz, R., Bialousz, S., Bielek, P., Carré, F., Houskova, 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, 94pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Eimberck M., 1990. Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux ». Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXV, n°1-2 : 81-94.

El Garouani A., Merzouk A., Raouf Jabrane R. et Rached Boussema M.R., 2005. Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le Pré-Rif Marocain. » in *Téledétection 2005, vol 5, n° (1-2-3) : 69-80.*

Ellison W.D., 1947. Soil erosion studies - Part I: Agric. Eng. 28 : 145-146.

Emberger L., 1945. Une classification biogéographique des climats. *Recueil Trav. Lab. Bot. Geol. Sool. Fac. Se. Montpellier, Bot.7 : 3-43.*

Farres JP., 1987. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena ; 14 : 119-30.*

Favis-Mortlock D.T., 1998. Modelling Soil Erosion by Water. Global Environmental Change. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Ch. Evaluation of _eld-scale erosion models on the UK South Downs : 43-53.

Floret C. et Serpantie G., 1991. La jachère en Afrique de l'Ouest. *Actes de l'Atelier des 3-5 décembre 1991., Montpellier. Eds sc . ORSTOM, coll. et Sèm., Montpellier, 494 p.*

Flotte J., 1984. La coulée d'éboulis de Mechtras (grande Kabylie, Algérie) un exemple de mouvement ancien d'extension catastrophique in mouvement de terrain colloque de Caen, document de BRGM : 524-532.

Folly A., Quinton J. N., Smith R. E., 1999. Evaluation of the eurosem model using data from the catsop watershed, the netherlands. *Catena 37 : 507-519.*

Foster G.R., 1990. Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In : Soil erosion on agricultural land (J Boardman, IDL Foster, JA Dearing, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK) : 429-445.

Fournier F., 1960. *Climat et érosion.* Édit. Presses Universitaires de France, Paris ; 201 p.

Fournier F., 1967. La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains 12 (1) : 5-53.*

- GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation), 1990.** *World map of the status of human-induced soil degradation. An exploratory map.* Wageningen (Pays-Bas): ISRIC.
- Gomer D., 1992.** Ecoulement et érosion dans des bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. GTZ – ANRH ; 207 p.
- Gomer D., Vogt T., 1993.** Determination of runoff and soil erosion under semi-arid conditions using GIS to integrate Landsat TM, DEM and hydrological field data from the Oued Mina project Algeria. European Society for Soil Conservation. International meeting. "Soil Erosion in Semi-arid Mediterranean areas" Taormina, October 28-30th, 93, abstract 5.
- Greenland D. J., Nye P.H., 1959.** Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. J. Soil Sci. 10, 2 : 284-299.
- Gréco J., 1966.** L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie, Edit. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire Alger ; 303 p.
- Gréco J., 1979.** La défense des sols contre l'érosion. La Maison Rustique, Paris ; 183 p.
- GTZ, 1996.** L'aménagement des zones marneuses dans les bassins versants des montagnes de l'Atlas tellien semi-aride. GTZ .R.F.A ; 142 p.
- Guettoche M.S., 1992.** Cartographie de l'érosion des sols par imagerie satellitaire du bassin de Médéa. Thèse de Magister, Université Houari Boumediene, Alger, 153 p.
- Habi M. et Morsli B., 2011.** Contraintes et perspectives des retenues collinaires dans le Nord-ouest algérien. Revue Sécheresse Vol. 22, n° 1, 49-56.
- Habi M. et Morsli B., 2011a.** Impact of water and soil conservation (WSC) strategies in improving water balance and soil production in Algeria: options to alleviate the negative impacts of climate change, Arabian Journal of Geosciences. Saudi Society for Geo Sciences. Publisher Springer, Vol. 2, n° 2.
- Halimi A., 1980.** L'Atlas blidéen: climats et étage végétaux. OPU; 487p.
- Hallaire V., 1988.** La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I. Description in situ. Agronomie 8 : 139 - 145.
- Hammoudi A., Monjengue BS. et Roose E., 1989.** Enquête sur l'efficacité des aménagements de DRS en Algérie. Bull Réseau Erosion ; 9 : 14-8.
- Hamoudi A., Morsli B., Roose E., 2006.** Evaluation des méthodes classiques de défense et restauration des sols en Algérie. In : Comptes rendus 14^e conférence de l'ISCO « l'International Soil Conservation Organisation » (Marrakech, 14-19 mai 2006).
- Heddadj D., 1997** – La lutte contre l'érosion en Algérie. Bull. réseau-érosion n° 17, Edit. IRD, Montpellier, : 168-175.

- Henensal P., 1986.** L'érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes. Rapport de recherches Laboratoire Central des Ponts et Chaussées n°138.
- Hénin S. et Monnier G., 1956.** Evaluation de la stabilité structurale du sol. GRAISS, Paris, volume B : 49-52.
- Heusch B., 1970.** L'érosion du Pré rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. Ann. de la Recherche Forestière du Maroc ; 12 : 9 -176.
- Heush B., 1971.** Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. C.R.Soc.Sc.Nat et Phy du Maroc T37 : 43-48.
- Heusch B., 1986.** Cinquante ans de banquettes de DRS. –C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan cah. ORSTOM, sér. Pédol.,vol XXII, n° 2 : 153-162.
- Hien E., 2002.** Effet de la déforestation et de l'érosion sur le statut organique du sol : cas d'un sol ferrugineux tropical sableux du SO du Burkina Faso. Résumés des actes du Coll. Intern gestion de la Biomasse, Erosion et Séquestration du Carbone, Montpellier ; 83p.
- Hillal D., 1974.** L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vander Ed ; 287p.
- Hjulström F., 1935.** Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries. Bull. Geo. Inst. Univ. Uppsala 25: 293-305 et 442-452.
- Horton R.E., 1938.** Rain wave-trains. Trans. Am. Geophys. Union., 19 : 368-270.
- Hudson N.W., 1987.** Soil and water conservation in semi-arid areas. FAO Soils Bull.57 ; 172 p.
- Hudson N.W., 1992.** Land husbandry. London. Bastsford. 192p.
- Hudson N.W., 1993.** Field measurements of soil erosion and runoff. Bulletin Pédologique FAO, Rome; n°68: 121-126.
- INRF, 1994.** Synthèse du Bilan de la DRS en Algérie. Document INRF Alger 117 p.
- Jetten, V. G., de Roo, A. P. J., Favis-Mortlock, D., 1999.** Evaluation of yield - scale and catchment - scale soil erosion models. Catena 3 : 521-541.
- Kadik B., 1987.** Contribution à l'étude de Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) en Algérie, dendrométrie, morphologie, office de publication universitaire, Alger ; 580 p.
- Kalman R., 1976.** Modélisation des débits solides. Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. – Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, : 189-194.
- Keith R., Cooley R., 1980.** Erosivity values for individual desing storms. J.of.Irr.and Dra.,vol. 106,(Juin) : 135-145

King D, Le Bissonnais Y., 1992. Rôle des sols et pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux : exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *CR Acad Agric Fr*; 78 : 91-105.

Kilian J., 1974s. Études du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail. Méthodes cartographiques. *L'Agronomie Tropicale*, 29(2-3) : 141-153.

Klingebiel A.A. and Montgomery, P.H., 1966. Land capability classification. Agriculture Handbook 210, Soil Conservation Services, USDA.210p.

Knisel, W. G., 1980. Creams, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. U. C. R. Report USDA 26: 36-64.

Kouadri K.M., 2012. Étude de l'érosivité des pluies dans le Tell Oranais, Algérie. Mémoire de Magister, Université de Mostaganem Algérie ; 135p.

Kouidri R., Arabi M. et Roose E., 1993. Premiers résultats de quantification du ruissellement et de l'érosion en nappe sur Jachères en Algérie (Région de Médéa). – Annales de la Recherche Forestière en Algérie, 1^{er} sem. 1993 : 43-52.

Kouri L., 1993. L'érosion hydrique des sols dans le Bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). Thèse géographie, Univ. Strasbourg ; 238 p.

Lacosta G., 1993. Réactualisation des courbes de traçage des stations hydrologiques de Ribeira Seca. Bilan hydrologique 1991-92. INIDA ; 32p.

Lafforgue A. et Naah E., 1976 . Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, Hydrol.* 13 (3) : 195-237.

Lafforgue A., 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 14 (4) : 299-344.

Lahlou A., 1994. Envasement des barrages au Maroc. Casablanca-Maroc; Editions Wallada; 277p.

Lal, R. 1975. Role of mulching techniques in tropical soil and water management. International Institute for Tropical Agriculture Technical Bulletin No.1, Ibadan, Nigeria. 138p.

Lal R., 1976. Soil erosion problems on an Alfisol in Western Nigeria and their control. Monograph n° 1, Ibadan, Nigeria, IITA. 126p.

Laouina A.,1992. Recherches actuelles sur l'érosion au Maroc. Bull. Réseau Erosion 14: 444-462.

Laouina A., Nafaa R., Coelho C., Chaker M., Carvalho T., Boulet AN. et Ferreira A., 2000. Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kebir, Maroc. Bull Réseau Erosion : 256 -274.

Le Bissonnais Y., 1988. Analyse des mécanismes de dégradation et de modélisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Université d'Orléans ; 216 p.

Le Bissonnais Y. et King D., 1993. Rôle des sols et des pratiques culturales dans les phénomènes de ruissellement et d'érosion : Exemple des sols limoneux en grande culture du nord de l'Europe. *PURPAN*; 166 : 68-74.

Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J. et King D., 1998. Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. INRA Orléans. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. *Etude et Travaux*.18 ; 91 p.

Mabit L., Bernard C., Laverdière M.R. et Wicherek S., 1998. Spatialisation et cartographie des risques érosifs à l'échelle d'un bassin versant agricole par un radio-isotope Cs137. *Etude et gestion des sols*. 5 (3) : 171-180.

Mabit L., 1999. Estimation de l'érosion hydrique des sols par la méthode du ¹³⁷Cs. Application aux bassins versants de Vierzy (France) et Lennoxville (Québec). Thèse de doctorat, Paris I Panthéon-Sorbonne ; 257 p.

Maillo L., 1999. Influence des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion sur les coteaux viticoles du Bas-Vivarais (Ardèche). Thèse de 3ème cycle, Institut de Géographie Alpine, université Joseph Fourier, Grenoble 1, 174 p. + annexes.

Mannering J.V., 1981. The use of soil loss tolerance as a strategy for soil conservation. In: ISCO 2, Morgan (ed.), Wiley : 337-350.

Mansouri A., Belamri M., Morsli B., Hamoudi A., Hocini N., Foudil cherif H., Boulabraouat F. Z., Azbouche A., 2010. Utilisation de la technique du Cs137 pour la quantification de l'érosion hydrique applications au bassin versant Isser (Tlemcen). Com. Séminaire "Les enjeux sur la qualité dans le secteur de l'eau et l'assainissement en Algérie" Tipaza-Algérie, 12 et 13/05/2010. 22p.

Mathieu R., King C. et Le Bissonnais Y., 1993. Contribution de données multitemporelles Spot à l'identification des risques d'érosion. L'exemple des sols limoneux du nord de la France. *Cah Orstom Sér Pédologie* ; 28 (1) : 81-94.

Mazour M., 1992. Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser : Tlemcen, Algérie. *Bull. Réseau Erosion* 12 : 300-313

Mazour M., Roose E., 2002. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du Nord – Ouest de l'Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 21, IRD, Montpellier (France) : 320-330.

Mazour M., 2004. Etude de facteurs de risque de ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser, Tlemcen, Algérie. - Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen. 184p.

Mazour M. et Morsli B., 2008. Analyse de quelques techniques traditionnelles de conservation de l'eau et du sol dans le Nord-Ouest Algérien. *Efficacité de la Gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides*, É. ROOSE, J. ALBERGEL, G. DE NONI, A. LAOUINA et M. SABIR édit., Édit. AUF-IRD-ENFI, Paris, p. 193-198.

- Mebarki A., 1984.** Ressources en eau et aménagement en Algérie. " bassin de Kebir Rhumel" O.P.U. Alger.302p.
- Meddi M., 1992.** hydro pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina Algérie. Thèse de Doctorat, Univ Louis pasteur Strasbourg France 1992 ; 390 p.
- Meddi. M., 1994.** Etude du transport solide à l'échelle de la crue dans le bassin versant de l'Oued Mina, modèle probabiliste d'estimation du débit solide, Revue « Algérie équipement » n°13.
- Meddi M., Morsli B., 2001** -Etude d'érosion et du ruissellement sur bassins versants expérimentaux dans les monts de Beni-Chougrane. Revue Z. Gemorph NF 2001, Allemagne; 45/4 : 443-452,.
- Meddi M. et Meddi M., 2005.** Sècheresses et spatialisation des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie. Ive Colloque du département de géographie. Tunis, : 1-7
- Millward A.A. and Mersey J.E., 1999.** Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed.Catena, vol. 38, p : 109-129.
- Miloudi A., 1998.** Contribution à l'étude de la régénération du tuya dans la foret de fergoug. Thèse de Magister. INA El Harrach Alger. 140p.
- Ministère de l'Environnement et l'Aménagement du Territoire 2000.** Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement ; 95p.
- Ministère de l'Agriculture 1984.** Inventaire général des terres et des forêts.12 volumes + cartes
- Mlaouhi A., 2001.** *Climat et érosion par ravinement dans les bassins versants des oueds Maïz et Redjel (Hafouz), Tunisie centrale.* Thèse de l'Université de Provence ; 221 p.
- Moeyersons J., 1989.** La nature de l'érosion des versants au Rwanda. Annales, Kon. Mus. Mid. Afr., Tervuren, Série des Sciences économiques, 19 ; 396 p.
- Monjauze A., 1964.** Rénovation rurale : rôle et dispositifs d'infiltration. Délégation Générale, Dpt. Forêts, Service DRS, Alger ; 16 p.
- Monnier G. et Stengel P., 1982.** La composition granulométrique des sols un moyen de prévoir leur fertilité physique. Bulletin Technique Information 370-372 : 503-512
- Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., 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 elds and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms 23 (6) : 527-544.
- Morsli B., Habi M. (2014).** Effet du comportement hydrodynamique des sols argileux sur les risques de ruissellement et d'érosion du sol: cas des sols des montagnes méditerranéennes de Beni-Chougrane-Algérie. Revue Zeitschrift für Geomorphologie (ZFG Germany), volume 58, Numéro 4, Décembre 2014. 22p.

Morsli B., Habi M. (2013). Dynamics of erosion in the Mediterranean Algerian zone: factors explaining variations in runoff and erosion under different land uses. *Revue des Sciences de l'Eau* 26 (2) Juin 2013, pp 89-105.

Morsli B., Habi M., Mazour M., Hamoudi A. et Halitim A., 2012. Erosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du NO: analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, Vol 1 (1): 33-40.

Morsli B., 2008. Stratégie CES en Algérie. Communication orale : Atelier international sur les Indicateurs d'impact des travaux de CES et de collecte d'eau (SWC & WH impact indicators). Tunisie, 25-27/02/08. FAO/ICARDA (Tunisie).

Morsli B., Halitim A et Mazour M. (2008) - Érosion et effet des techniques culturales sur les versants semi-arides de l'Algérie (Beni Chougrane). *In : Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*. Édit. AUF-IRD-ENFI, Paris, p. 199-203.

Morsli B. et Habi M., 2007 Analyse des aménagements hydro agricoles et antiérosifs : contraintes et perspectives des retenues collinaires dans le Nord-ouest algérien. Communication orale : Journées Scientifiques inter réseaux AUF, Hanoi. Gestion intégrée des eaux et des sols - Ressources, aménagements et risques en milieux ruraux et urbains Hanoi- Vietnam, 4-9 novembre. 2007.

Morsli B., Mazour M., Medejel N., Arabi M. et Roose E., 2005. Influences of land uses, soils and cultural practices on carbon eroded and carbon stocks in soils of Mediterranean mountains of northern Algeria. In: *Soil erosion & carbon dynamics*, Roose, Lal, Feller, Barthès and Stewart edit. Boca Raton, New York Fl, USA). Edit. CRC Press. *Advances in Soil Science*, vol. 15: 103–124

Morsli B., Mazour M., Medejel N., Hamoudi A. et 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'Algérie. *Sécheresse*, 15 (1) : 96-104.

Morsli B., 1996. Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne - Cas des monts de Beni-Chougrane. Thèse de Magister INA El Harrach Alger. 170p.

Morsli B. et Malla R., 1995. Méthodologie et description de la dynamique du ravinement dans les monts de Beni chougrane. Rapport INRF. 10 p.

Morsli B., Benelouati A. et Roose. E., 1988. Erosion et aménagement conservatoire de trois micro-bassins versants dans les monts de Béni-Chougrane. Rapport, INRF-ORSTOM. 66p.

Mouffadal K., 2001. Les premiers résultats des parcelles de mesures des pertes en terre dans le bassin versant de Oued Nakhla dans le rif occidental. *Bull Réseau Erosion* 2001 ; 21 : 244 -254.

Mrabet R., Lahlou S., Le Bissonnais Y. et Duval O., 2004. Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influences des techniques culturales simplifiées. *Bull. Réseau Erosion IRD* 23,2: 405-415

- Mura R., 1992.** La restauration des terrains en montagne dans l'approche actuelle de la conservation des sols. *Bultin réseau érosion* n° 12 : 11-20.
- Mutchler C.K., Murphree C.E. and McGregor K.C., 1988.** Laboratory and field plots for soil erosion studies. In *Soil erosion research methods La1 Edit.* Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa : 9-36.
- Nearing, M.A. and Nicks, A.D., 1998.** Modelling Soil Erosion by Water. Global Environmental Change. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Ch. Evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes : 43-53.
- Nyamulinda V., 1991.** Erosion sous cultures de versants et transports solides dans les bassins de drainage des hautes terres de Ruhengeri au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion, IRD, N° 11:* 38-63
- Osburn H B., Renard K.G., 1973.** Thunderstorm runoff on the Wlanut Gulch expérimental watershed,, Arizona, USA. IAHS Publication N° 97 :455-464.
- Parsons, A. J., Wainwright, J., Abrahams, A. D., Simaton, R. J., 1997.** Distributed dynamic modelling of interrill overland ow. *Hydrological Processes* 11 : 1833-1859.
- Pihan J., 1979.** Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. In : Colloque Strasbourg. T. et J. Vogt (eds.) : 13-18.
- Plantié L., 1961.** Technique franco-algérienne des banquettes de DRS. Délégation Générale, Dept. Forêts, Service DRS d'Oran ; 22 p.
- Probst J.L., Nkounkou R.R., Krempp G., Bricquet J.P., Thiébaux J.P. and Olivry J.C., 1992.** Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangui rivers during the period 1987-1989. *J. Of Hydrolog~*, 135 : 237-257.
- Putod R., 1956.** La protection des vignes contre l'érosion. *Revue Agronomie d'Afrique du Nord* 1992 : 567-576.
- Quezel, P., 1974.** Les forêts du pourtour méditerranéen. M.A.B. UNESCO : 9-33.
- Raheliarisoa M.A., 1986.** Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la susceptibilité à l'érosion de sols limoneux et sableux sous pluies simulées. Thèse Univ. Orléans, ORSTOM – INRA ; 300p.
- Rango A. et Arnoldus H.M.J., 1987.** Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO.*
- Rémini B., 2000.** L'envasement des barrages. *Bull Réseau Erosion* 20 : 165 -171. *Revue Agron. Afrique du Nord*, 1992 : 567-576.
- Rémy JC., Le Bissonnais Y., 1998.** Comparaison des phénomènes d'érosion entre le Nord et le Sud de l'Europe : ampleur des problèmes et nature des mécanismes. *Bull Réseau Érosion* 1998 ; 18 : 15-32.

- Roose E., 1972.** Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antiérosive en région tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne. In « Les Actes des Journées d'étude du CIGR », Firenze, 12-16 Septembre 1972 : 417-441.
- Roose E., 1973.** Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire. Thèse Doct. Ing. n° 20, Abidjan, ORSTOM ; 25 p.
- Roose E., 1977.** Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en parcelles expérimentales. Travaux et Doc. ORSTOM Paris n° 78 ;108 p.
- Roose E., 1981.** Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. *Édit. ORSTOM, Paris, série Travaux et Documents, n° 130 (Thèse de Doctorat d'État, Université d'Orléans) ; 569 p.*
- Roose E., 1987 .** Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano sahéliens d'Afrique occidentale. C .R. Séminaire ICRISAT/INRAN, Niamey, Niger : 57-72 .
- Roose E., 1989.** Bilan de trois années de coopération INRF-ORSTOM sur le thème de la GCES. Bull. Réseau Erosion 9 : 13 et rapport ORSTOM Montpellier ; 25 p.
- Roose E. et Sarrailh J.M. 1989.** Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. ORSTOM Pédol.* 25(1) : 7 – 30.
- Roose E., 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES). Bull. Sols FAO, Rome, 70 ; 420 p.
- Roose E., 1996.** Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui aide au diagnostic de terrain sur les risque de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes . Bull. Réseau Erosion 16 : 87-97.
- Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M. et Morsli B., 1996.** Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole Par la GCES : synthèse des campagnes 1984-95 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cah. ORSTOM Pédologie.*, Paris, 28, 2 : 289-308.
- Roose E., Chebbani R. et Bourougaa L., 2000.** Ravinement en Algérie : typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, vol. 11 : 317-326.
- Roose E. et Sabir M., 2002.** Stratégies traditionnelles de GCES dans le bassin méditerranéen. *Bulletin du Réseau Érosion*, vol. 21 : 34-44.
- Roose E. et De Noni G., 2004.** Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive- Vers la Gestion Conserv- atoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Sécheresse*, vol. 15 (1) : 9-18.
- Roose E. et De Noni G., 2004.** Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives. *Sécheresse*, vol. 15, n° 1, : 121-129.

- Roose E., Sabir M., Arabi M., Morsli B. et Mazour M., 2012.** Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 6/2012, mis en ligne le 03 mai 2012. URL : <http://physio-geo.revues.org/2319> ; DOI : 10.4000/physio-geo.2319 : 43-69.
- USDA (United States Department of Agriculture), 1951 -** Soil survey manual. United States Department of Agriculture, Handbook, Washington 18.
- Sabir M. et Roose E., 2004.** Influence du couvert végétal et des sols sur le stock de carbone et les risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes méditerranéennes du Rif occidental, Maroc. *Bull. Réseau Erosion Montpellier* , 23 : 144-154.
- Sari D., 1977.** L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis (Algérie). Thèse doctorat. Alger : éditions SNED, 1977 ; 621 p.
- Seltzer P., 1946.** Le climat de l'Algérie. *Inst. Météor. et de Phys. du globe. Univ. Alger* ; 219 p.
- Sentis I., 2002.** Soil organic matter effectson runoff and erosion in dryland vineyards of NE Spain. Résumés des actes du Coll. Intern gestion de la Biomasse, Erosion et Séques. du Carbone, Montpellier ; p.104.
- Simonneaux V., Cheggour A., Sabir M. et Roose É. 2006.** Spatialisation de l'érosion dans le bassin versant de la Rhéraya (Haut Atlas, Maroc) Comparaison de simulation de pluies et d'exportation à l'exutoire du bassin. *In : Efficacité de la GCES en milieux semi-arides.* Édit. AUF-IRD-ENFI, Paris: 312-316.
- Sogon S., 1999.** Érosion des sols cultivés et transport des matières en suspension dans un bassin versant de Brie. Application des traceurs radioactifs naturels et magnétiques. Thèse de doctorat, Paris I Panthéon-Sorbonne ; 304 p.
- Stengel P., 1988.** Etude expérimentale de la fissuration au cours du dessèchement et de l'humectation. *In Séminaire du département de Science du sol (ed INRA.)* : 161 – 183
- Stocking M., 1978.** A dilemma for soil conservation. *AREA* 10: 306-308.
- Taabni M. et Kouti A., 1993.** Stratégies de conservation, mises en œuvre et réactions du milieu et des paysages dans l'Ouest algérien. *Bull Réseau Erosion* 1993 ; 13 : 215-29.
- Taabni M., 1998 .** Aménagement, lutte contre l'érosion des terres et pratiques paysannes dans les montagnes telliennes du nord ouest algérien. *BRE* 18. : 348 - 363.
- Takken I., Beuselinck L., Nachtergaele J., Govers G., Poesen J. and Degraer G., 1999.** Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena* 37 : 431-447.
- Talia A., 2003.** Évolution des régimes pluviométrique et hydrologique du Nord de l'Algérie. Mémoire de Magister, Université de Mascara, 2003 ; 160 p.

Terfous A., Megnounif A., Bouanani A., 2003. Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins-versants des régions méditerranéennes algériennes. IAHS Publication 2003 (278) : 366-72.

TESCULT., 2004. Etude de la protection des bassins versants des barrages de Ouizert, Bouhanifia et Fergoug. Phase description du milieu. Rapport ANB. 58p.

Tomassone R., 1987. Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire Publ. de l'Inst. Techniques des céréales et des fourrages, Paris. 55p.

Touaibia B., Dautrebande S., Dieter G. et Aïdaoui A., 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales: bassin versant de l'Oued mina. HSJ, 44(6), pp. 937-990.

Touaibia B., Gomer D. et Aïdaoui A., 2000. Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les microbassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du Nord. Bulletin Réseau Erosion 2000 ; 20 : 478-84.

Touabia B., Aïdaoui A., Gomer D. et Achite M., 2001. Quantification et variabilité de l'écoulement solide en zone semi aride, de l'Algérie du Nord. Revues des sciences hydrologiques, 46(1) : 41-53.

Touaibia B., 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Sécheresse 2010 ; 21 (1) : 1-6

Tribak A., 1988. L'érosion du pré-Rif oriental : contribution à l'étude de la dynamique actuelle dans quelques bassins du nord de Taza (Maroc) ; Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble : 258 p.

Tribak A., El Garouani A. et Abahrour M., 2008. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans un espace montagnard marocain : cas du sous-bassin versant de l'Oued Tetla (Pré-Rif oriental). In : *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*, É. ROOSE, J. ALBERGEL, G. DE NONI, A. LAOUINA et M. SABIR édit., Édit. AUF-IRD-ENFI, Paris: 339-342.

Tuan Long, P. 2008. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 195 pp.

Vallentin C., 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions sub-désertiques (Agadez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3e cycle. Université Paris VII. Edit. 1985, coll. Etudes et Thèses, ORSTOM ; 260 p.

Walling D. E., He Q. & Quine T. A., 1995. Use of caesium-137 and lead-210 as tracers in soil erosion investigations. IAHS publication 229 :163-172.

Wang G., Gertner G., Fang S. & Anderson AB., 2003. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 69: 889-898.

Wischmeier W.H., 1959. A rainfall erosivity index for a universal soil loss equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23 : 246-249.

Wischmeier W.H., 1966. Surface runoff in relation to physical and management factors. Proc. Ist Pan Am. Soil Cons. Congress Sao Paolo, Brazil. : 237-244.

Wischmeier W.H., Johnson C.B. & Cross B.U., 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J. of Soil and Water Conservation 26 (5) : 189-192.

Wischmeier W.H. & Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Handbook n° 537 ; 58 p.

Wassmer P., 1981. Recherches géomorphologiques au Rwanda. Etude de l'érosion dans la préfecture de Kibuye. These Doctorat, Univ. Strasbourg ; 156 p.

Zekri N., 2002. Analyse du facteur de l'agressivité climatique dans le Tafna, Nord ouest algérien. mémoire de Magister Univ Tlemcen Algérie 2003 ; 110 p.