

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de La Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers
Département Des Sciences d'Agronomie et des Forêts



THESE

Présentée et soutenue publiquement par :

BOUGHALEM KASMI Mostafia

le 08 octobre 2013

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en
Sciences Forestières

Thème

*Impact des systèmes de gestion sur la vulnérabilité des sols
à l'érosion; cas du bassin versant de l'Isser- Tlemcen
(Algérie)*

Devant le jury composé de:

Président :	Pr Amrani Sidi Mohamed	Université de Tlemcen
Directeur de thèse :	Pr Mazour Mohamed	Centre universitaire d'Ain Témouchent
Co- Directeur de thèse :	Pr Grecu Florina	Université de Bucarest
Examineur :	Pr Abdellaoui Abdelkader	Université de Paris 12
Examineur :	Dr Haddouche Idriss	Université de Tlemcen

Année 2012-2013

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de La Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers
Département Des Sciences d'Agronomie et des Forêts



THESE

Présentée et soutenue publiquement par :

BOUGHALEM KASMI Mostafia

le 2013

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en
Sciences Forestières

Thème

*Impact des systèmes de gestion sur la vulnérabilité des sols
à l'érosion; cas du bassin versant de l'Isser- Tlemcen
(Algérie)*

Devant le jury composé de:

Président :	Pr Amrani Sidi Mohamed	Université de Tlemcen
Directeur de thèse :	Pr Mazour Mohamed	Centre universitaire d'Ain Témouchent
Co- Directeur de thèse :	Pr Grecu Florina	Université de Bucarest
Examineur :	Pr Abdellaoui Abdelkader	Université de Paris 12
Examineur :	Dr Haddouche Idriss	Université de Tlemcen

Année 2012-2013

Nous abusons de la terre parce que nous la considérons comme une commodité qui nous appartient. Si nous la voyons comme une collectivité à laquelle nous appartenons, nous pouvons commencer à l'utiliser avec amour et respect.

- Aldo Leopold, 1949, A Land County Almanac.

Remerciements

Cette thèse constitue une expérience très enrichissante tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. C'est aussi l'aboutissement d'un travail auquel ont pris part des scientifiques algériens et roumains. J'exprime ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail et à sa mise en œuvre.

*Je tiens à exprimer en premier lieu ma vive reconnaissance à Monsieur **Mohamed Mazour**, Professeur au Centre Universitaire d'Ain Témouchent : il a accepté de diriger cette Thèse, comme il avait déjà dirigé mon Mémoire de Magister, à l'Université de Tlemcen. Il a orienté ma recherche avec patience, bel humanisme et grande sagesse !*

*Ma vive gratitude va également à Madame **Florina Grecu**, Professeur à la Faculté de Géographie de Bucarest pour avoir codirigé cette thèse. Elle m'a suivie et soutenue tout au long de ce travail. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.*

*Aucun remerciement ne saurait être à la hauteur de l'aide et du soutien que Monsieur **Abdelkader Abdellaoui**, Professeur à l'Université UPEC de Paris, m'a apportés. Merci d'avoir accepté d'être l'un des examinateurs de cette Thèse.*

*J'adresse de sincères remerciements aux personnes qui ont accepté de prendre part au jury, malgré des calendriers très chargés : Merci donc au président Pr **Sidi Mohamed Amrani** et au Dr **Idriss Haddouche**. Je leur sais sincèrement gré de leur participation et de l'effort accompli en conséquence.*

*Je remercie Monsieur **Jean-Marie Lama chère**, chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)-Maroc pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux de thèse et le temps qu'il a consacré à la lecture de mon manuscrit. Ses nombreuses relectures et corrections ont été très appréciables. Cette thèse lui doit beaucoup. Pour tout cela merci.*

*Je remercie également Monsieur **Mourad Arabi**, Directeur de la Station de Médéa-INRF pour ses encouragements et pour les rencontres fécondes au début de mes recherches.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur **Alain Feuvrier** pour ses encouragements et conseils.*

*Merci également à Madame **Leila Omri**, Bibliothécaire à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Tunis pour son accueil et sa disponibilité.*

J'associe à ces remerciements :

*Madame **Zolka Bouhafs**, Ingénieur à la circonscription forestière d'Ouled Mimoune, Monsieur **Ahmed Alioui**, Cadre au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Monsieur **Abderahmane Hamimed**, Enseignant à l'Université de Mascara, Monsieur **Boutkhil Morsli**, Directeur de la Station de Tlemcen-INRF et Madame **Sabah Touil**, Enseignante à l'Université de Constantine.*

J'adresse ma profonde sympathie à la population du village de «Ain Nekrouf » pour son hospitalité et sa collaboration. Merci aussi aux propriétaires des terres qui nous ont permis d'installer des dispositifs expérimentaux dans leurs champs.

*Une immense gratitude à **Jawad**, mon époux, et à mes filles, **Nassima** et **Yousra** : ils m'ont soutenue tout au long de cette Thèse !*

Sommaire

	Page
RESUME	7
SUMMARY	8
ملخص الرسالة	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE	10
1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	10
2. OBJECTIFS	18
3. PLAN DE L'ÉTUDE	21
PREMIERE PARTIE : L'EROSION DES SOLS EN MILIEU MEDITERRANEEN SEMI-ARIDE ET LA GESTION DES TERRES AGRICOLES	22
CHAPITRE I : DEGRADATION DES SOLS ET BAISSSE DE LA FERTILITE EN MILIEU MEDITERRANEEN SEMI-ARIDE	24
1.1. Causes et effets de la dégradation des sols en région méditerranéenne semi-aride	24
1.1.1. Causes.....	25
1.1.1.1. Causes anthropiques	25
1.1.1.2. Causes climatiques	26
- <i>Irrégularité et violence des pluies</i>	26
- <i>Température et vent</i>	26
1.1.2. Effets	28
1.1.2.1. Baisse de la fertilité des sols	28
1.1.2.2. Formation des croûtes superficielles	29
1.1.2.3. Erosion, ruissellement et infiltration	30
1.2. De la nécessité de lutter contre l'érosion des sols	30
CHAPITRE II : PROCESSUS DE DEGRADATION DES SOLS PAR L'EROSION ...	33
2.1. Les agents de l'érosion	33
2.1.1. La pluie.....	33
2.1.2. Le ruissellement	34
2.1.3. La gravité.....	36
2.2. Les processus de l'érosion hydrique sur les versants	37
- Les glissements lents	39
- Les glissements rapides	39
- Les versants moutonnés	39
- Les coulées boueuses	39
- Les glissements rotationnels en "coups de cuillère"	41
- Les formes locales	41
2.3. Le comportement du sol sous l'effet de la pluie	42

2.3.1. Les mécanismes et paramètres de la désagrégation	42
2.3.2. Mise en mouvement	44
2.3.3. Transport, sédimentation et exportation.....	45
2.4. Structure des sols et érosion	47
2.4.1. Érodibilité.....	47
- <i>La texture</i>	47
- <i>La matière organique</i>	47
- <i>Le type de cation dans le sol</i>	48
2.4.2. États de surface.....	48

CHAPITRE III : IMPACT DES SYSTEMES DE GESTION DES TERRES SUR LA DEGRADATION DES SOLS ET AMENAGEMENTS ANTI- EROSIFS 51

3.1. Influence du couvert végétal et des résidus de cultures	52
3.2. Effet des systèmes de culture	53
3.2.1. Système agro-pastoral	54
3.2.2. La jachère	54
3.2.3. Les Systèmes cultivés.....	55
- Céréaliculture traditionnelle	55
- Cultures sur billons.....	56
- Arboriculture	57
3.3. La lutte contre l'érosion	58
3.3.1. Les aménagements anti- érosifs	58
3.3.1.1. Aménagements anti-érosifs dans les ravines et les cours d'eau	58
Correction torrentielle par des gabions	58
Les aménagements en pierres sèches	58
Les seuils en terre.....	59
3.3.1.2. Aménagements de versants en milieu cultivé	60
- Amélioration de l'infiltration	60
- Travaux du sol.....	60
- Matière organique	61
- Les cordons pierreux	62
- Banquette anti-erosives	62
- La technique des terrasses	62
- Techniques culturales simplifiées	62
- La gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES).....	64

CHAPITRE IV :CHOIX D'UNE REGION, D'UN BASSIN VERSANT ET D'UN SITE D'ETUDE..... 67

4.1. Présentation de la zone d'étude	68
4.1.1. Situation géographique.....	68
4.1.2. Caractéristiques morphométriques	71
4.1.2.1. Forme du bassin	72
4.1.2.2. Paramètres de relief	73

4.1.3. Système hydrographique	78
4.1.4. Géomorphologie.....	81
- Les versants	81
- Les glacis.....	81
- Les terrasses	81
4.1.5. Géologie	81
- Les formations du quaternaire.....	82
- Les formations du plioquaternaire	82
- Le tertiaire	82
4.1.6. Pédologie.....	83
4.1.7. Les formes d'érosions rencontrées dans la zone d'étude	84
- Erosion en nappe et rigole	85
- Le ravinement.....	85
- Les ravines de suffosion	85
- Les mouvements de masse	85
- La solifluxion	85
- Les glissements de terrain	86
- Les coulées boueuses	86
- L'érosion mécanique sèche	86
4.1.8. Occupation du sol.....	86
4.1.9. Aspects socio économiques.....	88
4.1.1.0. Les caractéristiques climatiques.....	89
4.1.1.1. Précipitations irrégulières et souvent torrentielles	90
4.1.1.2. Températures	95
4.1.1.3. La synthèse bioclimatique	97
4.1.1.4. Les vents.....	100
4.1.1.5. La gelée	101
4.1.1.6. La neige	101
4.1.1.7. Le brouillard.....	101
4.1.1.8. Agressivité climatique.....	101
DEUXIEME PARTIE.....	115
CHAPITRE V : ETUDE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION.....	116
5.1. Approche méthodologique et dispositif expérimental	116
5.1.1. Etude du comportement hydrodynamique des sols.....	118
5.1.1.1. Étude de l'infiltrabilité des sols.....	121
5.1.1.2. Étude des états de surfaces	133
5.1.2. Etude quantitative de l'érosion et du ruissellement.....	140
5.1.3. Évaluation par analyse multicritères de la vulnérabilité des sols à l'érosion	152
CONCLUSION GENERALE	167
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	171
LISTE DES FIGURES	188

LISTE DES TABLEAUX.....	190
LISTE DES GRAPHIQUES	191
LISTE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES	192
LISTE DES ACRONYMES	193
ANNEXE	194

Résumé :

Les problèmes d'érosion des sols sont largement répandus dans les pays du bassin de la méditerranée (Bou Kheir et al. 2001). L'érosion hydrique est un phénomène très grave qui touche la quasi-totalité des terres agricoles du Tell algérien. Elle réduit de plus en plus les terres cultivables, diminue les capacités des réservoirs d'eau, dégrade les infrastructures et affaiblit les revenus des populations (Daoudi, 2008). Partant de ce constat, le présent travail se propose d'étudier l'impact des systèmes de gestion des terres sur leurs potentialités de production et les phénomènes de dégradation qui y sont liés. Face à l'ampleur de ces derniers et leurs manifestations, nous avons voulu pour ce travail un double objectif: i) l'analyse des systèmes de gestion des terres utilisés, l'évaluation de leur impact sur le ruissellement et les pertes en terre. ii) la réalisation d'une carte sur la vulnérabilité des sols à l'érosion.

Les travaux sont menés sur le bassin versant de l'Isser. Nous avons focalisé les analyses sur la partie amont du bassin à savoir le sous bassin versant de Sidi Ahmed Chérif. Le choix de ce micro-bassin test répond à quatre critères définis dans notre approche: la représentativité, l'homogénéité, la disponibilité des données antérieurs et enfin l'accessibilité (Daoudi, 2008). L'étude des systèmes de gestion des terres et leur rôle dans l'amélioration de la productivité agricole en zone marneuse sont présentés dans la première partie. La deuxième partie expose l'analyse des systèmes de gestion des terres et la conservation de l'eau et du sol sur les versants de l'Isser. Elle présente les caractéristiques du bassin versant (morphométriques, pédologiques, agroclimatiques, hydrologiques, socio économiques, etc.). Dans la troisième partie traitant de la vulnérabilité des sols à l'érosion, nous présentons une vue d'ensemble des dispositifs expérimentaux et des techniques utilisées pour étudier l'évolution du fonctionnement. Ce travail consiste en l'évaluation et la caractérisation de l'érosion hydrique et en la cartographie de la vulnérabilité des sols à la dégradation en abordant en particulier l'étude de l'infiltrabilité des sols, des états de surfaces, etc.

Pour cela, nous avons utilisé des données de terrain et le système d'information géographique (SIG). Les résultats obtenus mettent en évidence l'implication de l'état hydrique du sol et des systèmes de gestion sur les transferts de l'eau et les conséquences sur les pertes en sol. Des corrélations assez significatives ($R^2 = 0,76$) ont été observées entre la capacité d'infiltration et les surfaces ouvertes du sol. Il s'avère, par ailleurs, que le semis direct a l'avantage d'améliorer l'infiltrabilité des sols et d'assurer une meilleure gestion des résidus de récolte.

L'analyse multicritères de la vulnérabilité des sols à l'érosion nous a permis de sélectionner les variables significatives et de localiser les zones les plus propices au processus de l'érosion. La validation du modèle est réalisée à l'aide des résultats obtenus sur le terrain. La synthèse de cette approche est illustrée sous forme d'une carte de vulnérabilité mettant en évidence trois grandes régions de vulnérabilités hétérogènes.

Mots- clés : Erosion, vulnérabilité, systèmes de gestion, bassin versant de l'Isser.

Summary:

The problems of soil erosion are largely widespread in the countries of the Mediterranean basin (Bou Kheir et al. 2001). The process of erosion is a complex phenomenon with disastrous consequences. It particularly affects northern Algeria, decreasing the potentialities of the water tanks, reducing cultivable lands availability and degrading infrastructures (Daoudi, 2008). Therefore, this work studies the impact of management systems on soil vulnerability to erosion. The objective of this thesis is twofold: i) to analyze systems of land management used in Sidi Ahmed Sharif, assess their impact on runoff and soil loss. ii) produce a map of soil vulnerability to erosion by integrating field data, various thematic maps and satellite imagery through a GIS solution.

Works are undertaken on the catchment area of the Isser River. We focused the applications on the upstream part of the basin : under-basin slope « Sidi Ahmed Sharif ». The choice of these test area answer to four criteria defined in our method : the representativeness, the homogeneity, the availability of former data and, finally, the accessibility (Daoudi, 2008). We used field data and a geographic information system (GIS). The results of the evaluation of erosion and the extent of infiltration highlight the effects of soil water status and management systems on the transfer of water and the effects on sediment transport. Significant correlations ($R^2 = 0.76$) were observed between infiltration capacity and opened surface of the soil. It turns out, moreover, that the system of tillage improves soil infiltrability, as well as the provision of materials or crop residues.

Multi-criteria analysis of the vulnerability of soil erosion has allowed us to select the significant variables and locate areas most conducive to the process of erosion. The validation of the model is carried out using the results on the ground. The synthesis of this approach is illustrated in the form of a vulnerability map highlighting three major regions of heterogeneous vulnerabilities.

Keywords: Erosion, vulnerability, management systems, the Isser watershed.

ملخص:

تعد مشاكل تعرية التربة أكثر انتشارا في بلدان حوض البحر الأبيض المتوسط (Bou Kheir et al. 2001) ، يعتبر عامل انجراف التربة مظهرا مركبا نظرا لنتائج الوخيمة، يمس بالخصوص الشمال الجزائري حيث يقلل من إمكانات الخزانات المائية، يقلص شيئا فشيئا المساحات الزراعية و يعمل على تدهور الهياكل القاعدية (Daoudi, 2008) . انطلاقا من هذه المعايير يهتم هذا العمل بتحليل و تنبؤ تعرية الأراضي باستعمال مقارنة احتمالية اعتمادا على معطيات متعددة المصادر قصد الوقوف على إبعاد و خطورة هذا المظهر. هدف هذا العمل هو ذو شقين: الأول لتحليل نظم إدارة الأراضي المستخدمة و تقييم تأثيرها على الجريان السطحي و خسائر الأرض. الهدف الثاني هو إنتاج خريطة تعرض التربة للتعرية و ذلك عن طريق دمج البيانات الميدانية و الخرائط الموضوعية المختلفة و صور الأقمار الصناعية.

اقتصر مجال الدراسة و البحث على الحوض التجميحي لواد يسر، مركزين في تطبيقاتنا على القسم العلوي للحوض "سيدي أحمد الشريف". اختيارنا لهذه المنطقة التجريبية يتركز على أربعة خصائص تم اعتمادها في الطريقة: المقارنة التمثيلية، التجانس، توفر المعطيات و أخيرا سهولة الوصول (Daoudi, 2008).

دراسة نظم إدارة الأراضي و دورها في تحسين الإنتاجية الفلاحية تم عرضها في الجزء الأول. الجزء الثاني تم فيه تحليل نظم إدارة الأراضي و الحفاظ على الماء و التربة في الحوض التجميحي لواد يسر و تقديم الخصائص المتعلقة بالحوض (الفيزيوجرافية، المورفومترية، الهيدرولوجية، الاجتماعية، الاقتصادية...) أما الجزء الثالث الخاص بدراسة حساسية الأراضي للتعرية يتعلق بالوسائل و الطرق المتخذة لدراسة تدهور الأراضي و المياه. النتائج المتحصل عليها سمحت لنا بتحديد العوامل المسببة لانجراف التربة من جهة و ترتيب تأثير هذه العوامل من جهة ثانية و بالتالي تعيين المناطق المعرضة للتعرية.

تم التحقق من صحة النموذج باستخدام النتائج المتحصل عليها على أرض الواقع و يتضح تركيب هذا النهج في شكل خريطة توضح قابلية تسليط الضوء على ثلاث مناطق رئيسية حساسة للانجراف غير متجانسة.

كلمات مفتاحية : تآكل التربة، الحساسية، نظم الإدارة، الحوض التجميحي لواد يسر

INTRODUCTION

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Le sol est un milieu vivant. C'est le siège des processus biologiques vitaux pour la continuité de la vie en milieu terrestre. Il constitue, en effet, les fondements de la quasi totalité de notre alimentation et de nos ressources forestières. Or, l'érosion façonne la terre depuis qu'elle est émergée...Et depuis plus de sept millénaires, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des pluies et du ruissellement (Lowdermilk, 1953). Mais les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20^{ème} siècle ; d'abord en Allemagne, puis 40 ans plus tard, aux états Unis d'Amérique, à l'époque de la grande crise économique (Roose, 1999 in Roose 1994).

Ce n'est que dans les années 1950, après le Congrès de Madison de l'Association Internationale de Science du Sol, que les méthodes américaines de mesure du ruissellement et de l'érosion sur petites parcelles se sont répandues en Afrique francophone (Fournier, 1960) et anglophone (Hudson, 1973 in Roose 1994), puis en Amérique latine, et plus récemment, en Asie et en Europe.

L'Amérique avait donc 20 ans d'avance sur le reste du monde pour collecter des données et développer un premier modèle empirique de prévision des pertes en terre à l'échelle de la parcelle « USLE » (Universal Soil Loss Equation) de W.H. Wischmeier et D.D. Smith (Wischmeier et Smith, 1960 à 1978 in Roose 1994).

Mais le modèle USLE ne satisfait pas toujours ceux qui recherchent des modèles physiques basés sur les processus élémentaires d'érosion tout en s'appuyant, non pas sur des valeurs moyennes sur 20 ans, mais sur les événements au cours de chaque averse élémentaire (Roose, 1999 in Roose 1994). Dans ce modèle, n'interviennent que l'inclinaison de la pente (entre 2 et 25 %) et secondairement sa longueur ($L^{0,5}$). Or il existe de multiples interactions entre l'influence de la pente, la forme (convexe ou concave), l'état de la surface du sol et la position topographique (Heusch, 1970 in Roose 1994). Malgré ses imperfections, ce modèle reste cependant le seul suffisamment calibré pour être appliqué dans un grand nombre de pays où le ruissellement est lié à la dégradation de la surface du sol.

Le problème de perte des terres agricoles par l'érosion hydrique ne cesse de s'amplifier et de retenir l'attention des aménagistes, chercheurs et planificateurs qui se posent encore des questions sur les solutions susceptibles de juguler aux mieux ce fléau. La qualité des sols s'est fortement dégradée à l'échelle de la planète, particulièrement dans les pays touchés par la désertification, la sécheresse et l'érosion des terres : durant les 40 dernières années, la terre a perdu près du tiers de terres arables. Plus de 10 millions d'hectares disparaissent chaque année (Mathieu, 2001).

L'érosion des sols est largement répandue dans les pays du bassin de la Méditerranée (Bou Kheir et al. 2001) et constitue un aspect majeur de la dégradation des paysages. Le climat, avec les variations spatio-temporelles brusques des précipitations et des écoulements, l'action

du gel et du dégel (Touaibia, 2010), le pouvoir évaporant du sirocco, en est le premier responsable ; l'action anthropique accentue cette influence.

Après une longue phase de description des processus d'érosion, de leurs relations avec le mode d'utilisation des terres et la fragilité des sols, d'analyse fréquentielle des pluies en relation avec la rupture fréquente des ouvrages de petite hydraulique, les chercheurs ont lancé des études de quantification de l'érosion à diverses échelles, des parcelles d'une centaine de m² ou des micro-bassins de quelques hectares, à de grands bassins versants de milliers de km². L'ambition était de vérifier, dans les conditions des montagnes méditerranéennes, où il fallait commencer pour optimiser la lutte antiérosive. En effet, les techniques traditionnelles mises au point au cours des siècles par les paysans étaient supposées a priori moins efficaces que les techniques modernes de terrassements mécanisées développées par la société occidentale (Roose et al. 2012).

Contrairement à l'opinion générale, les sols méditerranéens ne sont pas plus fragiles que les autres, mais ils ont tendance à se dégrader rapidement dès qu'on les dénude (labour) et qu'on les prive d'un apport régulier de litière. Les sols ferrallitiques résiduels sont généralement assez résistants. Les lithosols caillouteux, très fréquents en montagne, sont très résistants mais peu fertiles. Les vertisols calciques sont les plus résistants à l'érosion en nappe mais ils sont sensibles aux glissements et aux ravinements. Par contre, les vertisols sodiques des plaines arides sont très sensibles à la battance des pluies. Les sols bruns calcaires sont d'autant plus résistants qu'ils ont une charge importante en cailloux (calcaire) et une forte teneur en argiles saturées en calcium. Enfin, les sols rouges fersiallitiques méditerranéens lessivés sont généralement assez fragiles car pauvres en matières organiques (Blavet *et al.*, 2004 in Roose et al, 2012).

L'amélioration de la résistance d'un sol à l'érosion pluviale est difficile, car l'augmentation de 1 % du taux de matière organique (MO) de l'horizon labouré exige l'apport régulier de 5 t/ha de fumier (rarement disponible) pour compenser les pertes par minéralisation, très fortes en milieux chauds, et ne réduit que de 15 % les risques d'érosion des terres (Roose et Sarrailh, 1989).

Les terres agricoles en milieux semi-arides de l'Afrique souffrent aujourd'hui d'une crise environnementale, dont l'érosion hydrique constitue la manifestation la plus spectaculaire (Attia, 1977 ; Hamza, 1988 ; Amirèche, 1994 ; Laouina, 1995 ; Kouri *et al.*, 1997 ; Tribak, 1997 ; EL Abbassi, 1999 ; Sadiki *et al.* 2004 ; Bouchetata et Bouchetata, 2006 ; Gauche, 2006 ; Bannari *et al.* 2007). L'érosion en nappe est un moteur très efficace de l'appauvrissement en particules fines et en nutriments de l'horizon superficiel de nombreux sols argilo-sableux (Roose, 1981, 1994). Ainsi, près d'Abidjan, quand on défriche une forêt ($E = 50$ kg/ha/an) pour développer une culture de maïs ($E = 90$ t/ha/an) sur une pente de 7 %, les pertes annuelles en nutriments passent de 14 à 1866 kg pour le carbone, de 1,5 à 185 kg pour l'azote, de 0,1 à 33 kg pour le phosphore, de 0,8 à 70 kg pour le calcium, de 0,3 à 3 kg pour le magnésium et de 0,6 à 54 kg/ha/an pour le potassium. À ces pertes considérables, il faut encore ajouter les pertes de nutriments en solution dans les eaux de drainage : cela explique que les sols concernés sont généralement très acides.

Ces problèmes ont déjà attiré l'attention de plusieurs géomorphologues (Raynal, 1957 ; Eck et Mathieu, 1963 ; Capolini, 1968 ; Sari, 1977 ; Bellatreche, 1987 ; Kouri, 1993 ; Belaid, 1965 ; Heusch, 1970). Un réseau de parcelles de taille et de mode de gestion standardisés a été mis en place pour estimer les paramètres des modèles empiriques disponibles (Roose, 1977). Parmi ces modèles, le modèle USLE de W.H. Wischmeier et Smith (1978) a été le plus largement utilisé. D'après ce modèle empirique basé sur plus de 10000 résultats annuels de mesures en parcelles et petits bassins versants aux USA, le risque d'érosion moyenne en nappe sur un versant donné est une fonction multiplicative de cinq sous-modèles : l'érosivité des pluies et quatre facteurs de résistance du milieu (l'érodibilité du sol, un facteur topographique, le couvert végétal et les pratiques culturales antiérosives). La source d'énergie érosive est calculée à partir de la hauteur et de l'intensité des pluies durant toutes les averses, mais sans compensation pour l'énergie du ruissellement (ravinement), ni pour l'énergie de masse (glissement) (Roose et al., 2012).

L'analyse de l'évolution des recherches sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb montre que de 1945 à 1970, on observe principalement l'importance des dégâts d'érosion : dégradation de la productivité des terres, ravinement, glissements de terrains, ensablement des barrages et inondations. Peu de recherches sont menées, mais il est appliqué des techniques de lutte mécaniques (banquettes, seuils) et biologiques (mises en défens et reforestation à l'amont des barrages) utilisées aux USA et en France. Des géographes (J.M. Avenard, 1990) régionalisent les traces des processus d'érosion et en tirent la répartition des risques futurs (Roose et al., 2012).

De 1965 à 1985, l'érosion est quantifiée. En Tunisie, l'équipe de Cormary et Masson (1964) évalue les facteurs de l'érosion en nappe (USLE) à l'aide d'un simulateur de pluies. Floret & Pontanie (1982) ; Delhoume (1987) ; Delhumeau (1981) étudient les processus d'érosion sous des climats arides, semi-arides et subhumides. Au Maroc, l'équipe de B. Heusch (1986) démontre sur parcelles et bassins versants i) que l'érosion en nappe est moins importante que le ravinement et l'ablation par les rivières, ii) que la pente a moins d'effet que la position topographique et iii) que les averses exceptionnelles saturantes ont un rôle majeur sur les transports solides. En Algérie, A. Demmak trouve que les transports solides des oueds dépendent surtout de la superficie des affleurements de roches argileuses, de marnes et de schistes tendres dans les bassins versants (Roose et al., 2012).

Depuis 1985, une équipe de l'INRF et de l'IRD a réalisé, en Algérie, des enquêtes sur l'efficacité de la "défense et restauration des sols" (DRS), développé des agro-systèmes intensifs couvrant mieux le sol et valorisant mieux la terre et le travail, aménagé des ravines développant ainsi des techniques de "gestion et conservation des eaux et des sols" (GCES). Au Maroc, les équipes de géographes ont analysé les problèmes d'érosion au niveau régional. Les équipes de l'ENFI, de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Rabat et de l'IRD ont décrit trente systèmes traditionnels de gestion de l'eau et de la fertilité des sols sur les massifs du Rif et des Atlas (2011). L'IRD et la Faculté des Sciences Appliquées de Marrakech ont mis au point une méthodologie (télédétection, simulation de pluies sur 1 m², indicateurs

des états de surface et SIG) pour spatialiser les risques d'érosion sur un bassin montagnard de 270 km² et pour orienter la priorité des aménagements (Roose et *al.*, 2012).

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. En Tunisie, J. Dumas (1965) a utilisé un simulateur de pluies arrosant 50 m² avec des intensités très fortes, ce qui a posé des problèmes d'interprétation sur l'érodibilité des sols. R. Kalman (1967) a étudié le facteur climatique modifiant l'érosion en nappe et rigoles sur les principaux sols cultivés du Maroc. Il a développé un simulateur de pluies projetant les gouttes vers 5 m de haut, ce qui les rendait sensibles au vent. Enfin, une équipe de pédologues et hydrologues de l'ORSTOM a utilisé, en Tunisie et en Algérie, le simulateur de pluies mis au point par J. Asseline et C. Velenti (1978) : il s'agit d'un gicleur porté par un derrick de 4 m de haut et sélectionné par Meyer aux USA pour simuler des intensités de 30 à 120 mm/heure sur 10 m² dont on ne mesure au sol que la partie centrale de 1 m². Il permet de tester des pluies de fréquence rare, mais consomme beaucoup d'eau (> 600 litres par essai), de manipulateurs et de temps (Roose et *al.*, 2012).

Pour réduire les exigences en eau (ramenées à 60 litres pour un test) et simplifier les manipulations, un infiltromètre manuel à aspersion est finalement développé au Maroc pour tester des surfaces très pentues dans la montagne et les zones semi-arides (Roose, 1996 ; V. Simonneaux et *al.*, 2008). Ces deux infiltromètres permettent une bonne évaluation de la dynamique du ruissellement et de sa charge solide en fonction de la stabilité structurale et du couvert végétal à la surface du sol, ainsi que des techniques culturales. Dans les basses montagnes méditerranéennes, souvent convexes puis concaves, l'érosion en ravines domine largement l'érosion en nappe. Les recherches pour quantifier le ravinement sont bien moins nombreuses, alors que les paysages sont souvent lacérés par le ruissellement concentré (Roose et *al.*, 2012).

En Tunisie, J. Collinet et P. Zante (2002) ont comparé des nivellements au tachéomètre laser tous les deux ans pour évaluer la contribution des ravines au comblement d'un barrage collinaire. En année moyenne (P = 300 mm), la ravine a produit 42 t/ha de sédiments provenant de la dégradation des berges et du "piping", mais ces sédiments se sont déposés sur le versant (cône de sédiments) avant d'atteindre le barrage. Plus récemment, V. Chaplot et al. (2004), J. Albergel et al. (2008), A. Ben Slimane (2011) en Tunisie semi-aride, ont confirmé que le ravinement produit nettement plus d'érosion à l'hectare que l'érosion en nappe. Toutefois, comme cette dernière touche des surfaces beaucoup plus grandes, c'est l'érosion en nappe qui apporte finalement le plus de sédiments au barrage. Il faudrait confirmer ces résultats au cours d'années très humides où le ravinement est plus actif (Roose et *al.*, 2012).

Au Maroc, dans les marnes du Pré-Rif, Heusch (1970) avait attiré l'attention sur la contribution des divers types d'érosion en fonction de l'abondance des pluies : le ravinement et les glissements de terrain dominant largement en années excédentaires ou lors d'averses exceptionnelles, tandis que l'érosion en nappe répartie sur la majorité des surfaces des bassins méditerranéens l'emporte lors des années moyennes ou sèches. En année ordinaire, les ravines évoluent sur place (comblement du fond) ou semblent souvent endormies jusqu'à ce qu'un

événement pluvial surabondant balaie les sédiments accumulés (effet de chasse). Dans le Rif occidental, Naimi et al. (2001) ont suivi l'incision des ravines à l'aide de relevés topographiques dans un petit bassin de 5 ha. Parmi les facteurs du ravinement, la stabilité structurale et surtout le % de pente expliquent le mieux la variabilité des pertes par ravinement. Le ravinement dans le bassin du Nakhla est une source majeure de sédiments (36 t/ha en 6 mois), alors que l'érosion en nappe est estimée à 1,3 t/ha/an sur des parcelles expérimentales (Moufaddal, 2002 ; A. Tribak, 1998 in Roose et al, 2012).

LE CAS DE L'ALGERIE

Depuis le début du siècle, la région montagneuse septentrionale de l'Algérie est soumise à de fortes pressions en homme et en bétail qui ont contribué à une sévère dégradation des sols, de la couverture végétale et des rivières (Roose, 1993). Les montagnes s'étendent sur une superficie de 75 000 km² dont les deux tiers sont situés à plus de 800 m, et le quart présente des pentes supérieures à 25 %. La lithologie y est souvent constituée de roches tendres (notamment schistes et argiles) sensibles à l'érosion. Le climat très irrégulier alterne années sèches et humides, avec des pluies souvent intenses et dévastatrices (Remini et al., 2009).

Les pluies torrentielles sont fréquentes en automne, au moment où la couverture végétale est absente. Des intensités, dépassant 45 mm/h ont été observées, provoquant des crues violentes, rapides et chargées, ayant des répercussions directes, tant à l'amont par des pertes de sol et des ravinements qu'à l'aval par des inondations, des dépôts de sédiments (routes, autoroutes, barrages, plages, etc.), des pertes matérielles et de vies humaines (Touaibia, 2010).

La lame d'eau, en mouvement le long des versants, se divise progressivement en filets d'eau. Concentrée, cette dernière déploie une force lui permettant d'arracher les obstacles, augmentant ainsi la faculté d'érosion qui se voit amplifiée avec l'épaisseur de la lame d'eau ruisselée, la longueur et la pente du versant. Cet état de fait est illustré par l'exemple frappant des inondations de Bab El-Oued (Alger) en novembre 2001 où plus d'un millier de personnes ont péri, ensevelies dans la boue. Sur 2,6 millions de mètres cubes ruisselés, un volume de 800 000 m³ de sédiments arrachés au bassin a transité via l'écoulement pour se déposer dans les parties basses de la ville et atteindre plus de 3 m de hauteur par endroits (ANRH, 2001).

Les facteurs anthropiques ont participé de façon remarquable à la dégradation des sols par les incendies, les défrichements, le morcellement du foncier, le surpâturage..., livrant les bassins-versants au ruissellement. D'après une étude faite par Avias (1997 in Touaibia, 2010), lorsque 800 moutons passent dans un champ un jour de pluie, il ne reste plus d'herbe, ni même de racines d'herbes et si la pente est suffisante, il se déclenche une érosion par ruissellement et par ravineaux et ravins dont certains peuvent dépasser 1 m de profondeur.

D'après Chebbani, (1996), le phénomène d'érosion touche 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares et a pour cause principale la pression exercée sur la couverture végétale (surpâturage, incendie, pratique culturales inadaptées, etc.). Ce phénomène est encore plus grave lorsque l'on sait que 85% des surfaces cultivables soit 6 million d'hectares sont situées

dans les zones les plus sensibles à l'érosion. Il est à l'origine du décapage des profils pédologiques, du transfert de sédiments, mais aussi d'une perte d'eau, de carbone et de nutriments pour les cultures : il accélère la dégradation de la fertilité des sols cultivés, aggrave l'envasement des réservoirs d'eau, et dégrade les infrastructures (routes, pistes et ports en aval). De plus, les sédiments qui quittent une parcelle sont généralement plus riches que le sol en argiles et limons fins, en matières organiques et en nutriments associés. (Mazour, 2004 ; Daoudi, 2008).

Ce processus est de plus en plus accentué par le climat méditerranéen de régime pluviométrique orageux dans cette région. Avec une quantité moyenne annuelle de sédiments érodés estimés à plus de 120 millions de tonnes transportés par les principaux cours d'eau, l'Algérie se classe parmi les pays les plus érodables du monde (Demmak, 1982).

Les ressources en eau sont faibles, irrégulières et localisées dans la bande côtière. Il existe une plus grande disponibilité hydrique dans l'Est 28,15 % (Soummam- Constantinois- Annaba) que dans l'Ouest 14,20 % (Oranie- Chélif) (Bouchetata, 2006). Les eaux superficielles représentent en moyenne plus de 87% des eaux mobilisables. Elles sont annuellement renouvelables au rythme des pluies. Or, ces eaux sont stockées dans des barrages situés en aval des cours d'eaux qui drainent les pluies des bassins versants.

La centaine de barrages existant ne mobilise que 4 500 millions m³. Une quantité élevée de matériaux solides est transportée annuellement par les cours d'eau jusqu'aux réservoirs des barrages. Le taux d'érosion dépasse 2000 t/km/an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Télien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser). Il atteint 4000 t/km/an sur la chaîne côtière de Dahra, et 5000 t/km/an sur le bassin très dégradé de l'Oued Agrioum (Megueni & Remini, 2008 ; Remini, 2003).

Tout ce matériel érodé est transporté plus ou moins rapidement jusqu'aux cours d'eau. Il comprend des particules fines en suspension, des sédiments grossiers charriés, et de la matière dissoute. Les sédiments déposés dans les réservoirs des barrages causent un manque annuel estimé à 20 millions m³ (Remini, 2003). Ainsi la capacité utile est progressivement réduite mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate, qui, bien souvent exige que la retenue soit hors de service, ce qui est particulièrement impossible dans les pays arides et semi- arides (Remini, 2000). Le dépôt de sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation pose le problème de comblement du réseau (des canaux) d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage.

Sur le bassin d'alimentation, le transport solide provoque un colmatage superficiel des sols (sols lourds) et augmente le ruissellement aux dépens de l'infiltration. L'érosion va contribuer au changement progressif du relief, en accentuant les pentes, en provoquant des ravinements intenses et en accélérant la formation du réseau hydrographique au profit des surfaces arables. L'envasement des barrages, l'affouillement et le comblement des lits d'oued sont spectaculaires en Algérie. La vitesse de colmatage des ouvrages d'art est variable d'un barrage à un autre selon la force de l'érosion et de la lame ruisselée alors que la durée de vie d'un barrage est estimée à une trentaine d'années (Kadik, 1987).

La prévention et la lutte contre l'érosion est devenue une préoccupation prioritaire pour de nombreux chercheurs algériens (Arabi, 1991 ; Ramdane, 1989 ; Bellatrache, 1987 ; Sari, 1977 ; Demmak, 1982 ; Kouri, 1993 ; Ramdane, 1993 ; Daoudi et al., 1994 ; Gomer, 1994 ; Chaatal, 1996 ; Roose et al., 2000 ; Bouanani, 2004 ; Mazour, 2004) (in Daoudi, 2008) et les gestionnaires de plusieurs organismes nationaux dont l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques « ANRH », l'Agence Nationale des Barrages « ANB », le Bureau National des Etudes et de Développement rural « BNEDER », l'Institut National des Recherches Forestières « INRF » et l'Office National des forêts « ONF » (SODITEG, 1975 ; BNEDER, 1981 ; Projet MED, 1993 ; GTZ, 1996 et ANB, 1997) (in Daoudi, 2008).

Ainsi, les zones marneuses de l'atlas tellien ont déjà fait l'objet de plusieurs recherches. Heusch montre qu'au cours de la période 1947-1968, les banquettes n'ont eu aucune influence sur la vitesse d'envasement de la retenue du barrage de l'oued Fodda, à l'ouest algérien. Alors que les superficies traitées en DRS finissent par couvrir 20 % de la superficie du bassin versant, le rythme de comblement de la retenue reste malheureusement toujours aussi soutenu. Dans une étude géomorphologique et morphométrique sur le bassin versant de l'Oued Fodda et de l'Oued Rhiou, Capolini (1968, in Daoudi, 2008) montre la relation entre l'érosion et transport solide ; il précise qu'il existe une bonne corrélation entre la torrencialité du bassin versant et la géomorphologie. Sari (1977, in Daoudi, 2008) constate que l'érosion est due pour l'essentiel à l'agriculture de subsistance des paysans de montagne et se demande comment cette subsistance peut être garantie à la longue, et comment la protection des sols peut être atteinte par le boisement. Il conclut logiquement que l'exploitation des sols telle qu'elle se pratique n'est pas compatible avec leur protection. Les travaux de Demmak (1982 in Daoudi, 2008), montrent que la construction des banquettes anti érosives et le boisement de grandes surfaces, pratiqués alors dans toute l'Algérie ont non seulement été un échec, mais ont aussi gêné l'agriculture et sont dangereux car ils peuvent accélérer le phénomène d'érosion. L'existence d'une relation étroite entre le type d'érosion, le transport des sédiments et la lithologie a été mise en évidence.

Par ailleurs, Bellatrache (1987, in Daoudi, 2008) a effectué une approche par cartographie géomorphologique : une carte détaillée d'érosion a été réalisée sur les bassins sédimentaires de Médéa- Beni Slimane, ce qui a permis de présenter une perspective de conservation des sols par la mise en place d'une stratégie de protection du milieu physique.

Dans son étude de quantification de l'érosion des sols de montagne (sur parcelle), Arabi (1991) montre la faiblesse de l'érosion en nappe ; les valeurs restent inférieures au seuil de tolérance ; ces résultats sont confirmés par Heusch (1970, in Daoudi, 2008) au Maroc, Clauzon et Vaudour (1971, in Daoudi, 2008) en France (Aix en Provence), Kuidri et al (1989); Mazour (1992) en Algérie. Kouri (1993, in Daoudi, 2008) étudie l'évolution des ravines dans une zone pilote dans l'ouest algérien et décrit les processus d'érosion observables. Il établit, par analyse statistique, une typologie des ravines suivant la lithologie, la pente, l'exposition et la morphologie. Cinq types de ravine ont été obtenus par classification, ce qui permet d'appréhender et d'évaluer qualitativement les formes d'érosion dominantes au moyen des facteurs explicatifs. D'autre part, Gomer (1994, in Daoudi, 2008) dans une démarche quasi physique, élabore un model combiné avec un

système d'information géographique pour décrire l'écoulement et l'érosion des sols dans des petits bassins marneux en climat semi aride méditerranéen.

A partir des années 1970, plusieurs études ont été menées sur les bassins versants de l'Oued Tafna (C R S, 1970 ; Mazour, 1992 ; Mazour, 2001 ; Mazour et Benmansour, 2002 ; Terfous, 2003 ; Zekri, 2003 ; Bouanani, 2004 ; Mazour, 2004 ; Chebbani, 1996 ; Boughalem, 2007 ; Mazour et al., 2008 ; Boughalem et al., 2012). L'étude du Centre de Recherche de Catalane (Italie) (CRS, 1972) a proposé des aménagements de lutte antiérosive devant prévenir l'envasement rapide du barrage Izdihar de Sidi Abdelli. Une superficie de 159536 hectares est traitée durant les années de 1976 et 1986 à travers le bassin versant de l'Oued Isser à l'amont du barrage par des ouvrages anti-érosifs de type seuils en terre, seuils en gabion et des levés d'ados sur versant ainsi que la diversification des cultures (Mazour, 2004).

LE BASSIN DE L'ISSER

Le bassin versant (BV) de l'Isser, affluent rive droite de la Tafna est particulièrement confronté au problème de dégradation des sols, notamment par l'érosion hydrique. Différents facteurs contribuent à accroître les risques d'érosion. En premier lieu, cet espace géographique étant situé en région méditerranéenne, les averses sont abondantes et violentes, ce qui peut être à l'origine de forts ruissellements induisant l'érosion hydrique des sols. De plus, ceux-ci sont en général peu épais, pauvres en matière organique et développés sur de fortes pentes qui ne résistent que faiblement à l'érosion. Par ailleurs, la croissance démographique, l'évolution de l'usage des sols et des systèmes de culture fournissent des arguments complémentaires pour expliquer l'augmentation des effets du ruissellement et de l'érosion (Boughalem, 2007).

Les enjeux sont de protéger les populations et les infrastructures principalement menacées par l'envasement rapide des réservoirs d'eau et les pertes en surfaces cultivables.

La vocation essentiellement agricole du bassin en étude exige ainsi de considérer avec la plus grande attention le problème d'envasement des barrages et retenues, ses causes et ses apports.

Notre thématique de recherche rentre dans ce cadre. Pour préserver la fonctionnalité des retenues, il est possible soit de stopper les sédiments dans les bassins versants à l'amont des retenues en adoptant des systèmes de gestion des terre confiants, soit d'installer des pièges à sédiments à l'aval des zones en érosion (Rey, 2002 in Daoudi, 2008).

Aujourd'hui, la dégradation des sols caractérisée par une baisse de fertilité et conséquemment de celle des rendements des cultures, est devenue une contrainte majeure dans tous les écosystèmes et une préoccupation aussi bien des paysans que des autorités. Morsli et al., 2004 notent que toute opération culturale induit une modification de l'état structural du sol et de l'infiltration et par conséquent une diminution ou une augmentation du ruissellement et de l'érosion. Le système de culture, défini comme la succession des cultures sur une parcelle et des techniques culturales qui leur sont appliquées, est le facteur important où l'homme peut intervenir pour modifier la résistance des sols à l'agressivité de l'érosion hydrique.

2. NOS OBJECTIFS DE RECHERCHES

Dès lors, notre recherche sur l'érosion des sols au niveau des versants marneux de l'Isser a pour objectifs :

- i) d'analyser les systèmes de gestion des terres utilisées à Sidi Ahmed chérif et évaluer leur impact sur le ruissellement et les pertes en terre et donc connaître leur influence sur la vulnérabilité et le devenir du sol face aux événements érosifs. Ceci afin de pouvoir proposer des améliorations dans le but d'immobiliser les sédiments dans les bassins versants à l'amont des retenues.
- ii) réaliser une carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion à partir de l'intégration de données terrain, des cartes thématiques diverses et de l'imagerie satellitaire à travers une solution SIG.

Les travaux sont menés et appliqués sur le bassin versant de l'Isser, caractérisé par un haut potentiel de production céréalière. Ce bassin fait partie de la région montagneuse septentrionale de l'Algérie fortement affectée par l'érosion hydrique. C'est un espace fragilisé par les épisodes de sécheresse et caractérisé par des affleurements de marnes et d'argiles très fragiles. Le phénomène érosif dans cette zone, constitue l'agent principal de la dégradation du patrimoine sol.

Cette entité hydrographique est caractérisée par trois zones distinctes :

Au nord, une zone de collines à pente douce (15 à 30%), est constituée par des marnes miocènes (Station de Hériz et A Chérif sur sol brun calcaires à caractère vertique) où sont comparés différents systèmes de gestion : jachères pâturées ou en défens, cultures de blé en traditionnel ou en intensif, culture de légumineuses, vesce avoine, etc.

La zone médiane du bassin correspond aux plaines où les pentes sont douces <10%. C'est le siège des particules charriées par l'oued.

Au sud, le relief montagneux escarpé et fortement disséqué, ayant souvent de fortes pentes (> 30%) et un réseau de drainage dense, comprend des calcaires jurassiques (Madjoudj sur sol brun calcaire sur roche calcaire) et des terrains gréseux du jurassique (Gourari sur sol rouge fersialitique).

Le système de production actuel à Sidi Abdelli (région nord du bassin) repose principalement sur une céréaliculture, associée souvent à l'élevage ovin et caprin sur les terres de parcours, destinées à assurer l'autosuffisance céréalière des paysans. Ce mode de gestion des terres n'est, malheureusement ni viable au plan économique ni au plan écologique. Les rendements sont faibles et souvent égaux ou inférieurs à 20 quintaux/ha sur des sols pauvres en nutriments (Mazour, 2004). La faible productivité de la culture céréalière est accompagnée d'un labour généralement dans le sens de la pente pour des raisons de facilité et de sécurité. Ce système s'est développé à une époque où la disponibilité de terre n'était pas le principal facteur limitant la production, ce qui explique son caractère extensif plutôt qu'intensif. Or l'augmentation

rapide de la population et l'utilisation de tracteurs de plus en plus puissants favorisent le défrichement des terres même sur les fortes pentes.

La culture des céréales protège efficacement le sol pendant cinq à six mois, de mars à août sachant que la réduction sensible de l'érosivité des pluies sur les sols est nettement observable à partir d'un couvert végétal supérieur à 30 % (Mabit et *al.*, 2002). Mais, juste après le semis en hiver, celle-ci n'est pas assez couvrante pour protéger efficacement le sol contre une dégradation de sa structure sous l'impact des gouttes de pluies. Mazour, (2004) affirme que les principaux problèmes érosifs découlent des pratiques culturales associées à cette culture.

Le bassin versant de l'Oued Isser constitue un lieu d'étude d'intérêt particulier en raison des ses caractéristiques physico-climatiques représentatifs de la zone telliennes méditerranéenne. Ses caractéristiques naturelles ont fait de cette région une des zones à risque érosif très fort. C'est un site instrumenté par l'université de Tlemcen et doit servir de site pilote pour mieux comprendre les phénomènes d'érosion, grâce à l'acquisition de données hydrologiques in situ. Il est au centre d'une étude multidisciplinaire intégrée pour comprendre les phénomènes associés à l'érosion.

Cette région a été étudiée sous plusieurs angles géomorphologiques, climatiques et morphopédologiques par plusieurs auteurs (Zekri, 2003 ; Chebbani, 1970 ; Mazour, 1992 ; Mazour, 2001 ; Mazour et Benmansour, 2002 ; Terfous, 2003 ; Bouanani, 2004 ; Mazour, 2004 ; Chebbani, 1996 ; Boughalem, 2007 ; Mazour et *al.*, 2008 ; Boughalem et *al.*, 2012).

Il est à souligner que la même entité hydrographique a fait l'objet d'une thèse de doctorat, soutenu en 2004 à l'Université de Tlemcen par M. Mazour. Cette dernière, intitulée « Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser- Tlemcen », a constitué les tous premiers pas vers cette thèse qui porte aussi sur la conservation de l'eau et des sols dans le même secteur d'étude.

La présente recherche présente l'impact des modes de gestions des terres sur la vulnérabilité des sols à l'érosion au niveau du bassin versant de l'Isser par une approche quantitative sur les données de terrain. Nous nous focalisons dans ce cadre sur la partie amont du bassin versant de l'Oued Isser : Sous bassin versant de « Sidi Ahmed Chérif », d'une superficie de 945 ha.

Le choix de ce micro bassin test répond également à quatre critères : la représentativité, l'homogénéité, la disponibilité, des données antérieurs et en fin l'accessibilité.

L'érosion et le ruissellement sont très fréquents au niveau des sommets des versants et au niveau des ruptures de pente et se manifestent par un amincissement et une troncature du profil. Les versants sont très ravinés, dénudés de végétation, le relief est accidenté et les infrastructures sont de plus en plus détruites. Tout cela est fortement relié à la nature lithologique formée de roches tendres qui sont les marnes riches en argiles gonflantes de type smectites. L'érosion sur les versants est habituellement modérée et évalué à 3t/ha/an (travaux de Mazour, 1992) mais devient massives sous conditions météorologiques exceptionnelles (orages). Elle atteint jusqu'à 300t/ha/an en érosion ravinante (Chebbani, 1996) et se manifeste sous plusieurs formes : érosion en nappe et rigole, ravinement (ravines en V et ravines en

U), ravines de suffosion, mouvements de masse, solifluxion, glissements de terrain, coulées boueuses et érosion mécanique sèche).

Ces formes d'érosion sont bien façonnées par le ruissellement. La question qui se pose est la suivante: le ruissellement n'est-il pas lié à la diminution de la vitesse d'infiltration du sol, diminution liée probablement à la dégradation structurale qui, à son tour dépend des systèmes d'utilisation des sols ? Ceci dit, les sols marneux de sidi Ahmed chérif sont-ils instables et imperméables ? Nous confronterons ces hypothèses aux résultats obtenus sur le terrain.

Une analyse du sol en place et du sol érodé montre que ce dernier est plus riche en éléments fins, en matière organique et en calcaire mais pauvre en éléments grossiers (Belaidi, 2005). Il y a donc une sélectivité des particules les plus fines, un entrainement et une redistribution dynamique de ces éléments à l'échelle spatiale du versant. Par simple constatation, certains facteurs localisés tel que l'exposition semblent influencer la couverture du sol. Ainsi, les versants exposés au sud sont dénudés de végétation et offrent des paysages ravinés avec des incisions profondes, le réseau hydrographique étant plus ramifié.

Du point de vue socio économique, la question est complexe du fait même de l'essor économique trop important, et des différents handicaps de l'agriculture algérienne, un handicap naturel (spécificités climatiques), social (exploitation extensive des sols) et un handicap technique (intensification agricole sans pour autant parvenir à l'application de modèles techniques de référence pour les cultures ou l'élevage). Il en est de même de la mécanisation non performante qui a eu aussi pour conséquence l'extension des surfaces mises en culture. Les sols de qualité médiocre ont subi au cours du temps les agressions du milieu humain et de techniques de culture. Ceci a eu pour conséquence l'appauvrissement du capital humique et la dégradation des écosystèmes. Inconscient du danger de l'érosion, les paysans continuent à la mise en culture des terres fragiles et la déforestation des massifs surtout pentus.

Face aux problèmes d'insécurité qu'avait connus l'Algérie en (1990- 1999), la grande majorité de la population se concentre dans les chefs lieu. Les conditions de vie sont particulièrement très difficiles, ce qui fait que de nombreuses familles ont déjà abandonné leur terre.

Pour cette recherche, nous avons installé six parcelles expérimentales sur quelques parcelles paysannes, afin d'élargir le spectre des variations étudiées (pente, exposition, semis direct, labour). Les résultats confirment l'effet positif du semis direct sur la diminution du ruissellement et de perte en sol. D'autres facteurs peuvent être pris en compte, comme les propriétés physiques des sols, modifiées à la fois par les labours et les restitutions ou non de résidus. Ainsi, la vitesse d'infiltration de l'eau semble significativement supérieure dans les parcelles en semis direct.

3. PLAN DE L'ÉTUDE

Pour tenter d'apporter des réponses aux questions posées, nous avons articulé notre thèse en cinq chapitres.

Les trois premiers chapitres sont consacrés à l'étude des systèmes de gestion des terres et leur rôle dans l'amélioration de la Productivité agricole en zone marneuse. Le premier chapitre porte plus particulièrement sur les causes et facteurs de la dégradation des sols, la baisse de leur fertilité ainsi que la lutte antiérosive qui leur est inhérente en milieu méditerranéen semi-aride.

Dans le deuxième chapitre, nous nous appuyons essentiellement sur un ensemble de connaissances bibliographiques pour fournir un point des connaissances actuelles sur les processus d'érosion hydrique et leur action en termes de structure des fragments de terre. Les différents agents érosifs sont évoqués et les mécanismes et paramètres relatifs à l'érosion hydrique diffuse sont présentés.

Le troisième chapitre décrit les systèmes de gestion pratiqués dans la zone d'étude et montre leur impact sur l'écosystème. En fin de ce chapitre, la lutte anti-érosive et l'efficacité de certains aménagements en terrains marneux sont révélées.

Le quatrième chapitre Ce chapitre présente la zone d'étude, ses caractéristiques morphométriques, climatiques, sociales et économiques qui ont fait de cette région une des zones à risque érosif très fort.

Enfin, pour traiter de la vulnérabilité des sols à l'érosion, le cinquième chapitre présente une vue d'ensemble des dispositifs expérimentaux et les techniques utilisées pour étudier l'évolution du fonctionnement. Il synthétise les méthodes exposées séparément dans les paragraphes suivants. Nous présenterons, par la suite, les résultats obtenus dans le cadre de « l'impact des systèmes de gestion des terres sur la vulnérabilité des sols à l'érosion ».

PREMIERE PARTIE

L'EROSION DES SOLS EN MILIEU MEDITERRANEEN SEMI-ARIDE ET LA GESTION DES TERRES AGRICOLES

Dans cette première partie, nous présentons le contexte général de notre étude afin de bien appréhender les limites et les objectifs de ce travail. Le premier chapitre traite de la dégradation, de la baisse de la fertilité des sols et de la lutte antiérosive en milieu méditerranéen semi-aride. Dans le deuxième chapitre, nous nous appuyons essentiellement sur un ensemble de connaissances bibliographiques pour décrire les différents processus de l'érosion hydrique en milieu semi-aride. Les différents agents érosifs caractérisant ce milieu méditerranéen semi-aride sont décrits ainsi que l'ensemble des processus érosifs qui ont une action sur l'érosion hydrique diffuse. Le troisième chapitre propose un état de l'art concernant les différents systèmes de gestion des terres et leur rôle dans la protection des sols contre l'érosion hydrique de surface. Il débute par une description des modes de gestion pratiqués dans la zone d'étude. Il présente ensuite l'impact de cette gestion sur la production des céréales et sur l'écosystème. Enfin, l'efficacité des aménagements antiérosifs en terrains marneux est analysée.

CHAPITRE 1

DEGRADATION DES SOLS ET BAISSSE DE LA FERTILITE EN MILIEU MEDITERRANEEN SEMI-ARIDE

L'expression « *dégradation des terres* » indique, selon les auteurs et les régions, différentes formes de dégradation parmi lesquelles on peut citer la destruction du couvert végétal, la dégradation des ressources en eau et en sol, la dégradation des parcours, la salinisation des terres, la dégradation des écosystèmes ou la mobilisation des dunes (Dregne, 1983 ; Mainguet, 1991 ; Le Houérou, 1996).

La dégradation des sols est donc une problématique globale (Oldeman *et al.*, 1991 ; Scherr, 1999 ; Eswaran *et al.*, 2001 ; Eswaran et Reich, 2002) (in Lahmar & Ruellan, 2007) et complexe. C'est l'un des problèmes majeurs au quel est confrontée l'agriculture à travers le monde. La complexité tient à : i) la diversité des formes de dégradations, leurs interrelations et imbrications, leur extension, sévérité et réversibilité (Van Lynden, 1995 ; Scherr 1999) ; ii) la diversité des facteurs de dégradation, qui peuvent être naturels mais sont surtout anthropiques (Oldeman *et al.*, 1991 ; Van Lynden 1995) ; iii) la difficulté d'établir des indicateurs, des seuils et des relations de cause à effet entre une forme de dégradation et ses impacts (Eswaran *et al.*, 2001 ; Scherr 1999) ; et iv) la difficulté d'évaluer les impacts sociaux, économiques et environnementaux immédiats et sur le long terme, à l'endroit où les dégradations se produisent et au-delà de ces lieux (Van Lynden 1995 ; Malik, 1998 ; Scherr, 1999 ; Eswaran *et al.*, 2001 ; Lipper et Osgood, 2001) in Lahmar & Ruellan, 2007).

De nombreux travaux réalisés par différents auteurs montrent que la désertification en général et la dégradation des sols en particulier est une réalité en Algérie (Benslimane et al, 2008). Ces travaux font ressortir plus ou moins clairement le rôle primordial de la végétation dans la stabilité des écosystèmes agro-sylvo-pastoraux, et la réduction de la couverture végétale qui est à la base des processus de dégradation.

La lutte contre la dégradation des sols nécessite une bonne connaissance des causes de cette dégradation et de ses effets, afin de choisir avec précision les technologies convenables de conservation des sols et les bonnes stratégies permettant de remédier aux problèmes liés à la dégradation des sols tout en assurant aux populations concernées une production agricole durable.

1.1. Causes et effets de la dégradation des sols en région méditerranéenne semi-aride

La dégradation des sols est considérée comme l'une des problématiques environnementales les plus préoccupantes du 21^{ème} siècle. Elle est liée au contexte socio-économique de l'utilisation des ressources naturelles au-delà de leur capacité de restauration, aggravée souvent par les fluctuations climatiques (World Bank, 2003).

Les principales causes de cette dégradation sont évoquées ci-après. Il s'agit des causes anthropiques, de la péjoration climatique, des températures et vents, de la baisse de la fertilité

des sols, de l'érosion, du ruissellement et de l'infiltration. . Ces facteurs sont discutés pour la région méditerranéenne en se focalisant sur l'érosion hydrique qui est au cœur de notre sujet.

1.1.1. Causes :

1.1.1.1 Causes anthropiques

Les abus et les diverses erreurs de gestion des ressources en sols et en eaux sont considérés comme des causes bien plus importantes du déclin de grandes civilisations dans le monde. Rares sont les sols qui ont pu évoluer sans être marqués plus ou moins profondément par l'action directe ou indirecte de l'homme. Les causes anthropiques sont multiples et aussi complexes que les comportements humains. Elles sont fondamentalement liées à une pression accrue sur les écosystèmes qui excède leur capacité de résilience (Begnig et Lanly, 2010).

Parmi les principales causes anthropiques on peut accorder une importance particulière à la pression démographique. L'accroissement de la pression démographique dans les zones arides et semi arides entraîne en effet des modifications profondes des modes de gestion et d'utilisation des ressources naturelles et de l'espace rural (Roose, 1994). Ces perturbations anthropiques (culture extensive, faiblesse des apports d'engrais, coupe abusive du bois, mauvaise gestion des parcours, pratique des feux de brousse, surpâturage...) ont contribué au recul des formations végétales, lequel a exacerbé les processus érosifs. Les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols se trouvent fortement altérées par une mise en culture prolongée sans restitution de matière organique ou sans apport d'engrais. Les principales manifestations de cette dégradation sont la généralisation du ravinement, la baisse des productions et des rendements agricoles. La dégradation du couvert végétal naturel entraîne la raréfaction du bois d'énergie et du bois d'œuvre. L'exode rural est une conséquence de cette raréfaction des ressources naturelles due à la dégradation des sols et du couvert végétal.

Les sols, auparavant mis en jachère pour retrouver leurs qualités agronomiques (structure, fertilité), sont désormais cultivés chaque année, le plus souvent sans rotation culturale. Cette surexploitation entraîne un appauvrissement rarement compensé par l'apport d'éléments fertilisants. Par ailleurs, l'irrigation accompagnée d'un usage irraisonné d'engrais et de pesticides provoque la salinisation directe des sols ainsi qu'une salinisation des aquifères et donc une propagation spatiale de cette salinisation avec des effets à long terme sur la qualité des nappes d'eaux souterraines.

Le surpâturage, conjugué à la surexploitation sédentaire et au déboisement, dénude les sols et les expose à l'érosion. Boutrais (1996) et Toutain (1979) s'accordent à dire que l'élevage pastoral est une activité dégradante de la végétation et participe à la désertification. Lorsque la capacité de charge des pâturages est dépassée, les troupeaux provoquent la compaction des sols et la réduction du couvert herbacé par piétinement et surpâturage.

Les feux intempestifs que l'homme allume dans la forêt peuvent avoir des effets érosifs importants. En effet, après le passage du feu, la couverture végétale du sol n'est plus assurée. Le sol nu est alors soumis à l'impact des gouttes de pluie, ce qui entraîne la formation de croûtes de battance qui réduisent fortement la capacité des sols à l'infiltration, ce qui accroît

le ruissellement et l'érosion des sols. Outre la dénudation, l'échauffement et la perte de matières organiques favorisent ainsi une dégradation de la structure superficielle du sol.

1.1.1.2. Causes climatiques

L'irrégularité et la violence des pluies

La principale caractéristique du climat méditerranéen est l'existence de mois secs en été. Pendant ces mois, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est bien supérieure à l'apport en eau occasionné par les rares épisodes pluvieux. La pluviosité des régions méditerranéennes est caractérisée non seulement par une irrégularité interannuelle des quantités tombées, mais aussi par une mauvaise répartition des pluies dans l'espace et dans le temps. Cela conduit à des sécheresses récurrentes et à des productions agricoles aléatoires (Albergel et *al.*, 1995). En automne, après une longue période sans pluie, des orages surviennent sur des sols desséchés ayant subi la dessiccation estivale ou sur des sols fraîchement labourés. Malgré leur durée souvent brève et leur quantité faible, ces pluies sont à fortes intensités et développent une énergie cinétique suffisante pour causer des dégâts importants sur tous les types de cultures. Les dégâts sont d'autant plus importants que les sols méditerranéens sont souvent minces et pauvres en matière organique.

Les pluies, qui surviennent surtout en saison froide peuvent être très violentes et atteindre des intensités instantanées très fortes. Elles provoquent alors un ruissellement considérable, qui peut entraîner deux formes d'érosion : l'érosion diffuse en nappes et l'érosion concentrée, dans les ravines, les torrents ou les oueds. Par ailleurs, les effets du ruissellement et de l'érosion sont très fortement aggravés lorsque le sol a été dénudé par un labour, un sarclage ou un surpâturage. Les sols méditerranéens cultivés sont donc particulièrement sensibles à l'érosion au cours des mois de septembre à février quand le couvert végétal n'a pas encore recouvert suffisamment le sol pour assurer sa protection.

L'intensité des pluies est le principal facteur de ruissellement qui entraînent une dégradation rapide de la structure des sols en surface (Nicou et *al.*, 1990; Guillobez et Zougmoré, 1991). Elle intervient à deux niveaux: la saturation momentanée de la porosité du sol et l'énergie cinétique que la pluie dissipe en détruisant la structure du sol (battance). Les fortes intensités entraînent la conjonction des phénomènes d'engorgement et d'encroûtement superficiel qui aboutissent à la formation de croûtes (quelques cm) ou de pellicules (quelques mm) très peu perméables. La formation des croûtes ou des organisations pelliculaires superficielles entraîne une réduction de l'infiltrabilité se traduisant par un accroissement des risques de ruissellement et d'érosion hydrique (Casenave et Valentin, 1989). Il en résulte aussi une diminution des quantités d'eau stockées dans le sol et qui sont utilisées pour le couvert végétal.

Température et vent

La zone méditerranéenne est caractérisée par un régime thermique élevé. Les températures restent élevées pendant la saison des pluies et peuvent ainsi réduire l'efficacité des pluies par l'augmentation de l'évaporation. Les fortes températures occasionnent également un accroissement de l'activité microbienne et favorisent ainsi la dégradation accélérée de la

matière organique qui s'épuise plus rapidement. Cependant, la dégradation de la matière organique doit être bien faite pour que des éléments tel que l'azote puissent être à nouveau assimilable par les plantes.

En ce qui concerne le vent, son action est principalement néfaste pendant la saison sèche et lors des tempêtes qui précèdent la saison des pluies, lorsque le sol est nu. Il constitue l'un des facteurs déterminants de la transformation des états de surface, particulièrement en zone aride et semi-aride (Thiombiano, 2000). Les températures élevées et la vitesse importante du vent ont, en outre, pour conséquence une intense demande évaporatoire qui se traduit par une diminution rapide des stocks d'eau dans le sol.

L'érosion éolienne est une forme d'érosion qui se manifeste surtout dans les zones arides et semi-arides. Elle est due à l'arrachement par le vent des particules fines de la surface du sol (fig.1). Un double danger menace les sols de ces zones : celui d'être réduits à l'état de squelette après le départ des éléments fins enlevés par le vent, ou, au contraire, celui d'être recouverts par des sables, voire des dunes, apportées par le vent. L'érosion éolienne affecte tant l'endroit où elle se produit que des régions plus éloignées où se forment des dépôts sableux infertiles. Là aussi, le couvert végétal et la stabilité des agrégats sont des facteurs importants de résistance à l'érosion éolienne.

Il est à noter que l'érosion éolienne contribue aussi à la formation de sols très fertiles (loess) dans des régions éloignées des zones où sont arrachés les matériaux les plus fins. Ces matériaux fins peuvent être en effet transportés sur de grandes distances et contribuer à enrichir les sols.

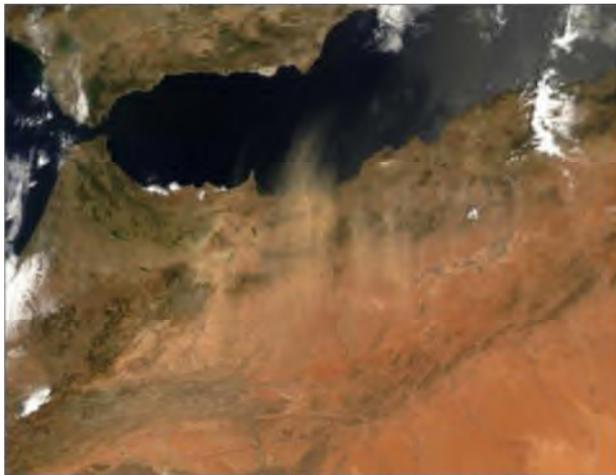


Figure n°1 :Observation par satellite de vents propageant des masses considérables de sable vers les zones plus fertiles du nord du Maroc et de l'Algérie. © NASA. (Begni & Lanly, 2010)

1.1.2. Effets

1.1.2.1. La baisse de fertilité des sols

Au sens large, la fertilité du sol inclut les fertilités chimique, biologique et physique; elle renvoie à la capacité d'un sol à fournir à la fois un bon ancrage aux racines des plantes, une bonne pénétration de l'eau et de l'oxygène et un bon stockage hydrique. Ces capacités d'ancrage, d'échange et de stockage dépendent de la texture et de la structure du sol, en relation avec sa composition granulométrique, sa perméabilité, sa porosité, sa profondeur et sa réserve en eau.

La fertilité d'un sol est en relation directe avec sa capacité productive qui dépend de plusieurs composantes: son état physique, ses statuts minéral et organique (fertilité chimique) et son activité biologique. Les caractéristiques physiques et chimiques du sol déterminent également son érodibilité (Roose, 1994 ; Hien, 1995).

Le sol est dit dégradé lorsqu'une transformation de ses caractéristiques physiques ou chimiques ne lui permet plus d'assurer ses fonctions de support et de nutrition pour les végétaux (Ouédraogo, 1999; Mando *et al.*,2000). Selon Bousquet (1997), cette dégradation est un processus complexe, résultat de l'enchaînement, dans le temps et dans l'espace, de divers processus de détérioration. La baisse de fertilité des sols est largement évoquée en Algérie comme un indicateur de la dégradation des sols. Les sols des régions méditerranéennes d'Afrique du Nord sont en effet caractérisés par une mauvaise stabilité structurale des horizons superficiels liée à leur faible teneur en matière organique. La baisse des taux de matière organique favorise, sous l'influence de la forte énergie cinétique des pluies et du faible développement de la végétation, une formation de croûtes qui limitent l'infiltration (Casenave et Valentin, 1989).

Il faut considérer trois types de dégradation des sols cultivés: les dégradations physique, chimique et biologique (Roose, 1994).

La dégradation physique des sols se manifeste par trois phénomènes distincts: l'encroûtement, la dislocation structurale et le compactage (Hien, 1995).

L'encroûtement est du à l'action mécanique des gouttes de pluies sur le sol (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984; Casenave et Valentin, 1989): l'énergie cinétique des gouttes de pluie disperse les particules de sol dont les plus fines, entraînées par l'eau de ruissellement, forment un film à la surface du sol qui ferme la porosité superficielle et limite l'infiltration. La dislocation structurale est liée à la diminution du taux de matière organique du sol qui peut provoquer un effondrement des agrégats argilo-humiques (Le Bissonnais, 1989-1990). Elle concerne plus fréquemment les sols cultivés où les labours réguliers et la minéralisation de la matière organique, sans compensations extérieures suffisantes, constituent des facteurs favorables à ce phénomène. Une des conséquences de la dislocation structurale est le compactage (Valentin, 1981) qui se traduit par une réduction de la porosité et qui rend l'enracinement difficile. Le compactage peut être aussi une conséquence du passage répété des engins agricoles, lesquels ont tendance à tasser le sol sous l'horizon superficiel travaillé.

La dégradation chimique des sols est le résultat de l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs suite à l'exploitation continue, sans apport de fertilisants ou d'amendements organiques.

La dégradation biologique concerne à la fois des changements de la couverture végétale, de la composition floristique et de la diversité des espèces végétales et animales qui font vivre le sol.

Pour lutter contre la dégradation des sols, leur enrichissement en matière organique et de bonnes pratiques culturales représentent des options intéressantes pour améliorer la productivité du sol. Des techniques telles que le paillage, l'agroforesterie, les cultures intercalaires, les plantes de couverture, le non labour et les cultures en couloirs sont des moyens de lutte contre la dégradation des sols qui complètent les approches anti-érosives d'aménagement rural (lignes de pierres, terrasses, canaux de drainage, ados et billons cloisonnés).

1.1.2.2. La formation des croûtes superficielles

La formation de croûtes superficielles a fait l'objet de nombreux travaux (Bolline, 1982, 1986; Trevisan, 1986). Ces croûtes sont la principale cause de la diminution de l'infiltrabilité à la surface du sol. Elles augmentent, par conséquent, les risques de ruissellement et d'érosion (Le Bissonnais, 1990).

En 1945, Ellison établissait, en étudiant le développement des croûtes, que l'érosion débute par la désagrégation des mottes présentes en surface et par le déplacement des particules produites par le rejaillissement sous l'impact des gouttes de pluie (effet splash). Dans un travail expérimental, Mc Intyre (1958) a, par la suite, montré comment les propriétés du sol pouvaient intervenir sur le splash et la formation des croûtes.

Sur les sols limoneux, Boiffin (1984) puis Boiffin et Monnier (1985) ont montré que la formation des croûtes résulte d'une combinaison de processus comprenant le détachement des particules, le déplacement et le colmatage interstitiel ainsi que la compaction par le choc des gouttes de pluie. La quantité et la dimension des particules mobilisées sont déterminées par le mode de division des agrégats initiaux. Trois mécanismes de division ont été identifiés par Boiffin (1984):

- l'éclatement qui résulte de la compression de l'air dans la porosité des agrégats lors de l'humectation;
- la désagrégation mécanique due à l'impact des gouttes de pluie sur les agrégats;
- la microfissuration liée aux cycles d'humidification et de dessiccation.

Cet auteur a mis aussi en évidence l'influence de l'état hydrique initial sur le comportement des agrégats lors de la mise en contact avec l'eau. Dans une étude expérimentale, Le Bissonnais (1988) a montré que le type de mécanisme de désagrégation est étroitement lié à l'état hydrique initial et au mode de réhumectation des agrégats. La distribution de la taille

des particules produites est ainsi différente selon l'état hydrique initial et selon les modalités d'humectation, en relation avec l'intensité de la pluie.

1.1.2.3. Erosion, ruissellement et infiltration

L'érosion hydrique est largement répandue en Méditerranée et continue de s'amplifier particulièrement en zones de pentes (Boukheir et *al.*, 2001). C'est la menace la plus grave pesant sur les sols méditerranéens. En Albanie (Zdruli et Lushaj, 2001), au Maroc (Badraoui et Stitou, 2001) et en Sardaigne (Vacca et *al.*, 2002), elle semble avoir atteint des niveaux critiques. Les premières études réalisées par une quarantaine de chercheurs de l'ORSTOM (IRD) ont concerné les processus, les facteurs causaux et l'extension spatiale de la dégradation des sols. Les recherches actuelles s'orientent de plus en plus vers la recherche de solutions aux problèmes du développement rural : l'alimentation en eau de qualité, l'érosion des sols et la pollution des eaux avec la prise en compte du milieu humain. Ainsi, l'érosion hydrique est une conséquence de la réduction du recouvrement végétal. Elle entraîne des pertes plus ou moins importantes de sol et d'éléments nutritifs qui se concentrent dans les bas-fonds.

Avec une érosion spécifique moyenne annuelle variant entre 2000 et 4000 t/km²/an, l'Algérie se classe parmi les pays les plus érodables du monde (Demmak, 1982). Actuellement, plus de 12 millions d'hectares sont soumis à l'érosion hydrique (Ghazi, 2004). Ces chiffres illustrent la sévérité et la variabilité des processus d'érosion hydrique. En effet, l'impact de cette érosion au niveau des sols se traduit sur le plan morphologique par des phénomènes de décapage et de perte sélective en éléments fins, avec pour conséquence la formation d'états de surface de type croûte d'érosion, à l'origine d'un faible taux d'infiltration et d'un fort taux de ruissellement.

Dans les régions arides, l'érosion éolienne favorise la formation de placages sableux qui constituent pratiquement les seules unités écologiques susceptibles d'être utilisées comme support de la végétation car elles présentent une capacité d'infiltration notable. Ces placages sableux font cependant l'objet de fortes variations spatio-temporelles et sont soumis à un surpâturage pouvant entraîner leur disparition. Certains auteurs, comme Tengberg (1995), considèrent les microdunes (nebkhas) comme des indicateurs de l'érosion éolienne et de la dégradation des sols en zone désertique.

Les pertes en sols dans les régions montagneuses et les dépôts éoliens dans les régions arides sont donc les caractéristiques les plus visibles de la dégradation des terres en milieu méditerranéen. Dans ce contexte, l'érosion des sols, particulièrement forte dans les régions semi-arides, constitue un facteur majeur de la dégradation des écosystèmes méditerranéens. L'enjeu du développement rural de ces régions consiste donc à protéger les ressources naturelles en optimisant l'usage de l'eau et en améliorant les rendements des cultures par des mesures et des techniques appropriées (Alali, 2007).

1.2. De la nécessité de lutter contre l'érosion des sols

Lorsqu'il y a dégradation d'un sol, il est rare que le problème à régler soit simple. Au contraire, il y a en général des interactions entre un ensemble de phénomènes complexes

(baisse du taux de matière organique, dégradation de la structure, perte de fertilité, érosion mécanique sèche, érosion en nappe, en ravines, glissements de terrain) eux-mêmes dus aux interactions complexes de processus physiques, sociaux et économiques, dont certains ont lieu en amont. Pour entreprendre une lutte efficace contre la dégradation, il faut donc partir d'une sérieuse analyse de tous les tenants et aboutissants de l'érosion et disposer d'une vision claire des enjeux ainsi que des objectifs.

L'érosion étant un phénomène naturel, il n'est pas souhaitable, ni même possible, de l'enrayer totalement, mais il convient plutôt de la limiter à un niveau « tolérable » (Roose, 1994). Ce niveau est souvent délicat à déterminer; il varie en fonction des types de sols et des usages qui en sont faits ou prévus. Le seuil de tolérance accepté déterminera le moment où il faut intervenir ainsi que le type de réponse à apporter. Il est fréquent que la conservation d'un sol passe par l'application de plusieurs mesures combinées (par exemple des travaux mécaniques et des pratiques visant à accroître le couvert végétal).

Roose (1991) a montré que les mesures quantitatives à l'échelle des parcelles et des bassins versants au Maroc, en Tunisie, en Algérie et en France ont fait ressortir quelques conclusions soulignant l'originalité des problèmes de lutte antiérosive en zone méditerranéenne.

1 - Les pluies ont beaucoup moins d'énergie qu'en région tropicale, à part quelques orages de fréquence rare (100 à 400 mm en 1 jour) qui laissent des blessures profondes sur le paysage.

2 - Les sols (rendzines, vertisols, lithosols, sols rouges fersiallitiques et les sols bruns calcaires) sont assez résistants à la pluie car ils sont argileux, saturés en calcium et souvent couverts de cailloux.

3 - L'érosion en nappe, négligeable sous végétation naturelle (0,01 à 0,5 t/ha/an) même dégradée, est modérée sous culture peu couvrante (0,1 à 10 t/ha/an sur des pentes de 12 à 40 %).

4 - Le ruissellement, par contre, peut être très abondant lorsque le sol est saturé, peu couvert en hiver. C'est le ruissellement qui creuse de profondes ravines et charge les oueds de transports solides qui envasent rapidement les retenues des barrages.

5 - Le traitement des ravines commence par la stabilisation et le rehaussement de leurs lits à l'aide de seuils légers. Ce rehaussement des lits doit être complété rapidement par la végétalisation des sédiments et des berges jusqu'à l'extinction des sources d'érosion à l'intérieur des ravines. Le choix judicieux des végétaux, en fonction de la diversité des niches écologiques, permet de transformer les ravines en « oasis linéaires » produisant fourrages, bois de chauffage ou d'ouvrage et fruits comestibles.

En Algérie, La dégradation des terres cultivées et la perte de productivité des sols soumis à l'érosion n'est pas récente. Elle est l'héritage d'une histoire mouvementée qui a poussé à l'extension de l'agriculture dans des régions surpeuplées. En l'espace d'un siècle, à l'échelle du pays, l'espace cultivé est passé de 2 à plus de 7 millions d'hectares. Les écosystèmes forestiers et steppiques ont été bouleversés ; les surfaces forestières sont passées dans le même temps de 7 à 2,5 millions d'hectares (Heddadj, 1997).

En général, l'érosion des sols a pour conséquence la diminution de la réserve utile du sol et de la profondeur maximale humidifiée, ainsi que par la baisse de l'efficacité des précipitations dans la recharge des réserves hydriques du sol. Le régime hydrique des sols subit alors un dysfonctionnement qui aboutit à l'augmentation du stress hydrique des végétaux. La dégradation des sols contribue donc à terme au déséquilibre des écosystèmes et à la baisse de fertilité du milieu. Face à une telle situation et pour mieux en connaître les processus et les conséquences, il est indispensable de conduire des études sur la dynamique de la dégradation, ainsi que sur les moyens de réhabilitation ou de restauration des terres dégradées et érodées.

L'analyse historique des stratégies de lutte antiérosive montre que l'homme a manifesté depuis des millénaires sa capacité d'adaptation aux changements de situations écologiques et humaines, c'est-à-dire aux crises d'érosion (Roose, 1994). Plus récemment, devant l'accélération des changements démographiques et socio-économiques des dernières décennies, une nouvelle crise d'érosion se dessine dont les causes varient selon qu'on analyse une région de grande culture (motorisation trop poussée et mal adaptée), une région semi-aride où l'agriculture et le pastoralisme présentent un caractère extensif (dégradation du couvert végétal et de la matière organique du sol) ou une zone de montagne densément peuplée (intensification de l'exploitation sans apport équilibré de nutriments).

La lutte antiérosive n'est donc pas seulement un problème technique (encore qu'on soit loin aujourd'hui de disposer partout de techniques efficaces), mais aussi et plus encore un problème humain. D'où la proposition d'une approche nouvelle basée sur la nécessité de prendre en compte les problèmes urgents d'intensification des cultures par un accroissement de la productivité des terres et du travail, tout en préservant l'avenir par une optimisation de la gestion des eaux disponibles, de la biomasse et des nutriments.

La lutte antiérosive exige donc une intégration des opérations de développement rural dans le cadre d'une politique globale d'aménagement régional se fixant pour objectif d'être compatible avec les conditions physiques et socio-économiques du milieu. Cette stratégie nécessite cependant une meilleure connaissance des processus d'érosion et leur action sur la dégradation des terres. Ceci sera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 2

PROCESSUS DE DEGRADATION DES SOLS PAR L'ÉROSION

Le mot « érosion » vient du terme latin « *erodere* », signifiant « ronger ». Il existe différentes types d'érosion : hydrique, éolienne, gravitaire, agraire. La forme d'érosion qui nous concerne plus particulièrement dans le cadre de cette étude est l'érosion hydrique. Selon Roose (1991), « elle résulte de nombreux processus au niveau de trois phases successives : le détachement des particules, leur transport et leur sédimentation ».

L'objectif de ce chapitre est de faire, à travers une synthèse bibliographique, le point des connaissances actuelles sur les processus d'érosion hydrique et leur action. Dans la plupart des cas, les particules de terre sont déposées avant d'être entraînées en dehors des zones d'émission. Nous nous pencherons dans un premier temps sur les processus et paramètres qui agissent sur les pertes en terre à l'échelle locale, pour ensuite nous intéresser à l'étude des mécanismes qui influencent l'érosion à l'échelle du versant. Nous détaillerons ensuite le comportement de la surface du sol sous l'effet de la pluie, puis les relations entre la structure du sol et l'érosion.

La perte en terre (Soil loss) est définie comme la masse nette de sol perdue pendant une certaine période par une surface donnée. Elle s'exprime en unité de masse par unité de surface (t/ha ou t/km²) et concerne la perte moyenne en sol sur une période plus ou moins longue (une année ou plusieurs années dans le cas de parcelles expérimentales, parfois quelques décennies pour les retenues de barrages). La production en sédiment (Sediment yield), quant à elle, est définie comme la masse de sédiments émise par une certaine surface pendant une période donnée. Elle fait donc référence à une masse de sédiment qui franchit une limite, comme une limite de parcelle ou l'exutoire d'un bassin versant. Elle peut s'exprimer en unité de masse totale (kg) ou en unité de masse par unité de surface (kg/m²). La production en sédiment est importante pour les dégâts causés à l'aval du territoire agricole tels le comblement des fossés, le sapement des chaussées ou les inondations en zones habitées.

2.1. Les agents de l'érosion

2.1.1. La pluie

La pluie est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (Ellisson, 1944; Ekern, 1950 in Leguédois, (2003). L'impact des précipitations sur l'érosion se manifeste soit par l'effet direct des gouttes de pluie sur les particules du sol, soit sous l'effet de la lame d'eau ruisselée. Déjà en 1877, Wollny, cité par Ellison (1944 in Leguédois, (2003), décrivait l'effet de la pluie sur la désagrégation et la fermeture de la surface des sols. Ellison (1944) a montré que l'érosion par splash est positivement corrélée à la taille et à la vitesse des gouttes de pluie, en relation avec l'intensité de la pluie, la direction et la vitesse du vent.

L'énergie de l'eau apportée par les gouttes de pluie est à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface du sol (Boiffin, 1976; Le Bissonnais, 1988 in Leguédois, (2003), du détachement de fragments de sol et de leur transfert par rejaillissement à faible distance des points d'impact (Free, 1952 ; Bradford & Huang, 1996). Le potentiel érosif de la pluie est désigné par le terme général d'**érosivité** (Bergsma et al., 1996). L'érosivité dépend surtout de l'intensité de pluie et de l'énergie cinétique qui en résulte directement (Stengel et Gelin, 1998). Cette énergie découle du diamètre des gouttes et de leur vitesse de chute.

L'équation universelle des pertes de sol, reliant l'érosivité et l'intensité de la pluie, regroupe toutes les variables sous six facteurs majeurs (Wischmeier et Smith, 1965). Elle prédit les pertes moyennes de sol au champ, pertes qui sont occasionnées par l'érosion de surface (érosion par l'impact des gouttes de pluie ou la battance, érosion en nappe et érosion en rigole). Elle s'exprime :

$$E = R K L S C P$$

E = perte annuelle moyenne de sol ($t\ ha^{-1}\ an^{-1}$)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ an^{-1}$)

K = indice d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique ($t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$)

LS = facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur

C = facteur de culture, incluant la régie des cultures et des sols et les pratiques culturales;

P = facteur de conservation et d'aménagement.

L'effet de la pluie sur la surface du sol est fortement réduit par le couvert végétal et ses résidus qui, en interceptant la pluie, diminuent le pouvoir érosif des pluies. En contexte cultivé, les gouttes reformées sur les feuilles ont un rôle limité et peu d'impact sur la surface du sol (Leguédois, 2003).

La présence d'une lame d'eau à la surface du sol est aussi un facteur important qui joue sur l'érosivité de la pluie. Une faible épaisseur d'eau semble avoir un effet positif sur le détachement des particules par la pluie mais lorsque la lame d'eau dépasse une certaine hauteur elle agit en protégeant la surface du sol (Moss & Green, 1983; Torri et al., 1987 ; Proffitt et al., 1991 in Leguédois, (2003).

2.1.2. Le ruissellement

L'écoulement d'une lame d'eau est un moteur essentiel de l'érosion. Il détache, transporte et exporte des fragments de sol. Le ruissellement superficiel peut être généré par trois processus distincts (Ambroise, 1999) : le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration, le ruissellement par saturation du sol en profondeur et le ruissellement par exfiltration.

- ✓ Le ruissellement par **dépassement de la capacité d'infiltration** (excess infiltration over land) est appelé également ruissellement hortonien. Il se produit quand la capacité d'infiltration du sol (ou infiltrabilité) est inférieure à l'intensité des précipitations. L'excès de pluie qui ne peut s'infiltrer stagne alors en surface, puis ruisselle le long des versants. C'est l'état de la surface du sol qui détermine l'infiltrabilité de tout un profil. Ceci explique pourquoi des intensités de pluie inférieures à l'infiltrabilité d'un profil peuvent néanmoins provoquer du ruissellement. Le ruissellement hortonien est notamment favorisé sur les sols nus par la formation d'une croûte de battance qui apparaît rapidement sous l'impact des gouttes de pluie. Il peut également apparaître très localement sur les parcelles cultivées dans les traces laissées par les engins agricoles qui compactent le sol.
- ✓ Le ruissellement sur une **surface saturée** (saturated over land flow) est appelé aussi ruissellement de zone contributive ou ruissellement de source à surface variable. Il se produit sur les zones généralement hydromorphes (fond de vallon humide, marais) où le sol est gorgé d'eau. Toute la porosité du sol est alors occupée par de l'eau. L'eau ne peut pas s'infiltrer et ruisselle en surface. Contrairement au ruissellement hortonien, la genèse de ce ruissellement est indépendante de l'intensité des pluies. Elle dépend du cumul des pluies et des conditions du milieu. Les surfaces saturées se forment en hiver, lors de la remontée des nappes phréatiques proches de la surface du sol, au cours de longues périodes pluvieuses. Elles se contractent ensuite. Les sols présentant un horizon imperméable, par exemple une semelle de labour, génèrent aussi ce type de ruissellement puisqu'ils sont plus rapidement saturés en eau que les sols perméables sur tout leur profil.
- ✓ Le ruissellement par **exfiltration** est un cas plus rare s'expliquant par la saturation du profil de sol par le bas suite à la présence d'une source ou d'une nappe. Le flux en excès s'écoule alors par la surface donnant lieu à du ruissellement, sans qu'il n'y ait obligatoirement de précipitations. L'exfiltration survient notamment dans les talwegs concaves. Pendant les périodes humides, du fait de la remontée des nappes, on observe une extension progressive des zones d'émergence des nappes d'eaux souterraines.

Une fois formé en surface (Fig.2), le ruissellement peut s'écouler de manière **diffuse** lorsque les filets d'eau parcourent la surface du sol en évitant les parties hautes (mottes, touffes, cailloux) et en occupant les parties basses. Si la lame d'eau est d'une épaisseur plus importante, elle submerge la microtopographie donnant lieu à un ruissellement **en nappe**. Le ruissellement tend également à se **concentrer** vers l'aval. Cette concentration confère au ruissellement une force érosive certaine qui lui permet de former des griffures, rigoles et ravines (Auzet, 1988).

La principale variable qui contrôle l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules est la vitesse de l'écoulement qui dépend de la pente et de l'épaisseur de la lame d'eau (Gimenez & Govers, 2002). La vitesse de l'écoulement dépend également de la rugosité hydraulique de la surface du sol (Govers et al., 2000). La végétation herbeuse, qui accroît

fortement la rugosité hydraulique de la surface du sol, constitue donc une bonne protection des sols contre l'érosion.

Les plus grands déplacements de matériaux ont donc tendance à survenir à la suite de longues périodes de pluie. La majeure partie des matériaux mobilisés ne peuvent être déplacés que sur des distances relativement courtes, en général jusqu'au pied de la pente, mais de grandes quantités de matériaux peuvent aussi être déplacées en quelques minutes.

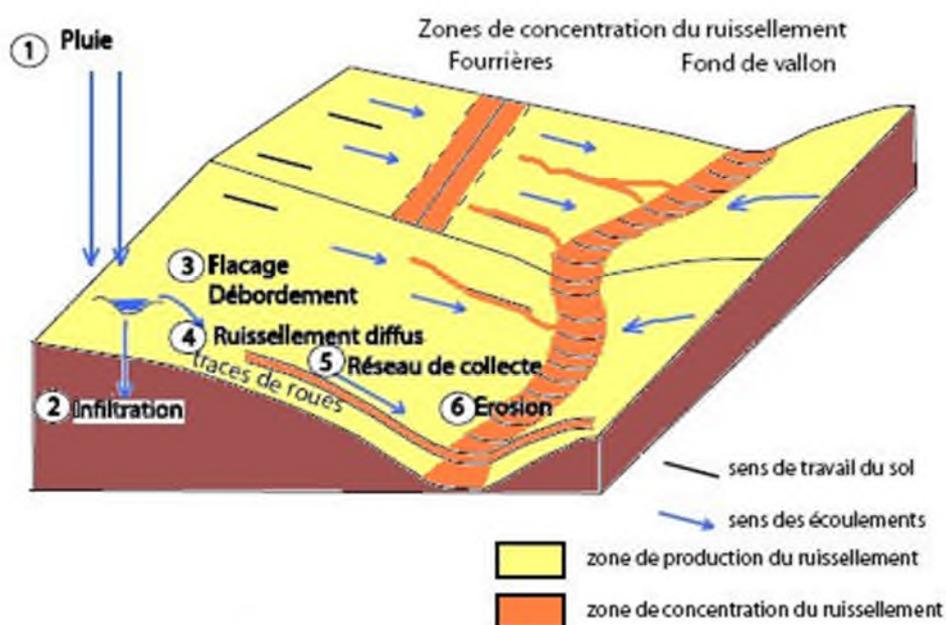


Figure n°2 : Schéma et processus simplifiés des écoulements (d'après Bussièrre, 1996)

2.1.3. La gravité

C'est un agent d'érosion important qui participe à la mobilisation et au transfert des particules à la surface du sol. Elle se manifeste continuellement sur toute surface inclinée. La force gravitationnelle est partout la même, mais la résistance des matériaux varie. Elle diminue en particulier avec l'humidité. Lorsque la couche de surface est saturée en eau, des phénomènes gravitaires peuvent être observés aussi bien à l'échelle de l'agrégat que du rang de semis (Boiffin & Sebillotte, 1976; Boiffin, 1984 in Leguedois, 2003). La gravité est aussi la force principale qui limite l'érosion en s'opposant à la mise en mouvement des particules et en étant le moteur de la sédimentation.

L'érosion agraire due au travail du sol est loin d'être négligeable. C'est un processus (arrachement + transport + dépôt) sans intervention de l'eau, peu connu, très peu quantifié, qui par gravité et par simple poussée des instruments aratoires, décape les horizons superficiels des hauts de pente et des ruptures de pente. Il pousse ces masses de terre vers le bas de la toposéquence où elles s'accumulent soit en talus, en bordure de parcelles, soit en colluvions concaves de texture peu différente des horizons d'origine (Roose, 1994).

2.2. Les processus de l'érosion hydrique sur les versants

A l'échelle du versant, l'énergie des gouttes des pluies et du ruissellement sont les agents les plus actifs de l'érosion hydrique. Celle-ci est donc causée par l'ensemble des agents présentés au sous-chapitre précédent : l'impact des gouttes de pluie, le ruissellement diffus, le ruissellement concentré, la gravité, le travail du sol. Chacun de ces agents peut agir isolément mais tous sont communément actifs au sein du versant, soit séquentiellement, soit simultanément (Cerdan, 2001). L'arrachement du sol est beaucoup plus considérable si les gouttes de pluies sont plus intenses, ce qui accentue la vitesse de l'eau. Si l'érosion en griffe n'est pas effacée, les griffes causées par une concentration du ruissellement se développent en ravine pouvant avoir une taille assez importante, de 0.5 m à 5 m. Plus la pente du terrain est forte, plus rapidement se développent de telles ravines.

Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion linéaire. Il y en a trois processus de ravinement (Fig.3) :

a/ Dans la nature, on observe 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.

Au cours des saisons intermédiaires, les matériaux fins accumulés sur les versants par altération des roches, glissent jusqu'au fond de la ravine, d'une part suite à l'impact des gouttes de pluies, et d'autre part par formation de petites rigoles secondaires ou le plus souvent par glissement en masse des particules saturées par l'eau. La pente d'équilibre des versants étant largement dépassée, aucune végétation ne peut s'y installer (Roose, 1994).

b/ Un deuxième type de ravines en **U** s'observe fréquemment dans la nature sur des matériaux hétérogènes. Soit elles ont un fond constitué de matériaux très résistants: lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement. Soit, la couche de résistance se trouve en surface, le ruissellement creuse alors profondément le matériau jusqu'à atteindre une nappe d'eau temporaire ou permanente qui va exercer une poussée latérale sur le bas du versant jusqu'à ce que celui-ci s'effondre (sapement de berges) (Roose, 1994).

c/ Il existe une troisième forme de ravinement encore plus difficile à traiter: l'érosion en tunnel (tunneling). Elle peut se développer sur des pentes faibles, dans un matériau fissuré en surface, soit sur des sols riches en argiles gonflantes (vertisols, sols bruns tropicaux, etc...), soit sur des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles (fréquent dans le bassin méditerranéen).

Lors des orages de fin de saison sèche, les eaux pénètrent dans ces sols fissurés jusqu'à la roche altérée, ruissellent dans ces fissures jusqu'en bas de pente où elles peuvent former des ravines régressives.

Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique vont se transformer progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours des grosses averses.

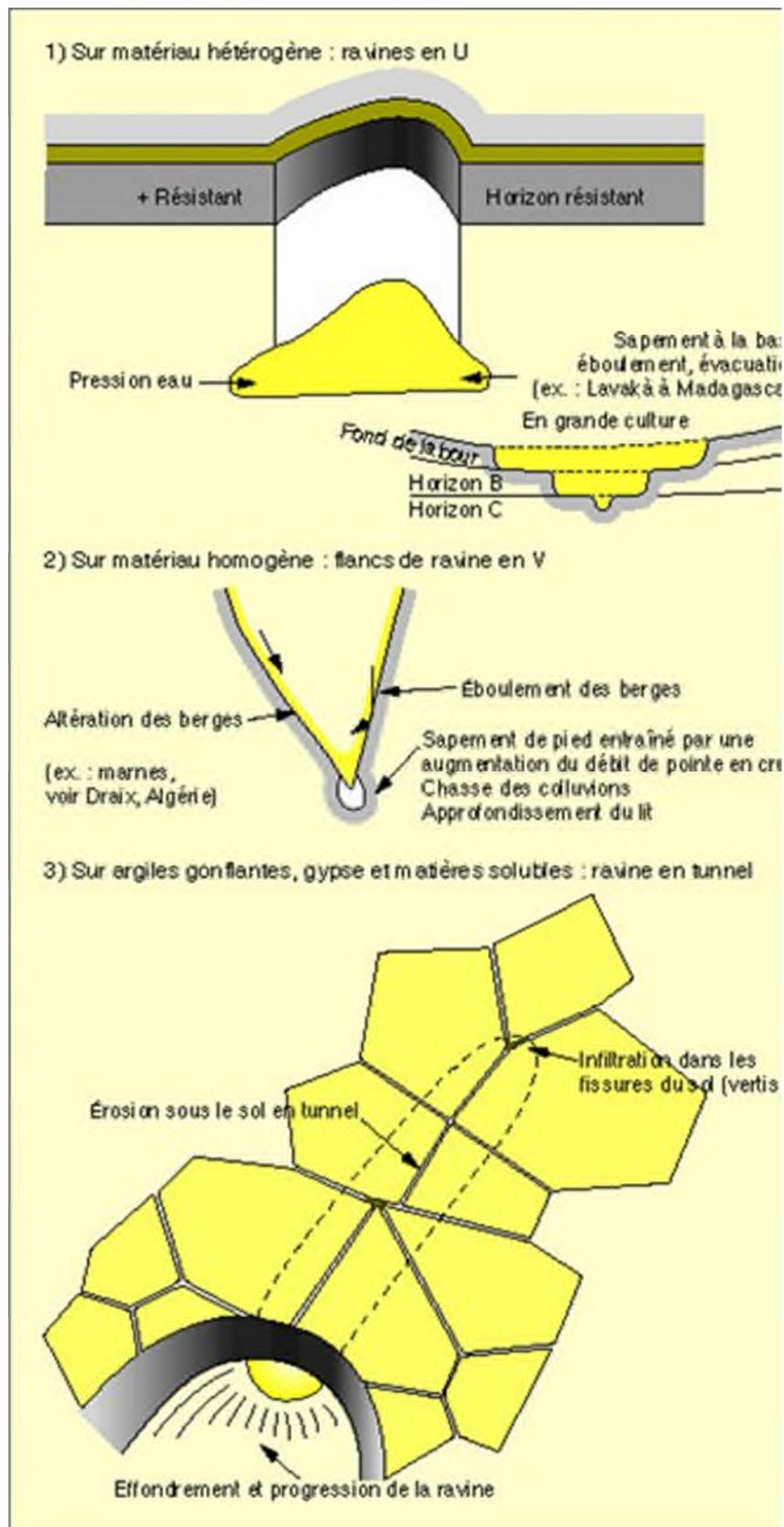


Figure n°3: Processus de ravinement en relation avec leur typologie (Roose, 1994).

Des phénomènes de mouvement de masse peuvent également se manifester sur le versant, ils proviennent d'une part, du déséquilibre entre la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur la roche altérée en pente sur laquelle ils reposent. On peut regrouper ces phénomènes en six groupes principaux (Fig.4):

- **Les glissements lents** (creep)

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en croix de la base des arbres adultes. Dans les zones sylvopastorales; la circulation des animaux le long des versants peut également entraîner la formation d'escaliers encadrés par des réseaux de fissures (Moeyersons, 1989 ; Roose, 1994).

- **Les glissements rapides**

Les glissements de terrain **en planches** sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération.

- **Les versants moutonnés**

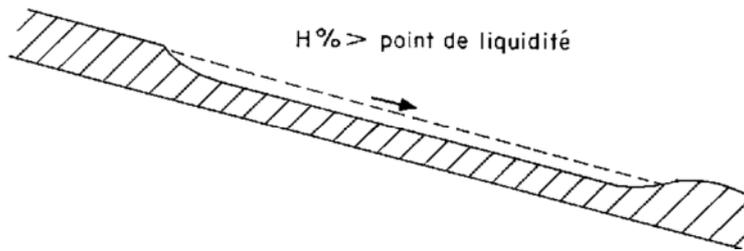
Formes molles apparaissant dans des conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, comme une pâte dentifrice, entre la trame de racines qui retient l'horizon de surface et l'horizon compact imperméable que représente l'altérité des marnes ou des argilites par exemple (Roose, 1994).

- **Les coulées boueuses** (lave torrentielle)

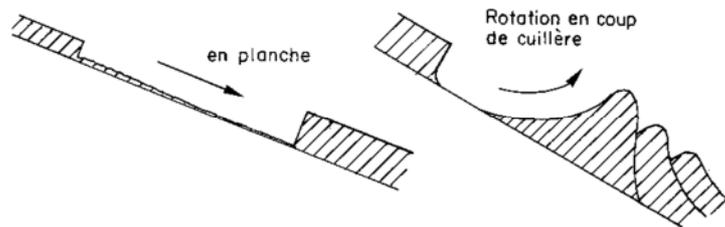
Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Lorsqu'elles viennent de se produire, elles se présentent sous forme d'un canal terminé par une langue de matériaux de texture très hétérogène (cône de déjection). Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène. Elles apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle nettoyant les altérites accumulées depuis quelques années (Temple, Rapp, 1972 in Roose, 1994).

GLISSEMENTS RAPIDES

1) Coulées boueuses

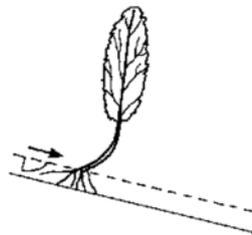


2) Glissements de terrain

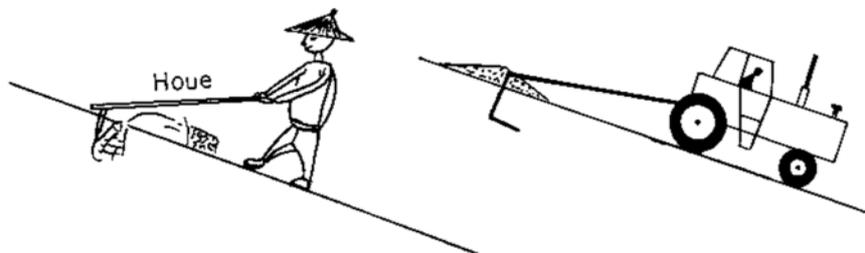


MOUVEMENTS LENTS

3) Creep (Glissement lent des particules a la surface du sol sur pentes fortes)



4) Erosion mécanique ou érosion sèche (Descente progressive des terres poussés par les outils de travail du sol)



- Charrue à soc
- Charrue à disque
- Herse

Figure^o4 : Différentes formes d'érosion en masse (Roose, 1994)

- Les glissements rotationnels en "coups de cuillère" (fig.5)

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. Au creux du coup de cuillère, on observe généralement une zone humide où croît une végétation adaptée à l'hydromorphie. Il arrive couramment qu'après des périodes très humides, il s'installe un ruissellement sur les bords de la contrepente et ce ravinement fait progressivement disparaître la contrepente, ne laissant qu'un creux dans le versant qu'il est difficile de dissocier d'un ravinement ordinaire.

- 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. On les retrouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre.

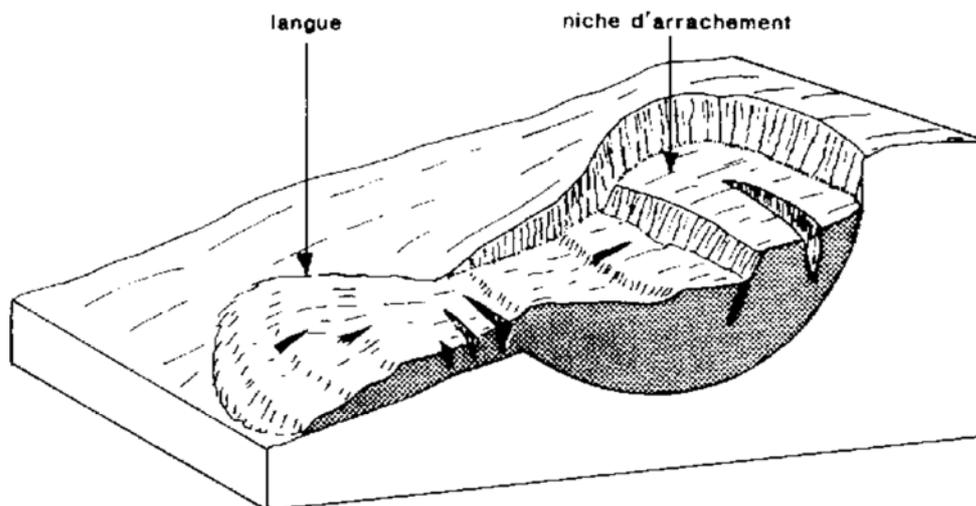


Figure n° 5: Glissement rotationnel en coups de cuillère (Neboit, 1991 in (Roose, 1994)

A l'échelle de la parcelle cultivée, la distinction la plus commune est faite entre les processus d'inter rang, où l'entraînement est principalement causé par l'énergie des gouttes de pluie et l'érosion linéaire pour laquelle c'est l'énergie du ruissellement qui devient prépondérante.

2.3. Le comportement du sol sous l'effet de la pluie

L'alimentation en eau de la surface du sol est la condition sine qua non de l'érosion hydrique de la couverture pédologique. Cette alimentation en eau engendre l'infiltration au travers de la surface, la percolation dans les horizons du sol ainsi que la rétention dans le sol et à la surface du sol. Les mouvements de l'eau dans le sol et au travers de la surface sont contrôlés par le volume, la taille, la distribution et la connectivité de l'espace poral, donc par le squelette et l'arrangement géométrique des particules et des agrégats. Cet arrangement est dynamique, il évolue à des taux variables suivant des processus physiques et biochimiques (Horn, 1988 ; Horn et *al.*, 1994 in Cerdan, 2001). Quelquefois ces particules et agrégats existent au sein d'une matrice non cohérente, mais plus communément ils sont reliés par des forces de caractères et d'intensités variables au sein d'une structure cohérente. Dans le contexte des sols cultivés, la matrice et la structure du sol sont régulièrement désorganisées par les interventions culturales. Une question importante pour l'étude des processus érosifs est donc la compréhension du taux de rétablissement d'une certaine cohérence, en particulier sous l'impact de la pluie. Nous étudierons en premier lieu les processus et paramètres de la désagrégation qui influent sur l'arrangement des particules et agrégats, avant de passer en revue les processus de redistribution et de réorganisation (Cerdan, 2001).

2.3.1. Les mécanismes et paramètres de la désagrégation

Les mécanismes de désagrégation se différencient du point de vue de la nature des interactions en jeu et de l'énergie nécessaire à la rupture, des conditions physico-chimiques requises pour leur mise en œuvre, de la cinétique des processus ainsi que de la nature et de la taille des particules produites. La désagrégation par l'eau résulte de différents mécanismes physiques et physico-chimiques. Elle peut affecter différents niveaux d'organisation de la structure des sols, depuis les interactions entre les particules d'argile jusqu'aux mottes de terre.

La pluie dégrade la structure du sol (Fig.6, 7 et 8) selon quatre mécanismes (Emerson, 1967; Boiffin, 1984; Le Bissonnais, 1988; Emerson & Greenland, 1990; Le Bissonnais & Le Souder, 1995; Le Bissonnais, 1996) : par effet « splash », par humectation, par gonflement et par dispersion physico-chimique.

a- Lors de son impact, la pluie libère l'énergie accumulée durant sa chute en cisillant les agrégats. Cet **effet mécanique**, appelé **splash**, voit son importance varier selon l'intensité de la pluie, le type de sol et son état hydrique.

b- Lorsque les agrégats sont secs, l'humectation brutale provoque une compression des volumes d'air contenus dans le sol, ce qui provoque un **éclatement** des particules.

c- Les sols argileux sont affectés d'alternances d'humectation et de dessiccation (déterminées par les conditions météorologiques) entraînant une microfissuration des agrégats préparant le terrain aux autres mécanismes. C'est le **gonflement différentiel**.

d- La présence d'ions monovalents (Sodium, Na^+) et d'ions bivalents (Calcium, Ca^{2+}) joue sur les forces d'attraction du sol : c'est la **dispersion physicochimique**. La présence de sodium tend à favoriser la dispersion, alors que la présence de calcium favorise la stabilité en établissant des ponts entre les particules. Le rôle de ce mécanisme est important car il joue sur les particules élémentaires, renforçant ainsi les effets des autres mécanismes.

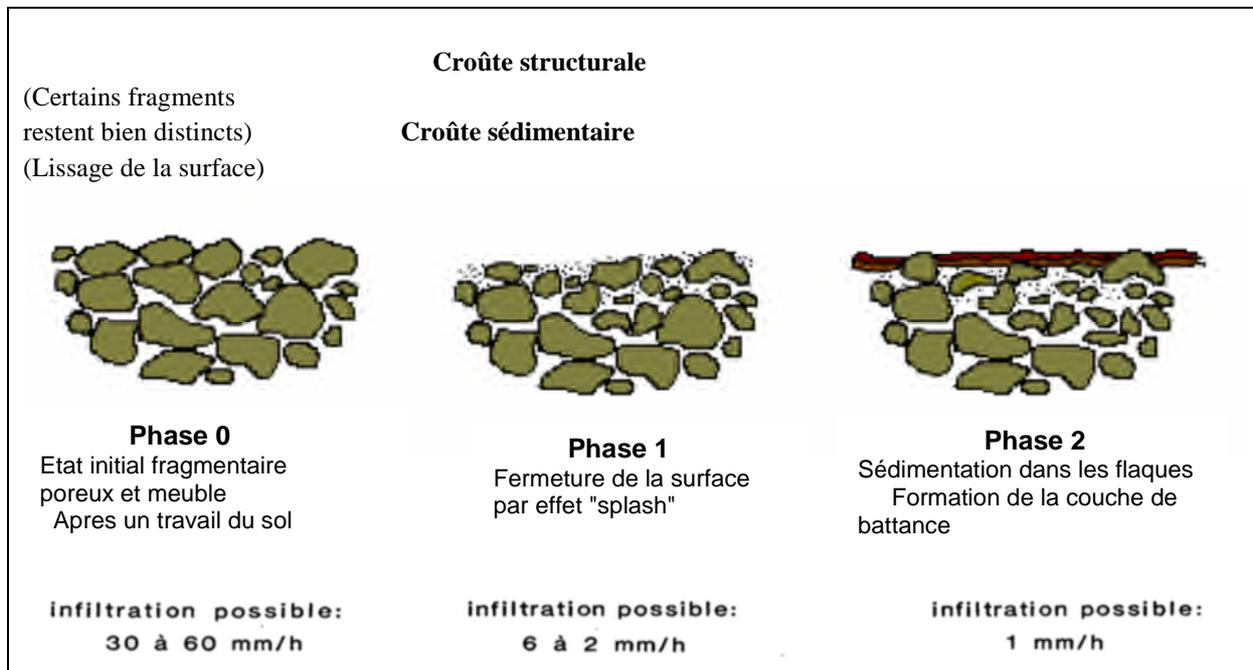


Figure n°6: Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies (Boiffin, in Auzet, 1987)

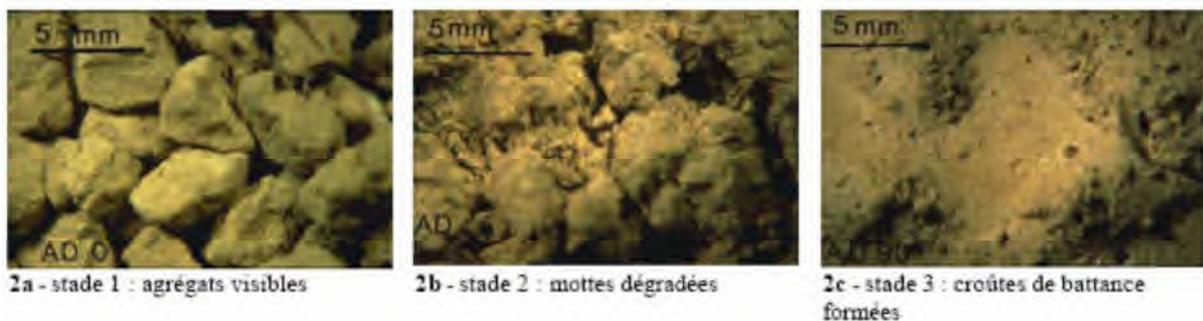


Figure n°7 : Evolution des états de surfaces d'un sol limoneux, formation d'une croûte de battance (Le Bissonnais, 2002)

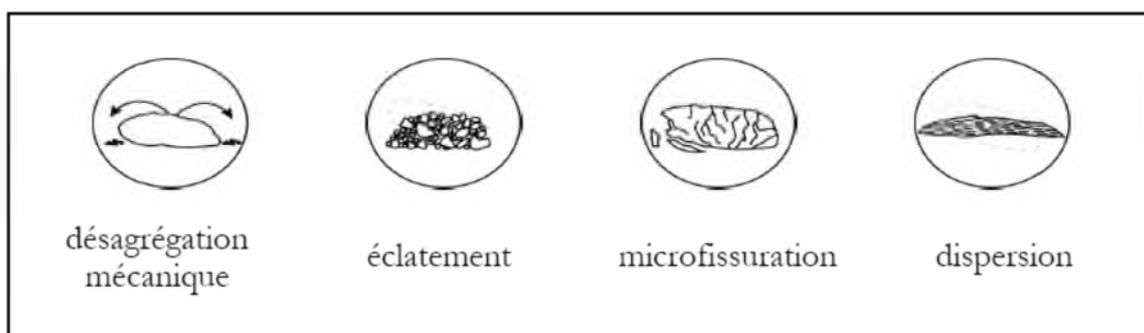


Figure n°8 : Mécanismes de la désagrégation des mottes
(Le Bissonnais et Le Souder, 1995)

La **stabilité structurale** d'un sol est la résistance qu'il oppose quand il est soumis à différentes contraintes, en particulier à celle de l'eau (Boiffin, 1976; Angers et Carter, 1996 in Leguedois, 2003). La stabilité structurale est donc une propriété qui rend compte en particulier de la sensibilité d'un sol à la désagrégation par l'eau.

Plus généralement, la sensibilité d'un sol à l'érosion hydrique dépend de plusieurs facteurs (Amézketa, 1999) comme la texture, la porosité, la teneur en matière organique et son épaisseur. Les capacités d'un sol à infiltrer et à retenir l'eau sont aussi deux paramètres qui expliquent sa susceptibilité à l'érosion hydrique. Un sol profond avec des pourcentages élevés de cailloux et de sable est un sol qui permet une absorption facile de l'eau de pluie. C'est donc un sol sur lequel le ruissellement ne se produira que très rarement.

Les sols sont aussi très différents selon la façon dont sont agencées les particules qui les composent. Plus la cohésion des matériaux du sol est forte, plus la résistance contre l'arrachement de ces particules est élevée. Un sol argileux est un sol très cohérent et la faible teneur d'un sol en argile et en cailloux contribue à l'arrachement des particules du sol par le ruissellement.

2.3.2. Mise en mouvement

La mise en mouvement des fragments de sol est réalisée par l'action des gouttes de pluie et du ruissellement. Classiquement, ces deux processus de mise en mouvement sont distingués (Rose, 1985; Sharma, 1996 in Leguedois, 2003).

➤ Mise en mouvement par l'impact des gouttes de pluie

La mise en mouvement de fragments de terre par l'impact des gouttes de pluie est un processus qui a lieu aussi bien sur une surface de sol libre que sous une lame d'eau peu épaisse (Green & Houk, 1980; Moss & Green, 1983 in Leguedois, 2003). L'intensité de la mise en mouvement par l'impact des gouttes est liée à la cohésion interne du matériau qui est souvent mesurée en termes de résistance au cisaillement (shear strength).

➤ Mise en mouvement par le ruissellement

La mise en mouvement des fragments de terre par le ruissellement, parfois désignée par le terme entraînement, est généralement liée à des conditions de ruissellement concentré. Tout comme pour l'impact des gouttes de pluie, la susceptibilité du sol face au détachement par une lame d'eau ruisselante est dépendante de sa cohésion interne. La résistance au cisaillement du sol est donc une variable souvent utilisée pour caractériser le matériau soumis à l'érosion (Torri & Borselli, 1991; Sharma, 1996 in Leguedois, 2003).

2.3.3 Transport, sédimentation et exportation

• Le splash

Suite à l'impact d'une goutte de pluie, des gouttelettes d'eau et des fragments de sol sont éjectés de la surface, transportés radialement autour du point d'impact, avant de se déposer à la surface (Fig.9). Ce rejaillissement d'eau et de sol est communément désigné par le terme de splash. Ce dernier reste néanmoins un agent érosif primordial, qui, en modifiant les caractéristiques de la surface du sol et les propriétés hydrauliques de l'écoulement, peut fortement influencer les processus dans les rangs et entre les rangs. L'importance de l'énergie créée par l'impact des gouttes de pluie a été confirmée par de nombreuses études empiriques (Young et Wiersma, 1973 in Cerdan, 2001).



Figure n°9 : Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash
(Photos : Pierre-Olivier Cochard, in Leguedois, 2003)

Sans l'énergie apportée par les gouttes de pluie, l'écoulement laminaire possède une capacité d'entraînement faible. L'impact des gouttes sur une lame ruisselante est un déterminant essentiel de la charge solide transportée (Proffitt et *al.*, 1991, in Cerdan, 2003). Quand il y a une pente générale, le flux de fragments de sol transférés par splash est cependant légèrement plus important vers l'aval que vers l'amont (Quansah, 1981; Wan et *al.*, 1996 in Cerdan, 2003). Localement, le transfert de sédiments par splash peut générer des états de surface

hétérogènes du fait d'une microtopographie variée ou de la présence d'éléments protecteurs sur la surface (Wainwright et *al.*, 1995, 1999; Planchon et *al.*, 2000).

Lorsque la surface du sol est partiellement protégée de l'impact des gouttes de pluies, par des petits cailloux par exemple, le détachement et le transport par rejaillissement se traduisent par la formation de « cheminées de fées » tout à fait caractéristiques (fig.10).



Figure n°10: « Cheminées de fées » résultant du détachement et du transport par rejaillissement.
(Photo : Dautrebande, 2006)

- **Le transport par ruissellement**

Le ruissellement est l'agent principal de l'exportation des fragments de sol mis en mouvement sur une surface. Dans la lame d'eau peu épaisse qui s'écoule à la surface lors d'un événement érosif, les fragments de sol sont transportés par suspension, saltation et traction (Moss et *al.*, 1980). Le mode de transport d'un fragment de sol dépend de sa masse et de ses caractéristiques (Moss et *al.*, 1980).

Dans des conditions expérimentales contrôlées sous une pluie constante, on observe généralement une certaine relation entre le ruissellement et la charge solide transportée. Cette relation est en fait dépendante du type de sol et des conditions hydriques initiales. Ainsi, à ruissellement égal, on peut obtenir des concentrations en sédiments très variables, soit entre différents sols, soit pour un même sol dans des conditions hydriques initiales différentes. Le Bissonais et *al.* (1995 in Cerdan, 2001) ont pu établir des relations entre le taux de ruissellement et l'érosion, spécifiques à des conditions hydriques initiales données.

Dans un flux liquide, les taux de mise en mouvement et de sédimentation sont prédits à partir de la différence entre la charge en sédiments et la capacité de transport, cette capacité de transport étant en relation avec la vitesse de l'écoulement. Quand la charge en sédiments est inférieure à la capacité de transport, il y a mise en mouvement. Quand la charge en sédiments est supérieure à la capacité de transport, les sédiments en excès se déposent.

2.4 Structure des sols et érosion

2.4.1 Érodibilité

De nombreuses propriétés des sols influencent la composition et la quantité de sédiments exportés par l'érosion hydrique. La susceptibilité globale des sols face aux processus érosifs est désignée par le terme générique d'érodibilité (Bryan et *al.*, 1989). Middleton (1930) a formalisé le concept d'érodibilité et proposé des indices d'érodibilité du sol. Ces indices combinent des propriétés affectant le ruissellement et la détachabilité des particules (Leguedois, 2003).

Beaucoup d'études ont examiné l'effet des propriétés du sol sur l'érosion. Si les processus érosifs sont pris séparément, on peut associer à chacun une catégorie de propriétés structurales:

- à la désagrégation, la stabilité structurale ;
- à la mise en mouvement, la cohésion de la surface du sol ;
- au transport, la microtopographie.

Les facteurs principaux qui influencent la stabilité structurale d'un sol cultivé sont la texture, la teneur en matières organiques et les types de cations présents dans le sol.

▪ *La texture*

Des textures avec trop peu d'argiles ont une faible cohésion et donc une faible stabilité structurale. Les sols les plus sensibles sont les sols riches en limons et/ou sables fins. Les limons ont une faible cohésion et sont des particules très fines. Ils sont donc facilement détachés de la matrice du sol et facilement transportés par le ruissellement puisqu'ils sont petits. Les sables fins ont une cohésion encore plus faible. Les sables grossiers ont une très faible cohésion, mais parce que ce sont des sédiments plus gros que les limons et sables fins, ils sont moins facilement transportés par les eaux de ruissellement.

▪ *La matière organique*

Il existe une forte interaction entre les pratiques de travail du sol et la dynamique des matières organiques du sol. Le travail du sol (ou le non travail) détermine les modalités d'incorporation et de décomposition des matières organiques fraîches retournant au sol (par sénescence ou à la récolte). Ces matières organiques en décomposition modifient en retour les propriétés physiques du sol et en particulier sa structure. On ne peut donc dissocier aisément les effets du travail du sol sur la décomposition des matières organiques fraîches et les effets affectant la structure du sol et ses propriétés.

La matière organique du sol (M.O.S.) est un des facteurs importants de l'agrégation des particules solides dans le sol. Dans les sols non calcaires ou qui contiennent des teneurs faibles d'oxydes de fer et aluminium, elle est même le facteur principal de cohésion des agrégats entre eux (Oades, 1993 ; Angers et Carter, 1996).

La **réduction du travail du sol et l'installation de couverts végétaux** permettent de réduire la consommation d'humus et d'accélérer sa synthèse. En séquestrant le carbone, on améliore

les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, tout en participant à la réduction de l'effet de serre. En fonction des conditions et des objectifs il est possible de récolter une culture dérobée ou d'assurer un complément de fourrage pour le bétail.

En évitant de perturber le sol et en le couvrant de façon permanente on développe la biodiversité : l'équilibre biologique permet de réduire les consommations de pesticides et de se diriger vers la lutte intégrée.

▪ ***Le type de cation dans le sol***

Les argiles ont une charge électrostatique négative, les cations en solution ont une charge électrostatique positive. L'attraction entre argiles (charge à dominante négative) et cations permet aux argiles de former des agrégats par des « ponts cationiques ». Le calcium est un cation particulièrement bénéfique pour la structure du sol et favorise la formation d'agrégats stables. Les agriculteurs se servent de calcaire broyé (CaCO_3) ou de chaux (CaO , où $\text{CaCO}_3 + \text{chaleur (environ } 850^\circ\text{C)} = \text{CaO} + \text{CO}_2$) pour remonter le pH de leur sol et améliorer sa structure. Les apports de calcaire broyé ou de chaux sont considérés comme des amendements.

Pratiquement tous les cations rencontrés dans le sol (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ ...) ont un effet bénéfique ou neutre sur la structure, sauf un : le sodium (Na^+). Le sodium agit comme un dispersant dans le sol et contribue à sa désagrégation.

La stabilité structurale, la cohésion de la surface du sol et la microtopographie sont des propriétés qui sont susceptibles de varier au cours du temps. L'échelle de variation semble être de quelques jours (Boiffin, 1976; Boiffin & Sebillotte, 1976 in Leguedois, 2003) pour la stabilité structurale, alors qu'elle descend à l'événement pluvieux pour la cohésion et la microtopographie, du fait de la variation d'humidité et de la redistribution particulière. Ces propriétés influencent collectivement, le mouvement de l'eau, la répartition des forces érosives et la résistance à l'entraînement. Un des mécanismes prépondérants réside dans l'influence de ces propriétés sur la réponse initiale de la surface du sol à l'impact de la pluie.

2.4.2 États de surface

L'état de surface du sol désigne en général les couvertures végétale et minérale du sol ainsi que la structure des premiers centimètres du sol (Armand, 2009). La pluie et le ruissellement génèrent différents types de croûtes à la surface des sols qui modifient au cours du temps la structure superficielle du sol. Les flux de particules générés par les processus érosifs viennent modifier la surface du sol et en modifient également la structure. L'érosion modifie donc la structure superficielle du sol qui influe elle-même sur son érodibilité.

Cette réorganisation des premiers millimètres du sol conduit à la fermeture de la surface et à la réduction de sa capacité d'infiltration en créant des croûtes de battance (McIntyre, 1958a in Leguedois, 2003). Ce processus entraîne généralement la formation d'un ruissellement de type hortonien (Leguedois, 2003). Bresson & Boiffin en 1990; Valentin & Bresson en 1992 font état de deux types morphologiques de croûtes :

- dans un premier temps, les **croûtes structurales** se forment sous l'action mécanique des gouttes de pluies, des fragments sont détachés des agrégats et se réorganisent à la surface du sol ;

- dans un second temps, en présence de ruissellement ou de flaques, les particules détachées sédimentent et forment des litages à l'infiltrabilité très limitée, créant des **croûtes sédimentaires** quise forment préférentiellement dans les dépressions, jusqu'à devenir coalescentes si l'excès d'eau en surface se maintient.

Les **croûtes d'érosion** résultent de l'érosion des croûtes structurales ou sédimentaires. Elles concernent surtout les sols sableux.

Chaque croûte est caractérisée par une capacité d'infiltration et une cohésion.

Basée sur la morphologie caractéristique des croûtes, différentes typologies des états de surface ont été réalisées (Casenave & Valentin, 1992 ; Ludwig et *al.*, 1996 ; Cerdan, 2001 in Leguedois, 2003). Elles sont utilisables sur le terrain là où elles ont été créées : en Afrique de l'Ouest pour la typologie de Casenave et Valentin. La conséquence majeure de la formation des croûtes est la réduction de la capacité d'infiltration à la surface du sol. Les fragments et particules de taille inférieure à 100 µm et qui résultent de la désagrégation du sol en surface jouent un rôle important dans l'évolution des propriétés hydrodynamiques en réduisant la taille des pores présents à la surface du sol (Loch, 1994; Le Bissonnais et *al.*, 1989 in Cerdan, 2001).

La structure du sol, en surface et en profondeur, est un facteur de contrôle de l'infiltrabilité du sol et par voie de conséquence du ruissellement et de l'érosion. Or, pour un sol déterminé, cette structure présente une forte variabilité spatiale et un caractère dynamique lié aux opérations culturales, aux chutes de pluies et aux conditions climatiques. Le déterminisme de ces variations spatiales et temporelles est cependant rarement pris en compte pour évaluer les risques de ruissellement et d'érosion hydrique en relation avec les pratiques culturales. Cependant, il est généralement admis que des pratiques de non travail du sol augmentent la résistance à l'arrachement des particules par la pluie ou par le ruissellement, diminuant ainsi les transferts de matières solides à l'échelle des parcelles cultivées.

L'état de surface du sol au début d'une pluie influence fortement la charge solide du ruissellement. On observe en fait une combinaison de deux tendances liées à la disponibilité en particules à la surface du sol :

- d'une part, la charge solide a tendance à diminuer au cours d'un événement pluvieux au fur et à mesure que les fragments et particules facilement mobilisables sont évacués, par une sorte de lavage de la surface ;

- d'autre part, la quantité de particules mobilisables diminue également d'un événement pluvieux à l'autre, avec le développement d'une croûte de battance et l'atténuation de la rugosité.

Ainsi, une forte rugosité initiale permet de retarder la formation d'une croûte et donc de limiter le ruissellement, mais elle va maintenir plus longtemps une source de sédiment à partir

des mottes et fragments en relief. Elle sera donc à l'origine d'une concentration en sédiments plus forte (Martin et *al.*, 1997 in Cerdan, 2001).

La figure. 11 illustre le devenir d'une goutte de pluie à la surface du sol.

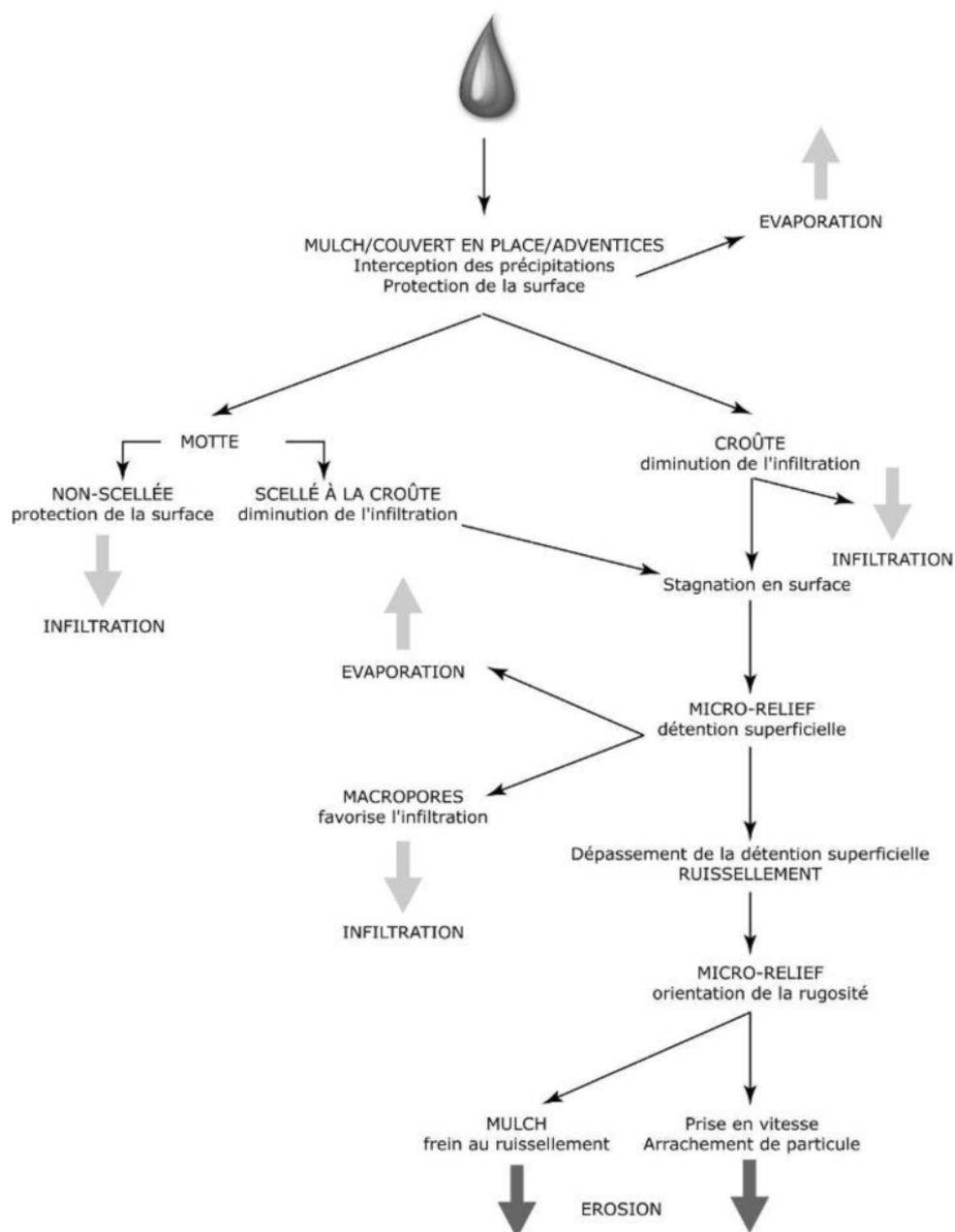


Figure n°11 : Que devient une goutte d'eau à la surface du sol ?
(Armand, 2003)

CHAPITRE 3

IMPACT DES SYSTEMES DE GESTION DES TERRES SUR LA DEGRADATION DES SOLS ET AMENAGEMENTS ANTI- EROSIFS

En matière de durabilité de l'environnement, le mode de gestion des terres et les pratiques de conservation de l'eau et des sols constituent un aspect important à prendre en considération. Ainsi, les agriculteurs n'ont parfois pas besoin d'inventer de nouveaux systèmes d'aménagement face à la diminution des terres, il suffit qu'ils appliquent certaines de leurs pratiques plus intensivement. L'ancienne méthode de semis des céréales, base de l'alimentation de la population riveraine du bassin versant de l'Isser s'est avérée inefficace face aux variations climatiques. S'agissant de la baisse de fertilité des sols qui engendre une baisse des rendements, la recherche doit faire des propositions d'amélioration qui concernent presque tous les systèmes de cultures adoptés dans la région. Augmenter la production agricole et assurer la sécurité alimentaire devient une nécessité. Cet objectif peut être atteint par l'augmentation des surfaces cultivées et/ou par l'augmentation de la productivité des systèmes de culture. Cette dernière solution a été mise en œuvre en Europe bien avant la seconde guerre mondiale avec l'utilisation des engrais organiques provenant de l'élevage. L'association de l'agriculture et de l'élevage a permis un enrichissement des terres en matière organique et une hausse de la productivité des terres. Avant l'utilisation du fumier comme amendement organique, les agriculteurs pratiquaient la jachère en laissant reposer la terre 5 à 10 ans.

Cependant, l'intensification des systèmes de culture européens après la seconde guerre mondiale s'est accompagnée d'un certain nombre d'effets néfastes sur l'environnement: pollution des eaux, appauvrissement biologique des sols et leur dégradation physique qui ont conduit à une forte remise en cause du modèle agricole occidental (Boiffin *et al.*, 2001).

Il faut donc proposer de nouveaux systèmes de culture pour répondre aux attentes, souvent contradictoires, des agriculteurs et des consommateurs sur la productivité agricole, le respect de l'environnement et la rentabilité économique.

L'objectif de ce chapitre est justement de décrire les modes de gestion des terres pratiqués dans la zone d'étude et d'avoir la perception des populations locales sur les impacts de la culture des céréales sur l'écosystème. Cette étude n'aura de consistance qu'en prospectant des systèmes agraires de gestion des terres techniquement acceptables et permettant à la fois le respect de l'environnement et la rentabilité économique.

Ce chapitre débute donc par une description des modes de gestion pratiqués dans la zone d'étude. Il présente ensuite l'impact de cette gestion sur la production des céréales et sur

l'écosystème. Enfin, l'efficacité des aménagements antiérosifs (en milieu cultivé dans les ravines et les cours d'eau) est analysée.

3.1. Influence du couvert végétal et des résidus de cultures

La couverture végétale et le type de sol influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une portion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement. A l'inverse, le sol nu, de faible capacité de rétention augmente le ruissellement. Les parties aériennes du couvert végétal, les résidus de culture et la litière agissent sur la dynamique des états de surface. La couverture du sol par les végétaux, morts ou vivants, retarde l'apparition de la croûte de battance dans la mesure où, en interceptant les gouttes d'eau, elle réduit leur énergie cinétique et par conséquent leur pouvoir dégradant sur les agrégats du sol. La litière et les végétations rampantes sont plus efficaces que la canopée des plantes dressées pour favoriser l'infiltration des pluies car elles protègent la surface du sol contre la destruction des agrégats par l'énergie des gouttes de pluie (Roose, 1994).

Par ailleurs, l'ensemble formé par les tiges les feuilles et les racines dirige les eaux de pluie vers des lieux d'infiltration préférentielle (Gallien et al., 1995). De même, les résidus de récolte créent une rugosité pérenne qui freine la propagation du ruissellement et favorise l'infiltration de l'eau dans le sol (Gascuel-Oudou et Heddadj, 2000). La rugosité au sol dépend du nombre de tiges par m². C'est ainsi qu'une couverture végétale formée d'herbacées à tiges nombreuses est plus efficace pour protéger le sol contre le ruissellement que des arbres (Mazour, 2004).

La capacité de maîtriser l'érosion dépend aussi de la protection végétale disponible à diverses périodes de l'année, en relation avec la quantité de précipitation à caractère érosif durant ces périodes. A cet égard, les plantes qui assurent un bon couvert végétal durant la majeure partie de l'année (luzerne et cultures hivernales) maîtrisent mieux l'érosion que les cultures qui laissent le sol nu durant une longue période (cultures en rangs), particulièrement pendant les périodes aux cours desquelles les précipitations sont très érosives (printemps et début de l'été). Toutefois, la majeure partie de l'érosion sur les cultures annuelles en rang peut être atténuée en semant une plante fourragère ou en laissant un couvert de résidus (planche photographique 6.c) d'au moins 30 % après la récolte et pendant les mois d'hiver (Arnold et al., 1989).

Une étude expérimentale réalisée in situ, destinée à étudier l'effet du mode de gestion des parcelles en jachère, a montré que les deux principaux couverts testés (moutarde et mélange ray-grass/trèfle) réduisent le ruissellement par rapport à un sol nu. Cependant, il ressort de ces expérimentations que l'influence du couvert végétal sur la quantité d'eau ruisselée est limitée, le sol subissant une dégradation avant que ces couverts soient suffisamment développés pour constituer une protection efficace contre l'impact des gouttes de pluie (Gallien et al., 1995). En fait, un couvert végétal est d'autant plus efficace pour réduire l'érosion qu'il dissipe l'énergie des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes où les pluies sont les plus agressives, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et maintient une bonne porosité à la surface du sol (Roose, 1980; 1994).

Le surpâturage, par la réduction du couvert végétal et le tassement de la surface du sol, réduit l'infiltration de la pluie et augmente les risques de ruissellement et de ravinement (planche photographique 3.b). La mise en culture et le labour des terres réduisent plus encore le couvert végétal pendant le début de la saison des pluies, modifient la structure, la perméabilité et la résistance des sols à l'érosivité des pluies. Si le labour améliore temporairement l'infiltration, il accélère la minéralisation des matières organiques du sol et affaiblit la résistance des agrégats à l'énergie des pluies. La plantation d'arbres (reboisement ou agroforesterie), par le développement de la couverture du sol, le développement des racines et l'apport de litières (planche photographique 4.b), permet une restructuration du sol et par conséquent une amélioration de leurs propriétés hydriques (Masson, 1971; Roose, 1994; Morsli et *al.*, 2004).

3.2. Effet des systèmes de culture

Le ruissellement est le résultat d'une combinaison complexe de facteurs qui interagissent. Alors que certains ne sont pas maîtrisables, comme la texture du sol ou le régime des précipitations, il est possible d'agir sur d'autres facteurs tels que la couverture du sol ou le microrelief. La couverture du sol par exemple a pour effet de réduire le ruissellement et cette couverture peut être raisonnée par l'exploitant sur les parcelles à risques. Le maintien de cette couverture végétale est finalement une condition essentielle de la durabilité des systèmes de culture (Mazour, 1992).

Le système de culture peut être défini comme un ensemble constitué par la succession des cultures sur une parcelle et les techniques culturales qui sont appliquées. C'est le facteur le plus important où l'homme peut intervenir pour protéger et améliorer la productivité de la ressource en sol (Morsli et *al.*, 2004).

Ces mêmes auteurs notent que toute opération culturale induit une modification de l'état structural du sol et de l'infiltration et par conséquent une diminution ou une augmentation du ruissellement et du transport solide.

Le travail du sol augmente temporairement l'infiltration mais accroît la vulnérabilité du sol à l'érosion, plus particulièrement sa vulnérabilité à l'encroûtement. L'encroûtement du sol provoque ensuite un accroissement très important du ruissellement et du transport solide.

Au Maghreb, en zone semi-aride, l'action anthropique accentue les processus de dégradation des terres. La conjugaison de la pauvreté et de la croissance démographique dans les milieux fragiles aboutit à une dégradation des ressources non renouvelables, ou difficilement renouvelables, notamment les forêts, les sols et les eaux. La pression démographique et le surpâturage favorisent ainsi la vraie pâture pour des troupeaux nombreux et variés.

Par ailleurs, le déboisement, la mise en culture des terrains fragiles en forte pente, le creusement de tranchées et de banquettes, le labour dans le sens de la pente, et bien d'autres pratiques inappropriées, créent un déséquilibre et causent une dégradation du patrimoine écologique (Fikri Benbrahim, 2004).

Des pratiques agricoles trop intensives ou trop peu respectueuses de l'environnement sont ainsi responsables de la dégradation du sol et de la perte de sa biodiversité. Des

labours fréquents et notamment des labours profonds, perturbent les organismes du sol (macrofaune, mésofaune, microorganismes), réduisent le stock de matière organique (principale source d'énergie pour les habitants du sol) et bouleversent la structure, l'aération, la compacité, la texture, le pH ou la composition du sol, modifiant ainsi son fonctionnement.

D'autres pratiques agricoles, au contraire, permettent de maintenir, voire de restaurer la biodiversité du sol. Ce type d'agriculture prône l'utilisation des propriétés naturelles du sol pour en améliorer le rendement et propose de travailler la terre sans la dégrader : ne pas enterrer le fumier, éviter les labours ou labourer à faible profondeur, ne pas utiliser d'appareils lourds, éviter de laisser le sol à nu, apporter de la matière organique.

Sur une parcelle, la mise en œuvre d'un système de culture détermine au cours du temps une évolution cyclique des états de surface et de l'occupation du sol. Chaque système de culture implique une répétition d'opérations culturales qui induisent des discontinuités dans l'évolution des propriétés physiques des sols et qui fixent pour chaque culture un calendrier d'occupation et de recouvrement des sols (Lawani, 2012). De par ses actions, l'exploitant agricole peut donc contribuer à l'accélération ou au contraire au ralentissement de la dégradation superficielle des sols. Nous allons donc maintenant développer les différents systèmes de culture utilisés en zone semi-aride au Maghreb.

3.2.1. Système agro-pastoral

Les systèmes de culture traditionnels à jachère longue étant contrariés par l'accroissement de la population rurale, les paysans se sont adaptés aux nouvelles conditions démographiques en modifiant leur modèle de production. Dans les systèmes de productions agro-pastoraux actuels, les relations entre l'agriculture et l'élevage restent limitées à la production de fumure et à la valorisation des résidus culturaux. Cette forme de complémentarité implique un accroissement et une sédentarisation du cheptel qui exerce alors une pression constante sur le milieu. Les parcelles laissées en jachère sont pâturées par les moutons et les chèvres qui exploitent les résidus des récoltes et déposent leur fumier (planche photographique 3.b). Il apparaît aussi que le piétinement du bétail et la dégradation de la strate végétale modifient la structure du sol (fermeture des pores, tassement, etc.) en rendant plus aisé le ruissellement. Le surpâturage se traduit par la réduction du couvert végétal des espèces vivaces (Le Houérou, 1969). Il est à noter que sous certaines conditions, le parcours n'a pas une grande incidence sur le taux d'érosion particulièrement en terrain calcaire (planche photographique 3.a).

Dans le système agro-pastoral actuel, la biomasse produite au cours de la saison des pluies est consommée avant l'arrivée des pluies suivantes, laissant le sol nu au début de la saison suivante. L'absence de protection du sol par une couverture végétale en début de saison des pluies entraîne une dégradation superficielle de sol par érosion hydrique, contribuant à la régression du niveau de fertilité du sol. Ces évolutions engagent à la définition d'alternatives plus durables à la baisse de la fertilité du sol et à l'évolution régressive de l'environnement.

3.2.2. La jachère

Pour contribuer à la gestion des agrosystèmes, les paysans intègrent la pratique de la jachère comme mode de reconstitution de la fertilité des sols. C'est un système courant dans le bassin

versant de l'Isser. Il consiste à semer les terres en céréales une année sur deux. Ainsi, chaque année les terres sont cultivées à moitié. L'autre partie n'étant pas travaillée. La reconstitution de la fertilité des sols durant la jachère passe par plusieurs étapes et s'accompagne de changements dans la composition floristique.

- **La jachère longue** permet de rétablir à la fois un bon état structural du sol, des teneurs suffisantes en matières organiques et la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes. Les champs bénéficiant d'une jachère longue (plus d'une année culturale) servent aussi de pâturage pour le bétail attaché ou libre mais gardé.

- **La jachère courte** ne dure en général qu'une saison. Le terrain est colonisé par une végétation naturelle mélangée à des résidus de culture (restes de maïs, de sorgho...).

La jachère est alors utilisée comme pâturage de courte durée et bénéficie des déjections animales du bétail qui y broute. La jachère courte est également faite avec des cultures semi-pérennes, c'est à dire celles qui occupent le terrain plus d'une saison culturale et dont la technique de conservation consiste à les laisser dans le sol pendant la durée de leur consommation. Dans ce cas, les animaux ne seront pas autorisés à paître sur la parcelle. S'il y a assez de végétation, elle sera coupée et donnée comme fourrage aux animaux au piquet et à l'étable. Le sol sera enrichi principalement par des remontées chimiques et l'érosion est arrêtée par la végétation qui s'y développe.

Certains avancent que la jachère permet d'emmagasiner de l'eau, de la conserver et permet d'augmenter la fertilité du sol. Ces arguments qui ne reposent pas sur des données scientifiques se trouvent actuellement remis en cause. Ainsi tous les sols n'emmagasinent pas l'eau de pluie, seuls ceux qui ont la profondeur nécessaire le peuvent (Belaid, 1986).

3.2.3. Les systèmes cultivés

L'augmentation actuelle de la population pousse généralement à raccourcir la durée de la jachère, au risque de l'épuisement des sols et de l'accentuation de l'érosion. Les bénéfices d'un changement de gestion des terres peuvent inclure de meilleures récoltes et un accroissement de la sécurité alimentaire en particulier pour les années sèches, des coûts moindres et une meilleure distribution des travaux agricoles avec économie de temps au cours de l'année.

Les systèmes cultivés les plus pratiqués dans la région sont au nombre de cinq : la céréaliculture traditionnelle, la céréaliculture intensive, la culture sur billons, l'arboriculture et le semis sans labour.

✓ **Céréaliculture traditionnelle**

Comme dans tout le nord ouest algérien, la céréaliculture extensive est la culture traditionnelle la plus pratiquée, en rotation avec quelques légumineuses et la jachère pâturée. Les sols cultivés restent nus après la récolte et sont livrés sans protection à l'agressivité des pluies. Sur les fortes pentes, les sols sont continuellement érodés et, quelques fois, les horizons de surface sont complètement décapés. De plus, les traces de roues, laissées par les

divers engins agricoles après les semis, imperméabilisent le sol et favorisent les écoulements concentrés (planche photographique 6.b).

Ce n'est qu'à partir du mois de novembre que les sols commencent à être labourés. Les semis de céréales sont généralement réalisés entre novembre et décembre. C'est en janvier seulement que certaines cultures commencent à couvrir le sol.

La culture céréalière protège efficacement le sol pendant cinq à six mois, de mars à août sachant que la réduction sensible de l'érosivité des pluies sur les sols est nettement observable à partir d'un couvert végétal supérieur à 30 % (Mabit et *al.*, 2002). Mais en hiver, juste après le semis, celle-ci n'est pas assez couvrante pour protéger efficacement le sol contre une dégradation de sa structure superficielle. Sous l'impact des gouttes de pluies, l'encroûtement de la surface du sol est à l'origine des principaux problèmes érosifs qui sont associés à l'utilisation de la céréaliculture traditionnelle.

Celle-ci reste encore largement appliquée dans la région de Sidi Abdelli située non loin de la zone d'étude. Elle garantit tant bien que mal des rendements assez intéressants sur des sols marneux à vocation céréalière mais néanmoins très fragiles. Ces dernières années, les rendements des céréales connaissent une certaine régression due à plusieurs facteurs (stress hydrique, pratiques culturales inadaptées, dégradation de la fertilité à cause des problèmes d'érosion, etc.)

✓ Cultures sur billons

Le billonnage est une technique couramment employée dans la région et qui s'effectue sur plusieurs cultures. Elle consiste à cultiver en rangées de petites buttes d'environ 15-20 centimètres de hauteur (6-8 pouces), préparées la saison précédente. Les buttes sont aplaties sur le dessus pour former une sorte de trapèze à pente douce évitant le ravinement en cas de fortes pluies. De plus, le volume important de terre disponible conserve mieux l'humidité du sol en terres légères. L'association de plusieurs cultures sur le même billon assure la stabilité du billon, une bonne couverture du sol et réduit l'érosion. On comprend dès lors, pourquoi les billons disposés dans le sens perpendiculaire de la pente résistent efficacement au ruissellement. (Goulet P, 2005).

Le billonnage en courbe de niveau est deux fois plus efficace que le simple labour en courbe de niveau, il réduit l'érosion à environ 30% du témoin travaillé à plat pour des pentes de 1 à 8 %. Mais l'efficacité du billonnage diminue lorsque la pente augmente : en particulier, sur de fortes pentes lors des averses exceptionnelles, on risque la rupture des billons provoquant de graves ravinements ou encore des glissements de terrain. C'est le cas en particulier si l'horizon de surface est sableux et très perméable alors que les horizons de profondeur le sont beaucoup moins. Une première solution consiste à incliner légèrement le billonnage de telle sorte que les excédents d'eau peuvent rejoindre un exutoire aménagé en circulant à faible vitesse et en transportant très peu de matériaux terreux (expérimentations de Hudson au Zimbabwe). Une autre solution consiste à cloisonner les billons (contour tied ridging). Pour éviter que l'ensemble des eaux stockées derrière les billons se précipite dans une brèche de l'un d'eux et provoque la formation d'une ravine, on peut créer après le billonnage une série de

cuvettes et de cloisons perpendiculaires aux billons. Derrière celles-ci seront piégés 30 à 60 millimètres d'eau et les éléments terreux les plus lourds tandis que les excès d'eau pourront circuler derrière les billons pour atteindre les exutoires aménagés. Cette méthode s'est avérée extrêmement efficace et réduit l'érosion au dixième de sa valeur normale. Ces méthodes ne sont valables que sur des sols très perméables jusqu'en profondeur. Pour être efficaces, les cloisons doivent être situées à une distance comprise entre 1 et 5 m (Mazour, 2004).

Du point de vue d'un développement durable, c'est-à-dire dans le respect des considérations environnementales, économiques et sociales, nul ne doute que les avantages de cette culture durable sont tous indiqués.

Et dans le contexte actuel, si cette pratique est bien supportée, elle est destinée à se développer. En effet, contrairement aux méthodes conventionnelles, ce mode de culture « de conservation des sols » s'effectue sans opération de labour avec un travail minimum du sol. La FAO recommande l'adoption de ce genre de pratique considérant qu'il permet une plus grande rétention de carbone (séquestration) (Boughalem, 2007).

✓ **Arboriculture**

L'érosion hydrique touche aussi les zones d'arboriculture. L'introduction d'arbres fruitiers est recommandée. Ils jouent un rôle de protection du sol contre l'érosion tout en apportant un revenu à la population riveraine.

Le choix des essences fruitières doit se faire en fonction des exigences agro-climatiques des espèces et des vœux des riverains.

La plantation et le développement d'arbres fruitiers (oliviers, amandiers) et agro-forestiers permettent d'apporter un soutien aux structures d'aménagement et une plus-value économique.

Pour l'érosion des vergers, on peut distinguer deux principaux types de gestion des inter-rangs qui correspondent à deux types de fonctionnement de l'érosion différents :

- lorsque le verger est désherbé chimiquement, le sol, tassé et imperméabilisé, est à l'origine de la formation du ruissellement qui, en se concentrant, peut provoquer des dégâts importants à l'aval ;
- lorsque les inter-rangs sont travaillés, le ruissellement est moins fréquent, mais s'il intervient, l'érosion décape facilement le sol ameubli, d'autant plus facilement que la pente est forte (Montier, 1998).

Certains agriculteurs, dont les vergers sont affectés depuis longtemps par l'érosion, ont mis en place des stratégies de lutte qui limitent efficacement les dégâts de l'érosion linéaire par enherbement des inter-rangs ou par la création de fossés de collecte des eaux de ruissellement. Il existe aussi plusieurs types de vergers avec des stratégies de culture qui varient avec le type d'arbre. Pour la région étudiée, nous avons des espèces rustiques telles que l'olivier, le figuier et le prunier. Et d'autres espèces non rustiques comme l'abricotier, le pommier qui sont localisées dans les zones où l'irrigation est possible.

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, les

stocker et les utiliser pour l'irrigation des terrasses aménagées, des arbres fruitiers. Au pied des arbres sont souvent confectionnées des cuvettes d'infiltration circulaires ou en demi lune avec l'utilisation du "mulching" en paille mais parfois aussi en pierres (Roose, 2008).

3.3. La lutte contre l'érosion

La lutte antiérosive peut s'organiser à partir de la couverture du sol (orientation des résidus de cultures, gestion des adventices, plantes de couverture au moment de la plantation, rotation avec la céréaliculture), de la gestion des eaux de surface (augmenter la rugosité du terrain, réduire la longueur des pentes par des lignes de résidus, bandes enherbées ou haies vives et pistes empierrées en contre pente), de la limitation du tassement du sol (réduction du travail du sol et des passages des ouvriers) et du drainage souterrain des bas de pente.

3.3.1. Les aménagements antiérosifs

Au delà des mesures agronomiques qui peuvent efficacement réduire les problèmes d'érosion, certains aménagements sont parfois nécessaires pour empêcher l'érosion en cas de fortes pluies. Ces aménagements sont le plus souvent des dispositifs paysagers qui permettent, quand ils sont bien implantés et en fonction du type d'aménagement retenu, de limiter les volumes de ruissellement et la concentration des eaux, et de mieux maîtriser l'écoulement des eaux à l'échelle du bassin versant.

3.3.1.1. Aménagements antiérosifs dans les ravines et les cours d'eau

Après leur concentration, les eaux de ruissellement sont évacuées par une multitude de filets liquides qui donnent naissance à de petits cours d'eau puis au cours d'eau principal.

L'aménagement d'un cours d'eau principal doit commencer par ses affluents. Ceci est réalisé par les ouvrages de petite hydraulique. Parmi ces ouvrages, on distingue les ouvrages de correction des lits d'oueds et de protection des berges tels que les seuils en pierres sèches, en gabions, en terre, en fascines ou encore en sacs de terre agencés, en grillage ou même des pneus usagés.

➤ Correction torrentielle par des gabions

La correction d'un torrent comprend une succession de seuils destinés à réduire la pente. Les travaux doivent commencer de la tête de la ravine vers l'aval.

Soumis à des pressions et à des compressions, grâce à leur flexibilité intrinsèque, les gabions métalliques se plient mais ne se cassent pas et leur structure conserve ainsi son efficacité. Le module étant déformable, il est à noter que tout changement dans la forme dû à un affaissement des fondations ou à une contrainte interne est un caractère fonctionnel et non un défaut. Le gabion s'adapte donc à de légers mouvements de terrain et, en se déformant, reste structurellement solide sans se fracturer.

Dans le bassin versant étudié, les ouvrages en gabions n'ont pas toujours l'efficacité souhaitée pour lutter contre l'érosion des berges. L'inefficacité partielle ou totale de ces ouvrages y est due à l'affaissement des fondations en raison des infiltrations de l'eau entre les gabions et la terre des berges, entre les fondations de l'ouvrage et le substrat (planche photographique.5a, 5b). C'est ainsi que parfois tout l'ouvrage se dégrade peu à peu.

➤ **Les aménagements en pierres sèches**

Souvent, pour dégager de l'espace et mettre la parcelle en culture, les paysans enlèvent les pierres présentes à la surface du sol. Celles-ci sont utilisées pour former des alignements en pierres sèches appelés cordons pierreux, avec de réels effets antiérosifs. Il s'agit de deux à trois niveaux de pierres rangées en courbe de niveau de façon à se renforcer l'une l'autre.

Ce cordon filtre les pailles, les fèces et diverses matières organiques flottantes, au point que les paysans considèrent que c'est là l'une de ses fonctions les plus utiles: garder en place la fertilité des sols.

Les cordons de pierres sont en principe installés perpendiculairement aux écoulements, mais pas forcément orientés perpendiculairement aux vents: ils ne piègent donc pas toujours les sables qui circulent en nappe en saison sèche (Roose, 1994).

On appelle seuils, les ouvrages placés en travers des oueds ou ravins qui permettent une correction de la pente du cours d'eau dans le but de réduire les vitesses d'écoulement au cours des crues (SOGETHA, 1968). La construction de seuils en pierres est une solution esthétique peu coûteuse mais qui exige du temps et des personnels qualifiés pour la récolte des pierres et le montage des murs.

Lorsqu'on dispose de gros blocs d'enrochement pratiquement inutilisables pour les gabions, il est possible de construire des aménagements filtrants dans les ravins et les petits cours d'eau pour stabiliser la pente. Ces ouvrages en enrochements peuvent être déversants et le sont nécessairement lorsqu'ils sont implantés en zone haute du bassin versant (Rabhi, 1997).

➤ **Les seuils en terre** (planche photographique 4.c)

Le seuil en terre, pour sa caractéristique de facilité d'adaptation et de simplicité d'exécution, est le premier type d'œuvre à prendre en considération lorsqu'on veut aménager un torrent (CRS, 1972).

Les raisons économiques qui conseillent l'adoption de ce type de seuil sont :

- la valeur des matériaux, pratiquement nulle puisqu'on utilise seulement les matériaux sur les lieux mêmes d'exécution du travail ;
- la facilité de trouver les matériaux nécessaires à l'exécution du travail.

Dans la région étudiée, 75% des gabions construits ont été affouillés ou emportés par l'eau et la plupart des seuils en terre présentent beaucoup d'anomalies : rupture des digues, affouillement des talus...) (planche photographique 5.b et 5.c).

Lorsque l'écoulement est important, l'ouvrage en terre doit être protégé par un seuil en pierre ou en béton complété par un coursier adapté à l'écoulement afin que le seuil en terre ne soit pas exposé aux affouillements.

Roose *et al.*, 1999 montrent à travers le tableau n°1 l'efficacité de divers types de seuils en Algérie.

Tableau n° 1 : Efficacité de trois types de seuils sur le ravinement (Roose et *al.*, 1999)

Type de seuil	en terre	en gabion	en pierres sèches	en grillage
Capture de sédiments	Très rapide	Rapide	Assez rapide	Assez rapide
Durabilité	Durable	Durable	Peu durable	Peu durable
Efficacité	Bonne	Assez bonne	Moyenne	Moyenne
Coût	Peu coûteux	Assez coûteux	Moins coûteux	Moins coûteux

3.3.1.2. Aménagements de versants en milieu cultivé

➤ Amélioration de l'infiltration

Le taux d'érosion est d'autant plus important que l'infiltration est faible. Or le taux d'infiltration commence à décroître lorsque le taux de la couverture végétale diminue. Une couverture végétale du sol adéquate peut donc favoriser l'infiltration hydrique et, par conséquent, minimiser les pertes en terre (Mazour & Roose, 2002).

La capacité d'infiltration des sols, très variable en fonction des types de sols, l'est encore plus en raison de l'évolution des états de surface au cours des pluies et de la battance des pluies sur la surface du sol qui entraîne une diminution de l'infiltrabilité par la formation d'une pellicule superficielle et favorise le ruissellement, donc la dégradation du sol par le ruissellement.

Améliorer l'infiltration de l'eau dans les parcelles, c'est garantir la réserve utile du sol et conserver les éléments nutritifs et les particules superficielles du sol. C'est par conséquent réduire les phénomènes d'érosion associés au ruissellement qui conduit aux inondations, aux pollutions et aux dégradations d'infrastructure.

Dans de nombreux pays, des études ont montré que les apports de matière organique sous forme de fumier, de compost ou de paille ont été utilisés avec succès pour protéger le sol contre l'énergie des pluies et comme fertilisant organique pour maintenir le stock en carbone du sol, sa structure et sa capacité d'infiltration (Boughalem, 2007). La végétation par l'apport de matières organiques, maintient la porosité de la surface du sol minéral assurant une meilleure pénétration verticale de l'eau.

Par ailleurs, les vers de terre améliorent aussi très sérieusement la capacité d'infiltration des sols où ils creusent leurs galeries. En introduisant la rotation culturale, en maintenant la litière, en réduisant la séquence des labours, ainsi que l'usage de pesticides et des herbicides, les activités bénéfiques de cette mésofaune pourraient être mieux respectées (Roose et *al.*, 1999).

➤ Travaux du sol

Les opérations culturales modifient l'état structural du sol, mais les conséquences vis à vis des possibilités d'infiltration diffèrent selon les techniques utilisées et leur date de réalisation par rapport aux périodes pluvieuses. Tout travail du sol visant à l'implantation des cultures, tel

que le labour et les semis, ou à la lutte contre les adventices, tel que le déchaumage et le binage, ont pour conséquence un accroissement instantané de la capacité d'infiltration. Cela constitue donc un frein au ruissellement en réduisant sa vitesse et par conséquent, sa force tractrice. Par ailleurs, outre les modifications de rugosité, le travail du sol modifie le ruissellement par rapport à la direction imposée par la plus grande pente. Dans le cas où la direction du travail du sol est perpendiculaire à la direction de la plus grande pente, la rugosité créée peut contribuer à stocker un important volume d'eau. Mais cette technique de travail du sol en suivant les courbes de niveau, souvent préconisée, est extrêmement difficile à mettre en œuvre dans des parcelles de forme rectangulaire allongée (planche photographique 6.a). En outre, la moindre ondulation topographique crée une accumulation d'eau en une série de points bas où la rupture brutale des billons peut être responsable d'une importante érosion.

D'une manière générale, le travail du sol augmente l'aération, la macroporosité et la rugosité superficielle du sol. Il améliore donc l'enracinement, permet l'enfouissement des résidus de récolte et améliore ainsi le statut organique du sol. L'accroissement de la rugosité superficielle et de la macroporosité du sol améliore également le stockage de l'eau de pluie dans l'horizon superficiel. Néanmoins, le travail du sol présente aussi des dangers :

- il améliore temporairement l'infiltration mais réduit la cohésion du matériau et, de ce fait, accroît les risques d'érosion et de glissement;
- il permet d'enfouir les matières organiques mais expose la surface du sol à la battance des pluies ;
- il accélère la minéralisation des matières organiques avec pour conséquence le départ du gaz carbonique dans l'atmosphère.
- et il engendre un déplacement des mottes de terre vers l'aval des versants par les outils aratoires (érosion mécanique).

Brenda (2006) signale que l'une des méthodes les plus recommandées de réduction des risques d'érosion est la diminution du travail du sol car le travail du sol pulvérise les agrégats en particules assez petites pour être emportées par le vent ou l'eau. Il fait également disparaître les résidus de surface qui protègent le sol. Pour diminuer les effets du travail du sol, on réduit le nombre de passages de la charrue, la vitesse et la profondeur de travail des instruments aratoires. Un sol cultivé présente cependant moins de risques d'érosion qu'un sol nu tassé. Le travail du sol et le billonnage, sur les zones cultivées de pente inférieure à 15 %, ont une influence très marquée sur le risque de ruissellement : ces techniques retardent le déclenchement du ruissellement et augmentent l'infiltration. (Morsli et *al.*, 2004).

➤ Matière organique

Larouche (1983), Cline (1992), Frick et *al.* (2006) et MacDonald (2005) ont montrés bienfaits de la matière organique (MO) du sol : elle produit les majeures parties de l'azote, du phosphore et du soufre absorbés par les plantes et elle est une source de nourriture pour les organismes vivants du sol. Les matières organiques assurent également la cohésion des autres constituants du sol entre eux et contribuent à la structuration du sol et à sa stabilité (Boiffin et Fleury, 1974 in Balesdent, 1996). Cette cohésion est due au grand nombre de liaisons électrostatiques (surtout de liaisons faibles) que les matières organiques peuvent assurer. C'est ainsi que les matières organiques peuvent augmenter l'aération, la pénétration des racines,

l'infiltration de l'eau, la résistance au compactage, diminuer la battance du sol, aider le sol à garder l'eau et surtout limiter les risques d'érosion et de perte en sol.

Or, à court terme, la matière organique enfouie ne réduit nettement ni le ruissellement, ni l'érosion (Barthes et *al.*, 1997). Mieux vaut la maintenir à la surface du sol, gérer les adventices et favoriser les activités de la mésofaune, de manière à protéger efficacement la surface du sol contre l'énergie des pluies et du ruissellement (Roose, 1994).

➤ **Les cordons pierreux**

Le but des cordons pierreux est de ralentir le ruissellement de l'eau pour limiter l'érosion et favoriser l'infiltration. Cette technique est adaptée aux pentes faibles à moyennes sur un sol sablo-argileux ou gravillonnaire.

On dispose perpendiculairement à la pente des murets de pierre de 25cm de haut. Si l'on ajoute de la fumure, la production de céréales et de fourrure peut être augmentée de 20%.

Cette méthode est efficace pour des précipitations inférieures à 800mm.

➤ **Banquette antiérosives**

Une banquette antiérosive est un fossé de 70cm de profondeur avec un bourrelet de terre, qui suit les lignes de niveau du terrain. Les banquettes sont espacées d'une trentaine de mètres. Le principe est le même que celui des cordons pierreux: les Banquettes forment un obstacle à l'écoulement de l'eau, elles limitent donc l'érosion et favorisent l'infiltration. Creuser des Banquette antiérosives demande cependant un travail considérable. Il faut à une personne seule une journée entière pour creuser une dizaine de mètres. Ces projets doivent donc être menés à l'échelle d'une communauté ou d'un village.

➤ **La technique des terrasses**

Les terrasses sont formées de murs d'appui en pierres construits sur une pente, à l'amont desquels un remplissage de terre permet l'infiltration des eaux de pluie (planche photographique 4.a). Lorsque le terrain devient vulnérable à l'érosion hydrique, Planhol et Rognon (1970), Mainguet (2003) indiquent qu'au dessus d'une pente de 8°, commence généralement le domaine des terrasses pour décomposer des pentes considérées comme trop fortes. Elles constituent aussi un moyen de concentrer le ruissellement permettant aux récoltes de franchir la saison sèche. Quand ce ruissellement est élevé, le trop-plein d'eau se déverse sur la terrasse sous-jacente. En milieu sec, elles sont un moyen efficace pour empêcher la fuite de l'eau et des sols. Favorisant l'infiltration de l'eau, elles améliorent l'humidité des sols donc le rendement agricole. Elles assurent aussi une recharge des puits sur les sites aménagés. Trois facteurs naturels, la géologie, la pente et l'eau, déterminent la construction des terrasses, ils sont décrits par Léonard et Dumas (2002).

➤ **Techniques culturales simplifiées**

Lorsqu'il est question de réduire l'érosion par une modification des pratiques, il est souvent fait référence aux techniques culturales simplifiées (TCS) associées à une couverture végétale des intercultures. Ces techniques couvrent une large gamme, allant du semis direct sans aucun travail du sol à des itinéraires techniques faisant succéder plusieurs opérations de travail du

sol à des profondeurs variables avant le semis. Le seul point commun entre ces différents itinéraires techniques est de ne jamais labourer le sol.

- Semis sans labours

Les systèmes de gestion des terres cités précédemment sont fondés sur le travail du sol. Les objectifs de ce dernier sont l'enfouissement des débris et des résidus, l'ameublissement de la couche arable, la maîtrise des mauvaises herbes, la formation du lit de semences ; la répartition de la terre fine et des mottes ; le nivellement du sol. Toutefois, l'ensemble de ces objectifs peut être réalisé par un semis direct, sans travail du sol.

Alors que le labour améliore temporairement l'infiltration, il expose le sol nu à l'agressivité des pluies et réduit sa cohésion. Le semis direct sous litière est une tentative de se rapprocher du milieu naturel où le sol reste couvert et protégé de l'agressivité des pluies (ROOSE E., DE NONI G., LAMACHERE J-M – ORSTOM).

Les effets positifs du non-labour sur le sol ne sont perceptibles qu'au bout de quelques années. Il y a plusieurs types de non-labour :

- Le non-labour profond (15 à 30 cm) : il est réalisé avec des outils à dents à plus de 15 cm de profondeur.
- Le non-labour superficiel (2 à 15 cm) est réalisé le plus souvent à moins de 10 cm avec des déchaumeurs par exemple. Il peut être très superficiel (2 à 5 cm) quand il est réalisé avec des outils rotatifs.

Dans le cas du semis direct, le sol n'est pas travaillé ou alors seulement sur la ligne de semis et superficiellement.

Le semis direct repose sur trois principes : le non-travail du sol, le couvert permanent par des résidus de culture ou par des cultures intercalaires et la rotation des cultures. Le non-labour permet de ne pas enfouir les résidus végétaux afin de constituer un mulch en surface et de ne pas dégrader la structure du sol en conservant les agrégats argilo-humiques. Les couverts protègent physiquement le sol de l'impact de la pluie et d'un réchauffement excessif. Ils sont de plus à la source de la nutrition du sol en carbone, en azote et en phosphore (Laurent et al., 2011).

Le semis direct, un des outils de la lutte contre le ruissellement

Dans les régions soumises à de fortes intensités de pluies ou sur des sols vulnérables, le semis direct est tout d'abord un moyen de limiter l'érosion (Minella et al., 2009) : le non-labour permet de garder un mulch en surface (Bayer et al., 2006 ; Calegari et al., 2008). Ce sont les résidus de culture qui, en se décomposant, accroissent la teneur en matière organique du sol et donc la fertilité (Derpsch et al., 1986; Sisti et al., 2004 ; Maia et al., 2010 in Laurent et al., 2011).

Dans un système bien mené, une partie significative de la production de biomasse doit être laissée au champ, à des valeurs en matières sèches proches de 4 à 6 t.ha⁻¹.an⁻¹ (Bollinger et al., 2007). Le couvert limite l'effet de splash des gouttes de pluies, amortit le passage des engins (Séguy and Bouzinac, 2001) et améliore la structure du sol par l'accroissement de l'activité biologique. A moyen terme (de trois à dix ans), la faune du sol est activée par l'abondance de matière organique en surface et les galeries creusées par les vers de terre créent une porosité

favorisant l'infiltration de l'eau aux dépens du ruissellement (Derpsch et *al.*, 1986 in Laurent et *al.*, 2011). La réserve en eau du sol se trouve accrue d'autant que le *mulch* limite l'échauffement du sol et réduit ainsi l'évaporation (Bollinger et *al.*, 2007).

➤ **La gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES)**

Il est apparu clairement que la conservation des sols qui se limite à réduire le tonnage de terre emportée par l'érosion ne pouvait satisfaire les paysans des régions tropicales.

En effet, les spécialistes ont proclamé longtemps qu'il faut conserver les sols pour maintenir la productivité des terres, "protéger le patrimoine foncier pour les générations futures" - (titre de la cinquième Conférence ISCO à Bangkok, (Rimwanich 1988 in Roose, 1994). C'est un devoir social et un investissement à long terme !

Les paysans (plus ou moins forcés) ont accepté de déployer des efforts considérables pour aménager leurs terres contre l'érosion, mais ils ont été déçus de constater que la terre continuait à se dégrader et les rendements des cultures à décroître. Les structures antiérosives imposées (fossés, banquettes de diversion, diguettes) ont souvent réduit la surface cultivable (de 3 à 20 %) sans pour autant améliorer la productivité des parcelles "protégées". Si on veut motiver les paysans, conserver les sols en place ne suffit pas: il faut gérer l'eau et restaurer simultanément la fertilité des sols pour augmenter significativement les rendements de ces sols tropicaux déjà très pauvres pour la plupart (en particulier les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, sableux en surface).

A la fin des années 80, de nombreuses critiques de chercheurs, de socio-économistes et d'agronomes se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches d'aménagement hydraulique menées trop rapidement sans tenir compte de l'avis des populations (Lovejoy et Napier, 1986 in Roose, 1994).

Aux Etats Unis, malgré 50 ans de travaux remarquables des services de conservation de l'eau et des sols (CES) et des millions de dollars investis chaque année, 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an, limite de tolérance sur les sols profonds. Pour améliorer l'efficacité de la démarche purement volontariste des paysans souhaitant protéger la productivité de leurs terres, l'Etat a promulgué des lois (sur la mise en culture des prairies, des marais et des terres fragiles), contraignant l'agriculteur à respecter des règles d'aménagements conservatoires.

Au Maghreb et en Afrique de l'Ouest, les paysans préfèrent souvent abandonner les terres aménagées par l'Etat plutôt que d'entretenir des moyens de protection dont ils ignorent l'objectif et la propriété (Heusch, 1986 in Roose, 1994).).

Les raisons évoquées de ces échecs partiels sont multiples (Marchal, 1979; Lefay, 1986, Reij *et al.*, 1986 in Roose, 1994).):

- choix de techniques peu adaptées au sol, au climat, à la pente;
- mauvaise planification ou réalisation peu soignée ou absence de suivi et d'entretien;
- absence de préparation des bénéficiaires et rejet du projet à cause d'une perte de surface non compensée par l'augmentation des rendements;
- désorganisation des unités de production (parcelles morcelées et isolées).

Une stratégie fondée sur le développement agricole

Devant ces échecs, il fallait développer une nouvelle stratégie qui prenne mieux en compte les besoins des gestionnaires des terres, tant paysans qu'éleveurs, en proposant des méthodes qui améliorent à la fois la capacité d'infiltration du sol, sa fertilisation et les rendements, ou mieux, la marge bénéficiaire des paysans (Roose 1987). Cette méthode a été appelée "Land Husbandry" par Shaxson et Sanders en 1988, et "La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols" par Roose en 1987.

La GCES prend pour point de départ, la façon dont les paysans ressentent les problèmes de dégradation des sols et comporte trois phases (Roose, 1994):

1° **Des dialogues préparatoires** entre paysans, chercheurs et services techniques. Cette phase comprend **deux enquêtes** pour localiser les problèmes, évaluer leur importance, leurs causes et les facteurs sur lesquels on va pouvoir jouer pour réduire le ruissellement et l'érosion. Elle comporte aussi des "tours de terroir" avec la communauté villageoise pour développer leur sens de la responsabilité communautaire et découvrir la façon dont ils ressentent les problèmes de dégradation et les stratégies qu'ils mettent déjà en œuvre pour améliorer l'usage de l'eau, entretenir la fertilité des sols, renouveler la couverture végétale et maîtriser la divagation du bétail. L'enquête porte aussi sur les contraintes socio-économiques, facteurs limitant, statut foncier, crédit, formation et disponibilité en main d'œuvre.

2° **Des expérimentations sur les champs** sont mises en place chez les paysans pour quantifier et comparer les risques de ruissellement ou d'érosion et les gains de rendement sous différents types de mise en valeur ou de technique culturale améliorée. Il s'agit d'établir un référentiel et de vérifier la faisabilité, la rentabilité et l'efficacité des méthodes antiérosives préconisées: l'évaluation doit être faite conjointement par les paysans et les techniciens.

3° Enfin, **un plan d'aménagement global** doit être défini après 1 à 5 ans de dialogue pour intensifier rationnellement l'exploitation des terres productives, pour structurer le paysage et pour fixer les ravines, stabiliser les terres en privilégiant les méthodes biologiques simples et maîtrisables par les paysans eux-mêmes. Rien ne peut se faire sans l'accord préalable des paysans amenés à gérer l'ensemble de leur terroir.

En fonction des conditions socio-économiques locales (gros propriétaires à la pointe du progrès ou petits paysans luttant pour leur survie), les solutions seront bien différentes, même si le milieu physique est le même. Là, se trouve une différence majeure des approches développées jusqu'ici: la diversité des solutions en fonction des conditions humaines.

Conclusion partielle

Le ruissellement est le résultat d'une combinaison complexe de facteurs qui interagissent. Alors que certains ne sont pas maîtrisables, comme la texture du sol ou le régime des précipitations, il est possible d'agir sur d'autres facteurs tels que la couverture du sol ou le microrelief. La couverture du sol par exemple a pour effet de réduire le ruissellement et cette couverture peut être raisonnée par l'exploitant sur les parcelles à risques. Le maintien de cette couverture végétale est une condition essentielle de la durabilité des systèmes de culture.

Dans le bassin versant de l'Oued Isser, si l'érosion est importante à cause de la fragilité du milieu physique et de l'agressivité climatique, il semble que l'influence du mode de gestion des terres devient de plus en plus déterminante depuis la persistance de la sécheresse au cours des vingt dernières années. (Morsli et al., 2004)

Le système de culture est le facteur le plus important où l'homme peut intervenir pour protéger et améliorer la productivité de la ressource en sol (Morsli et al., 2004).

Ce chapitre débute donc par une description des modes de gestion pratiqués dans la zone d'étude. Il présente ensuite l'impact de cette gestion sur la production des céréales et sur l'écosystème. Les modes de gestion appliqués dans la région ne suivent plus l'évolution bioclimatique du milieu naturel ce qui accentue les processus de dégradation des terres. Ces systèmes de gestion, basés sur le labour des terres, réduisent plus encore le couvert végétal pendant le début de la saison des pluies, modifient la structure, la perméabilité et la résistance des sols à l'érosivité des pluies. Le semis direct sous litière est par contre, une tentative de se rapprocher du milieu naturel où le sol reste couvert et protégé de l'agressivité des pluies. Seule une gestion appropriée peut réduire le ruissellement qui vient des versants et compenser les pertes en fertilité et enrichir le sol (cas des cultures en billons et des jachères mises en défens). Ces dernières s'avèrent intéressantes pour la production de la biomasse et pour la séquestration du carbone dans le sol. Une telle utilisation pourrait assurer un équilibre durable entre la conservation de la fertilité et la productivité du sol.

Il apparaît donc, à la lumière de ces résultats, qu'on peut suggérer certaines recommandations et propositions qui peuvent améliorer la qualité de drainage et d'infiltration des différentes unités du bassin versant et, par conséquent, diminuer le ruissellement et la perte de sol :

- Encourager la population à la culture en courbe des niveaux surtout sur les versants de forte pente, qui offre la possibilité de stabiliser les sols ;
- Sensibiliser la population maraîchère contre certaines méthodes d'exploitation inadéquates (labour dans le sens de la pente) ;
- Exhorter les habitants à une bonne gestion de leur eau, en préconisant l'engazonnement des parcelles et la gestion des eaux de ruissellement.

Pour lutter contre le ruissellement et les pertes en terres, certains aménagements antiérosifs (en milieu cultivé dans les ravines et les cours d'eau) ont été analysés. L'apport des aménagements agro-sylvo-pastoraux dans le bassin versant où les risques d'érosion sont les plus intenses aura d'autant plus d'efficacité que les caractéristiques physiographiques du milieu d'étude sont bien connus. Quelles sont alors les caractéristiques morphométriques, climatiques et socio économiques de la zone d'étude ? La réponse à cette question fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4

CHOIX D'UNE REGION, D'UN BASSIN VERSANT ET D'UN SITE D'ETUDE

Au niveau du bassin versant de l'oued Isser, l'agriculture reste, pour les autochtones, la principale source des revenus. Cette agriculture reste largement extensive car l'attachement des paysans aux pratiques traditionnelles et la pauvreté y constituent des obstacles à la diffusion des techniques de gestion conservatoire visant l'amélioration de la fertilité des sols. Une dégradation continue des sols limite donc le développement agricole de la région.

Par ailleurs, la compréhension des phénomènes de ruissellement et d'infiltration est encore incomplète, bien qu'elle ait déjà fait l'objet de nombreuses études (Boughalem, 2007 ; Chebbani, 2006 ; Mazour, 2004).

Cela vient très probablement du fait que les paramètres explicatifs de ces phénomènes, cruciaux pour la compréhension du bilan hydrique des sols, sont essentiellement connus à l'échelle locale et que leur estimation reste difficile à l'échelle du bassin versant. La modélisation hydrologique à l'échelle d'un bassin versant (1 à plusieurs milliers de km²) est donc un enjeu scientifique important qui nécessite l'appréhension des paramètres du bilan hydrologique des sols à une échelle spatiale, celle du bassin versant, qui dépasse de très loin l'échelle à laquelle sont mesurés les paramètres du bilan hydrologique des sols (du mètre carré à l'hectare).

L'érosion hydrique, associée au ruissellement, est favorisée par les pratiques culturelles de déforestation et d'agriculture non adaptées aux conditions physiographiques locales (pente, sol, climat). Ceci est d'autant plus vrai pour les terrains fragiles, soumis à des précipitations intenses, qui couvrent le bassin versant de l'oued Isser.

Les phénomènes de dégradation des sols peuvent cependant être combattus, sur ce bassin versant, par une meilleure maîtrise de l'occupation des sols et des pratiques culturelles adaptées aux risques de dégradation. Bien entendu, une meilleure occupation des sols et une amélioration des pratiques culturelles ne peuvent être envisagées sans une bonne appréhension des caractéristiques physiographiques du bassin versant.

Ce chapitre présente donc la zone d'étude, ses caractéristiques morphométriques, climatiques, sociales et économiques qui ont fait de cette région une des zones à risque érosif très fort.

4.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à l'intégralité du bassin versant de l'oued Isser pour l'étude qualitative du bassin. Néanmoins, pour ce qui est des analyses de terrain, seule la partie amont du bassin sera étudiée, cette partie correspondant à un tiers amont du bassin, soit 380 km² sur 1122 km² au total.

4.1.1. Situation géographique

Le bassin versant (BV) de l'Isser se situe au nord ouest algérien, entre les longitudes 1° 20' 31" W et 0° 52' 28" W et les latitudes 34° 41' 22" N et 35° 9' 37" N. Il s'étend sur une superficie de 1122 km² pour un périmètre de 207,7 km (fig.12).

Affluent rive droite de l'oued Tafna, l'oued Isser est long de 81 km. Il prend sa source à Ain Isser au sud d'Ouled Mimoun. En aval, la limite du bassin coïncide avec le barrage El Izdihar d'une capacité de 110 Hm³.

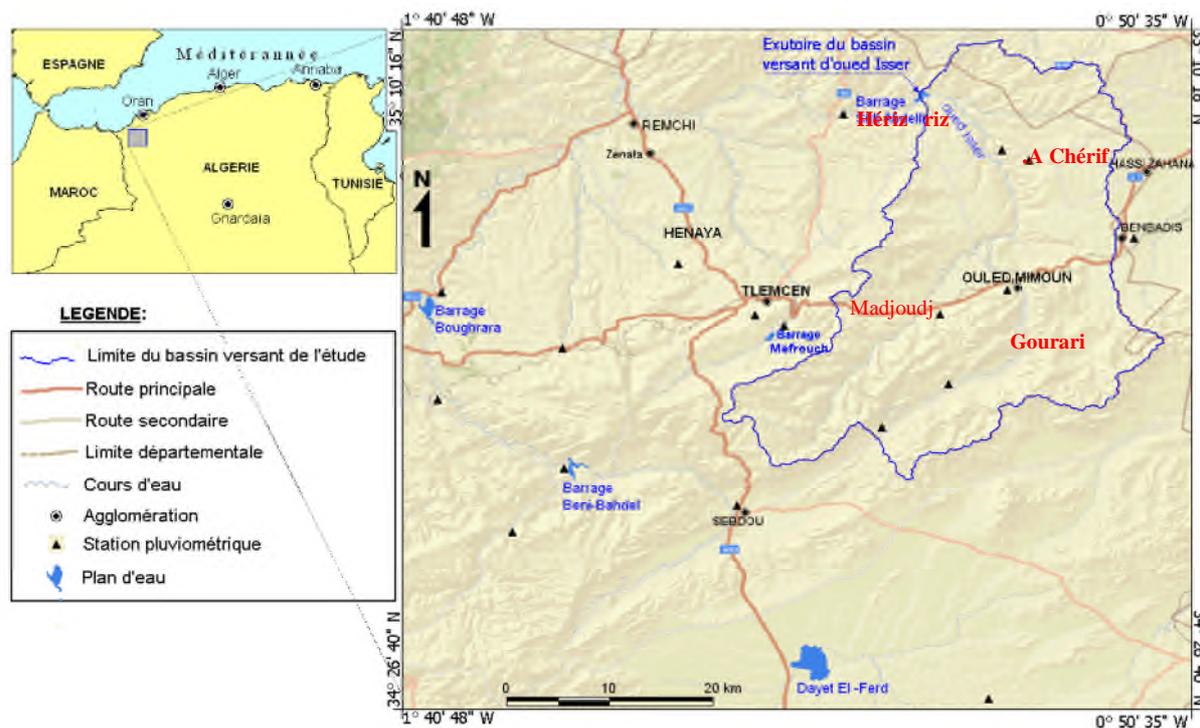


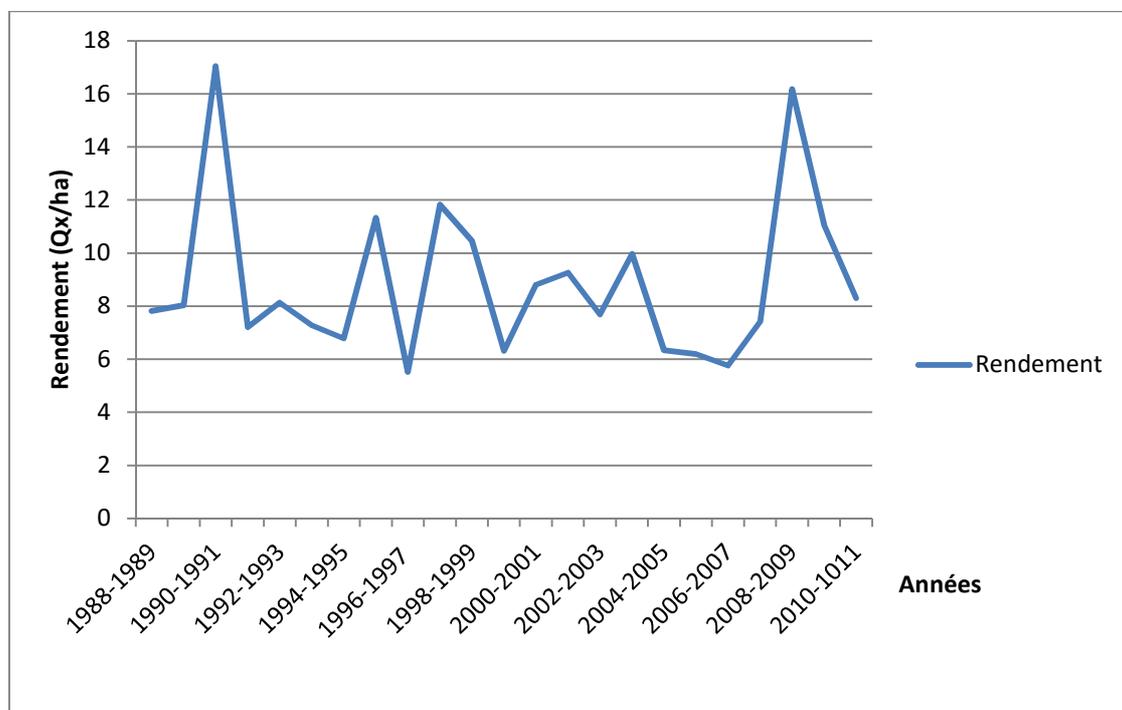
Figure n°12 : Carte de situation de la zone d'étude avec les stations pluviométriques

Cette entité hydrographique est caractérisée par trois zones distinctes. Au nord, une zone de collines à pente moyenne (15 à 30%) est localisée sur des marnes miocènes. Dans cette zone ont été implantées les stations agronomiques expérimentales de Hériz et A Chérif sur sol brun calcaire à caractère vertique, où furent comparés différents systèmes de gestion des terres : jachères pâturées ou en défens, cultures de blé traditionnelle et intensive, cultures de légumineuses, cultures associées (vesce avoine, etc.).

La zone médiane du bassin correspond aux plaines où les pentes sont douces, inférieures à 10%. C'est dans cette zone que se déposent les particules solides charriées par l'oued Isser. La zone sud du bassin présente un relief montagneux escarpé, fortement disséqué, de fortes pentes (supérieures à 30%) et un réseau de drainage dense. Cette zone se situe sur des calcaires jurassiques (Madjoudj sur sol brun calcaire sur roche calcaire) et des terrains gréseux du jurassique (Gourari sur sol rouge fersialitique).

Dans la région, le système de production repose principalement sur une céréaliculture, souvent associée aux élevages ovin et caprin sur les terres de parcours. Ce système de production vise à assurer l'autosuffisance alimentaire des paysans. Ce mode de gestion des terres n'est cependant pas viable tant sur le plan économique qu'écologique. Les rendements sont faibles, souvent inférieurs à 10 quintaux par hectare, sur des sols pauvres en nutriments (graphique.1). En traction mécanisée, pour des raisons de facilité d'exécution et de stabilité du tracteur et des outils tractés, les labours sont généralement effectués dans le sens de la pente. Ce système de production s'est développé à une époque au cours de laquelle la disponibilité en terre était le principal facteur limitant de la production agricole, ce qui explique le

caractère extensif de ce système. Mais l'augmentation rapide de la population et l'utilisation de tracteurs de plus en plus puissants ont favorisé le défrichement des terres sur de fortes pentes.



Graphique n°1: Evolution du rendement céréalier à Sidi Abdelli de 1989 à 2011 (DSA, Tlemcen).

Sachant que la réduction sensible de l'érosivité des pluies sur les sols est nettement observable à partir d'un couvert végétal supérieur à 30 % (Mabit et *al.*, 2002), on peut en déduire que la culture des céréales ne protège efficacement le sol qu'à partir du mois de mars, quand le taux de recouvrement végétal dépasse 30 %, et jusqu'au mois d'août, quand la récolte du blé a été réalisée. Pour une culture céréalière, la protection du sol n'est donc assurée que pendant cinq à six mois, à partir du mois de mars. Après les semis qui sont pratiqués au cours des mois de novembre ou décembre et jusqu'au mois de février, la végétation n'est pas assez couvrante pour protéger efficacement le sol contre une dégradation de sa structure sous l'impact des gouttes de pluies. Les principaux problèmes érosifs découlent de cette exposition de sols nus à l'agressivité des pluies pendant la période de l'année la plus pluvieuse. Ces problèmes érosifs sont renforcés par des pratiques culturales associées à la céréaliculture extensive.

Les habitants de la région pratiquent des cultures annuelles de faible productivité (céréales et légumineuses), parmi lesquelles le blé se place au premier plan en termes de surfaces cultivées et de production. L'orge et les légumineuses viennent en seconde et troisième place car elles servent aussi à l'alimentation du bétail. La faible quantité de fumure produite sur

place ne suffit pas à amender les terres. Pour pallier à la réduction de la fertilité des terres, la tendance à utiliser des engrais chimiques est de plus en plus affirmée.

Le bassin versant de l'Isser, un lieu d'étude sur l'érosion des sols cultivés

Le bassin versant de l'oued Isser a été choisi comme lieu d'étude en raison de ses caractéristiques physico-climatiques représentatives de la zone telliennes méditerranéennes pour des raisons d'accès (routes et pistes d'atterrissage) et de la quantité d'informations concernant ce site.

Ses caractéristiques naturelles font de cette région une des zones à risque érosif très fort. C'est un bassin instrumenté par l'Université de Tlemcen et doit servir de site pilote pour mieux comprendre les phénomènes d'érosion, grâce à l'acquisition de données hydrologiques in situ. Il est au centre d'une étude multidisciplinaire intégrée pour comprendre les phénomènes associés à l'érosion. Environ 50 km à l'est de Tlemcen, en amont du barrage Izdihar près de Sidi Abdelli, dix sept parcelles expérimentales furent installées fin 1989 dans les principales stations écologiques du bassin versant de l'Isser (Gourari, Madjoudj, Boubakhla-Hériz et Sidi Ahmed Chérif).

On compare, dans cette étude, le comportement d'un témoin absolu (sol nu travaillé dans le sens de la pente) à un témoin régional (ici un système de production agropastoral traditionnel de blé- jachère travaillée) et à un système amélioré.

4.1.2. Caractéristiques morphométriques

La morphométrie des bassins versants est le principal facteur qui commande le degré des ruissellements et la gravité des crues à côté bien sûr de sa couverture végétale. Un bassin allongé ne réagit pas de la même manière qu'un bassin ramassé, aussi un profil en pente du talweg principal du bassin n'a pas la même réaction qu'un autre de plaine.

Pour caractériser notre bassin d'étude nous avons regroupé tous les paramètres morphométriques dans le tableau 2 ci-dessous :

Tableau n°2: Paramètres morphométriques du bassin versant de l'Isser (Terfous et al, 2003)

Paramètres physiques	Symboles	Unité	Valeurs
Superficie	S	km ²	1122
Périmètre	P	Km	207
Indice de compacité	Kc	/	1.64
Densité de drainage	Dd	km/km ²	0.94
Altitude maximale	Hmax	M	1625
Altitude minimale	Hmin	M	275
Altitude moyenne	Hmoy	M	880
Indice de pente	Ip	%	0.123
Indice de pente global	Ig	%	0.0125
Coefficient de torrentialité	Ct	/	2.1
Temps de concentration des eaux	Tc	H	13.5

Les caractéristiques morphométriques sont expliqués par deux paramètres : la forme et le relief.

4.1.2.1. Forme du bassin

- **Indice de compacité « K_c » (indice de Gravelius)**

Différents indices de forme sont proposés pour comparer les bassins versant et estimer certaines de leurs caractéristiques hydrologiques. L'indice auquel il est le plus généralement fait référence est l'indice de compacité, dit de Gravelius.

Ce coefficient est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin.

$$K_c = P / 2 \Pi R \text{ Avec } A = \Pi R^2.$$

Sachant que P est le périmètre et A la surface du bassin.

Ce coefficient est donné finalement par la relation suivante.

$$K_c = 0,28P / \sqrt{A}$$

Ce coefficient est égal à 1 lorsque le bassin est parfaitement circulaire car le cercle est l'élément le plus compact.

Cette valeur croîtra au fur et à mesure que la compacité du système diminue et peut aller à 1,1128 dans le cas d'un bassin carré, puis la valeur 3 pour les bassins très allongé.

L'indice de compacité K_c de l'Isser.

$$K_c = 1,64$$

On peut dire que le bassin versant de l'Isser est d'une forme plutôt allongée.

- **Rectangle équivalent**

La notion du rectangle équivalent appelée aussi rectangle de Gravelius est une transformation purement géométrique en vertu de laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie.

De cette façon, les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits cotés du rectangle, et l'exutoire est l'un de ces petits côtés.

En effet le rectangle équivalent permet de comparer les différents bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

$$L = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \frac{\sqrt{1 - (1,12)^2}}{K_c} \right)$$

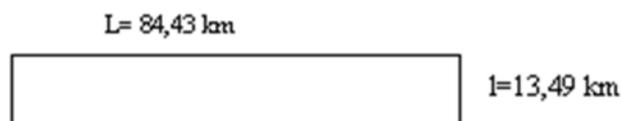
L = longueur du rectangle équivalent

l = largeur du rectangle équivalent

A= la surface égal à L x l (Km²)

P = le périmètre = 2(L+l). (Km).

Ainsi, pour ce qui est du bassin versant de l'Isser, la longueur équivalente L est selon (Bouziane, 1992) égale à 84,43 km et la largeur équivalente a été déduite : $l = A/L = 13,49$ km.



4.1.2.2. Paramètres de relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin.

La plus part des facteurs météorologiques (précipitations, températures) et hydrologiques sont fonctions de l'altitude.

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle détermine l'état du bassin vis-à-vis de son potentiel érosif ; et le reflet de l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin d'après Strahler in Llamas (1993).

- **Répartition altimétrique.**

Cette dernière (Tableau. 6) est obtenue à partir de la planimétrie des superficies partielles situées entre deux courbes de niveaux voisines.

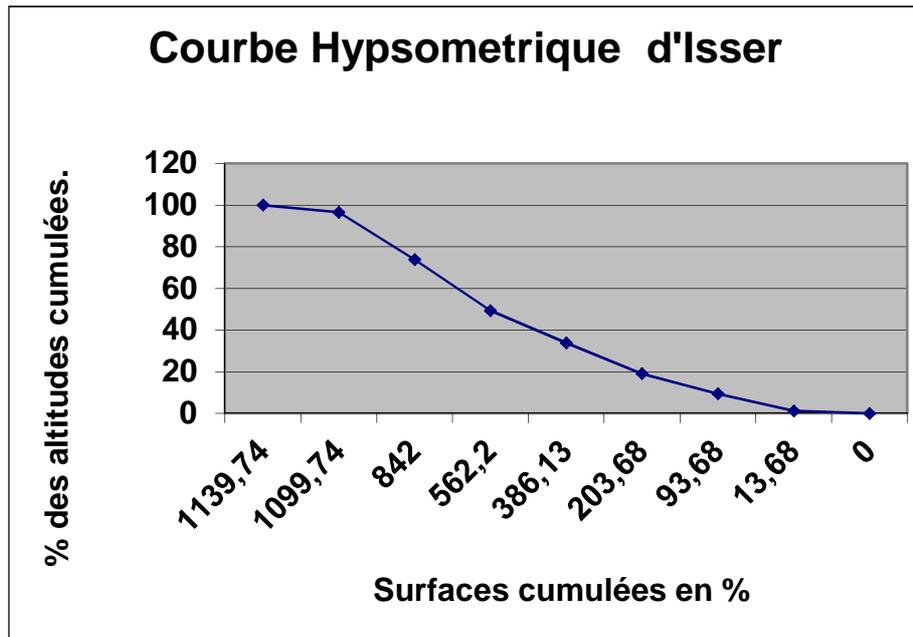
Tableau n°3: Répartition altimétrique de la zone d'étude (Source : CSR, 1972)

Altitudes (m)	Surfaces partielles (Km ²)	Surfaces cumulées (Km ²)	% des altitudes	% des altitudes cumulées.
1625	0	0	0	0
1625-1600	13,68	13,68	1,20	1,20
1600-1400	80,00	93,68	8,22	9,42
1400-1200	110,00	203,68	9,65	19,07
1200-1000	182,45	386,13	14,81	33,88
1000-800	176,07	562,20	15,45	49,33
800-600	279,80	842,00	24,50	73,87
600-400	275,14	1099,74	22,62	96,5
400-275	17,43	1139,74	3,5	100

On remarque que 75% de la superficie du bassin est située en dessous de 1000m d'altitude, et les 25% sont entre 1000 et 1200 m d'altitude.

- **Courbe Hypsométrique.**

La courbe s'obtient en portant en abscisse les surfaces cumulées et en ordonnées les altitudes cumulées correspondantes.



Graphique n°2: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Isser

L'allure de la courbe hypsométrique (Graphique. 2) indique l'état allant vers l'équilibre du bassin avec un potentiel érosif assez important. Elle permet de déduire les altitudes suivantes du bassin versant.

- Altitude minimale : $H_{\min} = 275$ m.
- Altitude maximale : $H_{\max} = 1625$ m.

- **Etude de la pente** (fig.13 A)

La pente joue un rôle important en hydrologie, car elle influe directement sur l'infiltration et le ruissellement. Certains auteurs ont établi des fonctions de puissance entre le gradient de pente et l'érosion en nappe (Govers, 1991).

- **Indice de pente de Roche (Ip)**

Il est déterminé à partir des valeurs du rectangle équivalent, par la relation suivante.

$$I_p = 1/\sqrt{L} \sum_{i=1}^n X_i \sqrt{B_i(a_i - a_{i-1})}$$

B_i = Fraction de la surface totale compris entre les côtes a_i et a_{i-1} .

x_i = Fraction de la longueur du rectangle équivalent (Km)

L = Longueur du rectangle équivalent (Km).

a_i et a_{i-1} = Côtes.

- **Indice de pente globale (Ig)**

Cet indice s'exprime par la formule suivante :

$$I_g = D/L$$

D = Dénivelée (m)

L = Longueur du rectangle équivalent.

Il indique la pente moyenne dans une tranche altimétrique comprise entre l'altitude à 5% et 95% de la surface cumulée tirée à partir de la courbe hypsométrique.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%}$$

L'indice de pente globale (I_g) sert aussi à classer le relief (tableau.4) d'après une classification de l'ORSTOM (Laborde, 2000), qui peut être appliquée à tout bassin quelle que soit sa superficie. Elle dérive aussi de la pente globale (I_g) en corrigeant l'effet de la surface admis inversement proportionnel à \sqrt{A} :

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

- **La pente moyenne**

C'est le rapport de la dénivelée totale du rectangle équivalent sur sa longueur.

$$I_m = D_r / L$$

D_r = dénivelée totale du rectangle (m)

L = longueur du rectangle équivalent

Tableau n°4 : Classification du relief (Ig) selon l'IRD (Bouanani, 2004)

Relief	Valeur de Ig
1 Relief très faible	$Ig < 0,002 \text{ m/km}$
2 Relief faible	$0,002 < Ig < 0,005$
3 Relief assez faible	$0,005 < Ig < 0,01$
4 Relief modéré	$0,01 < Ig < 0,02$
5 Relief assez fort	$0,02 < Ig < 0,05$
6 Reliefs forts	$0,05 < Ig < 0,5$
7 Relief très fort	$0,5 \text{ m/km} < Ig.$

- **Dénivelée spécifique Ds**

Elle permet aussi à classer le relief (tableau.5) et s'obtient par la formule suivante :

$$Ds = Ig \cdot A^{1/2}.$$

Ig = indice de pente globale (m/Km)

A = Aire du bassin (Km)

Tableau n° 5 : Classification du Relief en fonction de Ds (Bouanani, 2004)

Ds < 10	Relief très faible.
10 m < Ds < 25 m	Relief faible.
24 m < Ds < 50 m	Relief assez faible
50 m < Ds < 100 m	Relief modéré
100m < Ds < 250 m	Relief assez fort
250 m < Ds < 500 m	Relief fort
500m < Ds	Relief très fort

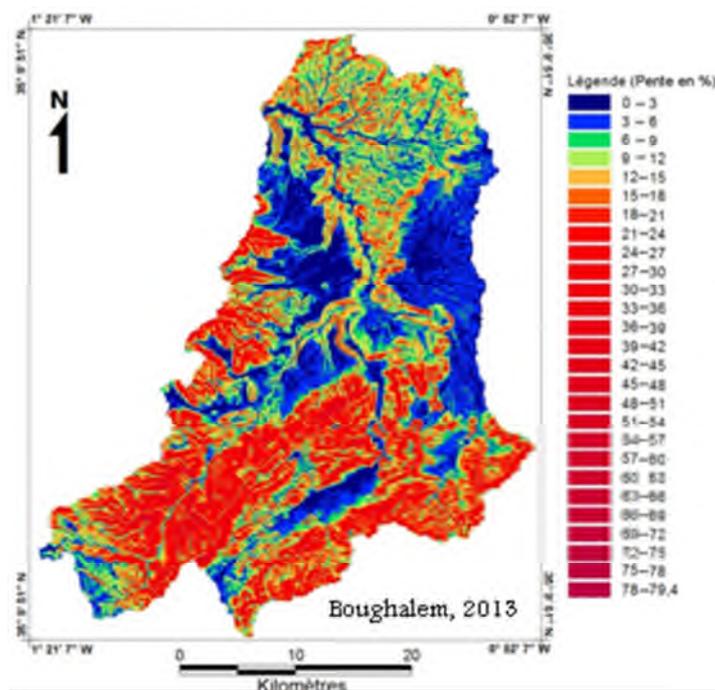
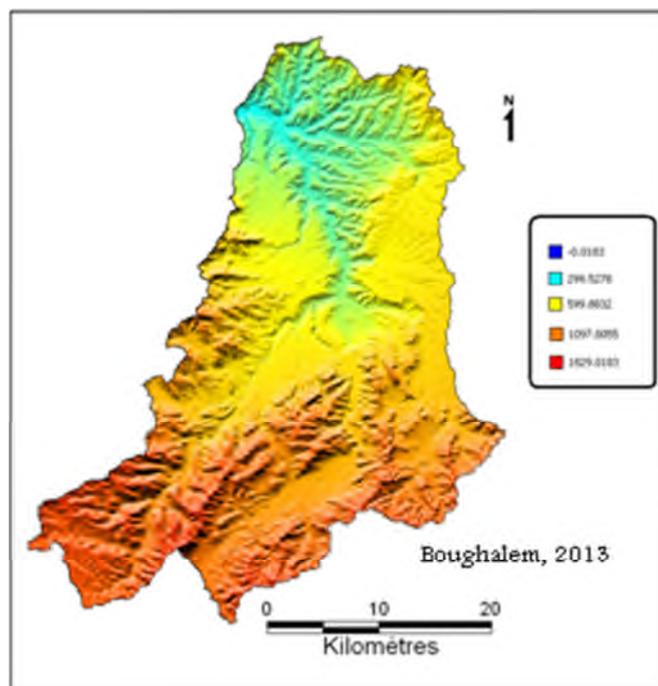
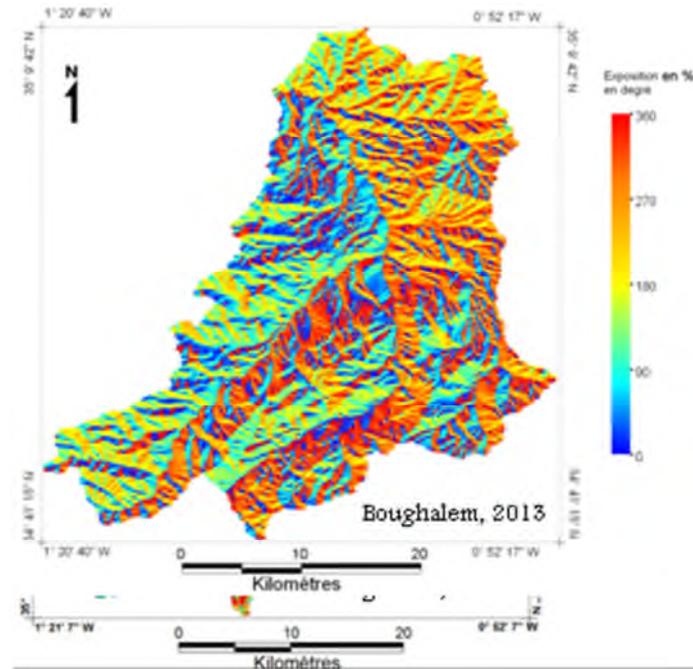


Figure n° 13: contexte physiographique du (BV) de l'Isser : A. Pente



B. Altitude



C. Orientation des versants

4.1.3. Système hydrographique

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques. Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations lithologiques et se modifie selon l'évolution tectonique (Bouanani, 2004, Daoudi, 2008)). Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Isser est composé d'un oued principal (Oued Isser) et d'une série de tributaires : Oued Chouli, Oued Fernan, Oued Ben Hadi et Oued Beniane (fig.14 et 15).

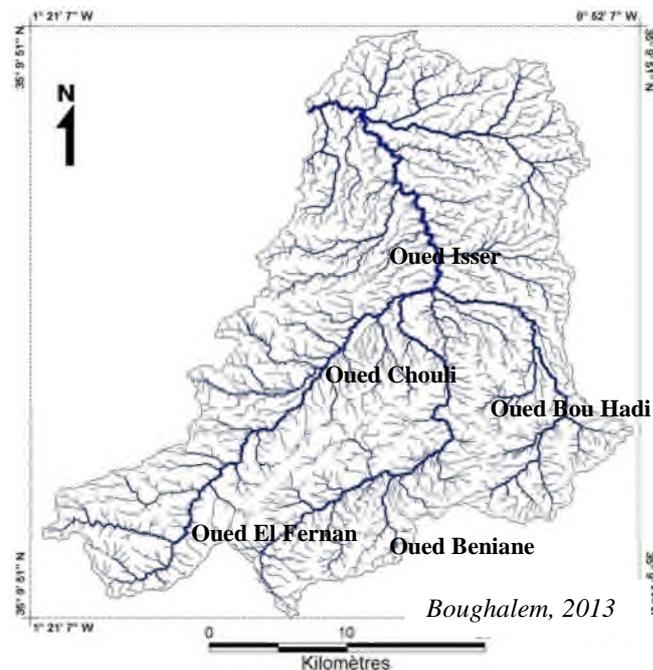


Figure n°14 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

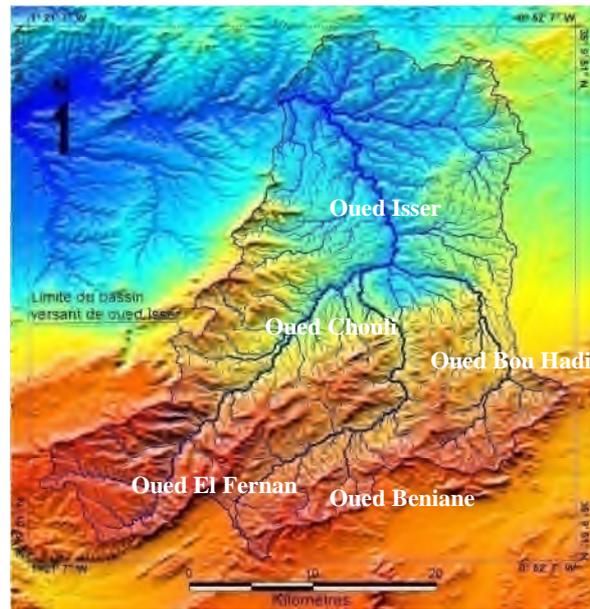


Figure n°15 : Modèle numérique de terrain « MNT » du BV de l'Isser

L'oued Isser prend sa source au niveau de Ain Isser. Il draine dans sa partie amont les formations carbonatées du jurassique et ce jusqu'au niveau d'Ouled Mimoune. Au-delà, il entaille une gorge profonde dans les marnes du miocène en divisant l'ensemble en deux secteurs :

- La zone carbonatée de Sidi Senouci à l'ouest où l'Oued Isser draine les formations carbonatées.
- La zone de plaines et de plateaux de Ain Nehhala à l'est où l'Isser draine les formations du plioquaternaire.

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique sont :

- **La densité de drainage Dd (Km/Km²)**

C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant.

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur des canaux d'écoulement et la superficie.

$$Dd = \sum_1^n \frac{L_i}{A}$$

Dd = densité de drainage (Km/Km²).

L_i = la somme des longueurs des cours d'eau (Km)

A = La superficie du bassin versant.

- **Le coefficient de torrencialité**

Ce coefficient s'exprime par :

$$C_t = D_d \cdot F_1$$

Sachant que :

$$F_1 = N_1 / A$$

- **Temps de concentration T_c**

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

A = superficie du bassin (Km²)

L = longueur du thalweg principal (K_m)

H_{moy} = altitude moyen (m)

H_{min} = altitude minimale

T_c = temps de concentration.

- **Le rapport de confluence R_c**

Appelé aussi rapport de bifurcation, c'est le nombre de vecteurs d'un ordre rapporté à un nombre d'ordre supérieur.

$$R_C = N_n / N_{n+1}$$

N = nombre de vecteurs ou nombre de talwegs.

Pour un bassin, le rapport de confluence moyen (R_c) peut être estimé graphiquement en portant le nombre de vecteurs d'ordre différent (en logarithme sur l'axe des ordonnées) par rapport aux ordres correspondants (sur l'axe des abscisses). Il obéit à une série géométrique inverse. Si l'ordre des cours d'eau dépasse 5, nous aurons :

$$R_c = 10^a$$

$$R_c = 3,90 \text{ avec } a = 0,59$$

- **Le rapport de longueur R_l**

C'est le rapport des longueurs de cours d'eau d'ordre n+1 par celui d'ordre n.

$$R_l = l_{n+1} / l_n$$

$$R_l = 2,05$$

4.1.4. Géomorphologie

D'une manière générale, nous distinguons cinq ensembles géomorphologiques dans notre zone d'étude: les versants, les glacis, les terrasses, les replats ainsi que les dépressions.

- **Les versants :**

Le modelé des versants dépend de l'influence de certains facteurs tels que le pendage, la nature lithologique et l'effet de l'érosion.

Les versants sont constitués de substrats tendres (marnes) avec intercalations gréseuses notamment dans la partie Nord de Sidi A. Chérif. Dans le coté sud, la partie dominante du versant porte des sols à croûte et encroûtements calcaires et surmonte un lit de galets cimenté par un ciment jaune rougeâtre.

Les versants sont de forme concavo-convexe et occupent la plus grande partie du relief. La plus haute altitude est de 689m. Ils sont formés d'assises gréseuses qui forment des corniches escarpées. Parfois, entre les assises gréseuses, on aperçoit des formations argileuses surtout du coté Nord.

La présence des bancs gréseux imprime parfois une forme en marche d'escalier. Par endroits, ces versants sont affectés par des mouvements de masse et de tunneling qui évoluent en ravines et découpent les versants.

- **Les glacis :**

Ils correspondent à d'anciennes surfaces d'aplanissement entaillées par des cours d'eaux récents ou actuels, se sont des formes héritées des phases pluviales du quaternaire. Ces unités sont peu étendues et sont découpées du fait de l'érosion linéaire.

- **Les terrasses :**

On rencontre deux types de terrasses :

- La terrasse Rharbienne: Constituée de formation limoneuse ou sablo limoneuse, cette terrasse apparaît généralement en continu le long des oueds, et correspond au quaternaire récent.

- La terrasse Soltanienne: Cette terrasse est plus ancienne et subsiste par lambeaux le long des oueds. Elle est constituée de formation argilo limoneuse rougeâtre. Des accumulations de calcaire apparaissent entre 40 à 60cm de profondeur sous forme d'amas ou de granules et reposent sur un substrat alluvial très chargé en galets de forme arrondie.

4.1.5. Géologie

Le type de formations géologiques qui affleurent dans le bassin versant a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en générale une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé

de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration (Bouanani, 2004).

D'après (Demmak, 1982), il y'a une relation étroite entre le type d'érosion, les transports des sédiments et la lithologie.

Le bassin versant de l'Isser est constitué de trois grands ensembles lithologiques :

- **Les formations du quaternaire** : Elles sont souvent continentales et constituent une succession de terrasses et de glacis de pente plus ou moins encroûtées (calcaire). Les alluvions récentes et sub-actuelles, se situent le long de l'oued Isser.

- **Les formations du plioquaternaire** : Elles sont représentées par des sédiments continentaux de type conglomératique.

- **Le tertiaire** : Le tertiaire est représenté par des dépôts essentiellement marins, à savoir le miocène moyen (Helvétien) qui est composé par une épaisse série d'argiles marneuses grises ou bleutées. Au sein de cette masse s'intercalent des bancs de grès plus ou moins épais.

L'étude de Mazour (1992) montre que sur toute la partie méridionale du bassin versant affleurent des calcaires et dolomies d'âge jurassique qui s'étendent dans la direction nord. Des formations marneuses avec intercalation gréseuses affleurent au nord et à l'est de la zone. Il s'agit de marnes grises très fines avec des bancs de grès calcaires jaunâtres intercalés. A l'Est sont localisés des alluvions sur terrasse du pliocène. Dans la zone Nord, les versants sont constitués de substrats tendres (marne) avec intercalations gréseuses surtout dans la partie nord de Sidi Ahmed Chérif, ils ont une forme concavo-convexe et occupent la plus grande partie du relief (fig.13).

Dans le tableau 6 ci-dessous sont regroupées les différentes formations lithologiques de la zone d'étude par rapport à la surface totale du bassin versant.

Tableau n°6 : Formations lithologiques par rapport à la surface totale du bassin versant de l'Isser (Mazour, 1992)

Formations lithologiques	Pourcentage %
Calcaires et dolomies	38
Marnes avec grès intercalés	21
Alluvions limoneuses et caillouteuses en terrasses	19
Grès siliceux, grès calcaires et autres formations	22

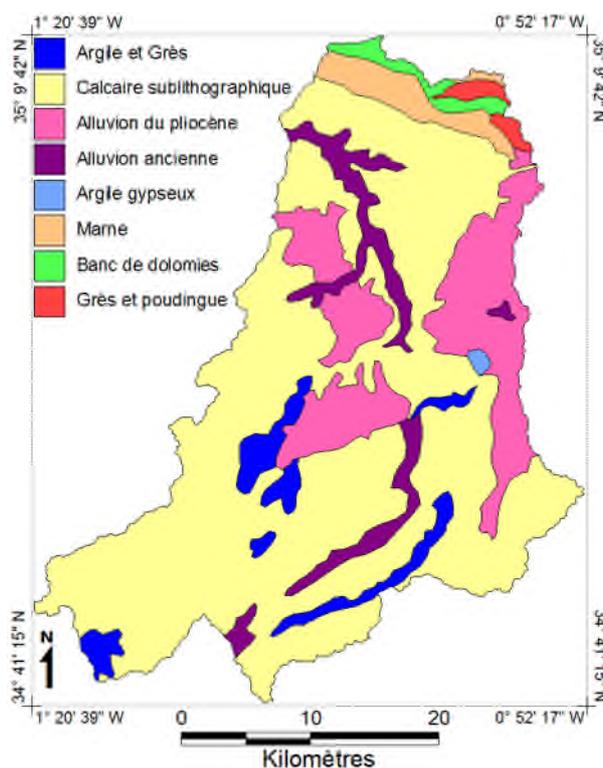


Figure n° 16: carte lithologique de la zone d'étude

4.1.6. Pédologie

Dans son étude pédologique, Chebbani (1996) a classé les sols du bassin versant de l'Isser en trois grands groupes. Ce sont les sols calcimagnésiques, les sols isohumiques et les sols peu évolués. Ils sont riches en calcaire et pauvres en matière organique. Ils présentent une bonne stabilité structurale et une perméabilité moyenne à lente.

Dans le tableau.7, sont classées les différentes unités pédologiques selon les systèmes CPCS et USDA (Chebbani, 1996).

La zone d'étude est caractérisée par des roches en majorité tendres (Marnes et grès tendre). Ce sont les zones marneuses du miocène au Nord qui sont les plus exposées aux différents processus d'érosion (Mazour 2004).

Tableau n°7 : Présentation des différents types de sol dans le micobassin versant de S. A/Chérif (Chebbani, 1996)

Unités pédologiques	Description	Surface (ha)	% de surface	%cumule
	1- CPCS 2- USDA			
Unité1	1: Sol peu évolué non climatique d'érosion lithosolique sur conglomérat 2:Lithic xerochrept thermic fine silt	169,11	7,34	
Unité2	1: Sol isohumique à complexe saturé en Ca évoluant sous pédoclimat frais pendant la saison pluvieuse 2: Typic calcixerotic xerochrept thermic	271,44	11,79	19,13
Unité3	1: Sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire vertique 2: vertic calcixerolic xerochrept thermic clayey	783,36	34,02	53,15
Unité4	1: Sol peu évolué non climatique d'apport alluvial 2: Typic xerochent thermic clayey	72,00	3,13	56,28
Unité5	1: Sol calcimagnésique carbonaté à encroutement calcaire 2: Calcixerolique xerochrept thermic fine loamy	204,12	8,86	65,14
Unité6	1: Sol isohumique marron gris verthique 2:Vertique xerochrept thermique clayey	303,93	13,20	78,34
Unité7	1: Sol calcimagnésique carbonaté brun calcaire modal 2:Typic calcixerolic xerochrept thermic fine silty	63,99	2,78	81,12
Unité8	1: Sol isohumique gris noirci vertique 2: Vertic xérochrept thermic clayey	7,74	0,34	81,45
Unité9	1: Sol calcimagnésique carbonaté brun vertique 2: Ultic xerochrept thermic clayey	77,31	3,36	84,81
Unité10	1: Sol minéral brut 2: Regosol	349,74	15,19	100,00

4.1.7. Les formes d'érosions rencontrées dans la zone d'étude

La zone connaît un climat dont les pluies sont irrégulières et parfois violentes. Les terrains sont en général des terres marneuses, riches en argiles gonflantes de type smectite. Les conditions orotopographiques et anthropozoogènes aggravent les phénomènes de l'érosion hydrique. Cette dernière se manifeste sous plusieurs formes.

- **Erosion en nappe et rigole**

Malgré une fréquence des pluies érosives faible, quelques événements exceptionnels peuvent être enregistrés. Mazour, par exemple, durant la campagne 1989-1990, a mesuré l'érosion en nappe sur les zones marneuses qui a nettement dépassé 2t /ha/an (Mazour 2004).

Ces valeurs restent toutefois inférieures au seuil de tolérance généralement admis entre (2 à 12t/ha/an).

Ce type d'érosion se produit lorsque l'écoulement et l'érosion se font sur toute la surface du sol, ce qui provoque une usure homogène non perceptible dans la majorité des cas.

L'érosion en nappe se traduit par le décapage de l'horizon superficiel humifère, et par un amincissement du sol. Ce type d'érosion se manifeste par l'apparition à la surface du sol d'une couleur plus claire et d'une charge caillouteuse plus importante formant ainsi une couche continue (planche photographique 2.d).

- **Le ravinement**

Le ravinement est le processus morphogénétiques le plus actif, cette forme d'érosion est très courante à travers la zone marneuse de l'Isser (planche photographique 2.c) où elle peut évoluer sous divers processus : par suffosion, par affouillement ou alors par surcreusement.

- ✓ **Les ravins en V** formés par l'organisation du ruissellement en provenance des versants. Occasionnellement, on observe dans ces ravines des dépôts peu importants(planche photographique 2.a).
- ✓ **Les ravines en U** à fond plat qui évoluent par érosion régressive par l'énergie de tourbillon de chute en tête de ravine.

- **Les ravines de suffosion** qui sont liées aux propriétés physiques des sédiments et à la circulation de l'eau dans le sol. Ce type de ravinement provient de l'éboulement des tunnels creusés par les eaux d'infiltrations qui créent un rongement interne des terrains affectés qu'on observe notamment au sud du mico-bassin de Sidi Ahmed Chérif (planche photographique 2.b). Ces formes d'érosionsont prépondérantes au niveau des formations tendres, elles ont abouti dans le bassin de l'Isser aux formes de bad-lands et ravinement généralisé. Les bad-lands constituent l'étape finale de la dégradation du sol, et présentent un manteau d'altérites dû aux alternances climatiques.

- **Les mouvements de masse**

Suivant l'humectation de la couverture pédologique, la zone présente plusieurs types de mouvement de masses.

✓ **La solifluxion**

La **solifluxion** est la descente, sur un versant, de matériaux boueux ramollis par augmentation de leur teneur en eau liquide.

Ce mouvement de masses est aussi visible dans le paysage, que les griffes et les ravines dues à l'érosion. Il est présent un peu partout dès que les conditions sont réunies.

✓ **Les glissements de terrain**

Ils sont très fréquents, surtout au nord du bassin. Ils concernent généralement des matériaux beaucoup plus meubles, On voit par endroit, des glissements de terrain formant des loupes plus ou moins importantes.

✓ **Les coulées boueuses**

Lors de forte pluie, on observe des coulées terreuses ou boueuses : cela consiste à des phénomènes d'écoulement du sol sous forme semi liquide, très caractéristiques des régions marneuses.

• **L'érosion mécanique sèche.**

Il s'agit d'un lent mouvement en masse des horizons superficiels sous la pression des outils de travail du sol qui aboutit au décapage des sommets des collines sombres. Dans la zone d'étude, le phénomène s'observe surtout sur les pentes fortes (>20%).

L'érodibilité de ces sols, ou facteur de la susceptibilité à l'érosion et au ruissellement varie suivant le type de sol, de la saison et des pratiques culturales (Roose et Sarrailh, 1989).

Enfin, même si l'érosion éolienne n'est pas au centre de ce travail, il est impossible de s'entretenir des conséquences de l'utilisation des terres sans explorer ce sujet. En effet, suivant une logique imparable (défrichage – accélération des vents – prise en charge croissante de matériaux), la région étudiée est soumise à une extension très importante des zones d'érosion éolienne. Ces zones de déflation éolienne se présentent donc sous forme de croûtes indurées inexploitable par les paysans en fonction des pratiques agricoles actuelles.

4.1.8. Occupation du sol

De nombreuses études ont démontré l'influence déterminante du couvert végétal sur l'infiltration (Collinet et Laffrogue, 1979 ; Collinet et Valentin, 1979 ; Chevallier et Valentin, 1984 ; Pontanier *et al.*, 1986 ; Thebe, 1987 ; Albergel, 1987).

En effet le couvert végétal joue un rôle important dans le transport solides, l'humidité des sols, la réserve hydrique et le régime de l'eau.

Les travaux de Mazour (1992), sur les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'Isser, montrent que l'action du couvert végétal dépend de l'influence de certains facteurs tels que la pente et la géologie. L'auteur souligne également qu'à chaque groupe lithologique correspond un type de couvert végétal bien distinct:

- Les formations de calcaires et dolomies avec une prédominance du couvert forestier dégradé suivit d'un couvert forestier normal
- Les terrains marneux sont surtout occupés par les cultures extensives (annuelles), on trouve aussi de l'arboriculture comprenant les vignobles, les oliviers, les agrumes et quelques espèces herbacées (planche photographique 1.b).
- Sur substrat rocheux bien visible dû à des phénomènes d'érosion accompagnés du pâturage, d'incendie, souvent les terrains sont sans végétation.
- Les travertins et croûtes calcaires, sont occupés surtout par les cultures extensives et l'arboriculture.

Le tableau n°8 ci-dessous donne les indications concernant la végétation

Tableau n° 8: Occupation des sols dans le bassin versant de l'Isser (Terfous et al, 2003)

Paramètres	symboles	unité	valeurs
Cultures extensives	CE	%	37.19
Couvert forestier dégradé	CFD	%	34.12
Couvert forestier normal	CFN	%	13.43
Arboriculture	A	%	09.19
Couvert mort	CM	%	05.22
Prairies et terrains de parcours	PTP	%	0.85

La carte d'occupation du sol (Fig.17), a été établie à partir de l'image Landsat TM par classification du maximum de vraisemblance (sous Erdas imagine).

Les cultures annuelles occupent la plus grande partie du bassin versant. La majorité des terres sont des terres « Arch. », ces terres céréalières donnent des bons rendements les bonnes années.

Il faut noter aussi que sur le massif rocheux du jurassique subsistent encore quelques forêts intéressantes :

- Forêt de Zerdeb : couvrant le relief du Dahar-el-Mendjel et du Djebel Miez au sud d'Ouled Mimoun.
- Forêt de Fougahal : Situé à l'Est d'ouled Mimoun.

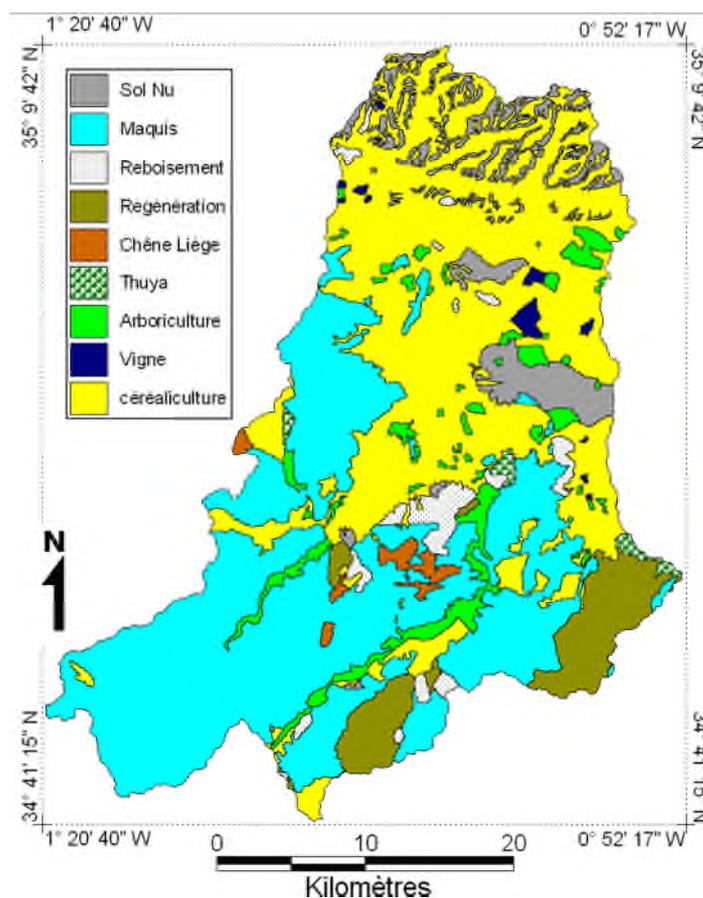


Figure n° 17 : Carte de végétation de la zone d'étude

4.1.9. Aspects socio économiques

La question est complexe du fait même de l'essor économique trop important, et des différents handicaps de l'agriculture algérienne, un handicap naturel (spécificités climatiques), social (exploitation extensive des sols) et un handicap technique (intensification agricole sans pour autant parvenir à l'application de modèles techniques de référence pour les cultures ou l'élevage). Il en est de même de la mécanisation non performante qui a eu aussi pour conséquence l'extension des surfaces mises en culture. Les sols de qualité médiocre ont subi au cours du temps les agressions du milieu humain et de techniques de culture. Ceci a eu pour conséquence l'appauvrissement du capital humique et la dégradation des écosystèmes.

Inconscient du danger de l'érosion, les paysans continuent à la mise en culture des terres fragiles et la déforestation des massifs surtout pentus.

Face aux problèmes d'insécurité qu'avait connus l'Algérie en (1990- 1999), la grande majorité de la population se concentre dans les chefs lieu. Les conditions de vie sont particulièrement très difficiles, ce qui fait que de nombreuses familles ont déjà abandonné leur terre.

La répartition des emplois par secteurs d'activités économiques est dominée par l'agriculture à 55 % du total et offre 35% d'emplois. L'industrie, par contre, n'offre que 10% seulement (ANAT in Bouziane, 1992).

Le taux de la scolarisation est faible, surtout pour les filles, du fait de l'ignorance des parents et de l'éloignement des centres scolaires.

Le réseau dont dispose la zone en matière d'alimentation en eau potable, d'électrification et infrastructures routières demeure toujours insuffisant.

Au cours de ces dernières années, la région a connu d'importants flux migratoires vers les grands centres urbains en espérant retrouver des conditions de vie relativement meilleures.

L'agriculture demeure la principale activité de ces populations rurales car elle reste la source de revenus du paysan à priori, les rendements sont moyens.

L'irrigation est rarement pratiquée, par manque d'eau et d'équipements hydrauliques nécessaire. Certains, paysans ont vu leurs revenus rehausser depuis l'installation des seuils dans le cadre de la correction torrentielle, car cette dernière leur a permis d'avoir un plus pour abreuver le bétail et irriguer quelques parcelles (planche photographique 4.c).

Les revenus de l'agriculture ne répondent pas des besoins de la population locale, puisque le développement de ce secteur reste tributaire de la disponibilité d'eau et des terres agricoles.

En effet pour combler les revenus, tout en pratiquant l'agriculture, certains paysans se sont lancés dans d'autres secteurs en particulier le commerce, l'industrie, et dans les administrations ...

L'élevage, activité très ancienne de la région, occupe une bonne place dans la vie économique de la population. Le cheptel est composé d'effectif varié de bovins, ovins, caprins puis renforcé par l'élevage de la basse cours à savoir l'aviculture, la cuniculture. Le pourcentage des ovins est très élevé par rapport aux autres.

La région reçoit, par ailleurs, d'importants troupeaux lors de la transhumance provenant de la steppe. Ceci aggrave le surpâturage, l'une des causes de la dégradation des sols qui par conséquent favorise l'érosion.

Tout revient aujourd'hui grâce aux orientations du PNDA (plan national du développement agricole) et aux différents plans de soutien à reconstruire un territoire dégradé et fragilisé aussi bien dans le domaine forestier qu'agricole par de grandes lignes d'action comme :

- La reconversion des sols
- Action de mise en valeur plus raisonnée
- Le programme national de reboisement
- La protection et la mise en valeur des écosystèmes forestiers

4.1.1.0. LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES

Le climat joue un rôle fondamental dans les différents processus de dégradation des terres et de l'érosion. Les variations climatiques sont l'un des éléments essentiels qui concourent à la dégradation des sols. Jarraud M. 2005, signale qu'il est plus important de s'interroger sur le climat, une des causes profondes de la dégradation des sols, que de s'occuper uniquement des conséquences de cette dégradation, et qu'il faut connaître les ressources climatiques d'une région ainsi que le risque de perturbations naturelles liées au climat ou induites par celui-ci.

Le climat régional est de type méditerranéen semi-aride à hiver tempéré marqué par deux saisons : l'une froide et pluvieuse, s'étalant du début novembre à mi mars et l'autre chaude et sèche qui débute vers mi-mars jusqu'au début novembre.

Le climat joue un rôle fondamental dans les différents processus de dégradation des terres et de l'érosion. Les pluies sur des sols dénudés et fragile et sur de fortes pentes, façonnent les

reliefs et l'allure de l'hydrographie en laissant des cicatrices durables dans les paysages. Elles prennent souvent un caractère agressif qui peut être à l'origine de beaucoup de ruissellement et d'érosion.

Le climat général est particulièrement aggravé par des amplitudes thermiques et surtout pluviométriques importantes. C'est ainsi que ces fortes variations exposent les affleurements rocheux à une désagrégation physique.

4.1.1.1. Précipitations irrégulières et souvent torrentielles

Daoudi (2008) signale que la pluviométrie en Algérie a été étudiée par de nombreux auteurs (Seltzer, 1913- 1938; Medinger, 1913- 1953 ; Chaumont et Paquin, 1913- 1963 ; Halimi, 1980 et Laborde, 1995). Ces auteurs montrent que la répartition des précipitations est très hétérogène et qu'elle subit généralement trois influences : celle du relief, celle de la longitude et celle de l'éloignement de la mer. Au nord de l'Algérie, les précipitations sont souvent accompagnées par des vents de direction Nord à Nord- Ouest. Ces courants atmosphériques chargés d'humidité pendant leur parcours maritime rencontrent les versants montagneux, ce qui provoque des pluies sur les reliefs (Touzi, 2001 in Daoudi, 2008).

Les données disponibles permettent un examen des régimes annuel et mensuel des précipitations. Trois stations météorologiques de référence (les plus proches et les plus représentatives) ont été retenues :

- La station de Bounakhla à une altitude de 450 m est située au niveau même de la station de quantification de l'érosion dans le sous bassin versant de Bounakhla.
- La station de Ouled Mimoun à une altitude de 718 m est située au centre du bassin versant de l'Isser.
- Et la station de Sidi Abdelli à une altitude de 323 m est située au niveau du barrage El Izdihar à l'extrême nord du bassin versant de l'Isser.

Les épisodes pluvieux dans le bassin versant sont caractérisés par l'abondance et la violence des averses. Ils sont le plus souvent observés dans les orages d'été et d'automne. Les pluies de printemps et d'hivers sont abondantes mais de longue durée. Elles sont redoutables car elles provoquent localement des dégâts considérables. Le régime des précipitations est très irrégulier et se concentre sur un nombre réduit de jours. Le bioclimat de la zone, de type semi-aride, impose à la fois une certaine originalité de la région et un déterminisme assez étroit à la répartition et à l'aspect de la végétation naturelle, aux cultures...

- **Précipitations annuelles**

La distribution spatiale des moyennes annuelles précipitées dans le bassin versant de l'Isser est illustrée par la figure n°18.

La cartographie de la pluviométrie Moyenne Annuelle est influencée par trois paramètres (altitude, exposition et éloignement de la mer) (fig.19).

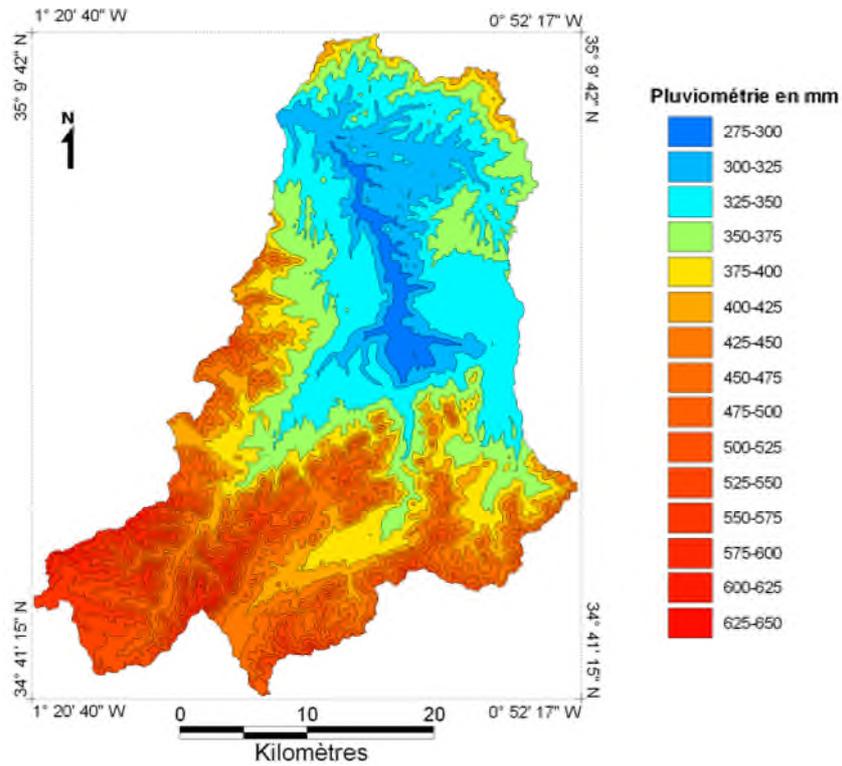
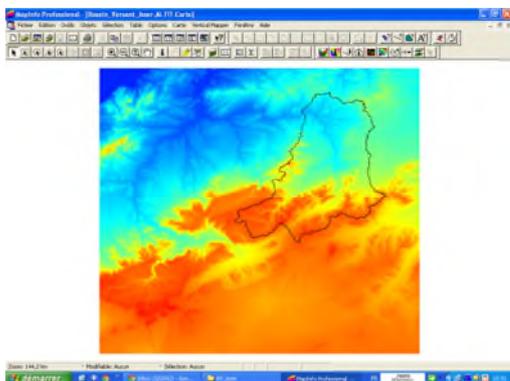
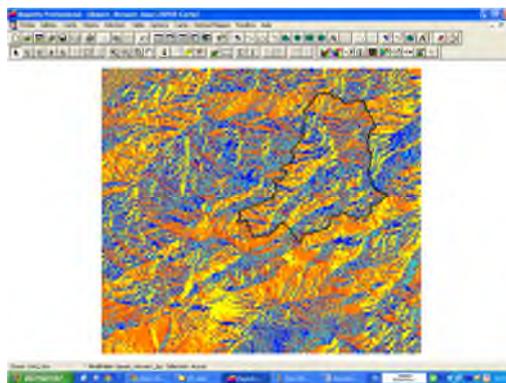


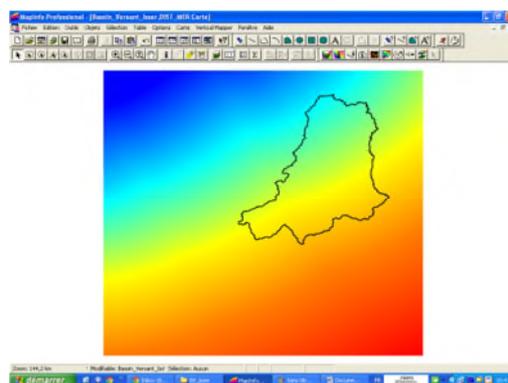
Figure n°18 : Carte des isohyètes de la distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'Isser (de 1979 à 2005) (d'après la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, modifiée)



a) altitude



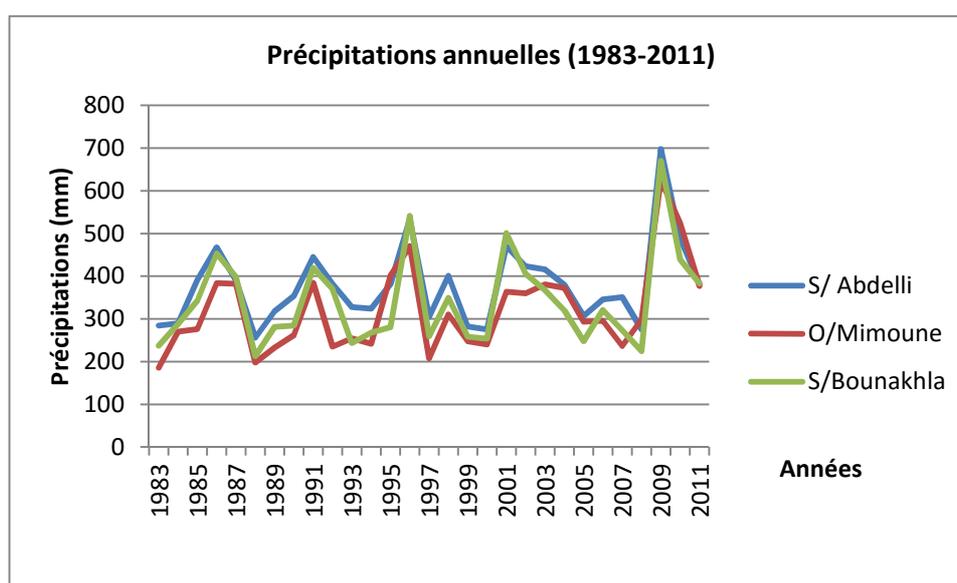
b) exposition



c) éloignement de la mer

Figure n° 19: Paramètres utilisés pour obtenir la carte de pluviométrie moyenne Annuelle du bassin; a) altitude, b) exposition, c) éloignement de la mer

Une comparaison des 03 séries (graphique.3) révèle une fluctuation des précipitations annuelles, qui se traduit par l'existence d'une forte oscillation pluviométrique liée à l'instabilité des types de temps, on ne peut pour autant prétendre déterminer statistiquement une variation climatique cyclique vue la faible étendue des séries de données et le caractère très aléatoire des précipitations dans la région.

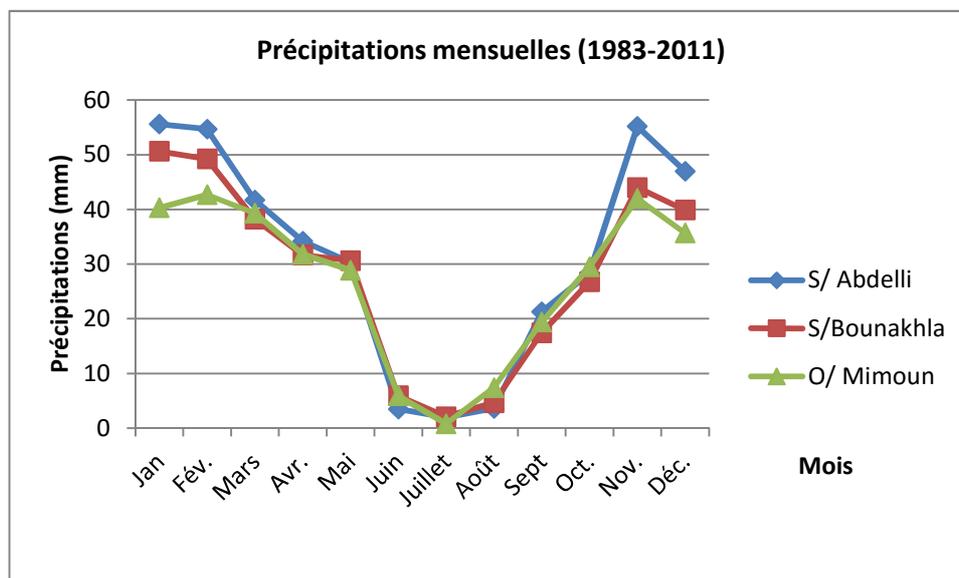


Graphique n°3: Variabilité des précipitations annuelles (1983-2011)
(ANRH- Tlemcen)

- **Précipitations mensuelles**

Graphique.4 de la répartition mensuelle des précipitations montre un net contraste pluviométrique. Les précipitations sont irrégulières avec un maximum absolu en novembre, février et mars, et le minimum est situé en juin, juillet et août avec une pluviométrie sensiblement nulle.

Les pluies journalières maximales sont le plus souvent à l'origine de l'érosion hydrique en climat méditerranéen.



Graphique n°4 : Précipitations mensuelles des différentes stations (1983-2011)
(ANRH- Tlemcen)

Le tableau.9 montre que les pluies maximales journalières s'observent généralement l'automne, l'hiver, et le printemps. Mais celles d'automne sont moins durables.

Ces dernières, de courte durée, sont plus érosives parce qu'elles tombent au moment où les sols sont peu couverts par la végétation et plus secs suite à la saison chaude de l'été. Les sols se retrouvent plus vulnérables à la battance des gouttes de pluies et au cisaillement du ruissellement.

Tableau n°9 : Pluies maximales journalières les plus élevées dans chaque mois dans la station d'Ouled Mimoune pour la période allant de 1930 à 2011

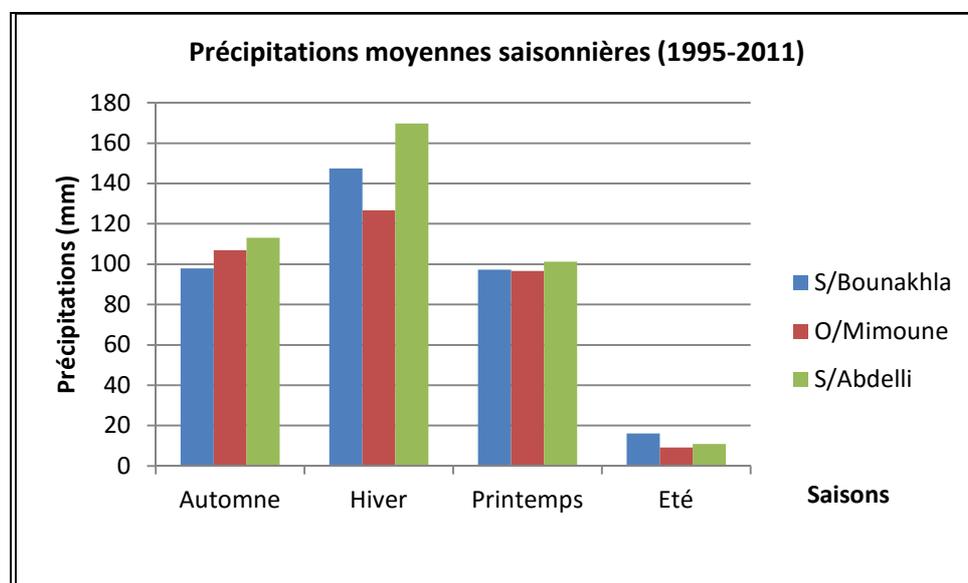
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
P (mm)	173	157	152	169	206	53	33	25	119	212	117	244
Année	1940	1987	1991	1954	1963	1955	1935	1947	1951	1949	1934	1951

- **Précipitations saisonnières moyennes**

Les quatre saisons de l'année correspondent à :

- L'hiver (Décembre, janvier, février) ;
- Le printemps (Mars, avril, mai) ;
- L'été (Juin, juillet, août) ;
- L'automne (septembre, octobre, novembre).

L'hiver représente la saison la plus pluvieuse et l'été correspond à la saison la plus sèche (graphique 5)



Graphique n°5: Précipitations moyennes saisonnières (1995-2011)
(ANRH- Tlemcen)

- **Pluies, fréquence et intensité des précipitations**

Le déclenchement des processus, du ruissellement d'abord et de l'érosion ensuite, est sous la dépendance des effets des précipitations sur l'interface sol-atmosphère.

Les pluies sont souvent violente et de courte durée (elles dépassent rarement 48heures). Elles sont concentrées sur quelques jours de quelques mois de l'année.

Le tableau 9 illustre cette variabilité dans la localisation des averses entre deux régions voisines.

Les chutes torrentielles surviennent pendant les mois de forte pluviosité de la fin de novembre à février, mais elles peuvent intervenir également pendant d'autres mois, notamment, en octobre septembre et surtout en avril et mai.

Ainsi, les précipitations les plus dangereuses pour les sols, surtout ceux qui sont dénudés apparaissent en grande partie au début de la campagne agricole.

L'intensité de la pluieest une caractéristique importante qui joue sur le débit du ruissellement, et sur le détachement et la capacité de transport de l'écoulement.

Seltzer in (Mazour, 2004) signale des intensités maximales enregistrées à Hassi Zahana, situé à 10 km des stations de Bounakhla Hériz (Tlemcen) et qui ont atteint 91 mm/h en 45 minutes le 19/10/1935 et 122 mm/h en 15 minutes le 21/10/1931.

En 1991, une intensité de 95 mm/h a été enregistrée à la station de Gourari et en l'an 2000, une intensité de 84 mm/h en 30 minutes a été observée dans la région de Tlemcen (Mazour, 1992, Mazour, 2004).

S'il est bien connu que les pluies exceptionnelles entraînent généralement de gros dégâts, l'importance relative de celles-ci est variable selon les milieux (Mazour, 2004).

La hauteur des averses peut atteindre des valeurs très élevées : 157 mm (Tableau.10).

Tableau n°10: Nombre d'averses torrentielles enregistrées durant la période 1913- 1938 (Mazour, 2004)

Station	Nombre de pluies torrentielles observées	Répartition par hauteur d'averse		Hauteur maximale (mm)
		50-100 (mm/24h)	>100 (mm/24h)	
Tlemcen	116	18	-	95
Mascara	70	15	2	157

- **Variabilité interannuelle des apports solides**

Les variations interannuelles des apports solides montrent une grande irrégularité, liée à l'irrégularité des précipitations et donc des apports liquides. Durant l'année 1990/91, l'apport solide drainé vers le barrage El Izdihar représente 52% de l'apport global enregistré en 10 ans de 1988/89 à 1997/98.

La dégradation spécifique de l'année 1990/91 est de 1035 t/km²/an, elle est 5 fois supérieure à l'avaloir moyenne de la période avec un apport liquide de 5 Hm³, presque 4 fois plus grand. La turbidité moyenne annuelle varie entre 0.71g/l (1996/97) et 28 g/l (190/91). Il faut noter que la crue du 7 septembre 1990 a apporté 760 000 tonnes de sédiments sur les 1.2 millions de tonnes de l'année (Bouanani, 2004).

4.1.1.2. Températures

La température conditionne les phénomènes d'évaporation et du dégel et influe sur le développement de la végétation.

La température et l'évaporation peuvent jouer un rôle essentiel dans la détermination de l'état hydrique initial d'un sol. Lors d'une pluie, ce dernier influence l'importance de l'infiltration, de la dessiccation des particules du sol sous l'action de l'impact des gouttes de pluie et par conséquent l'importance du ruissellement.

Nous avons pris à titre d'exemple la station de Sidi Bounakhla où les données sont complètes et disponibles de 1988 à 2011.

✓ Les moyennes mensuelles soulignent l'existence de deux saisons bien distinctes :

Une saison froide qui s'échelonne sur six mois, de novembre à avril. Le mois de janvier étant le mois le plus froid avec une température minimale absolue de -6,2°C.

✓ Une saison chaude qui s'étale sur six mois, entre mai et octobre. Le mois d'août étant le mois le plus chaud avec une température maximale absolue de 44,8°C.

En été, s'opère surtout un actif travail de désagrégation sur place par insolation et dessiccation sauf au cours de violentes averses.

L'insolation détruit la structure colloïdale du sol dont l'humus disparaît sous l'action photochimique de cette dernière ainsi que l'activité microbienne énergiquement stimulée.

La dessiccation du sol provoque un intense fractionnement superficiel par un réseau très serré de fissure et une complète désintégration en fines particules inertes.

Ainsi se forme une croûte superficielle fractionnée facilement d'un substratum plus cohérent.

En hiver, les fortes précipitations souvent torrentielles déclenchent tous les processus de dissection, d'affouillement et d'ablation en masse ou en nappe à la suite du ruissellement ou de l'infiltration (sursaturation) des eaux.

L'ablation succède à la dégradation en été ou survient immédiatement suite à l'action des gouttes des pluies.

Les fissures de dessiccation guident et facilitent l'écoulement externe ou interne des eaux provoquent des effondrements, affaissements et éboulements qui sont principalement responsables de la rapidité d'évolution de l'érosion accélérée dans le bassin versant de l'Isser, de même les mouvements en masse du sol par solifluxion ou écoulement en nappe suppose une destruction préalable de sa cohésion (Benchetrit, 1972).

- Etude des températures

La température est l'un de facteurs climatiques les plus importants dans les processus météorologiques.

L'évapotranspiration réelle ETP correspond à l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. Sa formule est déterminée ci-après.

$$ETP = \frac{P}{(0,9 + P^2 / L^2)^{1/2}}$$

$$L = 0,05T^3 + 25T + 300$$

T= Température en °C

P= Précipitation (mm)

ETR = Evapotranspiration (mm/an).

Les besoins hydriques ou déficits (tableau 11) sont d'autant plus importants que les pluies mensuelles sont inférieures à l'ETP (Sidi Abdelli). Si par contre ces pluies sont supérieures à l'ETP, on aura une disponibilité d'eau qui servira à reconstituer les réserves d'eau dans le terrain et le surplus ruissellera sur le terrain vers les thalwegs.

C'est surtout dans la partie montagneuse, au sud du bassin versant que les écoulements sont les plus importants (Ain Es Souk, Merbah, Gourari, etc.).

Tableau n°11: Ecoulement et besoin hydrique dans le bassin versant d'Isser (Mazour, 1992), (Mazour, 2004)

Stations	Pluies Moy mensuelle (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Besoins hydriques moyens annuel (mm)	Écoulements Moyens annuels (mm)
O.Mimoun	513	846	437	409	76
Ain Es Souk	581	771	432	339	149
Merbah	471	776	347	429	124
Ben Badis	526	841	424	417	100
Sidi Abdelli	515	889	439	450	84

ETP : évapotranspiration potentielle ; ETR évapotranspiration annuelle.

4.1.1.3. La synthèse bioclimatique

- **Diagramme ombrothermique :**

La courbe ombrothermique est établie en reportant suivant une échelle arithmétique les températures en °C et suivant une échelle les précipitations (mm), double de la précédente, et en abscisse le mois de l'année (tableau n°12 ; Graphique.6).

Gausson a proposé un rapport de 1 à 2 : une unité représente 2mm de précipitation ou 1°C.

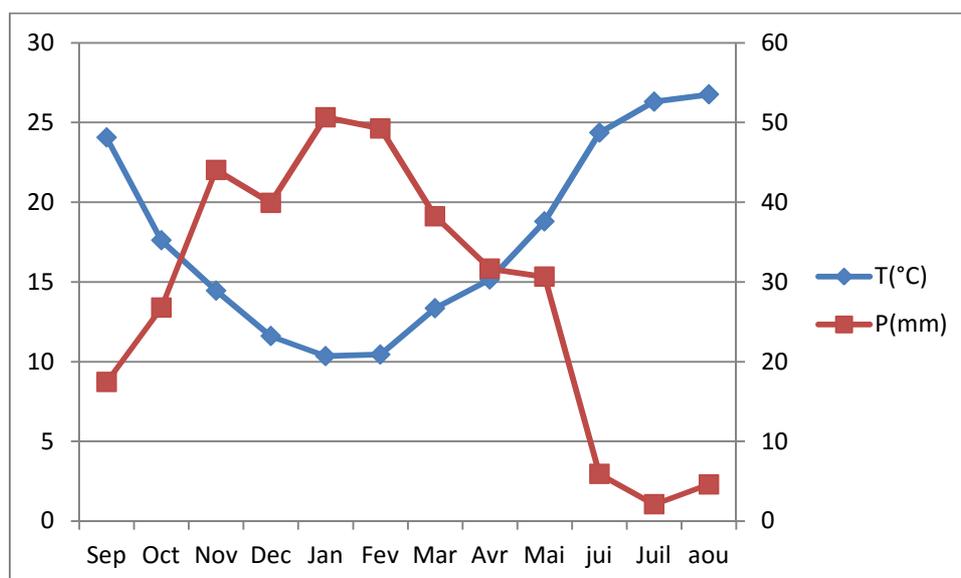
- ❖ Lorsque la hauteur d'eau est inférieure au double de la température moyenne (courbe pluviométrique en dessous de la courbe thermique) la saison est déficitaire (sèche).
- ❖ Par contre, lorsque la pluviométrie est au dessus de la température, la période correspondante est excédentaire : la saison est humide;
- ❖ Et lorsque les deux valeurs se superposent, les besoins en eau sont couverts.

Tableau n°12 : Températures moyennes mensuelles, moyennes maximales et minimales enregistrées à La station de Sidi Bounakhla de 1988 à 2011(ANRH, Tlemcen)

Paramètres	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
m	20,8	13,4	12,1	9,0	7,8	7,9	11,5	12,8	16,0	18,8	24,0	24,6
M	27,3	21,8	16,8	14,2	12,9	13,0	15,2	17,5	21,6	29,9	28,6	28,9
M-m	6,5	8,4	4,7	5,2	5,1	5,1	3,7	4,7	5,6	11,1	4,6	4,3
(M+m)/2	24,05	17,6	14,45	11,6	10,35	10,45	13,35	15,15	18,8	24,35	26,3	26,75
P(mm)	17,44	26,76	44,02	39,91	50,64	49,24	38,21	31,65	30,65	5,9	2,1	4,6

m : température moyenne minimale

M : température moyenne maximale



Graphique n°6 : Diagramme ombrothermique de Hériz de 1988 à 2011

- **Indice de LANG**

Il est déterminé par la formule suivante.

$$L = \frac{P}{T}$$

P = La précipitation moyenne annuelle (mm).

T = La température moyenne annuelle (°C).

Cet indice est classé en fonction du climat (tableau.13).

Tableau n°13 : classification de l'indice de Lang (L) en fonction du climat

Indice de LANG (L)	Climat
$70 < L < 100$	Humide
$40 < L < 70$	Semi-aride
$20 < L < 40$	Méditerranéen
$0 < L < 20$	Aride

Le tableau.14 renferme quelques valeurs de L (stations de l'oued Chouly et de Hériz).

Tableau n°14 : La valeur de L des deux stations de l'oued Chouly et de Hériz

Stations	Période	P (mm)	T°C	Indice L
O. Chouly	1925-1970	532	18,5	28,75
Hériz	1971-2001	337,4	19	17,75

- **Indice d'aridité de Martonne**

C'est une variante de l'indice de Lang, il est donné par la formule suivante :

$$A = \frac{P}{T + 10}$$

A = Indice de Martonne.

T = Température moyenne annuelle.

P = Précipitations moyennes annuelles.

Tableau n°15 : Les valeurs de l'indice d'aridité de Martonne A de la station de O. Chouly et la station de Hériz

Stations	Période	P (mm)	T°C	A
O. Chouly	1925-1970	532	18,5	18,66
Hériz	1971-2001	337,4	19	11,62

Selon la classification de Martonne, on a le tableau suivant (Tableau.16).

Tableau n°16 : Classification de L'indice A en fonction du climat selon Martonne

Indice de Martonne	Climats
A > 20	Humide
10 < A < 20	Semi-aride
5 < A < 10	Désertique
A < 5	Hyper-aride

- **Indice de Stewart**

C'est une nouvelle forme du quotient d'Emberger donné par Stewart. Il est déterminé par la formule suivante.

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

Tableau n°17 : Résultats du quotient pluviométrique Q_r de O. Chouly et Heriz

Stations	Période	M °C	m °C	M-m °C	P (mm)	Q_r
O. Chouly	1925-1970	32	5	27	523	66,44
Heriz		34	4,9	29	363,06	42,94

Cet indice permet de distinguer les types de climat en fonction du classement de Stewart :

10 < Q_r < 50 climat semi-aride.

2 < Q_r < 10 Climat désertique.

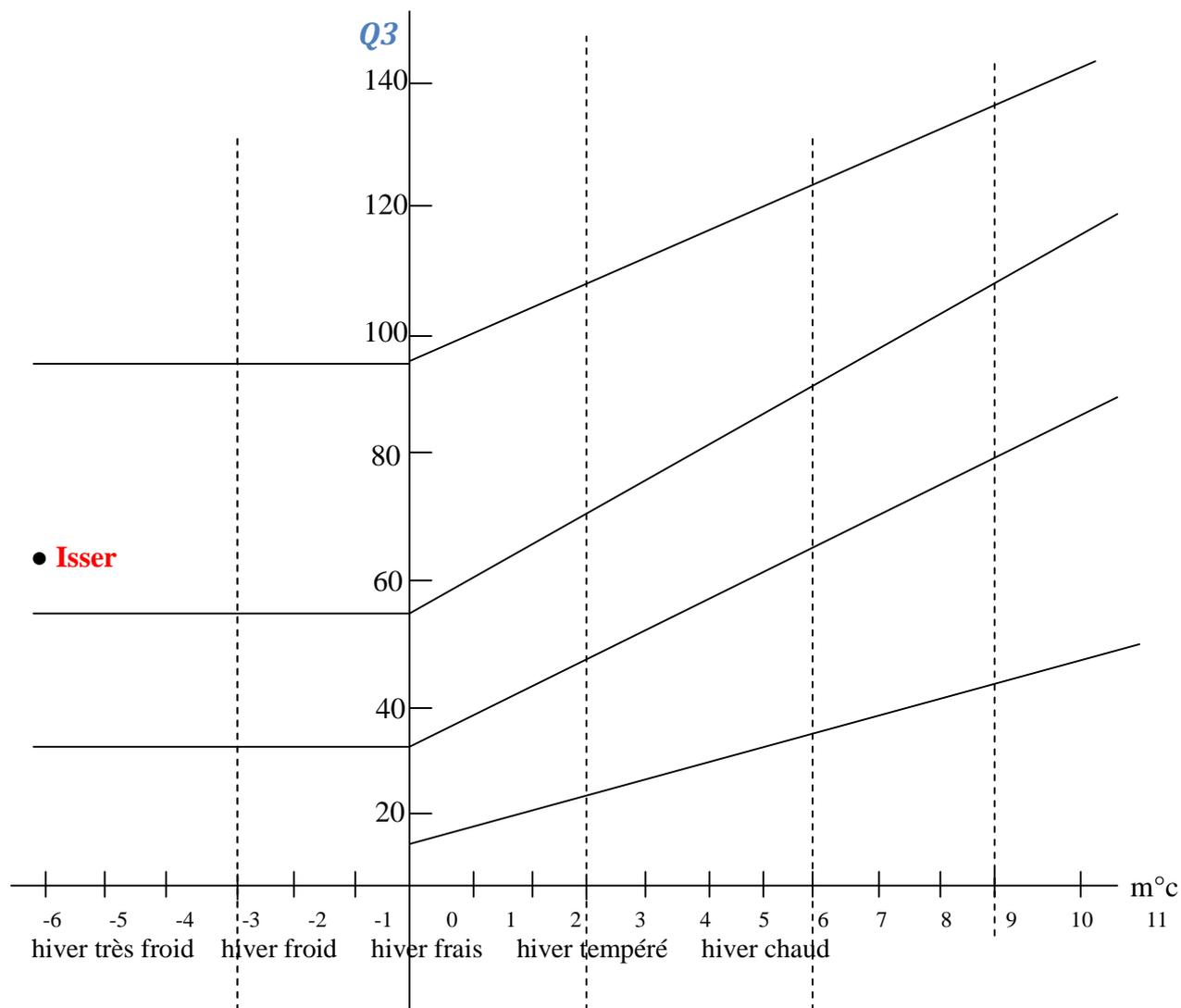


Figure n°20: Climagramme pluviothermique (Emberger, 1955)

4.1.1.4. Les vents

Les vents qui circulent dans la région sont ceux de l'ouest et du nord-ouest. Selon la station météorologique de Tlemcen, ces vents d'ouest soufflent en hiver et ceux du nord-ouest en été (Benabadji et Bouazza, 2000).

4.1.1.5. La gelée

La formation de la gelée, s'observe dès que la température va en dessous de 0°C .

En effet les gelées blanches sont les plus redoutables à cause de leur fréquence, leur durée et leur intensité surtout au printemps. Celles du mois de décembre et janvier sont les plus agressives.

4.1.1.6. La neige

La neige n'est pas fréquente dans notre zone d'étude, car on ne dépasse pas 600 m d'altitude. La neige est la forme solide des précipitations, elle a un effet bénéfique sur le sol par la fonte lente qui a moins d'effet érosifs que les pluies, elle permet également une grande infiltration dans le sol.

4.1.1.7. Le brouillard

Le brouillard est un nuage formé au sol dans les zones où l'on atteint la température de condensation plus rapide que dans les voisinages, il est épais, durable et fréquent, il permet aussi la formation de la gelée blanche.

4.1.1.8. Agressivité climatique

L'agressivité de la pluie est fonction de l'énergie et des intensités de pluies maximales en 30 mn. C'est le facteur moteur de l'érosion. Il est connu dans les régions méditerranéennes que les dégâts les plus considérables de l'érosion hydrique proviennent de quelques jours et même de quelques heures de pluies.

Ces pluies sont à l'origine d'un ruissellement exceptionnel qui dévale et cause d'énormes dégâts sur un sol mal couvert.

L'indice Rusa de l'agressivité des pluies oscille entre 20 et 100 en moyenne (fig.21) et le rapport rusa/ hauteur des pluies annuelles est de l'ordre de 0,10 à 0,12 (Mazour, 1992) alors que ce rapport est de 0,4 à 0,6 en Afrique de l'ouest et de 0,2 à 0,3 dans les montagnes de l'Afrique centrale (Roose et Arabi, 1994 in Mazour, 2004).

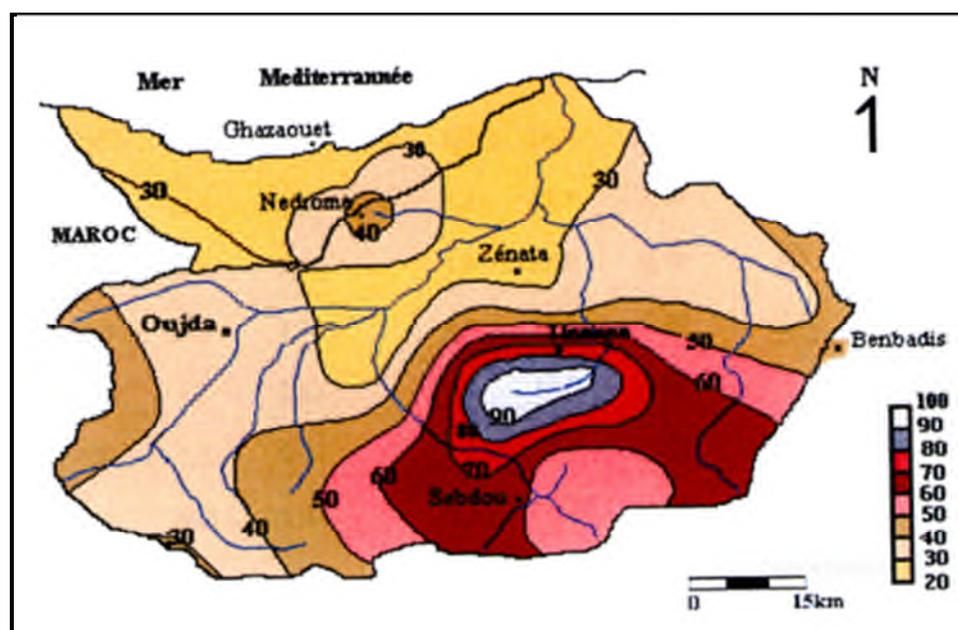


Figure n°21 : Carte de la répartition spatio-temporelle de l'agressivité climatique (isovaleur de R 1973-2001 Tafna) (Morsli, *et al.*, 2000)

Le tableau.18 renferme les précipitations moyennes annuelles et leurs indices d'agressivité climatique des trois stations (Hériz, Gourari et Chouli) dans la période de 1973 à 2001(Mazour, 2004)

Tableau n°18: Précipitations moyennes annuelles et leurs indices d'agressivité climatique des trois stations dans la période de 1973 à 2001(Mazour, 2004)

Stations	S.Heriz		Gourari		O. Chouli	
	P(mm)	R=0,15P	P (mm)	R=0,15P	P (mm)	R=0,15P
1973	260,7	26,07	582,1	87,32	589,0	88,35
1974	471,4	47,14	639,4	95,91	63,8	95,52
1975	397	39,70	722,1	108,32	610,7	91,61
1976	344,9	34,49	413,8	62,07	458,6	68,79
1977	296,7	29,67	497,2	74,58	406,6	60,99
1978	429,2	42,92	424,2	63,63	452,3	67,85
1979	471,5	47,15	547,2	82,08	514,2	77,13
1980	376,2	37,62	558,2	83,73	4344,3	65,15
1981	201,7	20,17	334,2	50,13	346,8	52,02
1982	239,1	23,91	285,4	42,81	281,3	42,20
1983	266,6	26,66	271,5	40,73	335,7	50,36
1984	297,8	29,78	361,1	54,17	374,0	56,10
1985	400	40,08	398,4	59,76	469,4	70,41
1986	340,3	34,03	505,9	75,89	502,0	75,30
1987	205,4	20,54	513,9	32,09	218,4	32,76
1988	291,6	29,16	339,6	50,94	375,2	56,28
1989	299,1	29,91	323,2	48,48	338,9	50,84
1990	434,5	43,45	628,8	94,32	475,0	71,25
1991	386,1	38,61	504,5	75,68	403,1	60,47
1992			491,0	73,65	400,7	60,11
1993			338,5	50,78	335,0	50,25
1994			373,8	56,07	367,7	55,16
1995			413,3	62,00	451,9	67,79
1996			457,0	68,55	481,7	72,26
1997			395,0	59,25	420,4	63,06
1998			307,5	46,13	250,0	37,50
1999			480,5	72,08	438,2	65,73
2000			338,0	50,70	257,3	38,60
2001			373,5	56,03	449,3	67,40
Moyenne	337,4	33,74	431,68	64,75	416,36	62,45

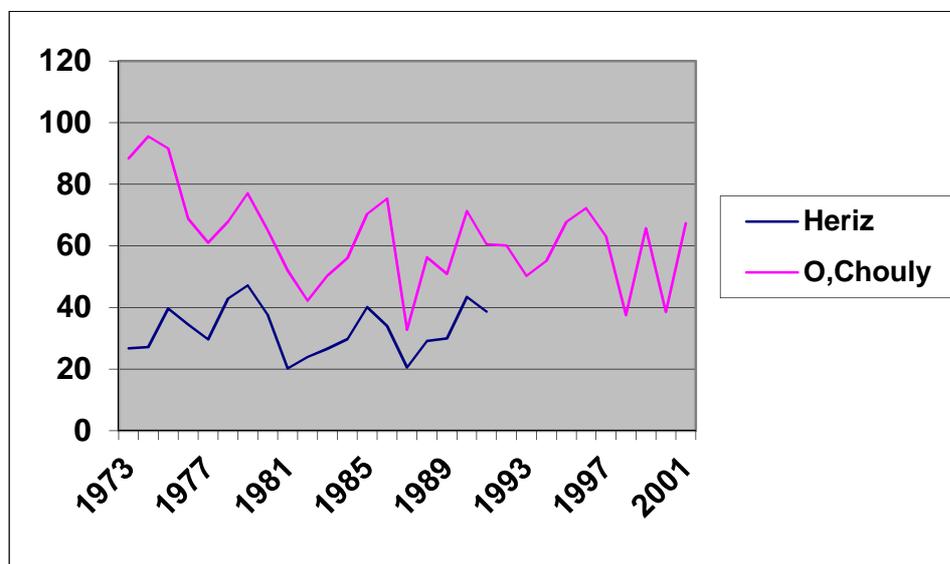
Le R_{moy} annuel se calcule à partir des relations suivantes.

$R_{ann} = 0,15 \times P_{ann} \pm 0,05$ en zone montagneuse.

$R_{ann} = 0,08 \times P_{ann} \pm 0,05$ sur la frange côtière.

$R_{ann} = 0,1 \times P_{ann} \pm 0,05$ Pour les autres zones.

Le graphique.7 représente la variation inter-annuelle de l'agressivité climatique dans les stations de Hériz et Oued Chouly.



Graphique n°7 : Variation inter-annuelle de l'agressivité climatique dans les stations de Hériz et Oued Chouly.

La méthode de Roose en 1981, tient compte du module pluviométrique annuel dans la détermination du facteur d'agressivité climatique, est largement appliquée dans monde.

L'agressivité des pluies dans notre région à climat méditerranéen peut s'observer uniquement en quelques jours ou même en quelques heures, le cumul annuel des précipitations peut être néanmoins peu représentatif de l'importance de l'érosivité des pluies.

D'après Fournier (1994), les valeurs de l'indice d'érosivité climatique dans le bassin de l'Isser sont faibles et varient de 33 à 64 (tableau.19).

Tableau n°19 : Indice R_{usa} dans les différentes régions du globe (Fournier, 1994)

Région ou pays de mesure	R_{usa} annuel moyen
Etats-Unis	50 à 500
Zone méditerranéenne	50 à 350
Zone tropicale sèche	200 à 600
Zone subéquatoriale	500 à 1400
Côte d'ivoire, Abidjan	1260
Azaguié	885
Divo	840
Bouaké	520
Konbogo	720

A titre d'exemple l'indice R peut dépasser 300 en 24 h et 2000 dans l'année entre Abidjan et Conakry ; varie entre 80 et 600 au Burundi et entre 300 et 700 au Rwanda.

Le climat du bassin versant est de type méditerranéen, marqué par la dominance du domaine semi-aride.

Les précipitations annuelles varient de 337 à 417, elles sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle nettement observée par les régimes pluviométriques.

En effet le facteur de l'agressivité climatique n'est pas le facteur le plus déterminant des phénomènes érosifs dans le bassin d'Isser, mais conjugués aux autres caractéristiques du milieu (état du couvert végétal, sensibilité du sol, nature de pente..) peut jouer un rôle important (Mazour et Benmansour, 2002).

Conclusion

Le bassin versant de l'oued Isser est un bassin versant rural situé dans une zone de montagne. De part sa structure géologique et sa lithologie, ce bassin présente une sensibilité à l'érosion hydrique. Cette sensibilité est aggravée par les caractéristiques du climat : forte amplitudes thermiques, précipitations irrégulières et se traduisant souvent à quelques journées lors de la saison hivernale pluvieuse. Les pluies torrentielles sont fréquentes et particulièrement dangereuses sur les versants à fortes pentes et sur les terrains nus.

Ainsi, aux chaleurs de l'été succèdent les chutes d'eau ruisselantes de l'hiver. L'ensemble de ces phénomènes climatiques conjuguent leur agressivité particulièrement quand le couvert végétal n'est pas présent pour jouer son rôle d'écran protecteur des sols. D'autres facteurs climatiques comme la gelée et le sirocco viennent parfois aggraver la situation.

Les différents indices climatiques: Indice de Demartonne, diagramme ombrothermique de Bagnouli et Gaussen, quotient pluviométrique d'Emberger ... permettent de classer la zone du bassin versant de l'Oued Isser dans le semi-aride avec tendance à l'accroissement de l'aridification ou désertification.

L'étude du relief du bassin versant de l'Oued Isser nous a permis de dégager les principales caractéristiques morphologiques qui ont une influence sur l'écoulement des eaux de surface. Les paramètres morphométriques sont étroitement liés aux caractères lithologiques des formations pour la plupart imperméables et meubles qui constituent le bassin versant. L'Oued Isser draine un ensemble de régions hétérogènes, fortement accidentées où le réseau hydrographique est tantôt adapté, tantôt inadapté à la structure. Cette disposition orographique s'explique en grande partie par l'évolution du relief à l'échelle géologique.

Les pentes dépassent souvent 35% au nord du bassin. Globalement, sur près de 32% de la surface du bassin versant, la pente dépasse 30% (Mazour, 1992). On peut donc en déduire a priori que, compte tenu de ces fortes pentes, le temps de réponse du bassin versant est court.

C'est une zone à vocation essentiellement céréalière, avec une forte pression exercée par le cheptel sur la couverture végétale tout au long de l'année. Le paysage est fortement modelé par l'érosion sous toutes ses formes. On y voit de grandes surfaces éclaircies par les effets de

l'érosion en nappe sélective et dont les conséquences sur les rendements sont importantes. Les sols cultivés restent nus, sans protection végétale, durant les longs mois d'automne et d'hiver, quand les averses sont les plus agressives.

Le couvert végétal est globalement insuffisant pour assurer la protection des sols. Les cultures annuelles occupent la plus grande partie du bassin versant. La majorité des terres sont des terres « Arch. », ces terres céréalières donnent de bons rendements les bonnes années. Il faut noter aussi que sur le massif rocheux du jurassique subsistent encore quelques forêts intéressantes : Forêt de Zerdeb et Forêt de Fougahal. Ces forêts sont soumises à la dégradation humaine, aux défrichements et aux incendies rendant leurs sols vulnérable à l'érosion hydrique.

La vulnérabilité des sols, définie comme leur fragilité face aux agressions extérieures telles que le climat et les actions anthropiques dépend de facteurs intrinsèques et extrinsèques que nous examinerons dans la seconde partie de ce travail.

Planche photographique 1. Erosion et paysages dans le domaine marneux



a) Paysage caractéristique des terrains marneux à Sidi Abdelli



b) Quelques espèces locales assurant une protection des sols marneux en pente



c) Parcelle de quantification du ruissellement et de l'érosion à Sidi Abdelli



d) Micro-bassin versant de S/
Ahmed Chérif où est installé
le dispositif expérimental
supplémentaire

Planche photographique 2. Les formes d'érosions rencontrées dans la zone d'étude



a) Ravinement en V sur formation marneuse transformant le paysage en "*badlands*"



b) Phénomène de suffosion: ruissellement hypodermique, et formation des ravines régressives



c) Erosion en ravine menaçant une route à S/A Chérif



d) Zones de décapage et d'érosion sélective à S/A Chérif.
Présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés

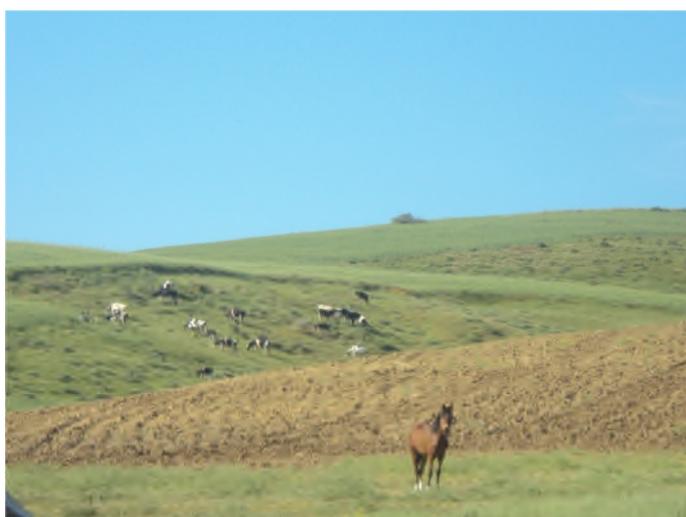
Planche photographique 3. Effet du parcours sur la dégradation des sols



a) Sous certaines conditions, le parcours n'a pas une grande incidence sur le taux d'érosion particulièrement en terrain calcaire



b) Par contre, il tasse le sol, détruit la structure superficielle et augmente le ruissellement



c) Système agro-pastoral : les parcelles laissées en jachère, sont pâturées par le cheptel qui exploite les résidus des récoltes et dépose son fumier.

Planche photographique 4. Gestion conservatoire de l'eau, du sol et de la biomasse



a) Dans la zone montagneuse, les versants sont aménagés de manière traditionnelle en petites terrasses progressives étroites



b) Ligne de Casuarinas : délimite les parcelles agricoles, maintient le sol et favorise l'infiltration



c) Seuil en terre compactée sur les terrains marneux, ayant un triple rôle : bloquer l'érosion linéaire, stocker les sédiments derrière les petits seuils et capter de l'eau pour abreuver le cheptel et produire du fourrage.

Planche photographique 5. Aménagements antiérosifs



a) Les seuils, de correction torrentielle ne sont pas adaptés au terrain marneux



b) Seuil de correction torrentielle en terre inadapte en terrains marneux : déversoir endommagé par la force des eaux

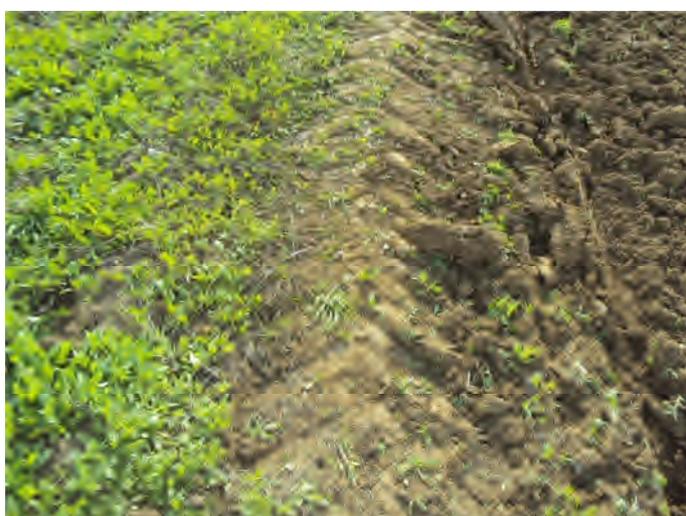


c) Seuil en pierres sèches ; La partie aval est très vulnérable à l'érosion régressive (renard)

Planche photographique 6. Etats de surface du sol et techniques culturales



a) Les techniques culturales sont souvent inadaptées (labour dans le sens de la pente)



b) Les empreintes de roues du tracteur sont à l'origine d'une diminution des capacités de perméabilité des sols et une accélération du ruissellement



c) Parcelle en jachère recouverte par les résidus de culture (juin 2009)



d) Les fentes de retrait en terrain marneux peuvent être importantes en période estivale, aucune végétation ne peut survivre. Les rayons solaires pénètrent en profondeurs et assèchent les racines



e) Pratique de la céréaliculture à grande échelle en système traditionnel : zones à potentialités importantes à préserver absolument



f) Les sols en pente sont fixés par une bonne couverture végétale augmentant la biomasse souterraine et aérienne

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION

Chapitre 5

ETUDE DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION

5.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'érosion peut être un processus lent et insoupçonné, ou encore prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de sol arable. Au fil des chapitres précédents, nous avons essayé de souligner la gravité de l'érosion des sols dans le bassin versant de l'Isser.

Ce dernier est un espace fragilisé par les épisodes de sécheresse et caractérisé par des affleurements de marnes et d'argiles très fragiles. Le phénomène érosif dans cette zone, constitue le facteur principal de la dégradation du patrimoine sol. Il résulte de la conjonction de plusieurs facteurs : agressivité des pluies, érodibilité des sols, dissection du relief, et faiblesse du couvert végétal.

Le sol est l'un des facteurs les plus déterminants de l'érosion. Il peut, en effet, jouer un rôle essentiel dans l'atténuation du risque érosif. Il réagit en fonction de sa nature en accentuant (sols peu résistants) ou en atténuant, voire en annulant (sols très ou super résistants) ces effets.

Le risque peut se définir par le croisement de deux dimensions : aléa x vulnérabilités. L'aléa est le phénomène physique aléatoire, par définition à l'abri ou à l'écart de toute installation ou enjeu humain. Ce dernier aspect se traduit par la vulnérabilité qui est le pendant, en termes économiques ou en termes de vies humaines, de l'aléa en question (Glossary, 1992).

La vulnérabilité des sols peut être définie comme leur fragilité face aux agressions extérieures telles que le climat et les actions anthropiques. Elle dépend donc de facteurs intrinsèques et extrinsèques. Elle peut être hiérarchisée en fonction du degré d'exposition aux risques.

Dans ce chapitre, nous essayons d'estimer la capacité des sols à résister à l'érosion et par conséquent leur érodibilité. Pour cela, nous avons adopté la démarche suivante, scindée en trois parties :

- La première consiste à caractériser les propriétés du sol qui sont en relation directe avec l'érosion et qui reflète bien la résistance du sol à l'agressivité des pluies: les **états de surfaces** et la **capacité d'infiltration** des sols.
- La deuxième consiste à estimer les pertes en terres et le ruissellement sur des parcelles expérimentales et à estimer l'érodibilité des sols, pour montrer le degré de l'ampleur de l'érosion.
- La troisième partie justifie la réalisation d'une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique en intégrant données terrain, cartes thématiques diverses et imagerie satellitaire à travers une solution SIG.

Justification de la démarche

Comme nous l'avons indiqué dans l'état de l'art, les sols du bassin versant de l'Isser sont très remaniés, érodés et ravinés. Le bassin caractérisé par des sols sensibles à la battance, est régulièrement le lieu de formation de ruissellement, notamment lors des orages de printemps, typiques du climat régional. Le paysage est nettement marqué par des griffes, des rigoles et des ravines. Ces formes d'érosion sont bien façonnées par le ruissellement. La question qui se pose est la suivante: le ruissellement n'est-il pas lié à la diminution de la vitesse d'infiltration du sol, diminution liée probablement à la dégradation structurale qui, à son tour dépend des systèmes d'utilisation des sols ?

En fait, le diagnostic des risques de ruissellement et d'érosion sur un versant exige une bonne compréhension du comportement hydrodynamique des sols et en particulier l'origine de la naissance du ruissellement, la capacité d'infiltration du sol en fonction de ses états de surface et des risques de saturation des horizons profonds en relation avec le mode de valorisation. Ceci nous amène alors à étudier deux caractéristiques du sol : les **états de surfaces** ainsi que la **capacité d'infiltration** des sols. Ces tests permettent d'expliquer en partie la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Toutefois, ils restent insuffisants pour quantifier les pertes en terre (érosion) et en eau (ruissellement).

La deuxième partie de la démarche, qui repose sur l'utilisation des parcelles expérimentales de quantification permet justement de pallier aux limites de la précédente. C'est dans cette perspective que s'intègre cette épreuve. On tente de quantifier les pertes en terres et le ruissellement sur des parcelles expérimentales et d'estimer l'érodibilité des sols, pour montrer le degré de l'ampleur de l'érosion.

Or, les problèmes de dégradation des sols ne se posent pas avec la même acuité dans les différentes parties du bassin. Avant de pouvoir prendre des mesures, il faut pouvoir identifier des zones à risque. Il est donc utile de compléter nos expérimentations par une production cartographique de la vulnérabilité des sols à l'érosion sur l'ensemble du bassin pour délimiter les zones d'aménagements prioritaires (troisième partie de la démarche). L'intervention dans les zones vulnérables consiste à proposer des travaux d'aménagement antiérosifs visant à atténuer les effets négatifs des pertes en terre aussi bien à l'amont qu'à l'aval.

Le présent chapitre fournit une vue d'ensemble des dispositifs expérimentaux et les techniques utilisées pour étudier l'évolution du fonctionnement hydrique (variation spatio-temporelle des propriétés hydrauliques de surface du sol, du stock d'eau dans les horizons superficiels et des composantes du bilan hydrique). Il synthétise les méthodes exposées séparément dans les paragraphes suivants.

5.1. ETUDE DU COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE DES SOLS :

Outre le dispositif principal de quantification du ruissellement et de l'érosion installé depuis 1989 (voir p 141), notre travail repose aussi sur un dispositif expérimental que nous avons installé récemment à S/ Ahmed Chérif et qui est constitué de six parcelles paysannes, rectangulaires de 200 m² chacune, sur des pentes variant entre 15 et 20 % (fig.22).

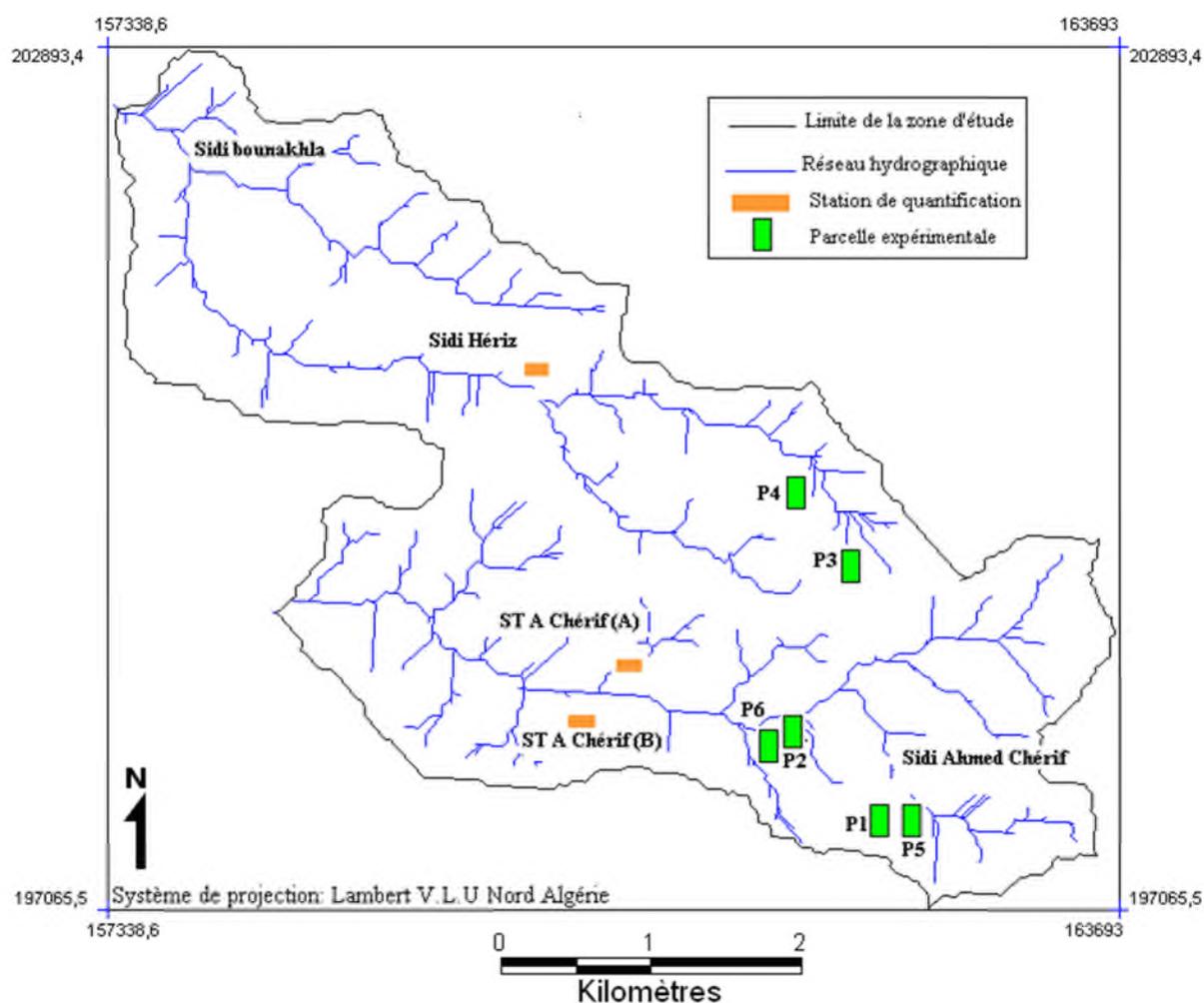


Figure n° 22: Localisation des parcelles expérimentales à travers le micro-bassin versant de S/ Ahmed Chérif

Chaque parcelle est délimitée par quatre barres de fer cornières d'environ 160 cm de long, simplement posées sur le sol de façon à matérialiser les cotés de la placette sans briser l'état de surface du sol. Des bourrelets de terre humide sont disposés sur l'extérieur des barres pour les stabiliser et assurer, le cas échéant, l'étanchéité de la bordure. Les portions des bourrelets qui peuvent affleurer localement le long des barres à l'intérieur de la placette, du fait d'une légère concavité du sol, sont recouvertes de petites pierres plates pour les fixer (Cheggour, 2008).

Quatre de ces parcelles (P3, P4, P5 et P6) ont été semées après un labour avec une charrue à soc, au mois d'octobre, suivi d'un recroisement juste avant le semis aux environs du 15 novembre. Les deux autres parcelles (P1 et P2) ont été semées directement sans labour « semis direct ».

Le tableau.20 résume les caractéristiques des parcelles expérimentales qui ont été comparées.

Tableau n°20: Caractéristiques des parcelles expérimentales

Parcelle	Superficie (m ²)	Semis	Exposition	Situation sur le versant	travail du sol
P1	200	orge	Nord	bas de pente (BP)	Semi direct
P2	200	orge	Nord	haut de pente (HP)	Semi direct
P3	200	blé tendre	Sud	bas de pente (BP)	Labour
P4	200	blé tendre	Sud	haut de pente (HP)	Labour
P5	200	orge	Nord	bas de pente(BP)	Labour
P6	200	orge	Nord	haut de pente(HP)	Labour

Le dispositif supplémentaire nous a permis d'élargir le spectre des variations étudiées (pente, exposition des versants, gestion des sols et des cultures).

Facteurs à prendre en considération :

- 1- Travail du sol (labour ou semis direct)
- 2- Exposition des versants nord/sud
- 3- La pente (dans la même exposition) : haut ou bas de pente

Il est à noter que les opérations culturales réalisées sur les différentes parcelles durant les trois campagnes agricoles (2008 à 2010) sont identiques à celles pratiquées par les agriculteurs de la région.

Les mesures d'infiltration et des états de surfaces ont été réalisées en parallèle sur les parcelles expérimentales les unes semblables (même pente, ou même exposition), pour tester l'homogénéité des réponses, les autres contrastées (labour ou semis direct) pour comparer le comportement de mêmes sols présentant des "modes de gestion" distincts.

Le choix des parcelles d'essai a été commandé d'abord par les impératifs techniques tels que l'accessibilité et la disponibilité en eau, puis l'uniformité de la surface du sol, le type de sol, la possibilité de gardiennage et l'accord du propriétaire du terrain.

METHODOLOGIE :

L'érosion hydrique est un phénomène complexe aux conséquences désastreuses sur la fertilité des sols entraînant une baisse de la production agricole et une forte diminution des revenus des populations touchées.

Dans le bassin versant de l'Oued Isser, l'évolution démographique entraîne une forte pression sur les terres agricoles qui indique l'extension des superficies mises en culture. Cela a conduit au défrichement presque total de la forêt. Cette situation a eu pour résultat une accélération de la dynamique érosive qui menace la présence de la population dans la région vu les nuisances variées (pertes de terre, accentuation des crues et des inondations et progression du ravinement). Nul doute que le couvert végétal, la pente, l'agressivité climatique et les techniques culturales sont des facteurs majeurs de cette érosion. Cependant on reconnaît que les propriétés intrinsèques des sols marneux ont une influence non moins importante sur l'intensité de ce phénomène.

Notre étude s'oriente vers une approche plus déterministe et se déroule en deux étapes complémentaires et menées en parallèle :

- Une enquête menée avec les paysans pour caractériser les systèmes de production pratiqués ainsi que les problèmes rencontrés et qui concernent la perte de fertilité, les maladies... (démarche socio économique);
- Une analyse technique basée sur les mesures et la collecte de données sur les sols et les systèmes de culture utilisés dans la région en vue d'une amélioration de la productivité céréalière en zone marneuse.

DESCRIPTION DES METHODES DE MESURE :

Pour réaliser un bon diagnostic des risques de ruissellement et d'érosion sur un versant cultivé, il est nécessaire d'observer le fonctionnement hydrique du terrain au cours de la saison des pluies, ou tout au moins, de tester la capacité d'infiltration des sols soumis à diverses utilisations les plus courantes.

Aussi, avant de proposer des méthodes de lutte antiérosive, est-il nécessaire de mettre au point des outils simples et performants pour aider, dans chaque paysage, au diagnostic de l'origine du ruissellement, de l'érosion et des risques de dégradation en fonction des systèmes de culture développés par les exploitants agricoles tout au long des versants (Roose, 1993).

Dans cette étude sont décrites deux méthodes simples et peu coûteuses :

- La première, pour déterminer la capacité d'infiltration des sols « **le test au monocylindre** ».
- La seconde, décrivant les états de surfaces des sols, est « **la méthode des points quadrats** ».

Dans un premier temps, nous présenterons le matériel utilisé pour chaque méthode et le cadre conceptuel de son emploi. Nous présenterons ensuite les difficultés rencontrées au cours de l'exploitation des données, avant de discuter les résultats en termes de variabilité spatiale de la mesure. En dernier lieu, nous dégagerons les conclusions d'utilisation de ces méthodes.

5.1.1. ETUDE DE L'INFILTRABILITE DES SOLS :

La capacité d'infiltration ou capacité d'absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.

Si l'on compare l'intensité de la pluie et la capacité d'infiltration d'un sol, il existe deux possibilités :

Tant que l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité d'infiltration, l'eau s'infiltré aussi vite qu'elle est fournie. Le temps nécessaire pour égaler la capacité d'infiltration est variable. Il dépend principalement des conditions antécédentes d'humidité du sol et de l'averse. Le temps requis est d'autant plus long que le sol est sec et que le régime d'alimentation est voisin de la conductivité hydraulique à saturation.

Lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, l'excédent d'eau s'accumule en surface ou dans les dépressions formant des flaques, ou bien encore s'écoule en suivant les dénivelés topographiques. Dans ce cas, on a atteint le **temps de submersion** et l'on parle d'infiltration à capacité (le régime d'infiltration est limité par la capacité d'infiltration du sol).

Les taux d'infiltration dépendent fortement du couvert végétal puisque les végétaux et matières organiques augmentent la porosité du sol et agissent ainsi sur sa conductivité hydraulique. En absence d'un couvert végétal, la porosité du sol près de la surface peut diminuer fortement sous l'impact des gouttes de pluie et former une croûte de battance. Dans ce cas, le taux d'infiltration est très faible. Un système racinaire bien développé améliore aussi les taux d'infiltration (Linsley et al., 1958, Kincaid et al. 1963).

La teneur en eau dans le sol est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la "*capacité au champ*" ou capacité de rétention du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. Près de la surface, le sol n'est pas saturé, les espaces vides contiennent de l'eau et de l'air; l'eau est soumise aux forces de gravité et de capillarité. A partir d'une certaine profondeur, la teneur en eau n'augmente plus: le sol est saturé, tous les pores du sol sont remplis d'eau: cette zone saturée forme une nappe; les forces de gravité sont prédominantes. L'eau du sol ne représente qu'une faible quantité de l'eau douce totale; son rôle est cependant essentiel puisque c'est l'eau qu'utilisent les racines des plantes.

EVALUATION DE LA CAPACITE D'INFILTRATION :

En vue de simuler le comportement hydrodynamique des sols vis-a-vis de l'érosion hydrique, nous avons procédé par la détermination, sur le terrain, des taux d'infiltration des sols sous différents types d'occupation du sol.

Les mesures d'infiltration et la pénétration de l'eau dans le sol, in situ visent à connaître le flux vertical de l'eau d'un sol soumis à une lame d'eau ou d'une pluie artificielle (Brouwers, 1990).

Les méthodes de mesures d'infiltration de l'eau sur terrain se différencient dans leur exécution par :

- Le nombre d'anneaux employés (simple ou double anneaux)
- La charge : constante ou décroissante
- La surface occupée par l'anneau central sur lequel se fait la mesure.

MATERIEL ET METHODE :

Le matériel utilisé pour mesurer l'infiltration est un dispositif à simple anneau à charge décroissante appelée aussi monocylindre (Roose et al., 1993) (fig.23).



Figure n°23 : test d'infiltration au monocylindre ; matériel facile à transporter nécessitant une faible quantité d'eau par rapport aux simulateurs de pluie

La méthode consiste à suivre l'infiltration en fonction du temps d'un litre d'eau introduit dans un cylindre métallique de 100 cm² de section et de 10 cm de charge initiale. Elle consiste à tracer la courbe de la quantité infiltrée en fonction du temps d'arrosage.

Des couples de lecture (hauteur d'eau « h », temps « t ») sont effectués avec une périodicité en fonction de la vitesse d'infiltration. Ce test est poursuivi jusqu'à ce qu'on obtienne une vitesse d'infiltration stable.

Une fois l'infiltration terminée (fin de la brillance de la surface), on observe rapidement si la surface du sol n'a pas été dégradée ou colmatée, puis on enlève rapidement le cylindre. Une coupe est en suite réalisée à l'aide d'une bêche et un couteau pour relever les dimensions et la forme de la partie mouillée (après 3min environ).

Le relevé systématique de la forme des dimensions de la partie mouillée sous le cylindre est très intéressant puisqu'il permet d'une part, de voir comment s'est effectué le mouvement de l'eau et d'autre part, elle nous permet de faire des corrections si l'essai est affecté d'un biais du aux flux latéraux.

INTERPRETATION DE LA FORME DE LA TACHE D'HUMECTATION

Si le sol est sableux et très perméable, la tache aura la forme d'un cylindre (fig.24a).

Si le sol est sablo-limoneux ou argileux, la tache prendra la forme d'un ballon ou d'un cône renversé à cause de la succion latérale dans les micropores (fig.24 b).

Si le sol est tassé, l'infiltration est lente, la succion latérale est importante, et la tache prend la forme d'une coupe évasée (fig.24 c).

Enfin, si le sol est formé d'un horizon perméable sur un horizon peu perméable, la tache s'étale sur cette dernière forme un champignon renversé. S'il y a un drainage oblique vers le bas de la topo séquence, la tache indiquera le sens du drainage oblique (fig.24 d).

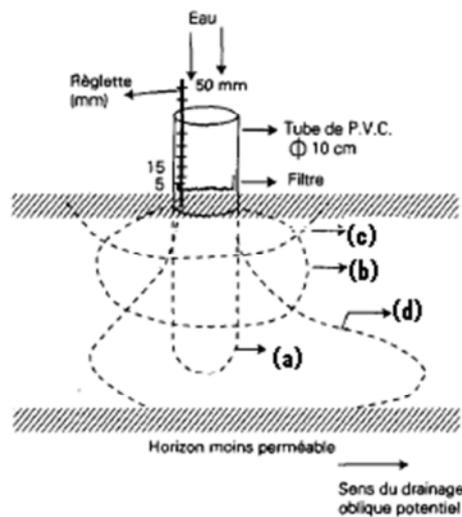


Figure n°24 : Forme des taches d'humectation en fonction des caractéristiques hydrodynamiques des horizons du sol

a) sol sableux très perméable ; b) sol sablo-argileux à porosité fine ; c) sol peu perméable, tassé ou battu par la pluie ; d) horizon perméable sur un horizon moins poreux avec tendance au drainage oblique (Roose et Blancaneaux, 1993 in Roose et al., 1993).

Le diamètre moyen de la tache permet de corriger l'estimation de l'infiltration en fonction de la succion latérale :

Le coefficient de correction (CC) = f (volume des taches) = $\pi.H.R^2 / \pi.H.r^2 = R^2/r^2$

CC varie de 2 à 4 sur sols à comportement sableux ou argileux stables

CC varie de 4 à 10 sur sols argilo-limoneux instables

(Fn corrigé = Fn mesuré x R^2/r^2) (Roose et Smolikowski, 1997).

Capacité d'infiltration corrigée

Pour tenir compte de la succion latérale indiquée par la force de la tache, on calcule le coefficient de correction partir du rayon moyen sur l'ensemble de la hauteur de la tache (R).

On divise l'infiltration finale par le coefficient de correction:

FN corrigée = $FN \cdot R^2/r^2$ (en mm/h)

Plus le coefficient de correction est élevé, plus les risques de drainage oblique sont forts.

Avantages

- 'est un Test rapide qui exige peu d'eau, il permet une bonne compréhension du comportement de l'eau dans le profil et le long d'une toposéquence ; le matériel est très mobile, à la portée de toutes les bourses. Cette méthode permet de définir les propriétés hydrodynamiques les plus utiles.
- Ce test donne souvent des valeurs relatives 10 fois supérieures aux mesures d'infiltration sous pluies simulées (Roose et Smolikowski, 1997).

Limites

- Ce n'est qu'un test comparatif et non une mesure absolue : les sols sont souvent des milieux si hétérogènes qu'il est nécessaire de faire de nombreuses répétitions (cinq au minimum) dont on compare les médianes.
- La surface de mesure (100 cm²) n'intègre pas toujours toute la maille de l'hétérogénéité.
- Il n'est pas toujours facile d'étanchéifier le contact sol cylindre, en particulier sur les sols sableux, caillouteux, fissurés ou tassés : on augmente alors artificiellement les valeurs de la capacité d'infiltration.
- Il faut absolument verser l'eau dans le cylindre avec soin et amortir l'énergie de chute à l'aide des doigts ou d'une cuillère sans remuer la surface du sol ; sans quoi il se forme une suspension qui va se déposer et former une croûte artificielle.

Influence de l'état hydrique des sols

Afin d'avoir des résultats comparables, tous les tests de suivi de la vitesse d'infiltrabilité ont été effectués en période d'été pendant le mois d'**août**, lorsque les sols se trouvaient dans leur état le plus sec (humidité du sol =5%).

Toutefois l'état hydrique initial des sols varie au cours de l'année, raison pour laquelle des répétitions ont été menées en automne (**novembre**), en hiver (**février**) et au printemps (fin **avril**) sur des sols qui renfermaient respectivement une teneur d'eau mesurée en pour-cent massique de l'ordre de 15%, 45% et 28% dans les dix premiers centimètres du sol.

Le choix de ces dates a été fait surtout sur la base de la répartition de la pluie au cours de l'année.

En été, les pluies sont rares et les sols sont secs et fissurés. Les sols restent tels qu'ils sont après les récoltes (**1^{er} essai sol sec**).

Ce n'est qu'au mois de novembre et décembre que le sol commence à être travaillé après les premières pluies de la saison. Le sol commence à s'humidifier et les fissures se referment progressivement, mais la surface reste toujours nue sans couverture végétale (**2^{ème} essai**).

A partir des mois de décembre et janvier, la couverture végétale commence à couvrir le sol, mais le taux de couverture reste toujours faible, le sol pendant cette période est parfaitement humide (**3^{ème} essai**).

Au printemps, le sol est totalement couvert par la végétation et tout en s'approchant de la fin de la saison, il commence à se dessécher et les premières fissures apparaissent et continuent à prendre de l'ampleur au fil de l'arrivée de la saison sèche (**4^{ème} essai**).

Les essais des différentes époques sont situés sur le même site. Les tests ont été accompagnés chaque fois par l'observation de l'allure de la frange infiltrée et de l'état de surface (Morsli, 1997). Avant et après chaque essai, nous avons déterminé au bord de chaque parcelle l'humidité des sols à 10 cm de la surface (par variation de poids d'un sol mis à l'étuve à 105°C pendant 24 h).

Les sols étudiés possèdent plus de 50% d'argiles gonflantes. Ces argiles sont sensibles à la dispersion par l'effet de l'impact de pluies et à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation. IL y'a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies. L'humectation de ces sols argileux entraine un gonflement qui est une forme analogue à la désagrégation (l'agrégat en se délitant cède de l'argile « dispersion argileuse »).

L'argile mobilisé migre dans l'eau d'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices intra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former la croûte.

La formation des croûtes, ou organisation pelliculaire de surface, entraine une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion.

RESULTATS ET DISCUSSION :

Rappelons tout d'abord que, sur le terrain, nous avons fait cinq répétitions pour chaque campagne de mesure et chaque parcelle expérimentale. Les valeurs d'infiltration obtenues ont été corrigées en fonction de la succion latérale indiquée par Laforce de la tache d'humectation (fig. 25).

Nous donnerons la valeur moyenne des répétitions qui sera à la base de nos commentaires.

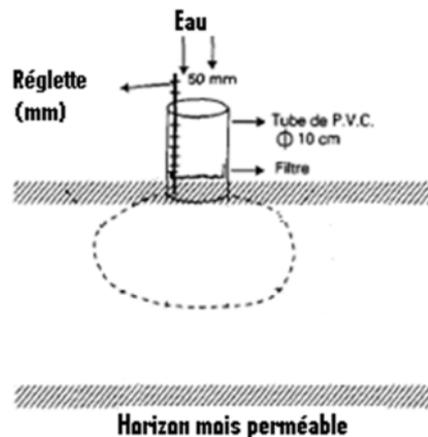


Figure n° 25: Forme de la partie mouillée sous le cylindre de mesure de l'infiltration obtenue sur sol marneux

Dynamique de l'infiltration

En région aride et semi-aride le ruissellement et son corollaire l'érosion dépendent du dépassement de la capacité d'infiltration d'un sol, c'est-à-dire de sa possibilité d'absorber reflux d'eau fourni. Le processus d'infiltration débute généralement par une décroissance très rapide durant les premiers instants de l'événement pluvieux. Par la suite le taux de décroissance diminue pour aboutir à un régime stable appelé infiltrabilité finale.

L'infiltration de l'eau dans le sol est un paramètre très important pour l'étude de l'érosion ; plus l'infiltration est importante, plus le ruissellement est réduit. Celle-ci est extrêmement variable en fonction de l'humidité préalable, de la texture et surtout de la structure du sol et de la stabilité de sa surface.

Les résultats d'infiltration obtenus sont présentés sous forme de graphiques sur la figure.26

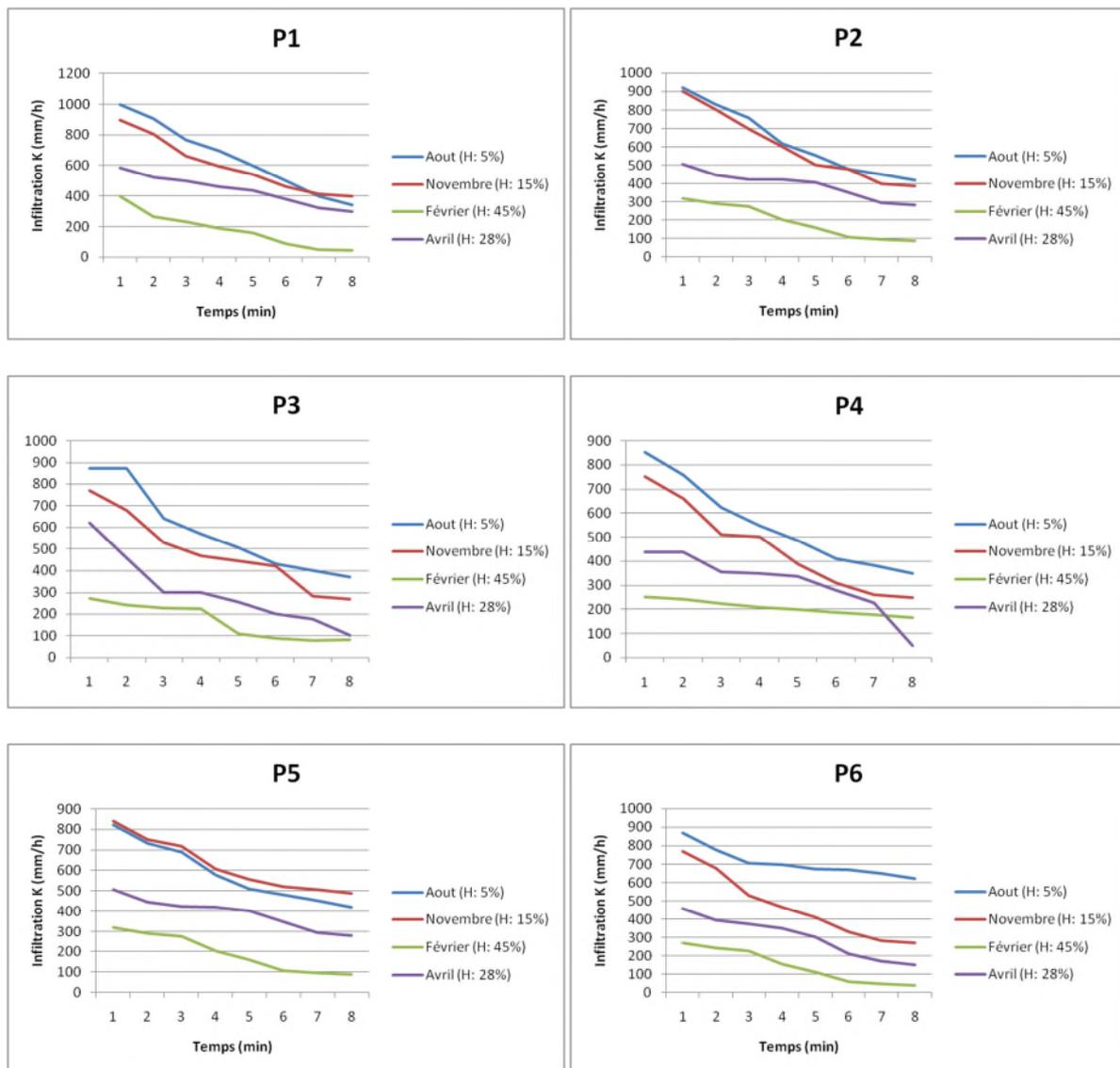


Figure n°26 : Courbes d'infiltration des parcelles expérimentales étudiées
Les courbes d'infiltration obtenues pour les six parcelles étudiées ont présenté la même allure quelle que soit la position topographique. Elles montrent l'enchaînement de 3 phases :

1. La phase d'**imbibition** : durant laquelle toute l'eau s'infiltré. Cette phase coïncide avec la constitution de la croûte structurale ou croûte de battance sous l'action mécanique et physique de l'eau.

2. La phase de **décroissance de l'infiltration** qui se présente avec un profil de diminution progressif. La diminution de l'infiltrabilité est due à plusieurs causes :

- La diminution du gradient potentiel hydrique au fur et à mesure que la teneur en eau du sol augmente.
- La dégradation de la structure qui fait disparaître les macropores.
- Le colmatage des pores par les particules solides mises en suspension.
- Le piégeage de l'air qui se comprime dans les pores et empêche la pénétration de l'eau.

Selon Poss et al, (1989-1990) la phase de décroissance correspond à la transformation de la croûte structurale en croûte d'érosion.

3. La phase de **stabilisation** (intensité limite d'infiltration), au cours de cette période la diminution de l'infiltrabilité se poursuit très lentement et coïncide conjointement avec le développement de la croûte d'érosion sur les zones restées saillantes et de la croûte de sédimentation dans les zones immergées (Poss et al, 1989-1990).

Une infiltration préférentielle attribuable à des macro-pores semble se produire au début de l'infiltration pour toutes les parcelles.

Dans les sols marneux, très riches en minéraux argileux gonflables, La dynamique hydrique est très particulière. L'infiltration est très liée à l'état hydrique et structural du sol. Le suivi de l'infiltration a permis d'expliquer cette dynamique hydrique.

Au début de l'été, le dessèchement du sol provoque une réorganisation de ses constituants. Il en résulte un retrait se manifestant par une modification de la porosité du sol et notamment par l'apparition des fissures. La fissuration du sol s'effectue en 2 étapes : le dessèchement provoque d'abord une fragmentation du sol, créant un réseau serré de fissures fines, puis il provoque une prise en masse, créant un réseau lâche de fissures larges. La fissuration des sols marneux apparaît s'effectuer en 2 phases : la fragmentation et la prise en masse (Hallaire, 1988, Ferroukh, 1994 in Morsli, 1997). L'infiltration peut atteindre des valeurs assez basses sur des sols tassés ou reposant sur un horizon imperméable.

Le dessèchement du sol provoque l'apparition d'un réseau serré de fissures fines, puis le retrait continu avec le temps et on observe l'élargissement de certaines fissures au dépend d'autres. Des fissures fines peuvent aussi se former au sein 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 au environ d'une humidité pondérale de 14 pour mille (Morsli, 1997). Les fissures restent ouvertes jusqu'à l'automne, (saison de pluie).

En été, lorsque le sol est sec, l'infiltration est élevée (344- 998 mm/h) et peut atteindre des valeurs plus basses sur des sols tassés ou reposant sur un horizon imperméable. Les eaux infiltrées par les grandes fissures emportent vers les profondeurs des quantités appréciables de terres fines. Cette infiltration préférentielle influe négativement sur la fertilité des sols (appauvrissement en matière organique).

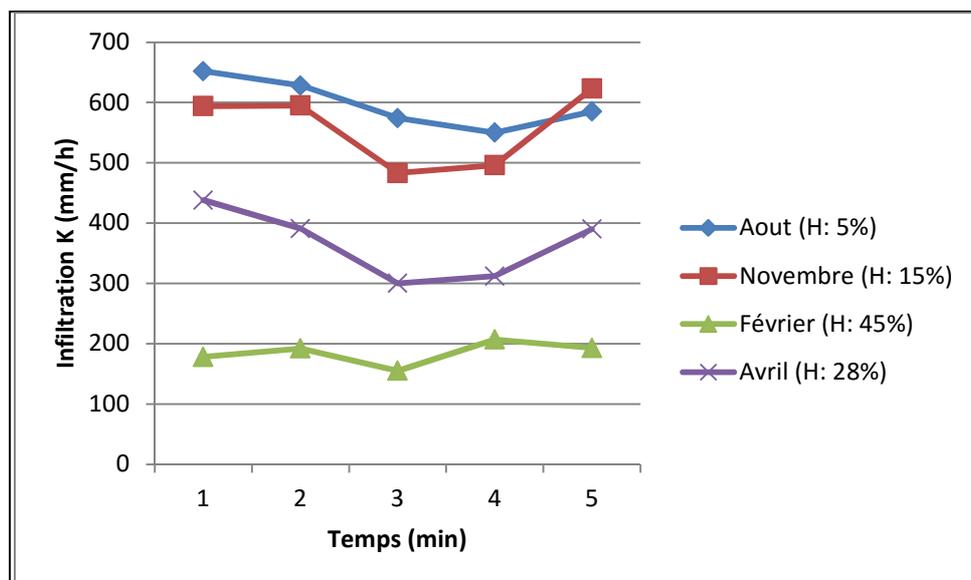
Dans l'essai de fin novembre, l'humidification du sol par les pluies d'automne a provoqué un gonflement qui a fait disparaître les fissures (les traces restent encore visibles). L'infiltration est relativement faible (249- 900 mm/h). Elle a diminué par rapport à celle de l'été. Celle-ci est devenue encore plus faible au 3^{ème} essai (37- 398 mm/h), celui de février quand le sol est très humide.

Au 4^{ème} essai, en avril, le sol commence à se dessécher, l'infiltration augmente légèrement et varie de 82 à 620 mm/h suivant les situations.

Les sols marneux, une fois saturés deviennent gonflants, perdent leur stabilité et par simple soutirage ou rupture de pente, on observe un effondrement en masse de ces sols.

Pour ce type de sol, lorsque l'infiltration le permet, l'eau s'infiltré dans la masse et dès que certains seuils sont franchis, des déformations et des glissements s'amorcent.

Les résultats obtenus montrent que l'infiltration est fortement influencée par l'état hydrique des sols qui varie en fonction des saisons (fig. 26 Graphique 8).



Graphique n°8 : variation de l'infiltration moyenne en fonction de l'état hydrique des sols (H : humidité du sol)

A partir de cette analyse, on peut dire que l'écoulement de l'eau dans le sol marneux est de deux types : un écoulement lent dans le sol (écoulement au niveau de la microporosité du sol). Cet écoulement se réalise lorsque le sol est humide et fermé (non fissuré) et un écoulement rapide par l'intermédiaire des fissures, écoulement privilégié et hypodermique (écoulement préférentiel) à travers la macroporosité.

Boudjemline (1987 in Roose, 1996) a montré que c'est l'humidité de la couche superficielle qui influence le plus la réaction du sol à la pluie : au-delà de 10 cm, le complément d'information est négligeable, sauf dans le cas où le ruissellement naît de la saturation d'un

massif poreux situé au-dessus d'un horizon très peu perméable. Trévisan (1986) a montré par ailleurs que c'est le déficit de saturation de cet horizon poreux (Porosité totale - porosité pleine d'eau avant l'averse) qui conditionne le démarrage du ruissellement (pluie d'imbibition) plus que l'humidité en elle-même des échantillons.

L'infiltration est aussi liée à l'état structural du sol. Les conséquences du retrait ont une grande influence sur l'infiltration de l'eau dans le sol (Hallaire, 1988). Les phénomènes de gonflement-retrait et de saturation des sols ont surtout été analysés dans le cas des sols argileux (Tessier, 1984 ; Bruand, 1986 ; Hallaire, 1987 ; Mc Garry et Daniells, 1987).

Généralement, les valeurs d'infiltrabilité les plus élevées sont enregistrées en été, au niveau des sols présentant les plus fortes proportions de surfaces ouvertes, tandis que les plus faibles infiltrabilités sont notées en hiver, sur des sols avec de faibles proportions de surfaces ouvertes. Cette relation montre que l'ouverture telle que nous l'avons estimée visuellement est un paramètre hydrodynamique pertinent. Ces résultats concordent avec ceux de Morsli, (1997) obtenus à partir des test d'infiltration par la méthode de Piogger et ceux de Habi et al., (2009) obtenus sous pluies simulées.

Il est bien entendu que l'infiltration sur sol sec est plus élevée que sur sol humide, mais résultat inattendu, la courbe d'infiltration relative à la parcelle P5 nous montre bien l'inverse!

Cette apparente contradiction peut être expliquée par le fait que le sol se soit fermé assez rapidement par le gonflement des argiles présentes. L'accumulation d'argiles sur ces sols peu évolués et pauvres en matière organique permet une réaction rapide avec l'eau pendant les premiers instants du contact de l'eau avec le sol le rendant tout de suite imperméable. Ce n'est que quelques instants après que les pores du sol commencent à s'ouvrir progressivement permettant une infiltration sensiblement supérieure à celle du début quand le sol était sec.

a. Parcelles en semis direct :

L'infiltration moyenne pour le sol sec sur les **parcelles en semis direct** est élevée (998-44mm/h), par contre, sur les parcelles labourées elle est moyenne et varie de 871 à 37 mm/h: la présence d'une litière à la surface du sol, fortement transformée par les vers de terre et les termites, explique la disparition des croûtes de battance et l'amélioration de la capacité d'infiltration de l'eau par le semis direct.

Sur les **parcelles en semis direct exposées nord** (P1 et P2), l'infiltration moyenne est variable et augmente de l'amont vers l'aval des versants. C'est de ce fait qu'elle est modeste sur la parcelle P2 située en haut du versant (920- 88 mm/ h) alors qu'elle atteint 988 mm/h sur la parcelle P1 située en bas du versant.

Certains auteurs ont établi des fonctions de puissance entre le gradient de pente et l'érosion en nappe (Govers, 1991 ; McCool *et al.*, 1993). Il a été démontré, en se basant sur des pluies simulées, que plus la pente est forte plus l'infiltration est faible à cause du changement des propriétés de la surface du sol et la mise en place de la croûte de battance qui se traduisent

par l'augmentation de l'érosion (Poesen, 1984).

b. Parcelles labourées :

Sur les **parcelles labourées** (P3, P4, P5 et P6), l'infiltration moyenne varie en fonction de l'exposition des versants « nord/sud » et augmente de l'amont vers l'aval des versants.

Ainsi, l'infiltration moyenne est plus élevée sur les parcelles P5 et P6 exposées nord (871- 38 mm/h) que sur celles (P3 et P4) exposées sud (850- 37mm/h).

b.1. Parcelles exposées nord :

Pour les **parcelles labourées exposées nord** (P5 et P6), l'infiltration moyenne est modeste sur la parcelle P6 exposée nord et située en haut du versant (403 mm/ h) alors qu'elle atteint 449 mm/h sur la parcelle P5 exposée nord et située en bas du versant.

b.2. Parcelles exposées sud :

Pour les **parcelles labourées exposées sud** (P3 et P4), l'infiltration moyenne est modérée (871- 82 mm/h) sur la parcelle P3 (située en bas de pente), mais sur la parcelle P4 (située en haut de pente), l'infiltration moyenne de l'eau est encore plus faible (852- 50). Celle-ci peut atteindre jusqu'à 38 mm/h quand le sol est humide (3^{ème} essai en février).

Nos résultats montrent que ce sont les parcelles orientées au nord et situées en bas de pente qui enregistrent les valeurs d'infiltrabilité les plus élevées. Cela s'explique par leur richesse en biomasse qui favorise l'infiltration et s'oppose ainsi au ruissellement.

En effet, les teneurs en matières organique sur les versants nord sont relativement élevées (Mazour, 2004) et diffèrent selon les systèmes d'utilisation des terres. Les versants sud les moins arrosés et les plus érodés sont exposés à des conditions favorables de minéralisation de la matière organique.

De cette analyse de l'infiltration, il ressort que :

- si l'infiltration est élevée lorsque le sol est sec, elle peut atteindre des valeurs moyennes à faibles et même très faibles lorsque le sol est humide.

- l'infiltration sur les parcelles en semis direct est plus élevée que sur parcelles labourées.

- l'infiltration est variable dans l'espace : elle est plus élevée sur les versants exposés nord que ceux exposés sud. Pour le même type de sol et la même orientation, l'infiltration augmente de l'amont vers l'aval des versants.

La valeur d'infiltration la plus faible a été mesurée sur la parcelle **P4**, labourée, orientée sud et située en haut du versant (parcelle pauvre en biomasse, sol tassé et endurci, croûte de battance...).

La plus forte valeur d'infiltration a été enregistrée sur la parcelle **P1**, en semis direct, orientée nord et située en bas du versant ; à ce niveau, le sol est maintenu couvert en permanence par

une biomasse sèche de résidus végétaux, sa vie biologique s'anime, sa fertilité s'enrichit et il est à l'abri des différentes formes de dégradation. En réduisant le ruissellement, le système du semis direct constitue une protection efficace contre l'érosion.

Le travail du sol par labourage entraîne, en revanche, l'élimination des vers de terre qui entretiennent un réseau de galeries permettant la progression des racines et l'infiltration de l'eau. L'oxygénation du sol minéralise la matière organique, la terre s'appauvrit mais la culture en place bénéficie des minéraux libérés, ce qui donne l'impression d'une amélioration de la fertilité. En fait c'est le capital agronomique qui est consommé.

D'après Ehlers (1977 in Raheliasoa, 1986 in Bidon, 1994), l'infiltration de la pluie s'est trouvée meilleure dans le cas d'un sol non labouré que dans le cas d'un sol labouré (blé sur sol loessique), et la différence est surtout nette pour les fortes intensités de pluie; par conséquent le ruissellement et l'érosion sont réduits.

Ce même auteur a démontré que la porosité totale des sols labourés et les pores supérieurs à 30 microns sont élevés dans la couche 0-10 cm, mais très réduits dans la semelle de labour (20-30 cm). Par contre, dans les sols non labourés, la porosité et les tailles des pores sont plus homogènement répartis dans tout l'horizon (0-45 cm).

Certains facteurs favorisent la structure du sol, d'autres la régénèrent. Un travail du sol excessif diminue la stabilité de la structure, de même qu'une hydratation trop brutale des agrégats, suivie d'une dessiccation rapide. Certains éléments interviennent sur la stabilité structurale et ondes interactions positives comme par exemple le calcium, l'humus et le fer (Oades, 1984 ; Amézketa, 1999 in Mrabet et al, 2001). La destruction de la structure ou la désagrégation se produit par une perte de porosité, de perméabilité, par une prise en masse, un état de dispersion, et par la formation d'une croûte de battance à la surface du sol.

CONCLUSION SUR L'INFILTRABILITE

Le test d'infiltration au monocylindre nous a permis d'identifier le comportement hydrodynamique des sols marneux et de mettre en évidence des comportements influencés par le mode de gestion de ces sols ainsi que leur position topographique.

Les sols marneux se caractérisent par une structure stable et une infiltration très variable dans le temps et dans l'espace. Les mesures d'infiltration effectuées sur ces sols ont révélé une liaison étroite entre les dynamiques hydriques et structurales (porale). Lorsque ces sols sont desséchés, la macroporosité fissurale est responsable de l'infiltration très élevée. L'eau de pluie s'engouffre dans les fentes qui constituent les voies préférentielles d'écoulement (Morsli, 1997).

Les résultats obtenus ont bien montré l'influence de l'humidité préalable du sol sur le comportement hydrodynamique. L'infiltration varie de 998 à 344 mm/h pour les sols secs, de 620 à 50 mm/h pour les sols humides et de 398 à 38 mm de pluie pour les sols très humides.

Malgré leur bonne stabilité structurale, les sols marneux restent très sensibles à l'érosion du fait de leur comportement hydrodynamique particulier. Ils sont affectés d'alternances d'humectation et de dessiccation (déterminées par les conditions météorologiques) entraînant

une microfissuration des agrégats. Lorsque ces sols sont fissurés, l'infiltration est très élevée et une érosion interne peut être engendrée. Ces infiltrations peuvent même favoriser des mouvements de masse. A l'état plus ou moins saturé, l'infiltration devient très faible, ce qui déclenche facilement le ruissellement, et lorsque l'infiltration est importante, des mouvements de masse peuvent être déclenchés sur les zones de fortes pentes.

Le piétinement du bétail et le surpâturage modifiant la structure du sol (fermeture des pores, tassement, etc.) réduisent l'infiltration de l'eau dans le sol et rendent plus aisé le ruissellement (Mazour, 2004).

Cette étude a permis de contribuer à la compréhension du comportement hydrodynamique des sols marneux de la zone d'étude selon le mode de gestion des terres à l'échelle de l'année.

5.1.2. ETUDE DES ETATS DE SURFACES

Parmi les divers paramètres explicatifs des caractéristiques hydrodynamiques des sols, les états de surface tiennent une place importante qu'il n'est plus besoin de démontrer. Ils sont composés d'un ensemble de descripteurs caractérisant le microrelief de la surface, son état structural, son état hydrique et son couvert végétal. Les états de surface occupent une place d'interface entre la sphère climatique, la sphère pédologique et la sphère anthropique. Leur évolution est donc conditionnée par ces trois paramètres très complexes.

Par ailleurs, la conduite des systèmes de culture détermine une succession dans le temps de perturbations de l'état de surface, par fragmentation sous l'effet du travail du sol, par compactage par les engins agricoles et par dégradation structurale sous pluies (battance).

Appréhender les variations des états de surface grâce à quelques descripteurs permet alors un regard transversal et complet sur le milieu environnant. Dans notre cas, l'évolution des états de surface est notamment conditionnée par les épisodes pluvieux. Elle se manifeste par le passage d'un état initial (le semis) poreux, meuble et motteux à un état dégradé, beaucoup plus lisse et fermé (Auzet, 2000).

Le suivi des états de surface s'avère fondamental pour la compréhension des processus de ruissellement et d'érosion (Casenave et Valentin, 1989). L'étude de l'érosion hydrique nécessite non seulement la prise en considération des facteurs physiques et anthropiques, mais aussi l'étude des états de surfaces du sol et leur impact sur l'écoulement et l'infiltration. En d'autres termes, pour étudier l'érosion, il faut mettre en relation les propriétés climatiques de la région, les propriétés physico-chimiques du sol, le type du couvert végétal, le mode d'exploitation du sol ainsi que ses états de surfaces. C'est-à-dire qu'il faut adopter une vision globale du phénomène de l'érosion qui ne se limite pas à le considérer comme un simple effet des facteurs physiques ou anthropiques (Riahi, 2002). C'est dans cette perspective que s'intègre cette épreuve. On tente d'évaluer les risques de l'érosion en se basant sur l'étude de l'état de surface du sol et son impact sur le ruissellement, l'infiltration et les pertes en terre.

Rappelons que les relevés de descriptions des états de surfaces des sols ont été faits suivant la méthode des points quadrats.

MATERIEL ET METHODE :

Les sites choisis pour faire la description des états de surfaces du sol correspondent aux six parcelles expérimentales décrites plus haut dans le tableau. 20).

Le matériel de travail comporte, en plus des parcelles, deux cadres en bois (voir fig. 27) et une tige métallique ou (une aiguille à tricoter).

-Le premier cadre est de 1m^2 , muni d'un quadrillage qui comporte 100 grilles de 10 cm^2 . Les observations sont faites sur 110 points d'intersection. Ainsi, les données sont directement fournies en %.

-Le deuxième cadre est un support. Il sert à maintenir le premier à l'horizontale de la parcelle sans toucher le couvert végétal. Dans le cas où la hauteur du premier cadre est inférieure à celle de la végétation, celle-ci va être écrasée et s'étaler sur une superficie supérieure à la réalité (Riahi, 2002).

-La tige métallique doit être bien droite et bien pointue pour faciliter les relevés.



Figure n°27 : méthode des points quadrats ; un test simple et facilement applicable sur terrain (à gauche : états de surface août 2009, à droite: états de surface février 2009)

Les relevés des états de surfaces ont été réalisés sur quatre époques: en automne (novembre), en hiver (février), au printemps (fin avril) et en été (août).

Le choix de ces dates a été fait sur la base d'une étude préliminaire sur la variation de l'état hydrique, de l'état du sol (travaillé ou non), couvert ou nu...) et de la répartition de la pluie au cours de l'année (Morsli, 1997), (Boughalem, 2007).

Ces observations des états de surface sont, Comme nous l'avons souligné plus haut, couplées à des mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies naturelles.

La méthode consiste à décrire les états de surface des parcelles expérimentales comme suit: Poser le cadre en bois, muni du quadrillage, à 5 cm du sol, et laisser descendre (systématiquement, sans viser) une aiguille à tricoter aux points d'intersection correspondant au cadre de mesure.

Au point d'impact avec le sol, compter les points suivants :

- le % des surfaces couvertes au ras du sol ($CV\% = \text{adventices} + \text{litière} + \text{cailloux}$) ;
- le % des surfaces ouvertes ($SO\% = \text{agrégats} + \text{fissures} + \text{trous faune}$) ;
- ou fermées ($SF\% = \text{pellicule, croûtes, zones tassées et cailloux inclus dans la masse du sol}$) (Roose, 1996).

On prélève donc l'absence ou la présence de chaque élément. Ainsi, les données sont directement fournies en %.

La somme des surfaces couvertes et nues égale 100%. De même, la somme des surfaces fermées et ouvertes égale 100 %.

Avantages et limites

C'est une méthode rapide adaptable à toutes les situations et ne nécessitant pas une grande technicité. Toutefois, cette méthode présente de multiples inconvénients. Elle est basée sur le hasard car seules les composantes effectivement touchées par la tige sont prises en considération. De plus, le passage répété des observateurs sur les parcelles expérimentales favorise le tassement différentiel du sol par le piétinement. Ce qui perturbe le ruissellement et l'érosion sur la portion de la surface observée.

RESULTATS ET DISCUSSION :

Les résultats montrent que les composantes de l'état de surface du sol de chaque parcelle évoluent d'un relevé à l'autre. Les composantes les plus dynamiques sont le couvert végétal et le sol qui varient en sens inverse (tableau 21).

Les surfaces fermées vont produire rapidement de l'eau libre à la surface du sol. Pour que celle-ci ruisselle, il faut encore qu'elle évite les pièges des surfaces ouvertes c'est-à-dire zones motteuses très perméables, fissures profondes, galeries des termites et des vers de terre. La couverture du sol, en interceptant l'énergie des gouttes de pluies (canopée et litières) et l'énergie des eaux ruisselantes (litières, adventices et végétations basses) peut avoir une influence considérable sur l'érosion et dans une moindre mesure, sur le ruissellement (Roose, 1995).

En été (Août), les sols marneux présentent la plus forte proportion de surfaces ouvertes (50-57%), en hiver (Février) la plus faible proportion (0%), avec des valeurs intermédiaires en automne et au printemps (10- 47%). Ceci est dû au phénomène du retrait- gonflement caractéristique du domaine marneux.

En fin, l'étude de la porosité d'un sol marneux nécessite l'analyse des phénomènes de gonflement et de retrait, responsables d'une variation importante de l'espace poral au cours des cycles d'humectation et de dessiccation. On sait que ces phénomènes sont étroitement liés à la nature minéralogique de l'argile, à la charge du feuillet, mais également aux contraintes subies par le matériau au cours de son histoire hydrique et/ou mécanique (Tessier, 1984; Azzaoui, 1988).

On constate d'une manière générale que sous les mêmes conditions climatiques, les parcelles étudiées présentent des réactions différentes dues à la différence de leurs états de surfaces.

Les parcelles labourées (P3, P4, P5 et P6) sont les parcelles les plus anthropisées. Les labours ameublissent la terre et détruisent la végétation spontanée. Ils réduisent la teneur en matière organique des horizons superficiels des sols, leur stabilité structurale et leur capacité d'infiltration. Cela explique la faible densité du couvert végétal (19- 28%) dans ces 4 parcelles lors du 1^{er} relevé (août). Ce taux augmente progressivement pour atteindre des valeurs très élevées (90%) lors du 4^{ème} relevé. Cela signifie que ces parcelles ne bénéficient pas d'une protection durant toute l'année. Cette variation saisonnière du taux du recouvrement

engendre une variation saisonnière de l'érosion, d'autant plus que la période des labours coïncide avec la période des grandes pluies.

Tableau n°21 : Caractéristiques des états de surface des différentes parcelles

	Parcelles	Etats de surfaces						
		Cailloux (%)	Litière (%)	Adventices (%)	Surface couverte (%)	Sol nu (%)	Surface ouverte (%)	Surface fermée
Août	P1	10	23	4	37	63	64	36
	P2	9	13	7	29	71	67	33
	P3	7	10	3	20	80	49	51
	P4	9	9	2	19	81	50	50
	P5	8	10	10	28	72	67	33
	P6	9	7	6	22	78	64	36
Novembre	P1	10	20	4	34	66	34	66
	P2	8	14	7	29	71	56	44
	P3	7	3	8	18	82	30	70
	P4	9	4	2	15	85	55	94
	P5	9	7	12	28	72	56	44
	P6	9	4	5	18	82	33	67
Février	P1	9	23	24	56	44	17	83
	P2	10	18	22	50	50	6	94
	P3	7	15	19	41	59	8	91
	P4	9	14	14	37	63	5	91
	P5	8	20	21	49	51	6	94
	P6	9	13	18	40	60	7	93
Avril	P1	10	26	57	93	7	42	58
	P2	9	25	56	90	10	43	57
	P3	7	23	58	88	12	12	88
	P4	9	20	56	85	15	27	73
	P5	8	24	58	90	10	44	56
	P6	9	21	58	88	12	36	64

Les labours entraînent sur ces parcelles une augmentation des risques de ruissellement et, sur les parcelles situées en haut de pentes (P4 et P6) des risques de ravinement. Etant moins cohérentes, elles sont plus érodibles. Ces modifications dans les états de surface au niveau des parcelles labourées ont provoqué un changement dans les comportements hydrologiques des sols.

Les parcelles P1, P2, P5 et P6 orientées nord présentent une proportion de surface couverte (18- 93%) plus importante que les parcelles P3 et P4, orientées sud (15- 88%).

Sous semis direct, les parcelles P1 et P2 bénéficient du taux de recouvrement les plus élevés (29- 93%). On constate que le pourcentage de sol nu a diminué considérablement et parallèlement, celui du couvert végétal a augmenté progressivement (du 1^{er} au 4^{ème} relevé).

Par ailleurs, ces 2 parcelles bénéficient de la protection, garantie essentiellement par le couvert végétal, constante contre le détachement des particules dû à l'énergie cinétique des gouttes de la pluie. Cela signifie que les fractions des gouttes des pluies interceptées ou amorties sont très importantes.

Les résultats mettent en évidence l'exception que constitue le semis direct comme étant la pratique présentant l'état de surface le moins dégradé et cela pour les raisons suivantes:

- Les observations de surface n'ont pas révélé d'évolution de la surface sur la période étudiée ;

- On n'observe que très rarement la formation de croûtes sédimentaires, témoin de la formation du ruissellement.

Il est généralement admis que le semis direct, en augmentant la résistance à l'arrachement par la pluie et le ruissellement, diminue les transferts de matières solides à l'échelle des parcelles. La couverture du sol par les végétaux, morts ou vivants, retarde l'apparition de la croûte de battance dans la mesure où, en interceptant les gouttes d'eau, elle réduit leur énergie cinétique et par conséquent leur pouvoir dégradant. De même, les résidus de récolte créent une rugosité pérenne qui barre la propagation du ruissellement et favorise l'infiltration de l'eau dans le sol (Gascuel-Odoux et Heddadj, 1995).

Une bonne stabilité structurale réduit la battance et donc les pertes par ruissellement. Dans une expérimentation installée en 1987, le sol sous semis direct montre une amélioration de la stabilité structurale à l'eau en comparaison avec le labour conventionnel au pulvérisateur à disques, et ceci après une période de 11 ans (Mrabet et al., 2001; Saber et Mrabet, 2002, in Mrabet et al., 2002).

Cette amélioration est due à une augmentation de 136 % de la matière organique sous semis direct alors que sous le labour conventionnel, la séquestration du carbone était négligeable (Mrabet et al., 2001 in Mrabet et al., 2002).

Monnier et al. (1976 in Mrabet et al., 2002). ont trouvé qu'entre 1970 et 1974 sur un sol limono-argileux, la stabilité structurale a augmenté considérablement surtout à la surface du sol dans le cas du semis direct. Dans les Rougiers de Camarès (sud de France), Barthès et al. (1998,1999 in Mrabet et al., 2002) ont trouvé une corrélation significative positive entre la macroagrégation et la teneur en matière organique de la couche 0-10 cm d'un sol limono-argilo-sableux. Ces mêmes auteurs ont conclu que, même à très court terme, ce sol sous semis direct présente les plus faibles taux de ruissellement et de charge solide que sous labour profond classique à la charrue à socs. Cette amélioration du régime hydrique sous semis direct est expliquée en grande partie par une augmentation de l'indice de macro agrégation stable et du niveau de matière organique.

Sur la parcelle P4 (labourée, orientée sud et située en haut de pente), on a enregistré une infiltration de 165mm/h correspondant à un taux de recouvrement de 37% (essai de février). En avril, la même parcelle a bénéficié d'un taux de recouvrement plus élevé (85%). La protection de cette parcelle, garantie essentiellement par le couvert végétal, n'a pas reflété une meilleure infiltrabilité (50 mm/h). Ceci signifie que les zones couvertes par la végétation ne doivent pas être qualifiées systématiquement d'infiltrante.

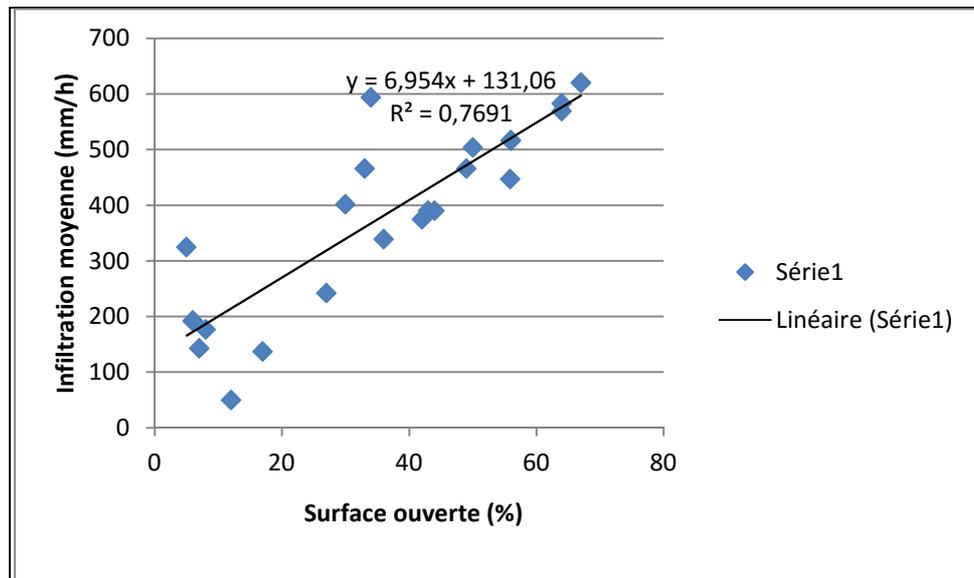
Les résultats montrent que l'infiltration est plus élevée sur les parcelles présentant les taux de recouvrement les plus élevés. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Mosli,1997. et ceux trouvés dans les parcours du moyen Atlas (Sabir et al., 1994).

Inversement, nos résultats ne mettent pas en évidence de relation nette de l'infiltration avec la couverture végétale du sol, contrairement à ce qui est signalé par plusieurs auteurs (Alkarkouri *et al.*, 2000; Sabir *et al.*, 2004).

4.2 Relations entre infiltrabilité et caractéristiques du sol

Les relations observées entre les infiltrabilités mesurées et les caractéristiques du sol sont présentées par le graphique.9. Nous constatons que les infiltrabilités observées sont bien corrélées avec l'ouverture du sol ($R^2 = 0,76$). La valeur la plus élevée d'infiltrabilité (998 mm/h) est enregistrée au mois d'août au niveau de la parcelle P1, sous semis direct, exposée nord et située en bas de la pente. En effet, cette parcelle présente les plus fortes proportions de surfaces ouvertes (jusqu'à 67 %), tandis que la plus faible infiltrabilité (50 mm/h) a été mesurée au 3^{ème} essai (Février) sur la parcelle P4, labourée, exposée sud, située en haut de pente et présentant une faible proportion de surface ouverte (5%). La parcelle P4 encourage le plus le ruissellement. Ceci est dû à la valeur de pente élevée qu'elle possède. Cette relation montre que l'ouverture du sol telle que nous l'avons estimée visuellement est un paramètre hydrodynamique pertinent.

J. Duman in (Medjoub, 1990) a démontré qu'il existait une relation entre les caractéristiques analytiques du sol et l'érodibilité et s'est surtout attardé sur l'influence des cailloux sur le coefficient d'érodabilité.



Graphique n°9 : Relation entre l'infiltrabilité et la surface ouverte du sol

CONCLUSION:

Le ruissellement et l'infiltration sont fortement corrélés à la pluie en début d'averse, ce sont les états de surface par la suite qui conditionnent en grande partie le ruissellement et par conséquent les pertes en terre.

L'étude des états de surfaces et de l'infiltration avec les facteurs qui les commandent, ont permis en partie d'expliquer la sensibilité des sols à l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Isser.

Ces méthodes peuvent nous aider à poser un diagnostic sur l'origine du ruissellement, donc de l'érosion en rigoles et ravines, si communes sur les versants marneux du bassin versant de l'Isser.

La sensibilité des sols dépend beaucoup de ces caractéristiques, mais reste dépendante encore plus des conditions climatiques, topographiques et culturelles.

Si ces paramètres ont permis d'expliquer dans une certaine mesure la résistance des sols à l'érosion dans la zone d'étude, d'un point de vue qualitatif, en forte rigueur, le degré et l'ampleur de l'érosion ne peuvent être estimés que par une évaluation quantitative du processus (Morsli, 1997).

L'analyse suivante permet justement de pallier aux limites de la précédente : Elle est consacrée justement à la quantification de l'érosion et du ruissellement sur des parcelles expérimentales placées sur site.

5.1.3. ETUDE QUANTITATIVE DE L'ÉROSION ET DU RUISSELLEMENT

L'érosion hydrique étant un phénomène très complexe, on peut la considérer en général, comme fonction de la pente, des précipitations et de leur intensité, de la consistance géologique du substratum et de la stratigraphie des couches, de la couverture végétale, de la structure et de la texture (susceptibilité) des sols, y compris les propriétés physiques et chimiques, de l'exposition des versants et de la température, enfin des moyens d'exploitation des sols (Galevski, 1955).

Nous n'avons pas l'intention d'exposer le rôle de tous ces nombreux facteurs. Chacun d'eux joue un certain rôle dans la formation des phénomènes d'érosion, mais sans doute les précipitations et leur intensité exercent un rôle essentiel et décisif autant pour la phase de décapage que dans celle du transport des matériaux. Ici nous parlerons plus spécialement du rôle des précipitations sur l'enclenchement de l'érosion et du ruissellement. A cet effet, un dispositif expérimental de quantification de l'érosion et du ruissellement a été mis en place en 1989 par l'université de Tlemcen en collaboration avec l'administration des forêts. Ce dispositif n'étant plus en service, nous nous inspirons dans cette recherche, de l'étude de M. Mazour menée en 2004 sur le bassin versant de l'Oued Isser. L'auteur a utilisé le même protocole expérimental durant la période (1990- 2004) pour analyser l'évolution des taux d'érosion, de ruissellement et des hauteurs et intensités des pluies sur les versants marneux à Sidi Ahmed Chérif (planche photographique 1.c).

Les résultats obtenus vont être exploités dans ce travail pour analyser, d'une part, les processus d'érosion et du ruissellement actuels et d'autre part, les relations avec la dynamique de l'eau dans le sol, les états de surfaces et l'amélioration de la productivité des céréales, objet de nos travaux

5.1.3.1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Nous donnons tout d'abord, un aperçu sur le matériel et la méthode qui ont été adoptés pour la quantification des processus d'érosion et du ruissellement dans les versants marneux de l'Isser.

Le dispositif expérimental comporte 17 parcelles de 100 m² de type Wischmeier, parmi lesquelles six parcelles à Sidi Ahmed chérif que nous avons étudiées (Fig. 28). Le dispositif permet d'analyser l'effet des systèmes de gestion des terres les plus fréquents et les plus dominants dans la région : Sol nu, sol cultivé, sol en jachère et quelques améliorations sur les risques de ruissellement et des pertes en sol. Les sols de la zones d'étude sont bruns calcaires argileux, d'une grande capacité hydrique mais, assez pauvres en matière organique.

La parcelle d'érosion matérialise un petit bassin versant de 100 m² avec une longueur de 22,13 m et une largeur de 4,52 m (Roose, 1968).

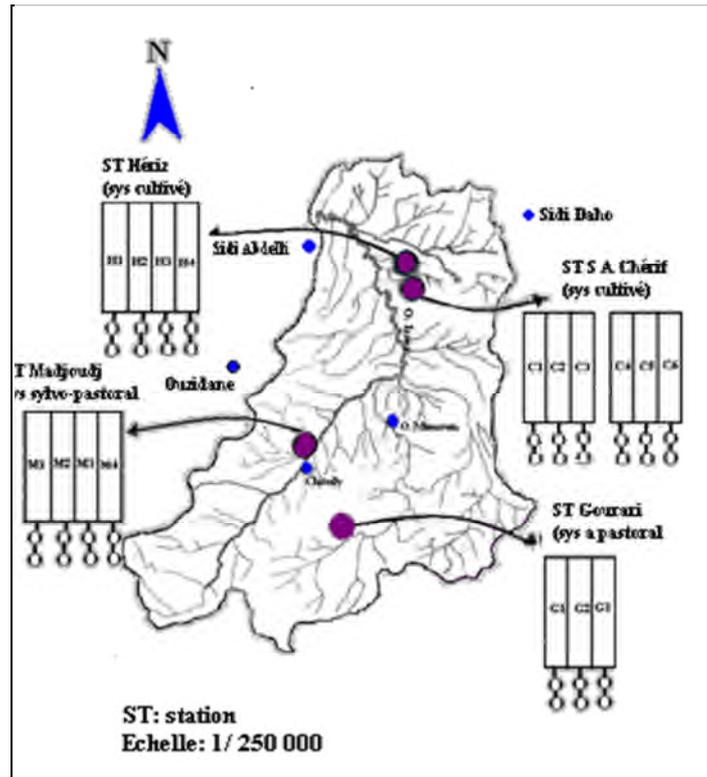


Figure n°28 : Carte de situation du dispositif expérimental (parcelles de quantification type Wischmeier) dans le bassin versant de l'Isser

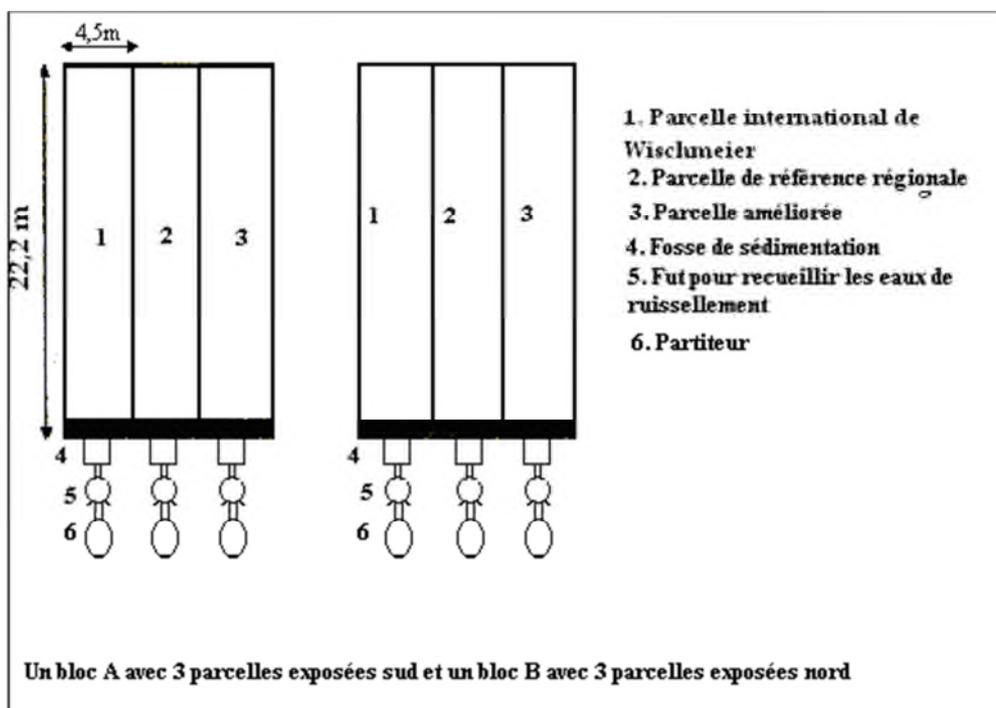


Figure n° 29: Model d'une station de quantification du ruissellement et de l'érosion

Les parcelles expérimentales sont isolées de l'extérieur par des tôles métalliques fichées dans le sol isolant ainsi la parcelle de tout écoulement ou infiltration de l'extérieur. A l'aval, un canal récepteur en béton dirige les eaux de ruissellement et les terres érodées vers un système de stockage composé d'un piège à sédiments et de deux cuves de 1m³ reliées l'une à l'autre par un partiteur à 3 trous (Figure 28 et 29).

Tout le dispositif (cuve et canaux) est couvert d'un toit en tôles en vue d'éviter les erreurs par rebondissement des gouttes de pluie (effet splash). Il est réparti à travers les versants comme suit :

Un bloc (A) avec trois parcelles exposées sud et un bloc (B) avec aussi trois parcelles exposées nord, sur des sols marneux du miocène dans le micro bassin de Sidi Ahmed Cherif. Ces parcelles détiennent une pente variant de 8 à 34 %.

Dans chaque bloc sont comparées :

- **Un témoin international**, appelé aussi parcelle standard, ou parcelle de référence 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 5 cm de profondeur (au maximum une fois par mois pluvieux), afin de casser les croûtes de surface ;

- **Un témoin régional** avec des cultures traditionnelles représentées par une rotation céréale jachère et le travail du sol dans le sens de la pente dans les régions marneuses à vocation céréalière ;

- **Un témoin régional** avec des cultures traditionnelles représentées par une rotation céréale-jachère pâturée et le travail du sol dans le sens de la pente, le parcours est simulé par des piétinements d'un mouton dans la parcelle de 100 m², dans les régions marneuses à vocation agro-pastorale.

- **Un témoin régional** avec des cultures intensives représentées par une céréaliculture en blé dur et un travail du sol perpendiculairement à la pente dans les régions marneuses à vocation céréalière ; pour chaque région et système de production : agriculture intensive avec l'utilisation des engrais nécessaires et une rotation biennale appropriée blé vesce avoine et blé pois chiches.

Le dispositif nous permet de calculer les facteurs qui rentrent dans l'équation universelle de pertes en terre de Wischmeier expliquée plus haut.

L'approche méthodologique repose sur l'analyse du ruissellement et de l'érosion au niveau de 06 parcelles expérimentales de cent mètres carrés de type Wischmeier à sidi Ahmed Cherif.

Les mesures du ruissellement et des pertes en terre (suspensions et sédiments lourds) ont été effectuées après chaque pluie, à l'aide des dispositifs de cuves installés en aval de chaque parcelle.

Pour les matières en suspensions, un échantillon de un litre est prélevé des cuves, après homogénéisation de l'eau de ruissellement). La précision des mesures est de l'ordre de 10% pour la détermination du ruissellement et de l'érosion.

5.1.3.2. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus et publiés nous donnent une caractérisation confirmée des processus d'érosion et du ruissellement en place.

- **Précipitations :**

P. Seltzer, (1946) a montré que la répartition des pluies obéit aux trois lois suivantes :

La hauteur de la pluie augmente avec l'altitude mais est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les versants sous le vent. Elle augmente de l'ouest à l'est et diminue à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

Les pluies moyennes annuelles varient de 270 à 550 mm dans le bassin versant de l'Isser d'où une variabilité relativement importante. Le tableau. 22 montre les écarts exprimés en % entre les pluies annuelles de 1991 à 2001 et les valeurs moyennes annuelles des pluies déterminées sur deux périodes assez longues : 1913-1971, 1971-2001 et une période récente : 1990-2001. Il en ressort une diminution des moyennes pour la période récente à laquelle appartient la période de mesure de M. Mazour.

Tableau n°22 : Ecart des pluies annuelles par rapport aux moyennes annuelles déterminées sur trois périodes de mesures et les pluies maximales journalières (Mazour, 2004)

Année		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Pluie max. Jour mm/24h	Tlemcen	30,6	44,7	26,1	35,1	41,9	33,8	25,1	35,7	20	26,6	
Pluie moyenne annuelle mm	Tlemcen	371	243	268	256	541	260	349	260	253	413	422
Ecart/moyenne (%) 1913-1971	Tlemcen : 496 mm $\sigma = 100$	-25	-51	-46	-48	+9	-48	-30	-48	-49	-17	-15
Ecart/moyenne (%) 1971-2001	Tlemcen : 347 mm $\sigma = 110$	+7	-30	-23	-26	+56	-25	+1	-25	-27	+19	+22
Ecart/moyenne (%) 1990-2001	Tlemcen: 331 mm $\sigma = 100$	+12	-27	-19	-23	+63	-21	-5	-21	-24	+25	+27

L'indice Rusa de l'agressivité des pluies oscille entre 20 et 100 en moyenne, et le rapport Rusa/hauteur des pluies annuelles est de l'ordre de 0,10 à 0,12 (Mazour, 1992).

Or le moyen le plus caractérisant de l'érosivité des averses est l'intensité maximale des pluies. Cette dernière peut arriver à n'importe quel endroit de notre zone d'étude et elle détermine l'agressivité climatique. La partie sud du bassin est celle qui enregistre les intensités les plus élevées et la fréquence la plus importante de ces événements intenses. IL y'a lieu de noter qu'il existe une forte corrélation entre le module pluviométrique annuel et l'intensité maximale de la pluie. Donc pour pouvoir analyser la répartition spatiale de

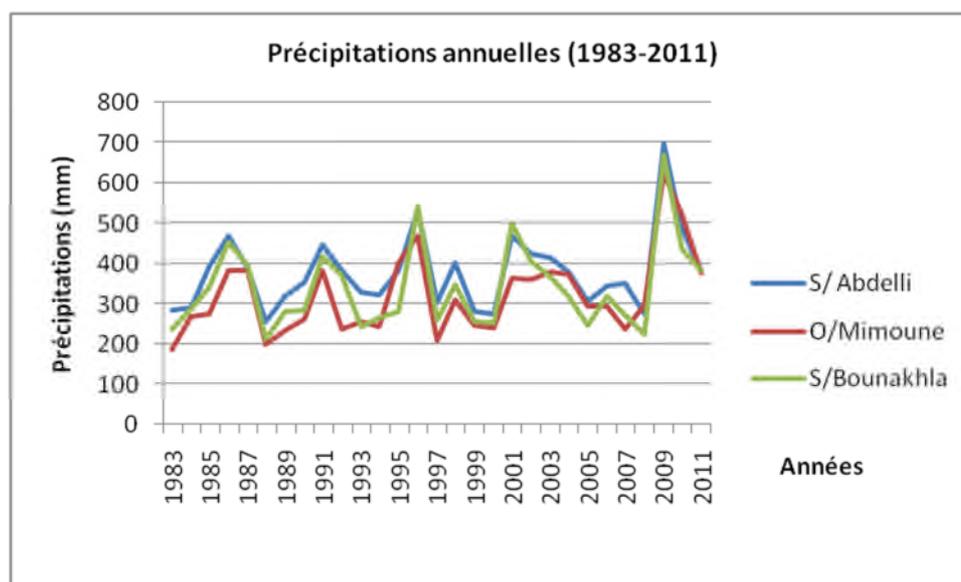
l'agressivité climatique, nous nous inspirons du travail de (Mazour, 2004) pour dire qu'il y'a globalement trois zones distinctes représentant chacune un tiers de la superficie du bassin avec des valeurs de l'indice Rusa de l'agressivité des pluies R plus ou moins différentes :

- 1) La zone nord où l'agressivité climatique est la plus faible ($R = 30$)
- 2) La zone médiane du bassin correspondant à une agressivité climatique moyenne (R varie de 45 à 55).
- 3) La zone sud où l'agressivité climatique est la plus forte. La valeur de R peut y atteindre 60.

Le rapport Rusa /hauteur des pluies annuelles est de l'ordre de 0,10 à 0,12 (Mazour, 1992) alors que ce rapport est de 0,4 à 0,6 en Afrique de l'ouest et de 0,2 à 0,3 dans les montagnes de l'Afrique centrale (Roose et Arabi, 1994 in Mazour, 2004).

Les précipitations moyennes annuelles durant les trois campagnes agricoles (2008 à 2010) ont été plus importantes en hauteur par rapport à celles enregistrées durant la période (1991-2004)(Graphique.10). Cependant, les intensités ne dépassent pas 45- 50mm/h.

Pour les stations du bassin versant de l'Oued Isser, l'intensité des pluies pour la période (1991-2004) n'a pas dépassé 50 mm/h sauf pour quelques averses exceptionnelles notamment celle observée le 27/02/93 avec 98mm/h (Mazour, 2004).



Graphique n°10: Précipitations moyennes annuelles dans les 3 stations (S/Abdelli, O/Mimoune et S/Bounakhla :1983-2011) (ANRH)

- **Ruissellement et érosion**

Les résultats du ruissellement et de perte en terre varient en fonction des modes de gestion des terres de la zone d'étude et les ruissellements moyens sont en général assez modestes tout au long de la période de mesure : le coefficient de ruissellement moyen annuel (K_{ram}) sur sol nu varie de 2 à 10,8 % sur sol brun calcaire argileux en système agro-pastoral, de 2 à 8% sur

parcelle traditionnelle et de 0,9 à 7,4% sur parcelle améliorée, alors que le coefficient de ruissellement maximum (K_{rmax}) a atteint des valeurs relativement élevées : 33 sur les sols cultivés (tableau.23 et 24).

Le (K_{ram}) le plus élevé se rencontre sur le sol dénudé et exposé aux différents aléas climatiques.

Sur les parcelles "améliorées", le ruissellement annuel et surtout maximum est légèrement plus faible que sur les parcelles traditionnelles : cela s'explique par une nette augmentation de la biomasse (% couvert végétal) et une réduction des surfaces fermées par la battance.

Tableau n°23 Erosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Sidi Ahmed Chérif A - Exposition sud-ouest (1991-2004) Tlemcen(Mazour, 2004).

	Pluies	Parcelle Standard			Système Traditionnel			Système amélioré		
		Kram	Krmax	Erosion	Kram	Krmax	Erosion	Kram	Krmax	Erosion
	(mm)	(%)	(%)	(t/ha/an)	(%)	(%)	(t/ha/an)	(%)	(%)	(t/ha/an)
1991	371	09,9	34,6	3,60	7,1	33,0	3,20	4,4	20,0	1,20
1992	243	08,8	26,5	2,22	6,1	12,7	0,87	2,8	08,1	0,40
1993	268	05,1	12,5	0,73	4,1	11,2	0,41	0,9	02,4	0,28
1994	256	09,2	13,1	0,99	7,5	12,8	1,00	3,9	06,0	0,40
1995	541	10,8	36,5	05,9	7,8	28,7	3,95	6,4	20,0	2,10
1996	260	05,5	09,8	1,68	5,2	12,8	1,20	3,5	07,0	0,30
1997	349	09,9	27,2	4,30	7,1	18,0	2,60	6,6	16,0	2,00
1998	260	04,3	08,6	1,52	4,6	09,0	1,60	2,6	08,9	0,60
1999	253	03,6	08,2	0,61	2,0	08,0	0,40	1,4	06,0	0,20
2000	413	07,5	29,8	3,24	6,5	26,0	2,30	5,0	15,6	0,72
2001	422	07,8	27,6	3,90	7,9	22,8	2,90	6,0	13,0	1,10
2002	405,6	06,8	16,6	2,80	4,2	18,8	1,20	3,4	16,0	0,92
2003	367,2	04,5	14,6	1,98	3,9	16,2	0,96	3,1	14,2	0,80
2004	320,6	05,2	16,1	2,21	4,8	18,7	1,24	3,2	16,1	0,80

Les coordonnées de la station de mesure sont : $X=161,11$ $Y=199,12$ $Z=512$ m.

Les systèmes de gestion appliqués au niveau de ces parcelles sont :

- Sol nu sur parcelle nue labourée sarclée chaque mois
- Système traditionnel : blé-jachère traditionnelle, travail dans le sens de la pente.
- Système amélioré : blé intensif avec engrais (NP), travail perpendiculaire à la pente.

Les sols sont des sols à caractère verticale sur marnes. La pente est de 30% et les dimensions de la parcelle sont : $L= 22,2$ m, $l= 4,5$ m.

L'agressivité climatique est : $RUSA = 33$, $\sigma = 9,7$

Etat de surface : 5% de cailloux.

Tableau n°24 Erosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Ahmed Chérif B - Exposition nord-est (1991-2004) Tlemcen (Mazour, 2004).

	Pluies (mm)	Parcelle Standard			Système Traditionnel			Système amélioré		
		Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)	Kram (%)	Krmax (%)	Erosion (t/ha/an)
1991	371	9,9	34,6	3,60	7,1	33,0	3,20	4,4	20,0	1,20
1992	243	8,3	25,0	2,20	6,0	13,1	0,92	2,2	08,7	0,37
1993	268	3,8	10,0	0,70	2,6	07,0	0,40	3,3	09,4	0,31
1994	256	6,0	11,1	0,92	5,5	12,8	1,00	3,9	07,0	0,41
1995	541	7,9	35,5	4,90	7,7	28,7	3,90	7,4	22,0	2,10
1996	260	4,5	09,7	1,28	5,6	13,8	0,80	3,5	08,0	0,30
1997	349	8,9	25,2	3,90	6,0	18,0	2,20	6,6	16,0	2,00
1998	260	4,0	08,0	1,22	3,6	07,0	0,90	2,2	08,1	0,30
1999	253	2,0	07,2	0,31	2,0	08,0	0,20	1,3	06,0	0,10
2000	413	6,8	28,8	2,64	5,5	20,0	1,30	5,0	15,0	0,90
2001	422	7,1	22,6	1,90	7,9	22,6	1,80	6,0	14,0	1,20
2002	405,6	6,6	14,2	2,20	4,0	15,8	1,10	3,3	12,0	0,80
2003	367,2	4,5	12,6	1,88	3,8	12,2	0,86	2,7	14,2	0,82
2004	320,6	5,0	15,1	2,11	4,7	12,7	1,14	2,4	11,1	0,76

Les coordonnées de la station de mesure sont :X=161,11 Y=199,12 Z=512 m.

Les systèmes de gestion appliqués au niveau de ces parcelles sont :

- Sol nu sur parcelle nue labourée sarclée chaque mois
- Système traditionnel : blé-jachère traditionnelle, travail dans le sens de la pente.
- Système amélioré : blé intensif avec engrais (NP), travail perpendiculaire à la pente.

Les sols sont des sols à caractère vertique sur marnes. La pente est de 20% et les dimensions de la parcelle sont : L= 22,2 m, l= 4,5 m.

L'agressivité climatique est : RUSA = 33, $\sigma = 9,7$

Etat de surface : 4% de cailloux.

En nous appuyant sur les résultats trouvés par Mazour (2004), nous enregistrons une bonne corrélation entre les grandeurs de « h » (hauteur des pluies précipitées) et « E » (le débit solide). Or, les aboutissements obtenus ne sont pas toujours satisfaisants. Les nuages de points sont parfois trop dispersés. Nous avons été amenés à supprimer certains points (dont les valeurs nous paraissent aberrantes) pour obtenir une corrélation correcte. Cependant, si dans la réalité ces points avaient une signification traduisant, par exemple, des « accidents » pluviaux sur une station, il faudrait alors admettre que les corrélations que nous avons présentées ne peuvent être considérées que comme très approchées.

Ces corrélations sont indiquées par les figures 30 et 31. Les valeurs du coefficient de corrélation linéaire (R) sont indiquées dans le tableau 25. Elles montrent que la corrélation « h » et « E » est étroite et se traduit exactement par une proportionnalité parfaite, avec exception pour quelques torrents, mais qui peut être interprétée par des circonstances spéciales expliquées précédemment.

Les tableaux 23 et 24 montrent clairement que l'érosion en nappe est modeste durant la période d'étude, et n'a jamais atteint le seuil de tolérance défini par Heusch comme étant 12t/ha/an. Cette forme d'érosion varie significativement selon les systèmes de culture et les types de sol. Les taux les plus élevés sont enregistrés en automne. Les pertes en terre sont plus élevées sur un sol nu que sur un sol cultivé.

Généralement, le ruissellement démarre après 20 millimètres de pluie si le sol est sec et après 4 millimètres, seulement, si le sol est humide, encrouté ou compact. Ce seuil de hauteur de pluie donnant lieu à un ruissellement, dépend évidemment des caractéristiques de chaque averse (intensité mais aussi capacité à saturer le sol), mais surtout l'état de surface du sol (humidité des dix premiers centimètres de sol, présence de fissures, de trous de vers, de croûtes de battance, de litière, de cailloux et de mottes résiduelles créées par le travail du sol).

Il a été observé que le labour profond et grossier augmente temporairement l'infiltration. Par exemple, lorsqu'on a remplacé le labour par un sarclage par herbicide sous le vignoble de Ouzera, l'horizon superficiel s'est tassé et le ruissellement a été multiplié par trois (Bouchetata, 2006).

Du fait de cette amélioration temporaire, le labour a réduit le ruissellement et l'érosion durant les années déficitaires, à laquelle appartient la période de mesure de M. Mazour.

Mais, lors des années humides (et des averses ou séries d'averses exceptionnelles), la capacité de stockage et d'infiltration des sols peut être dépassée par l'abondance de pluies : surtout sur forte pente, les risques d'érosion sont élevés sur sols travaillés, car le labour a réduit leur cohésion.

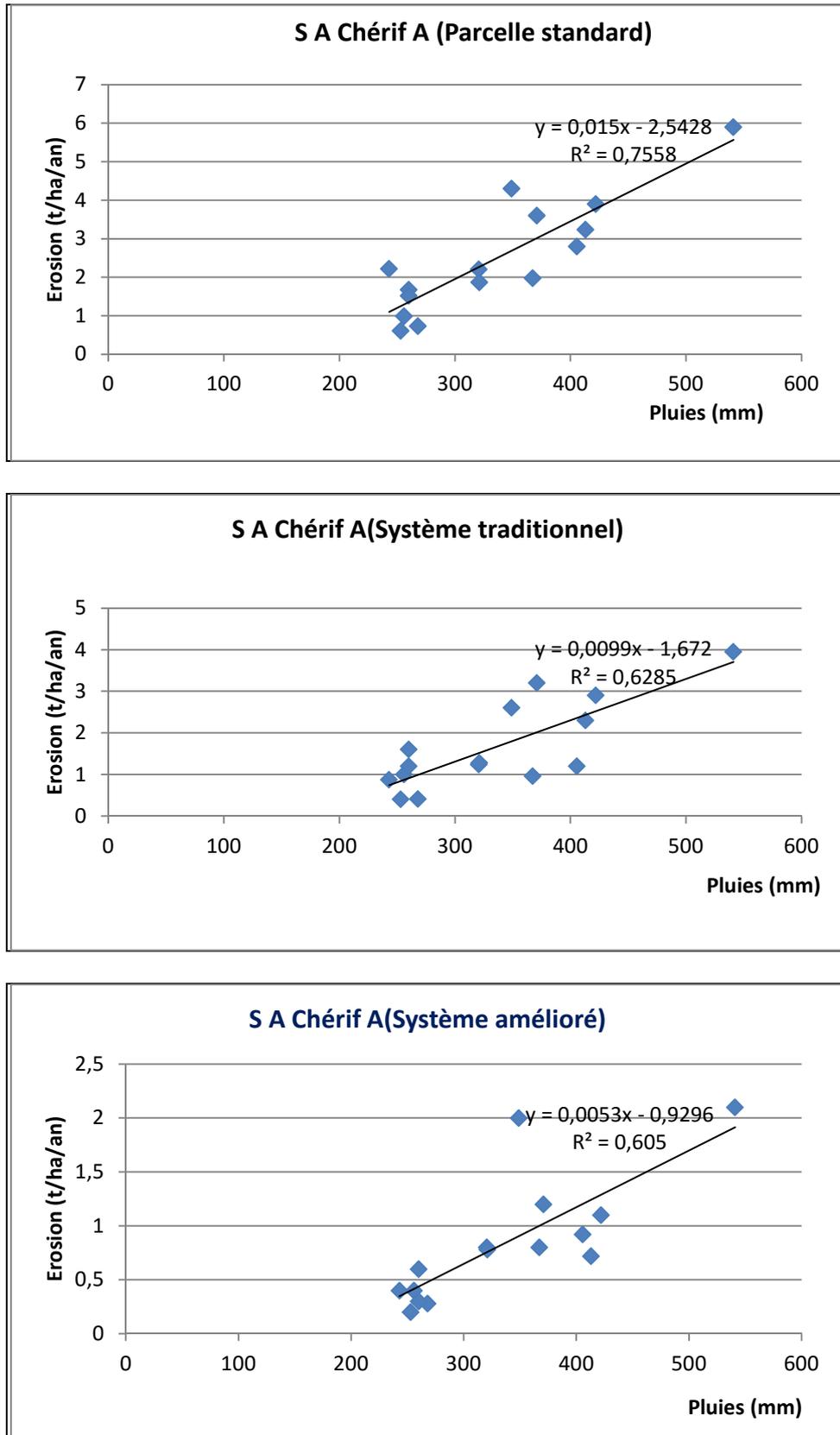


Figure n°30 : Relation entre l'érosion (t/ha/an) et la lame précipitée à S A Chérif A

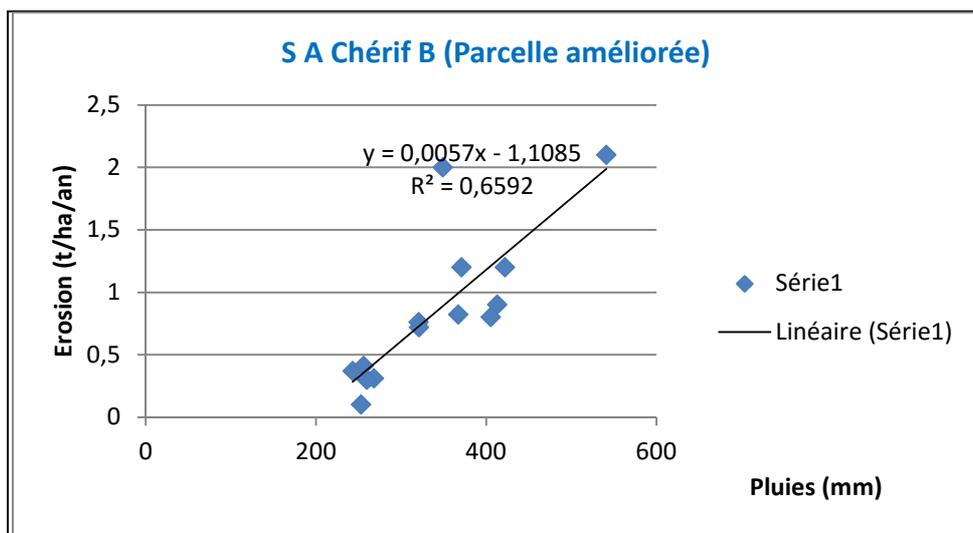
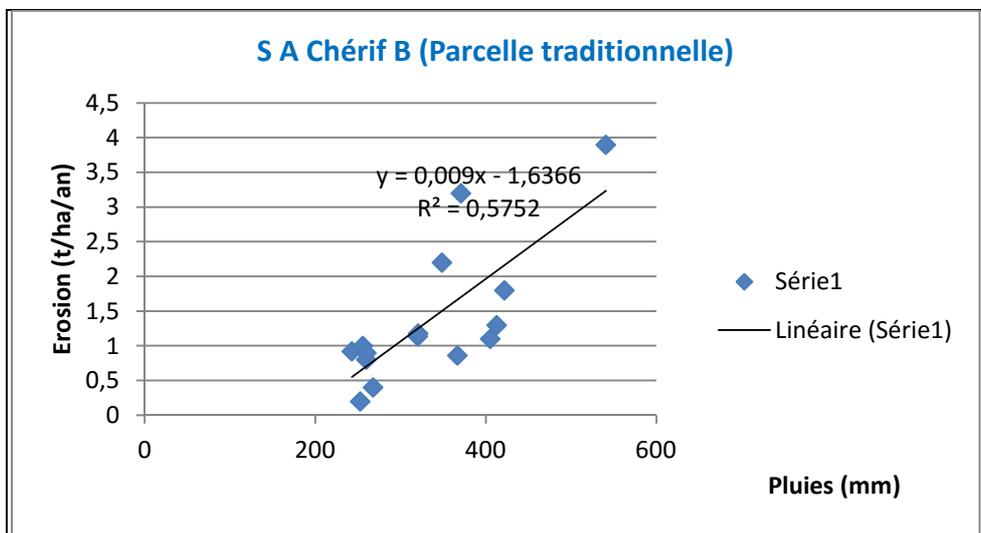
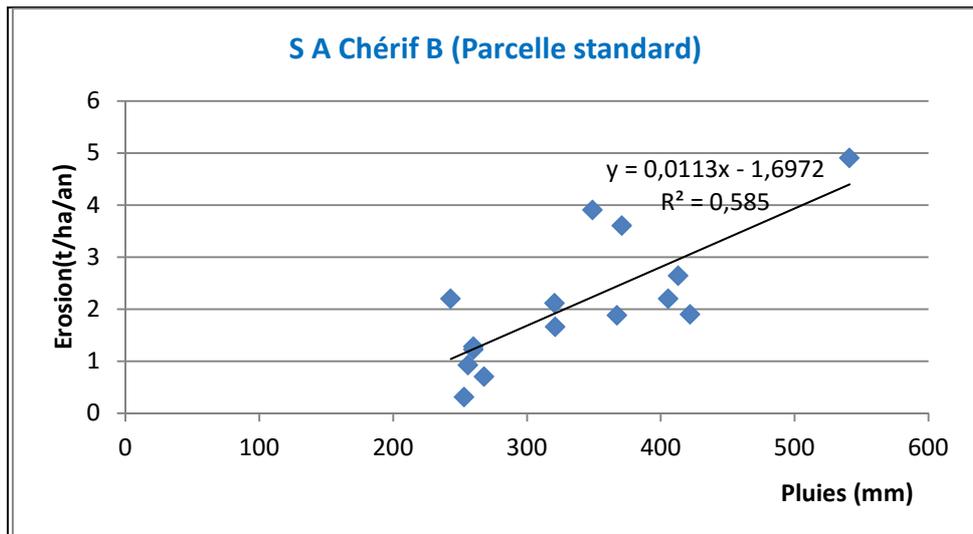


Figure n°31 : Relation entre l'érosion (t/ha/an) et la lame précipitée à S A Chérif B

Tableau n°25: Corrélation pluies - érosion (E)

	Système de gestion appliqué	Coefficient de corrélation linéaire (R)	Droite de régression Pluies (P) /Erosion (E)
A Chérif A	Parcelle standard	0,86	$E = 0,015P - 2,542$
	Syst traditionnel	0,79	$E = 0,009P - 1,672$
	Sys amélioré	0,79	$E = 0,005P - 0,929$
A Chérif B	Parcelle standard	0,76	$E = 0,011P - 1,697$
	Syst traditionnel	0,75	$E = 0,009P - 1,636$
	Sys amélioré	0,81	$E = 0,005P - 1,108$

Sachant que les précipitations durant les trois campagnes agricoles (2008 à 2010), sur le même type de sols, ont été plus importantes en hauteur par rapport à celles enregistrées durant la période (1991-2004), ces pluies n'ont pas été particulièrement intenses alors que l'intensité de pluie est le paramètre le plus influent sur l'érosion et le ruissellement. Aucune inondation grave n'a été enregistrée dans la région durant les dix dernières années. Ceci nous permet une approximation raisonnable sur l'érosion et le ruissellement de notre période de mesures à partir de ceux enregistrés sur la période (1990-2004).

Ces observations nous amènent à dire que bien que les systèmes de gestion des terres soient modifiés sur le même type de sol, ils vont dans le sens d'une amélioration de la structure du sol. Ils favorisent l'infiltration et la production en biomasse et réduisent le ruissellement et par conséquent les pertes en terres.

De nombreuses études ont recherché des relations possibles entre la dégradation spécifique des sols et l'abondance des précipitations saisonnières ou annuelles. En effet, il apparaît souvent qu'avec la même quantité de pluie, on enregistre des taux de dégradation de sols extrêmement variables, et il est désormais établi qu'en Afrique du nord, et particulièrement au Maghreb, ceux sont les fortes intensités de quelques orages rares d'automne, ou de printemps qui font l'essentiel de l'érosion.

Si les hauteurs de pluies annuelles, saisonnières, voire journalières ne peuvent expliquer à elles seules les phénomènes d'érosion, c'est parce qu'elles ont tendance à lisser les variabilités dans le temps de la pluviosité, et à masquer de ce fait les caractéristiques d'érosivité des averses.

Ces caractéristiques sont liées à l'énergie cinétique libérée par la pluie au contact du sol, et à son intensité (Masson, 1980).

La hauteur des pluies, combinée à leur intensité favorise le ruissellement et l'érosion en ravine. Les sols marneux, lorsqu'ils sont secs, restent non érodibles mais, dès qu'ils atteignent une certaine humidité, leur sensibilité à la détachabilité et au ruissellement augmente. En effet, au début de la phase d'imbibition, il y a désagrégation par l'effet de l'humectation et du

gonflement des marnes et formation d'une croûte structurale qui, par ruissellement évolue vers une croûte d'érosion ou de dépôt.

La prochaine analyse évalue la vulnérabilité des sols marneux à l'érosion. Elle est donc utile pour compléter nos expérimentations par une production cartographique de la vulnérabilité des sols sur l'ensemble du bassin afin de délimiter les zones d'aménagements prioritaires.

5.1.4. EVALUATION PAR ANALYSE MULTICRITERES DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays méditerranéens (Bou Kheir et al. 2001). Elle résulte de l'intensification agricole, de la dégradation des terres et de très fortes variations climatiques.

En Algérie, les régions de montagnes présentent un enjeu socio-économique important (agriculture, forêt, patrimoine, ...). Elles sont très vulnérables au phénomène de l'érosion hydrique. Les relations entre la végétation, le sol et l'eau y sont largement perturbées (Benchetrit, 1972). Dans certains endroits, l'érosion a atteint un niveau d'irréversibilité et par endroit elle a transformé le paysage en "badlands". En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux. Les pertes annuelles des eaux dans les barrages sont estimées à environ 20 millions de m³ dues à l'envasement (Remini, 2000). La subsistance des populations est de plus en plus menacée par les pertes en sol.

L'apport des aménagements agro-sylvo-pastoraux dans les bassins versants où les risques d'érosion sont les plus intenses aura d'autant plus d'efficacité que les facteurs du milieu naturel sont bien connus. Or, les problèmes de dégradation des sols ne se posent pas avec la même acuité dans les différentes parties de la zone (Boughalem et al., 2012). C'est pourquoi il est utile de délimiter des zones d'aménagements prioritaires.

Dans ce contexte, la présente étude a pour objet la réalisation d'une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique sur le bassin versant de l'Isser. Le risque peut se définir par le croisement de deux dimensions : aléa x vulnérabilité. L'aléa est le phénomène physique aléatoire, par définition à l'abri ou à l'écart de toute installation ou enjeu humain. Ce dernier aspect se traduit par la vulnérabilité qui est le pendant, en termes économiques ou en termes de vies humaines, de l'aléa en question (Glossary, 1992).

En réalité, la vulnérabilité des sols peut être définie comme leur fragilité face aux agressions extérieures telles que le climat et les actions anthropiques. Elle dépend donc de facteurs intrinsèques et extrinsèques. Elle peut être hiérarchisée en fonction du degré d'exposition aux risques. L'érosion des sols dépend ainsi de nombreux facteurs. Pour le présent travail, quatre facteurs principaux ont été considérés : le climat (plus exactement les précipitations), la topographie, la lithologie et le couvert végétal. Ce choix est fait en nous appuyant sur des études régionales relatives à l'érosion des sols (Mazour, 2004; Morsli et al., 2004; Roose et al., 1996; Talbi et al., 2002). Ces mêmes auteurs s'accordent pour considérer les facteurs déclenchant de l'érosion cités plus haut, comme étant les plus pertinents et les plus discriminants. En effet, les précipitations constituent l'élément climatique essentiel par leur variabilité spatio-temporelle aussi bien annuelle que mensuelle. Ce sont les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement sur les terrains en pente qui détachent et entraînent les particules terreuses en favorisant la fermeture du sol et la formation de croûtes de battance. Pour la zone d'étude, les versants nord sont plus arrosés que les versants sud. Les mois les plus pluvieux de l'année sont généralement Février, Mars et Avril. Les pluies maximales journalières dépassent assez souvent 60 mm (Mazour, 2004).

De même, le couvert végétal intervient sur le volume ruisselé et les pertes en terre. La végétation protège le sol contre la battance des pluies, donc maintient l'ouverture du sol et réduit le ruissellement. Sa litière entretient la mésofaune (laquelle creuse la macroporosité) et absorbe une grande quantité d'énergie du ruissellement. Le phénomène d'érosion se manifeste sur le bassin versant de l'Isser, chaque année pendant les épisodes pluvieux hivernaux, lorsque les sols sont encore peu couverts, ou lors des violents orages de fin d'été et d'automne sur des sols que les récoltes laissent également peu couverts. Les résidus de culture et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie, tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration (Bannari et *al.*, 1999 ; Roose, 1994).

En plus des facteurs favorisant le ruissellement, l'entraînement des particules du sol est facilité par les caractères du sol comme sa texture, sa minéralogie et sa stabilité structurale. La lithologie est considérée comme le facteur principal contrôlant la stabilité des versants. La succession de roches dures et tendres (marnes et grès) ; là où les roches sont résistantes, on trouve les pentes les plus fortes et des transports des sédiments faibles ; mais sur les roches argileuses tendres et les marnes on peut trouver des pentes relativement modérées et des transports abondants de sédiments (Heusch, 1970). Ce sont les zones marneuses du Miocène au nord du bassin qui sont les plus exposées aux différents processus d'érosion (Mazour, 2004).

Sur ces terrains, lorsque les sols sont sensibles à la battance, une petite augmentation locale de pente peut être à l'origine d'une aggravation importante de l'aléa érosion. Selon Roose (1994), la longueur de la pente est moins importante que son inclinaison et sa forme. Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas, car cette énergie augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15%.

Les variables d'analyse sont connues à diverses échelles et selon divers découpages de l'espace ; afin d'homogénéiser l'appréciation des paramètres, nous avons opté pour un découpage du territoire en mailles régulières; ce type de découpage a été testé pour d'autres régions et plusieurs thématiques par Abdellaoui et *al.* (2010), Abdellaoui et Boughalem(2012), Grecu (2002) et Huzui et *al.* (2011).Ceci nous a permis de réaliser une carte faisant ressortir des zones homogènes d'intervention par ordre de priorité. Ce modèle n'a pas encore été appliqué au niveau du bassin hydrologique étudié.

5.1.4.1. APPROCHE QUANTITATIVE ET MODELISATION

- **Définition des variables**

Comme nous l'avons déjà signalé, l'étude du processus érosif sera réalisée au travers de quatre facteurs (climat, topographie, lithologie et couvert végétal) dans l'optique de déterminer une carte de vulnérabilité à l'érosion ; pour cela nous définissons, pour chaque facteur, des classes codées de façons à traduire l'influence de chacun dans l'estimation de la vulnérabilité.

- Les précipitations

La carte des précipitations (Fig.6a), obtenue à partir des valeurs relevées sur un ensemble de 17 stations pluviométriques du bassin et de ses environs immédiats(tableau.26), permet de délimiter quatre classes de pluies annuelles.

- classe 1: 270- 350 mm;
- classe 2 : 350- 450 mm ;
- classe 3 : 450- 550 mm;
- classe 4 : 550- 650mm.

La figure 32 montre que les stations sont bien réparties sur toute la zone d'étude.

Tableau n°26 : Pluies, altitudes, exposition et distance à la mer (de 1979 à 2005)

Station	Code	Pluies moyennes annuelles (mm)	Altitude (m)	Exposition (degré)	Distance à la mer(km)
B-Bahdell	16 04 03	394,9	643,53	130,93	51,87
Khemis	16 04 06	367,7	894,23	336,91	56,49
Chouly	16 06 01	383,5	772,31	30,92	53,79
Meurbah	16 06 02	357,9	1118,56	119,54	63,66
O. Mimoun	16 06 07	318,5	717,58	14,57	53,33
S. Gourari	16 06 08	391,6	970,81	159,62	61,70
B. Nakhala	16 06 10	333,2	429,36	231,53	40,34
B. Badis	11 03 07	318,1	726,48	325,83	55,30
L. Setti	16 07 05	498,2	995,24	5,34	45,60
Mefrouch	16 07 01	550,2	1108,17	91,65	47,84
S. Heriz	16 06 09	322	530,18	345,20	42,90
S. Mdjahed	16 04 07	268,4	390,51	306,96	39,22
Sebdou	16 04 01	362	879,82	328,67	64,12
H. Boughrara	16 05 01	216,5	253,05	130,30	28,32
Sabra	16 05 02	368,3	620,36	54,99	38,72
Hennaya	16 05 16	379	520,18	83,12	36,17
Bensekrane	16 07 02	351,1	248,29	300,19	28,27

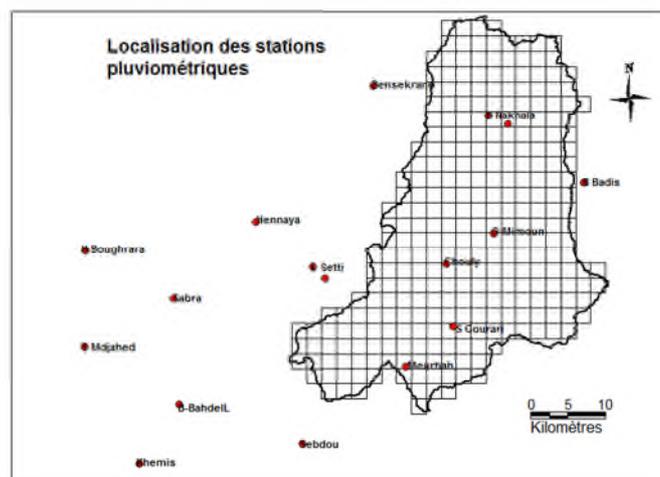


Figure n°32: Localisation des stations pluviométriques

- Le couvert végétal

La carte d'occupation du sol (Fig.33b), a été établie à partir de l'image Landsat TM par classification du maximum de vraisemblance (sous Erdas imagine). À la suite des observations de terrain, cette carte laisse apparaître quatre classes de couverture végétale, codées de 1 à 4, en fonction de leur capacité de protection du sol à l'érosion (Fig.34):

- classe 1: couvert végétal non protecteur ;

- classe 2 : couvert végétal peu protecteur ;
- classe 3 : couvert végétal moyennement protecteur ;
- classe 4 : couvert végétal protecteur.

La classe 1 correspond aux parcours et aux sols entièrement dénudés et non cultivés (bad lands, pistes...). La classe 2 comprend les cultures annuelles (céréales, agriculture extensive) ; La classe 3 appréhende l'arboriculture et la viticulture et la classe 4 comprend quelques espèces pérennes : *Chamaerops humilis* ; *Asparagus stipularis* ; *Lycium europoeum* ainsi que les maquis et reboisements.

- La topographie

Dès que la pente est suffisante pour permettre à l'eau de ruisseler, le terrain est vulnérable à l'érosion hydrique (Boukheir *et al.*, 2001). La zone d'étude présente un large éventail de valeurs de pentes allant de 0.3% à 80%. La carte des pentes (Fig. 33d), générée à partir du modèle numérique d'altitude (MNA), montre que les pentes les plus abruptes, très fortes à fortes, se concentrent dans les parties nord-ouest et sud du bassin versant. Elles sont caractérisées par un relief accidenté. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles à très faibles sont réparties sur l'ensemble du bassin. La longueur de la pente n'a pas pu être prise en compte. Les valeurs de pentes ont été regroupées en quatre classes et les limites ont été choisies en fonction des connaissances de terrain :

- classe 1 : « 0 - 3% » : correspond à un relief de plaines, aux terrasses alluviales et aux replats structuraux que l'on trouve dans la zone montagneuse ;
- classe 2 « 3 - 12% » : représente la zone de piémont, relief de glacis, collines ;
- classe 3 « 12 - 25% » : correspond à une zone mixte qui regroupe le haut de piémont et les montagnes ;
- classe 4 « 25 - 80% » : représente un relief moyennement accidenté à accidenté et les escarpements rocheux.

La figure 34 fournit les caractéristiques des classes pour chacun des trois facteurs principaux engendrant le phénomène d'érosion.

couvert végétal			pente				précipitations		
nature du couvert	protection	classe	limites classes	terrain	impact érosif	classe	limites classes	érosivité	classe
sol nu ou parcours	non protecteur	1	0% - 3%	plaine, terrasses alluviales et replats	très faible	1	270 - 350mm	très faible	1
céréiculture/ agriculture extensive	peu protecteur	2	3% - 12%	zone de piémont, glacis, collines	faible	2	350 - 450mm	faible	2
arboriculture et viticulture	moyennement protecteur	3	12% - 25%	hauts de piémonts et montagnes	moyen	3	450 - 550mm	moyen	3
maquis, reboisement et espèces pérennes	protecteur	4	25% - 80%	reliefs accidentés, escarpements rocheux	fort	4	550 - 650mm	fort	4

Figure n°34 : Définition des paramètres (couvert végétal, pente, précipitation)

- La lithologie

La carte lithologique (Fig.33c), réalisée après digitalisation de six cartes géologiques (Tlemcen, Bensakrane, Terni, Beni Smaiel, Sidi Boussidi et OuledMimoune), montre que sur toute la partie sud du bassin versant affleurent des calcaires d'âge jurassique qui s'étendent dans la direction nord. A l'Est sont localisés des alluvions sur terrasse du pliocène. Dans la zone nord, les versants sont constitués de substrats tendres (marnes) avec intercalations gréseuses ; ils ont une forme concavo-convexe et occupent la plus grande partie du relief. D'autre part, la dominance et l'importance des alternances de marnes et grès en pente, augmentent les potentialités érosives du bassin. Notre connaissance du terrain et l'analyse de la carte géologique nous ont permis de distinguer trois classes de matériaux affleurant (Très résistants, résistants et vulnérables).

Par ailleurs, pour cette étude de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique, le facteur lithologie se différencie des trois autres facteurs cités précédemment en ce sens que le sol subit les effets des facteurs érosifs et réagit en fonction de sa nature en accentuant (sols peu résistants) ou en atténuant, voire en annulant (sols très ou super résistants) ces effets. Pour traduire cette situation particulière, nous utilisons une échelle plus large des contributions des classes de sol. La figure 35 précise ces valeurs.

lithologie		
nature du sol	érodibilité	classe
banc de dolomie, calcaire sub lithographique, grès et poudingue	très résistant	1
alluvions du pliocène, alluvions anciennes	résistant	2
marne, argile gypsifères, argiles et grès	vulnérable	3

Lithologie	
Facteur spécifique	
classe	contribution
1	1
2	5
3	10

Figure n°35: Nature et contribution des classes de sols

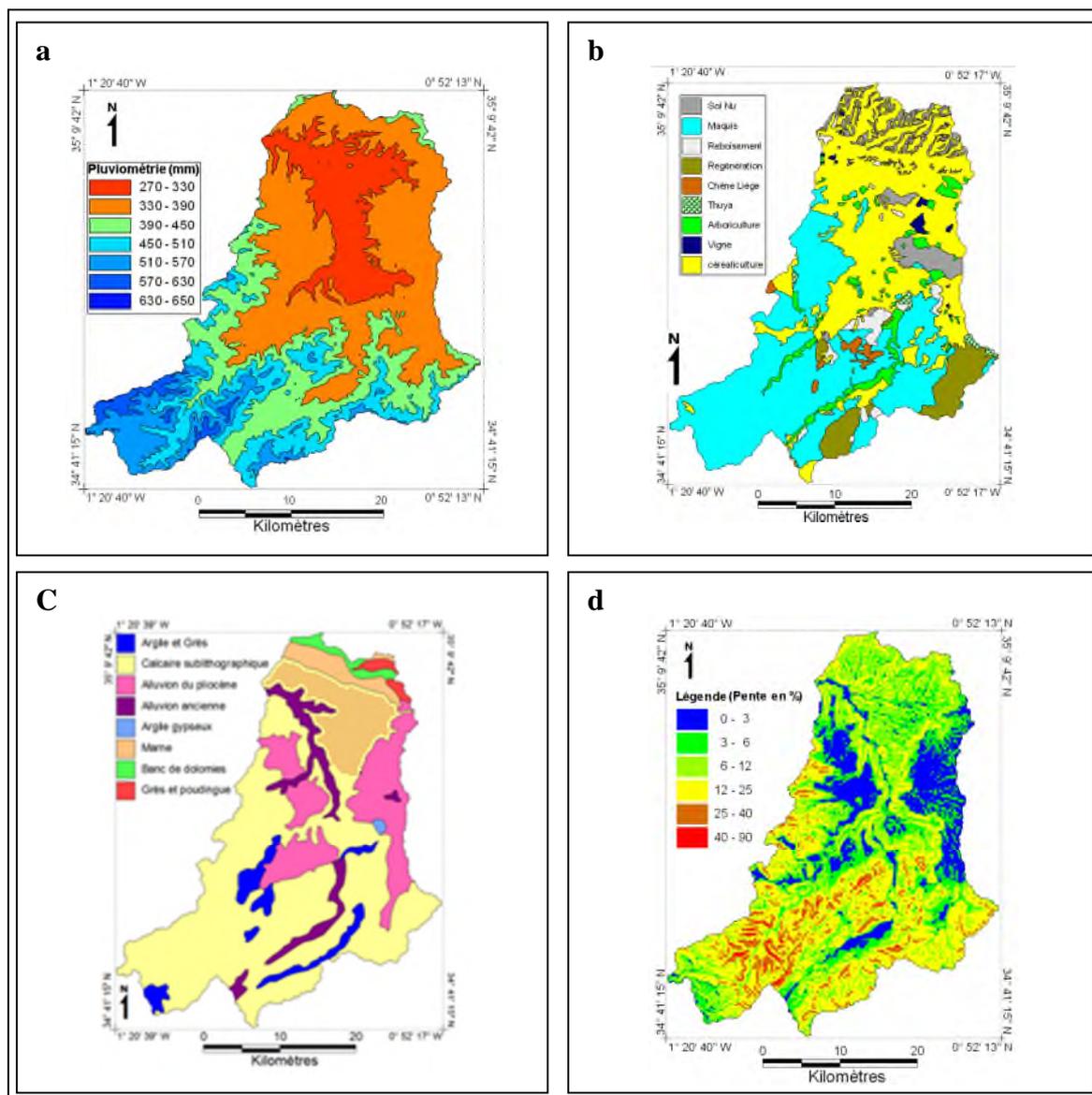


Figure n°33 : Paramètres utilisés pour obtenir la carte à risque ; a) pluviométrie, b) couvert végétal, c) lithologie, d) pentes

- **Combinaison des facteurs**

La combinaison des facteurs d'érosion hydrique est réalisée en deux étapes pour tenir compte de l'effet particulier de la lithologie faisant apparaître le sol comme élément à double implication à la fois résultat de la dégradation et cause d'atténuation ou de dilatation.

Nous calculons pour cela un premier indice tenant compte des effets des trois paramètres externes au sol (couvert végétal, précipitation et pente) sur la vulnérabilité par la formule :

$$IV_I = \sum \sum p_i f_{ij}(1)$$

Dans cette formule :

- p_i représente la pondération du paramètre (i), avec i variant de 1 à 3 (précipitation, végétation, pente)
- f_{ij} est l'implication de la classe (j) pour le facteur f_i .

Les valeurs de pondération p_i peuvent influencer sur les choix d'aménagement anti érosif. Pour fixer ces valeurs, nous nous sommes inspirés de la connaissance du terrain et des principes généraux utilisés par Le Bissonnais (Le Bissonnais et *al.*, 2004). La pondération la plus forte est attribuée au facteur « couvert végétal », considéré comme le facteur dominant et la plus faible à la précipitation car nous ne disposons pas des intensités des pluies, mais seulement des hauteurs moyennes annuelles. La figure 36 montre les valeurs de pondération des facteurs.

couvert végétal		pente		précipitations	
poids	3	poids	2	poids	1
classe	contribution	classe	contribution	classe	contribution
1	4	1	1	1	1
2	3	2	2	2	2
3	2	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4

Figure n°36 : Poids des facteurs et contributions des classes

Nous calculons par la suite l'indice de vulnérabilité pour chaque classe de sols (j) IVS_j par la formule :

$$IVS_j = p_j IV_I(2)$$

Dans cette formule, p_j représente l'effet de dilatation ou d'atténuation de l'érosion.

- **Découpage de l'espace de travail :**

L'étude de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique suppose, comme nous l'avons précisé plus haut, la combinaison de plusieurs facteurs ; rappelons que nous nous sommes limités ici à trois facteurs externes dominant en plus de la lithologie à la fois effet et cause. La valeur des paramètres d'estimation des facteurs est obtenue à partir de mesures (en station pour la pluviométrie), de calculs à partir d'un modèle numérique (cas de la pente) ou de traitements spécifiques de l'imagerie satellitale (extraction du couvert végétal). Des méthodes d'interpolation spécifiques permettent ensuite de déterminer les valeurs des paramètres en dehors des points de mesure c'est-à-dire pour l'ensemble de la zone étudiée. Afin d'homogénéiser ces déterminations et faciliter la combinaison des paramètres, un découpage de l'espace en mailles régulières nous semble le plus approprié. Nous nous inspirons pour cela

des travaux de Abdellaoui et *al.* (2010), Abdellaoui et Boughalem (2012), Grecu (2002) et Huzui et *al.* (2011). Dans ce type de découpage de l'espace, le choix de la taille de la maille est toujours le résultat d'un compromis entre plusieurs contraintes notamment la finesse d'analyse et les échelles d'estimation des facteurs (évidemment différentes à causes du nombre de point de mesures, des méthodes d'interpolation etc). Notons que plus la taille de la maille est petite, plus la finesse d'analyse est grande et donc des interventions plus ciblées ; cependant, une trop petite taille peut perdre toute signification réelle de l'estimation des valeurs des paramètres ; une trop grande taille peut conduire à ignorer certains effets locaux des facteurs (figures 37, 38 et 39).

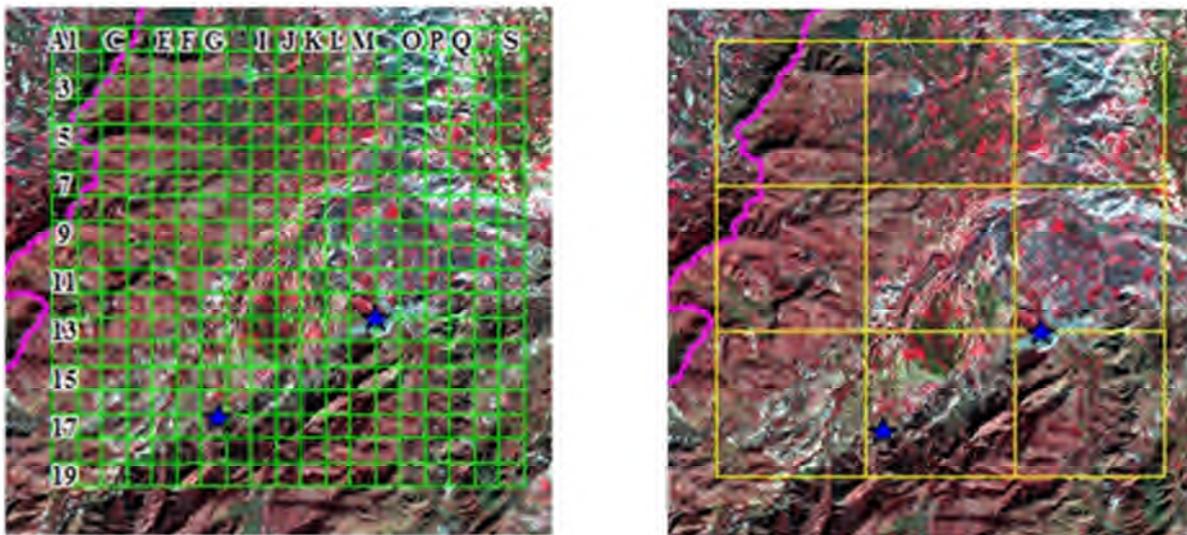


Figure n°37: Choix de la maille et estimation de la couverture végétale à partir d'image satellitale

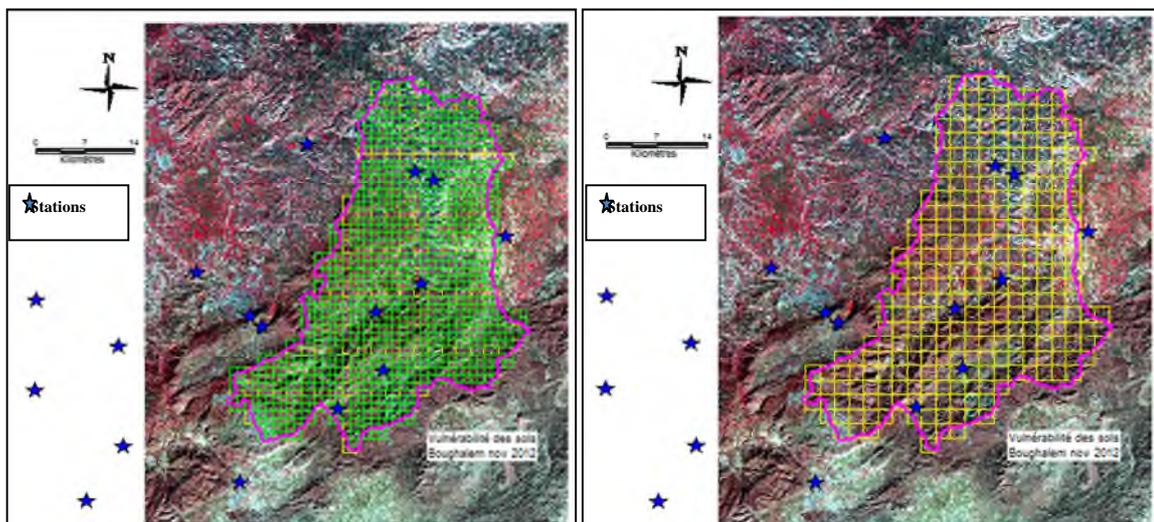


Figure n°38 : Application de la grille sur l'ensemble du bassin versant (à gauche : maille de 1 km de côté, à droite : maille de 2 km de côté)

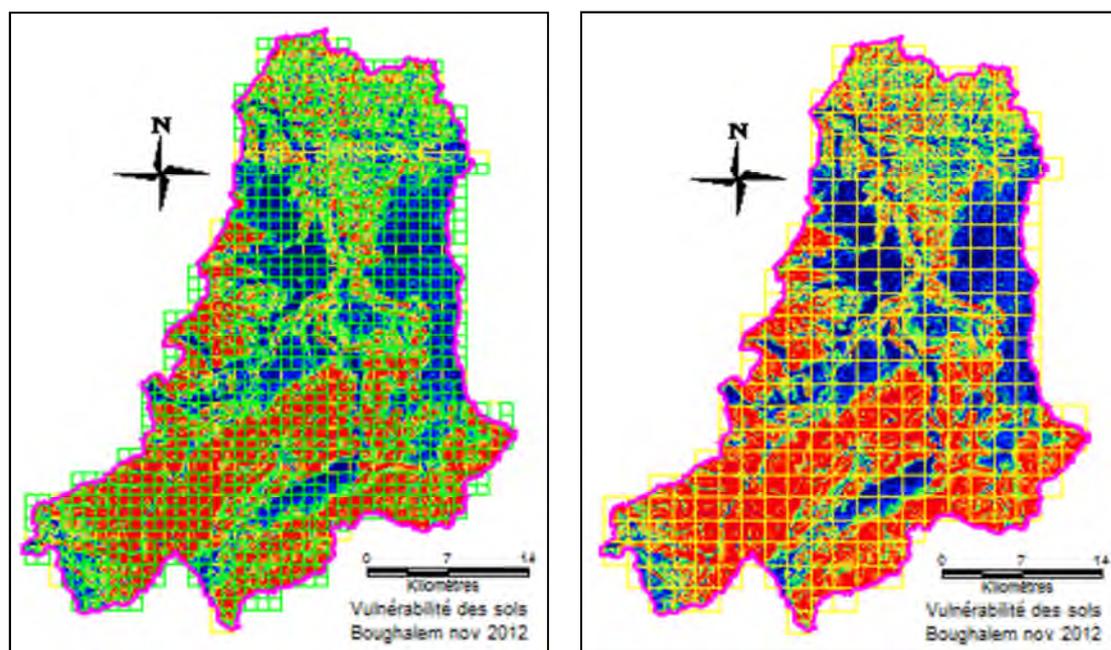


Figure n°39 : Découpage de la carte des pentes : la précision de la grille d'analyse est fonction de la taille de la maille (à gauche : maille de 1km de côté, à droite : maille de 2

De façon concrète, le choix de la dimension de la maille dépend de plusieurs paramètres qui doivent conduire à apprécier et estimer au mieux les facteurs intervenant dans l'analyse du phénomène de dégradation des sols, à savoir la lithologie, les précipitations, la végétation et la pente. Parmi ces paramètres :

- Les méthodes d'extrapolation ou de classification des facteurs à partir des valeurs acquises : les valeurs de précipitation sont extrapolées à partir des valeurs relevées sur un nombre réduit de stations ; les valeurs de pente sont obtenues à partir des courbes de niveaux puis une classification (donc un regroupement) en un nombre réduit de classes ; la végétation est obtenue à partir du calcul du NDVI et une classification de ces valeurs.
- La configuration du terrain et son degré d'homogénéité spatiale relativement aux facteurs : la figure 11 nous montre que les facteurs pente et précipitations (fig.40b et fig.40c) sont relativement spatialement homogènes (exception faite de la partie Nord plus hétérogène).
- La part des mailles hétérogènes ou ambiguës par rapport au nombre total de mailles couvrant la région d'étude. Une maille sera dite hétérogène ou ambiguë dans les deux cas suivants : i) elle comporte plusieurs classes pour un facteur donné ; ii) elle comporte deux classes de couverture (dans la maille) égale à une valeur voisine de 50%. ; c'est le cas des mailles mises en évidence en rouge sur la figure (40.d).
- Enfin le compromis entre la taille de la maille et le nombre total de mailles qui influence directement sur la préparation de la base de données.

A partir de ces considérations, nous avons opté pour le choix d'une maille régulière de 2km de côté ; ceci est montré sur la figure (40.a). La grille couvrant la région d'étude comporte ainsi un total de 301 cellules. Dans cette configuration, le pourcentage de cellules hétérogènes

ou ambiguës est alors de : 7% pour le facteur pente, 7,6% pour le facteur précipitations et 14,9% pour le facteur végétation obtenu à partir de l'imagerie satellitale, donc sur une couverture plus grande et une résolution meilleure (28,5m).

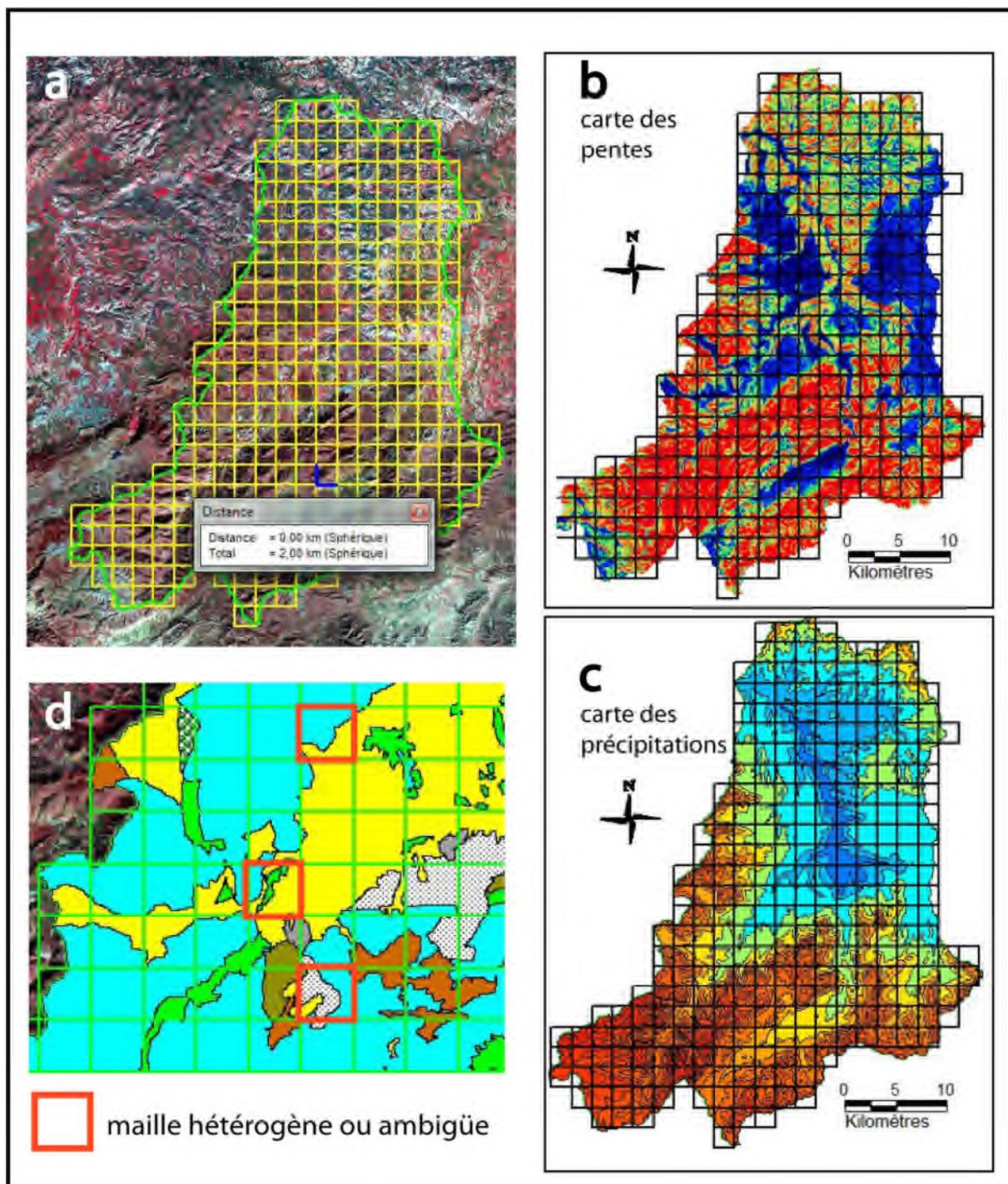


Figure n°40 : Représentation spatiale des facteurs pente et précipitations

Pour le couvert végétal, on a une image satellitale Landsat de 30 m de résolution, donc fournissant des informations sur l'équivalent d'un maillage à 30 m sans méthode

d'interpolation. Lors de l'utilisation d'une grande maille, les petites surfaces de végétation sont ignorées et on a convenu d'affecter 1 pixel au thème ayant une couverture >50%. Une grille fine est plus intéressante car elle nous permet une meilleure appréciation du facteur.

Pour le thème « précipitation », les deux dimensions de maille donnent la même appréciation car la valeur calculée est issue d'une méthode d'interpolation sur un même ensemble de points pivots (stations de mesures).

L'estimation des classes de pente est également issue d'une méthode d'interpolation ; une maille plus fine n'améliore pas l'appréciation.

Donc pour la majorité des facteurs (lithologie, pente et précipitation), l'utilisation d'une maille plus fine n'ajoute rien à la précision d'analyse.

Nous choisissons pour la présente étude un découpage de l'espace en mailles carrées de 2 km de côté résultant d'un bon compromis entre les échelles d'estimation des paramètres et les schémas d'aménagement et de lutte contre l'érosion pratiqués sur des régions semblables à la zone d'étude. La figure 12 donne, à titre d'exemple, un aperçu du découpage et de l'affectation des valeurs du facteur « couvert végétal ».

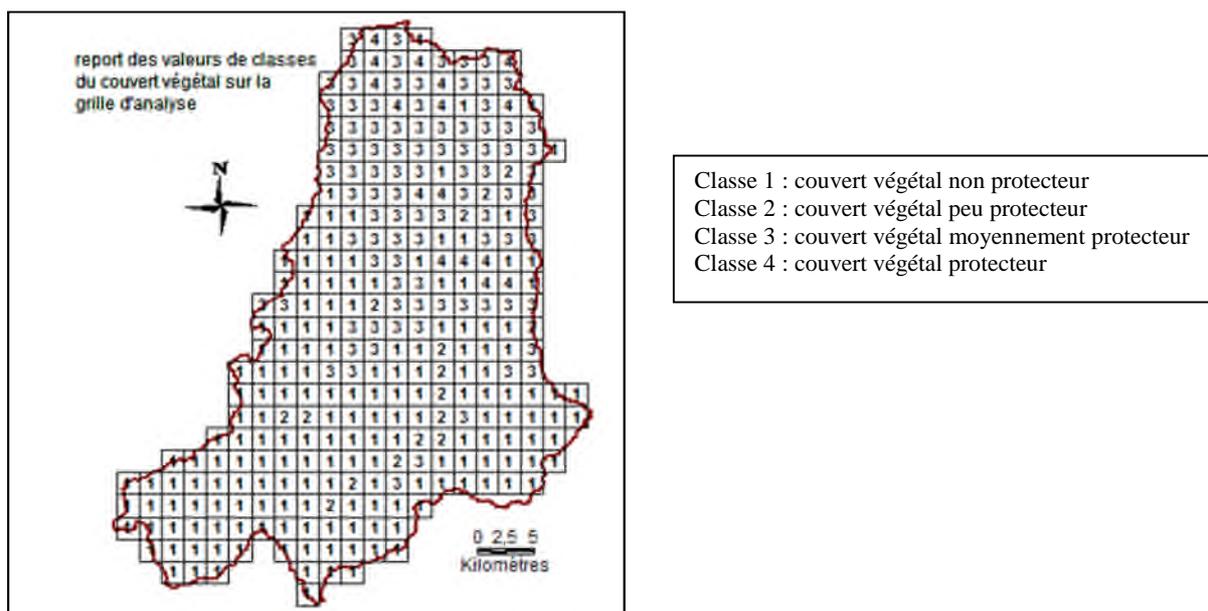


Figure n°41 : Exemple de report des valeurs

5.1.4.2. RESULTATS ET DISCUSSION

L'intégration des différentes variables dans un système d'information géographique (sous logiciel MapInfo 7.8) a permis de produire les diverses cartes thématiques correspondant aux divers facteurs étudiés (figure 6). Le découpage par maille du bassin, nous a permis d'étudier l'impact des différents facteurs sur la vulnérabilité des sols (figure 13, 14, 15 et 16) et d'obtenir une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique (figure 17).

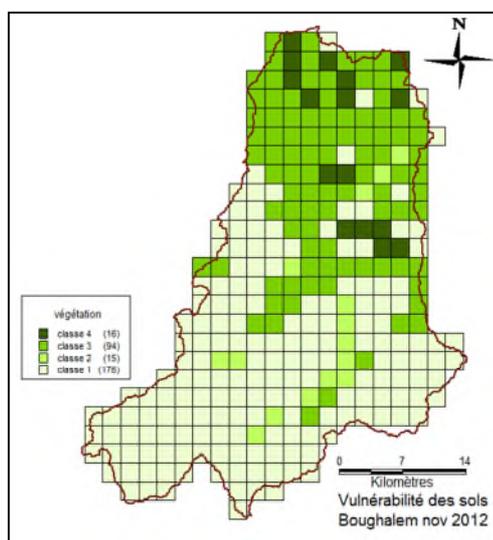


Figure n°42: Impact du couvert végétal sur la vulnérabilité

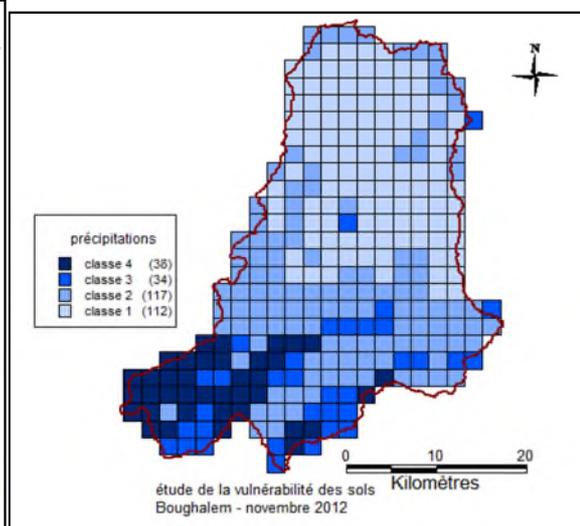


Figure n°43: Impact de la précipitation sur la vulnérabilité

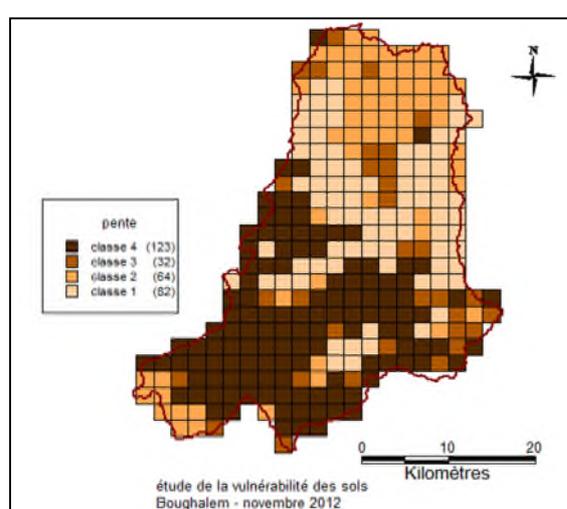


Figure n°44: Impact de la pente sur la vulnérabilité

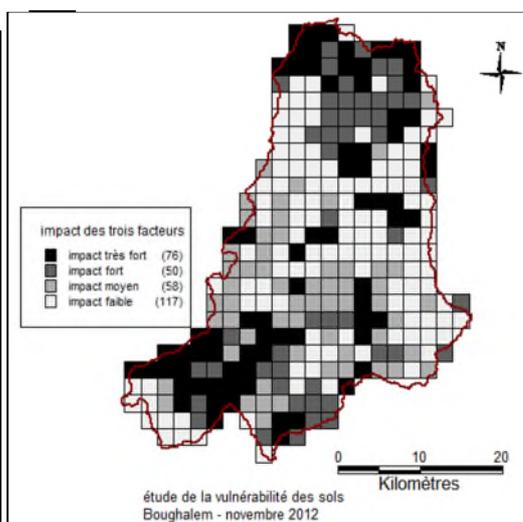


Figure n°45 : Impact des trois paramètres (végétation, pente, précipitation) sur la

Les figures 42, 43 et 44 font ressortir, sur le bassin, deux parties séparées par une ligne NO-SE ; les deux parties occupent respectivement 47% (partie nord) et 53% du bassin (partie sud).

La figure 42 concerne l'impact du couvert végétal sur la vulnérabilité des sols à l'érosion. La partie sud est quasiment homogène avec une prédominance de la classe 1 (environ 79%) c'est-à-dire un couvert végétal protecteur, ce qui conduit à une vulnérabilité faible si l'on ne

considère que le facteur « couvert végétal ». La partie nord du bassin est plutôt hétérogène avec tout de même une prédominance de la classe 3 (65%) ; nous sommes donc en présence d'un espace fortement vulnérable ; les autres classes (1, 2 et 4) se retrouvent de façon aléatoire.

La figure 43 concerne l'impact des précipitations sur la vulnérabilité. L'hétérogénéité apparaît ici sur la partie Sud ; la partie Nord, dominée par la classe 1 (cette classe occupant 87% de la partie Nord) a une vulnérabilité faible pour le facteur climat. Sur la partie Sud toutes les classes sont présentes bien que la classe 1 n'occupe que 13%. Nous sommes donc en présence d'un espace à la fois hétérogène avec une érosivité des pluies forte à moyenne.

La figure 44 montre l'impact du facteur pente. Pour ce facteur, les deux parties paraissent hétérogènes. Toutefois, la classe 4 (pentes fortes, et donc vulnérabilité, forte) se concentre dans la partie sud du bassin versant. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles (classes 1 et 2) sont réparties sur l'ensemble du bassin en étant plus présentes sur la partie Nord.

La figure 45 montre l'impact combiné des trois facteurs végétation, pente et climat sur la vulnérabilité à l'érosion. La vulnérabilité faible semble apparaître sur la ligne de séparation des deux parties du bassin. Les mailles correspondantes à une très forte vulnérabilité occupent 25% de la totalité du bassin.

La figure 46 représente la carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Une forte vulnérabilité correspond à un espace nu (ou faiblement couvert), de pente et d'érosivité fortes et de sol peu ou pas résistant. Cette figure montre que la partie Nord est fortement vulnérable à l'érosion hydrique. Sur la partie sud, toutes les classes de vulnérabilité apparaissent. Les programmes de lutte anti érosive doivent différer sur les deux parties du bassin.

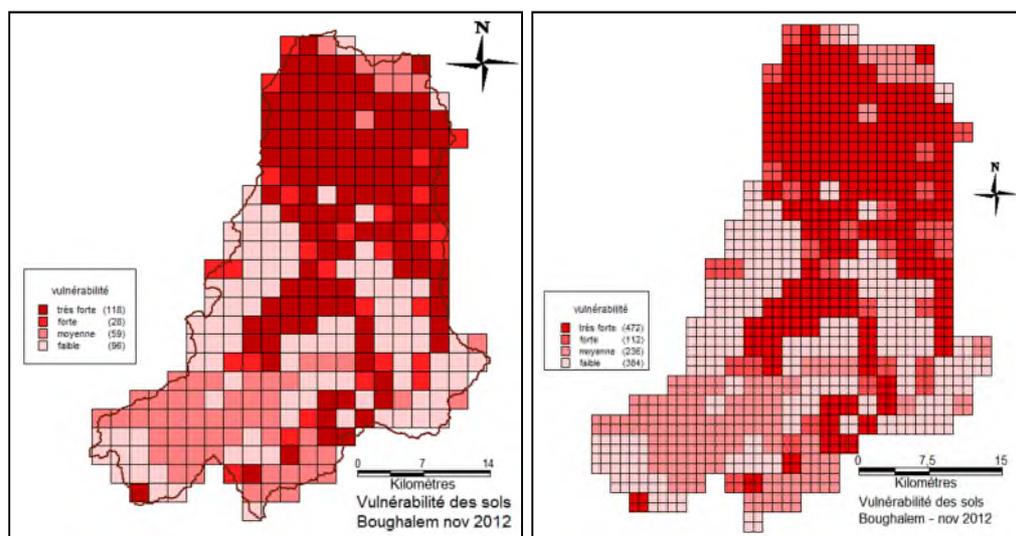


Figure n°46 : Carte de vulnérabilité des sols ; la maille choisie permet de minimiser le nombre de cellules tout en gardant une bonne précision

Conclusion

Pour élaborer la carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique nous avons pris en compte les trois facteurs dominants (climat, pente et couvert végétal) ; ceci nous a permis d'estimer l'agressivité résultante en affectant un poids spécifique à chacun des trois facteurs en nous inspirant de la littérature scientifique spécialisée et en consultant les experts de terrain travaillant sur le bassin versant de l'Isser. L'introduction du facteur lithologie nous a conduit par la suite à déterminer des classes de vulnérabilité en fonction de la capacité du sol à résister à l'agressivité des facteurs.

Pour la présente étude, nous avons opté pour un découpage régulier de l'espace en mailles carrées. Une solution SIG sous MapInfo a été réalisée pour intégrer l'ensemble des informations et permettre un échange facile de données et de résultats entre les divers opérateurs.

La carte finale de vulnérabilité permet de mettre en évidence trois grandes régions de vulnérabilités respectives : i) forte à moyenne principalement localisée au nord du bassin mais s'étendant localement vers le centre ou le sud ; ii) faible, essentiellement sur une partie du sud du bassin et iii) très faible ou nulle principalement au centre et au sud du bassin versant.

L'étude d'un phénomène tel que la dégradation des sols fait intervenir divers paramètres (naturels ou anthropiques) dont la représentation dans l'espace dépend à la fois de la mesure (à tout point de l'espace dans le cas de l'image, ou en des points particuliers dans le cas de stations d'acquisition) et de l'estimation finale généralement en classes de valeurs. Dès lors, les régions d'estimation des facteurs sont différentes et donc non superposables. Leur combinaison devient ainsi problématique. Pour remédier à cet inconvénient, quatre solutions sont envisageables :

- Ramener l'estimation des facteurs à un découpage administratif genre cadastral (qui n'est pas toujours disponible ou à jour dans les pays en développement) ou communal (ce découpage n'est pas suffisamment précis, les communes rurales étant de manière générale de grande superficie) ;
- Ramener cette estimation à un découpage en « sous régions naturelles » dans le cas où une définition en sous régions suffisamment petite et homogène est possible ;
- Ramener cette estimation au découpage induit par la classification des valeurs du facteur connu avec la meilleure précision ; si on utilise l'image satellitale pour un facteur, cela suppose que l'on devrait utiliser un découpage au pixel (30m pour l'image Landsat) ; ce découpage nous paraît trop fin et non adapté à l'estimation des autres facteurs prédominants (pluviométrie et pente) ;
- Définir un découpage régulier indépendant des facteurs et des définitions purement administratives mais tenant compte d'un compromis de précision d'estimation des facteurs intervenant dans l'étude du phénomène étudié ; c'est ce dernier découpage que nous avons adopté.

La solution SIG mise en place a pris en compte les principaux facteurs intervenant dans la dégradation des sols dans la région d'étude ; elle offre d'autres possibilités en permettant :

- des extensions thématiques : prise en compte d'autres facteurs, tels que socioéconomiques (qualité et contraintes de vie des agriculteurs, modes d'utilisation du sol)
- ou spatiales (autres finesses du découpage, maille de côté plus petit si les contraintes d'aménagement l'exigent ou si les procédés d'acquisition des informations de base le permettent).

CONCLUSION GENERALE

La dynamique érosive au niveau de la zone d'étude est très active et présente des risques importants et les impacts se font sentir à plusieurs niveaux. Les processus érosifs sont exacerbés par l'agressivité du climat, la régression du couvert végétal, la faible résistance des terrains marneux, aux fortes pentes et surtout aux modes de gestion des terres. Cette situation limite l'infiltration des pluies et accentue le ruissellement, ce qui occasionne souvent des écoulements importants et rapides qui se déversent des versants, accentuant ainsi, la dynamique érosive et le phénomène d'inondation.

La détermination relative des zones sources potentielles de sédiments est une étape importante dans la mise en place d'une stratégie de conservation et gestion de lutte contre l'érosion des sols. En général, l'érosion hydrique représente l'élément moteur qui guide l'évolution géomorphologique des versants. Favorisé par une lithologie tendre, des pentes fortes, un couvert végétal dégradé, le processus de l'érosion se multiplie rapidement rongant directement dans le soubassement rocheux après l'attaque des formations superficielles. Cette agressivité érosive des processus génère d'importantes quantités de sédiments qui, une fois prises en charge par les oueds et leurs affluents, vont participer d'une manière active à l'envasement des réservoirs d'eau, diminuant ainsi leurs capacités initiales. Le développement de l'érosion dans cette région du Tell, n'est donc pas une fatalité naturelle ; elle est la manifestation d'une rupture d'équilibre favorisé par les conditions du milieu et l'action humaine (Daoudi, 2008). Notre intérêt s'est porté sur l'amont du bassin versant de l'Oued Isser. Il s'agit du sous bassin versant de « Sidi Ahmed chérif ».

La première partie de cette recherche s'est attachée à l'étude des systèmes de gestion des terres et leur rôle dans l'amélioration de la productivité agricole en zone marneuse. Elle décrit les systèmes de gestion pratiqués dans la zone d'étude et montre leur impact sur l'écosystème. Les systèmes de gestion des terres accroissent ou réduisent considérablement les risques érosifs.

La lutte contre la dégradation des sols nécessite une bonne connaissance des causes de cette dégradation et de ses effets, afin de choisir avec précision les technologies convenables de conservation des sols et les bonnes stratégies permettant de remédier aux problèmes liés à la dégradation des sols.

Le bassin versant de l'Oued Isser est soumis à un climat de type méditerranéen contrasté. Le régime pluviométrique présente une grande variabilité spatio-temporelle, caractérisée par un gradient croissant des précipitations du sud au nord sur l'ensemble du bassin versant et surtout des pluies de forte intensité (Daoudi, 2008).

Dans la deuxième partie de l'étude traitant de la vulnérabilité des sols à l'érosion, nous avons présenté une vue d'ensemble des dispositifs expérimentaux et les techniques utilisées pour étudier l'évolution du fonctionnement. L'objectif dans une première étape étant de démontrer aux agriculteurs qu'il est possible d'avoir des niveaux de productivité élevés en utilisant la méthode du semis direct et aussi de conserver les potentialités des terres avec des techniques simplifiées à même de garantir la durabilité de la qualité des terres.

Nous avons pu voir que les parcelles en semis direct présentent des caractéristiques physiques du sol meilleures que les parcelles labourées. Ainsi, les états de surface sont bien plus favorables en semis direct ; le phénomène de croûte de battance qui bloque la pénétration de l'eau et de l'air dans le sol est beaucoup moins présent ; la première barrière à l'infiltration de l'eau est levée. L'amélioration des états de surface et de la porosité du sol se traduisent par une plus grande quantité d'eau dans les horizons explorés par les racines.

La combinaison facteur- processus a, d'une part, montré que l'analyse multicritères de la vulnérabilité des sols à l'érosion met en évidence les variables contrôlant le processus d'érosion hydrique et, d'autre part, a permis de hiérarchiser les variables et de connaître leur degré d'influence. Cette analyse montre que les facteurs les plus influents pour l'érosion sont : Les précipitations, la pente, le couvert végétal et la lithologie (Daoudi, 2008).

nous avons pris en compte les trois facteurs dominants (climat, pente et couvert végétal) ; ceci nous a permis d'estimer l'agressivité résultante en affectant un poids spécifique à chacun des trois facteurs en nous inspirant de la littérature scientifique spécialisée et en consultant les experts de terrain travaillant sur le bassin versant de l'Isser. L'introduction du facteur lithologie nous a conduit par la suite à déterminer des classes de vulnérabilité en fonction de la capacité du sol à résister à l'agressivité des facteurs.

Pour combiner ces différents facteurs, nous avons utilisé un découpage de l'espace en mailles homogènes: méthode de grille.

L'approche de l'analyse multicritères par la méthode de « grille » nous a permis de sélectionner les variables significatives et de localiser les zones les plus propices pour le processus d'érosion.

Après intégration des résultats, nous avons comparé les valeurs de l'érosion estimée par les informations de synthèse obtenues grâce aux SIG à celles mesurées en parcelles sur le terrain.

Cette dernière qui traduit le mieux la réalité doit valider les résultats estimés par les SIG. Il est toujours très difficile d'obtenir au départ une bonne corrélation mais la connaissance des différents paramètres du terrain (pente exposition des versants, ...) permet de mieux appréhender l'érosion par ces systèmes d'information géographiques et donner une meilleure efficacité des modèles. La synthèse de l'approche adoptée est illustrée sous forme d'une carte de vulnérabilité mettant en évidence trois grandes régions de vulnérabilités hétérogènes.

Il est important de souligner l'apport de la cartographie issue des systèmes d'information aux questions d'aménagement antiérosifs des bassins versants. Ce dernier est appréhendé dans son ensemble en dégageant assez facilement les ensembles homogènes à traiter prioritairement et en évaluant les interactions avec les autres ensembles et sous ensembles. Afin de faciliter l'interprétation de la carte de vulnérabilité à l'érosion par les utilisateurs, les zones propices à l'érosion hydrique sont présentées en trois grandes régions de vulnérabilités respectives : i) forte à moyenne principalement localisée au nord du bassin mais s'étendant localement vers le centre ou le sud ; ii) faible, essentiellement sur une partie du sud du bassin et iii) très faible ou nulle principalement au centre et au sud du bassin versant.

Les résultats des travaux menés dans le cadre de cette thèse laissent prévoir de nombreux développements dans plusieurs directions. L'approche présentée ouvre une première piste de recherche vers une réflexion interdisciplinaire. Elle peut être étendue et généralisée à d'autres régions semblables et voir si les mêmes facteurs interviennent avec le même degré d'influence dans l'explication du processus d'érosion (Daoudi, 2008).

Le listing des aménagements à préconiser est long, il faut néanmoins choisir les plus adaptés au terrain, les plus efficaces et les moins coûteux. Il faut intégrer le plus possible les aménagements traditionnels et accorder une importance particulière aux traitements biologiques (Mazour, 2004). Il est évident que le traitement du ravinement peut faire appel à certains ouvrages mécaniques qui exigent une technicité assez élevée, mais les traitements au niveau des versants cultivés sont eux aussi à faire avec le plus grand soin notamment le choix des techniques culturales appropriées, des systèmes de gestion des terres et des assolements bien choisis.

- **Aménagement des ravines**

Les buts de cette opération sont de :

- diminuer l'activité de l'érosion linéaire (ravinement) qui connaît une évolution dangereuse.
- protéger le barrage El Izdihar (Sidi Abdelli – Tlemcen) contre un envasement accéléré.
- réduire les risques de glissements et d'éboulements qui menacent continuellement les routes ainsi que le Village de Sidi Abdelli.

Vu la nature marneuse des terrains de la région, les types d'ouvrages préconisés pour l'aménagement hydraulique des ravins sont des seuils en terre. Ils pourraient permettre une bonne stabilisation des ravines en terrain marneux et une bonne reprise de la végétation si seulement leur dimensionnement et leur réalisation se font correctement.

Les sédiments captés par les seuils risquent d'être remis en suspension et de continuer leur cheminement s'ils ne sont pas fixés rapidement (Combes, 1992 in Roose et al., 2008). Les espèces à fort enracinement et à fort pouvoir recouvrant sont envisagées ; leur rôle est d'améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol et de dissiper l'énergie du ruissellement et sa capacité de transport. L'eau stockée dans les sédiments peut être utilisée par des plantations d'espèces à développement racinaire dense et profond pour fixer le fond et les berges des ravines. Ces espèces doivent être économiquement valorisantes, afin de retenir l'intérêt des paysans qui auront par la suite la charge de les entretenir.

- **Plantations fruitières**

Comme l'arboriculture rustique répond positivement aux vœux de la population riveraine et joue un rôle efficace contre la dégradation des sols tout en apportant un revenu à la population locale, certains versants ont été choisis pour la plantation de l'*Olivier*, l'*Amandier* et le *Figuier*.

L'introduction d'arbres fruitiers est recommandée. Ils jouent un rôle de protection du sol contre l'érosion, et contribuent par conséquent à l'amélioration des revenus des agriculteurs

pour écarter le risque d'abandon des terres par les jeunes générations en l'absence de perspectives dans leur métier

Le choix des essences fruitières doit se faire en fonction des exigences agro-climatiques des espèces et des vœux des riverains.

- **Amélioration des systèmes de production**

Actuellement, en Algérie où les terres font l'objet de modification majeurs d'usage des sols et de reconversion, les grands projets nationaux de développement rural s'appuient sur la logique de la GCES, celle du développement rural avec la participation des communautés rurales (Roose, 2004) : les plantations arboricoles, l'amélioration des techniques culturales et de la gestion de l'eau, et même l'agroforesterie et les parcours réglementés sont les actions les plus à développer. L'efficacité des techniques culturales est strictement liée aux conditions économiques des sociétés (Roose, 1994).

Les solutions éventuelles pour freiner la dégradation des terres se situeraient surtout dans l'amélioration de la gestion de l'eau, facteur limitant, (billons, cuvettes, madjen, retenues collinaires, couverture du sol par les résidus de récolte), et de la production de la biomasse des sols (intensification et diversification des productions, arboriculture, agroforesterie, cultures couvrantes et gestion des parcours) avec le renforcement des techniques anti-érosives (aménagement biologiques et mécanique des ravines et des versants : seuils, cordons en pierres, plantation en courbes de niveau, barrages semi perméables) (Mazour, 2004).

La vraie solution consisterait à modifier en partie le système de production pour rétablir un équilibre dans le paysage. Cela prend du temps (5 à 10 ans) mais c'est plus efficace, plus durable et plus profitable pour les paysans.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Abdellaoui A. & Boughalem M., (2012) : SIG, image satellitale et risques en zones urbaines et péri urbaines ; aspects méthodologiques. Colloque international « Géomatique et gestion des Risques naturels, Oujda 6,7 et 8 mars Oujda-Maroc. Sous presse.

Abdellaoui A., Visan L. & Patru Stupariu I., (2010) : Étude de la viabilité du paysage par analyse de grille dans la région Sous Carpatique de la Vallée de Prahova (Roumanie), Revista de geomorfologie, vol. 12, 2010, 81-90.

Al Ali Y., (2007): Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes. Analyse, fonctionnement et essai de modélisation en milieu méditerranéen (El Gouazine, Tunisie Centrale) Thèse de Doctorat d'état, Université de Montpellier II, 170 p.

Albergel J., (1987) : Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins de Burkina Fasso, ORSTOM, Montpellier, 355-365.

Albergel J., Diatta M., Grouzis M. & Sene M., (1995) : Réhabilitation d'un écosystème aride par l'aménagement des éléments du paysage, In Pontanier et al. (eds.). L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?, 293-306.

Ambroise B., (1999): Génèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2 - Modélisation systémique et dynamique, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, Volume 12, numéro 1, 1999, 125-153.

Amézketa E., (1999) : Soil aggregate stability: a review, Journal of Sustainable Agriculture 14:83- 151.

Amézketa, E., (1999) : Soil aggregate stability: a review, Journal of Sustainable Agriculture, 14(2,3):83-151.

Arabi M., (1991) : Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu méditerranéen à Médéa (Algérie), Thèse de doctorat , Université de GrenobleIII, 273p.

Arabi M. & Roose E., (1993): Influence de quatre systèmes de production sur l'érosion et le ruissellement en milieu montagnard méditerranéen ST. Ouzera, Ann Recherche Forestière de L'INRF, 65-80p.

Armand R., (2003) : Risque de ruissellement des terres agricoles et techniques culturales simplifiées: évaluation par les états de surface du sol. Application au suivi d'essais dans le sundgau alsacien. Mémoire de maitrise, Geography, ULP (Strasbourg) 75 pp.

Armand R., (2004) : Observation, appréciation et quantification du ruissellement appliquées aux parcelles cultivées en techniques culturales sans labour (TCSL), Mémoire de DESS, EOST, ULP (Strasbourg). 89 pp.

Armand R., (2009) : Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol, Mise au point d'un indicateur de ruissellement, Thèse de Doctorat d'état, Université de Strasbourg, 208 p.

Arnold J.B., Wall G., Moore N., Baldwin C.S. & Shelton I.J., (1989) : L'érosion du sol, Causes et effets, Direction de la gestion du sol et de l'eau/MAAO, Ontario, Canada.

Auzet A. V., (1987): L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: Aspects agronomiques, Min, Env/Min, Agr., CEREG-URA 95 CNRS, 60 p.

Auzet A. V., (1988) : L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture. Aspects agronomiques, CEREG, Strasbourg, 60p.

Auzet A.V., (2000) : Ruissellement, érosion et conditions de surface des sols à l'échelle de versants et de petits bassins versants, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Louis Pasteur, 79 p.

Auzet V., Boiffin J., Papy F., Maucorps J. & Ouvry J. F., (1990) :An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris basin, France, In: Soil erosion on agricultural land (J. Boardman, IDL Foster, JA dearing, eds) John Wiley and Sons Ltd, Chichester (UK), 383-400.

Azzaoui M.M., (1988) : Comportement hydrique et organisation des matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation, Thèse Doct, Univ, Paris VI, 225 p.

Badraoui M. & Stitou M., (2001) : Status of soil survey and soil information system in Morocco, In : Zdruli P, Steduto P, Lacirignola C, Montanarella L, eds. Soil resources of Southern and Eastern Mediterranean countries, Bari : Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes-Instituto Agronomico Mediterraneo di Bari (Ciheam-IAMB).

Balesdent J., (1996) : Un point sur l'évolution des réserves organique des sols en France, INRA, Unité de science du sol, 78028, Versailles, Cedex, 245-260.

Bannari A., Haboudane D. & Bonn F., (1999) : Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents, In: 21st Canadian Symposium on Remote Sensing (June 1999, Ottawa, Ontario, Canada), Université d'Ottawa, Canada, 359-366.

Barthès B., Albrecht A., De Noni G., Asseline J., Roose E. & Viennot M., (1997) : Pratiques Culturelles et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron, France), Soumis à Etudes et Gestion des Sols, Orléans.

Barthès B., Albrecht A., Asseline J., De Noni G. & Roose E., (1999) : Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean Highland (Aveyron, France), Comm, Soil SC, Plant Anal, 30:1929-1938.

Barthès B., Albrecht, A., Asseline, J., De Noni, G., Roose, E. & Viennot, M., (1998) : Pratiques culturelles et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron), Etude et Gestion des Sols, 5 :157-170.

Begni G. & Lanly J. P., (2010) : Ligneux et désertification en Méditerranée, Troisième Conférence scientifique méditerranéenne du GID – Alexandrie, June 21-24, 2010.

Begnig G. et et Lanly J P. (2010) : Ligneux et désertification en Méditerranée. Troisième Conférence scientifique méditerranéenne du GID – « Richesse et diversité méditerranéennes ; biologie et culture »

Belaid D., (1986) : aspects de la céréaliculture algérienne, office des publications universitaires, 206p.

Bellatrache A., (1987) : Erosion et perspectives de conservation des sols dans les bassins sédimentaires de Médéa- Béni Slimane- Algérie, Thèse de doctorat en sciences, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Faculté des sciences de la terre et de Géographie et d'aménagement de territoire, Alger, 276p.

Benabadji N. & Bouazza M., (2000): Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à *Artemisia herba-alba* asso. Dans l'Oranie (Algérie Occidentale), Rev. Secheresse n°2, vol. 11: 117-123.

Benchetrit M., (1972) : L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie, Paris, PFU, 169p.

Benslimane M., Hamimed A., El Zerey W., Khaldi A. & Mederbal K., (2008): Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord, Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 8 Numéro 3, décembre 2008.

Bergsma E., Charman P., Gibbons F., Hurni H., Moldenhauer W. C. & Panichapong, S. (1996). Terminology for soil erosion and conservation. ISSS.

Boiffin J., (1984): La dégradation structurale des couches superficielles sous l'action des pluies. Thèse docteur ingénieur, INAPG, Paris, 230p + annexes.

Boiffin J. & Sebillotte M. (1976) : Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ, Annales Agronomiques, 27(3): 295–325.

Boiffin, J., (1976) : Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre, Annales Agronomiques, 27(4):447–463.

Boiffin J., (1984): La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, Thèse de docteur-ingénieur, Institut National Agronomique de Paris-Grignon.

Boiffin J., Malézieux E. & Picard D., (2001) : Cropping systems for the future, in J. Nosberger, H. H. Geiger, and P. C. Struik, eds. Crop science: Progress and prospects. CAB International, Oxford, UK, 261–279.

Bolline A., (1982) : Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique, Thèse Université de Liège, 365p.

Bonn, F., (1998) : La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites, Sécheresse, vol. 9, no 3, 185-192.

Bouanani A., (2004) : Hydrologie, transport solide et modélisation : Etude de quelques bassins de la Tafna (NW – Algérie), Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 204 p.

Bouchetata A., (2006) : Erosion hydrique en zone montagneuse et gestion conservatoire de l'eau de la biomasse et de la fertilité des sols, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel-Abbès 339 p.

Boughalem M., (2007): Impact des modes de gestion des terres sur la conservation de l'eau et des sols sur les versants marneux de l'Isser- Tlemcen- Algérie, Mémoire de Magister, université de Tlemcen, 109p.

Boughalem M., Mazour M. & Zaagane M., (2012) : Utilisation des SIG pour l'aménagement du bassin versant de l'Isser (Nord Ouest de l'Algérie), Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles, IRD EDITIONS Marseille, 2012.79-90.

BouKheir R., Girard M. C., Khawlie M. & Abdallah C., (2001) : Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens, une revue bibliographique, Étude et gestion des sols, vol. 8, n° 4, 231-245.

Boukheir R., Girard M.C., Shaban A., Khawlie M., Faour G. et Darwich T., (2001): Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région

Bousquet F., (1997) : Usages des ressources renouvelables et modélisation des représentations: une approche par les Systèmes Multi-Agents, Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement published by F. Blasco, Elsevier, Paris, 187-193.

Boutrais J., (1996) : Population et environnement pastoral en Afrique tropicale, In Gendreau F., Gubry, P., Véron J., (éds), Populations et environnement dans les pays du Sud, Colloque Economie et Développement, Karthala-Ceped, 177-198.

Bradford J. M. & Huang C., (1996) : Splash and detachment by waterdrops, Dans Agassi M., éditeur, Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation, Books in Soils, Plants and the Environment, Chapitre 4, Dekker, New York, 61–76.

Bresson L.M. & Boiffin J., (1990) : Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field, Geoderma, 47: 301–325.

Brouwers M., (1990): Les méthodes de mesure de l'infiltration : Avantages et inconvénients des tests classiques de laboratoire et de terrain, précaution à prendre, Bull. Réseau Erosion, n°10, ORSTOM: 12-13.

Bruand A., (1986) : Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral : Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau, Sci. Sol, 24, 351-362.

Bryan, R. B., (2000) : Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope, Geomorphology, 32: 85–415.

Bryan R. B., Govers G. & Poesen J., (1989) : The concept of soil erodibility and some

problems of assessment and application, *Catena*, 16: 393–412.

Bussière M., (1996) : L'érosion des sols cultivés en France: manifestation, coûts, remèdes. Mém. D.E.S.S, Univ. Picardie Jules Verne, 136 p.

Capolini J., (1968) : Etude géomorphologique et morphométrique des bassins versants de l'Oued fouda et de l'Oued Rhiou, SES, 13 Alger.

Casenave A. & Valentin C., (1989): Les états de surface de la zone sahélienne : Influence sur l'infiltration, Collection didactique, ORSTOM, Paris, France, 230p.

Casenave A. & Valentin C., (1992) : A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa, *Journal of Hydrology*, 130: 231–249.

Centro Studi Ricerche (1974) : Étude des bassins-versants des Oueds Isser et Sikkak, Alger, Secrétariat d'État aux forêts (SEFOR), 3 volumes, 640 p.

Cerdan O. (2001) : Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France.

Chaumont M. & Paquin C., (1971) : Carte pluviométrique de l'Algérie, Échelle 1: 50 000. Soc. Hist; Nat, Afrique du nord, Alger, feuilles, 1 notice.

Chebbani R., (1996) : Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser (Tlemcen), Thèse de Magister, Institut national d'agronomie, 135 p.

Chevallier R. P., & Valentin C., (1984): Influence des micro-organisation pelliculaires superficielles sur l'infiltrabilité d'un sol de type Sahélien. *Bulletin de GFHN* 17, 9-22.

Cline R.A., (1992) : Gestion Des Sols De Vergers Et De Vignobles, Institut de recherches horticoles de l'Ontario, Maribeth Fitts - Direction des productions végétales, MAAO. Canada.

Collinet J. & Laffrogue C., (1979) : Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute Volta, France, ORSTOM, 129p.

Collinet J. & Valentin C., (1979): Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle, nouvelle perspectives, Applications agronomiques, Cah.ORSTOM, ser. Pédol, XVII. n°4, 283-328.

Cosandey C., (1983) : Recherches sur le bilan de l'eau dans l'ouest du massif Armoricaïn, Thèse de doctorat, Institut. Géographie, Paris, 515p.

CRS: Centro Studi Ricerche (1972): Etude des bassins versants des oueds Isser et Sikkak. 3 rapports.

Cyr L., Bonn F. & Pesant A., (1995): Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion, *Ecol. Modelling* 79, 277-285.

Daoudi M. (2008) : Analyse et prédiction de l'érosion ravinante par une approche probabiliste sur les données multisources. Cas du bassin versant de l'Oued Isser- Algérie. Thèse de doctorat.

Univertité de Liège. 200 p.

Dautrebande S., Cordonnier H., Thirion M. & Bielders C., (2006) : Lutter contre l'érosion des terres, Les livrets de l'Agriculture n° 12, 41p.

De Ploey J., Imeson A. & Oldeman L.R., (1991) : Soil erosion, soil degradation and climatic change, in Brouwer F.M., 275-292.

Demmak A., (1982) : Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale, Thèse Doct. Ing, Paris, 323p.

Dregne H. E., (1983): desertification of arid lands. Advances in Desert and Arid Land Technology and Development, vol.3, Harwood Press, New York, 242p.

DSA (direction des services agricoles) de Tlemcen

Ekern P. C., (1950) : Raindrop impact as the force initiating soil erosion, Soil Science Society of America Proceedings, 15:7-10.

Ellison W. D., (1944): Studies of raindrop erosion, Agric. Eng 25, 131-181.

Elison W.D., (1945) : Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration, Trans. Am. Geophys. Un., vol. 26, 415 p.

Emberger L. 1955. une classification biogéographique des climats. Rec. Trav. Lab. Botan. Et Zool., Fac. Sci. Montpellier, Serv. Botanique. 7, 3-43.

Emerson W. W. & Greenland D. J., (1990) : Soil aggregates - Formation and stability. Dans de Boodt, M. F., éditeur, Soil colloids and their association in Plenum Press, New York. aggregates, 485-511.

Emerson W.W., (1967) : A classification of soil aggregates based on their coherence in water, Australian Journal of Soil Research, 5:47-57.

Eswaran H., Lal R. & Reich P.F., (2001) : Land degradation, an overview, In : Bridges EM, & al., eds, Responses to land degradation, New Delhi : Oxford Press.

Eswaran H. & Reich P., (2002) : A preliminary assessment of the human impact on land systems of the world, Transactions of the 17th WCSS Bangkok, CDrom paper 2128, 2002.

Ferroukh M., (1994): Etude du comportement physique des vertisols de la Mitidja, Mémoire de Magister, INA, Alger, 127p.

Fournier J., (1994): agressivité climatique et risques érosifs dans la région de Dschang Ouest Cameroun. Bull. Réseau érosion n°14, ED. IRD (ex ORSTOM), Montpellier, 145-155.

Free G., (1952) : Soil movement by raindrops, Agricultural Engineering, pages 491-494, 496.

Frick B., Bromm J. & Beavers R., (2006) : Choix d'engrais verts pour les agriculteurs

biologiques, Rapport intérimaire de recherche W2006-14, OACC, Canada.

Galevski M., (1955) : La corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion (d'après les observations faites dans un périmètre torrentiel), Skopje (Yougoslavie), 427p.

Gallien E., Le bissonnais Y., Eimberck M., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J. F.& Martin P., (1995): Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé, Cahiers agricultures, 4, 171- 183.

Gallien E., LE Bissonnais Y., Eimberck M., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J.-F. & Martin, P., (1995), Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol cultivé, Cahiers Agricultures, n° 4, 171-183.

Gascuel-Odoux C. & Heddadj D., (2000) : Maîtrise des transferts de surface dans le contexte armoricain, Bretagne Eau pure, 108 p.

Ghazi A., (2004) : la désertification en Algérie : aspects environnementaux et sécuritaires, 5ème conférence pan-européenne et 3ème conférence de afes-press gmass sur : « la reconceptualisation de la securite dans le cadre de la mondialisation » ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Algérie, 32p.

Gimenez R. & Govers G., (2002) : Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds, Soil Science Society of America Journal, 66:1475–1483.

Glossary (1992): Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management, United Nation, Departement of humanitarian Affair, IDNDR, DHA, Geneva, 83 p.

Gomer D., (1992) : Ecoulement et érosion dans des bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen, GTZ, ANRH 1992, 207p.

Gomer D., (1994) : écoulement et érosion dans des petits bassins versants à sol marneux sous climat semi-aride méditerranéen, Publié par: Projet pilote d'aménagement intégré du bassin versant de l'Oued Minac/oDeutscheGesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTS) 294p.

Goulet P., (2005): Réviser, prioriser et soutenir l'agriculture durable : La culture sur billons, une solution pour faire du développement durable en grande culture, Mémoire présenté dans le cadre des consultations sur le Plan de développement durable du Québec, Québec.

Govers G., (1991) : Rill erosion on arable land in Central Belgium : rates, controls and predictability, Catena 18, 133-155.

Govers G., Takken I. & Helming K., (2000) : Soil roughness and overland flow, Agronomie, 20:131–146.

Greco J., (1966) : L'érosion, la défense et la restauration des sols, et le reboisement en Algérie, MARA Algérie ; 303 p.

Greco F., (2002): Risk-Prone Lands in Hilly Regions, Mapping Stages, In Applied Geomorphology, Theory and Practice, Edited. Alisson, 2002 John wiley & sons, Ltd, 49-64.

Green T. & Houk D., (1980) : The resuspension of underwater sediment by rain, *Sedimentology*, 27: 607–610.

Guillobez S. et Zougmore R., (1991) : Etude du ruissellement et de ses principaux paramètres à la parcelle (Saria, Burkina Faso), *Sécheresse en Afrique tropicale*, Ed. John Libbey Eurotext, Paris, 319-329.

Habi M., Morsli B. & Meddi M., (2009) : Contribution à la connaissance du comportement hydrodynamique des sols argileux par l'utilisation de la simulation de pluies, *Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSA Tlemcen 09 »* Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009.

Halimi A., (1980) : L'Atlas Bllidien: climats et étages végétaux, Office des Publications Universitaires, Alger , 524p

Hallaire V., (1987) : Retrait d'un sol argileux au cours du dessèchement, *Mesures de l'affaissement et conséquences structurales*, *Agronomie* 7, (8), 631-637.

Hallaire V., (1988): La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement, II. Modélisation morphologique, *Agronomie*, 8 (3) 273- 280.

Heddadj D., (1997): La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull Réseau Erosion*, n°17, Ed., IRD (ex. Orstom), Montpellier, 168- 175.

Heusch B., (1986) : Cinquante ans de banquettes de DRS-CES en Afrique du Nord, *Un bilan*, *Cah Orstom Sér Pédol*, 22 : 153-162.

Heusch, B., (1970) : Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. *Soc. Sc. Nat. Phys, Maroc*, spécial, 41-54.

Hien F. G., (1995) : La régénération de l'espace sylvo-pastoral au Sahel : une étude de l'effet de mesures de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso, *Document sur la gestion des ressources tropicales* 7, Université Agronomique Wageningen, 219 p.

Hoogmoed W.B. & Stroosnijder (1984): Crust formation and sandy soil in the Sahel II, tillage and its effects on a water balance, *Soil Tillage Ressource*, 4: 321-337.

Horn R., (1988) : Compressibility of arable land, In: Dresher, J., Horn R., DeBoodt, M. (Eds), *Impact of water and external forces on soil structure*, *Catena*, 11: 53-71, Supp. Bd.

Horn R., Taubner H., Wutke M. & Baumgartl T., (1994) : Soil physical properties in processes related to soil structure, *Soil Tillage Research*, 30: 187-216.

Huzui A. H., Abdellaoui A. & PatruStupariu H.G., (2011): Analyzing urban dynamics using multi-temporal satellite images in the case of a mountain area, Sinaia (Romania), *International Journal of Digital Earth*, 2011, 1-17, URL: <http://mc.manuscriptcentral.com/>; 1-29

Jarraud M., (2005) : Le climat et la dégradation des sols, Organisation météorologique mondiale, OMM-N° 989, ISBN 92-63-20989-8 Genève 2 – Suisse.

Jauffret S., (2001) : validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides : Application au suivi de la désertification dans le Sud Tunisien, Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 364p.

Kincaid D. R., Schreiber H. A., (1967): Regression models for predicting on-site runoff from short duration convective storms, *Water Resources research*, Vol 3. N° 2, 389- 395.

Kouri L., (1993) : L'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). Etude du processus et types fonctionnels de ravins dans la zone de marnes tertiaires, Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 238p.

Kribaa M., Hallaire V., Curmi P. & Lahmar R., (2001) : Effects of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of soil in semi-arid climate, *Soil Tillage Research*, 60 : 43-53.

Laborde J. P., (1995), Les différentes étapes d'une cartographie automatique, Exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du nord, Publication de l'Association Internationale de Climatologie, vol 8, 37-48.

Lahmar R., Ruellan A. (2007): Soil degradation in the Mediterranean region and cooperative strategies, *Cahiers Agricultures*, Volume 16, issue 4, Juillet-Août 2007.

Laouina A., Nafaa R. & Chaker M., (2000) : Gestion des eaux et des terres et dégradation dans les collines de Ksar el Kebir, Maroc, *Bull. Réseau Erosion* 19, 18 p.

Larouche A.R., (1983) : la matière organique et ses décomposeurs, Projets pour une agriculture écologique, Collège Macdonald, université mcgill ste-anne-de-bellevue, Québec, canada h9x lco.

Le Bissonnais Y., (1988) : Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies, Thèse. Doc, Univ.Orléans, 220 p.

Le Bissonnais Y., (1990): Experimental study modelling of soil surface crusting processus. *Catena Suppl.*17, 13-23.

Le Bissonnais Y., Bruand A. & Jamagne M., (1989): Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregates breakdown and crust structure, *Catena*, 16, 377-392.

Le Bissonnais Y., Dubreuil N., Daroussin J., & Gorce M., (2004) : Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne, *Étude et Gestion des Sols*, Volume 11, 3, 307 - 321.

Le Bissonnais Y. & Le Souder C., (1995) : Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion, *Étude et Gestion des Sols*, 2(1), 43–56.

Le Bissonnais Y., (1996) : Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility, I. Theory and methodology, *European Journal of Soil Science*, 47: 425–437.

Le Bissonnais Y., Cros-Cayot S. & Gascuel-Oudoux C., (2002) : Topographic dependance of

aggregate stability, overland flow and sediment transport, *Agronomie*, 22: 489–501.

Le Bissonnais Y., Renaux B. & Delouche H., (1995) : Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils, *Catena*, 25: 33–46.

Le Houerou H.N., (1969) : La végétation de la Tunisie steppique (avec référence aux végétations analogues du Maroc, de l'Algérie et de la Libye), Thèse doct. d'Etat et Sci. Ann. Inst. Nat. Rech Agron, Tunis, 42 (5), 1-620.

Le Houérou H.N., (1996) : Drought-tolerant and water-efficient trees and shrubs (Trubs) for the rehabilitation of tropical and subtropical arid lands, with particular reference to Africa and Asia, *Land Husbandry*, 1 (1): 43–64.

Leguédou S., (2003) : Mécanismes de l'érosion diffuse des sols Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés, Tèse de Doctorat, Université d'Orléans, 156 p.

Léonard M. & Dumas C., (2002) : Diversité et fonctionnalités des aménagements de versant : Exemple des terrasses Ardéchoises, *Bull. réseau-érosion n° 21*, Edit. IRD (ex-ORS TOM), Montpellier, 182-196.

Linsley R. K., Kohler M. A., Paulhus J. L. H., (1958): *Hydrology for engineers*, McGraw Hill, New York.

Lipper L. & Osgood D., (2001): Two essays on socio-economic aspects of soil degradation, *FAO Economic and social development paper*, 149, Rome, United Nations Food and Agriculture Organisation (FAO).

Llomas J., (1993) : *Hydrologie générale, principes et applications*, Edit. Gaetan marin, Canada, 509 p.

Loch R. J. & Foley J. L., (1994) : Measurement of aggregate breakdown under rain: Comparison with tests of water stability and relationships with field measurements of infiltration, *Australian Journal of Soil Research*, 32: 701–720.

Ludwig B., Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., King D. & Chadoeuf J., (1996) : États de surface, structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du Nord de la France, *Étude et Gestion des Sols*, 3(1):53–70.

Mabit L., Laverdière M. R. & Bernard C., (2002) : L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France, *Cahiers Agricultures*, Volume 11, Numéro 3, 195-206, Mai - Juin 2002, Synthèses.

MacDonald J., (2005) : Faut-il déjà penser comment fertiliser le maïs en 2007? MAARO et Bill Deen/Université de Guelph, Canada.

Mainguet M., (2003) : les sécheresses et le génie créateur de l'homme dans les milieux secs : nouvelle géographie de l'adaptation ? Université de Reims Champagne-Ardenne. France.

Mainguet M., (1991): Desertification, Natural Background and Mismanagement, Springer-Verlag, Heidelberg, 306 p & 84 figs.

Malik S.J., (1998) : Rural poverty and land degradation : A reality check for the CGIAR, CGIAR Technical Advisory Committee and FAO. Rev.1. Rome : United Nations Food and Agriculture organisation (FAO), 1998, www.fao.org/Waidocs/TAC/x5784E/x5784e0d.htm.

Mando A., (1999) : Integrated land management for food production in Burkina Faso, environmental institutional and socio-economical issues, Rome, FAO, 97p.

Martin P., Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Ligneau L. & Ouvry J.F., (1997) : Mesures du ruissellement et de l'érosion diffuse engendrés par les pratiques culturales en Pays de Caux (Normandie), Géomorphologie, relief, processus, environnement, 2: 143-154.

Masson J. M., (1980) : Mesure de l'agressivité des pluies en rapport avec l'érosion des sols, La météorologie VI (20), 327-324.

Masson, J. M., (1971) : L'érosion par l'eau en climat méditerranéen, Thèse doct. Ing, USTL Montpellier, 213 p.

Mathieu A., (2001) : L'agriculture revue et corrigée par Dame Nature, L'Agora, des idées des débats, La Planète agricole, vol.8.n° 3, 11-14.

Mazour M., (2004) : Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen, Thèse de Doctorat d'état, Université de Tlemcen, 184 p.

Mazour M., (1992): Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'ued Isser- Tlemcen-Algérie, Bull; Réseau érosion, 12: 300-313.

Mazour M. & Benmansour M., (2002): effet de l'exposition des versants sur la production de la biomasse et l'efficacité anti-érosive dans le Nord Ouest algérien, Bull. Réseau érosion n°22 Ed. IRD (ex ORSTOM), Montpellier, 22: 360-368.

Mazour M; (2001) : Conservation des sols et lutte contre l'érosion, quelques résultats dans le bassin versant de la Tafna (Tlemcen), Comm. Sém, Theniet El Had, Tissemsilt, 4p.

Mazour M., Boughalem M. & Mededjel N., (2008) : La gestion de la matière organique et ses effets sur la conservation de la fertilité du sol dans le nord-ouest de l'Algérie, Revue (A S, Actualité scientifique) : Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides, 14, Marrakech (MAR), 2006/05/14-19, Agence universitaire de la francophonie. Edition des archives contemporaines, Session 7, Montréal (CAN), Paris : AUF ; IRD, 175-181.

Mc Garry D. & Daniells I.G., (1987) : Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a vertisol, Soil Sci, Soc. Am. J. 51, 1575-1580.

McCool D.K., George G.O., Römken M.J.M., Douglas C.L. & Papendick R.I., (1993) : Topographic effect on erosion from cropland in the northwestern wheat region, Trans. Am. Soc, Agr. Eng. 36-3: 771-775.

McDonald J., (2005) : Faut-il déjà penser comment fertiliser le maïs en 2007? MAAARO et Bill Deen/Université de Guelph. Canada.

McIntyre (D.S.), 1958. - Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, 85 : 261-266.

Medinger G., (1956) : Hauteurs de pluies en Algérie, moyenne 1913- 1953 (recueil statistique). S. E. S, Alger, 23p.

Monnier G., Stengel P., Bodet J.M., (1976) : Conséquences de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol, In. *Simplification du travail du sol en production céréalière*, ITCF, Paris, France, 151-165.

Morsli B., (1997): Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne; cas des monts de Béni-Chougrane- Mascara, Mémoire de Magister INA Alger, 165 p.

Morsli B., Mazour M., Mededjel N. & Roose E., (2004) : Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie, *Sécheresse* 2004, 15(1), 96-104.

Moss A. J. & Green P., (1983) : Movement of solids in air and water by raindrop impact, Effects of drop-size and water-depth variations, *Australian Journal of Soil Research*, 21:257-269.

Moss A. J., Walker P. H. & Hutka J., (1980) : Movement of loose, sandy detritus by shallow water flows: An experimental study, *Sedimentary Geology*, 25 (1-2), 43-66.

Mouffadal K., (2002) : Les premiers résultats des parcelles de mesure des pertes en terre dans le bassin-versant de Oued Nakhla dans le Rif occidental, *Bull Réseau Erosion*, 21 : 244-54.

Mrabet R., Saber N., El-Brahli A., Lahlou S., Bessam F., (2001) : Total, Particulate Organic Matter and Structural Stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco, *Soil & Tillage Res*, 57: 225-235.

Mrabet R., (2000): Differential response of wheat to tillage management systems in a semi-arid area of Morocco, *Field Crop Research*, 66: 165-174.

Musy A. & Higy C., (2000): Hydrologie appliquée, Polycopié HYDRAM, EPFL, Lausanne
Nicou R., Ouattara B. et Somé L., 1990 : Effets des techniques d'économie de l'eau à l'parcelle sur les cultures céréalières (sorgho, maïs, mil) au Burkina Faso. *L'agronomie tropicale*, 45 (1) : 43-57.

Niang D. (2006) : Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le Sahel Burkinabè, thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 135p.

Oades J.M., (1984) : Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management, *Plant Soil* 76: 319-337.

Oldeman L.R., Hakkeling R.T.A. & Sombroek W.G., (1991) : World map of the status of

human-induced soil degradation, An explanatory Note, Global Assessment of Soil Degradation, Wageningen, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), United Nations Environment Program (UNEP), 1991.

Ouédraogo B. L., (1998) : L'expérience des groupements Naam dans la lutte contre ladésertification au Yatenga, Sociétés rurales et environnement, In Gestion des ressources et dynamiques locales au sud, éd (Rossi G, Lavigne Delville P et Narbeburu D.) : 203-212.

Planchon O., Esteves M., Silvera N. & Lapetite J.M., (2000) : Raindrop erosion of tillage induced microrelief, possible use of the diffusion equation, Soil and Tillage Research, 56:131–144.

Planhol de X. & Rognon P., (1970) : Les zones tropicales arides et subtropicales, A. Colin, Paris. 487 p.

Poesen J., (1984) : The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume, Z.Geomorph, suppl, 49, 117-131.

Poss R., Pleuvret C., Saragon H., (1989-1990) : Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridional),Cah. ORSTOM, Pédol, 24, 4: 405-418.

Proffitt A. P. B., Rose C. W. & Hairsine P. B., (1991) : Rainfall detachment and deposition, Experiments with low slopes and significant water depths, Soil Science Society of America Journal, 55: 325–332.

Quansah C., (1981) : The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport, Journal of Soil Science, 32: 215–224.

Rabhi J (1997) : Etude hydrologique et aménagements du haut bassin versant de Merguellil (centre de la tunisie). Mém d'ingénieur. INA de Tunisie. 84 p.

Rabhi J., (1997) : Etude hydrologique et aménagements du haut bassin versant de Merguellil (centre de la tunisie),Mém d'ingénieur, INA de Tunisie, 84 p.

Raheliarisoa M.A., (1986): Influence des techniques culturales sur le comportement hydrodynamique et sur la susceptibilité à l'érosion des sols limoneux et sableux, thèse de troisième cycle, Université d'ORLEANS, laboratoire d'hydrogéologie.

Regis G., Roy A., (1999) : Efficacité de lutte antiérosive traditionnelle et moderne appliquées sur les versants en Haïti, Bul. Res. Eros 19, IRD, Montpellier, 274-285.

Remini B., (2000) : L'envasement des barrages, Bull Réseau érosion 20, 165- 171.

Riahi O., (2002) : Etude de la dynamique actuelle d'après l'observation de la surface du sol dans le bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie) , Mémoire de maîtrise Géographie, université de Tunis, 65p.

Romain A., (2009) : Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol, Mise au point d'un indicateur de ruissellement, Thèse de Doctorat d'état, Université de Strasbourg, 208 p.

Roose E., Smolikowski B., (1997) : Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes, monocylindre et 2 simulateurs de pluies, Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert, Bull. Réseau Erosion 17, ORSTOM, Montpellier, France, 282-296.

Roose E., (1980): dynamique actuelle des sols ferrallitiques, ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale, Trav. Doc, ORSTOM n°130, Paris, 567p.

Roose E., (1991) : Conservation des sols en zones méditerranéennes, Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVI, no 2, 1991: 145-181.

Roose E., (1968): Mesure de l'érodibilité d'un sol (K de Wischmeier) sur une parcelle de référence, protocole standard et discussion, ORSTOM, Abidjan, 10p.

Roose E., (1987) : Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages sudano sahéliens d'Afrique occidentale, In L'aridité, contrainte au développement, ORSTOM Montpellier, Sériedidactique: 481- 506.

Roose E., (1993): Dix sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de base Côte d'Ivoire, ORSTOM Abidjan, 125p.

Roose E., (1994):Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) , Bull pédologique de la FAO n° 70, 420 p.

Roose E., (1996) : Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes, Bull. Réseau Erosion, 16: 87-97.

Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M. & Morsli B., (1996) : Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne, Ch. ORSTOM, Seri. Pédol, Vol XXXVIII n°2 : 289- 307.

Roose E., Blancaneaux P. & Freitas P., (1993) : Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration ; Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, no 2, 1993 : 413-419 415.

Roose E., (1976) : Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale, Etudes sur petites parcelles expérimentales de sol, Revue de géographie physique et de géologie dynamique, XVHI (4), 365-374.

Roose E., Sabir M., Arabi M., Morsli B. & Mazour M. (2012) : Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. Physio- Géol, Volume 6 | 2012, p43-69.

Roose E., (1994) : Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), Bulletin pédologique, FAO 420 p.

Rose C. W., (1985) : Developments in soil erosion and deposition models, Advances in Soil

Science, 2:2–63.

Saber N. & Mrabet R., (2002) : Impact of no-tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calcixeroll soil in Morocco, *Agronomie* 22:451-459.

Sabir M., Merzouk A., Berkat O. & Roose E., (1994) : Effet du pâturage sur l'état de surface, l'infiltrabilité et la détachabilité du sol dans un milieu pastoral aride (Aarid, Haute Moulouya, Maroc). *Bull Réseau Erosion*, 14 : 444-462.

Saccardy L., (1950) : Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols, *Terres et eaux* 1950, 11 : 3-19.

Sari D., (1977) : L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis "Algérie", société Nationale d'édition et de diffusion, 623p.

Scherr S.J., (1999) : Soil degradation, A threat to developing-country food security by 2020? Food, agriculture, and the environment discussion paper 27, Washington (DC), International Food Policy Research Institute (IFPRI).

Seltzer P., (1946) : Le climat de l'Algérie, période 1913- 1938, *Inst. Météo, Univ. Alger*, 129-155.

Sharma P. P., (1996) : Interrill erosion, Dans Agassi M., éditeur, *Soil erosion, conservation, and rehabilitation*, Chapitre 7, Dekker, New York, 125–152.

SO.GE.T.H.A (1968) : Les ouvrages en gabions, techniques rurales en Afrique. 58p.

Stengel P. & Gélén S., (1998) : Sol, Interface Fragile, Collection « Mieux Comprendre », INRA Editions, Versailles.

Taabni M., (1998) : aménagement, lutte contre l'érosion des terres et pratiques paysannes dans les montagnes telliennes du Nord- Ouest algérien, *Bull. Réseau Erosion n°18*, ED. IRD (ex ORSTOM), Montpellier, 348- 363.

Talbi O., Mendas A., Bensaid A. & Trache M A., (2002) : Mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi et la quantification de l'érosion hydrique : application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen), *Sécheresse*, Volume 13, Numéro 3, 175-9.

Tengberg A., (1995) : Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso, *Journal of Arid Environments*, 30: 265–282.

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.

TESSIER O., (1984) : Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation, Thèse Univ, Paris VII, Pub. INRA, 360 p.

Thebe B., (1987) : Hydrodynamique de quelques sols du nord Cameroun. Bassins versants de

Mouda, Contribution à l'étude des transferts d'échelles, Thèse d'université, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier. 238p.

Thiombiano L., (2000): Etude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso, Thèse d'Etat, volume 1, 209 p.

Thomas A.J., Chadwick M.J. (réd.) Land use changes in Europe. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 528 p.

Torri D. & Borselli L., (1991) : Overland flow and soil erosion: some processes and their interactions, Dans Bork, H.-R., de Ploey, J. & Schick, A. P., éditeurs, Erosion, transport and deposition processes, Theories and models, volume 19 de Catena supplement, 129– 137.

Torri, D., Sfalanga M. & del Sette M., (1987) : Splash detachment: Runoff depth and soil cohesion, Catena, 14 (3):149–155.

Touaibia B. (2010) : Problematics of erosion and transport of solids in Northern Algeria Volume 21, issue 4, octobre-novembre-décembre 2010

Toutain B. (1979): Situation de l'élevage dans le Sahel voltaïque face à l'extension de l'espace agricole, In Maîtrise de l'espace agricole et développement en Afrique tropicale, Logique paysanne et rationalité technique, Mémoire ORSTOM n°89, Actes du colloque de Ouagadougou, Editions ORSTOM, Paris, 159-162.

Touzi M., (2001) : Ressources en eau et acquisition de bases de données à références spatiale et temporelle en Algérie du nord, Thèse de doctorat. Université de Nice Sophia- antipolis, 310 p.

Trevisan D., (1986) : Comportement hydrique et susceptibilité a l'érosion de sols limoneux cultivés, Thèse 3è cycle, Univ. Orléans, 242 p.

Vacca A., Loddo S., Serra G. & Aru A., (2002) : Soil degradation in Sardinia (Italy): main factors and processes, In : Zdruli P, Steduto P, Kapur S, eds, 7th international meeting on soils with Mediterranean type of climate, Bari : Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes-Instituto Agronomico Mediterraneo di Bari (Ciheam-IAMB).

Valentin C., (1981) : Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols des régions subdésertiques (Agadez-Niger). Dynamique de formation et conséquence sur l'économie en eau. Thèse 3è cycle, Université de Paris VII, 259p.

Valentin, C. & Bresson L.M., (1992) : Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils, Geoderma, 55:225–245.

Van Lynden G.W.J., (1995) : La ressource sol en Europe, Strasbourg, les éditions du Conseil de l'Europe, 1995.

Vogt H., (1991) : Quelques problèmes concernant les méthodes de recherche en érosion des sols, Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Alger, 10-15.

Wainwright J., Parsons, A. J. & Abrahams A. D., (1995) : A simulation study of the role of raindrop erosion in the formation of desert pavements, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20:277–291.

Wainwright J., Parsons A. J. & Abrahams A. D., (1999) : Field and computer simulation experiments on the formation of desert pavement, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24:1025–1037.

Wan Y., El-Swaify S. A. & Sutherland R. A. (1996) : Partitioning interrill splash and wash dynamics: A novel laboratory approach, *Soil Technology*, 9:55–69.

Wischmeier, W.H. et D.D. Smith, 1965. Predicting rainfall--erosion losses from crop land east of the Rocky Mountains. *Agricultural Handbook No. 282*, USDA, Washington.

Wischmeier W.H. & Smith D.D., (1978): *Predicting Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning*, *Agricultural Hand book No. 537*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 58 p.

Young R. A. & Wiersma J. L., (1973) : The role of rainfall impact in soil detachment and transport, *Water Resources Research*, 9(6):1629–1636.

Zdruli P. & Lushaj S., (2001) : The status of soil survey in Albania and some of its major environmental findings, In : Zdruli P., Steduto P., Lacirignola C. & Montanarella L, eds, *Soil resources of Southern and Eastern Mediterranean countries*, Bari : Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes-Instituto Agronomico Mediterraneo di Bari (Ciheam-IAMB).

Zekri N., (2003) : *Analyse du facteur de l'agressivité climatique et son influence sur l'érosion et le ruissellement dans le bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest Algérien)*, Mém de magistère, Université de Tlemcen 101p.

Liste des figures

	Page
1. Observation par satellite de vents propageant des masses considérables de sable vers les zones plus fertiles du nord du Maroc et de l'Algérie	27
2. Schéma et processus simplifiés des écoulements.....	36
3. Processus de ravinement en relation avec leur typologie.....	38
4. Différentes formes d'érosion en masse.....	40
5. Glissement rotationnel en coups de cuillère.....	41
6. Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies	43
7. Evolution des états de surfaces d'un sol limoneux formation d'une croûte de battance	43
8. Mécanismes de la désagrégation des mottes	44
9. Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau, ou effet splash.....	45
10. « Cheminées de fées » résultant du détachement et transport par rejaillissement	46
11. Que devient une goutte d'eau à la surface du sol	50
12. Carte de situation de la zone d'étude avec les stations pluviométriques	69
13. Contexte physiographique du bassin de l'Isser	77
14. Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	78
15. Modèle numérique de terrain « MNT » du Bassin de l'Isser	79
16. Carte lithologique de la zone d'étude.....	83
17. Carte de végétation de la zone d'étude.....	88
18. Carte des isohyètes de la distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de l'Isser (de 1979 à 2005	91
19. Paramètres utilisés pour obtenir la carte de pluviométrie moyenne annuelle du bassin	92
20. Climagramme pluviothermique (EMBERGER 1955	100
21. Carte de la répartition spatio-temporelle de l'agressivité climatique	101
22. Localisation des parcelles expérimentales à travers S/ Ahmed Chérif	118
23. Test d'infiltration au monocylindre	122
24. Forme des taches d'humectation	123
25. Forme de la partie mouillée sous le cylindre de mesure	125
26. Courbes d'infiltration des parcelles expérimentales étudiées	126
27. Méthode des points quadra ; un test simple et facilement applicable sur terrain.....	134
28. Carte de situation du dispositif expérimental	141
29. Model d'une station de quantification du ruissellement et de l'érosion.....	141
30. Relation entre l'érosion (t/ha/an) et la lame précipitée à S A Chérif A	148
31. Relation entre l'érosion (t/ha/an) et la lame précipitée à S A Chérif B.....	149
32. Localisation des stations pluviométriques utilisées.....	154
33. Paramètres utilisés pour obtenir la carte à risque	156
34. Définition des paramètres (couvert végétal, pente, précipitation.....	155

35. Nature et contribution des classes de sols	156
36. Poids des facteurs et contributions des classes.....	157
37. Choix de la maille et estimation de la couverture végétale	158
38. Application de la grille sur l'ensemble du bassin	159
39. Découpage de la carte des pentes.....	160
40. Représentation spatiale des facteurs pente et précipitations	161
41. Exemple de report des valeurs des classes sur la grille d'analyse.....	162
42. Impact du couvert végétal sur la vulnérabilité	162
43. Impact de la précipitation sur la vulnérabilité.....	162
44. Impact de la pente sur la vulnérabilité	162
45. Impact des trois paramètres (végétation, pente, précipitation) sur la vulnérabilité.....	162
46. Carte de vulnérabilité des sols.....	163

Liste des tableaux

	Page
1. Efficacité de trois types de seuils sur le ravinement	59
2. Paramètres morphométriques du bassin versant de l'Isser	71
3. Répartition altimétrique de la zone d'étude	73
4. Classification du relief Ig selon l'IRD	76
5. Classification du Relief en fonction de la dénivelée spécifique.....	76
6. Formations lithologiques par rapport à la surface totale du bassin	82
7. Présentation des différents types de sol à S. A.Chérif,	84
8. Occupation des sols dans le bassin versant de l'Isser	87
9. Pluies maximales journalières (1930 à 2011)	93
10. Nombre d'averses torrentielles enregistrées durant la période 1913- 1938.....	95
11. Ecoulement et besoin hydrique dans le bassin versant d'Isser.....	97
12. Températures moyennes mensuelles, moyennes maximales et minimales enregistrées à La station de Sidi Bounakhla de 1988 à 2011	97
13. Classification de l'indice de Lang (L) en fonction du climat.....	98
14. La valeur de L des deux stations de l'oued Chouly et de Heriz.....	98
15. Les valeurs de l'indice d'aridité de Martonne A de la station de O. Chouly et la station de Heriz	99
16. Classification de L'indice A en fonction du climat selon Martonne.....	99
17. Résultats du quotient pluviométrique Q_r de O. Chouly et Heriz	99
18. Précipitations moyennes annuelles et leurs indices d'agressivité climatique des trois stations dans la période de 1973 à 2001	102
19. Indice R_{usa} dans les différentes régions du globe	103
20. Caractéristiques des parcelles expérimentales	119
21. Caractéristiques des états de surface des différentes parcelles.....	136
22. Ecart des pluies annuelles par rapport aux moyennes annuelles déterminées sur trois périodes de mesures et les pluies maximales journalières	143
23. Erosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Sidi Ahmed Chérif A.....	146
24.Erosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Ahmed Chérif B.....	147
25. Corrélations pluies - érosion	151
26. Pluies, altitudes, exposition et distance à la mer (de 1979 à 2005)	155

Liste des graphiques

	Page
1. Evolution du rendement céréalier à Sidi Abdelli de 1989 à 2011.....	70
2. Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Isser.....	74
3. Variabilité des précipitations annuelles (1983-2011).....	92
4. Précipitations mensuelles des différentes stations (1983-2011)	93
5. Précipitations saisonnières moyennes	94
6. Diagramme ombrothermique de Hériz de 1988 à 2011	98
7. Variation inter-annuelle de l'agressivité climatique dans les stations de Hériz et oued Choul	103
8. Variation de l'infiltration moyenne en fonction de l'état hydrique des sols.....	128
9. Relation entre l'infiltrabilité et la surface ouverte du sol.....	138
10. Précipitations moyennes annuelles dans les 3 stations (1983-2011).....	144

Liste des planches photographiques

	Page
1. Erosion et paysages dans le domaine marneux.....	106
2. Les formes d'érosions rencontrées dans la zone d'étude.....	108
3. Effet du parcours sur la dégradation des sols.....	110
4. Gestion conservatoire de l'eau, du sol et de la biomasse.....	111
5. Aménagements antiérosifs.....	112
6. Etats de surface du sol et techniques culturales.....	113

Liste des acronymes

ANRH : Agence Nationale des ressources hydriques

CES : Conservation de l'Eau et des Sols

CPCS: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

DSA: Direction des Services Agricoles

EDS: Etats de surfaces

ETP: Evapotranspiration potentielle

ETR: Evapotranspiration réelle

FAO: Food and Agriculture Organization

INRF: Institut National de Recherche forestière

IRD:Institut de Recherche pour le Développement

MO: matière organique

ORSTOM: Organisme de Recherche Scientifique des Territoires d'Outre Mer

PNDA: Plan national du développement agricole

USDA: United States Department of Agriculture

Annexe

Annexe.1: Erosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Sidi Ahmed Chérif A - Exposition sud-ouest (1991-2004) Tlemcen (Mazour, 2004).

	Pluies	Parcelle Standard		
		Kram	Krmax	Erosion
	(mm)	(%)	(%)	(t/ha/an)
1991	371	09,9	34,6	3,60
1992	243	08,8	26,5	2,22
1993	268	05,1	12,5	0,73
1994	256	09,2	13,1	0,99
1995	541	10,8	36,5	05,9
1996	260	05,5	09,8	1,68
1997	349	09,9	27,2	4,30
1998	260	04,3	08,6	1,52
1999	253	03,6	08,2	0,61
2000	413	07,5	29,8	3,24
2001	422	07,8	27,6	3,90
2002	405,6	06,8	16,6	2,80
2003	367,2	04,5	14,6	1,98
2004	320,6	05,2	16,1	2,21

Système Traditionnel		
Kram	Krmax	Erosion
(%)	(%)	(t/ha/an)
7,1	33,0	3,20
6,1	12,7	0,87
4,1	11,2	0,41
7,5	12,8	1,00
7,8	28,7	3,95
5,2	12,8	1,20
7,1	18,0	2,60
4,6	09,0	1,60
2,0	08,0	0,40
6,5	26,0	2,30
7,9	22,8	2,90
4,2	18,8	1,20
3,9	16,2	0,96
4,8	18,7	1,24

Système amélioré		
Kram	Krmax	Erosion
(%)	(%)	(t/ha/an)
4,4	20,0	1,20
2,8	08,1	0,40
0,9	02,4	0,28
3,9	06,0	0,40
6,4	20,0	2,10
3,5	07,0	0,30
6,6	16,0	2,00
2,6	08,9	0,60
1,4	06,0	0,20
11 5,0	15,6	0,72
6,0	13,0	1,10
3,4	16,0	0,92
3,1	14,2	0,80
3,2	16,1	0,80

Les coordonnées de la station de mesure sont : $X=161$, $Y=199,12$ $Z=512$ m.

Les systèmes de gestion appliqués au niveau de ces parcelles sont :

- Sol nu sur parcelle nue labourée sarclée chaque mois
- Système traditionnel : blé-jachère traditionnelle, travail dans le sens de la pente.
- Système amélioré : blé intensif avec engrais (NP), travail perpendiculaire à la pente.

Les sols sont des sols à caractère vertique sur marnes. La pente est de 30% et les dimensions de la parcelle sont : $L= 22,2$ m, $l= 4,5$ m.

L'agressivité climatique est : $RUSA = 33$, $\sigma = 9,7$

Etat de surface : 5% de cailloux.

Annexe.2 : Erosion et ruissellement sur parcelles expérimentales à Ahmed Chérif B - Exposition nord-est (1991-2004) Tlemcen (Mazour, 2004).

		Parcelle Standard		
	Pluies	Kram	Krmax	Erosion
	(mm)	(%)	(%)	(t/ha/an)
1991	371	9,9	34,6	3,60
1992	243	8,3	25,0	2,20
1993	268	3,8	10,0	0,70
1994	256	6,0	11,1	0,92
1995	541	7,9	35,5	4,90
1996	260	4,5	09,7	1,28
1997	349	8,9	25,2	3,90
1998	260	4,0	08,0	1,22
1999	253	2,0	07,2	0,31
2000	413	6,8	28,8	2,64
2001	422	7,1	22,6	1,90
2002	405,6	6,6	14,2	2,20
2003	367,2	4,5	12,6	1,88
2004	320,6	5,0	15,1	2,11

Système Traditionnel		
Kram	Krmax	Erosion
(%)	(%)	(t/ha/an)
7,1	33,0	3,20
6,0	13,1	0,92
2,6	07,0	0,40
5,5	12,8	1,00
7,7	28,7	3,90
5,6	13,8	0,80
6,0	18,0	2,20
3,6	07,0	0,90
2,0	08,0	0,20
5,5	20,0	1,30
7,9	22,6	1,80
4,0	15,8	1,10
3,8	12,2	0,86
4,7	12,7	1,14

Système amélioré		
Kram	Krmax	Erosion
(%)	(%)	(t/ha/an)
4,4	20,0	1,20
2,2	08,7	0,37
3,3	09,4	0,31
3,9	07,0	0,41
7,4	22,0	2,10
3,5	08,0	0,30
6,6	16,0	2,00
2,2	08,1	0,30
1,3	06,0	0,10
5,0	15,0	0,90
6,0	14,0	1,20
3,3	12,0	0,80
2,7	14,2	0,82
2,4	11,1	0,76

Les coordonnées de la station de mesure sont : $X=161,11$ $Y=199,12$ $Z=512$ m.

Les systèmes de gestion appliqués au niveau de ces parcelles sont :

- Sol nu sur parcelle nue labourée sarclée chaque mois
- Système traditionnel : blé-jachère traditionnelle, travail dans le sens de la pente.
- Système amélioré : blé intensif avec engrais (NP), travail perpendiculaire à la pente.

Les sols sont des sols à caractère vertique sur marnes. La pente est de 20% et les dimensions de la parcelle sont : $L= 22,2$ m, $l= 4,5$ m.

L'agressivité climatique est : $RUSA = 33$, $\sigma = 9,7$

Annexe.3 : Collecte des Céréales des huit dernières années dans la zone de SIDI ABDELLI de 2003 à 2010 (DSA- Tlemcen)

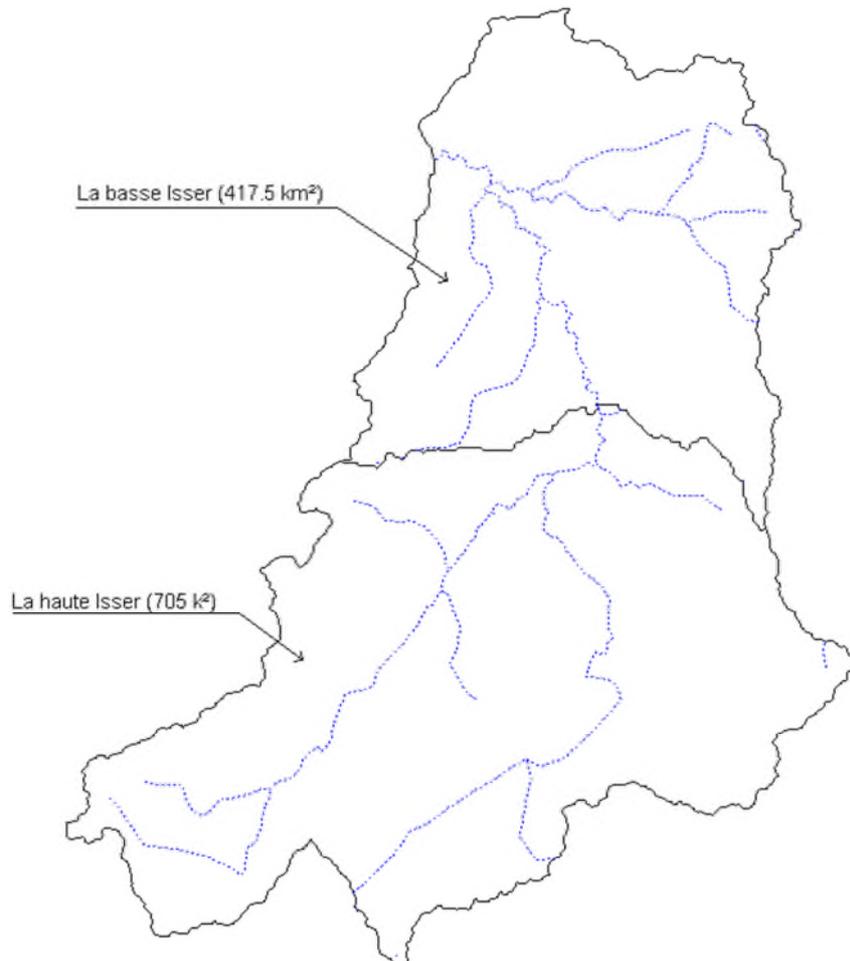
Campagne	Blé Dur			Blé tendre			Orge			Avoine			Céréales		
	Cons	Semence	Total	Cons	Semence	Total	Cons	Semence	Total	Cons	Semence	Total	Cons	Semence	Total
2003/2004	20843,70	5628,00	26471,70	10310,50	876,80	11187,30	641,30	1241,20	1882,50	0,00	0,00	0,00	31795,50	7746,00	39541,50
2004/2005	21286,00	4220,90	25506,90	9583,60	637,90	10221,50	423,30	518,30	941,60	0,00	0,00	0,00	31292,90	5377,10	36670,00
2005/2006	8525,50	2481,00	11006,50	3008,40	225,70	3234,10	2119,40	921,30	3040,70	7,50	0,00	7,50	13660,80	3628,00	17288,80
2006/2007	1699,40	10047,30	11746,70	0,00	4430,00	4430,00	0,00	6906,50	6906,50	0,00	38,20	38,20	1699,40	21422,00	23121,40
2007/2008	2178,70	1600,70	3779,40	0,00	1508,30	1508,30	0,00	872,20	872,20	0,00	0,00	0,00	2178,70	3981,20	6159,90
2008/2009	9745,40	4715,60	14461,00	4443,40	390,20	4833,60	1222,90	2208,80	14431,70	96,50	61,50	158,00	26508,20	7376,10	33884,30
2009/2010	22444,90	7184,80	29629,70	3232,90	462,60	3695,50	6356,40	1834,80	8191,20	55,90	0,00	55,90	32090,10	9482,20	41572,30
2010/2011	20019,30	13667,80	33687,10	0,00	6575,90	6575,90	655,30	2498,50	3153,80	0,00	0,00	0,00	20674,60	22742,20	43416,80
Moyenne	13342,86	6193,26	19536,13	3822,35	1888,43	5710,78	2802,33	2125,20	4927,53	19,99	12,46	32,45	19987,53	10219,35	30206,88

Annexe.4 : Evolution du rendement céréalier à Sidi Abdelli de 1989 à 2011 (DSA, Tlemcen)

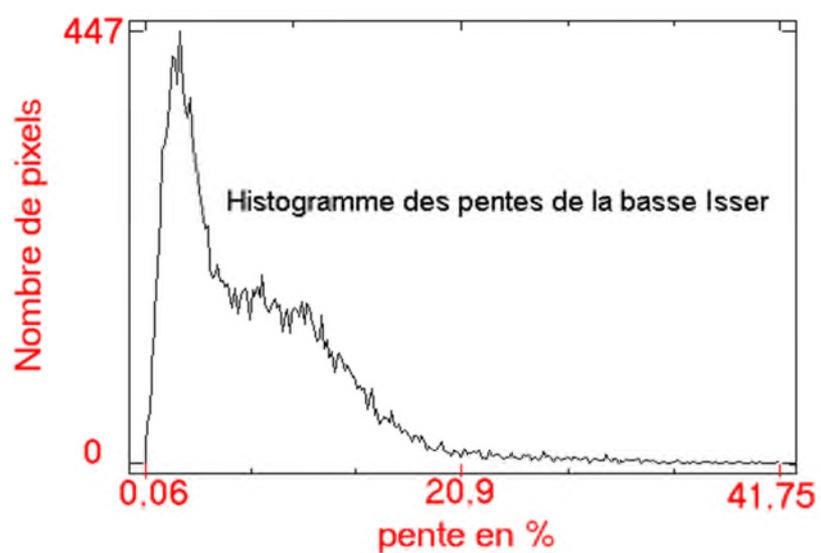
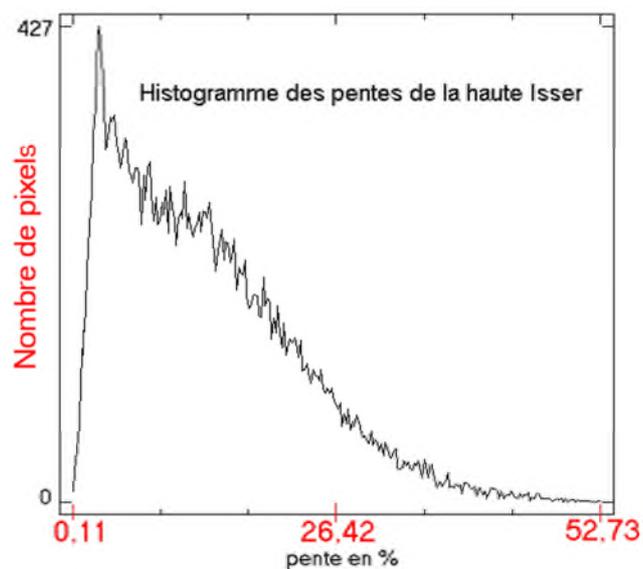
Campagne	Superficies moissonnées	Production	Rendement
1988-1989	7066	55224	7,82
1989- 1990	7514	60423	8,04
1990-1991	9588	163402	17,04
1991-1992	10333	74458	7,21
1992-1993	4324	35155	8,13
1993-1994	9100	66229	7,28
1994-1995	6022	40813	6,78
1995-1996	9824	111343	11,33
1996-1997	2610	14400	5,52
1997-1998	6769	80017	11,82
1998-1999	5861	61280	10,46
1999-2000	710	4481	6,31
2000-2001	7429	65348	8,80
2001-2002	6680	61860	9,26
2002-2003	6390	49072	7,68
2003-2004	6680	66580	9,97
2004-2005	6700	42480	6,34
2005-2006	4001	24755	6,19
2006-2007	6177	35565	5,76
2007-2008	852	6323	7,42
2008-2009	4355	70450	16,18

2009-2010	6210	68540	11,04
2010-1011	4600	38200	8,30

Annexe.5 :



Limites et superficies de la haute Isser et la basse Isser



Histogramme des pentes du bassin versant de l'Isser

Annexe.7:

DIX COMMANDEMENTS POUR L'AMENAGEMENT DES RAVINES (Roose, 1994)

1. Tant qu'on n'a pas **amélioré l'infiltration sur le bassin versant**, il ne faut pas tenter de reboucher la ravine (sinon elle trouvera un autre lit), mais prévoir un canal stable capable d'évacuer les débits de pointe de la crue décennale (au minimum).
2. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement en 1 à 6 ans, mais il doit concerner tout le bassin dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par différents types de seuils; si on inverse l'ordre, les plantes sont emportées avec les terres lors des crues.
3. L'emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si on cherche seulement à rehausser le fond de ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou, une gorge étroite où de nombreux seuils légers pourront s'appuyer sur des versants solides.

Si on cherche à fixer le maximum de sédiments ou à récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluent de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages-poids qui seront rehaussés progressivement.

4. L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont, à la pente de compensation près (1 à 10 % selon la nature du fond de ravine) qui peut s'observer sur place (zone stable sans creusement ni sédimentation). Dans un premier temps on peut doubler cet écartement et construire les seuils intermédiaires dès que la première génération de seuil est comblée de sédiments: **stabiliser immédiatement les sédiments** piégés avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres sur les versants.
5. Pour éviter la pression hydrostatique des coulées, il vaut mieux drainer les seuils (grillage, chicanes ou pierres libres).
6. Les seuils doivent être ancrés dans le fond et les flancs de ravine (tranchée de fondation) pour éviter les renards et contournements. Au contact entre le sol limono-argileux et les pierres des seuils, il faut prévoir une couche filtrante de sable et de gravier pour éviter que les **sous-pressions** n'entraînent les particules fines et la formation de renards.
7. Le courant d'eau doit être **bien centré dans l'axe de la ravine** par les ailes du seuil, plus élevées que le déversoir central. Ce déversoir doit être renforcé par de grosses pierres plates + cimentées ou par des ferrailles pour résister à la force d'arrachement des sables, galets et roches qui dévalent à vive allure au fond des ravines.
8. L'énergie de chute de l'eau qui saute du déversoir doit être amortie par une bavette (enrochement, petit gabion, grillage + touffes d'herbes) ou par un contre-barrage (cuvette d'eau) pour éviter les renards sous le seuil ou le basculement du seuil.
9. Tenir le bétail à l'écart de l'aménagement: il aurait vite fait de détruire les seuils et de dégrader la végétation. En compensation, on peut permettre des prélèvements de fruits, de fourrages et plus tard de bois, en échange de l'entretien de l'aménagement.
10. L'aménagement mécanique n'est terminé que quand on a éteint les sources de sédiments, stabilisé les têtes de ravine et les versants. La végétalisation doit alors se faire naturellement si on a atteint la pente d'équilibre, mais on peut aider la nature en couvrant rapidement les sédiments (herbe) et en les fixant à l'aide d'arbres choisis pour leurs aptitudes écologiques et leur production. Il faut passer de la simple gestion des sédiments à la valorisation des aménagements.

Les ravines peuvent devenir des "oasis linéaires".