



المدرسة الوطنية الغابوية للمهندسين بسلا

**ECOLE NATIONALE FORESTIERE
D'INGENIEURS DE SALE**

**Contribution à l'évaluation des aménagements de lutte
antiérosive du bassin versant de l'Ourika, Tensift.**

MEMOIRE DE 3^{ème} CYCLE

Présenté par : M. HOUNDODE Djidjoho Julien

**POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
DES EAUX ET FORETS**

**OPTION : ECOLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES
NATURELLES**

Soutenu publiquement le 19 Juin 2015 à 09h00 devant le jury:

MM :

Mr. ENDICHI M.	(H.C.E.F.L.C.D-Rabat)	Président
Pr. SABIR M.	(E.N.F.I-Salé)	Rapporteur
Pr. KHATTABI A.	(E.N.F.I-Salé)	Rapporteur
Pr. HLAL E.	(E.N.F.I-Salé)	Examineur
Pr. LAMRANI A. M.	(E.N.F.I-Salé)	Examineur
Mr. OURAINI A.	(H.C.E.F.L.C.D-Rabat)	Examineur



Ecole Nationale Forestière d'ingénieurs
Salé

N° 471/ENFI

Salé, le 11/07/2015

Autorisation pour remettre le mémoire

Fiche d'acceptation du mémoire revu et corrigé après la soutenance

Nom et prénoms : HOUNDODE Djidjoho Julien
Promotion : 44^{ème}
Option : Ecologie et Gestion des Ressources Naturelles
Et intitulé : «Contribution à l'évaluation des aménagements de lutte antiérosive du bassin versant de l'Ourika, Tensift».

A été révisé dans sa forme finale, comme l'attestent les signatures et dates ci-dessous indiquées. L'autorisation est donnée à l'intéressé pour soumettre la copie finale à la direction de l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs pour approbation.

Membre du Jury

Président	: Mr. ENDICHI M.....	Signature		Date	08/07/2015
Encadrant	: Pr. SABIR M.....	Signature		Date	25/06/15
Co-encadrant	: Pr. KHATTABI A	Signature		Date	28/07/15
Examineur	: Pr. HLAL E.....	Signature		Date	30.06.15
Examineur	: Pr. LAMRANI A.....	Signature		Date	25/06/2015
Examineur	: Mr. OURAINI A.....	Signature		Date	11/07/2015

Approbation du Directeur de l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs :
Signature _____ Date 11/07/2015



Directeur de l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs
Signé : M'hamed HACHMI

N.B. : - Dépôt de cinq exemplaires pour le besoin de la bibliothèque
- Un exemplaire par membre de jury

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la convention de collaboration établie entre l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, d'une part, et l'Association Marocaine des Sciences Régionales, d'autre part, relative à la mise en œuvre de certaines activités du projet GIREPSE (www.gire-pse.com) financé par le Centre de Recherche et de Développement International, Canada.

Dédicace*A**Dieu, le tout puissant,**Ma très chère famille,**Ma future épouse,**Mes très chères ami(e)s**Vous, lecteur de ce document.*

Remerciements

Avant de présenter les résultats de ce travail, c'est pour moi un plaisir d'exprimer mes remerciements à **Dieu, le tout puissant** qui m'a doté de la force et de la volonté nécessaire pour accomplir ce travail. J'exprime également ma reconnaissance et mes vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué généreusement de près ou de loin à la réalisation de ce travail et plus particulièrement :

Pr SABIR M., Professeur à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, qui a bien voulu encadrer ce mémoire. Ses connaissances approfondies dans le domaine des aménagements de lutte antiérosive et ses qualités humaines m'ont permis aujourd'hui de présenter ce travail. J'ai toujours pu compter sur son indéfectible appui. J'ai trouvé auprès de lui une écoute sans faille. Qu'il trouve à travers ces mots ma profonde reconnaissance pour sa disponibilité.

Pr KHATTABI A., Professeur à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, son soutien lors des sorties sur le terrain et son appui pendant toutes la période de réalisation de ce travail étaient d'une extrêmes importance pour mener ce travail dans de bonne condition. Qu'il trouve à travers ces mots ma profonde reconnaissance pour sa disponibilité.

Mr. ENDICHI M., Directeur de la Direction de Lutte Contre la Désertification et de la Protection de la Nature, qui m'a honoré en présidant le jury.

Pr. HLAL E., Professeur à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce modeste travail. Qu'il soit vivement remercié.

Pr. LAMRANI A. M., PA à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, de bien vouloir faire partie des membres de notre jury. Qu'il soit vivement remercié.

Mr. OURAINI A., Chef de Service de la Conservation des Sols et de l'Aménagement des Bassins Versants, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce travail. Qu'il soit vivement remercié.

Je ne peux clore ces remerciements sans y associer l'appui du projet GIREPSE, le département des eaux et forêts, les autorités et populations locales, et tous autres organismes et personnes qui m'ont soutenu lors de la réalisation de ce travail.

Je suis très heureux d'adresser mes sincères remerciements et mes grandes reconnaissances à **Mrs Arbi et Adam** qui m'ont aidé lors de la collecte des données sur le terrain.

Nous voudrions aussi serrer la main à tous les amis qui n'ont cessé de nous prodiguer encouragements et chaleur, puissent ils trouver ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Je tiens également à remercier tous mes proches et plus particulièrement **mes parents** pour leur soutien financier et leurs encouragements constants.

Enfin qu'il me soit permis d'adresser un merci spécial aux enseignants et personnel de l'ENFI.

Résumé

Les phénomènes torrentiels sont dans le bassin versant de l'Ourika un danger épouvantable et brutal pour les enjeux humains et matériels. Conscients de cette situation alarmante, des aménagements de lutte antiérosive (correction mécanique et la reforestation) ont été entrepris dans cette zone.

La présente étude vise à évaluer l'impact de l'ensemble des travaux anti-érosifs réalisés, sur les écoulements de ce bassin et à apprécier l'efficacité des ouvrages de consolidations contre les risques torrentiels.

L'impact des aménagements a été déterminé par la comparaison des écoulements annuels avant et après les aménagements en se basant sur une approche de la modélisation de la pluie en débit. Il a été mis en évidence que ces aménagements ont permis de réduire les écoulements de 12%.

L'efficacité des ouvrages de protections a été évaluée en prospectant et en analysant les différents types de seuils dans quatre SBV de l'Ourika. Des mesures nécessaires concernant la quantification des atterrissements et la description de l'état actuel des ouvrages ont été également prises.

L'examen du profil actuel des ravins a prouvé que ces ouvrages ont été efficaces en termes d'accumulation de sédiments. Après quantification des sédiments piégés par les seuils, on estime que le système de correction torrentielle a retenu 22,1t/ha. Sachant que ces seuils sont remplis deux ans après leur construction, en tenant compte de leur capacité de piégeage, la dégradation spécifique dans cette région a été estimée à 15t/ha/an. A mesure que ces sédiments atterrisent, ils sont soit stabilisé par la végétation ou soit mis en valeur par les paysans. Bien que le système de correction torrentielle a participé activement à la réduction des menaces des crues, les seuils en gabion semblent ne pas être adaptés à la zone, environ 60 % d'entre eux ne jouent plus leur rôle, ils ont été partiellement ou totalement emportés par les crues. Compte tenu des défaillances structurelle et fonctionnelle observées au niveau de l'ensemble des ouvrages nous recommandons qu'ils soient suivis et entretenus afin de prolonger leur durée de vie et de leur permettre de jouer pleinement leur rôle.

Mots-clés : bassin versant de l'Ourika, crues torrentielles, aménagements, évaluer, suivis et entretenus

Abstract

Torrential events in the Ourika watershed are of a frightful danger and brutal threat to human and material interests. Mindful of this alarming situation, anti-erosive measures have been undertaken in this area.

This study aims to evaluate the impact of all anti-erosion work carried out on the flows of the basin and assess the effectiveness of consolidation works against torrential risks. The impact of all management measures was determined by comparing the annual runoff before and after these changes based on an approach of modeling the rate of rainfall. It has been demonstrated management measures taken from 2000 to 2008 have reduced these runoff by 12%.

The effectiveness of the protection structures was evaluated by prospecting and analyzing different types of protective structures in four SBV Ourika. Necessary measures about the quantification of sediment and description of the current state of the protective structures were also taken.

The review of the current profile ravines proved that these works have been effective in terms of sediment accumulation. After quantification of sediment trapped by the thresholds, the specific degradation in this region was estimated at 15t / ha / year. Furthermore as these sediments land, they are either stabilized by vegetation or are highlighted by the farmers. Although the torrential correction system has been active in reducing flood threats, however the protective structures in the form of gabion seem not to be adapted to the area, about 60% of these thresholds no longer play their role, and they have been partially or completely washed away by the floods. Taking to account the structural and functional failures observed at all the structures, we recommend that they be monitored and maintained to prolong their lives and enable them to play their full role.

Keywords: Ourika watershed, torrential floods, management, evaluate, monitored and maintained

ملخص

تشكل ظواهر الفيضانات في الأحواض المائية بأوركا تهديدا مروعاً ووحشياً بالنسبة للموارد البشرية و كذلك المادية. وباعتبار هذا الوضع منذراً بالخطر، فقد تم اتخاذ في بعض وسائل معالجة تآكل التربة (المعالجة الميكانيكية والتشجير) بالمنطقة.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير جَل منشآت مكافحة التآكل التي أجريت على جريان الحوض المائي و كذلك تقييم فعاليتها ضد مخاطر السيول.

تم تحديد تأثير هذه منشآت من خلال مقارنة الجريان السطحي السنوي قبل وبعد التعديلات، استناداً إلى نهج لنمذجة الأمطار إلى تدفقات. وقد ثبت أن هذه التطورات قد قللت من التدفق بمعدل 12٪.

تم تقييم فعالية بنيات الحماية من خلال تنقيب وتحليل أنواع مختلفة من المنشآت في أربع أحواض مائية فرعية لأوركا. واتخذت أيضاً التدابير اللازمة فيما يتعلق بتحديد كمية الطمي و وصف الحالة الراهنة لبنيات الحماية.

أثبت الفحص الجانبي الحالي لالوديان أن هذه المنشآت كانت فعالة من حيث تراكم الرواسب. بعد تحديد كمية الرواسب المحاصرة من قبل العتبات، قُدّر التدهور الخاص في هذه المنطقة ب 15 طن/هكتار /سنة. وفي نفس الوقت الذي تتم فيه هذه الترسبات، يتم استقرارها من قبل النباتات أويتم استغلالها من طرف المزارعين.

على الرغم من أن نظام تصحيح الجريان فعال في الحد من تهديدات الفيضانات، فلا يبدو أنّ عتبات قفف التراب تتكيف مع ظروف المنطقة، إذ أنّ حوالي 60٪ منها لم تعد تلعب دورها، إذ جرفت جزئياً أو كلياً من طرف السيول. نظراً للإخفاقات الهيكلية والوظيفية التي لوحظت على مستوى جميع المنشآت، نوصي بأن يتم رصدها وصيانتها بهدف إطالة مدة وظيفتها و كذلك تمكينها من القيام بدورها كاملاً.

كلمات البحث: الحوض المائي لأوركا، الفيضانات الغزيرة، المنشآت، التقييم، الرصد والصيانة.

Sommaire

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Résumé	vi
Abstract.....	vii
ملخص.....	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
Listes des annexes.....	xiv
Liste des abréviations.....	xv
Introduction	1
Problématique	1
Objectifs	2
Partie 1 : Revue bibliographique	3
Chapitre 1 : Relation pluie-débit	4
1.1. Introduction	4
1.2. Transformation de la pluie en débit.....	5
1.3. Modélisation de la pluie en débit	6
1.4. Critères d'évaluation de la modélisation de la relation pluie début	8
Chapitre 2 : Effet des occupations du sol et des aménagements de lutte antiérosive sur la relation pluie-débit	10
2.1. Introduction	10
2.2. Le traitement biologique des bassins versants	11
2.3. Les ouvrages mécaniques de correction des torrents et de stabilisation des lits ...	12
2.4. Conclusion.....	15
Chapitre 3: Approche d'évaluation des aménagements de lutte antiérosive sur le comportement hydrologique d'un bassin versant.....	16
3.1. Introduction	16
3.2. Les approches expérimentales.....	16
3.3. Les approches non expérimentales.....	16
3.3. Conclusion.....	17
Partie 2 : Matériels et méthodes.....	18
Chapitre 4 : Présentation de la zone d'étude	19
4.1. Situations géographique et administrative	19
4.2. Le climat.....	20

4.3. Caractéristiques morphologiques	20
4.4. Structure géologique du bassin versant de l'ourika	22
4.5. Occupation des sols	24
4.6. Données socio-économiques	24
4.7. Crues.....	26
Chapitre 5 : Nature et Importance des aménagements de lutte antiérosive réalisés dans le cadre de développement du bassin versant de l'Ourika	27
5.1. Introduction	27
5.2. Traitement mécanique des ravins	28
4.3. Traitement biologique	30
Chapitre 6 : méthodologie	32
6.1. Impact des aménagements sur les écoulements annuels du bassin versant de l'Ourika	32
6.2. Evaluation de l'efficacité des seuils	35
6.3. Etude de l'état actuel des seuils (intensité et la nature des formes de dégradations de ces ouvrages) en relation avec les facteurs du milieu.....	38
Partie 3 : Résultats et discussions	39
Chapitre 7: Impact des aménagements sur l'hydrologique du bassin versant de l'Ourika.....	40
7.1. Introduction	40
7.2. Hydrologie du bassin versant de l'Ourika.....	40
7.2.1. Etude des précipitations	40
7.2. Etude de la Lamé d'eau ruisselée.....	42
7.3. Etude du comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika avant les aménagements	44
7.4. Effet des modifications sur l'écoulement du Bassin versant.....	47
7.5. Conclusion.....	47
Chapitre 8 : Efficacité des ouvrages de consolidations dans la réduction de la violence des crues de l'Ourika	49
8.1. Introduction	49
8.2. Etats des ravins après les travaux de correction torrentielle	49
8.3. Rôle des sédiments atterris après la mise en place des ouvrages de protection	53
8.4. Etat actuel des ouvrages et capacité de gestion des risques de crues.	55
8.5. Conclusion.....	58
Conclusion et recommandations	59
Annexes	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ecartement conseillé entre les structures antiérosives.....	15
Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ourika à Aghbalou .	20
Tableau 3 : Situation de reboisement de la forêt d'Ourika avant l'aménagement 2005 ...	27
Tableau 4 : Nombre de seuils construits dans chaque sous bassin dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Oued Ourika.....	28
Tableau 5 : situation de reboisement et de régénération dans le bassin d'Ourika pendant la période du projet développement du bassin versant.....	31
Tableau 6 : Renseignements sur les stations pluviométriques utilisées	34
Tableau 7 : Caractéristiques morphométriques des SBV traités dans le cadre du projet de développements du BV Ourika	35
Tableau 8 : Pluviométries moyennes annuelles des différentes stations utilisées.....	40
Tableau 9 : Ecoulements printaniers et pluies printanières des 4 années exceptionnelles et la moyenne du bassin versant de 1970 à 2013.....	42
Tableau 10 : Résultat des comparaisons entre les débits simulés et les débits observés des différentes périodes.....	47
Tableau 11 : Volume moyen de chaque seuil et la quantité de sédiments retenue par mètre cube des ouvrages dans les différents SBV	51
Tableau 12 : Défaillances structurelles observées au niveau des différents types de seuils exprimées en pourcentage	57

Liste des figures

Figure 1 : Bassin versant topographique et bassin versant hydrogéologique.....	4
Figure 2 : Principe d'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant (Musy & Higy, 2004).....	5
Figure 3 : Représentation simplifiée des fonctions de production et de transfert d'un bassin versant.....	6
Figure 4 : Les différentes applications de la modélisation pluie débit (Perrin, 2000 in Bouanani, 2010)	7
Figure 5 : Principes de la correction d'un torrent. P : pente du lit initial du torrent ; i : pente de 1ère compensation (Greco, 1966).....	14
Figure 6 : Carte du bassin versant de l'Ourika (HCEFLCD, 2012)	19
Figure 7 : Profils longitudinaux de l'Ourika et des principaux affluents (Saidi & al., 2010).	21
Figure 8 : Répartition des pentes dans le bassin versant de l'Ourika	22
Figure 9 : Carte de friabilité du bassin versant de l'Oued Ourika (Anonyme, 2000).....	23
Figure 10 : Repartiton de l'occupation du sol dans le bassin versant d'Ourika (Rihane, 2015)	25
Figure 11 : Répartiton des seuils construits dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Oued Ourika (HCEFLCD, 2012)	29
Figure 12 : Localisation des périmètres des reboisements réalisés dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Ourika	30
Figure 13 : Identification des polygones de Thiessen sur le bassin versant de l'Ourika	35
Figure 14 : répartition des ravins choisis dans le BV Ourika.....	36
Figure 15 : Forme géométrique des sédiments retenus par un seuil.....	37
Figure 16 : Représentation des pluies moyennes annuelles en fonctions de l'altitude.....	41
Figure 17 : Variation des précipitations du bassin versant de l'Ourika (1970/71 – 2012/13)	42
Figure 18 : Variation des précipitations et des lames d'eau ruisselées dans le bassin versant de l'Ourika (1970/71 – 2012/13).....	43
Figure 19 : Pluviométrie et lames d'eau écoulées annuelles dans le bassin d'oued Ourika (1970/71–2012/13)	43
Figure 20 : Distribution des lames d'eau ruisselées en fonction de la pluviométrie annuelle avant les aménagements (1970 – 2000).....	45

- Figure 21** : Distribution des lames d'eau ruisselées en fonction de la pluviométrie. Superposition des trois courbes de la période avant les aménagements (1970- 2000) et la courbe de la période après les aménagements (2001- 2011)..... 45
- Figure 22** : Visualisation de la qualité du calage avant les aménagements (1970 -1989).. 46
- Figure 23** : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (1970 -1989) 46

Listes des annexes

Annexe 1 : Distribution des lames d'eau ruisselées en fonction de la pluviométrie annuelle au cours des trois périodes avant les aménagements et superposition des trois courbes....	65
Annexe 2 : Etat d'un reboisement de Pin dans le SBV Anins réalisé dans le cadre du projet de développement du BV Ourika. Les arbres penchés sous l'effet du vent et absence de la matière organique sous les arbres	65
Annexe 3 : Courbe montrant la quantité de sédiments retenue par un mètre cube de chaque ouvrage dans les différents SBV en fonction du volume moyen de chaque seuil.....	66
Annexe 4 : Délimitation et fixation du bord d'une nouvelle terrasse par les pierres ramassées lors de l'aménagement des sédiments pour l'installation de la terrasse.	66
Annexe 5 : Mise en place d'une seguia par les paysans à travers laquelle l'eau de l'oued passe vers la terrasse de sédimentation.....	67
Annexe 6 : Barrière constituées de blocs disposés perpendiculairement au sens de l'écoulement de la seguia alimentant les terrasses	67

Liste des abréviations

BV : Bassin Versant

CES : Conservation des Eaux et Sols

DPEFLCD : Direction Provinciale des Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification

DREFLCD : Direction Régionale des Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification

DRS : Défense et Restauration des Sols

Em : Erreur moyenne

EQM: Erreur Quadratique Moyenne

ENFI : Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs

Es: Supplément d'Écoulement

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

GIREPSE: Gestion intégrée des ressources en eau et paiement des services environnementaux

GR1A: modèle Génie Rural à 1 paramètre Annuel

HCEFLCD : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification

Qx: Quintaux

R² : coefficient de détermination

SBV : Sous bassin versant

Vat : Volume des atterrissements retenus par un mètre cube de cube

Vms : Volume moyen des sédiments

Introduction

L'érosion hydrique est devenue un phénomène répandu dans presque tous les pays méditerranéens avec l'extension de l'agriculture et de l'élevage aux détriments des écosystèmes forestiers (Bergaoui & Camus, 1995). En effet l'exploitation des écosystèmes forestiers de façon excessive par rapport à leur potentiel de renouvellement (défrichement, supaturâge ...) conduit à la dégradation de ces ressources naturelles. Par conséquent la végétation naturelle est menacée de disparition, le couvert végétal devient faible et clairsemé, la surface des sols est tassé par le piétinement des animaux et on assiste à la réduction de l'infiltration au profit du ruissellement or les processus d'érosion hydrique sont surtout liés à l'énergie du ruissellement (Sabir, 2011).

Dans les zones semi-arides marocaines, comme la majeure partie du bassin versant de Tensift, caractérisé par une sévérité des conditions du milieu (matériel géologique vulnérable, relief accidenté, précipitations orageuses) et une anthropisation considérable, les conséquences de l'érosion hydrique aboutissent souvent à des catastrophes naturelles locales à savoir l'érosion active, les inondations, les phénomènes torrentiels.

Problématique

Le bassin versant de l'Ourika, hydrosystème du bassin de Tensift, a connu des crues tristement mémorables par leurs effets destructifs et mortels. En 1995, ces phénomènes ont causé des dégâts énormes dont le bilan en pertes humaines et matérielles fut près de 289 morts et 15 millions de dollars US (Saidi & *al.*, 2010). Pour atténuer des processus de cette ampleur, l'Etat a mis en place depuis longtemps, soit dans le cadre des programmes réguliers, soit dans le cadre du programme de lutte contre les effets de sécheresse ou encore dans le cadre du projet de développement du bassin versant d'Ourika, un ensemble de techniques de conservation des eaux et des sols à savoir les travaux de DRS fruitières et forestières, de reboisements de protection du sol et les travaux de correction torrentielle ayant pour objectif principal d'écarter les crues qui y sont très fréquentes (Doukkali, 2003).

L'efficacité de ces aménagements anti-érosifs dans l'atténuation des risques de crues qui menacent cette région est encore incertaine. Il serait mieux d'évaluer leur efficacité avant leur extension dans les autres bassins limitrophes notamment les BV de Rheraya et de N'Fis souffrants du même problème que le présent BV (Fniguire & Boukrim, 2007).

Objectifs

Afin de se prononcer sur le rôle de ces aménagements dans la réduction des crues, le présent mémoire de fin d'étude dans le cadre du projet GIREPSE* porte sur la détermination de l'effet de ces aménagements sur le comportement hydrologique du bassin versant.

A cet effet, deux objectifs spécifiques sont visés :

- Evaluer l'effet des aménagements sur les écoulements annuels du bassin versant en se basant sur des approches de modélisation de la pluie en débit ;
- Evaluer l'efficacité du système de correction torrentielle : Etudier le rôle joué par les ouvrages de protections dans l'atténuation des risques de crues et étudier l'état actuel des seuils (intensité et nature des formes de dégradations de ses ouvrages) en relation avec la gestion des risques de crues.

* GIREPSE : Gestion intégrée des ressources en eau et paiement des services environnementaux

Partie 1 : Revue bibliographique

Chapitre 1 : Relation pluie-débit

1.1. Introduction

Un bassin versant est un ensemble complexe qui transforme les eaux des précipitations en eaux courantes et les dirige vers le point le plus bas en aval du réseau hydrographique par lequel passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin. La ligne de crête d'un bassin versant est la ligne de partage des eaux, elle constitue la limite des bassins versants topographiques adjacents. Toutefois dans certaines situations (formations karstiques, etc.), où un substratum imperméable est placé sous un sol perméable de part et d'autre de la ligne topographique de partage des eaux (figure 1). Le cours d'eau d'un bassin versant donné peut être alimenté par les eaux précipitées sur un bassin topographiquement adjacent. De ce fait la ligne réelle de partage des eaux n'est pas nécessairement identique à la ligne de partage des eaux de surface du bassin versant.

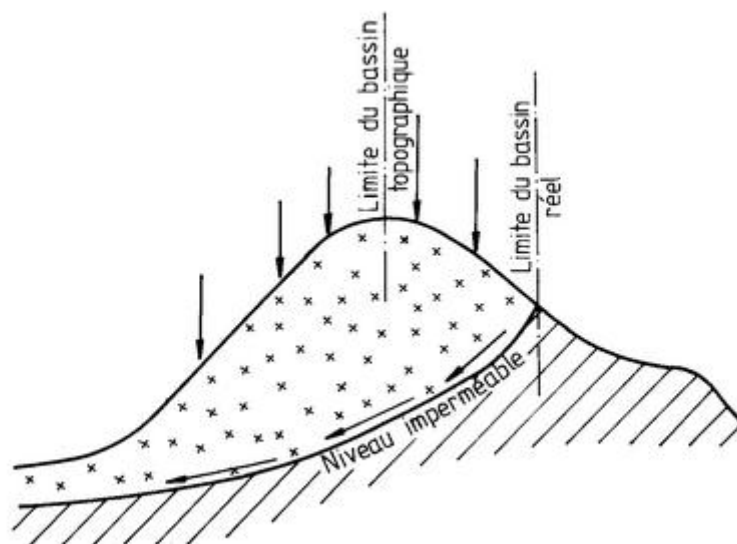


Figure 1 : Bassin versant topographique et bassin versant hydrogéologique

En se basant sur son rôle hydrodynamique on peut également définir un bassin versant comme étant une entité géographique qui concentre l'eau en un point et où tous les processus hydrologiques y prennent place : ruissellement, infiltration, écoulement souterrain. Lorsqu'un bassin versant est soumis à une sollicitation donnée (précipitation), sa façon de réagir est appelée réaction hydrologique. Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système (figure2).

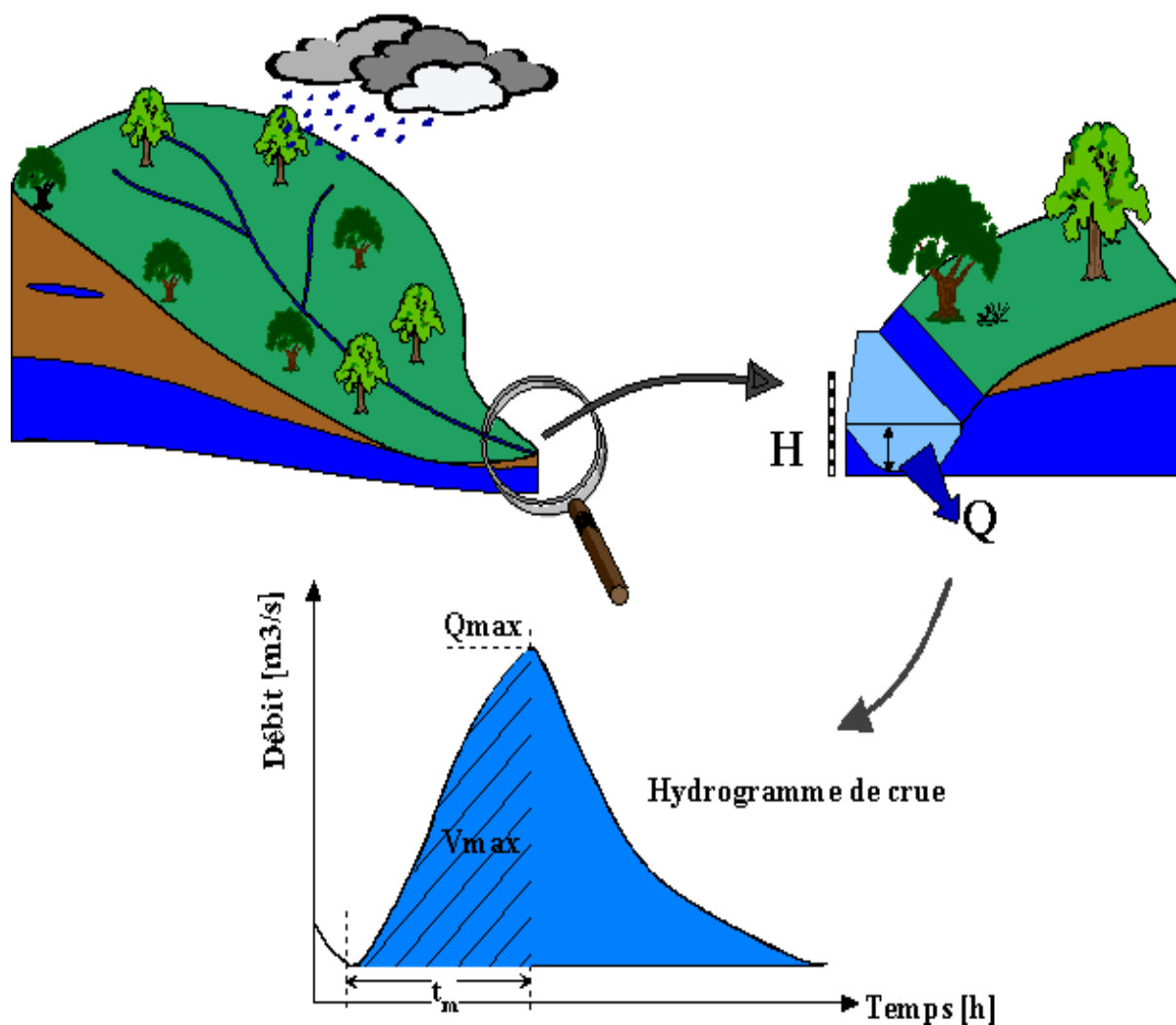


Figure 2 : Principe d'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant (Musy & Higy, 2004)

1.2. Transformation de la pluie en débit

La transformation de la pluie en débit se traduit par l'application successive de deux fonctions nommées respectivement fonction de production et fonction de transfert. Quand les versants reçoivent l'eau de pluie, ils la transforment en infiltration, ruissellement de surface, écoulement souterrain et évapotranspiration. Cette transformation d'une partie de la pluie brute en ruissellement (pluie efficace) est exprimée par le terme « fonction de production du bassin versant ». Elle permet de déterminer la quantité d'eau qui va s'écouler à l'exutoire d'un bassin versant. La fonction de transfert quant à elle s'explique par le fait que le réseau hydrographique achemine l'eau reçue des versants vers l'exutoire du bassin versant (figure 3). Elle permet la transformation de la pluie efficace en un hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant.

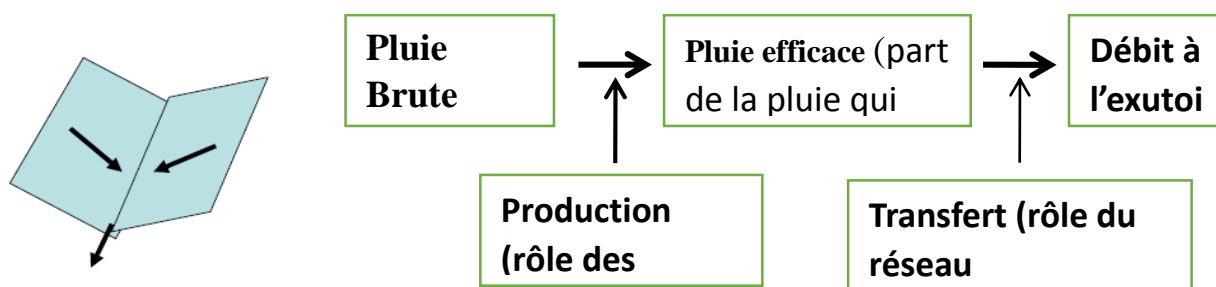


Figure 3 : Représentation simplifiée des fonctions de production et de transfert d'un bassin versant

1.3. Modélisation de la pluie en débit

La modélisation est souvent utilisée comme outil de prévision. Elle permet d'anticiper l'évolution future du débit d'un cours d'eau. En ce sens, elle a une importance capitale dans la prévision des inondations causant de temps en temps des grands dégâts matériels et humains et dans la détermination de la quantité de précipitation qui va participer à l'écoulement superficiel et celle qui va participer à l'écoulement souterrain (figure 4). En d'autres termes, elle permet de bien comprendre le fonctionnement hydro-climatique d'un bassin versant.

L'élaboration d'un modèle hydrologique passe par plusieurs étapes dont les importantes sont les suivantes (Boudhraa, 2007): d'abord il faut définir le modèle et préciser les objectifs à atteindre, ensuite identifier le modèle et caractériser sa structure, définir les paramètres et les variables nécessaires pour son fonctionnement et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base, enfin élaborer un algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions.

Après on passe au calage du modèle. Le calage d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'événements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence. La plupart du temps, on utilise une méthode d'optimisation qui détermine un jeu « optimal » au sens où la distance entre les simulations du modèle et les hydrogrammes de référence est minimale

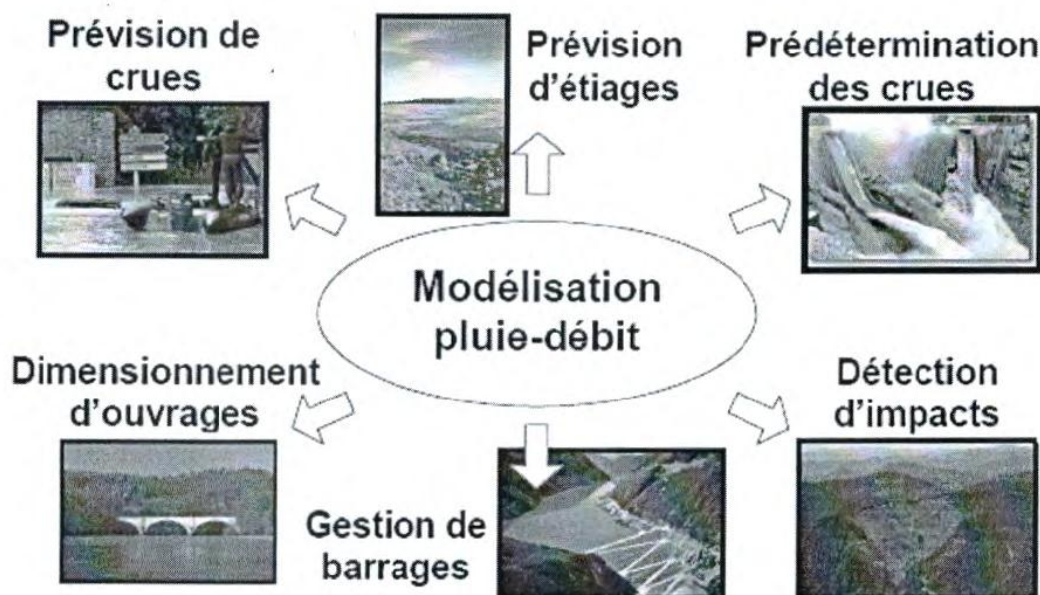


Figure 4 : Les différentes applications de la modélisation pluie débit (Perrin, 2000 in Bouanani, 2010)

Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon :

- la méthode passive : on prend tous les couples entrées-sorties disponibles et, par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations;
- la méthode active : on donne un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations.

Le calage peut être manuel, dans ce cas on teste des jeux de paramètres au hasard ou prédéfinis et on évalue visuellement l'ajustement des simulations des modèles aux données de référence mais cette méthode s'applique si on a une bonne connaissance de la sensibilité des différents paramètres du modèle et/ou si le modèle est relativement parcimonieux. Dans le cas où le calage est automatique on utilise une méthode d'optimisation automatique associée à des critères de performance (Cudennec, 2000). Pour caler un modèle, il est nécessaire de choisir (Bouanani, 2010):

- Une base de données d'événements (pluie et hydrogrammes de crue) de référence ;
- Un critère ou indicateur pour évaluer l'ajustement des simulations du modèle aux données de calage pour un jeu de paramètre donné ;
- Une méthode d'exploration de l'espace des paramètres du modèle.

Enfin on valide le modèle. Cette dernière étape est essentielle pour apprécier la robustesse d'un modèle de simulation des débits. Elle consiste à évaluer le modèle calé sur une base de données d'événements qui n'a pas servi pour le calage.

1.4. Critères d'évaluation de la modélisation de la relation pluie débit

Plusieurs critères ont été développés pour l'évaluation des modélisations. La plupart d'entre eux mesurent la distance entre les débits simulés et les débits observés. On y trouve (Boudhraa, 2007):

- L'erreur moyenne

C'est la moyenne des écarts entre les débits calculés et les débits observés, elle est notée $e_m(\%)$. Plus cette erreur se rapproche de zéro, plus l'estimation des débits est considérée meilleure :

$$em = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})$$

Avec

n : nombre d'observations,

Q_{ci} : débit calculé, et

Q_{oi} : débit observé.

- L'erreur quadratique moyenne

C'est le critère le plus utilisé en hydrologie pour quantifier l'erreur. Elle est définie comme étant la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts entre les débits observés et les débits calculés. Plus elle tend vers zéro, plus l'estimation est meilleure.

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}$$

- Coefficient de Nash

Il est donné par la formule suivante (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$Nash(\%) = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_m)^2} \right) * 100$$

Avec Q_m : débit moyen observé

Ce coefficient tend vers 1 lorsque le débit calculé tend vers le débit observé. Une valeur négative du critère indique que le modèle donne des résultats moins bons que l'utilisation de la moyenne de l'échantillon. On considère généralement qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables lorsque la valeur du critère de Nash est supérieure à 0.8 (Gaume, 2002).

Le critère de Nash est fréquemment utilisé en hydrologie. Il a l'avantage de donner un poids important à la restitution par le modèle des forts débits. Néanmoins, il présente l'inconvénient d'être dissymétrique: il peut prendre des valeurs fortement négatives pour des événements exceptionnelles.

Chapitre 2 : Effet des occupations du sol et des aménagements de lutte antiérosive sur la relation pluie-débit

2.1. Introduction

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs dont les précipitations et les facteurs internes du bassin versant comme la pente, la lithologie, etc.

Les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement constituent la cause et la source d'énergie érosive. Sur les terrains en pente, elles détachent et entraînent les particules terreuses. Dans les zones méditerranéennes, les précipitations sont faibles et très irréguliers (FAO, 1990). Ces averses de fréquence rare tombant sur des sols de faible épaisseur sont à l'origine de la formation des ravines, de l'apparition des mouvements de masse et d'inondations (Roose & De Noni, 1998).

En dehors des conditions climatiques, la pente et la lithologie jouent un rôle important sur le ruissellement dans un bassin versant. Le ruissellement commence sur des pentes faibles (1 à 2 %) et devient de plus en plus important sur les pentes fortes. De même, la longueur de la pente est proportionnelle à la vitesse d'écoulement de l'eau. Mais, il semble que l'influence de la longueur de pente est d'autant plus importante que le ruissellement a la possibilité de se concentrer. Quant à la lithologie, notons que les divers types de roches et leur structure donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration de l'eau (Demmak, 1982). Par exemple, des roches affleurantes ont une faible capacité d'infiltration indiquant ainsi qu'une grande quantité d'eau ruisselle, par conséquent, une forte quantité de terre peut être emportée. Les argilites, les marnes, les schistes, les basaltes et les gneiss sont très vulnérables au ravinement (Roose, 1994).

D'autre part, la végétation et les utilisations des terres contrôlent également fortement le ruissellement et l'érosion des sols dans un bassin versant. L'absence du couvert végétal expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie. Pour savoir si le sol est efficacement protégé par la végétation, ce ne sont pas les cimes des arbres qu'il faut regarder, mais plutôt la végétation au sol et la litière. Or dans les milieux méditerranéens arides, la production de matière organique est limitée, ce qui rend généralement les terres très susceptibles à l'érosion hydrique (Thornes, 1995). En ce qui concerne les activités humaines, elles affectent significativement l'érosion hydrique des sols. Par exemple, la mise en culture d'un sol le rend sensible à l'érosion car la probabilité s'accroît d'avoir un sol nu lors des fortes précipitations. Cependant les résidus de récolte jouent le rôle d'éponge et créent une rugosité qui divise, ralentit et étale les écoulements dans le temps (Bernard & al., 1998).

Les caractéristiques des différents facteurs cités ci-dessus se modifient avec le temps mais, à des vitesses très différentes selon le facteur considéré. Certains peuvent être considérés comme pratiquement stables à l'échelle humaine (comme la lithologie ...), d'autres comme la végétation par exemple sont susceptibles de se modifier plus rapidement et des changements importants peuvent affecter le régime d'écoulement en quelques années. De ce fait pour réduire le débit de pointe des crues et régulariser le régime des oueds dans le but d'assurer une protection contre les inondations des mesures de la correction torrentielle peuvent être entreprises dans un bassin versant. Pour ne pas se limiter à ses simples mesures posant exclusivement sur le lit du cours d'eau, on peut également agir sur l'ensemble du bassin versant par des actions de type biologique harmonieusement réparties entre le bassin et les lits (Lopez Cadenas, 1992).

2.2. Le traitement biologique des bassins versants

Le traitement biologique consiste à planter des espèces végétales permettant de protéger ou de stabiliser les sols contre les différentes formes d'érosion (Tayaa & Bouachid, 2004). Ces mesures revêtent en l'occurrence une importance particulière du fait de leur répercussion directe sur le volume des débits liquides des crues, dont la maîtrise est indispensable pour la correction de l'érosion linéaire des lits, ainsi que sur toute la dynamique du transport des matériaux solides.

Dans les bassins torrentiels, les espèces végétales ont un effet très bénéfique sur l'infiltration et le temps de concentration des eaux, et du même coup, exercent un contrôle efficace sur le ruissellement superficiel et le débit des crues. Néanmoins, des essences à croissance rapide doivent être évitées à ces fins car leur port ne leur permet pas une bonne interception, ni même une couverture efficace du sol. De plus elles ne tolèrent pas toujours les sous-étages de végétations arbustives et/ou herbacées, lesquels sont capitaux pour lutter contre les pertes en terre (Lopez Cadenas, 1992). Selon ce même auteur, les essences idéales sont celles dont la croissance se ralentit au stade adulte pour produire des fûts robustes et des houppiers bien développés. Il est à noter que les espèces introduites doivent être en équilibre avec les espèces existantes dans le milieu car les arbres introduits ne vont pas à eux seuls bien corriger le phénomène torrentiel mais l'écosystème qu'ils représentent. Ainsi, le boisement des bassins torrentiels doit être considéré comme une aide apportée à la nature pour inverser le processus de dégradation et amener progressivement cette dernière à un écosystème forestier, état optimal de la végétation pour le contrôle de ces phénomènes.

Sur les terrains cultivés, le traitement biologique peut être accompli par différentes espèces notamment les espèces herbacées sous forme de bandes enherbées, des espèces d'arbrisseaux et arbustes en général plantées sous forme de haie ou au moins en bordure des parcelles et des espèces fruitières ou para-fruitières plantées seules ou associations avec les ouvrages de CES (banquettes, gradins, cordons ...). Enfin notons que les couverts herbacés permanents, exploités en régime de pâturage rationnel et ordonné, font également partie des moyens biologiques auxquels on peut recourir pour corriger les bassins torrentiels, à condition que les pentes n'excèdent pas 30 à 35% (Tayaa & Bouachid, 2004).

2.3. Les ouvrages mécaniques de correction des torrents et de stabilisation des lits

Dans le cas des lits à caractère torrentiel marqué, où la force d'entraînement du courant dépasse habituellement la capacité de résistance du contour et où le phénomène apparaît général (abaissement progressif du lit, transport massif de matériaux par charriage, érosion des berges et déstabilisation des terrains adjacents), les types d'ouvrages offrant la meilleure solution et la plus simple sont les barrages de consolidation transversaux, perpendiculaires à l'axe du torrent.

Ces ouvrages ont pour but de créer des obstacles dans le but de ralentir ou d'empêcher le ruissellement et d'augmenter l'infiltration de l'eau en diminuant ainsi sa force érosive, ce qui assure le dépôt des sédiments (Raharinaivo, 2008) et évite que des charges solides s'incorporent au courant.

2.3.1. Principaux types de seuils

◆ Seuils en pierres sèches

Les seuils en pierres sèches sont des ouvrages construits au travers du lit d'un ravin, à l'aide de pierres sèches non cimentées mais ancrées sur les berges de manière à augmenter la cohésion et la rigidité (Blali, 2011). Du fait de manque de cohésion entre les pierres, sa hauteur ne doit pas être trop élevée (3 m au maximum). Il est recommandé que ces seuils ne soient pas installés dans les terrains argileux. L'utilisation de pierres sèches permet d'avoir un ouvrage filtrant qui laisse passer à travers les parois une partie des eaux de ruissellement. L'excédent des eaux est évacué à travers un déversoir aménagé à la partie aval de l'ouvrage. Ces seuils peuvent créer par leur atterrissement un milieu favorable à l'installation des plantes.

◆ Seuils en gabion

Les gabions sont des caisses en grillage formées de pierres rangées avec soin et entourées de fil de fer galvanisé. Ses pierres ne doivent pas être friables ni gélifiées mais de dimension plus grande que celle de la maille du grillage. Les seuils en gabion sont particulièrement recommandés pour les terres argileuses ou marneuses (Greco, 1966), car ils se prêtent avec une certaine souplesse aux affouillements et aux mouvements du sol. Ces seuils sont utiles pour la correction des ravins à largeur importante et permettent une bonne stabilisation des berges et l'écêtement des crues.

◆ seuils en maçonnerie

Des seuils en maçonnerie sont des barrages implantés transversalement dans les lits des ravins. Ces ouvrages construits avec de la pierre cimentée ou du béton se prêtent pour la correction des ravins très larges ou torrent pour empêcher le lit de se creuser en remettant ainsi en cause la stabilité des berges et des versants. Ces barrages, parfois importants, permettent d'assurer le collage du lit du torrent dans la partie inférieure car une fois atterris, ces ouvrages sont efficaces. Ces barrages sont solides, durent longtemps et permettent, lorsqu'ils sont associés à d'autres types de seuils, de corriger le profil en long du ravin. L'inconvénient de ces ouvrages est qu'ils sont très coûteux, nécessitent une main d'œuvre qualifiée et ne devront pas être établis dans les terrains très argileux. Pour éviter le risque d'accumulation de l'eau en amont, il est nécessaire de percer le barrage, lui-même, de plusieurs rangées de barbacanes ou pertuis qui permettront la diminution de la poussée et le drainage.

2.3.2. Exécutions des seuils

◆ Nombre de seuils

Un torrent se corrige par l'emploi de barrages successifs qui auront pour effet suivants (Greco 1966):

- ✓ Créer un atterrissement de matériaux à l'amont du barrage dont la pente est inférieure à la pente initiale du lit, d'où diminution de la vitesse de l'eau ;
- ✓ Etaler les eaux sur l'atterrissement pour l'augmentation des frottements

En général, ces atterrissements ont une pente inférieure à la pente initiale du lit, appelée pente limite ou pente de compensation pour laquelle la quantité de sédiments enlevés par le torrent correspond à la quantité déposée.

Pour corriger un ravin commençant par l'aval, il y a lieu de construire une série de seuils disposée en marche d'escalier, de façon que l'atterrissement du seuil aval arrive au pied du seuil amont (figure5). Le nombre de seuils à construire est donné par la formule suivante :

$$N = L * (P - I) / H$$

N : Nombre de seuils à construire;

L : Longueur du ravin;

p : Pente moyenne du lit;

I : Pente de compensation : elle est estimée en mesurant les pentes d'atterrissement naturel ou artificiel ;

H : Hauteur moyenne des seuils.

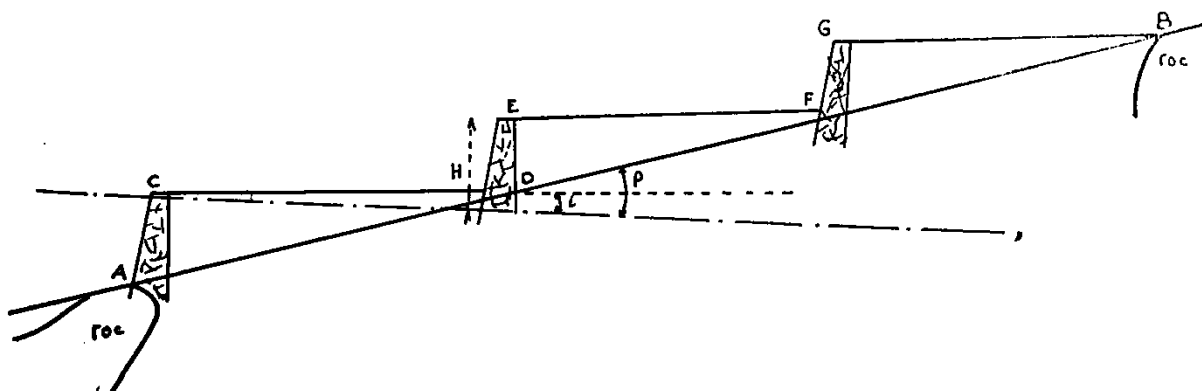


Figure 5 : Principes de la correction d'un torrent. P : pente du lit initial du torrent ; i : pente de 1ère compensation (Greco, 1966)

◆ Calcul de l'écartement entre les seuils

La distance entre les seuils est en fonction de la pente et aura une dénivelée qui pourra augmenter ou diminuer en fonction du relief des lieux d'exécution des travaux d'installations des barrages. Selon Greco (1966), la formule de l'écartement est la suivante: $E = L/N$; E : Espacement, L : Longueur du Ravin, N:nombre de seuil.

Selon Regis & Roy (1999), la détermination de l'écartement entre les ouvrages antiérosifs peut se baser uniquement sur la pente (tableau 1).

Tableau 1 : Ecartement conseillé entre les structures antiérosives (Regis & Roy, 1999)

Pente (en%)	Ecartement conseillé (en m)
< 10	12 à 15
10 à 25	10 à 12
25 à 40	8 à 10
40 à 60	6 à 8
> 60	2

2.3.3. Caractéristiques des barrages

Les seuils construits doivent être assis solidement et encastrés profondément dans les berges. Dans les sols affouillables les seuils peuvent avoir une fondation jusqu'à 1 m de profondeur. Même sur des sols rocheux, les fondations ne sont pas à négliger car le seuil risque de glisser. Quand les berges sont relativement peu solides, les seuils ayant une forme rectiligne sont établis mais, dans le cas où les berges sont solides, les barrages curvilignes sont préférables. Ceux-ci ont l'avantage de mieux résister à la poussée des terres et de l'eau accumulées à l'amont ainsi qu'aux forces de choc des blocs entraînés par le courant. Quant à la forme du déversoir d'un barrage, les déversoirs à section curviligne sont construits seulement dans le cas où les berges sont affouillables. Ils présentent l'avantage d'éviter les angles et de combattre la convexité des dépôts de matériaux qui tend à chasser vers les berges le courant d'eau et risque de provoquer des affouillements. Mais, ils ont l'inconvénient de rassembler les eaux toujours sur un même point.

2.4. Conclusion

La maîtrise de la violence des écoulements et de l'érosion dans un bassin versant n'est pas une chose facile. En effet, les processus, les causes et les facteurs déterminant de ces phénomènes semblent être très variables. Il ne s'agit donc pas d'un problème technique simple mais d'un signe de dégradation très complexes (Roose, 2000).

Les ouvrages construits lors de la correction d'un torrent ne sont que des protections temporaires qui doivent être accompagnées de la végétalisation qui en prolongera leurs effets. Plantés le long du talus des ravins et sur les atterrissements accumulés à l'amont des seuils de protection, les végétaux grâce à leur action sur le sol réduisent la quantité de sédiments en suspension qui contribuent à la turbidité et à la densité du courant, abaissant ainsi le poids spécifique de l'eau et donc, sa force d'entraînement.

Chapitre 3: Approche d'évaluation des aménagements de lutte antiérosive sur le comportement hydrologique d'un bassin versant

3.1. Introduction

L'influence des aménagements de lutte antiérosive sur le comportement hydrologique d'un bassin versant est très difficile en pratique à mettre en évidence. La quantification de façon précise des effets hydrologiques d'une modification de l'occupation du sol reste difficile à évaluer, d'autant qu'ils peuvent être influencés par la variabilité climatique (Andréassian, 2002). Le rôle de la végétation dans le cycle hydrologique est devenu polémique dans le monde scientifique à cause de nombreux résultats trouvés lors des études qui sont contradictoires. Néanmoins quelques approches sont développées à cet effet.

3.2. Les approches expérimentales

Les approches expérimentales sont celles qui maîtrisent mieux l'influence de la variabilité climatique lors des études de l'impact des aménagements de lutte antiérosive sur le comportement hydrologique d'un bassin versant (Fritsch, 1995). Celles-ci utilisent les données de plusieurs bassins observés simultanément. Celle qui a connu plus de succès est connue sous le nom de méthode de bassins jumelés ou de bassins appariés (Hewlett, 1982). Elle reste la référence pour ce qui est des études d'impact de la modification du couvert végétal sur l'hydrologie d'un bassin versant. Cette méthode consiste à sélectionner tout d'abord deux bassins versants similaires suivis simultanément durant la même période afin d'établir une relation univoque entre leurs deux comportements hydrologiques. Par la suite, l'occupation des sols de l'un des deux bassins versants est modifiée. La relation qui a été établie avant traitement entre les débits du bassin de contrôle et du bassin modifié, sera utilisée pour reconstituer ce qu'aurait été la production du bassin modifié sans traitement. Cette reconstitution permettra une évaluation directe de l'impact du traitement sur le comportement hydrologique du bassin considéré. Cette méthode, si elle est efficace pour détecter les changements brutaux ou graduels, nécessite de trouver deux bassins versants similaires.

3.3. Les approches non expérimentales

Les approches non expérimentales font appel dans le cas où on ne dispose que les données provenant d'un seul bassin versant comme le cas de la présente étude. Elles trouvent généralement un terrain d'application favorable sur des bassins versants observés dans le

cadre de la gestion opérationnelle des réseaux hydrométriques, qui seule permet de disposer de longues séries de données. Elles sont de plusieurs types, on distingue :

- Celle qui consiste à caler un modèle de prédiction des débits à partir des pluies avec les données de la période pendant laquelle on puisse considérer que l'utilisation du sol n'a pas varié c'est-à-dire la période avant traitement. On peut alors utiliser ce modèle avec les données de pluies de la période après traitement ce qui permet de reconstituer le comportement qu'aurait eu ce bassin pendant la période après traitement si le traitement n'avait pas été appliqué (Lavabre & al., 1996). Elle est préférable sur des petits bassins versants.
- Une deuxième consiste d'abord à identifier les périodes avant et après traitement . Ensuite on sépare les données de la période avant aménagement en deux parties égales. On dira que l'aménagement a eu un effet sur un paramètre de la crue si celui-ci n'a pas varié significativement entre les deux périodes avant aménagement et qu'il a pris une valeur nettement différente dans la période après aménagement (Bergaoui & Albergel, 2000).
- Une troisième basée sur les analyses statistiques (Bassoumori, 1992). Il suffit déterminer au préalable les variables explicatives (par les précipitations, la surface du bassin versant traitée en D.R.S ...) et les variables expliquées (érosion spécifique, volume d'eau écoulée ...). Ensuite pour déterminer l'impact des aménagements sur le comportement hydrologique du bassin versant, on utilise des régressions entre la variable à expliquer et les variables explicatives. Enfin on analyse le coefficient de corrélation de ces régressions. Cette approche est préférable lorsque les aménagements se réalisent progressivement dans le temps.

3.3. Conclusion

De ce qui précède on comprend que la mise en évidence des effets d'un traitement sur le comportement hydrologique d'un bassin versant avec précision et avec un risque statistique très faible dépend surtout de la capacité à reconstituer le comportement hydrologique du bassin en l'absence du traitement. Le choix de l'une des approches citées ci-dessus ne doit pas se faire au hasard. Il doit se baser plus sur le respect des conditions d'utilisation de ces approches.

Partie 2 : Matériels et méthodes

Chapitre 4 : Présentation de la zone d'étude

4.1. Situations géographique et administrative

Le bassin versant de l'Ourika fait partie du grand bassin de Tensift, il se situe sur la rive gauche de celui-ci (versant nord du Haut Atlas). Il est limité au Nord par la plaine du Haouz, au Sud par le bassin versant de Tifnout, à l'Est par celui de Zat et à l'Ouest par celui de Rheraya (figure 6). Ce BV relève du territoire de trois provinces dont environ 90% de sa superficie fait partie de la province d'Al Haouz et les 10 % restantes font partie des provinces d'Ouarzazate et de Taroudant. Il concerne principalement les communes rurales suivantes: Ourika, Setti Fadma et Oukaimden.

Sur le plan forestier, il relève de la compétence de la DREFLCD du Haut Atlas, du DPEFLCD de Marrakech et appartient à cinq secteurs forestiers dont ceux d'Aghbalou, de Setti Fadma, de l'Oukaimden, d'Agaïouar et de Tiguenin-N-Oumzil et Tnine.

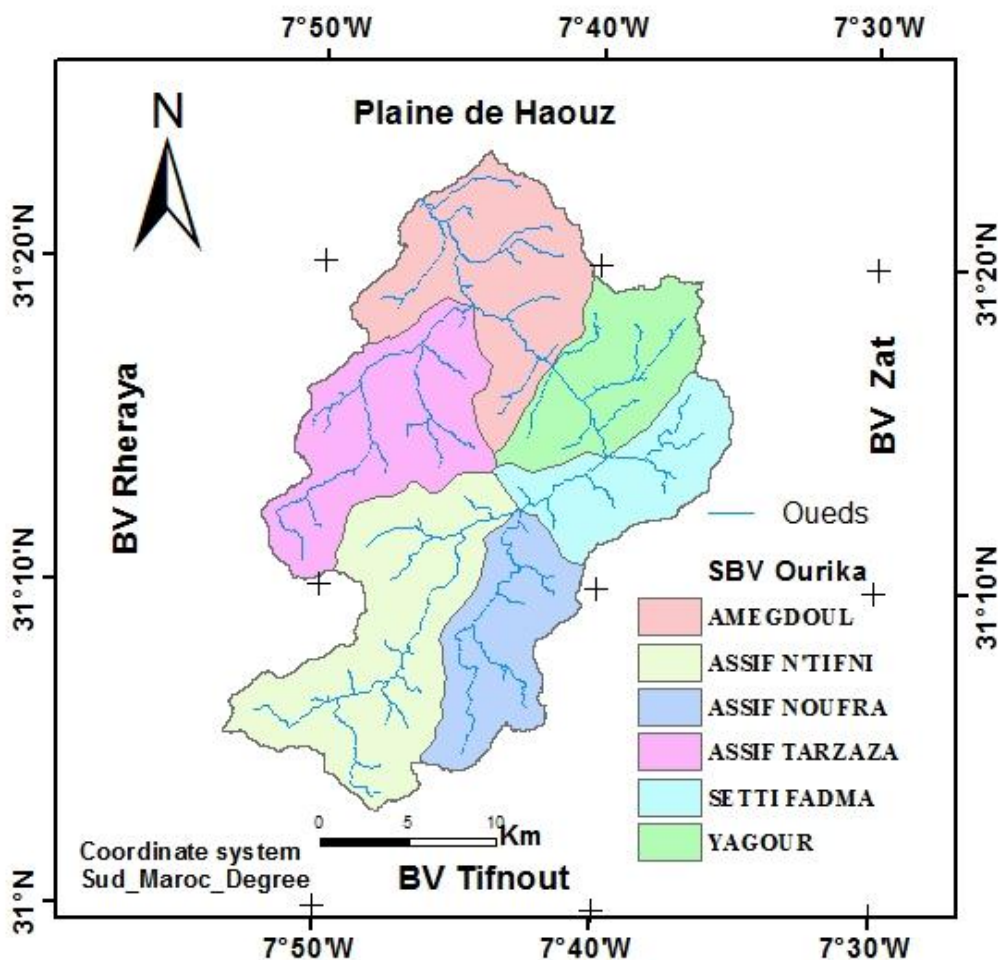


Figure 6 : Carte du bassin versant de l'Ourika (HCEFLCD, 2012)

4.2. Le climat

Le climat du bassin versant de l'Ourika est caractérisé par sa grande variabilité spatiotemporelle. La précipitation annuelle est en moyenne de 500 mm. Cette pluviométrie augmente avec l'altitude. Elle est de l'ordre de 400 mm au piedmont et peut dépasser 700 mm par an sur les hauts sommets du bassin (Doukkali, 2003). Il y a eu lieu de signaler l'existence d'orages très fréquents entre les mois de juillet et octobre, causant des dégâts importants au niveau des vallées de montagnes. Pour ce qui est de l'enneigement, il commence dès le mois d'octobre et se poursuit jusqu'au mois de mai. Cependant, leur durée reste très variable selon la position géographique et l'orographie. Les températures moyennes varient de 21.5 à 32°C pour les maxima et de 4 à 5.7°C pour les minima. Les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds alors que les mois de décembre et janvier sont les mois les plus froids de l'année. Sur le plan synthèse bioclimatique, le BV est caractérisé par l'existence d'une période de sécheresse en été pouvant durer trois mois et de deux périodes pluvieuses, en hiver et au printemps. Enfin le bassin versant a un bioclimat variable allant du semi-aride tempéré au subhumide frais.

4.3. Caractéristiques morphologiques

Les caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ourika conditionnent des conséquences hydrologiques importantes observées à son exutoire en période de crue. Ce bassin versant ayant une superficie d'environ 530 km² à Aghbalou, a une densité de drainage importante de l'ordre 3,1 km/km². Sa forme est légèrement allongée avec un indice de compacité de 1,3 (tableau 2). Le réseau hydrographique du bassin est particulièrement dense et bien hiérarchisé. Le cours d'eau principal atteignant l'ordre 6 à l'exutoire coule dans une longue vallée encaissée vers laquelle converge, sur les deux rives, une succession de vallées et de ravins affluents (Figure 7). Ainsi les ondes de crues de l'oued Ourika grossissent vers l'aval, à mesure de leur alimentation par les affluents (Saidi & al., 2010).

Le milieu physique est particulièrement très accidenté avec des variations brusques d'altitudes. La répartition altimétrique montre que 75 % des surfaces du bassin sont situées entre 3200 et 1600 m et l'altitude moyenne s'élève à 2500 m (Tableau 2). Les pentes sont dans l'ensemble fortes (Figure 8), celles du cours principal ne dépassent pas 5 %, mais la vitesse et la violence des écoulements sont surtout régies par les pentes plus importantes des affluents et des versants.

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'Ourika à Aghbalou (Saidi & al., 2010).

Périmètre (km)	104
Surface (km ²)	503
Indice de compacité	1,3
Longueur du cours principal (km)	45,5
Longueur du rectangle équivalent (km)	39,2
Largeur du rectangle équivalent (km)	12,8
Altitude maximale (m)	4001
Altitude minimale (m)	1070
Altitude moyenne (m)	2500
Pente moyenne du cours principal	2,15%
Pente moyenne des principaux affluents	9,35 %
Pente moyenne des versants montagneux	35%

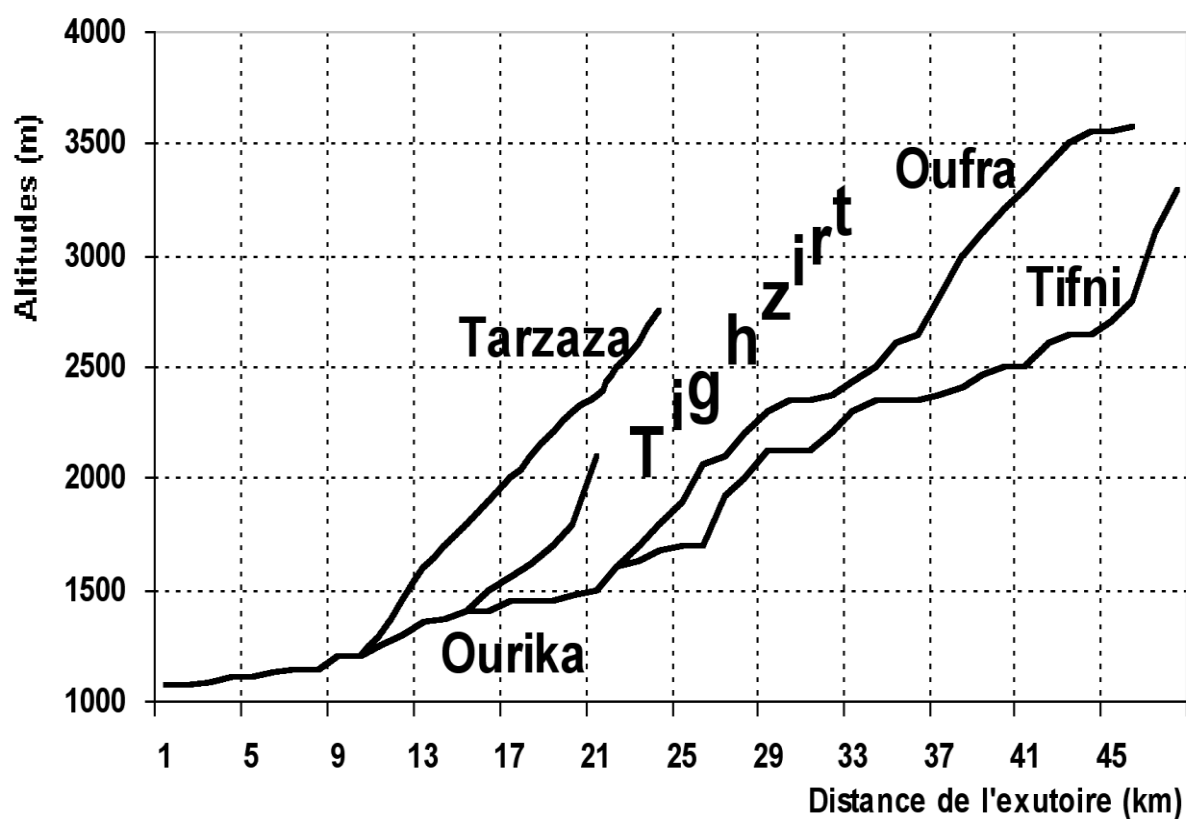


Figure 7 : Profils longitudinaux de l'Ourika et des principaux affluents (Saidi & al., 2010).

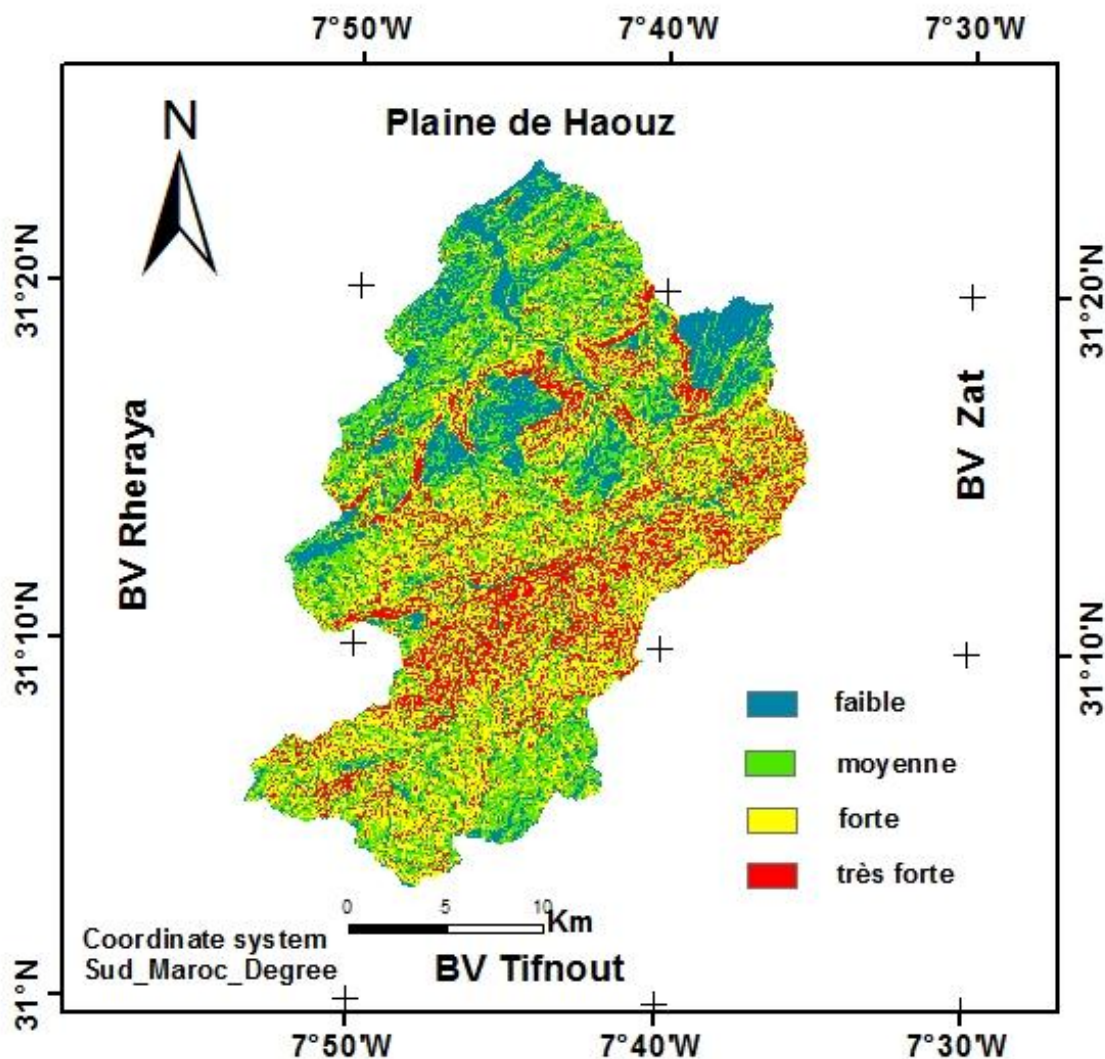


Figure 8 : Répartition des pentes dans le bassin versant de l'Ourika

4.4. Structure géologique du bassin versant de l'ourika

Le bassin versant d'Ourika se situe précisément sur le flanc nord de l'Atlas de Marrakech.

Il offre deux grands types de faciès (figure 3) :

- ❖ Un substrat rocheux dur (roche éruptives ou métamorphiques) située dans la partie amont du bassin versant à des altitudes supérieures à 2000 m et représentent environ 65% de l'étendue du bassin versat (Pascon, 1983 In Saidi & al., 2010) avec un fort coefficient de ruissellement.
- ❖ Un substrat tendre à moyennement tendre situé à des altitudes inférieures à 2000 m et composée de dépôts permo-triasique et quaternaires. Ses roches marneuses, argileuses et calcaires représentent une étendue inférieure à 35 % (Saidi & al., 2010).

Les ravins de la partie amont traversent un substrat rocheux non érodable (figure 9) caractérisé principalement par de faibles apports solides. Les eaux au moment des crues sont

claires et non chargées. Les ravins situés dans la partie centrale du BV sont par contre très vulnérables au phénomène d'érosion et charrient des apports solides et liquides importants.

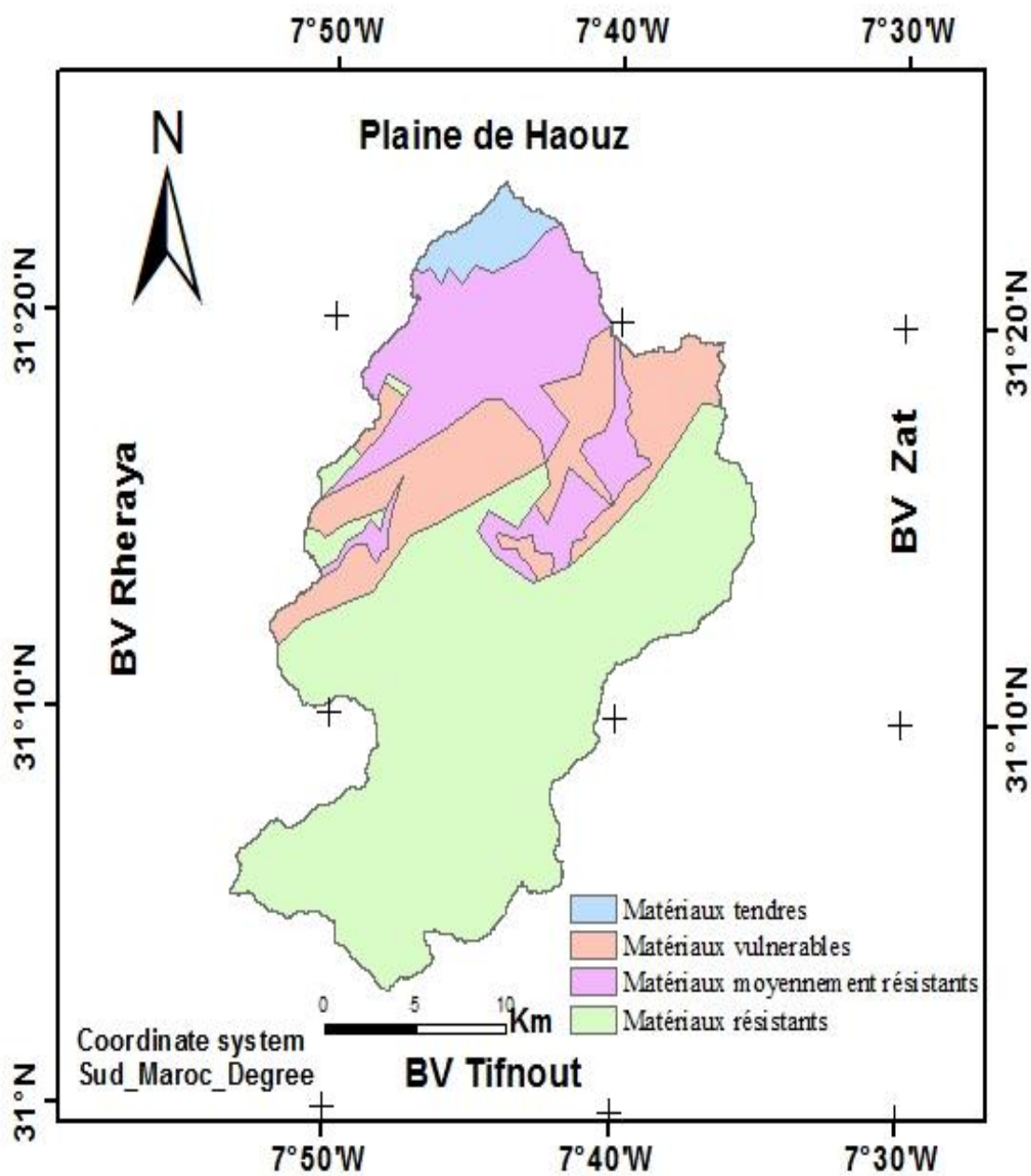


Figure 9 : Carte de friabilité du bassin versant de l'Oued Ourika (Anonyme, 2000)

4.5. Occupation des sols

Le sol est occupé de la façon suivante dans le bassin versant de l'Ourika (Rihane, 2015) :

- ◆ Les forêts représentent 31,41% de la superficie du bassin versant : on y retrouve les forêts denses (3,77%) composées essentiellement du chêne vert, du genévrier rouge, du lentisque, du thuya, de l'oléastre... ; les forêts moyennement denses (10,54%) de la même composition floristique ; les forêts claires (3,97%) et les forêts très claires (16,40 %) ;
- ◆ le sol nu, le matorral et les vides assylvatiques occupent environ 64,68% de la superficie du bassin versant ;
- ◆ les cultures en terrasses et arboriculture représentent 3,91 % de la superficie du bassin versant.

On remarque que le domaine forestier occupe une superficie assez importante dans le bassin versant, néanmoins son état est très dégradé et clairsemé sur une grande partie de sa superficie.

4.6. Données socio-économiques

4.6.1. Population

La population du bassin versant est estimée lors du recensement 2014 à 66306 habitants, répartie sur 12659 foyers, avec une densité de 115 habitants/Km² en considérant que la superficie du BV est de l'ordre de 576 Km². La majeure partie de la population vit de l'agriculture pratiquée au niveau de la vallée et sur des terrasses. 95% des exploitations ont une superficie inférieure à 5 ha. Les assolements sont dominés par les céréales à faible rendement (6 à 10 qx/ha pour l'orge et 10 à 18 qx/ha pour le maïs). Le maraîchage et l'arboriculture à base de noyer, pommier et cerisier qui sont relativement plus rentables restent cotonnés essentiellement dans des parcelles irriguées. L'élevage est de type extensif et le cheptel est constitué de caprins (17700) et d'ovins (19800) pâturant principalement en forêt (HCEFLCD, 2012).

D'une façon générale les conditions de vie de la population sont difficiles à cause du faible revenu généré par l'agriculture et l'élevage, de l'enclavement des douars et du manque des infrastructures et équipements sociaux.

Carte du réseau hydrographique et de l'occupation des sols 2014

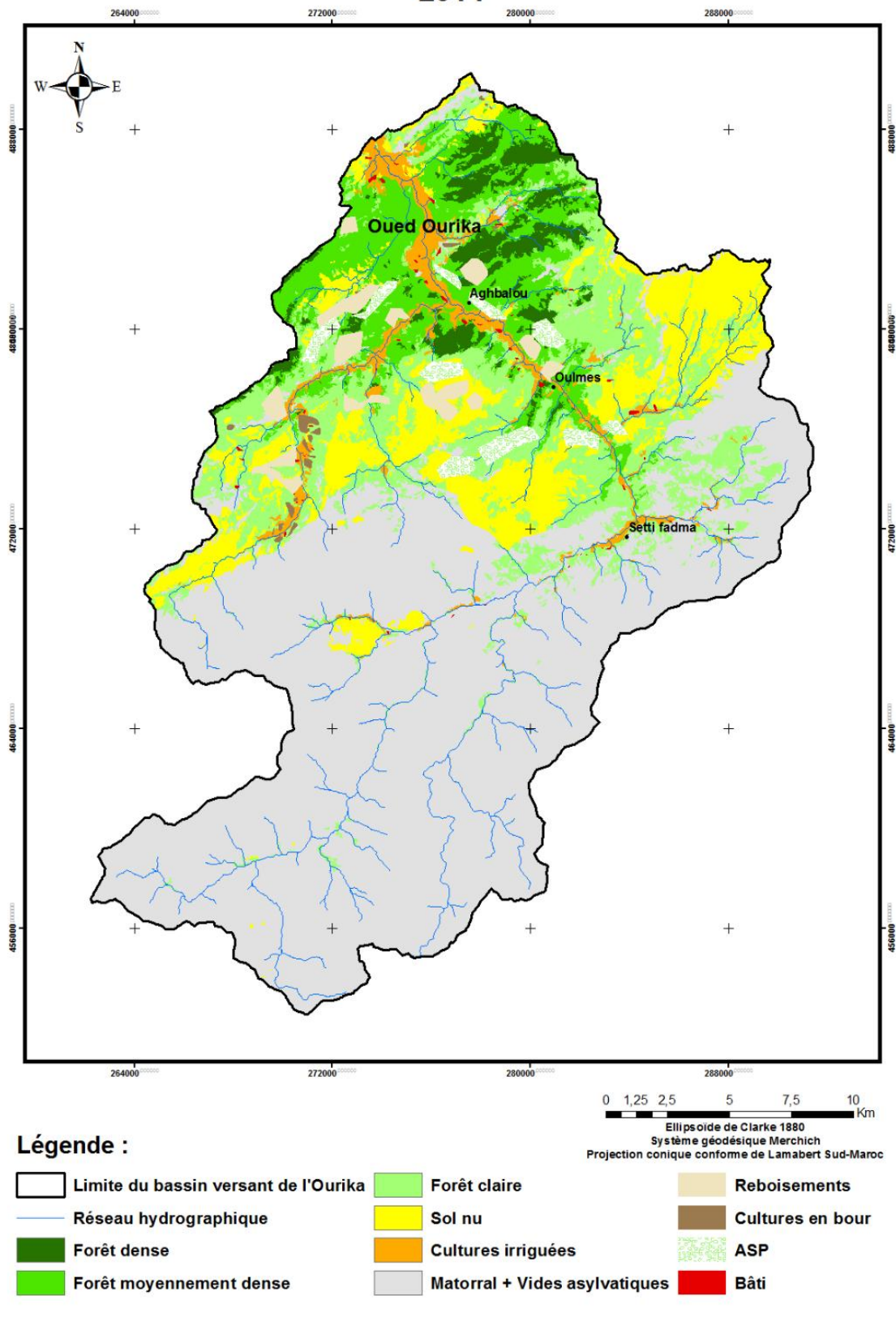


Figure 10 : Répartition de l'occupation du sol dans le bassin versant d'Ourika (Rihane, 2015)

4.6.2. Tourisme

La vallée de l'Ourika est un excellent site touristique situé à 35 km de Marrakech. Elle est très réputée, d'une part, pour ses paysages naturels uniques et parfois grandioses, par les reliefs, les encaissements des cours d'eau, les contrastes entre la couverture végétale des vallées et l'aspect minéral des sommets et les versants bien bâtis en séguias et terrasses de cultures et, d'autre part, pour sa fraîcheur en été (25 à 30°C contre 40°C à 47°C à Marrakech). La vallée connaît une affluence touristique importante surtout pendant la période estivale où l'on dénombre plus de 10 000 visiteurs par jour (HCEFLCD, 2012). Le tourisme de montagne connaît également du succès à travers la promotion des activités parmi lesquelles on peut citer l'animation et l'encadrement des randonneurs, des skieurs et des escaladeurs assurés par les guides de montagnes et les «tours opérateurs». Ce tourisme constitue une source de revenu pour une part importante des habitants de la vallée et des douars avoisinants et crée une activité économique dans la province d'Al Haouz.

4.7. Crues

La configuration morphologique et le milieu physique du bassin versant de l'Ourika offrent un environnement propice au développement de fortes crues. La zone d'Ourika pourrait être soumise, plusieurs fois par an, aux crues d'automne, d'hiver et de printemps, provoquées par les pluies et les fontes des neiges. Les crues brutales se produisent surtout en été, provoquant des débits brusques causant des dégâts importants. Les crues les plus importantes ont eu lieu en 1925, 1949, 1967, 1980, 1995 et 1999 (Doukkali, 2003). La plus catastrophique de ces crues a été celle d'août 1995 : l'intensité des précipitations a été estimée à 100 mm/h, sur une superficie de 228 km² en amont de Setti Fadma, alors qu'il n'y avait pas de pluies dans les zones aval. Le temps du trajet de la crue a été très court, estimé entre 30 et 60 min. La station d'Aghbalou a enregistré un débit de 1030 m³/s (Saidi & al., 2010). Ces débits de pointes correspondent aux débits maximaux annuels de périodes de retour de 30 et 100 ans respectivement (Doukkali, 2003).

Chapitre 5 : Nature et Importance des aménagements de lutte antiérosive réalisés dans le cadre de développement du bassin versant de l'Ourika

5.1. Introduction

La forêt de ce bassin versant n'a pas été fait l'objet d'un aménagement forestier au paravent, la superficie totale des périmètres de reboisement s'élevait à 2371 ha (tableau 3). Ce n'est qu'après la crue catastrophique de 1995 que la sécurisation de la vallée est devenue une priorité pour les pouvoirs publics. Ainsi pour laminier les écoulements dont les différents ravins qui sillonnent la vallée d'Ourika, un vaste programme de correction torrentielle a été entrepris dans le cadre du projet du développement du bassin versant d'Ourika. Il s'agit essentiellement, d'une part, du traitement mécanique des ravins qui visent la diminution des écoulements torrentiels par l'augmentation du temps de concentration des eaux procédant la correction des profils au long des ravins des réseaux hydrographique et, d'autre part, la reconstitution des essences naturelles et les reboisements de protection, à travers l'amélioration du couvert végétal favorisant également l'étalement des crues et l'augmentation du temps de concentration des ruissellements.

Tableau 3 : Situation de reboisement de la forêt d'Ourika avant l'aménagement 2005 (TTOBA, 2005)

Année	de	superficie (ha)	Essences plantées
1947		38	Pin d'Alep, Pin maritime, Feuillus
1949		6	
1950		26	
1959		18	
1963		49	amandier, olivier
1965		154	Pin d'Alep, Pin maritime, Feuillus, Cèdre
1966		66	
1968		477	amandier, olivier
1969		12	Cyprès de l'Atlas, Cyprès de l'Arizona,
1974		39	Pin d'Alep, Pin maritime, Feuillus, Cèdre
1975		224	
1998		712	
1999		200	
2000		200	
2001		150	Pin d'Alep
Total		2371	

5.2. Traitement mécanique des ravins

Les sous bassins du bassin versant de l'Ourika étant sensibles et ayant une forte capacité de drainage liquide et solide ont subi des traitements mécaniques d'un nombre total de 6866 seuils, soit environ un volume de 154689 m³ (tableau 4 et figure 11) depuis les impluviums en amont jusqu'à la confluence de l'oued Ourika en aval. Les réseaux hydrologiques dans ces sous bassins ont été traités en totalité. Dans les impluviums, les affluents secondaires et tertiaires qui alimentent les grands torrents ont été traités par des seuils en pierres sèches combinés le plus souvent avec des interventions biologiques. Au niveau des lits des torrents, il a été procédé à l'implantation de dispositifs de seuils en gabion et en maçonnerie cimentée de l'amont vers l'aval. Les seuils construits se concentrent dans les ravins qui confluent au niveau de la vallée directement sur des sites touristiques où se concentrent les habitations et les infrastructures touristiques et lors des crues ils déversent d'énormes quantités d'apports liquides et solides dans un laps de temps très court mettant ainsi en péril les visiteurs et les infrastructures existantes.

Tableau 4 : Nombre de seuils construits dans chaque sous bassin dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Oued Ourika

SBV	Nombre			Total
	Seuils en maçonnerie	Seuils en gabion	Pierres sèches	
Anamer	2	20	1171	1193
Ouigrane	10	12	516	538
AssifNouzrou		25	175	200
TiziAcheq	5	27	352	384
AssifNoussel	8	29	1209	1246
Asni	15	75	198	288
Tarzaza		20	88	108
Amlougui	17	81	1011	1109
Chiker	5	8	145	158
Tadrart		4	336	340
Anins	5	9	139	153
Tighezritze	13	58	1078	1149



Figure 11 : Répartition des seuils construits dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Oued Ourika (HCEFLCD, 2012)

4.3. Traitement biologique

Le bassin versant de l'Ourika, étant dans un état avancé de la dégradation des forêts et de la faiblesse de la couverture végétal, a subi également dans le cadre du projet de développement dudit bassin les traitements biologiques. Ces traitements ont consisté en trois types d'interventions (tableau 5 et figure 12): le reboisement, l'amélioration sylvo-pastorale et la régénération des forêts.

Les travaux de régénération ayant touchés environ 3000 ha ont pour but la reprise et la reconstitution de la végétation naturelle (la Thuriféraire, la Tetraclinaie, la Chênaie verte) par la mise en défens moyennant l'installation de clôtures et la régénération assistée par semis mais les travaux de reboisement et d'amélioration sylvo-pastorale qui ont touché environ 3670 ha ont pour objectifs non seulement la protection du sol contre l'érosion mais aussi la production du bois d'œuvre et la production fourragère pour le cheptel des riverains. Les essences plantées sont principalement des résineux (Cèdre et Pins) et les feuillus (Robinier et Cactus).

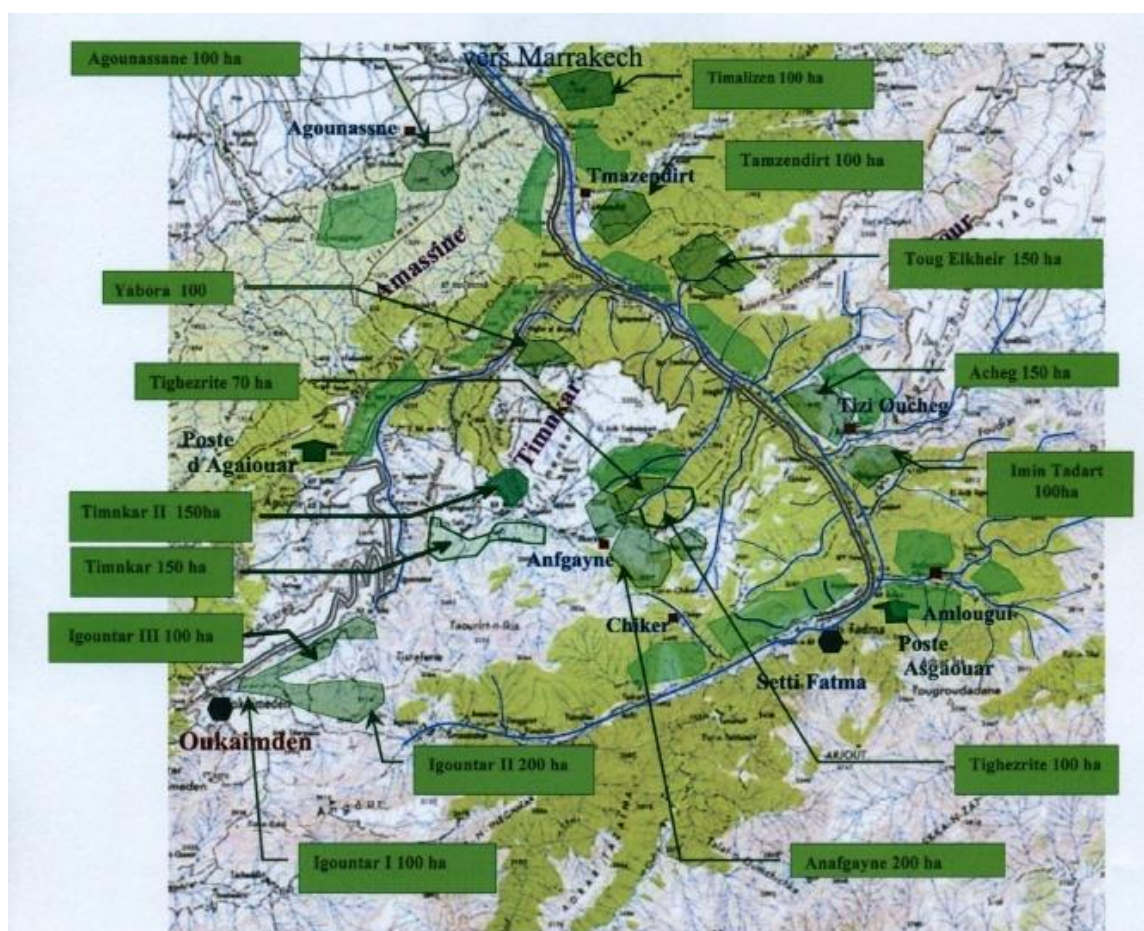


Figure 12 : Localisation des périmètres des reboisements réalisés dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Ourika

Tableau 5 : Situation de reboisement et de régénération dans le bassin d'Ourika pendant la période du projet développement du bassin versant

Reboisement			Régénération		
Perimètre	superficie	Espèces reboisées	périmètre	superficie	Espèces regenerée
Acheg	150	Pin d'Alep, Cyprès d'Atlas	Acheg	150	Chêne vert
IminTadart	100		IminTadart	100	
Anafgayne	200	Cèdre, pin maritime, Robinier	Magaste	80	Genévrier Thurifère
Igountar I	100		Ait	120	
Igountar II	200		Mechkour		
Igountar III	100		Tizrag	100	
yabora	100		Anefgain	150	
TimnkarII	150		Izma	200	
agounassane	100		Yabora sidi Ali	450	
Timalizen	100		Timnkar II	150	
Tamazdirt	100	Pin d'Alep, Cyprès d'Atlas	Timnkar	200	Genévrier Thurifère
Tougelkheir	150		Tourcht	100	
Tighezrite	170		Timichi	200	Genévrier Thurifère
			Tafza	400	
			Aghbalou	200	Chêne vert, Thuya, Genevrier rouge
			Amskrine	100	
			TougElkhie r	80	
Tamazdirt	100				

Chapitre 6 : méthodologie

6.1. Impact des aménagements sur les écoulements annuels du bassin versant de l'Ourika

L'impact des aménagements sur les écoulements annuels du bassin versant a été déterminé en appréhendant d'abord le comportement dudit bassin avant les aménagements par la modélisation de la pluie en débit (Lavabre & al., 1996). Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est utilisé pour ce travail. Le choix de ce modèle est basé sur le fait qu'il a une structure très simplifiée, ne demandant pas trop de données et il est facile à utiliser et à calibrer. Pour vérifier si le calage du modèle est bon, on a calculé le critère de Nash.

Une fois le modèle calé sur la période avant les aménagements, il a été utilisé pour reconstituer les débits qu'on aurait mesuré à l'exutoire du bassin après les aménagements si les aménagements n'avaient pas été réalisés. Enfin, on a comparé les débits simulés et les débits observés après les aménagement. Pour ce faire, l'erreur moyenne (em), l'erreur quadratique moyenne (EQM) (Boudhraa, 2007) et le supplément d'écoulement (Es) exprimé en pourcentage par rapport aux pluies annuelles (Lavabre & al., 1996) ont été calculés.

6.1.1. Description du modèle utilisé pour la simulation des débits (Perrin & al., 2007)

Le modèle GR1 (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue de l'utiliser pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La version utilisée dans la présente étude est celle présentée par Moulehi et al. (2006). Sa structure se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . La formule du modèle est la suivante :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Où :

Q_k : Débit simulé de l'année k

P_k : Pluie observée de l'année k

P_{k-1} : Pluie observée de l'année $k-1$

E_k : Evapotranspiration potentielle de l'année k

X : paramètre du modèle à optimiser

Le paramètre X du modèle à optimiser est un paramètre adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Il traduit en fait l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne (Perrin & al., 2007).

6.1.2. Données utilisées

◆ Données pluviométriques

Le bassin versant de l'Ourika a plusieurs stations pluviométriques. Les données pluviométriques des stations utilisées sont présentées dans le tableau 6. Pour mieux cerner le comportement pluviométrique du bassin, on a calculé la précipitation moyenne en se basant sur la méthode des polygones de Thiessen, qui consiste à découper le bassin versant en polygones centrés sur les stations pluviométriques, et à affecter à chaque polygone (exprimé en unité de surface) la valeur mesurée dans la station au centre (figure 13).

◆ Données hydrologiques

Les données hydrométriques utilisées sont fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift. Il s'agit des débits instantanés mesurés à la station d'Aghbalou N° IRE 2089/53, station de type principale, mise en service le 04/04/1969. Le calcul des débits se fait par la transformation du niveau d'eau lu sur l'échelle limnométrique par l'intermédiaire de courbes de tarages empiriques. Le choix de la courbe adaptée se fait par l'intermédiaire de jaugeages de contrôles effectués idéalement tout les mois ou après un épisode de crue.

La station ne dispose pas de mesure l'ETP, on a retenu alors celle du barrage LallaTakerkoust

Tableau 6 : quelques renseignements sur les stations pluviométriques utilisées

Nom du poste	Coordonnées			P(mm)	Source
	X	Y	Z		
Aghbalou	281062	479535	1050	1970 - 2013	ABHT
Oukaimeden	265011	470596	1165	1982 - 1996	météo. nation
Agaouiar	269883	478019	1700	1970 - 1996	EFCS
Agouns	271611	468404	2200	1996 - 2013	ABHT
Amenzal	278399	465849	2230	1996 - 2013	ABHT
Tizitount	282087	476636	1240	1998 - 2013	ABHT
Tourcht	286950	473006	1650	1996 - 2013	ABHT
Dar caidourika	273292	488751	900	1982 - 1996	EFCS

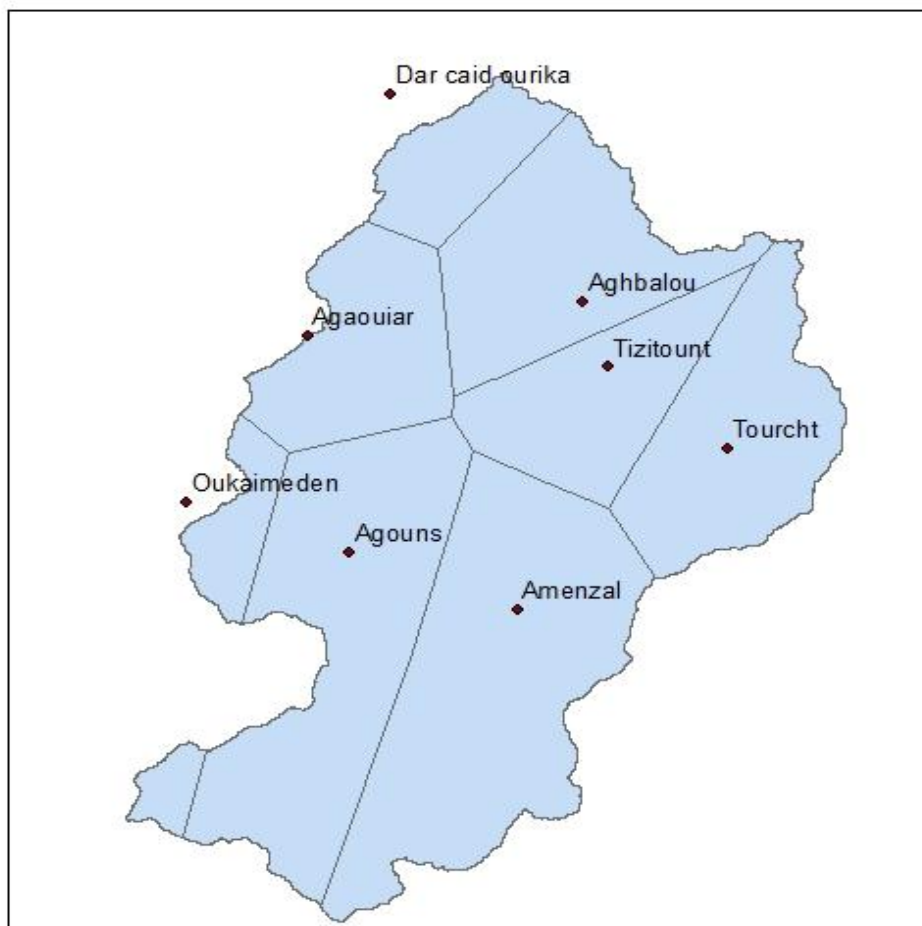


Figure 13: Identification des polygones de Thiessen sur le bassin versant de l'Ourika

6.2. Evaluation de l'efficacité des seuils

Pour évaluer l'efficacité des seuils, les sous bassins versants (SBV) prospectés ont été choisis en se basant d'abord sur la diversité des seuils c'est-à-dire dans lesquels on retrouve à la fois des seuils en maçonnerie, des seuils en gabion et des seuils en pierre sèche). Ensuite, en s'appuyant sur les caractéristiques morphométriques de l'ensemble des SBV traités (tableau 7), quatre ravins ont été choisis successivement de l'aval vers l'amont avec une alternance de la rive gauche et de la rive droite par rapport à l'Oued Ourika (figure 14). Au total 101 seuils de correction des ravines ont été prospectés et analysés dont 29 dans le SBV Anins, 17 dans le SBV Chicker, 25 dans le SBV Amlougui et 30 dans le SBV Tighzritze.

Tableau 7 : Caractéristiques morphométriques des SBV traités dans le cadre du projet de développements du BV Ourika. Les SBV étudiés dans la présente sont en gras.

SBV	Surface (Km ²)	Indice de compacité Gravilius (K _G)	Indice de compacité Horton (K _H)	Longueur du cours principal L (km)
Anins	10	1,28	1,56	2,5
Ait Amer	12	1,29	0,26	6,7
Tighzritze	12	1,38	0,66	5
Acheg	11	1,54	0,64	7
Wigrane	7	1,32	0,42	4
Assif Noussel	7	1,64	0,46	3,8
Assif Nouanzrou	6	1,38	1,02	2,5
Ait Lequaq	42	1,46	0,21	14
Igherman	2	1,51	0,86	2,3
Chicker	3	1,23	0,48	2,5
Amlougui	36	1,16	0,3	11

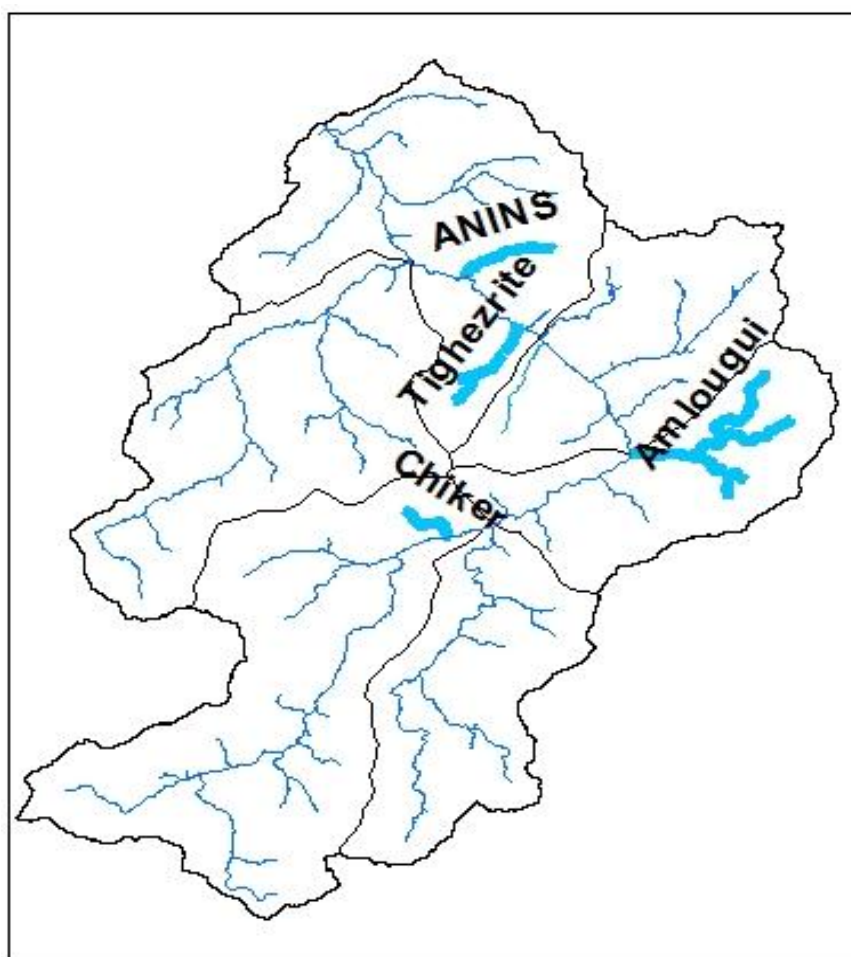


Figure 14 : répartition des ravins choisis dans le BV Ourika

6.2.1. Quantification des sédiments retenus par les seuils

Un ouvrage de correction efficace est celui qui joue son rôle correctement et répond aux objectifs pour lesquels il a été réalisé. L'un des objectifs de la construction d'un seuil est le stockage des sédiments. On s'est intéressé alors à estimer la quantité de sédiments retenus par les seuils étudiés pour déduire par la suite la dégradation spécifique et la quantité de sédiments perdus lorsqu'une partie du seuil est endommagé.

Pour ce faire on a d'abord établi une formule permettant d'estimer le volume des dépôts sédimentaires en assimilant les sédiments retenus par un seuil à la forme géométrique de la figure 15.

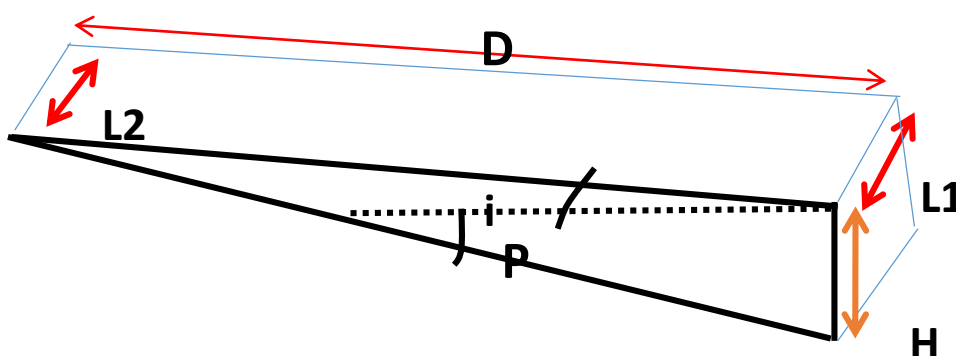


Figure 15 : Forme géométrique des sédiments retenus par un seuil

La formule ayant permis d'estimer le volume des sédiments est alors donné par :

$$V = (H * (H + D * \sin(i)) * (L1 + L2)) / (4 * \tan(P))$$

Où :

V : Volume des sédiments estimés (m³) ;

D: Longueur totale des sédiments (m) ;

H: Hauteur du seuil (m) ;

L1, L2 : Largeurs des sédiments atterris (m) ;

P : Pente initiale du ravin (en degrés) ;

i: Pente de compensation (en degrés).

NB : Veuillez convertir les angles en radians, au moyen de la fonction RADIANS du logiciel Excel au cas cette formule veut être utilisée dans le logiciel Excel car pour toutes les fonctions trigonométriques, Excel travaille en radians et non en degrés.

Au terrain, à l'aide d'un ruban, on a mesuré la longueur totale des dépôts sédimentaires, la largeur initiale et la largeur finale des dépôts sédimentaires et la hauteur du seuil. La pente

de compensation a déterminé à l'aide d'un clisimètre mais quant à la pente initiale du ravin, elle a été prise dans les fiches techniques élaborées lors de la construction des ouvrages.

Dans le cas où une partie du seuil est endommagé ou emporté par les crues, la longueur, la largeur et la hauteur des sédiments emportés ont été également mesurés.

6.2.2. Devenus des sédiments atterris derrière les seuils.

Cette étape a été réalisée par la lecture du paysage afin d'analyser dans quelles circonstances la végétation naturelle commence par s'installer sur les sédiments ou encore quelles stratégies utilisent les paysans pour exploiter ces dépôts pour des fins agricoles. Cette démarche est accompagnée de la réalisation de reportages photographiques.

6.3. Etude de l'état actuel des seuils (intensité et la nature des formes de dégradations de ces ouvrages) en relation avec les facteurs du milieu

Au niveau de chaque seuil, on note si le seuil est présent ou il a été emporté, si les ailes du seuil sont bien ancrées dans la roche mère, l'état du déversoir et du radier (état du seuil). Ensuite on a décrit le site en notant la nature du substrat, la taille des dépôts sédimentaires, la pente de compensation, le passage préférentiel des écoulements, la position des arbres ou arbustes par rapport au seuil, etc.

Partie 3 : Résultats et discussions

Chapitre 7: Impact des aménagements sur l'hydrologique du bassin versant de l'Ourika

7.1. Introduction

Dans les zones montagneuses fortement menacées par les phénomènes d'érosion hydrique comme le BV d'Ourika, les travaux de lutte antiérosive sont indispensables dans l'atténuation de la violence des fortes crues responsables de gros dommages en aval. Dans ce BV, compte tenu de son caractère agressif, les aménagements réalisés (végétalisation et correction des ravins) ont essentiellement pour but de freiner l'écoulement de surface et de réduire l'érosion hydrique. Pour s'assurer que les objectifs visés par ces aménagements ont été atteints, on cherche à déterminer par la présente étude l'impact des aménagements sur l'hydrologie du bassin versant. Ceci revient à comparer les paramètres hydrologiques du BV avant et après les aménagements afin de mettre en évidence les différences de comportement du BV en fonction des modifications effectuées sur les versants et dans le réseau hydrographique. Mais, comme la relation "pluie - débit" n'est facile à étudier que sur les BV de petite taille (ne dépassant pas 8 km²) (Bergaoui & Albergel, 2000), par quelle approche peut-on aborder cette étude dans le BV d'Ourika caractérisé par une superficie importante (plus de 500 km²) et une hétérogénéité spatiale des précipitations ?

7.2. Hydrologie du bassin versant de l'Ourika

7.2.1. Etude des précipitations

La pluviométrie est un facteur qui permet de caractériser le climat d'une région par la quantité annuelle d'eau recueillie et par leur répartition dans l'année. Dans le bassin versant de l'Ourika, durant la période d'étude, les précipitations annuelles sont très variables d'une année à l'autre avec un coefficient de variation qui est compris entre 31% et 42% (tableau 8). De même ses précipitations ne sont pas réparties de la même façon sur tout le bassin versant. La plus grande quantité des précipitations de la zone est enregistrée au niveau de la station d'Aghbalou, soit 532 mm d'eau par an. Alors que la faible quantité de précipitations provient de la station d'Agouns qui enregistre en moyenne 341 mm/an. L'effet de l'altitude sur la pluviométrie n'est pas prononcé (figure 16). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les précipitations prennent une forme neigeuse quand on évolue en altitude et qui ne sont pas comptabilisées comme précipitations liquides.

Tableau 8 : les pluviométries moyennes annuelles des différentes stations utilisées

Stations	Pluie moyenne annuelle (mm)	Ecart type (mm)	Coefficient de variation (%)
Aghbalou	532	165	31
Oukaimeden	475	151	32
Agaouiar	531	222	42
Agouns	341	129	38
Amenzal	366	110	30
Tizitount	480	141	29
Tourcht	405	120	30
Dar caïd ourika	374	125	33

La précipitation moyenne interannuelle calculée pour le BV durant la période d'étude est d'environ 500 mm. On a observé deux périodes sèches, une première de 1979/80 à 1985/86 et une deuxième de la fin de 1991/92 à 2007/08. La deuxième période de sécheresse, qui étant la plus longue, a atteint un minimum pluviométrique de 324 mm (1998/99), à partir duquel, les précipitations ont commencé par augmenter progressivement jusqu'à un maximum de 508 mm (2008/09) (figure 17).

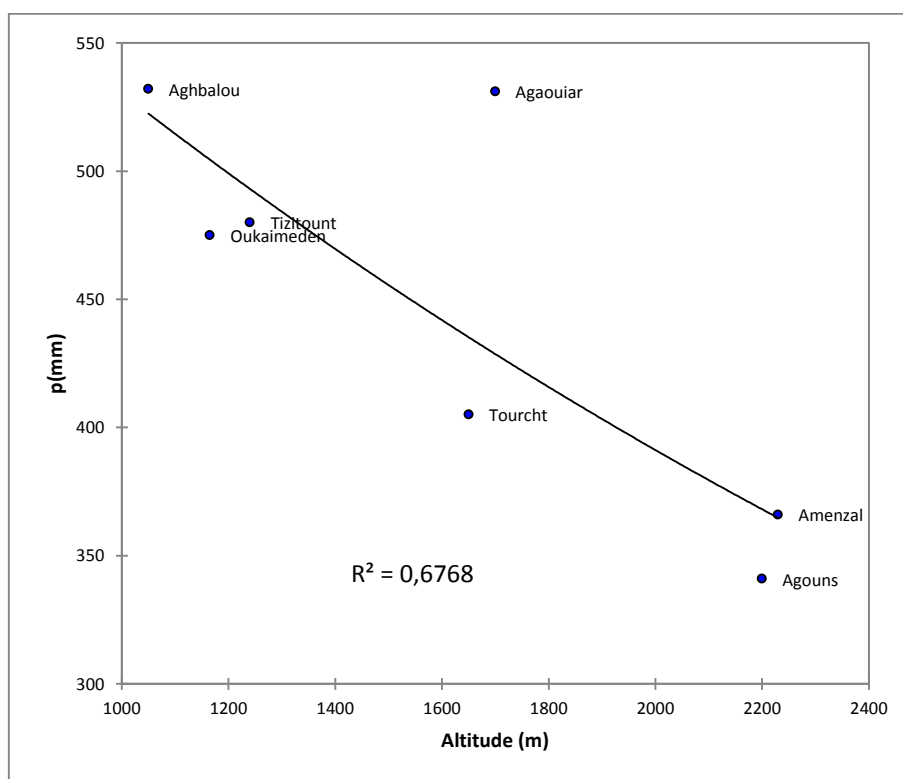


Figure 16 : Représentation des pluies moyennes annuelles en fonctions de l'altitude

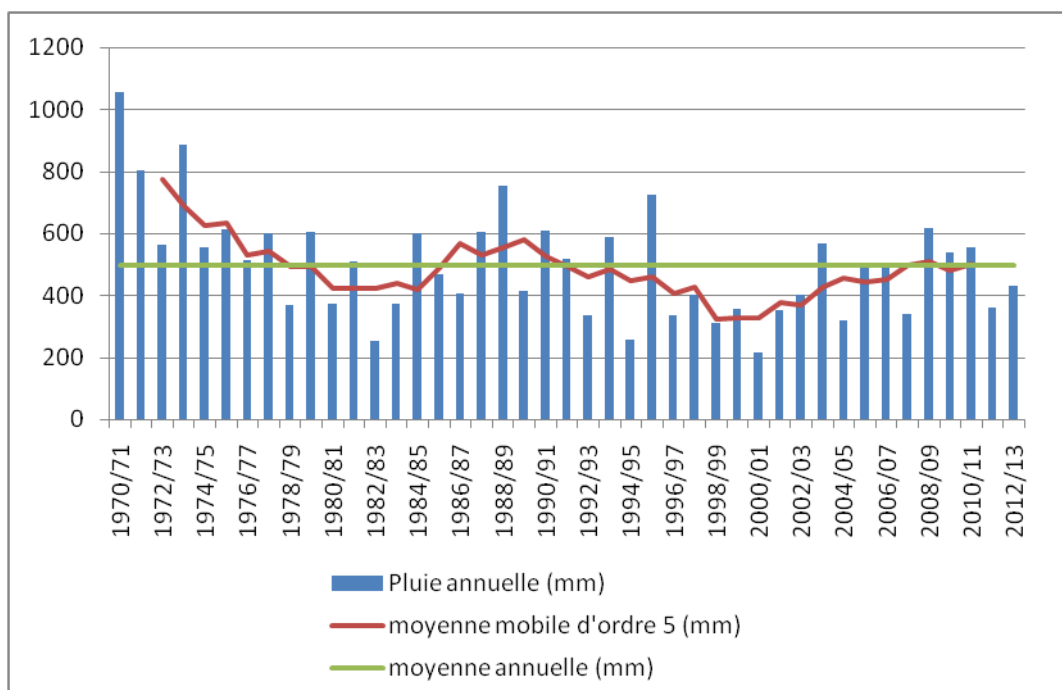


Figure 17: Variation des précipitations du bassin versant de l'Ourika (1970/71 – 2012/13)

7.2. Etude de la lame d'eau ruisselée

Durant la période d'étude, il apparaît que la variation interannuelle des lames d'eau écoulées suit celle des précipitations. L'écoulement minimal est observé en 2000/01, l'année pendant laquelle la précipitation annuelle aussi a atteint son minimale. Ce pendant on remarque que ce bassin versant a connu des périodes exceptionnelles où la lame d'eau ruisselée annuellement dépassent largement les précipitations annuelles. Il s'agit des années 1979/80, 1989/90, 1990/91, 1991/92 (figure 18). Ces quatre années ont en commun des écoulements printaniers (Mars, Avril et Mai) très forts qui dépassent considérablement ceux des autres années malgré qu'il n'y'a pas eu de grandes différences entres les précipitations printanières (tableau 9).

Tableau 9 : Ecoulements printaniers et pluies printanières des 4 années exceptionnelles et la moyenne du bassin versant de 1970 à 2013

Période	Écoulement printanier (mm)	Pluie printanière (mm)
1979/80	713	237
1989/90	566	124
1990/91	754	323
1991/92	815	202
Moyenne de 1970 à 2013	167	209

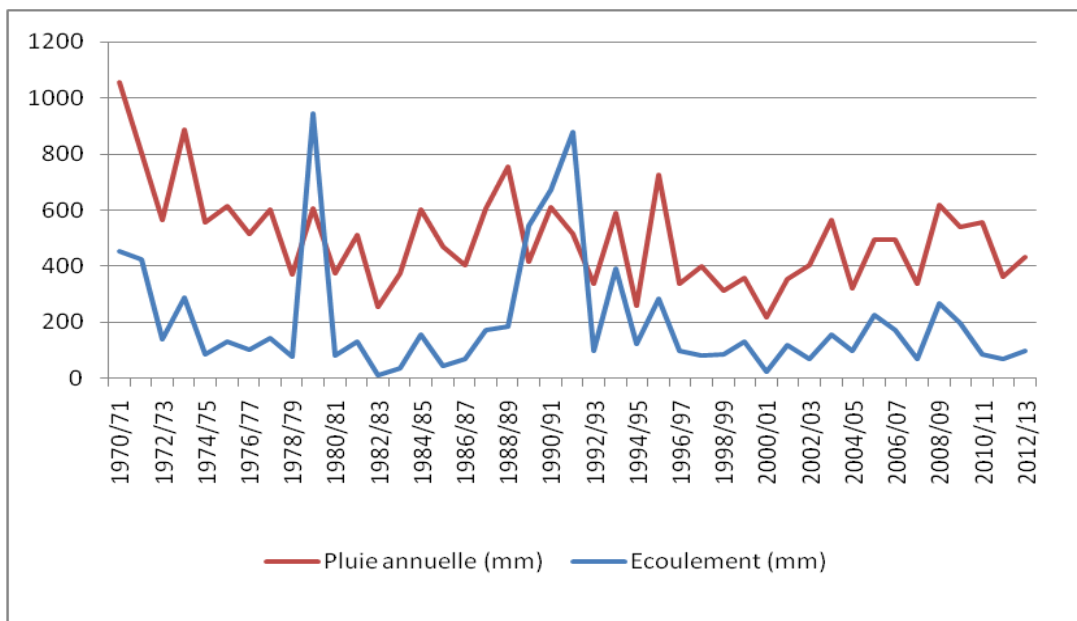


Figure 18 : Variation des précipitations et des lames d'eau ruisselées dans le bassin versant de l'Ourika (1970/71 – 2012/13)

L'analyse de la figure 19 montre que le régime pluviométrique annuel du bassin versant de l'Ourika est très irrégulier d'une année à l'autre. La répartition de la lame

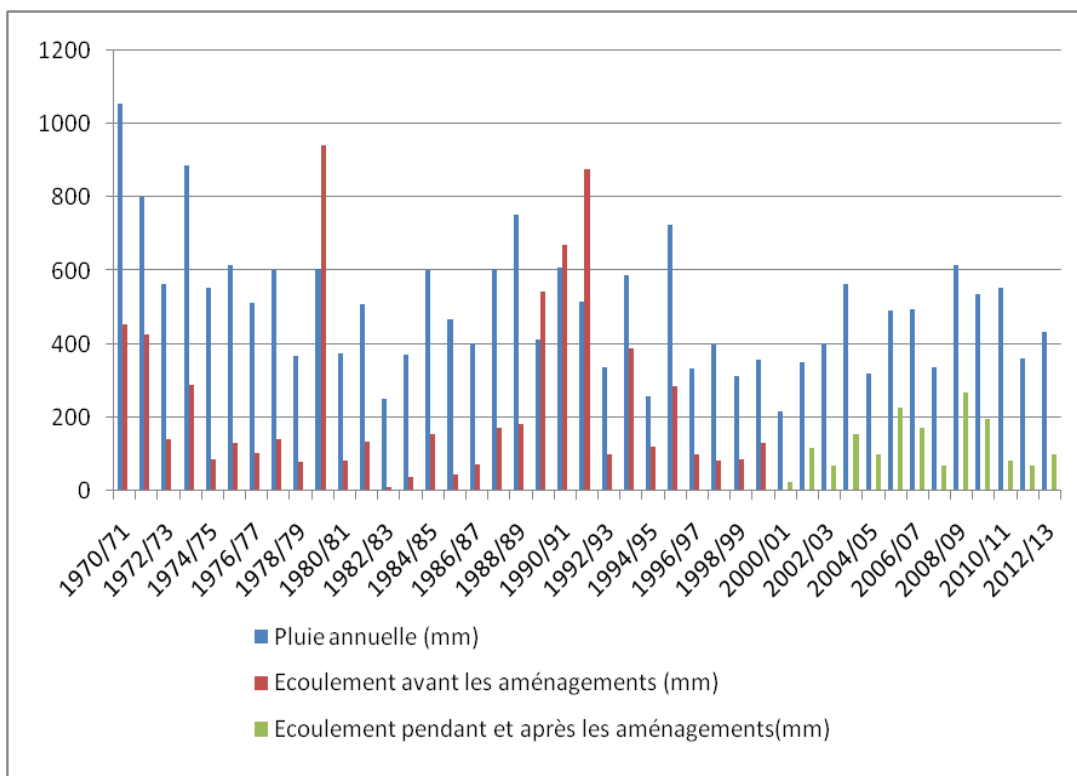


Figure 19: Pluviométrie et lames d'eau écoulées annuelles dans le bassin d'oued Ourika (1970/71–2012/13)

Ruisselée, année par année, est aussi très variable. On n'arrive pas à savoir si les lames ruisselées annuellement montrent une différence entre les périodes avant ou après l'aménagement. La variabilité climatique paraît dominer sur l'effet de l'aménagement. Andréassian (2002) avait déjà fait ressortir l'influence de la variabilité climatique sur la quantification de façon précise des effets hydrologiques d'une modification de l'occupation du sol. Donc, pour mieux cerner la problématique de ce genre, il s'avère important d'utiliser d'autres approches telles que l'étude de la relation pluie débit ou la modélisation pluie débit.

7.3. Etude du comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika avant les aménagements

Le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika a été étudié sur la période de 1970 à 2010. L'ajustement du nuage de points sur l'ensemble de la période a montré que la relation existante entre les lames ruisselées annuellement et les pluies annuelles est faible ($R^2 = 0,35$) (figure 20). Mais, lorsqu'on subdivise cette période en quatre parties et on étudie la relation pluie – débit sur chacune des parties, on constate qu'en réalité la relation pluie – débit est importante ($R^2 \geq 0,80$) (Annexe1). La superposition des ajustements du nuage de points des quatre parties nous a permis de déduire que le BV a subi deux changements importants, la première à partir de 1989 et la deuxième à partir de 2000 (figure 21).

Le modèle Génie Rural GR1A a été utilisée pour prédire les écoulements annuels qu'aurait eu le bassin versant de l'Ourika pendant ces périodes si ces modifications n'avaient pas eu lieu. Le modèle a été calé sur la période 1970- 1988. Les résultats de calage sont bons : le Nash trouvé est supérieur à 70% (NASH = 85,6%), le coefficient de détermination de la régression linéaire établie entre les écoulements estimés et ceux observés est important ($R^2 = 0,91$) (figure 23) et la superposition des deux graphes, des débits simulés et calculés (Figure 22), indique également un bon calage du modèle. De ce qui précède, la simulation du modèle est donc acceptable.

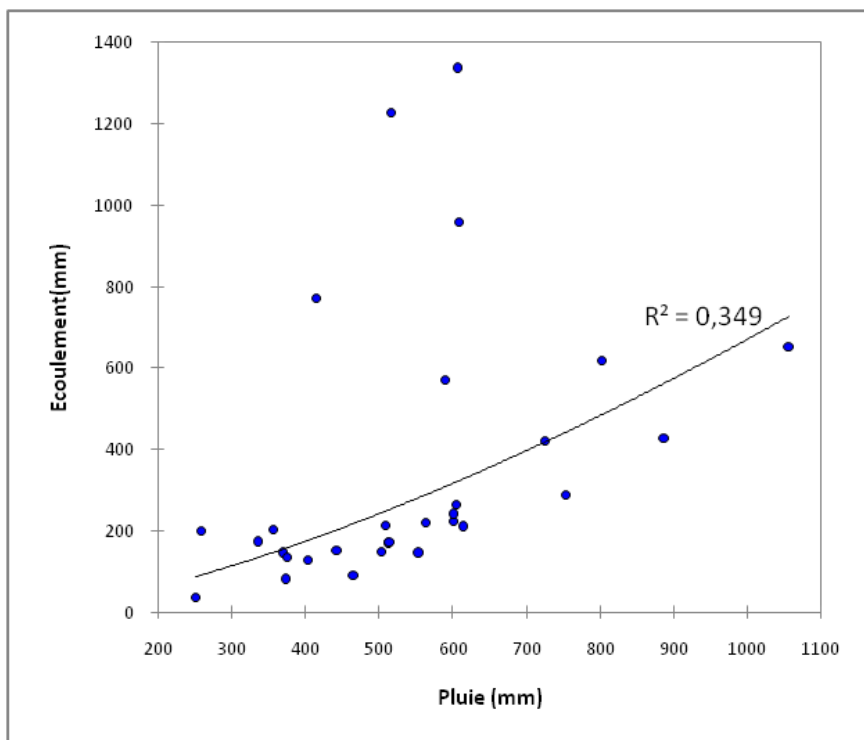


Figure 20 : Distribution des lames d'eau ruisselées en fonction de la pluviométrie annuelle avant les aménagements (1970 – 2000)

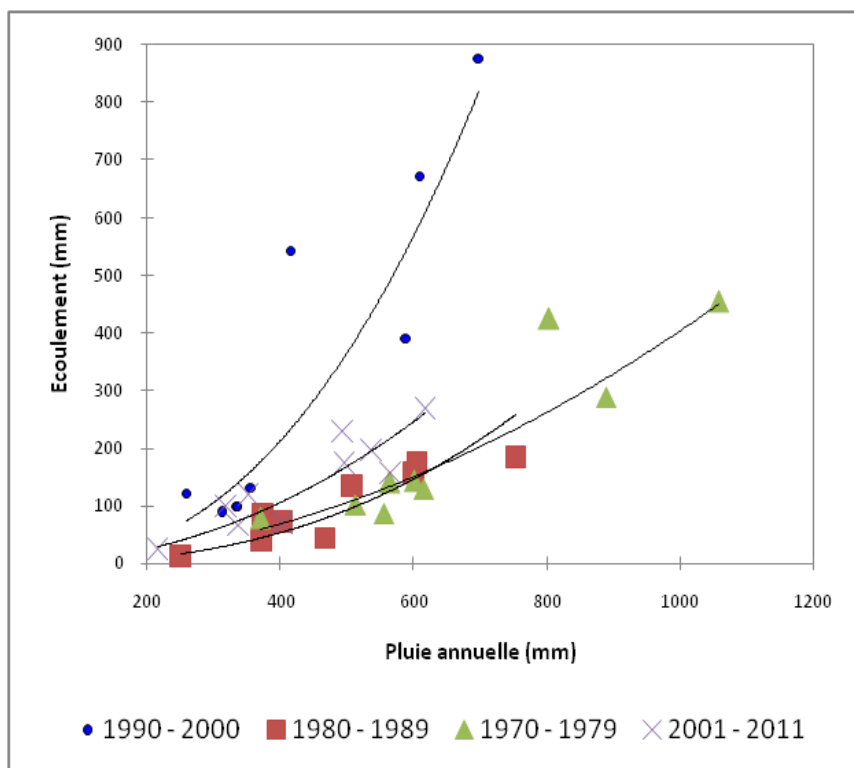


Figure 21 : Distribution des lames d'eau ruisselées en fonction de la pluviométrie. Superposition des trois courbes de la période avant les aménagements (1970- 2000) et la courbe de la période après les aménagements (2001- 2011)

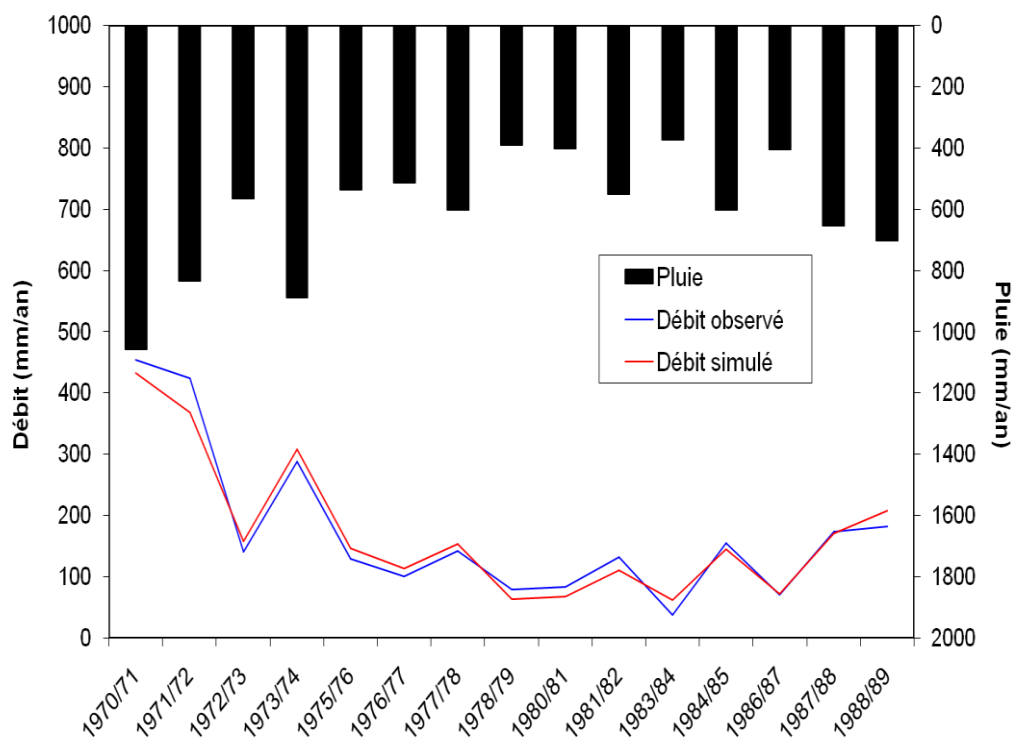


Figure 22 : Visualisation de la qualité du calage avant les aménagements (1970 -1989)

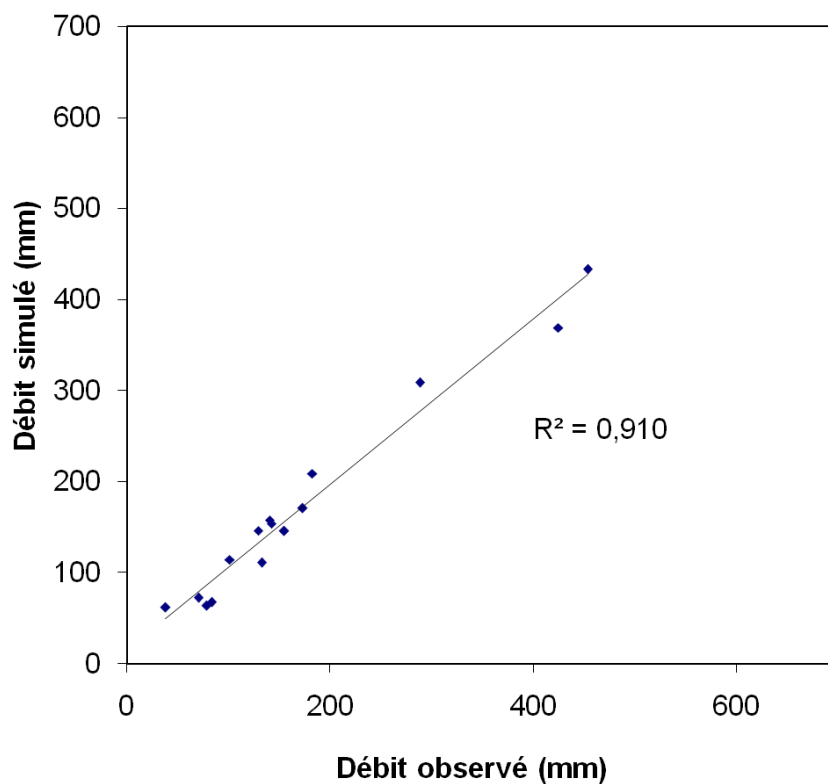


Figure 23 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés (1970 -1989)

7.4. Effet des modifications sur l'écoulement du Bassin versant

Pour mettre en évidence l'effet des modifications sur les écoulements annuels de ce bassin versant, le modèle calé sur la période 1970 – 1988, avec ces paramétrisations est utilisé pour simuler les écoulements des années de la période des modifications. Les données relatives aux années exceptionnelles (1990, 1991, 1992) où les écoulements annuels dépassent les précipitations annuelles ne sont pas utilisées lors de la simulation. Les débits simulés sont comparés aux débits observés. Les résultats trouvés indiquent que les débits observés dépassent largement les débits simulés. Les erreurs moyenne (Em) et quadratique (EQM) des périodes 1990 – 2000 et 2001 – 2010 sont très importantes et dépassent largement celles calculées pour la période 1970 – 1989 prise comme référence (tableau 10). Cependant les erreurs de la période 2001 – 2010 sont faibles par rapport à celles de la période 1990 – 2000.

Tableau 10 : Résultat des comparaisons entre les débits simulés et les débits observés des différentes périodes

Période	Em (mm)	EQM (mm)	Es (%)
1970 - 1988	-0,8	2,8	3
1989 - 2000	-103,71	126,85	27
2001 - 2010	-65,67	77,98	15

L'analyse des suppléments d'écoulement (Es) a montré que les modifications de la période 1989 – 2000 ont entraîné une augmentation des écoulements annuels d'environ 24% de la pluie annuelle. Certains auteurs ont montré que la réduction de la forêt peut entraîner une augmentation de l'écoulement dans un BV (Lavabre, 1996 ; Andréassian, 2002). Mais, les aménagements entrepris sur ce BV à partir des années 2000 ont réduit ces écoulements annuels de 12% de la pluie annuelle. Ceci nous a confirmé le rôle des travaux de lutte antiérosive dans l'amélioration du coefficient d'infiltration d'un bassin versant.

7.5. Conclusion

L'approche basée sur la modélisation de la relation pluie-débit a permis de mieux comprendre l'influence des utilisations des terres sur l'écoulement du bassin versant de l'Ourika. Les aménagements de lutte antiérosive réalisés, par l'amélioration du coefficient de ruissellement du bassin versant, ont joué un rôle important dans la réduction de l'agressivité des crues qui sont fréquentes dans cette région. Néanmoins, on se demande si l'efficacité de ces travaux est optimale. En effet on remarque par endroits que la qualité du couvert végétal de certains reboisements réalisés dans le cadre du projet (annexe 2) n'est

pas aussi meilleure pour protéger les versants contre les impacts des gouttes de pluies ni pour limiter d'une façon importante le phénomène de ruissellement. De plus les espèces plantées n'ont pas produits assez de matières organiques, lesquelles sont capitales pour lutter contre les pertes en terre. En général il est recommandé de reboiser les espèces ayant un port qui leur permettent une bonne interception et une couverture efficace du sol (Lopez Cadenas, 1992).

Chapitre 8 : Efficacité des ouvrages de consolidations dans la réduction de la violence des crues de l'Ourika

8.1. Introduction

Situé dans le haut Atlas Marocain, le bassin versant de l'Ourika n'est pas épargné des phénomènes torrentiels menaçant les estivants de la vallée, la population locale et leurs biens. La dangerosité de ces catastrophes résulte de leur soudaineté et leur rapidité ne laissant pas beaucoup de temps aux sauveteurs pour réagir (HCEFLCD, 2012). Lors de ces événements extrêmes, les ravins de l'oued Ourika déversent dans un bout de temps une quantité importante de sédiments mettant en péril les infrastructures en aval. Pour faire face à ces crues, le département des Eaux et Forêts a réalisé des aménagements de lutte antiérosive et notamment les travaux de correction torrentielle.

La technique de correction torrentielle a été révélée efficace pour la lutte contre le ravinement (Sajid & Ljouad, 2000) et la protection contre les risques de crues (Bergaoui & Camus, 1995). Cependant dans certains cas, cette technique peut ne pas donner une grande satisfaction s'il y a des lacunes dans les techniques et les démarches entreprises lors de la réalisation des travaux (Benchad, 1999 ; Zobiri, 2009).

Implantés depuis 2002/2003, quel serait l'impact des ouvrages de consolidation sur la dynamique du ravinement dans le bassin versant de l'oued Ourika? L'état actuel de ces ouvrages leur permettrait-il de jouer pleinement leur rôle ?

8.2. Etats des ravins après les travaux de correction torrentielle

Dans les SBV étudiés, le lit des oueds est transformé en un grand escalier dans lequel se succèdent plusieurs seuils. Grâce à la présence de ces barrages d'écrêtage, les caractéristiques des ravins ont complètement changé et on a assisté à un arrêt du creusement, un atterrissement des sédiments entraînés par le courant d'eau au moment des crues, une modification du profil en long des ravins et une correction de la pente initiale du cours d'eau principal.

Les ravins de l'oued Ourika sont tellement actifs en termes de production des sédiments que la majorité des seuils sont déjà remplis complètement de sédiments (photo 1) depuis les deux premières années de leur construction.

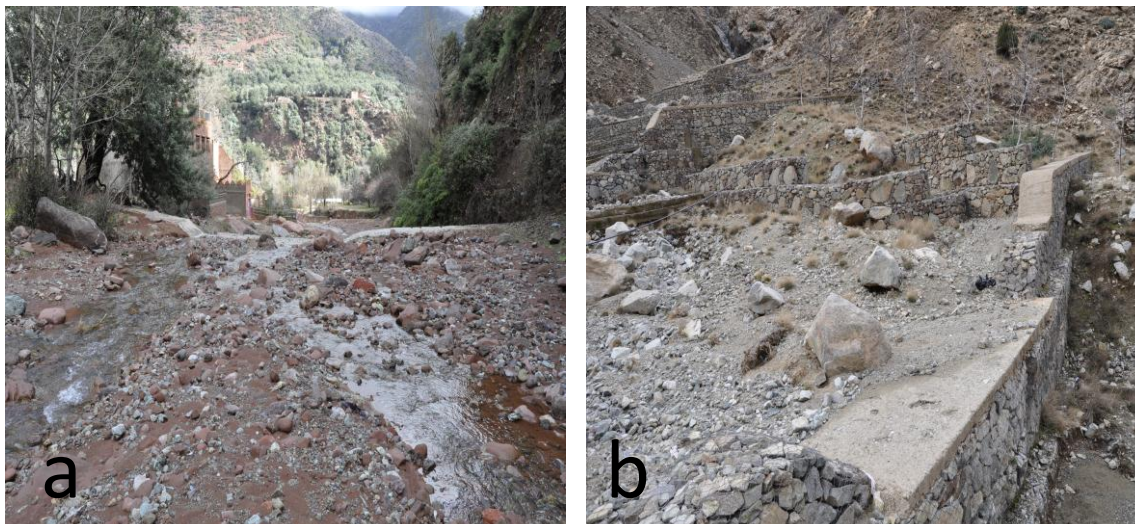


Photo 1 : Accumulation des sédiments derrière les seuils; a : seuil en maçonnerie à Tighzritze, b : seuil en gabion à Amlougui

Pour juger l'efficacité de ces ouvrages avec une analyse coûts-gains, l'estimation du volume des atterrissements provoqués par les seuils semble nécessaire. Après quantification des atterrissements, on remarque qu'à l'exception des seuils en pierre sèches, plus le volume d'un seuil est important, plus la quantité de sédiments retenue par un mètre cube de cet ouvrage est aussi importante (Annexe 3). On en déduit que les ouvrages de grande taille sont plus efficace en terme de stockage des sédiments. Mais, si cette relation n'est pas observée au niveau des seuils en pierre sèches, ceci est, probablement, dû à une forte hétérogénéité des pentes des ravins tertiaires et secondaires d'un SBV à un autre. En effet pour une même hauteur des seuils, plus la pente initiale du ravin est forte, plus la distance entre les seuils est petite (Blali, 2011) et, par conséquent, la quantité de sédiments retenue le seuil est faible. Si nous examinons le tableau 11 on perçoit que bien que le volume moyen des seuils en pierre sèche de Chiker est important, ils n'ont retenus que peu de sédiments. Ces résultats trouvés sont en conformité avec le caractère abrupt des pentes observé dans ce SBV.

En moyenne pour les quatre SBV étudiés, un mètre cube de gabion retient la même quantité de sédiment (6 m^3) qu'un mètre cube de seuil en maçonnerie. Par contre un mètre cube de seuil en pierre sèche en retient seulement 3 m^3 (tableau 11). Sachant que tous les seuils sont remplis environ deux ans après leur construction, si on multiplie la quantité de sédiments retenue par un mètre cube de chaque ouvrage par leur volume total correspondant, on trouve que le système de correction torrentielle a retenu environ $6,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$. Selon Athy (1930) la densité des sédiments constitués des particules grossières est comprise entre $1,5 \text{ t}/\text{m}^3$ et $1,7 \text{ t}/\text{m}^3$. Comme à Ourika les sédiments contiennent une quantité importante des particules de grande taille ; on retient alors $1,7 \text{ t}/\text{m}^3$ comme la densité des sédiments. En ce qui concerne

la capacité de piégeage des seuils, elle a été estimée à 72% (Serrat & al., 2001). En tenant compte de ces paramètres évoqués ci-dessus, on estime la dégradation spécifique à Ourika de 15 t/ha/an. Dans ce BV, les superficies exposées à une forte et très forte érosion sont importantes et représentent 65% et celles à érosion moyenne représentent 33% . Ceci justifie la forte valeur obtenue pour la dégradation spécifique qui dépasse largement le seuil de tolérance de la perte en sol dans le Haut Atlas Marocain qui est de 7 t/ha/an (Yjjou & al., 2014).

Tableau 11 : le volume moyen de chaque seuil et la quantité de sédiments retenue par un mètre cube des ouvrages dans les différents SBV

SBV	Seuil en maçonnerie		Seuil en gabion		Seuil en pierre sèche	
	Vms (m ³)	Vat (m ³)	Vms (m ³)	Vat (m ³)	Vms (m ³)	Vat (m ³)
ANINS	190,7	6	117,93	10	14,4	3
TIGHZRITZE	398,53	10	100,75	8	12,29	4
CHIKER	99,87	2	64,26	3	15,16	2
AMLOUGUI	157,74	6	90	5	20,04	3
Moyenne		6		6		3

En considérant les coûts de réalisation d'une unité (m³) de ces ouvrages qui varient en général en fonction de la disponibilité des matériaux de construction et de l'accessibilité aux lieux de construction et qui sont en moyenne de 70 à 100 Dh, 250 à 350 Dh et 400 à 600 Dh selon qu'il s'agit, respectivement, des seuils en pierres sèches, des seuils en gabion et des seuils en maçonneries on peut conclure que le coût déployé pour stocker les mêmes quantités de sédiments devient de plus en plus cher dans les ravins à forte pente. Par exemple, avec au plus 600 Dh, on peut stocker jusqu'à 10 m³ de sédiments à Tighzritze par contre à Chiker on ne peut stocker que 2 m³.

Dans les SBV explorés, bien que les ravins soient devenus stables suite à l'implantation des seuils, cette situation ne peut être durable que si les ouvrages implantés restent en permanence stables. En effet nous avons constatés que la destruction d'une partie d'un ouvrage entraîne le départ d'une quantité importante de sédiments qu'avait retenu ce seuil et remet en cause ainsi la stabilité du ravin et celle des berges (photo 2). La quantité de sédiments perdue est estimée, respectivement, en moyenne à 42% et 56% lorsqu'il s'agit d'une destruction au niveau du déversoir ou de la destruction de la moitié du seuil.



Photo 2 : Etat des dépôts sédimentaires en relation avec l'état des seuils. a : seuil en bon état ; b : seuil en destruction

8.3. Rôle des sédiments atterris après la mise en place des ouvrages de protection

Dans le bassin versant de l'Ourika, les atterrissements des seuils sont devenus un support pour la mise en place de la végétation et en contrepartie les végétaux assurent leurs fixations. Cette situation réduit la mobilité des dépôts sédimentaires due à la force de traction des eaux au moment des crues et garantit ainsi leur stabilité (Lilin & Koohafkan, 1987). Les espèces rencontrées sur ces sédiments ont varié d'un ravin à un autre selon les conditions du milieu. Dans les ravins Anins et Tighzrite où l'humidité du sol est importante on a trouvé le Laurier Rose, les peupliers, les bambous et quelques pieds de Tamarix et du genévrier rouge. Par contre dans certains affluents d'Amlougui où le sol est relativement sec, les sédiments sont fixés par les plantes aromatiques telles que le Thym et dans le ravin Chiker situé plus en altitude par rapports aux autres où il y'a plus de froid et moins d'humidité on a retrouvé carrément les xérophytes épineuses.

Bien que les végétaux jouent un rôle important dans la fixation des sédiments, dans le cas où ils sont mal repartis dans le lit d'un oued (photo 3), ils accélèrent au contraire l'érosion hydrique et c'est ce qu'on finira par observer dans certains ravins de l'oued Ourika si les entretiens ne sont pas faits. En effet dans le ravin Tighzritze on a observé les peupliers dans le lit mineur de l'oued et parfois au niveau du déversoir des seuils, de même à Anins dans certains affluents on a observé des peuplements denses de Laurier dans le lit mineur de l'oued. Cette situation accentuera la pression de l'eau au niveau de ces ravins lors des crues et les processus de transport des sédiments seront accentués. Pour mieux comprendre ce phénomène, imaginons un peu comment se comporte l'eau dans un tuyau au fur et à mesure qu'on diminue le diamètre de ce dernier, c'est exactement la même chose qui s'observe quand l'eau traverse les arbres alignés transversalement dans le fond de lit, donc plus l'espacement entre ses arbres est petite, plus la pression devient importante. C'est pourquoi il a été recommandé de stabiliser les sédiments arrêtés par les seuils avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres au niveau des berges (Roose, 1994).

Du moment où ses seuils créent par leur atterrissement un milieu favorable à l'installation des plants, dans certains endroits où les phénomènes torrentiels sont devenus peu importants et les berges sont devenues plus stables, ces atterrissements ont été mis en valeur par les paysans.



Photo 3 : végétalisation des ravins après les travaux de correction torrentielle ; a : lit mineur d'un affluent de l'oued Anins occupé par le laurier rose ; b : une partie du déversoir d'un seuil en maçonnerie de Tighzritze bloquée par le peuplier.

Plusieurs terrasses fruitières et agricoles ont été installées (photo 4). Ceci constitue une source de revenu supplémentaire pour les paysans et donc une amélioration de leur situation économique. Certaines techniques ont été développées par ces paysans pour améliorer le potentiel productif de ces champs de culture installés sur les dépôts de taille métrique. Nos observations sur le terrain et particulièrement dans le SBV Anins ont permis de constater que pour mettre en place leurs terrasses, les paysans commencent par ramasser les grosses pierres et les branches et les disposent pour délimiter et fixer le bord des terrasses (annexe 4). Ensuite, ils mettent en place une seguia à travers laquelle ils font passer l'eau de l'Oued vers la terrasse (annexe 5). Plusieurs barrières constituées de blocs sont disposés ensuite perpendiculairement au sens de l'écoulement de la seguia (annexe 6). Ainsi lors du passage de l'eau, les matériaux solides d'un calibre supérieur à l'espacement compris entre les blocs des barrières ne peuvent pas passer mais les limons et les matériaux d'un calibre inférieur à cet espacement s'infiltrent et se déposent sur la terrasse. Enfin on obtient une terrasse de sédimentation qui est de plus en plus enrichie par ses fines particules qui augmentent le potentiel productif de ces terrasses. Mais, quand les terrasses sont prêtes pour être exploitées, on ferme la seguia pour éviter le passage de l'eau et réduire tout risque de destruction des cultures.



Photo 4 : Mise en valeur agricole des atterrissements d'un seuil en maçonnerie à Tighzritze

8.4. Etat actuel des ouvrages et capacité de gestion des risques de crues.

Dans le cadre de la gestion des crues torrentielles, les ouvrages de correction ont essentiellement pour rôle d'agir sur les mécanismes de transport des matériaux solides et ainsi ils permettent de protéger directement les enjeux humains et matériels. Mais, pour jouer pleinement ces rôles, les ouvrages doivent avoir une structure résistante aux écoulements liquides et solides (Tacnet & al., 2009).

Dans le bassin versant de l'Ourika, Soumis aux mêmes conditions naturelles du milieu, la réponse à ces sollicitations a été différente d'un seuil à un autre (tableau 12):

- tous les seuils en maçonnerie sont encore fonctionnels, mais leurs radiers sont partiellement ou totalement détruits (photo 5). Le déversoir de certains a entamé le processus de destruction plus précisément au niveau du chapeau où on a observé l'apparition des ferrailles ;
- la plupart des seuils en gabion sont en détresse, environ 46% sont partiellement détruits et 16% sont totalement détruits. Ils sont vulnérables au niveau du déversoir (photo 6). La destruction commence par la coupure de leur grillage protecteur sous l'effet de choc entre les blocs entraînés par le courant et les blocs du seuil ;
- quant aux seuils en pierre sèche, ils n'ont subi que des destructions partielles (photo 7);
- la vitesse de dégradation de ces ouvrages varie d'un SBV à un autre et le SBV Chiker qui a les pentes relativement les plus fortes est le plus touché.



Photo 5 : Seuil en maçonnerie fonctionnel avec un radier complètement endommagé, risque d'affouillement de l'ouvrage



Photo 6 : Seuil en gabion partiellement détruit ne jouant plus correctement son rôle



Photo 7 : Seuil en pierre sèche toujours fonctionnel, écoulement de quelques pierres au niveau du déversoir

Tableau 12 : Défaillances structurelles observées au niveau des différents types de seuils exprimées en pourcentage

SBV	Type de seuil	S**	S***	D*	D**	D***	R*	R**	R***
ANINS	M	0	0	50	0	0	0	50	25
	G	45	20	0	20	80		10	90
	PS	0	0	0	0	0	A	A	A
TIGHZRITZE	M	0	0	30	0	0	0	46	39
	G	50	10	0	15	70	15	20	40
	PS	25	0	0	45	25	A	A	A
CHIKER	M	0	0	0	40	0	0	25	50
	G	50	25	0	25	75	0	30	60
	PS	66	0	0	50	25	A	A	A
AMLOUGUI	M	0	0	45	0	0	0	50	0
	G	40	10	0	40	20	0	50	20
	PS	25	0	40	0	0	A	A	A

Signification des symboles

M : seuil en maçonnerie, G : seuil en gabion, PS : seuil en pierre sèche, S : seuil, D : déversoir, R : radier, * : destruction entamée, ** : partiellement détruit, *** : totalement détruit, A : absent

Les dégâts observés au niveau de ces seuils sont causés par le chocs des blocs charriés et amplifiés par les écoulements de lave torrentielle. Ces paramètres devraient être pris en compte lors de la construction de ces ouvrages (Tacnet & al., 2009) mais les sollicitations exercées par une action dynamique sur un ouvrage rigide restent mal connues (Tacnet, 2010). Les seuils en gabion construits durant la même période (2002-2003) que les seuils en maçonneries qui sont toujours fonctionnels, ne jouent plus leur rôle. Dans certains endroits, le ravin est déjà revenu à l'état initial. On en déduit alors que ces ouvrages ne sont pas adaptés à la zone. En dehors de ces défaillances structurelles, certaines anomalies dont le changement de la trajectoire normale des écoulements ont été observées. Ces anomalies ont été essentiellement dues à la présence des blocs, des masses de sédiments ou les arbres au niveau du déversoir qui bloquent le passage de l'eau. Ces défauts qui ont pour effet la création d'une nouvelle ravine et la mise à nu des ailes de l'ouvrage pourraient être évités par des entretiens réguliers du système. Aucun n'entretien de ces aménagements depuis leur installation n'a été observé.

8.5. Conclusion

Les aménagements réalisés dans le BV Ourika en particulier l'implantation des seuils de correction de ravine constituent un soulagement pour les habitants de la région. Bien que tous les seuils soient déjà remplis, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent plus retenir de nouveaux sédiments, ils continuent toujours à réduire la vitesse des écoulements. Actuellement le système commence à être fragile surtout à cause du non fonctionnement des seuils en gabion qui ont eu du mal à s'adapter à des conditions particulières qui y règnent. Mais, globalement il y a lieu de signaler que les efforts fournis pour assurer la protection de la population n'ont pas été vains. La situation actuelle des ouvrages et de l'ensemble du système peut être améliorée par les entretiens réguliers.

A partir des atterrissements des seuils, on a estimé la dégradation spécifique à 15 t/ha/an, chiffre qui confirme la forte érosion hydrique qui règne dans cette zone.

Conclusion et recommandations

Le bassin versant de l'Ourika d'une superficie d'environ 576 km² et d'une densité de la population estimée à 115 habitants/Km² lors du recensement 2014, est avant les aménagements de lutte antiérosive, dans un état très dégradé et clairsemé sur une grande partie de sa superficie. Menacé par les phénomènes de crues torrentielles, sous l'effet conjugué de la pression anthropique et de la configuration physique du terrain amplifiée par les précipitations orageuses qui y règnent, le bassin versant de l'Ourika a été soumis à des travaux de correction mécanique des ravins et de reforestation dans le cadre du projet de développement de ce bassin versant afin de protéger les touristes de la vallée, la population locale et leurs biens contre les risques des crues violentes.

Dans le but de mieux cerner l'efficacité de ces aménagements dans l'atténuation de l'agressivité des crues qui menacent cette région, la présente étude a permis d'évaluer l'impact des travaux de lutte antiérosive sur le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika.

Pour ce faire, dans un premier temps, on a déterminé l'impact des aménagements sur l'hydrologie du bassin versant. Sur une période de 1970 à 2010, l'analyse de la relation pluie-débit à chaque intervalle de 10 ans, a permis de constater que le bassin versant a subi deux changements importants au cours de la période d'étude, la première à partir de 1989 et la deuxième à partir de 2000. Ensuite, l'impact de ces modifications sur l'hydrologie du bassin versant a été déterminé par la comparaison des écoulements annuels avant et après les modifications en se basant sur une approche de la modélisation de la pluie en débit. La période 1970-1988 utilisée comme référence a servi à déterminer le comportement du BV avant les modifications. Il a été mis en évidence que les modifications de la période 1989-2000 ayant entraîné une augmentation des écoulements annuels d'environ 24% de la pluie annuelle. Mais les aménagements entrepris sur ce BV à partir des années 2000 ont favorisé l'amélioration du coefficient d'infiltration du bassin versant et on a assisté à une réduction des écoulements annuels de 12% de la pluie annuelle.

Dans un 2^{ème} temps, on a déterminé l'efficacité des ouvrages de protections dans quatre sous bassins jugés représentatifs du bassin versant. Notre analyse est basée sur les différents types de seuils installés (seuils en maçonnerie, en gabion et en pierre sèche) dans le cadre des travaux de correction torrentielle. Il a été ressorti que grâce aux atterrissements, le profil initial des ravins est changé en un profil en escalier et le pied des berges a été stabilisé. Cette situation va atténuer la vitesse d'écoulement des eaux et réduit ainsi les risques d'inondations. De plus les sédiments sont généralement soit stabilisés par la végétation ou

soit mis en valeur par les paysans (plantation, maraichage). La quantité de sédiments stockée par un mètre cube de ces ouvrages a été estimée en moyenne à 6 m³ pour le gabionnage et la maçonnerie cimentée et de 3 m³ pour les pierres sèches. A partir de ces valeurs on a estimé la dégradation spécifique du BV Ourika à 15 t/ha/an. Bien qu'on a tenu compte seulement des accumulations des seuils dans l'estimation de cette dégradation, la valeur trouvée dépasse largement le seuil tolérance.

Enfin, l'étude de l'état actuel des seuils en relation avec les facteurs du milieu a permis de mettre en évidence le choc des blocs de taille métrique comme le facteur responsable de la dégradation des ouvrages. Les seuils en gabion se sont révélés inefficaces dans ses réseaux d'écoulement à charriage agressifs. Les seuils en maçonneries sont plus touchés par la destruction de leur radier. L'état actuel de ces ouvrages serait mieux s'ils ont été soumis à des entretiens réguliers, mais, les moyens qui peuvent permettre la détection de l'état de dysfonctionnement partiel ou total du système de correction des ravins puis à le rétablir et le remettre en service n'ont pas été mis en place.

Au terme de ce travail, nos recommandations s'articulent autour des points suivants :

- ❖ Prévoir un programme de réhabilitation et d'entretien de tous les ouvrages de correction torrentielle afin de garantir le fonctionnement de tout le système de lutte contre les crues.
- ❖ Les seuils en gabion étant fragiles dans cette zone, peuvent être abandonnés au profit des seuils en maçonnerie lors des prochains travaux de correction torrentielle.
- ❖ Porter une attention particulière à l'entretien permanent de ces ouvrages pour prolonger leur durée de vie et assurer l'efficacité globale de dispositifs de protection
- ❖ Entreprendre de nouvelles techniques dans la construction des radiers et le chapeau des déversoirs des seuils sous peine de défaillance
- ❖ Insérer la gestion des risques de crues dans une approche intégrée associant la dynamique torrentielle et la prise en compte de la qualité et la capacité des ouvrages à résister dans ses environnements particuliers
- ❖ Etudier la capacité des reboisements effectués dans le cadre du projet du développement du BV à assurer une protection des sols.

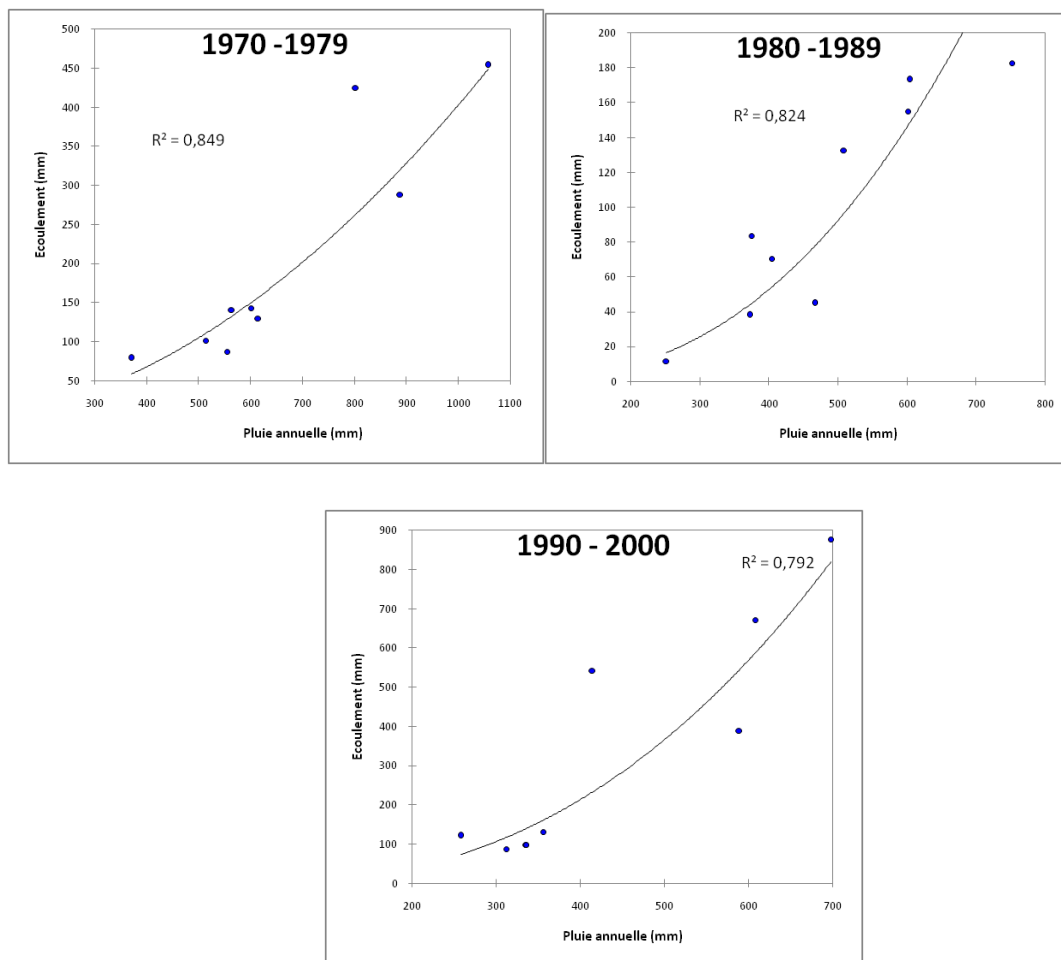
Bibliographie

- Andréassian, V. (2002). Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants, Tome 1 Thèse soutenue le 24 Septembre 2002 à l'ENGREF, Paris, France, 276p .
- Anonyme. (2000). étude environnementale dans la vallée de l'Ourika.
- Athy, L.-F. (1930). Density, porosity and compactation of sedimentary rocks, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. v. 14, pp. 1-24.
- Bassoumori, T. (1992). Evaluation de l'efficacité de la défense et la restauration des sols dans le bassin versant de Neckor, Mémoire de 3ème cycle ENFI, Salé, Maroc, 135 p.
- Benchad, A. (1999). Evaluation à Posteriori des Projets en Matière de CES dans le Nord du Maroc. (Cas du Projet de Développement Intégré du Loukkos et des Aménagements Anti-Erosifs du B.V. de Neckor). Mémoire de 3ème cycle ENFI, Salé, Maroc, 109 p.
- Bergaoui, M., & Albergel, J. (2000). Effets des aménagements en pierres sèches sur la forme des crues de l'oued Zioud, Tunisie. Bull. Réseau Erosion 20 : 23-38.
- Bergaoui, M., & Camus, H. (1995). Impact des travaux anti-érosifs sur les crues et le transport solide en Tunisie centrale, Sécheresse, 1995, 113- 126pp, Science et changement planétaire, " l'Homme peut-il refaire ce qu'il défait ". pp. 113-126.
- Bernard, S., Roose, E., Lopez, J., Querbes, M., Querido, A., & Barby, O. (1998). Utilisation du paillage léger et de la haie vive dans la lutte contre l'érosion en zone semi-aride de montagne (Cap-Vert). Sécheresse, 9(1) : 13-21,.
- Bouanani, R. (2010). Modélisation de la fonction pluie - débit, application au bassin versant de la Tafna (NW - algerien), mémoire de magister, universite Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 101p.
- Boudhraa, H. (2007). Modelisation pluie-débit a base geomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches Directe et Inverse, These de Doctorat en Sciences Agronomiques, Institut National Agronomique De Tunisie, 227p.
- Bouزيد, A. (2009). Etude de protection contre les inondations : cas de TNINE Ourika, mémoire de troisième cycle pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie rural, IAVH , Rabat –Instituts, Maroc, 130p, .
- Cudennec, C. (2000). Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France, 198 p.
- Demmak, A. (1982). Recherche d'une relation empirique entre les apports solides et les paramètres physico-climatiques des bassins. AISH 144: 403-414.
- Doukkali, O. (2003). Evaluation de la longévité et de la performance des techniques de conservation des eaux et des sols dans le bassin versant de l'Ourika- DREF du Haut Atlas-Maroc. Mémoire de 3ème cycle ENFI, Salé, Maroc, 113 p.

- Saidi, E.M., Daoudi, L., El Hassane Aresmouk, M., Fniguire, F., & Boukrim, S. (2010). Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc): Événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride. *Comunicações Geológicas*, 113-128.
- FAO. (1990). Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides, *Bulletin pédologique*, 57:182 p.
- Fniguire, F., & Boukrim, S. (2007). Etude dynamique et statistique des crues du Haut Atlas de Marrakech (Maroc), Cas des bassins versants du N'Fis, de la Ghiraya et de l'Ourika, *Maîtrise Es Sciences et Techniques d'Hydrogéologie*, FST, MARRAKECH, Maroc, 56p.
- Fritsch, J.-M. (1995). Occupation des sols et régimes hydrologiques : les enseignements des bassins versants guyanais. In: *Annales de Géographie*. 1995, t. 104, n°581-582. pp. 26-63.
- Gaume, E. (2002). Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation pluie-débit Cours de DEA en Sciences et Techniques de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Greco, J. (1966). L'érosion et la DRS. Le reboisement en Algérie .Ed. M.A.R.A. Alger, 393 p.
- Gresillon, J. (1994). Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants, *Approches numériques et expérimentales à différentes échelles*, diplôme d'habilitation à diriger des recherches, LTHE, Grenoble.
- HCEFLCD. (2012). Rapprt d'achèvement du Projet de développement du bassin versant de l'oued Ourika financé par le Fonds Hassan II.
- Hewlett, J. (1982). *Principles of Forest Hydrology*. The University of Georgia Press, Athens, 183 pp.
- Lavabre, J., Arnaud, P., & Folton, N. (1996). Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt. *Ingénieries - E A T*, p. 21 - p. 30.
- Lilin, C., & Koohafkan, P. (1987). *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. FAO, Rome, 36 p.
- Lopez Cadenas, F. (1992). Correction des torrents et stabilisation des lits, *Food & Agriculture Org.*, 167 p.
- Musy, A., & Higy, C. (2004). *Hydrologie 1: une science de la nature*, presses polytechniques et universitaires romandes, 314p.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, p 282-290.
- Perrin, C., Michel, C., & Andreassian, V. (2007). *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*, Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16p.
- Raharinaivo, S. (2008). Les techniques de correction des ravines et de stabilisation des Lavaka tirées des acquis du PLAE à MAROVOAY, Programme de Développement de Madagascar.

- Regis, G., & Roy, A. (1999). Efficacité de lutte anti érosive traditionnelle et moderne appliqués sur les versants en Haiti. *Bul Res. Eros* 19.IRD.Montpellier.pp274-285.
- Rihane. (2015). Contribution à l'évaluation des services hydrologiques de la forêt et des aménagements anti-érosifs dans le bassin versant de l'Ourika. Mémoire de 3ème cycle ENFI, Salé, Maroc, 87 p.
- Roose, E. (1994). Introduction à la GCES, Bulletin pédologique, FAO, 420 p.
- Roose, E. (2000). Evolution des Stratégies de Lutte Anti-Erosive, Vers la Gestion Conservatoire de l'Eau, de la Biomasse et de la Fertilité (GCES), Actes de la journée scientifique du 15/10/2000 organisée à l'ENFI, Salé, Maroc.
- Roose, E., & De Noni, G. (1998). Apport de la Recherche à la lutte antiérosive : Bilan mitigé et nouvelle approche. *Etude et Gestion des sols*, 5(3) : 181-194.
- Sabir, M. (2011). Utilisation des terres et risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes méditerranéennes du Maroc, colloque sur l'érosion hydrique et la vulnérabilité au Maghreb: Etat des lieux et perspectives, IAVH II, Rabat, Maroc .
- Sajid, S., & Ljouad, L. (2000). Evaluation de Certaines Techniques de Conservation des Eaux et des Sols : Cas du Haut Loukkos et Merchouch. Actes de la journée scientifique du 15/10/2000 organisée à l'ENFI, Salé, Maroc.
- Serrat, P., Ludwig, L., Navarro, B., & Blazi, J.-L. (2001). Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen : la Têt (France), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Sciences* Volume 333, Issue 7, pp 389–397.
- Tacnet, J., Berthet-Rambaud, P., Limam, A., Perrotin, P., & Tonello, J. (2009). Action des avalanches sur les ouvrages de génie civil : pratiques et connaissances actuelles, lacunes et enjeux associés, rapport d'études, Cemagref/INSA/Cete/ESIGEC/Tonello I.C., MEEDDAT/DIREN Rhône-Alpes, 91 p.
- Tayaa, M., & Bouachid, R. (2004). Fiches techniques: conservation des eaux et des sols, projet watershed protection and management, 64P.
- Thornes, J. (1995). Mediterranean desertification and the vegetation cover. In : Fantechi R., Peter D., Balabanis P., Rubio J-L., editors. *Desertification in a European context: physical and socioeconomic aspects*. European Commission Report EUR 15415, 169-194.
- Yjjou, M., Bouabid, R., El Hmaidi, M., Essahlaoui, A., & El Abassi, M. (2014). Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er Rbia *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, Volume 3 Issue 8 Pages, 83-91.
- Zobiri, B. (2009). Analyse et évaluation des aménagements de CES à l'amont du barrage ELIZDIHAR de Sid Abdelli Tlemcen, Algérie, Thèse. Mag. Fores. Fac. Scien. Univ. Tlemcen. 116p.

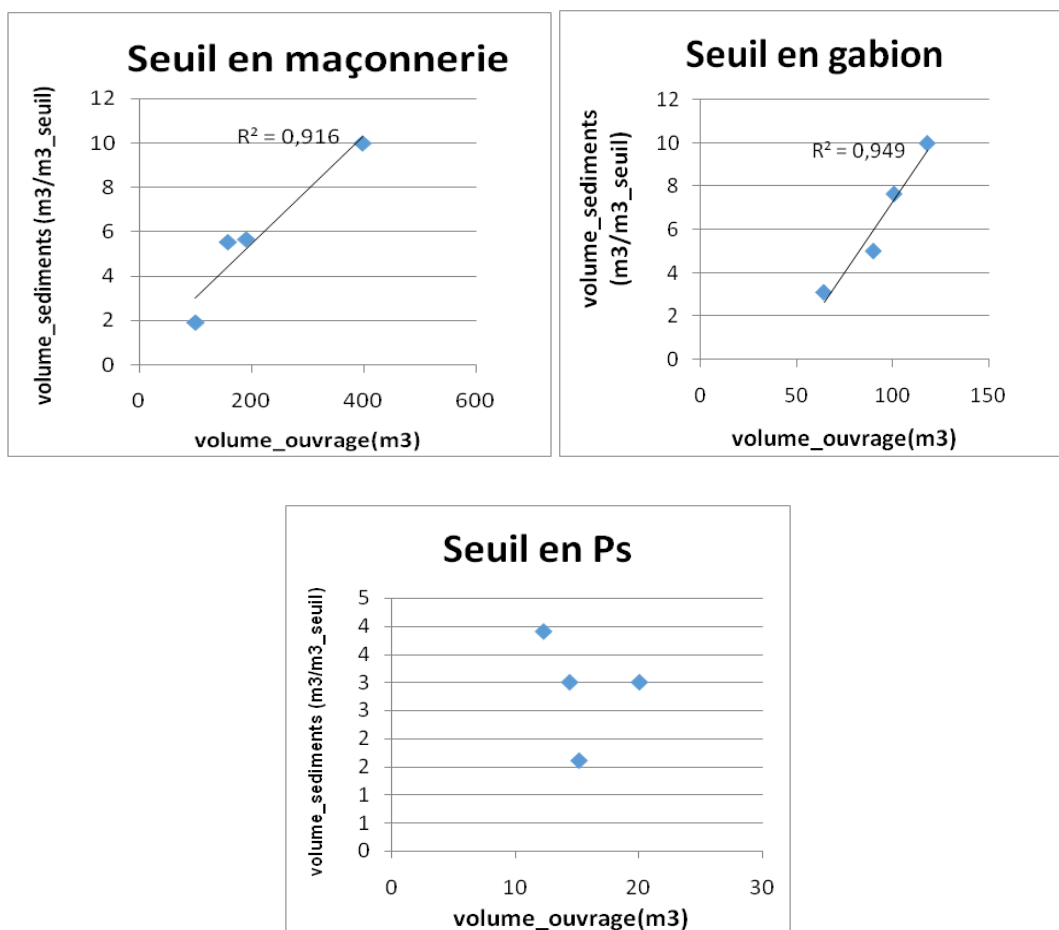
Annexes



Annexe 1 : Distribution des lames d'eau ruisselées en fonction de la pluviométrie annuelle au cours des trois périodes avant les aménagements et superposition des trois courbes.



Annexe 2 : Etat d'un reboisement de Pin dans le SBV Anins réalisé dans le cadre du projet de développement du BV Ourika. Les arbres penchés sous l'effet du vent et absence de la matière organique sous les arbres



Annexe 3: Courbe montrant la quantité de sédiments retenue par un mètre cube de chaque ouvrage dans les différents SBV en fonction du volume moyen de chaque seuil



Annexe 4: Délimitation et fixation du bord d'une nouvelle terrasse par les pierres ramassées lors de l'aménagement des sédiments pour l'installation de la terrasse.



Annexe 5 : Mise en place d'une seguia par les paysans à travers laquelle l'eau de l'oued passe vers la terrasse



Annexe 6 : Barrière constituées de blocs disposés perpendiculairement au sens de l'écoulement de la seguia alimentant les terrasses