



المدرسة الوطنية الغابوية للمهندسين بسلا
ECOLE NATIONALE FORESTIERE
D'INGENIEURS DE SALE

Contribution à l'évaluation des services
hydrologiques de la forêt et des aménagements
anti-érosifs dans le bassin versant de l'Ourika

MEMOIRE DE 3^{ème} CYCLE

Présenté par : Mr. RIHANE Reda

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
DES EAUX ET FORÊTS

OPTION : Aménagement des Forêts

Soutenu publiquement le 11 Juillet 2015 à 10h00 devant le jury :

MM.

Mr. BOUAICHA R.	(M.D.C.E.)	Président
Pr. KHATTABI A.	(E.N.F.I.)	Rapporteur
Pr. LAHSSINI S.	(E.N.F.I.)	Co-rapporteur
Dr. RIFAI N.	(H.C.E.F.L.C.D.)	Examineur
Mr. MHARZI ALAOUI H.	(H.C.E.F.L.C.D.)	Examineur
Mr. OURAINI A.	(H.C.E.F.L.C.D.)	Examineur

« 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 Marocaines 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. »



Ecole Nationale Forestière d'ingénieurs
Salé

N°...../ENFI

Salé, le.....

Autorisation pour remettre le mémoire

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

Nom et prénom : RIHANE Reda
 Promotion : 44^{ème}
 Option : Aménagement des Forêts
 Et intitulé : « Contribution à l'évaluation des services hydrologiques de la forêt et des aménagements anti-érosifs dans le bassin versant de l'Ourika. »

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. Bouaicha R.	Signature	Date 15/7/15
Encadrant ... Pr. Khatibi A.	Signature	Date 03/09/15
Co-encadrant ... Pr. Lhassini S.	Signature	Date 03.09.15
Examineur ... M. Abdelhakim O. R. A. W.	Signature	Date 14/07/15
Examineur ... Dr. Ri. Sai. N.	Signature	Date 15/07/15
Examineur ... M. S. Th. G. J. A. L. A. M.	Signature	Date 15/07/15
Approbation du Directeur de l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs :		
Signature		Date

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

Fiche n°

« 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 Marocaines 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

Ce travail est dédié à :

A DIEU, notre seigneur le tout puissant, de m'avoir accordé la santé, la volonté et le désir d'accomplir et d'achever ce travail.

Ma mère et mon père, qui m'ont toujours encouragé avec une inéluctable patience pendant mes longues études, en témoignage de mon affection et ma reconnaissance pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour moi. Aucune dédicace ne saurait, cependant, exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect profond.

A toute ma famille et à tous mes amis.

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Au terme de cette étude, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de mon travail de fin d'étude.

C'est de mon devoir de présenter ma reconnaissance et ma gratitude au Pr. KHATTABI A., Enseignant chercheur à l'ENFI, pour sa disponibilité, son immense apport aussi bien sur le plan scientifique que technique. Je lui suis reconnaissant pour le temps qu'il a bien voulu consacrer à l'encadrement de ce travail. Je voudrais par ces mots, vous exprimer toute ma reconnaissance et ma grande admiration.

Mes estime et ma profonde reconnaissance sont adressées particulièrement au Pr. LAHSSINI S., Enseignant chercheur à l'ENFI, pour son soutien, ses remarques directives et le temps qu'il a consacré pour assurer l'encadrement et l'accomplissement de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de tous mes respects.

Je tiens à remercier également Mr. BOUAICHA R., Chef de la division des méthodes au ministère délégué chargé de l'Eau, pour l'honneur qui m'a accordé en acceptant de présider ce jury et d'accorder de son temps et de son effort pour la correction du document.

J'adresse mes sincères remerciements au Dr. RIFAI N., Ingénieur principal au H.C.E.F.L.C.D., je lui remercie d'avoir accepté de juger ce travail et l'enrichir par ses critiques et ses suggestions constructives. Je lui présente ma profonde gratitude et ma reconnaissance pour ses conseils, ses directives et ses remarques constructives.

Mes chaleureux et grands remerciements sont également adressés à Mr. MHARZI ALAOUI H., Ingénieur principal au H.C.E.F.L.C.D., qui a bien voulu faire partie des membres de jury. Qu'il trouve ici ma considération et l'expression de tous mes respects et ma vive gratitude.

Je tiens à adresser aussi mes remerciements à Mr. OURAINI A. Ingénieur principal, chef du service de la conservation du sol et aménagement des bassins versants au H.C.E.F.L.C.D., qui m'a fait l'honneur de bien vouloir accepter d'évaluer ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mes meilleurs sentiments.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont apporté leur concours, leurs conseils et leur soutien lors de la réalisation de ce travail et que je ne pourrais tous citer.

Résumé

Soumis à un forçage climatique et anthropique, le bassin versant de l'Ourika connaît fréquemment des débits de crues extrêmement élevés. Pour faire face à cette situation, un certain nombre d'aménagements ont été entrepris pour atténuer les effets des crues et protéger les vies et les actifs naturels et artificiels dans la vallée. Conjuguées aux modes d'utilisation de l'espace ainsi qu'à la dynamique socio-territoriale qu'avait connu la région, ces actions pourraient se répercuter sur la couverture végétale et par conséquent sur son rôle régulateur des crues et des écoulements hydriques.

Dans cette optique, l'évaluation de l'impact de ces facteurs sur les ressources forestières et ses incidences sur le rôle de la forêt dans l'atténuation des événements extrêmes, est indispensable pour une meilleure gestion du risque d'inondations.

C'est dans ce cadre et contexte que le présent travail est réalisé et a pour objectif d'évaluer l'impact des aménagements biologiques et physiques réalisés dans le bassin versant de l'Ourika sur le couvert végétal et ses incidences sur l'atténuation des risques de crues.

La réalisation de ce travail a nécessité l'utilisation de la télédétection pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol correspondant aux dates de 1984, 2000 et 2014 en vue d'appréhender l'évolution du couvert végétal dans le bassin suite aux aménagements et interventions réalisés. Les modèles HEC-HMS et HEC-RAS ont été utilisés pour la simulation du fonctionnement hydrologique du bassin versant suite à deux scénarios de changement de l'occupation du sol, et pour la détermination de l'étendue de la crue centennale de l'oued, respectivement.

Le premier scénario a permis de simuler l'impact de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits de pointe. En effet, on a utilisé la carte d'occupation du sol de l'année 2000 qui illustre un recul de la superficie de la forêt équivalent à 20.16 % par rapport à l'état de 1984. Les résultats de la simulation montrent que le débit de pointe a augmenté de 31.68 %.

Quant au deuxième scénario, l'action a été mise sur l'évaluation de l'impact des actions entreprises par le forestier dans le bassin versant de l'Ourika à travers les actions de reboisement et la proscription des exploitations, ainsi que des changements du mode d'utilisation de l'espace. C'est dans ce but qu'on a utilisé la carte d'occupation du sol de

2014 illustrant une évolution dans la couverture forestière par rapport à 2000 qui est de l'ordre de 21.28 %. Les résultats des simulations montrent que ce changement a engendré une baisse dans les débits de pointe de 17.25 %. Toutefois, pour les averses extrêmes, on remarque une diminution de l'influence de l'occupation du sol sur les débits.

Les résultats de la modélisation hydraulique montrent que pour une période de retour de 100 ans, la superficie susceptible d'être inondée représente 3.91 % de la superficie du bassin versant. Il s'agit essentiellement de la zone située au niveau de la vallée et qui est la plus vulnérable vu la présence humaine et des infrastructures touristiques.

Les zones à risque élevé d'inondations représentent plus que la moitié de la superficie inondable. Ces zones correspondent aux constructions et aux terrains agricoles situés au niveau de la vallée, notamment les villages d'Aghbalou, d'Oulmes et de Sti Fadma. A ces zones s'ajoute la route provinciale P2017 reliant la vallée de l'Ourika à la ville de Marrakech.

Mots clé : Bassin versant de l'Ourika, Occupation du sol, Crues, Fonctionnement hydrologique, Modélisation.

Abstract

Subject to a climate and anthropogenic forcing, the watershed of Ourika in Morocco has experienced a very strong dynamic of vegetation cover during the thirty last years. In this context, this study is devoted to the evaluation of the impact of changes in land use on the hydrological functioning of the catchment area of Ourika.

The models HEC-HMS and HEC-RAS have been used to simulate the hydrological response of the watershed following two scenarios of change in land use, and to determine the extent of the centennial flood of the river respectively.

The first scenario was used to simulate the impact of deforestation and urbanization on peak flows. The simulation results show that the peak flow has increased by 31.68 %.

As for the second scenario, it evaluates the impact of actions taken in the watershed of Ourika through reforestation actions and proscription of exploitations. The simulation results show that this change has led to a decline of 17.25 % in the peak flows. However, for extreme events, there is a decrease in the influence of land use on flows.

The results of the floodplains mapping show that for a return period of 100 years, the flood risk area represents 4 % of the watershed area. These zones correspond to buildings and agricultural lands in the valley, including the towns of Aghbalou, Oulmes and Setti Fadma.

Keywords: Watershed of Ourika, Land Use, Floods, Hydrological Functioning, Modelling.

ملخص

واقع تحت تأثيرات مناخية وبشرية شهد الحوض المائي لأوريكا لدينامية قوية للغطاء النباتي خلال السنوات الثلاثين الماضية. في هذا السياق، هذه الدراسة تهدف إلى تقييم مدى تأثير التغييرات في استخدام الأراضي على النظام الهيدرولوجي للحوض المائي لأوريكا.

وقد استخدمت نماذج EHC-SMH و CEH-SAR لمحاكاة الاستجابة الهيدرولوجية للحوض المائي وفق سيناريوين إثنين، من جهة. ولتحديد المناطق المهددة بالفيضانات من جهة أخرى.

تم استخدام السيناريو الأول لمحاكاة تأثير إزالة الغابات والتوسع العمراني على تدفق المياه. وقد تبين أن التدفقات قد زادت ب 31,68 بالمائة.

أما السيناريو الثاني، فقد استعمل لتقييم تأثير الإجراءات المتخذة في الحوض من خلال إعادة التشجير ومنع الاستغلال. وقد بينت النتائج أن التدفقات قد نقصت بحوالي 17,25 بالمائة.

نتائج محاكاة المناطق ذات خطر الفيضانات، بينت أن المناطق التي يهددها الخطر تمثل حوالي 4 بالمائة من مساحة الحوض المائي. هذه المناطق تتوافق مع المباني والأراضي الزراعية في الوادي، بما في ذلك مناطق أغبالو، ولماس وستي فاطمة.

Sommaire

<i>Dédicace</i>	ii
Remerciements.....	v
Résumé.....	vi
Sommaire	x
Liste des figures	xiii
Liste des Tableaux	xv
Introduction générale	1
Problématique, questions générale et spécifique et hypothèses de recherche :	3
Etude de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ourika entre 1984 et 2014	5
Résumé.....	5
Liste des acronymes.....	7
1. Introduction	8
2. Zone d'étude et méthodologie	10
2.1. Zone d'étude.....	10
2.2. Méthodologie	12
2.2.1. Cartographie des occupations du sol	12
2.2.1.1. Prétraitement et classification des images satellitaires.....	12
2.2.1.2. Classification des images	12
2.2.2. Détection de changements	14
3. Résultats et discussions	15
3.1. Etat de l'occupation des sols entre 1984 et 2014	15
3.2. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols entre 1984 et 2014...	19
Conclusion et recommandations	30

Références bibliographiques	31
Impact de l'occupation des sols sur le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika	34
Résumé.....	34
Liste des acronymes.....	36
1. Introduction	37
2. Zone d'étude et méthodologie	40
2.1. Zone d'étude.....	40
2.2. Méthodologie	43
2.2.1. Données mobilisées	43
2.2.2. Combinaison modulaire.....	44
2.2.3. Modélisation hydrologique	47
2.2.3.1. Calibration du modèle	48
2.2.3.2. La validation du modèle	55
2.2.4. Modélisation hydraulique	58
3. Résultats et discussions	59
3.1. Impact de l'occupation des sols sur le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika.....	59
3.1.1. Détermination des averses quantiles.....	59
3.1.2. Scénario 1 : Impact d'un changement négatif dans l'occupation des sols	60
3.1.3. Scénario 2 : Impact d'un changement positif dans l'occupation des sols	61
3.2. Délimitation des zones inondables.....	62
Conclusion et recommandations	64
Références bibliographiques	66
Conclusion générale.....	71
Référence bibliographiques	73

Annexes 80

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika.....	10
Figure 2. Diagramme ombro-thermique de la station d'Aghbalou.....	11
Figure 3. Carte du réseau hydrographique et d'occupation des sols, 1984	16
Figure 4. Carte du réseau hydrographique et d'occupation des sols, 2000	17
Figure 5. Carte du réseau hydrographique et d'occupation des sols, 2014	18
Figure 6. Occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika : (a) en 1984; (b) en 2000 ; (c) en 2014	20
Figure 7. Changements intervenus dans l'occupation des sols entre 1984 et 2000.....	22
Figure 8. Changements intervenus dans l'occupation des sols entre 2000 et 2014.....	25
Figure 9. Changements intervenus dans l'occupation des sols entre 1984 et 2014.....	27
Figure 10. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika.....	40
Figure 11. Diagramme ombro-thermique de la station d'Aghbalou.....	43
Figure 12. Fonctionnement du modèle HEC-HMS sous la structure évènementielle ...	45
Figure 13. Fichiers de simulation préparés pour chaque événement	49
Figure 14. Comparaison entre les débits de pointe simulés et les débits de pointe observés après validation par les cinq méthodes utilisées	51
Figure 15. Comparaison entre les volumes simulés et les volumes observés après validation par les cinq méthodes utilisées.....	51
Figure 16. Comparaison entre le débit de base simulé et le débit de base observé après validation par les cinq méthodes utilisées.....	52
Figure 17. Variation du volume simulé de l'événement 16 en fonction de l'imperméabilité	54
Figure 18. Comparaison entre le débit de pointe simulé et observé pour les deux essais de validation.....	56
Figure 19. Comparaison entre le volume simulé et observé pour les deux essais de validation	56
Figure 20. Comparaison entre le débit de base simulé et observé pour les deux essais de validation	57
Figure 21. Validation du modèle par les évènements 5	57
Figure 22. Validation du modèle par les évènements 12	58

Figure 23. Carte des zones inondables dans le bassin versant de l'Ourika (crue centennale)

..... 62

Liste des Tableaux

Tableau 1. Images satellitaires utilisées pour cette étude (Téléchargeable sur www.glovis.usgs.gov).....	11
Tableau 2. Superficie et taux de couverture des unités d'occupation des sols du bassin versant de l'Ourika entre 1984 et 2014	19
Tableau 3. Taux de précision de la classification des images de 1984 et de 2000.....	21
Tableau 4. Erreurs de commission/omission pour les classifications de 1984 et 2000.	21
Tableau 5. Matrice des changements intervenus dans l'occupation des sols entre 1984 et 2000	23
Tableau 6. Matrice des changements intervenus entre 2000 et 2014 dans l'occupation des sols	26
Tableau 7. Matrice des changements intervenus entre 1984 et 2014 dans l'occupation des sols	28
Tableau 9. Images satellitaires utilisées pour cette étude (téléchargeable sur www.glovis.usgs.gov).....	44
Tableau 10. Table NRCS des classes d'occupation des sols identifiées sur le bassin versant de l'Ourika en 1984	48
Tableau 11. Neuf (9) évènements sélectionnés pour la modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant.....	48
Tableau 12. Jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation	55
Tableau 13. Résultats de validation du jeu de paramètres optimal.....	55
Tableau 14. Valeurs simulées du débit de pointe pour les averses quantiles	59
Tableau 15. Résultats de simulation de l'impact d'un changement négatif dans l'occupation des sols	60
Tableau 16. Comparaison entre les averses quantiles et les résultats du 1 ^{er} scénario ...	60
Tableau 17. Résultats de simulation de l'impact d'un changement positif dans l'occupation des sols	61
Tableau 18. Comparaison entre les averses quantiles et les résultats du 2 ^{ème} scénario	61

Liste des annexes

Annexe 1. Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ourika.....	81
Annexe 2. Carte des pentes du bassin versant de l'Ourika	82
Annexe 3. Carte de végétation du bassin versant de l'Ourika	83

Introduction générale

Malgré l'aridité de son climat, le Maroc se trouve confronté à des épisodes pluvieux récurrents qui peuvent générer des inondations et des crues susceptibles d'engendrer des dégâts non négligeables (Saidi et al., 2006).

Historiquement, de nombreuses crues et inondations ont affecté différentes régions du pays : la vallée de la Moulouya en 1963, la vallée du Ziz en 1965, la vallée de l'Ourika en 1995, les villes de Sefrou en 1950, d'El Hajeb en 1997, de Settat et Mohammedia en 2002, de Tan Tan, Nador, Al Hoceima et Khénifra en 2003, de Sidi Ifni en 2015, etc. (Ramromi, 2007).

Situé au centre Ouest du Maroc, le bassin versant de Tensift, d'une superficie de 18 210 km², est caractérisé par un climat semi-aride à aride. Les précipitations y sont faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. Sa flore extrêmement variée est assujettie à une forte pression (Saidi et al., 2006). Le sous bassin versant de l'Ourika est l'un des sous bassins versants les plus importants au niveau du Tensift et qui illustre parfaitement cette pression sur le couvert végétal. Cette dernière, conjuguée aux fortes pentes, aux sols peu perméables et à l'agressivité du climat, offre un environnement propice au développement de fortes crues (Saidi et al., 2010).

Au niveau de ce bassin versant, le risque élevé des crues et son impact potentiel sur les infrastructures et sur les vies humaines à l'aval, justifient la nécessité d'une étude hydrologique en liaison avec l'état du couvert végétal qui constitue une composante principale dans la régulation du fonctionnement hydrologique des bassins versants. En effet, les choix en matière de gestion des peuplements forestiers et les modes d'utilisation du sol se répercutent sur l'état du couvert végétal et par conséquent sur son rôle modérateur des crues. Ainsi, les changements de l'occupation du sol qu'avait connu le bassin versant au cours des dernières décennies, traduisent les choix des différents acteurs et pourraient concourir à en apprécier l'impact sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

L'utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et les modèles hydrologiques et hydrauliques permettent d'intégrer des données multi-sources pour une meilleure compréhension et évaluation des processus et des interactions dynamiques entre les paramètres environnementaux et physiographiques qui interviennent dans un

hydrosystème (Andréassian, 2002). C'est dans le contexte de cette évaluation que s'insère la présente étude qui a pour objectif d'évaluer le rôle de la forêt et du couvert végétal dans la diminution du risque lié à l'aléa des crues et inondations. Cette étude s'inscrit dans le cadre des activités de recherche du projet GIREPSE relatif à l'adaptation au changement climatique dans le bassin de Tensift au Maroc par une gestion améliorée du bassin versant et le paiement pour les services environnementaux.

Problématique, questions générale et spécifique et hypothèses de recherche :

Le rôle de la forêt en tant que modérateur d'écoulement et réducteur des débits de pointe pendant les crues est largement accepté. Cependant, des controverses subsistent encore concernant le rôle de la forêt sur le comportement hydrologique du bassin versant. Cosandey (2005) affirme qu'il est très complexe de séparer l'évaluation de l'impact de la forêt sur la gestion des crues, du contexte de gestion de l'eau et de la protection de l'environnement. Soit parce qu'il n'est pas encore possible de vérifier quantitativement le rôle que joue le couvert végétal dans la régulation des crues, soit parce qu'il serait probablement non viable d'appliquer une politique spécifique, sans considérer tous les autres phénomènes qui se produisent dans les bassins versants.

Toute étude pouvant aider à comprendre cette relation serait utile pour apporter un nouvel éclairage par rapport à ce sujet. L'évaluation de l'impact de l'évolution du couvert végétal sur le comportement hydrologique des bassins versants peut l'être.

En effet, la forêt du bassin versant de l'Oruika n'a pas fait l'objet d'un aménagement forestier auparavant, la superficie totale de reboisement s'y élevait seulement à 2 371 ha. Ce n'est qu'après la crue catastrophique de 1995 que la forêt a été aménagée. En effet, les services des Eaux et Forêts ont mis en place divers aménagements, à savoir l'aménagement forestier en 2002, ainsi que les aménagements de lutte anti-érosive dans le cadre du projet de développement dudit bassin versant (Anonyme, 2002). Le traitement biologique qui a été appliqué se résume à 3 interventions, à savoir le reboisement de protection, l'amélioration sylvo-pastorale et la régénération des forêts sur une superficie de 6 800 ha (Anonyme, 2002). De plus, ces interventions ont été renforcées par l'arrêt des exploitations forestières au niveau du bassin versant (Anonyme, 2002).

Ces interventions conjuguées à la diminution, au niveau de la commune d'Oukaimden à titre d'exemple, de la pression pastorale sur la forêt (3 759 et 1738 têtes en 1996, d'ovins et de caprins respectivement, contre 1450 et 700 têtes d'ovins et de caprins en 2014) (Bouarais, 2015) et la dynamique socio-territoriale que connaît la zone, pourraient être à l'origine de l'évolution positive qu'a connue le couvert forestier lors des dix dernières années et par conséquent de la diminution de la fréquence des crues dévastatrices.

C'est pour répondre à ces hypothèses que cette étude se propose de procéder à l'analyse de la dynamique spatio-temporelle du couvert forestier au niveau du bassin versant de

l'Ourika pendant les trente dernières années et sa relation avec son fonctionnement hydrologique.

Cette analyse va permettre éventuellement de dégager des orientations stratégiques pour un aménagement durable de la forêt à l'amont du bassin versant de l'Ourika et la réduction de l'intensité de l'aléa d'inondations et crues.

Cette étude a fixé comme objectifs de caractériser les différentes occupations du sol du bassin versant de l'Ourika ; analyser les facteurs responsables des changements intervenus dans l'occupation du sol au niveau du bassin versant ; modéliser le comportement hydrologique du bassin versant en fonction des changements d'occupation du sol ; et délimiter les zones inondables au niveau du bassin versant de l'Ourika.

Le document est structuré en deux chapitres. Le premier chapitre analyse la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol au niveau du bassin versant entre 1984 et 2014, et l'impact des aménagements réalisés par le HCEFLCD. Le second traite l'impact du changement dans l'occupation du sol sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Etude de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ourika entre 1984 et 2014

Résumé

Pendant les trente dernières années, le bassin versant de l'Ourika, l'un des sous bassins versants les plus importants au niveau du Tensift, a connu une série d'inondations catastrophiques. Ce risque élevé des crues a incité le gestionnaire du territoire à édicter de nouvelles orientations pour l'aménagement de l'espace naturel. Afin d'apprécier l'impact de ces changements, une évaluation de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol au niveau du bassin versant a été réalisée.

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation de la télédétection pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol correspondant aux années 1984, 2000 et 2014. Ces cartes ont fait l'objet par la suite d'une comparaison post-classificatoire pour la production des cartes et des matrices de changements.

Les résultats de cette étude montrent que le couvert végétal a subi une dégradation très accélérée au cours de la période 1984-2000. En effet, la forêt occupait 18 686.16 ha en 1984, soit 32.45 % de la superficie totale du bassin versant. L'évaluation des cartes d'occupation du sol a montré que le couvert forestier s'est rétréci au cours de la période 1984 à 2000. Il s'agit d'un recul de 20.19 % par rapport à la superficie forestière initiale, soit une superficie de 3 773.14 ha.

La période allant de 2000 à 2014, a connu une augmentation de 21.28 % dans la couverture forestière du bassin versant, soit une superficie de 3 174.28 ha. Pendant cette même période, les sols nus ne couvraient plus que 12.41 % de la superficie du bassin en 2014, soit un recul de 25.14 % par rapport à leur superficie en 2000.

Les choix du gestionnaire forestier en termes d'aménagements de lutte anti-érosive, conjugués à la dynamique territoriale qu'avait connu la zone pendant les dix dernières années. Le développement de l'activité touristique qui est devenue une source de revenu pour une part importante des habitants de la vallée et des douars avoisinants ainsi que la diminution de la pression pastorale, ont permis d'alléger la pression sur les ressources forestières et par conséquent la reconstitution des écosystèmes forestiers au niveau du bassin versant.

Mots clés : Bassin versant de l'Ourika, Occupation du sol, Télédétection, couvert végétal.

Liste des acronymes

ENVI	: Environment for Visualizing Images
ESRI	: Environmental Systems Research Institute
ETM	: Enhanced Thematic Mapper
IFN	: Inventaire Forestier National
MSS	: Multi-Spectral Scanner
NDVI	: Indice de Végétation par Différence Normalisée
OBIA	: Object-based Image Analysis
ROIs	: Regions Of Interest
TSAVI	: Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

1. Introduction

Les ressources naturelles au Maroc évoluent dans un environnement qui subit des transformations rapides. La pression anthropique sur les ressources forestières induit une forte dégradation du couvert végétal (Narjisse et al., 2001). Au cours des dernières décennies, cette dégradation s'est intensifiée et constitue l'un des facteurs responsables de la régression de la superficie forestière au Maroc (El Hadraoui, 2013). Dans le contexte socio-économique actuel du monde rural marocain, il est admis que les écosystèmes forestiers constituent l'une des sources privilégiées pour la satisfaction de leurs besoins humains et du cheptel.

Le bassin versant de l'Ourika n'est pas épargné de cette situation. En effet, les formations végétales qui s'y développent subissent d'une manière continue une forte pression anthropique résultant des prélèvements du bois de feu, du pâturage, des défrichements pour des besoins agricoles et autres (Saidi et al., 2006).

Toutefois, après les événements hydrologiques extrêmes qu'avait connu la zone pendant les années de 1984, 1987, 1995 et 1999, et qui ont attiré l'attention des pouvoirs publics par leurs énormes débits de pointe (respectivement 823, 650, 1030 et 762 m³/s) (El Alaoui El Fels, 2014), de nouvelles orientations de gestion de l'espace et des ressources forestières, ont été édictées.

En effet, après la crue catastrophique de 1995, le département des Eaux et Forêts a mis en place divers aménagements de lutte anti-érosive dans le cadre du projet de développement du bassin versant de l'Ourika. Au total, 6 466 seuils de correction torrentielle, soit un volume de 154 689 m³, ont été mis en place (Anonyme, 2002). Le traitement biologique appliqué a consisté en 3 interventions, dont des reboisements de protection, l'amélioration sylvo-pastorale et la régénération des forêts sur une superficie de 6800 ha (Anonyme, 2002). Ainsi, ces interventions ont été renforcées par l'arrêt des exploitations forestières au niveau du bassin versant (Anonyme, 2002).

Si ces orientations de gestion et interventions de terrain ont été saluées, l'évaluation de leurs impacts sur la reconstitution des écosystèmes naturels et sur leurs effets modérateurs en matière de limitation de l'impact dévastateur des crues n'ont pas été évalués. C'est ainsi que la présente étude se fixe comme objectif l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol pour apprécier l'impact des interventions et aménagements entrepris au niveau du bassin versant.

Nous avons analysé l'évolution de l'occupation du sol, en se basant sur des observations directes et en se servant des techniques de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique (SIG). Cette approche a été privilégiée par plusieurs auteurs (Lu et al., 2010 ; Exilien, 2013 ; Hammi et al., 2007 ; Lecerf, 2008 ; El Hadraoui, 2013 ; Kermadi, 2011 ; etc.). Dans leurs travaux, l'analyse multi-dates des images satellites, permet à la fois de cartographier et d'évaluer la dynamique spatio-temporelle des terres et de comprendre les facteurs responsables des changements observés.

Lors des deux dernières décennies, le progrès qu'avaient connu les SIG, a permis de développer une analyse d'images basée-objet (OBIA) comme alternative à la méthode traditionnelle basée-pixel (Dean et al. 2003). La classification basée-pixel utilise les informations spectrales contenues dans l'image et classe les images en considérant les ressemblances spectrales avec les classes d'occupation prédéfinies (Gao et al. 2006). A l'opposé de la méthode basée-pixel, OBIA travaille sur des objets produits par la segmentation de l'image et plusieurs éléments peuvent être utilisés dans la classification (Hay et al., 2006).

Les méthodes de classification d'images les plus courantes utilisent l'information radiométrique des bandes spectrales pour classifier chaque pixel individuellement (Coppin et al., 2004). L'image issue de la classification est composée de pixels appartenant chacun à une classe particulière. On énumère deux grandes approches en classification, à savoir l'approche non supervisée qui ne suppose pas une connaissance à priori du terrain, et l'approche supervisée qui présuppose que l'on connaît la localisation de quelques zones d'entraînement et leurs étiquetages correspondants (Bonn et al., 2007).

Dans les années 1980, Shaoqing (2008) a classé les méthodes de détection de changements en 5 catégories : la différence d'images, le rapport d'images, les méthodes de comparaison post-classification, l'analyse en composantes principales (ACP) et les méthodes d'analyse visuelle. Lu et al. (2010) les ont classées en deux catégories : méthodes binaires détectant présence/absence du changement comme la différence d'images, le rapport d'images, l'analyse en composantes principales (ACP) et la régression linéaire et celles détectant et identifiant la nature du changement telle que les méthodes de comparaison post-classification, la détection de changements hybride et l'analyse des vecteurs de changements.

Cette étude concernant le sous bassin de l'Ourika vise l'évaluation de l'impact qu'avait connu le bassin versant durant les trente dernières années suite aux aménagements qui y ont été réalisés.

2. Zone d'étude et méthodologie

2.1. Zone d'étude

L'étude concerne le bassin versant de l'Ourika, situé dans le Haut Atlas central, dit aussi Atlas de Marrakech et qui constitue un sous bassin atlasique du grand bassin versant du Tensift.

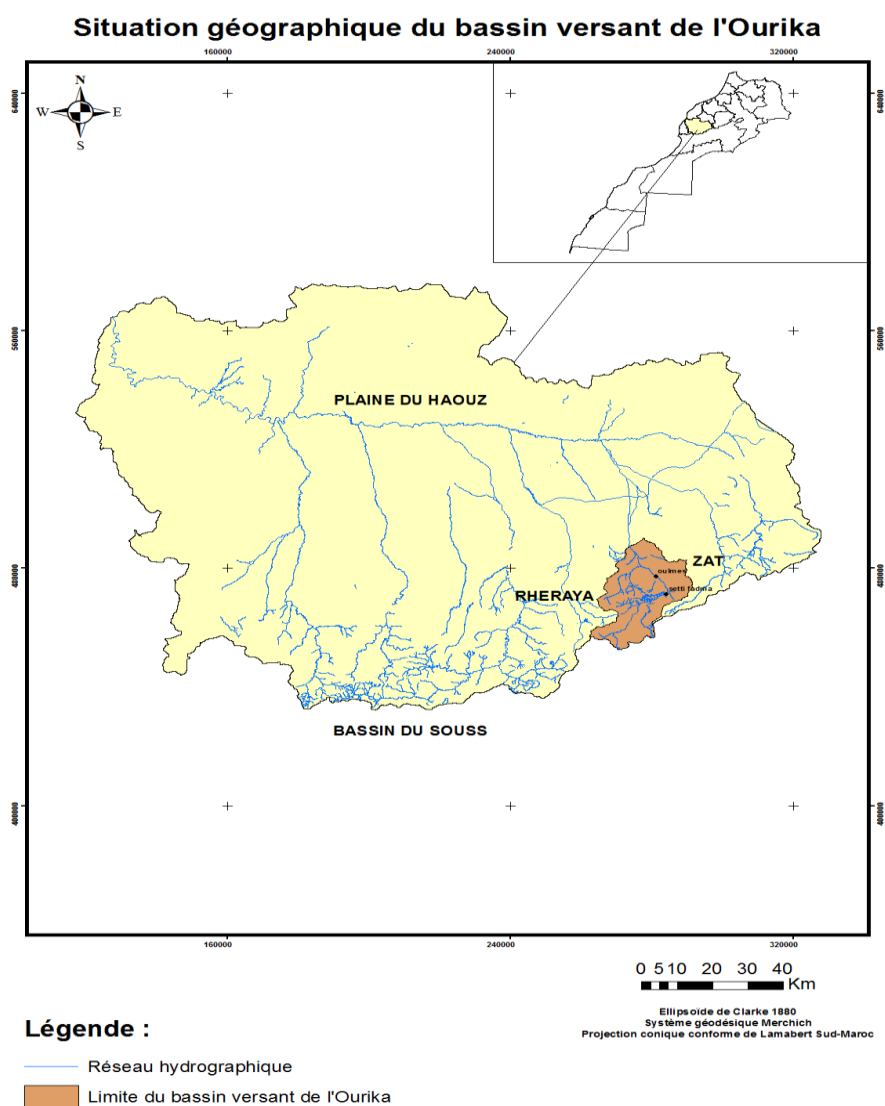


Figure 1. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika

Ce bassin couvre une superficie de 576 km². Il est situé entre les latitudes 31° et 31°21' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest. Il est limité au Sud par le haut bassin de

l'Oued Souss, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin versant de Zat et à l'ouest par le bassin versant de la Rhéraya.

La zone est caractérisée par trois principales unités physiographiques : i) les zones du piémont avec une altitude aux alentours de 600 m ; ii) les vallées de l'Oued Ourika et ses affluents ; et iii) les zones de haute montagne et les plateaux d'altitude.

Sur le plan topographique, l'altitude moyenne s'élève à 2500 m avec prédominance des terrains compris entre 1600 et 3200 m (75%). Le point culminant du bassin est celui de Jbel Iferouane (4001 m) et l'exutoire du bassin versant se trouve à une altitude de 848 m.

Sur le plan bioclimatique, le bassin versant de l'Ourika est assujéti à un bioclimat semi-aride à variante fraîche, caractérisé par la dominance du régime pluviométrique HPAE où le maximum des précipitations est recueilli pendant l'hiver et le printemps (Saidi et al., 2006). En effet, sur une période de 35 ans (1976-2011), la pluviosité annuelle varie entre 525.9 mm à la station d'Aghbalou et 321.2 mm à la station d'Agouns. La saison d'été est caractérisée par de forts orages provoquant des pulsations brutales du cours d'eau. La température quant à elle, elle varie entre 48.2°C et -7.2°C, avec une moyenne de 27.8°C.

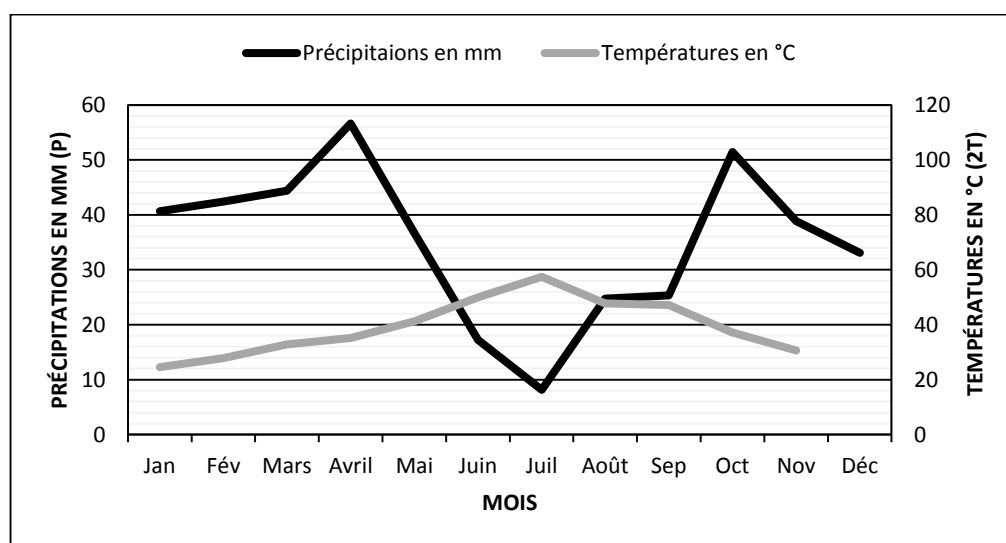


Figure 2. Diagramme ombro-thermique de la station d'Aghbalou (1976-2011)

Le couvert végétal au niveau de la zone se trouve en grande partie dans l'étage Oroméditerranéen à base de matorrals de xérophytes épineuses et d'hémicryptophytes d'altitude (Ouhammou). La même composition domine au niveau du Montagnard, qui est marqué aussi par la présence de quelques pieds de genévrier. La végétation arborée au niveau du bassin versant, est représentée par les étages Méditerranéen,

Mésoméditerranéen et Thermoméditerranéen. Il s'agit essentiellement de forêts de chêne vert, de genévrier rouge, de thuya, de lentisque et d'oléastre (Ouhammou, 1991b).

2.2. Méthodologie

Les données utilisées pour cette étude sont essentiellement des données spatiales et quelques informations sur la nature de l'occupation du sol récoltées sur le terrain. Les données spatiales, comprennent des images satellitaires et une carte topographique (1:100 000).

Dans le but de réduire les effets de sources externes au système comme l'angle du soleil, les différences saisonnières et phénologiques, nous avons choisi des images satellites correspondant au même satellite, avec les mêmes résolutions radiométriques et acquises à des dates proches ou durant la même saison (Tableau 1).

Tableau 1. Images satellitaires utilisées pour cette étude (Téléchargeable sur www.glovis.usgs.gov)

Identifiant d'image	Date d'acquisition	Satellite	Capteur	Résolution spatiale (m)
1	26/09/1984	Landsat 5	MSS	60*60
2	12/07/2000	Landsat 7	ETM +	30*30
3	27/07/2014	Landsat 8	OLI	30*30

Pour le traitement de l'information spatiale, nous avons eu recours aux logiciels ENVI 5.0 d'EXELIS pour le traitement d'images et ArcGis d'ESRI pour des manipulations de données et l'habillage des cartes élaborées.

2.2.1. Cartographie des occupations du sol

2.2.1.1. Prétraitement et classification des images satellitaires

Dans une première étape, les images ont été géoréférencées selon la projection conique conforme de Lambert et calées selon le système de coordonnées de référence de la zone Merchich Sud (Système du Sud du Maroc, zone 2).

2.2.1.2. Classification des images

La classification des images a été effectuée en adoptant l'approche supervisée par application de l'algorithme du maximum de vraisemblance. Les sites d'entraînement

nécessaires à la classification ont été choisis de manière visuelle en se basant sur la composition colorée de chaque image et sur les données de l'IFN de 1994.

La discrimination de la classe « sol nu » a été facilitée par le calcul de l'indice de brillance et l'indice TSAVI. Toutefois, la détermination des autres classes a été renforcée par le calcul du recouvrement à base de l'indice NDVI.

La précision de la classification a été appréciée à travers l'exploitation de la matrice de confusion et le calcul de la précision globale de la classification, du coefficient Kappa et des erreurs d'omission et de commission (Lillesand et al., 2004).

Après la définition des différents types d'occupation du sol à considérer, nous avons mené une campagne de terrain afin de valider les cartes d'occupation établies.

Nous avons choisi des points de contrôle aux endroits critiques, où deux types d'occupation du sol pourraient être confondus lors du procédé de classification (Richards et al., 2005).

De retour, les polygones pris sur le terrain ont servi pour créer le fichier des régions d'intérêt ou sites d'entraînement (ROIs) correspondant à la vérité terrain. Ce dernier a été utilisé pour la vérification des classifications des cartes d'occupation du sol et l'établissement des cartes de changements définitifs (Lecerf, 2008).

L'élaboration de la carte d'occupation du sol correspondant à l'année 1984 a nécessité l'utilisation d'une image Landsat_5_MSS. Cette image caractérisée par une faible résolution spectrale et spatiale (60*60 m) n'a pas permis la distinction détaillée de toutes les unités cartographiques existantes sur la zone d'étude. Pour suivre l'évolution de la végétation, six unités cartographiques ont été définies d'une manière plutôt approximative et qualitative :

- **les forêts denses** : c'est une formation végétale dont le recouvrement de la strate arborée et arbustive est supérieur à 66 % et la strate herbacée y est plus ou moins importante. Cette formation est composée essentiellement du chêne vert, du genévrier rouge, du thuya, du lentisque et de l'oléastre ;
- **les forêts moyennement denses** : représentent les stades de dégradation de la forêt naturelle dont le recouvrement de la strate arborée et arbustive est compris entre 33 et 66 %. Elle est de la même composition que la strate dense ;

- **les forêts claires** : c'est le stade de dégradation de la forêt naturelle dont le recouvrement de la strate arborée et arbustive est compris entre 10 et 33 % ;
- **les cultures en terrasses + Arboriculture** : Ce sont des terrains plantés en arbres fruitiers (oliviers, rosacées, etc.) avec des cultures irriguées en terrasses ;
- **le sol nu** : regroupe les affleurements rocheux et les espaces bétonnés ;
- **le matorral et les vides asylvatiques** : la végétation arborée est éliminée par le froid et la neige, les seules formations végétales qui s'y développent sont des groupements steppiques de xérophytes épineux en coussinets et les hémicryptophytes d'altitude.

Ensuite, l'établissement de la carte d'occupation du sol correspondant à l'année 2000 a nécessité l'utilisation d'une image Landsat_7_ETM+. La résolution de cette image (30*30) a permis la distinction des mêmes classes que pour l'année 1984.

Enfin, la carte d'occupation du sol correspondant de 2014 a nécessité l'utilisation d'une image Landsat_8_OLI. En effet, La classification a révélé l'apparition de nouvelles classes d'occupation du sol faisant un total de 10 classes.

Afin de permettre la superposition de la carte de 2014 avec les autres cartes, on a regroupé certaines classes en une seule classe.

2.2.2. Détection de changements

La détection de changements a été basée sur la soustraction d'images. Cette méthode met en œuvre deux images et utilise des techniques de détection pour extraire les changements entre deux dates d'acquisition (Sui H. et al., 2008).

Après application de la méthode précitée, une matrice de changements a été générée. C'est une matrice carrée décrivant, de manière condensée, les changements d'état d'occupation du sol pendant la période considérée (Zanini et al., 2006 ; Bamba et al., 2008; Inoussa et al., 2011). Elle procure l'information concernant la nature du changement et son intensité, mais ne fournit aucune information sur la distribution spatiale du changement ni ses causes (Zanini et al., 2006). Il était difficile de collecter la vérité terrain pour l'évaluation de la détection de changements vu que les dates d'acquisitions des images utilisées sont anciennes. Toutefois, on s'est basé sur une interprétation visuelle à partir des données utilisées. Les échantillons ont été choisis de telle façon qu'ils assurent une bonne

couverture de la zone (une trentaine d'échantillons par strate) et aux endroits où deux types d'occupation du sol pouvaient être confondus.

3. Résultats et discussions

L'analyse de la dynamique spatiale au niveau du bassin versant de l'Ourika a été basée sur l'analyse de l'évolution en termes de superficie des unités d'occupation du sol.

L'objectif est de faire apparaître l'évolution dans le temps, des six strates : « forêt dense », « forêt moyennement dense », « forêt claire », « sol nu », « cultures en terrasses » et « Matorral + vides asylvatiques ».

3.1. Etat de l'occupation des sols entre 1984 et 2014

L'analyse de la classification des images montre que le matorral et les vides asylvatiques occupent plus que la moitié de la superficie du bassin versant. La forêt a connu une forte régression en passant de 32.45 % de la superficie du bassin versant en 1984 à 25.89 % en 2000. Cependant, en 2014 on remarque que la superficie forestière a évolué pour présenter 31.41 % de la superficie du bassin versant. Le taux de couverture des sols nus est passé de 10.54 % en 1984 à 16.58 % en 2000. Ce taux a diminué par la suite pour devenir 12.41 % en 2014. La surface agricole a évolué pendant les trente années étudiées en passant de 1.51% en 1984 à 3.91 % en 2014.

Carte du réseau hydrographique et de l'occupation du sol 1984

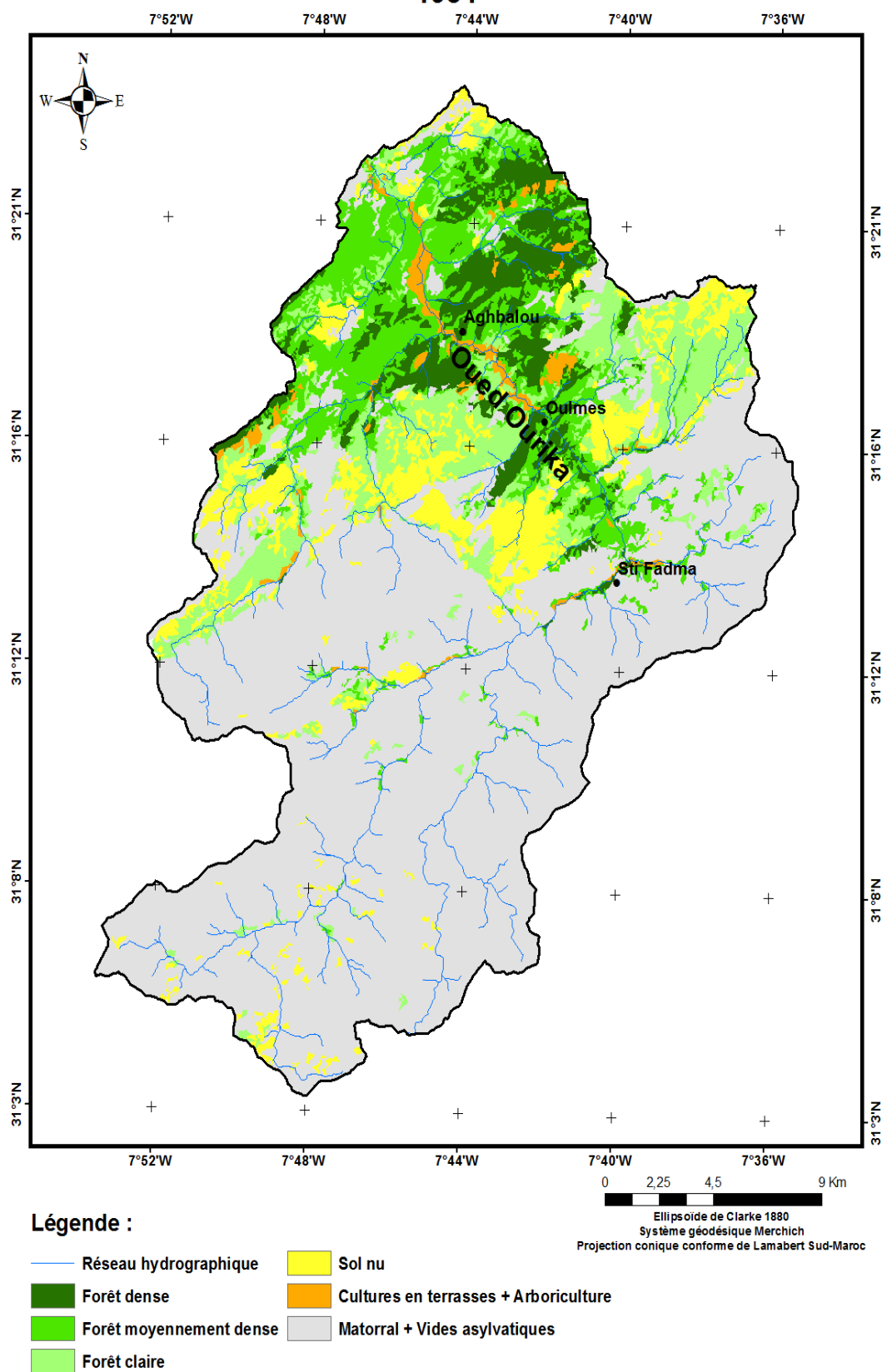


Figure 3. Carte du réseau hydrographique et d'occupation des sols, 1984

Carte du réseau hydrographique et de l'occupation du sol 2000

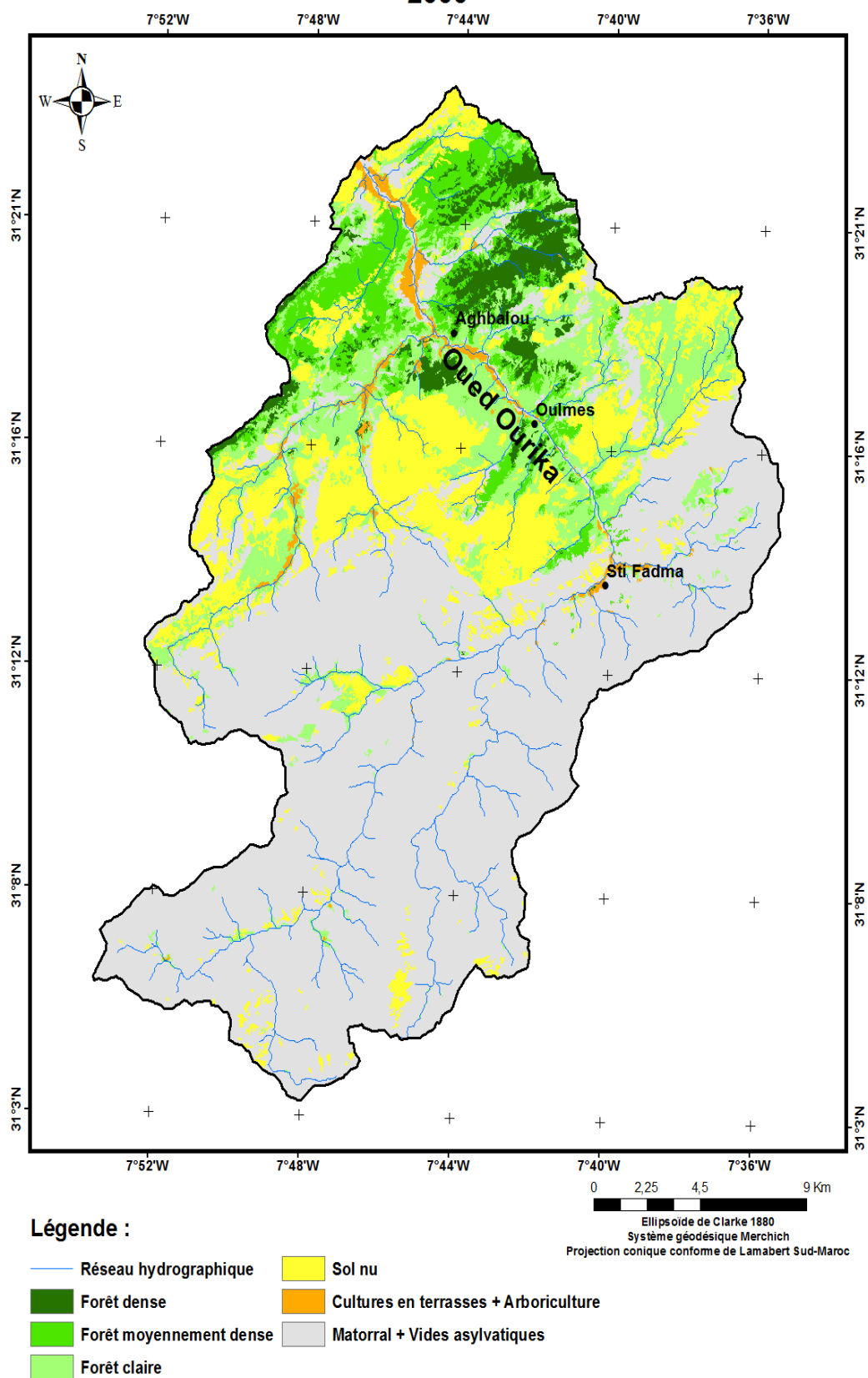


Figure 4. Carte du réseau hydrographique et d'occupation des sols, 2000

Carte du réseau hydrographique et de l'occupation du sol 2014

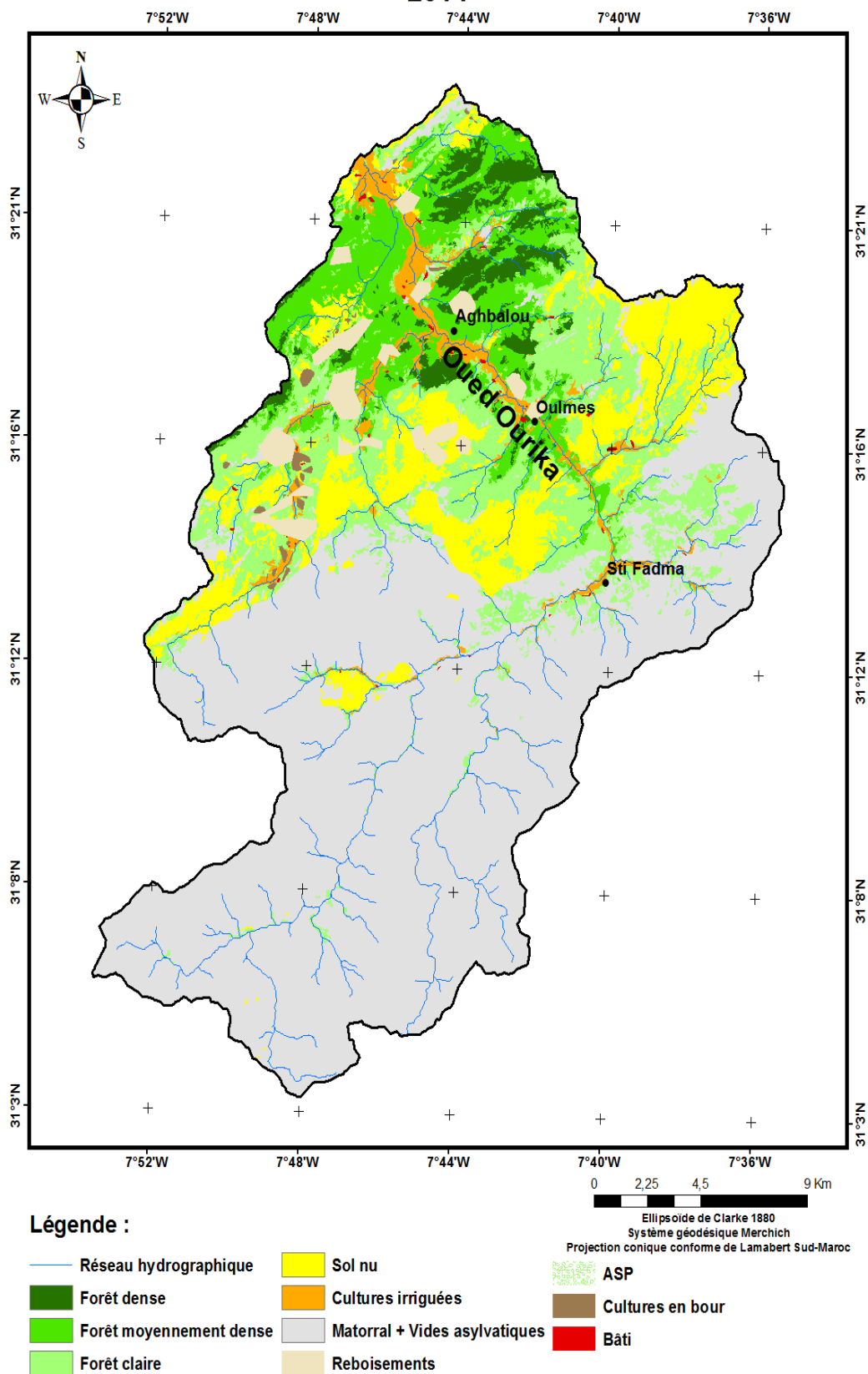


Figure 5. Carte du réseau hydrographique et d'occupation des sols, 2014

Les résultats de la classification des images sont consignés au tableau 2.

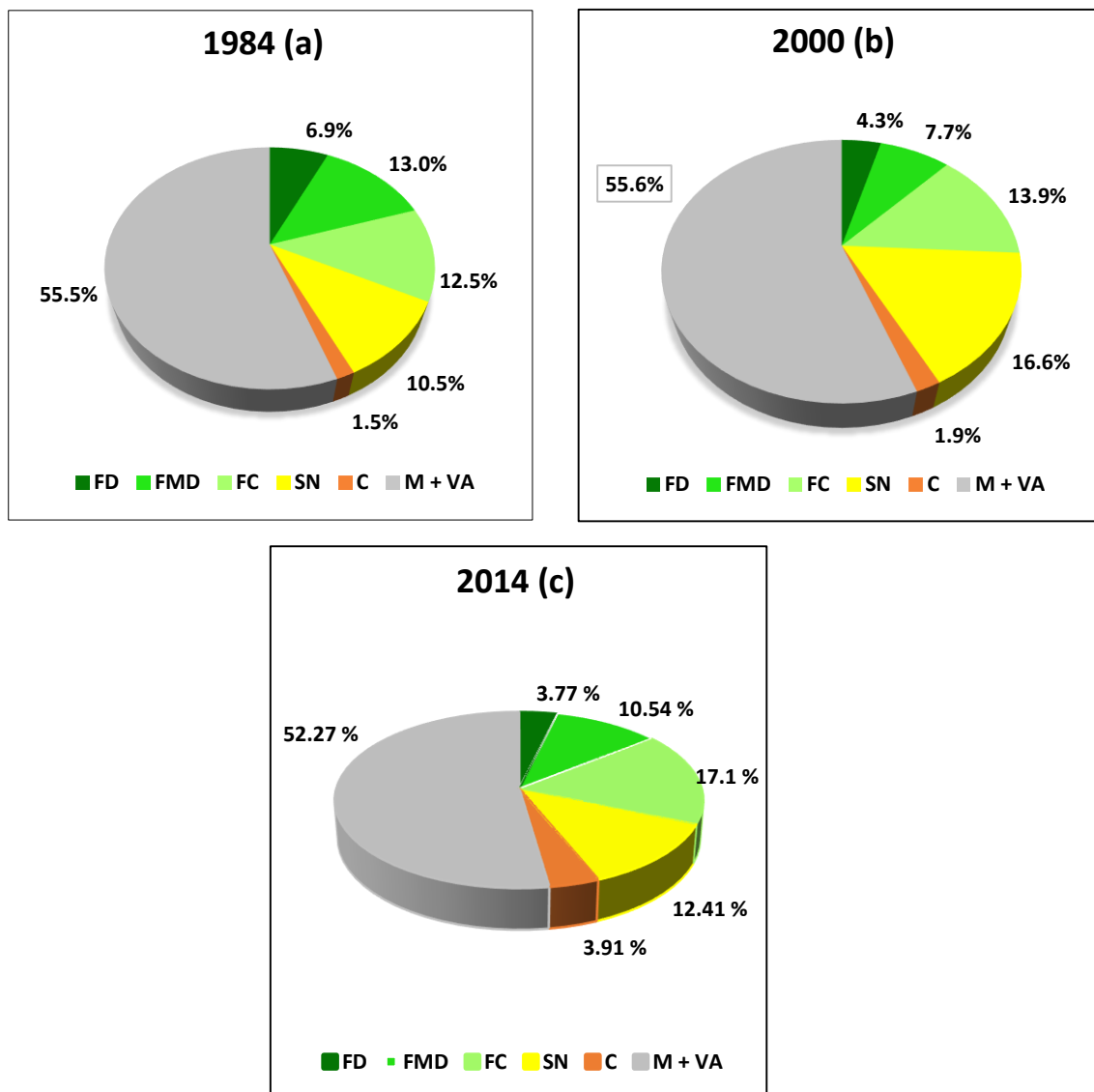
Tableau 2. Superficie et taux de couverture des unités d'occupation des sols du bassin versant de l'Ourika entre 1984 et 2014

Unités de l'occupation	1984		2000		2014	
	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)
Forêt dense	3 989.02	32.45	2 446.06	25.89	2 172.26	31.41
Forêt moy. Dense	7 506.34		4 434.12		6 070.86	
Forêt claire	7 190.8		8 032.84		9 844.18	
Sol nu	6 071.4	10.54	9 552.24	16.58	7 150.88	12.41
Cultures en terrasses + Arboriculture	875.16	1.51	1 085.74	1.89	2 254.57	3.91
Matorral + Vides asylvatiques	31 967.28	55.50	32 049	55.64	30 107.79	52.27
Total	57 600	100.00	57 600	100.00	57 600	100.00

3.2. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols entre 1984 et 2014

L'analyse de la classification de l'image de 1984 montre que plus de la moitié de la superficie du bassin versant était un matorral et des vides asylvatiques (55.50 %), l'autre moitié était en grande partie couverte de forêts occupant 32.45 % de la superficie du bassin versant, dont 6.93 % est à base de forêts denses, 13.04 % de forêts moyennement denses et 12.48 % de forêts basses et claires. Les sols nus occupaient de leur part une bonne partie du bassin, avec 10.54 %. Quant aux terrains agricoles, elles ne couvraient que 1.51 % de la superficie du bassin versant et ont été localisés essentiellement le long de la vallée.

L'interprétation de la carte de 2000 montre une régression de l'espace forestier qui ne couvre que 25.89 %, avec une nette augmentation de la superficie des forêts claires, des sols nus et des terrains agricoles qui continuent à se développer au niveau de la vallée.



FD : Forêt dense ; **FMD** : Forêt moy. dense ; **FC** : Forêt claire ; **SN** : Sol nu ; **C** : Cultures ; **M + VA** : Matorral + Vides asylvatiques.

Figure 6. Occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika : (a) en 1984; (b) en 2000 ; (c) en 2014

Cependant, la carte de 2014 montre une dynamique progressive des ressources forestières. En effet, la couverture forestière a augmenté de 5.52 % par rapport à 2000, soit un taux de couverture de 31.41 % par rapport à la superficie du bassin versant. Toutefois, elle montre que les terrains agricoles ont gagné l'altitude au centre Ouest de la zone.

Le tableau 3 montre que les classifications ont permis d'avoir des valeurs élevées du coefficient Kappa. Ces valeurs permettent de conclure que les classifications des images de 1984, 2000 et 2014 sont fortement cohérentes avec les observations terrain (il n'existe

pas de grandes confusions entre les classes) et par conséquent, les résultats de ces classifications sont statistiquement acceptables.

Tableau 3. Taux de précision de la classification des images de 1984 et de 2000

Image	Précision globale (O.A.)	Coefficient Kappa
1984	87.50 %	0.81
2000	86.83 %	0.80
2014	92.22 %	0.88

Quant au tableau 4, il montre que la classification est précise et les erreurs de commission n'excèdent pas 26.87 % pour la classification de 1984, 27.59 % pour celle de 2000 et 24.11 % pour 2014, tandis que les erreurs d'omission sont de l'ordre de 28.42 %, 40.56 % et 29.04 % respectivement pour les classifications de 1984, 2000 et 2014.

Tableau 4. Erreurs de commission/omission pour les classifications de 1984 et 2000

	1984		2000		2014	
	Commission	Omission	Commission	Omission	Commission	Omission
Forêt dense	12.03	19.14	2.58	23.36	24.11	22.05
Forêt moy. Dense	26.87	24.96	19.12	34.14	17.75	29.04
Forêt claire	14.44	19.75	28.42	32.74	12.77	15.62
Sol nu	21.03	27.59	20.15	14.91	2.73	1.32
Cultures en terrasses	1.99	27.24	2.39	40.56	3.15	9.17
Matorral + Vides asylv.	7.63	2.85	7.36	1.03	4.67	0.7

L'analyse de la carte des changements intervenus dans la bassin versant pendant la période 1984-2000, montre qu'une grande partie du bassin versant n'a pas subi de changement entre 1984 et 2000 (57.50 %), c'est la partie située en amont du bassin versant. Les changements encourus présentent une prédominance des changements négatifs (22.50 % de la superficie du bassin versant). Ces changements concernent essentiellement la régression des trois strates de la forêt sur les trois communes rurales d'Ourika, Sti Fadma et Oukaimden. Quant aux changements positifs (20 % de la superficie du bassin versant), ils se localisent, d'une part le long de la vallée, à travers le développement des terrasses agricoles. D'autre part, au niveau de la partie centre-Ouest du bassin versant, où les sols nus se sont développés.

Carte des changements intervenus dans l'occupation du sol 1984-2000

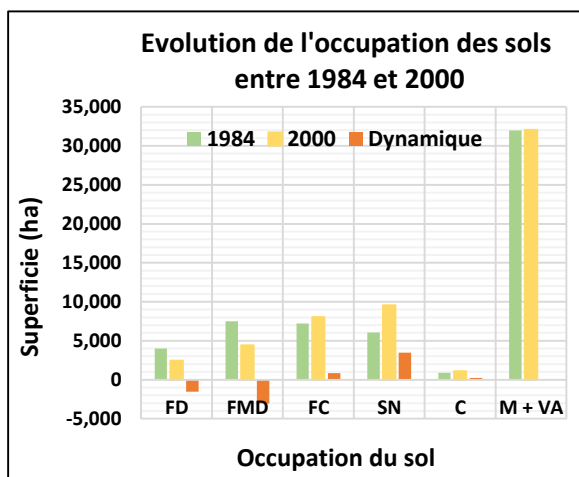
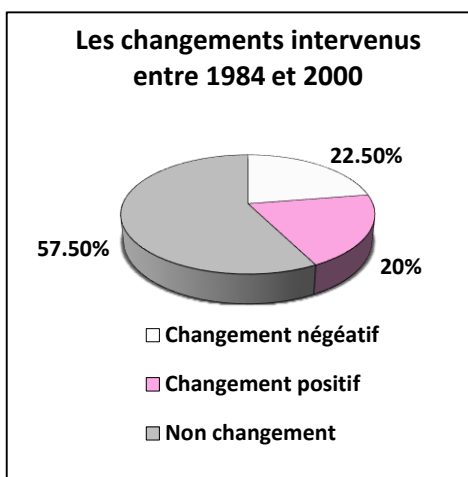
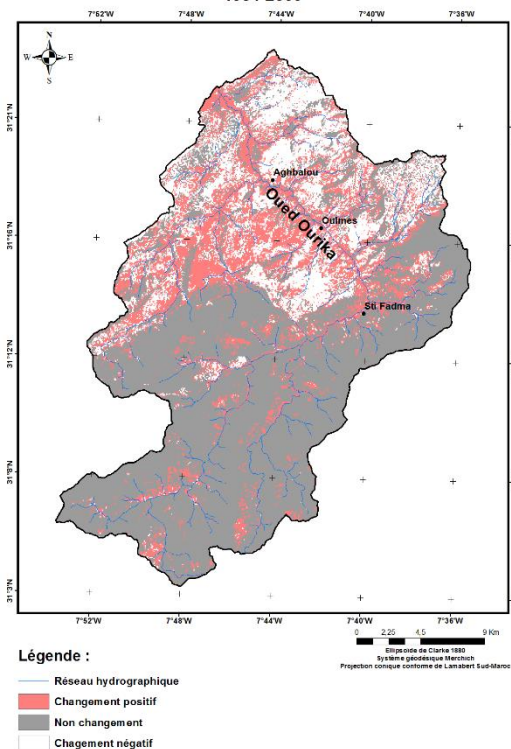


Figure 7. Changements intervenus dans l'occupation des sols entre 1984 et 2000

Ainsi, la matrice des changements intervenus entre 1984 et 2000 présentée dans le tableau 5, montre la disparition de plus du tiers du couvert végétal dense (1 542.96 ha, soit 38.68 % par à sa superficie en 1984) au profit de la strate moyennement dense et de la strate claire qui ont pris 1 153.08 ha et 835.92 ha, respectivement. En contrepartie, la strate dense a gagné une superficie de 532.44 ha au détriment du couvert moyennement dense et 161.64 ha au dépens des terrains agricoles. Ces changements ont été opérés en grande partie au niveau de la commune rurale de St. Fadma.

La superficie de la strate moyennement dense a régressé de 40.93 % en 2000 par rapport à 1984, soit une superficie de 3 072.22 ha. Ce recul a été fait en grande partie au profit de la strate claire et a concerné les trois communes rurales d'Ourika, de Sti Fadma et celle d'Oukaimden.

Cette période a été aussi marquée par la forte évolution qu'avait connue la classe des sols nus. Sa superficie a augmenté de 57.33 % en 2000 par rapport à 1984. Cette évolution s'est faite essentiellement au détriment de la strate claire et se localise en grande partie sur le territoire des communes rurales de Sti Fadma et Oukaimden.

Les changements relevés durant cette période peuvent être expliqués d'une part, par les sécheresses répétées que le bassin versant de l'Ourika avait connu au cours de ces années. Ces sécheresses ont amené les communautés villageoises à s'orienter vers l'exploitation des ressources forestières pour assurer leurs besoins de survie (Bouarais, 2015). D'autre part, la forêt constituait une source d'approvisionnement alimentaire, total ou partiel, des troupeaux. En même temps, elle servait de source de revenus pour les agriculteurs dont les activités agricoles se trouvaient remises en cause par les fluctuations pluviométriques (Bouarais, 2015).

Tableau 5. Matrice des changements intervenus dans l'occupation des sols entre 1984 et 2000

Classes thématiques		Etat initial en 1984 (ha)						Total des classes de 2000
		FD	FMD	FC	SN	C	M + VA	
Etat final en 2000 (ha)	FD	1 671.7	532.44	49.32	3.6	161.64	27.36	2 446.06
	FMD	1 153.08	2 302.92	509.4	46.08	243	179.64	4 434.12
	FC	835.92	2 637.36	2 945.32	621	105.84	887.4	8 032.84
	SN	56.52	595.08	2 550.96	3 987.72	3.96	2358	9 552.24
	C	131.4	112.3	383.4	51.84	315	91.8	1 085.74
	M + VA	140.4	1 326.24	752.4	1 361.16	45.72	28 423.08	32 049
Total des classes de 1984		3 989.02	7 506.34	7 190.8	6 071.4	875.16	31 967.28	57 600
Différence par rapport à 1984 (ha)		-1 542.96	-3 072.22	842.04	3 480.84	210.58	81.72	
Différence par rapport à 1984 (%)		-38.68%	-40.93%	+11.71%	+57.33%	+24.06%	+0.26%	
Changement en % par rapport à la superficie du bassin versant		-2.68%	-5.33%	+1.46%	+6.04%	+0.37%	+0.14%	

FD : Forêt dense ; **FMD** : Forêt moy. dense ; **FC** : Forêt claire ; **SN** : Sol nu ; **C** : Cultures ; **M + VA** : Matorral + Vides asylvatiques.

Pour la période 2000-2014, la carte de changement montre que 75.86 % de la superficie du bassin n'a subi aucun changement. La plus grande part des changements apparus est de nature positive. En effet, 16.37 % de la superficie du bassin versant a connu un changement positif. Il s'agit essentiellement d'une évolution de la strate claire, de la strate moyennement dense ainsi que le développement des terrasses agricoles au niveau de la montagne. Ces changements concernent la partie centrale du bassin versant. Quant aux changements négatifs (7.77 % de la superficie du bassin versant), ils concernent en grande partie la régression des sols nus. Cette régression a été opérée au niveau de toute la zone.

Les données planimétriques de la carte de 2014 ainsi que la matrice de changement présentée sur le tableau 6, montrent que la strate dense continue à se dégrader mais avec un rythme moins rapide qu'auparavant. En effet, durant cette période la formation forestière dense a diminué de 11.19 % par rapport à l'année 2000, soit 0.48 % de la superficie du bassin versant. Quant à la végétation moyennement dense, elle a subi une dynamique progressive très marquée, en gagnant 36.91 % de la superficie par rapport à celle de l'année 2000, de même pour la végétation claire qui a gagné 22.55 %. Ces changements se localisent sur le territoire des trois communes d'Ourika, Sti Fadma et Oukaimden.

Carte des changements intervenus dans l'occupation du sol 2000-2014

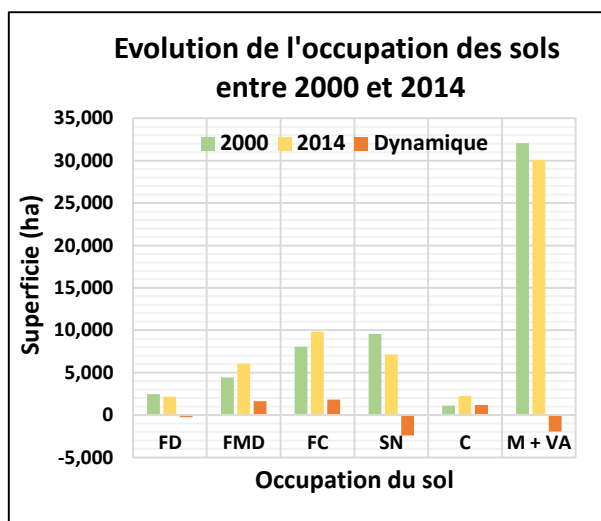
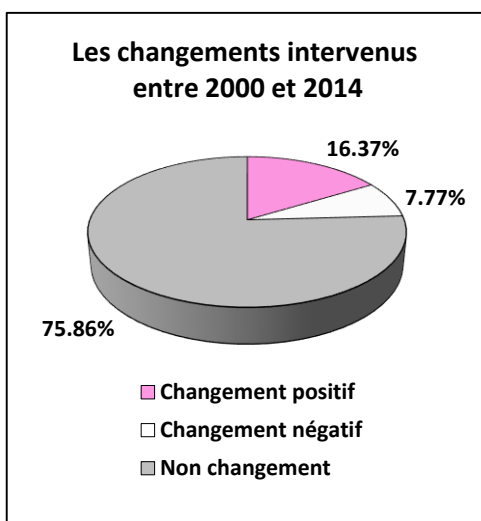
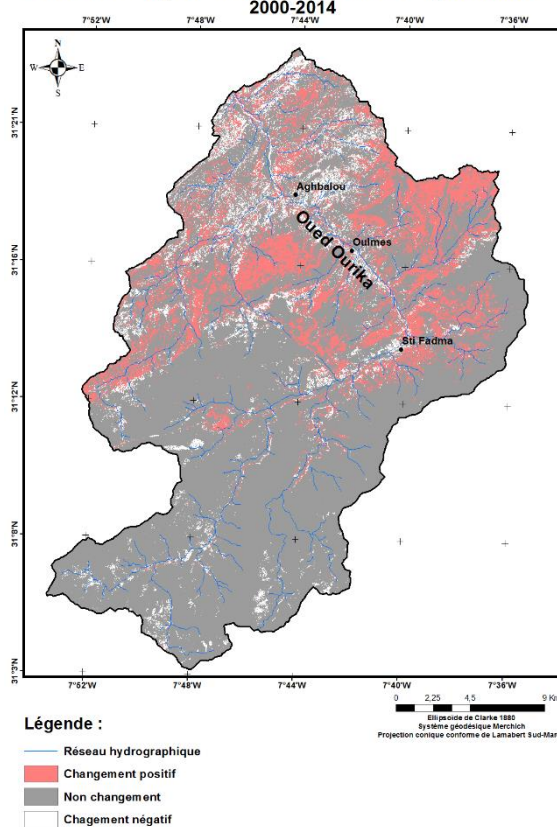


Figure 8. Changements intervenus dans l'occupation des sols entre 2000 et 2014

Le résultat de la matrice de changement montre également que les terrains de culture ont progressé de 107.60 %. Ceci renseigne sur une anthropisation très accélérée du bassin versant d'Ourika (2.03 % de la surface du bassin convertie en culture sur une période de 14 ans). Les cultures ont gagné plus l'altitude par rapport à l'année de 2000.

Les changements survenus dans l'occupation du sol entre 2000 et 2014, peuvent être expliqués par l'intervention du département des eaux et forêts dans la zone, suite aux

crues catastrophiques des années 90, à travers l'arrêt des exploitations et la réalisation de plusieurs reboisements (Anonyme, 2002). Ainsi, les changements socio-économiques (rareté de la main d'œuvre, diminution de l'effectif du cheptel, besoins de plus en plus croissant, etc.) ont conduit la population à recourir à d'autres formes de production, autres que l'élevage (Bouarais, 2015).

D'un autre côté, la vallée de l'Ourika est très réputée pour son paysage verdoyant et sa fraîcheur en été. Elle connaît donc une affluence touristique importante surtout pendant la période estivale où l'on dénombre plus de 10 000 visiteurs par jour (Anonyme, 2002). Chose qui a permis de créer d'autres sources de revenus pour la population locale, et d'alléger la pression sur les ressources naturelles (Bouarais, 2015).

Tableau 6. Matrice des changements intervenus entre 2000 et 2014 dans l'occupation des sols

Classes thématiques		Etat initial en 2000 (ha)						Total des classes de 2014
		FD	FMD	FC	SN	C	M + VA	
Etat final en 2014 (ha)	FD	1 434.28	570.87	89.01	61	15.3	1.8	2 172.26
	FMD	740.79	3 098.43	1 792.17	147.24	32.85	259.38	6 070.86
	FC	233.73	690.12	4057.27	2 530.26	92.43	2 240.37	9 844.18
	SN	0.9	19.17	1 202.22	5 645.63	1.08	281.88	7 150.88
	C	34.74	10.53	617.31	157.5	937.33	496.62	2 254.03
	M + VA	1.62	45	274.86	1 010.61	6.75	28 768.95	30 107.79
Total des classes de 2000		2 446.06	4 434.12	8 032.84	9 552.24	1 085.74	32 049	57 600
Différence par rapport à 2000 (ha)		-273.8	1 636.74	1 811.34	-2 401.36	1 168.29	-1 941.21	
Différence par rapport à 2000 (%)		-11.19%	+36.91%	+22.55%	-25.14%	+107.60%	-6.06%	
Changement en % par rapport à la superficie du bassin versant		-0.48%	+2.84%	+3.14%	-4.17%	+2.03%	-3.37%	

FD : Forêt dense ; **FMD** : Forêt moy. dense ; **FC** : Forêt claire ; **SN** : Sol nu ; **C** : Cultures ; **M + VA** : Matorral + Vides asylvatiques.

La carte de changement montre que 52.43 % de la superficie du bassin n'a subi aucun changement lors de la période de 1984-2014, et que la plus grande part des changements apparus est de nature négative. En effet, 31.2 % de la superficie du bassin versant a connu un changement négatif. Il s'agit essentiellement d'un recul de la strate dense de la strate moyennement dense. Ces changements concernent la partie Nord-Est du bassin versant. Les changements positifs (16.37 % de la superficie du bassin versant), concernent en grande partie le développement des terrains agricoles au long de la vallée, ainsi que les sols nus localisés essentiellement à l'Ouest de la zone.

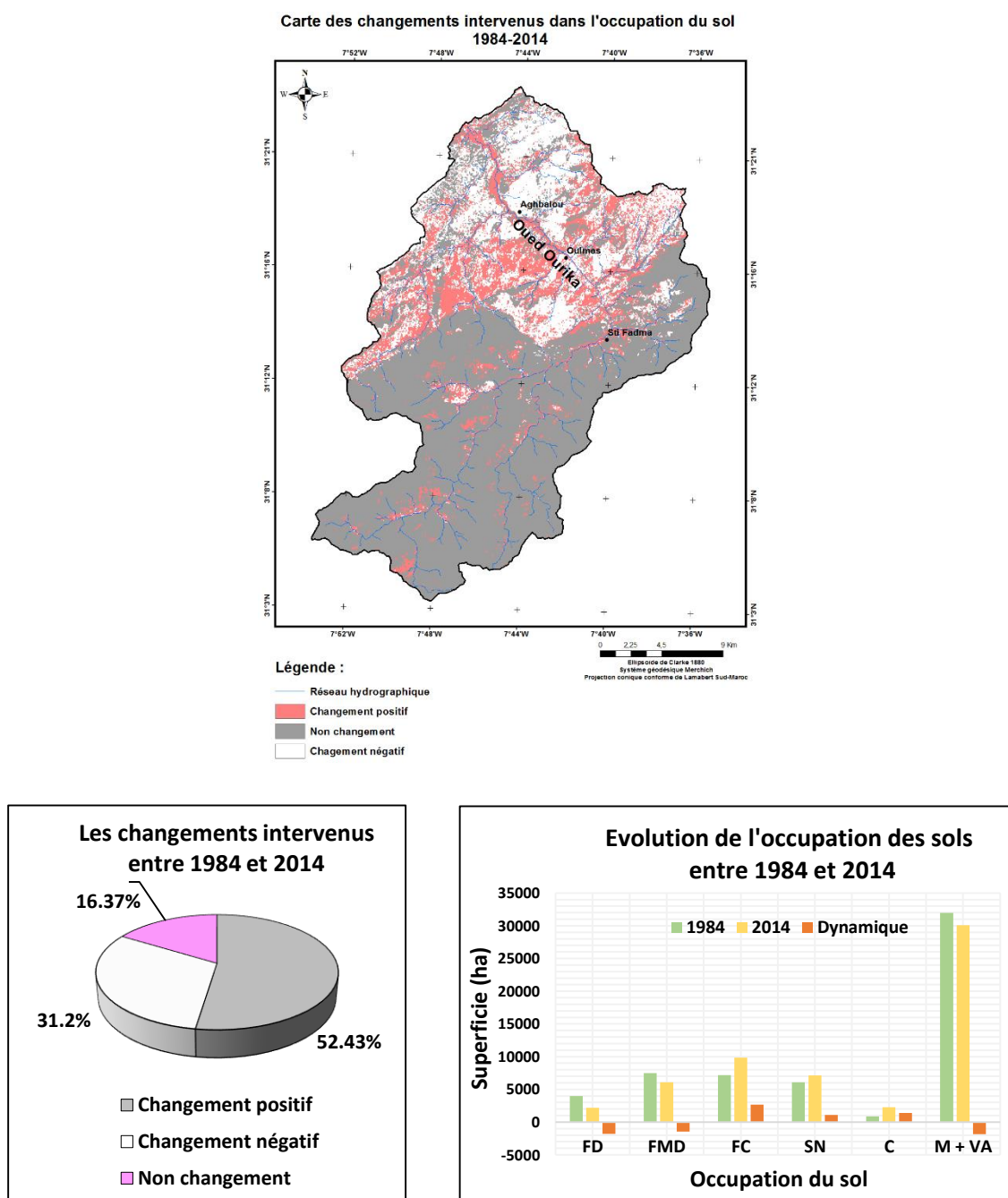


Figure 9. Changements intervenus dans l'occupation des sols entre 1984 et 2014

La matrice des changements intervenus entre 1984 et 2014 présentée dans le tableau 6, montre la disparition de plus que 45% de la couverture forestière dense (1 16.76 ha, soit) au profit de la strate moyennement dense, de la strate claire et des terrains agricoles qui ont pris successivement 1457.28 ha, 668.59 ha et 306.36 ha. Ces changements se sont produits en grande partie au niveau de la commune rurale d'Ourika.

La superficie de la strate moyennement dense, a régressé de 19.12 % par rapport à 1984, soit une superficie de 1435.48 ha. Ce recul s'est produit en grande partie au profit de la strate claire et a concerné les deux communes rurales d'Ourika, et d'Oukaimden.

La strate claire a connu une évolution importante pendant les trente années étudiées. En effet, sa superficie en 2014 a augmenté de 36.90 % par rapport à 1984.

Cette période a été aussi marquée par la forte évolution qu'avait connue l'agriculture dans la zone. Sa superficie est passée de 875.16 ha en 1984, à 2254.03 en 2014. Soit une évolution de 157.56 %. Cette évolution s'est faite essentiellement au détriment de la strate claire et se localise en grande partie au niveau de la vallée.

Les changements relevés durant la période de 1984 à 2014, donnent référence aux deux périodes étudiées précédemment. En effet, la zone a connu une dynamique régressive du couvert végétal avant les années 2000. Cette période marquée par de nombreuses crues mortelles, a suscité l'attention des décideurs, ce qui a permis la mise en place de divers aménagements dans le but de rétablir le couvert végétal et atténuer le risque d'inondation. Cependant, les ressources forestières demeurent toujours moins denses et moins importantes qu'avant par comparaison à la période antérieure à 1984.

Tableau 7. Matrice des changements intervenus entre 1984 et 2014 dans l'occupation des sols

Classes thématiques	Etat initial en 1984 (ha)						Total des classes de 2014	
	FD	FMD	FC	SN	C	M + VA		
Etat final en 2014 (ha)	FD	1 504.23	421.56	117.07	61	51.84	16.56	2 172.26
	FMD	1 457.28	3 158.98	937.28	79.56	161.28	276.48	6 070.86
	FC	668.59	2359.8	3 631.48	0.00	212.51	2 971.80	9 844.18
	SN	14.04	258.48	1 651.86	4 231.64	35.82	959.04	7 150.88
	C	306.36	686.88	320.04	441.83	301.64	197.28	2 254.03
	M + VA	38.52	620.64	533.07	1 257.37	112.07	27 546.12	30 107.79
Total des classes de 1984	3 989.02	7 506.34	7 190.80	6 071.40	875.16	31 967.28	57 600	
Différence par rapport à 1984 (ha)	-1 816.76	-1 435.48	2 653.38	1 079.48	1378.87	-1 859.49		

Différence par rapport à 1984 (%)	-45.54%	-19.12%	+36.90%	+17.78%	+157.56%	-5.82%
Changement en % par rapport à la superficie du bassin versant	-3.15%	-2.49%	+4.61%	+1.87%	+2.39%	-3.23%

Conclusion et recommandations

Suite aux crues catastrophiques qu'avait connues la zone pendant les années 90, un nouveau mode de gestion et une dynamique socio-spatiale importante ont marqué les quatorze (14) dernières années. Afin d'en apprécier l'impact, une évaluation de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols a été réalisée.

Il en ressort que les ressources forestières ont fortement régressé au cours de la période 1984-2014. En effet, le couvert forestier représentait 32.45 % de la superficie du bassin en 1984, tandis qu'en 2000, il n'en représentait que 25.89 %. Par la suite, une évolution a été constatée pour présenter, en 2014, l'équivalent de 31.41 % de la superficie du bassin versant.

A la lumière de ces résultats, on peut conclure que les choix du gestionnaire, conjugués à la dynamique socio-spatiale qu'avait connu la zone pendant les quatorze (14) dernières années ainsi que le développement du tourisme, ont permis d'alléger la pression sur les ressources naturelles et par conséquent ont contribué la reconstitution des écosystèmes naturelles au niveau du bassin versant.

Toutefois, ces résultats auraient été plus précis si on avait utilisé des images à haute résolution spatiale et spectrale afin de pouvoir extraire plus de détail par rapport aux occupations du sol (discriminer le sol nu des bâtis et infrastructures).

Références bibliographiques

- Andréassian, 2002.** Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Tome 1. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. Ecole doctorale : Géosciences et Ressources Naturelles Spécialité : Hydrologie. 276 p.
- Anonyme, 2002.** Procès-verbal d'aménagement de la forêt d'Ourika, HCEFLCD.
- Bamba et al., 2008.** Influence des Actions Anthropique sur la Dynamique Spatio-Temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas Congo (R.D. Congo). Sciences & Nature, VOL. 5, N 1, pp. 49-60.
- Bonn et al, 2007.** Précis de télédétection : Principe et méthodes, Vol.1, presse de l'université du Québec, Québec.
- Bouarais, 2015.** Contribution à la compréhension des enjeux environnementaux et des jeux d'acteurs qui conditionnent l'exploitation et la gestion des ressources naturelles dans le bassin versant de l'Ourika. Mémoire de 3ème cycle. Aménagement des Forêts. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs.
- Coppin et al., 2004.** Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. International Journal of Remote Sensing 25(9), pp. 1565-1596.
- Dean et al, 2003.** An evaluation of per-parcel land cover mapping using maximum likelihood class probabilities. International Journal of Remote Sensing, 24, pp. 2905-2920.
- El Alaoui El Fels, 2014.** Simulation et spatialisation du risque d'inondation dans une vallée anthropisée, le cas de la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). European Scientific Journal, June 2014 edition, vol.10, No.17, ISSN: 1857 – 7881.
- Exilien, 2013.** Evolution de l'occupation du sol de 2002 à 2010 et risques hydrologiques cas du versant nord du morne l'hôpital (Port-au-Prince, Haïti). Mémoire de maîtrise en Géographie. Université du Québec à Montréal.
- Fournier, 2008.** Détection et classification de changements. Thèse de Doctorat, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, 134p.

- Gao et al., 2006.** Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches-a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 4039-4051.
- Hammi, 2007.** Évolution des recouvrements forestiers et de l'occupation des sols entre 1964 et 2002 dans la haute vallée des Ait Bouguemez (Haut Atlas central, Maroc). *Sécheresse* 18 (2007) 271-277.
- Hay et al., 2006.** Object-based image analysis: strength, weakness, opportunities, and threats (SWOT). 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), 4-5, July, 2006, Salzburg, Austria.
- Houndode, 2015.** Contribution à l'évaluation des aménagements de lutte anti-érosive du bassin versant de l'Ourika, Tensift. Mémoire de 3^{ème} cycle. Ecologie et Gestion des Ressources Naturelles. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs.
- Inoussa et al., 2011.** Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le parc national du W du Niger (Afrique de l'Ouest). *Sècheresse*, Vol 22, n°2, pp. 108-116.
- Kermadi, 2011.** Evolution du régime hydrologique d'un bassin-versant péri-urbain : l'yzeron (ouest lyonnais). Complémentarité de l'analyse des données, de la modélisation et de la cartographie de l'occupation des sols. Journées de Climatologie Lyon, 17-18 mars 2011 - Climat et société : Climat et eau.
- Lecerf, 2008.** Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne). Thèse de Doctorat de l'Université de RENNES 2, Université Européenne de Bretagne. 326 p.
- Lillesand et al., 2004.** Remote Sensing and Image Interpretation, 5th edition. John Wiley & Sons, NY; Thesis. Univ. of Minnesota.
- Lu et al., 2010.** Land-use and land-cover change detection. Vol.11, N2, pp. 271-288.
- Narjisse et al., 2001.** Le couvert végétal marocain : Etat de dégradation, acquis et perspectives en matière de conservation et de mise en valeur. *Revue H.T.E N°119*- Juin 2001, pp. 25-29.
- Ouhammou, 1991b.** Aperçu sur l'étagement de la végétation dans le bassin versant de l'oued Ourika. Haut Atlas de Marrakech. *Bull. Soc. Linn. Lyon*, 60: 401-409.

- Ramromi, 2007.** Les crues en zone montagneuse semi-aride. Le cas des bassins du R'Dat et du Zat (Haut Atlas, Maroc).
- Richards et al., 2005.** Remote sensing digital image analysis. An introduction. 4th Edition. 439 p.
- Sabir et al., 2003.** Organisation spatiale et gestion paysanne des ressources naturelles dans deux terroirs des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). Colloque organisé par l'UMR SAGERT « Organisation Spatiale et Gestion des Ressources et des Territoires Ruraux », Montpellier – France les 25, 26 et 27 février 2003. 11 p.
- Saidi et al., 2006.** 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.
- Saidi et al., 2010.** Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc) : Événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride. *Comunicações Geológicas*, 2010, t. 97, pp. 113-128.
- Singh, 2004.** Variability of aerosol parameters over Kanpur, northern India, *J. Geophys. Res.*, 109, D23206.
- Shaoqing, 2008.** The comparative study of three methods of remote sensing image change detection. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079.
- Sui et al., 2008.** “Chapter 17: Processing of multi-temporal Data and Change Detection”, In Z. Li, J. Chen and E. Baltsavias (Eds.) “Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, ISPRS Congress Book, pp.: 227-247, 2008. Publisher : Taylor & Francis Group, London.
- Zanini et al., 2006.** Analyse de la dynamique du paysage de la plaine du Rhône de 1950 à 2003 sur la base de cartes topographiques. *Bulletin de la Murithienne*, VOL 124, pp. 89-98.

Impact de l'occupation des sols sur le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika

Résumé

La végétation constitue une composante principale dans la régulation du fonctionnement hydrologique. Les choix en matière de gestion des peuplements forestiers et les modes d'utilisation de l'espace pourraient se répercuter sur la couverture végétale et par conséquent sur son rôle modérateur des crues. Dans ce cadre, l'évaluation de l'impact des changements de l'occupation du sol sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Ourika constitue l'objet de la présente étude.

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail permet d'évaluer la réponse du bassin versant vis-à-vis des changements opérés dans l'occupation du sol. Nous avons utilisé le modèle hydrologique HEC-HMS pour simuler le fonctionnement hydrologique selon deux scénarios de changement. Le modèle hydraulique HEC-RAS a été utilisé pour simuler l'étendue de la crue centennale de l'oued.

Le premier scénario a permis de simuler l'impact de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits de pointe. Les résultats de la simulation montrent que le débit de pointe a augmenté de 31.63 %.

Quant au deuxième scénario, l'action a été mise sur l'évaluation de l'impact des interventions entreprises par le forestier dans le bassin versant de l'Ourika à travers des actions de reboisement et la proscription des exploitations, ainsi que des changements du mode d'utilisation de l'espace. Les résultats des simulations montrent que ce changement a engendré une baisse dans les débits de pointe de 17.25 %. Toutefois, pour les averses extrêmes, on remarque une diminution de l'influence de l'occupation du sol sur les débits.

Les résultats de la modélisation hydraulique montrent que pour une période de retour de 100 ans, les zones à risque élevé d'inondations représentent plus que la moitié de la superficie inondable. La superficie susceptible d'être inondée représente 3.91 % de la superficie du bassin versant. Il s'agit essentiellement de la zone située au niveau de la vallée.

Cette zone abrite des constructions et des terrains agricoles, notamment au niveau des villages d'Aghbalou, d'Oulmes et de Sti Fadma, et la route provinciale P2017 reliant la vallée de l'Ourika à la ville de Marrakech.

Mots clé : Bassin versant de l'Ourika, Occupation du sol, Crues, Fonctionnement hydrologique, Modélisation.

Liste des acronymes

CN	: Curve Number
HEC-HMS	: Hydrologic Engineering Center's Hydraulic Modeling Center
HEC-RAS	: Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
NRCS	: Natural Resources Conservation Service
SCS	: Soil Conservation Service
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission

1. Introduction

L'inondation se présente comme un risque naturel de plus en plus récurrent à travers le monde et sous divers types de climats. Les dernières décennies ont été marquées par de redoutables crues dont les conséquences sont désastreuses aussi bien sur les infrastructures que sur les vies humaines (El Alaoui El Fels, 2014).

Au Maroc, le bassin versant de l'Ourika, situé au Haut Atlas central, est soumis à un climat semi-aride à subhumide. L'été reste marqué, au niveau de ce bassin versant, par de redoutables orages caractérisés par des pluies intenses et localisées dans l'espace (El Alaoui El Fels, 2014). Ceux-ci ont pour conséquences de fréquentes et brutales pulsations du cours d'eau principal et de ses affluents. Les événements hydrologiques extrêmes de 1984, de 1987, de 1995 ou de 1999 en constituent un exemple. Ces événements ont attiré l'attention par leurs énormes débits de pointe (respectivement 823, 650, 1030 et 762 m³/s).

De plus, avec les changements climatiques, la susceptibilité du bassin versant de l'Ourika à être affecté par des inondations devient de plus en plus grande. En effet, l'étude faite par Salama et al. (2010) montre que les 40 dernières années ont été marquées par la baisse des précipitations au niveau de la région de Tensift et une augmentation dans la fréquence des événements pluviométriques intenses conduisant ainsi à davantage d'inondations.

Si les facteurs climatiques restent structurels, le bassin versant de l'Ourika a connu de nombreux réaménagements comme l'ensemble du territoire marocain à travers l'intensification de l'activité agricole et la pression sur la couverture forestière, ce qui a contribué à une probable modification du ruissellement et des écoulements de surface (Saadi, 2005).

L'influence de la végétation sur le comportement hydrologique d'un bassin versant a fait l'objet de nombreux travaux de recherche (Andréassian et al., 2001 ; Andréassian, 2002 et 2004 ; Cosandey, 2006 ; Cosandey et al., 2008 ; Aussenac, 1968 ; Galea et al., 1993 ; Fritsch, 1992 ; Derouiche et al., 1997 ; Descroix, 2003 ; Gerrits, 2010 ; etc.). Dans ces travaux, l'utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et les modèles hydrologiques permet d'intégrer des données multi-sources et d'effectuer des analyses pouvant prendre en considération des contraintes très diversifiées pour une optimisation de la gestion des eaux. En effet, ces outils permettent une compréhension des processus

et des interactions dynamiques entre les paramètres environnementaux et physiographiques qui interviennent dans un hydrosystème (Andréassian, 2002).

Au cours des dernières décennies, plusieurs modèles hydrologiques intègrent les caractéristiques physiographiques du milieu (topographie, classes d'occupation du sol, types de sols, etc.), les processus hydrologiques dépendant du climat ainsi que des états de surface qui évoluent aussi bien dans le temps que dans l'espace (Singh et al., 2002). Ils sont d'un excellent recours pour des problèmes de génie civil, de conservation des sols, de gestion des ressources en eau, etc. Ils se différencient en fonction de l'unité spatiale élémentaire considérée. Ainsi, certains modèles considèrent le bassin versant comme un tout non subdivisé (modèles globaux), tandis que d'autres permettent de tenir compte de la variabilité des phénomènes hydrologiques à l'intérieur des bassins (modèles distribués).

Ces modèles nécessitent un certain nombre de données spatialisées. Dans ce sens, La télédétection permet de cartographier les différents états de surface et, de ce fait, permet l'amélioration de la représentation spatiale des flux et des variables hydrologiques dans un bassin versant (Schmugge, 2002 ; Pietroniro et al., 2005). Aussi, l'exploitation des images obtenues par la télédétection permet d'identifier plusieurs variables hydrométéorologiques et physiographiques pouvant influencer le fonctionnement d'un l'hydrosystème (Bonn et Rochon, 1992) et d'en analyser les sens de changement. Par ailleurs, les capacités d'éditions qu'offrent les SIG permettent de donner un caractère réaliste aux hydrosystèmes présentés (Motevalli, 2012).

Si ces outils s'avèrent incontournables pour la préparation des données de base, le choix d'un modèle hydrologique n'est pas aisé et dépend de la disponibilité des données d'entrée et de l'échelle spatio-temporelle de modélisation. En effet, certains modèles sont très complexes et nécessitent plein d'informations sur le bassin dont la mobilisation est très difficile, comme c'est le cas pour les modèles à base physique SHE (Abott et al., 1986), MIKE-SHE qui en découle (Refsgaard et al., 1995), THALES (Grayson et al., 1992) ou PMRS (Leavesley et al., 1995). Ce genre de modèles sont adaptés pour des bassins versants bien instrumentés ayant des données d'entrée à grande échelle (Kouamé et al., 2007).

L'applicabilité de ce type de modèles à des bassins versants n'ayant pas de données à haute résolution spatiale est difficile et pose un problème d'estimation des paramètres, surtout lorsque les données pour la validation interne sont rares (Grayson et al., 1992).

En parallèle, d'autres modèles hydrologiques demandent moins de données. C'est le cas du TOPMODEL (Beven et al., 1979), CEQUEAU (Morin et al., 1981), ANSWERS (Connolly et al., 1997) et HYDROTEL (Fortin et al., 1986, 2001a), etc. Ces modèles peuvent s'appliquer à une gamme variée de bassins. Le modèle HEC-HMS fait partie de cette catégorie de modèles. Il a été développé par U.S. Army Corps of Engineers (USACE) et permet de simuler le comportement hydrologique d'un bassin en se basant sur les informations spatiales provenant de la télédétection et des SIG (Motevalli et al., 2012). Ce modèle prend en compte les conditions du milieu, et permet, avec ses modules optionnels et ses formalismes diversifiés, de s'adapter aux exigences particulières de chaque contexte, y compris le contexte semi-aride marocain, où il a été largement utilisé dans le cadre du plan national de protection contre les inondations (Brocca et al., 2009 ; Trambly, 2012 ; Taha et al., 2003). Son interface conviviale, sa compatibilité avec ArcGis permet à l'utilisateur d'importer ou d'exporter les couches de données exigées par le modèle et les formulations simples des équations décrivant les processus hydrologiques justifient son choix.

Ce travail, à travers la simulation de la réponse hydrologique du bassin versant en se basant sur le modèle HEC-HMS suite à des scénarios de changement de l'occupation du sol, sous-tend en apprécier les déclinaisons et de juger ainsi le rôle de la forêt. Quant à la spatialisations des zones inondables présentant un risque potentiel sur les biens et les vies humaines, elle a été faite sur le logiciel HEC-RAS.

Ce travail est organisé en une partie matériels et méthodes, puis résultats et discussions et pour conclure, on proposera des recommandations et des perspectives.

2. Zone d'étude et méthodologie

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude a concerné le bassin versant de l'Ourika, situé dans le Haut Atlas central, dit aussi Atlas de Marrakech et qui constitue un sous bassin atlasique du grand bassin versant du Tensift.



Figure 10. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika

Ce bassin couvre une superficie de 576 km². Il est situé entre les latitudes 31° et 31°21' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest. Ce bassin est limité au Sud par le haut bassin

de l'Oued Souss, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin versant de Zat et à l'Ouest par le bassin versant de la Rhéraya (Saidi et al., 2006).

L'altitude moyenne au niveau du bassin s'élève à 2500 m avec la prédominance des terrains compris entre 848 m et 3200 m (75%), Le point culminant du bassin est celui de Jbel Iferouane (4001 m) et l'exutoire du bassin versant se trouve à une altitude de 848 m. Trois principales unités physiographiques s'individualisent :

- les zones du piémont avec une altitude aux alentours de 600 m ;
- les vallées de l'Oued Ourika et ses affluents ;
- les zones de haute montagne et les plateaux d'altitude.

Du point de vue morphologique, le bassin versant présente une forme sensiblement allongé et a un indice de compacité de 1.3. Son principal cours d'eau, après la bourgade de Sti Fadma, traverse une longue vallée encaissée vers laquelle converge, sur les deux rives, une succession de vallées et de ravins affluents. Cette situation explique que les ondes de crues de l'oued Ourika grossissent vers l'aval, à mesure de son alimentation par ses affluents (Saidi et al., 2006).

Les pentes au niveau de la zone sont majoritairement fortes, elles confèrent à l'oued un caractère assez violent et torrentiel. Les pentes maximales sont de 46.4 %, les pentes minimales sont à 0.14 % et les pentes moyennes sont de 20 %. On peut voir que les pentes maximales se situent au centre du bassin versant. Le réseau hydrographique est donc plus encaissé à cet endroit, traduisant une forte érosion. Les pentes les plus faibles (<15 %) sont localisées le long du réseau hydrographique, dessinant d'étroites vallées encaissées, et sur le plateau au NE du bassin (Saidi et al., 2006).

Sur le côté lithologique, le bassin versant est dans l'ensemble assez imperméable. Selon les chiffres de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT), 6 % des sols y sont perméables, 39 % semi-perméables et 55 % imperméables. Cette lithologie fait croître les risques d'inondations ; elle favorise une augmentation des eaux de ruissellement mobilisées par les cours d'eau principaux et le développement d'importantes crues (Saidi et al., 2006).

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 aux crues de printemps, d'été et d'automne provoquées par les

pluies et par les fontes des neiges. Les crues brutales se produisent surtout en été, provoquant des débits brusques causant des dégâts immenses (Saidi et al., 2006).

Selon l'ABHT, les débits moyens annuels à l'exutoire du bassin varient de 0.59 m³/s à 29.845 m³/s. Ces débits moyens annuels montrent des variations interannuelles avec une succession des années sèches et des années humides.

Le débit moyen mensuel à la station d'Aghbalou enregistre une nette irrégularité intra annuelle. Les faibles débits sont remarqués au cours des mois d'été et d'automne, et les forts débits durant les mois d'hiver et du printemps (Janvier à Juin), ces cinq mois totalisent 78 % des écoulements annuels. La période estivale correspond généralement aux basses eaux, et l'étiage a lieu pendant le mois d'Août dans l'oued. La période printanière enregistre les débits les plus haut grâce à l'importance des précipitations et à la fonte des neiges liée à la hausse assez importante des températures à partir du mois de Mars. C'est d'ailleurs entre ce dernier mois et celui de Mai que les courbes atteignent le maximum avec une pointe généralement en Avril. La légère augmentation des débits au mois de Novembre est due aux pluies automnales. Cette variabilité saisonnière très nette, ressemble dans ses grands traits à celle des précipitations avec un décalage dans le temps. Le bassin versant de l'Ourika possède donc un régime nivo-pluvial (Saidi et al., 2006).

Sur le plan bioclimatique, le bassin versant de l'Ourika est assujettie à un bioclimat semi-aride à variante fraîche, caractérisé par la dominance du régime pluviométrique HPAE où le maximum des précipitations est recueilli pendant l'hiver et le printemps (Saidi et al., 2006). En effet, sur une période de 35 ans, la pluviosité annuelle varie entre 525.9 mm à la station d'Aghbalou et 321.2 mm à la station d'Agouns. La saison d'été est caractérisée par de forts orages provoquant des pulsations brutales du cours d'eau. La température quant à elle, elle varie entre 48.2°C et -7.2°C, avec une moyenne de 27.8°C.

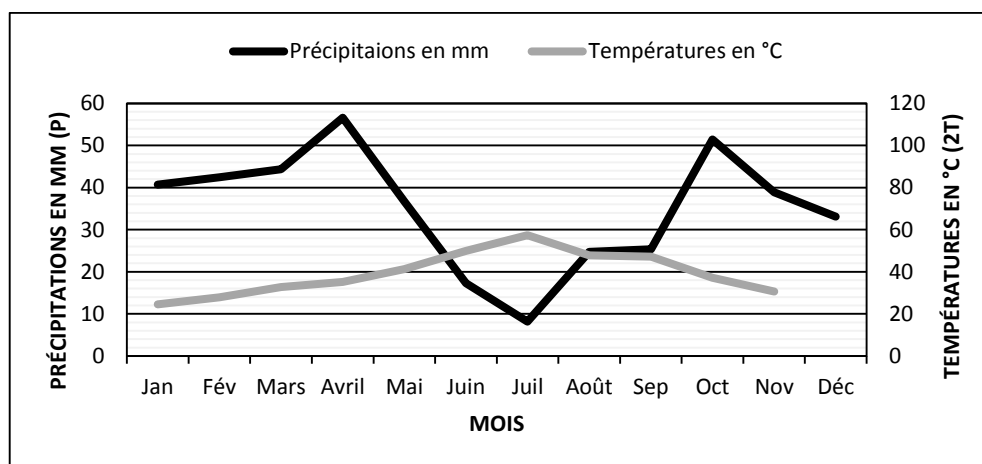


Figure 11. Diagramme ombro-thermique de la station d'Aghbalou

La couverture végétale au niveau de la zone se trouve en grande partie dans l'étage Oroméditerranéen à base de matorrals de xérophytes épineuses et d'hémicryptophytes d'altitude. La même composition domine au niveau du Montagnard, qui est marqué aussi par la présence de quelques pieds de genévrier. La végétation arborée au niveau du bassin versant, est représentée par les étages Méditerranéen, Mésoméditerranéen et Thermoméditerranéen. Il s'agit essentiellement de forêts de chêne vert, de genévrier rouge, de thuya, de lentisque et d'oléastre (Ouhammou, 1991b).

2.2. Méthodologie

2.2.1. Données mobilisées

La base de données géospatiales utilisée comporte des données physiographiques, des cartes thématiques (carte topographique à 1:100 000 et carte pédologique simplifiée à 1:500 000 par Cavallar (1950)), des images satellitaires ainsi que des données hydrométéorologiques (pluie et débit).

Les données hydrométéorologiques (pluie et débit) recueillies par l'ABHT entre 1984 à 2013 (30 ans) ont été utilisées pour apprécier la variabilité spatio-temporelle du climat. Ces données, ont été recueillies au niveau de la station d'Aghbalou, à l'exutoire.

Les images satellitaires qui ont été utilisées pour la cartographie de l'occupation des sols au niveau du bassin versant, présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 8. Images satellitaires utilisées pour cette étude (téléchargeable sur www.glovis.usgs.gov)

Identifiant d'image	Date d'acquisition	Satellite	Capteur	Résolution spatiale (m)
1	26/09/1984	Landsat 5	MSS	60*60
2	12/07/2000	Landsat 7	ETM+	30*30
3	27/07/2014	Landsat 8	OLI	30*30

La classification des images satellitaires a permis de définir des types d'occupation du sol. Ainsi, sur la base de l'image Landsat 8_OLI de l'année 2014 que la largeur et la configuration du cours d'eau ont été numérisées.

Aussi, un Modèle Numérique du Terrain (SRTM de 30m de résolution spatiale) a été utilisé. Il constitue la source de données permettant d'identifier le sens d'écoulement des eaux (Rawls et al., 1989).

2.2.2. Combinaison modulaire

Le HEC-HMS a été adapté pour simuler la réponse hydrologique du bassin versant suite à des changements dans l'occupation du sol. C'est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants développé par U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Il permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au ruissellement (USACE, 2010).

Ce modèle fonctionne selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il considère le bassin versant comme un système uniforme comportant plusieurs composantes qui assure chacune de représenter une partie du processus hydrologique et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement.

Affrontés au problème d'absence de données en continues des précipitations, la modélisation événementielle a été privilégiée sur la modélisation continue (Taha et al., 2003). La figure 12 résume les étapes de fonctionnement du modèle sous une structure événementielle.

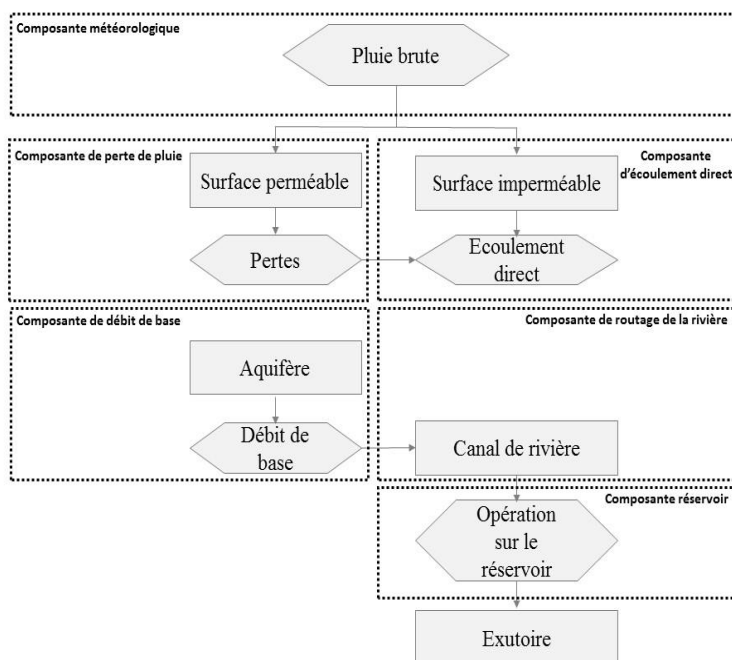


Figure 12. Fonctionnement du modèle HEC-HMS sous la structure événementielle

Ce type de modélisation nécessite aussi les distributions temporelles des pluies qui peuvent être approchées en appliquant le module météorologique des averses NRCS (Motevalli et al., 2012).

Le module météorologique NRCS, connu auparavant sous le SCS, est un service attaché au département d'agriculture des États Unis, chargé de conserver, de planifier et de porter de l'assistance dans les domaines de la gestion des eaux et des sols. Ce module se base sur l'analyse d'un nombre considérable d'observations d'averses au niveau des États-Unis, pays où il a été développé (Musy et al., 1998). Les averses de projet ainsi définies, attribuent une distribution temporelle à une hauteur de pluie donnée enregistrée pendant 24 heures. Ces observations, faites à travers tout le pays, ont été analysées et ont finalement donné lieu à quatre types d'averses de projet selon la position géographique, et donc le climat dominant (NRCS, 1997). Les quatre types se distinguent par leurs intensités, leurs heures de pointe et par leurs formes. Pour ce qui est de l'intensité maximale, l'ordre décroissant commence par le type II, puis le III, ensuite le type I et enfin le IA. Ces intensités différentes vont sans doute provoquer, lors des simulations, des débits de pointe qui vont sous-estimer ou surestimer les débits observés en fonction de l'intensité maximale réelle qu'on aurait enregistrée si on avait un pluviographe (Motevalli, 2012).

Lors de la modélisation, et puisque il n'y avait pas de choix de préférence, on a utilisé les quatre types pour chaque événement, et essayé d'en déduire, en comparant les résultats de chaque type, l'averse la mieux appropriée à notre contexte.

La fonction de production choisie est la NRCS CN. Cette fonction développée par la NRCS en 1950, relie la pluie nette participante au ruissellement à trois principaux facteurs : l'occupation des sols, le type de sol et l'humidité antécédente. Elle est simple et ne nécessite pas d'énormes quantités de données et dépend directement d'un seul paramètre (CN). Ce paramètre est déterminé à partir des tables NRCS définissant une valeur du CN à travers des combinaisons de la nature de l'occupation du sol, des conditions hydrologiques et du type de sol (Musy et al., 1998).

Quant à la fonction de transfert, deux fonctions de transfert ont été choisies dans le cadre de cette étude, l'hydrogramme unitaire de la NRCS et l'hydrogramme unitaire de Clark. Elles n'exigent pas des données supplémentaires, et ont montré des résultats satisfaisants dans l'évaluation de la sensibilité du modèle aux formalismes utilisés (Tramblay, 2012).

D'une part l'hydrogramme unitaire de la NRCS (ou le formalisme Lag) présente un seul paramètre à calculer (T_{Lag}). Il permet de ressortir le temps et le débit de pointe provoqué par n'importe quelle hauteur de pluie nette, chose qui va permettre de concevoir l'hydrogramme de simulation en reposant sur le principe de linéarité de la réponse. D'une autre part, l'hydrogramme de Clark (ou le formalisme de Clark) possède deux paramètres à calculer, le temps de concentration (T_C) et le coefficient de stockage (S_t). Il permet de refléter le stockage temporaire de la pluie nette baissant l'ampleur du débit, et de représenter le mouvement de la pluie nette le long du réseau de drainage depuis son origine jusqu'à l'exutoire (Sabol, 1988).

Dans le but de simuler la contribution du réservoir souterrain au débit avant et après le pic de l'événement, on a utilisé le formalisme de la récession exponentielle. Ce module possède une seule variable d'entrée (le débit initial) et deux paramètres, la constante de récession (R_c) et le seuil (T_d). Ces deux paramètres varient de 0 à 1. Toutefois, vu la non disponibilité d'informations permettant de leur attribuer une valeur initiale et que leur valeur peut être calibrée, on s'est contenté au départ d'une valeur bibliographique en attendant leur calibration (Ahbari, 2013).

Pour la détermination des averses quantiles, différentes techniques sont utilisées en hydrologie fréquentielle (Delyon, 2013), à savoir la méthode des moindres carrés et celle

des moments pondérés (Meylan et al, 2008), mais celle qui est la plus utilisée auprès des chercheurs est la méthode du maximum de vraisemblance. Cette méthode permet d'estimer à partir de l'échantillon observé, le jeu de paramètre optimal d'une loi de probabilité, de façon que la vraisemblance obtenue soit maximisée.

Quant à la spatialisation de l'étendue des crues, la géométrie de l'oued et du lit majeur est nécessaire.

La suite de l'approche nous a permis de spatialiser le phénomène. Les débits extrêmes prédéterminés, en plus des paramètres physiographiques issus de la partie traitant la modélisation hydrologique, notamment la rugosité du lit et la pente, ont permis de faciliter le calcul de la distribution des débits le long du profil de l'oued. La largeur et la configuration du cours d'eau ont été cartographiées sur la base de l'image satellitaire Landsat 8_OLI de l'année 2014.

2.2.3. Modélisation hydrologique

Le processus de modélisation hydrologique comprend trois composantes, la première vise la préparation des données de base, la seconde comprend la création des fichiers de simulation et a été faite sur ArcGis à travers le module ARC-HecGeo, la dernière a trait à l'exécution des simulations, à partir des fichiers issus de la première partie, et a été réalisée sur le logiciel HEC-HMS.

Ainsi, les données physiographiques ont été utilisées par le module ARC-HecGeo d'ArcGis pour la caractérisation spatiale des structures d'écoulement et le calcul des paramètres initiaux du modèle.

Pour être en conformité avec les classes d'occupation des sols définies par la fonction de production choisie (NRCS CN), les types déjà définies ont été recodés (Jeníček, 2007).

Comme dans le cas de la carte d'occupation des sols, la carte des sols type NRCS est indispensable pour déterminer le paramètre CN de la fonction de production (Jeníček, 2007). En l'absence d'une carte de texture des sols, on a procédé par des approximations et des correspondances à partir des données bibliographiques accessibles, principalement : la carte pédologique simplifiée de Cavallar (1950). La compilation de ces données, nous a permis de définir 4 types de sols qui peuvent être reliés aux classes NRCS : le type A (sols sablonneux et sols bruns zonaux sur schistes), le type B (sols sablonneux argileux peu profonds), le type C (sols squelettiques d'altitude) et enfin les

sols imperméables (sols correspondants à la classe d'occupation « sol nu »). Ainsi, un code NRCS et une valeur du paramètre CN en fonction type de sol ont été attribués à chaque classe d'occupation (Tableau 9).

Tableau 9. Table NRCS des classes d'occupation des sols identifiées sur le bassin versant de l'Ourika en 1984

Code	Description de l'occupation du sol		CN			
	Type d'occupation	Condition hydrologique	A	B	C	D
11	Zones urbanisées/Sol nu		77	86	91	94
225	Cultures	Mauvaise	72	81	88	91
323	Matorral	Mauvaise	48	67	77	83
343	Forêt claire	Mauvaise	45	66	77	83
342	Forêt moyennement dense	Moyenne	36	60	73	79
341	Forêt dense	Bonne	30	55	70	77

2.2.3.1. Calibration du modèle

Parmi trente évènements, neuf ont été sélectionnés. Il s'agit de ceux qui présentent les plus grands débits de pointe. Pour chaque évènement, on a préparé les fichiers de simulation tout en prenant en compte les quatre types d'averses NRCS et le formalisme choisi pour la fonction de transfert.

Tableau 10. Neuf (9) évènements sélectionnés pour la modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant

Evènement	Date début	Date fin	Fonction	Débit (m3/s)
3	09/02/1986	12/02/1986	Calage	249
4	01/11/1987	03/11/1987	Calage	650
5	05/05/1984	10/05/1984	Calage/Validation	823
6	10/03/1989	12/03/1989	Calage	265
7	13/09/1990	15/09/1990	Calage	207
8	01/08/1992	03/08/1992	Calage	290
10	06/03/1993	09/03/1993	Calage	226
12	15/08/1995	20/08/1995	Calage/Validation	1030
16	26/10/1999	30/10/1999	Calage	762

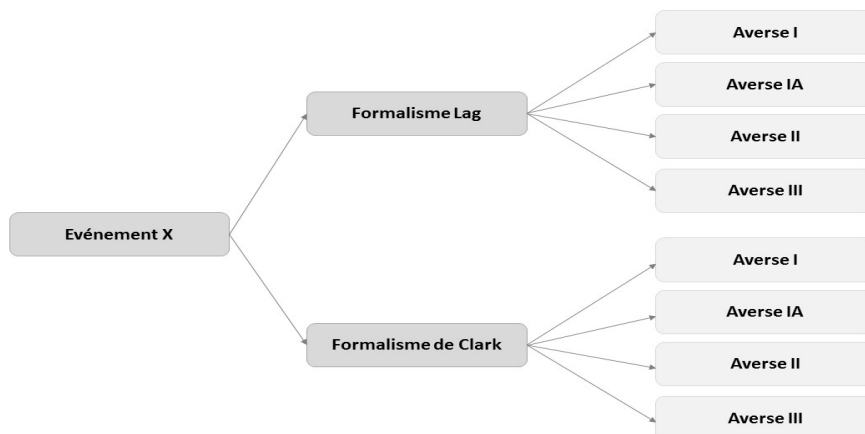


Figure 13. Fichiers de simulation préparés pour chaque événement

La calibration a pour objectif principal d'ajuster les paramètres du modèle jusqu'à ce qu'il reproduise les données observées. La mesure quantitative du degré d'ajustement est donnée par la fonction objective. C'est dans ce but qu'on a choisi comme fonction objective « la racine de l'erreur quadratique moyenne pondérée » (peak-weighted root mean square error). Elle présente l'avantage de considérer simultanément la magnitude et la synchronisation temporelle de la crue.

Dans cette étude, la calibration a été effectuée pour les 72 fichiers de simulation en utilisant la méthode du gradient univarié qui permet d'ajuster un paramètre à la fois en tenant les autres constants.

Les résultats de la calibration, montrent que la valeur de la fonction objective, les débits de pointe et de base et le volume simulés ainsi que les valeurs optimisées des paramètres varient selon l'événement, le type de l'averse et du formalisme choisi pour la fonction de transfert.

Les premiers résultats de la calibration montrent que dans le cas du formalisme Lag et pour les quatre types d'averses (à l'exception des événements 4 et 6), la fonction objective n'est jamais nulle. Elle prend sa valeur minimale dans le cas des averses types I et IA. Ce constat est valide pour les débits de pointe qui se trouvent mieux restitués lors de l'utilisation des averses I et IA. Pour les volumes simulés, ils sont toujours surestimés quel que soit l'événement et le type d'averse, à l'exception des averses type I et IA qui les surestiment moins. Quant aux débits de base, ils semblent être mal simulés par l'approche choisie. Ils se trouvent parfois surestimés (cas des événements 3, 6, 7 et 10) et des fois sous-estimés (cas des événements 16, 12 et 5). Concernant les valeurs optimisées

des paramètres, le « T_d » reste inchangé indépendamment de l'évènement, tandis que les autres paramètres changent en fonction de l'évènement. Vu leur grande différence inter-évènements, ces jeux de paramètres n'ont pas permis la validation du modèle. En effet, les paramètres prennent des valeurs qui ne permettent pas de minimiser la fonction objective et diminuer la surestimation des débits de base et des volumes de crue.

Dans le cas du formalisme Clark, et à l'exception des deux évènements 7 et 10 qui ont été éliminés à cause de leurs mauvais résultats, la restitution des hydrogrammes a été nettement améliorée pour l'ensemble des évènements. En effet, la fonction objective devient nulle quel que soit l'évènement et le type d'averse. Pour les volumes de crue le problème lié à leur surestimation persiste toujours, chose qui s'explique par le fait que la fonction de transfert n'a pas d'effet sur le volume de la crue. La même chose a été constatée pour les débits de base qui suivent la variation des volumes.

D'après la première calibration, il s'est avéré que le formalisme de l'hydrogramme unitaire de Clark est le plus adapté à notre contexte d'étude que celui de la NRCS. Ainsi, les averses types I et IA ont montré de bonnes performances quant à la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme (débit de pointe, débit de base et les volumes simulés).

Toutefois, la calibration ne parvient pas à la restitution des volumes et des débits de base. Ce problème peut être lié à la mauvaise estimation des variables d'entrée de la fonction de production ou de ses paramètres, voire même le choix de la fonction objective elle-même.

Donc et afin d'aboutir à un jeu de paramètres optimal, on a procédé par diverses approches, à savoir :

- méthode 1 : la moyenne des valeurs les plus fréquentes des paramètres ;
- méthode 2 : les maximums des valeurs les plus fréquentes des paramètres ;
- méthode 3 : les maximums des valeurs des paramètres des 7 évènements ;
- méthode 4 : la moyenne des valeurs annuelles des paramètres ;
- méthode 5 : les valeurs annuelles les plus probables des paramètres.

Ces méthodes ont été exécutées sur les deux types d'averses I et IA pour déceler celle qui permet, avec son jeu de paramètres, d'aboutir à une validation du modèle.

Pour le cas de l'averse type I, la figure 14 montre que la différence entre le débit de pointe observé et simulé varie de 0.1 % (méthode 1, évènement 6) jusqu'à 39.2 % (méthode 3,

événement 16). Les événements les mieux reproduits sont 8 et 12, alors que les mal simulés sont 4 et 16. Donc peu importe la méthode utilisée, l'efficacité du modèle sur le débit de pointe reste faible.

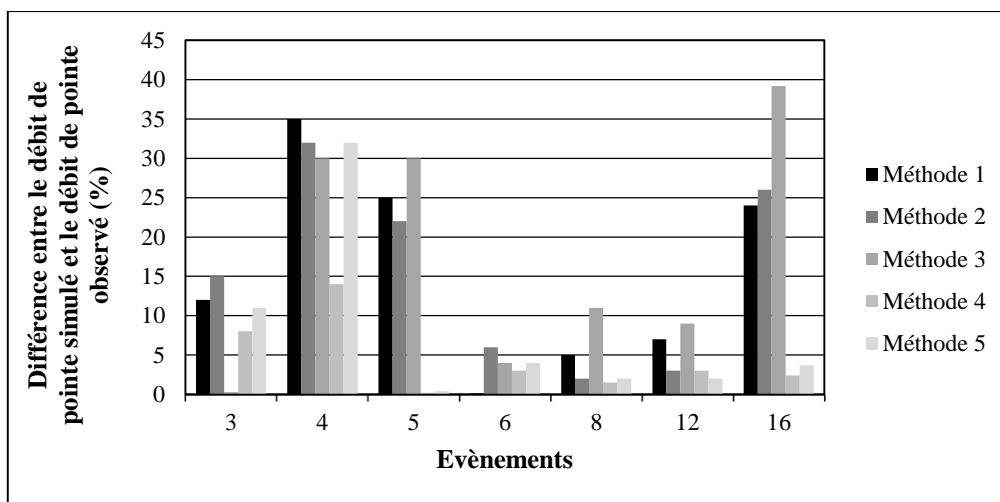


Figure 14. Comparaison entre les débits de pointe simulés et les débits de pointe observés après validation par les cinq méthodes utilisées

Concernant l'efficacité sur le volume, la figure 15 montre que le comportement diffère en fonction de la méthode et de l'événement. Il s'avère que le problème de surestimation des volumes persiste toujours.

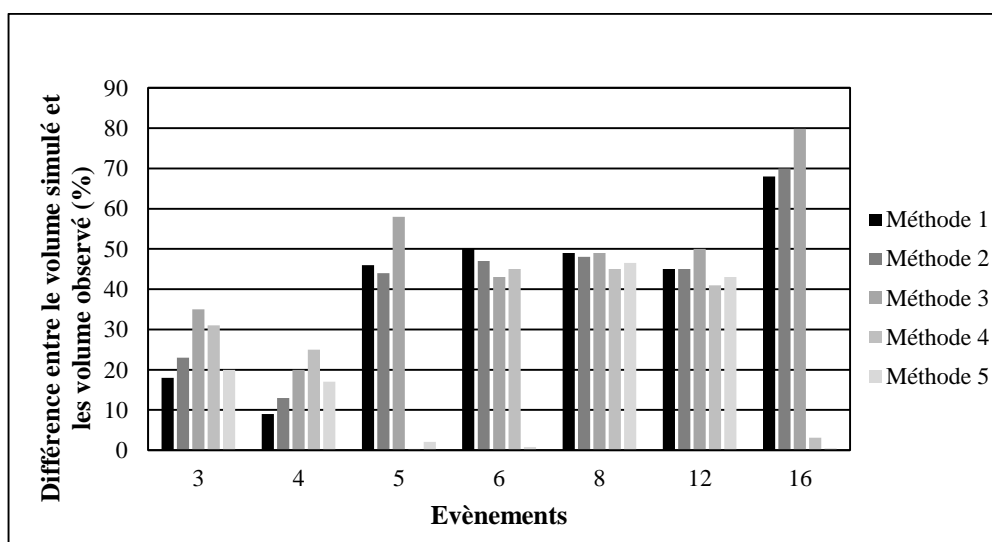


Figure 15. Comparaison entre les volumes simulés et les volumes observés après validation par les cinq méthodes utilisées

La figure 16 montre que le débit de base est presque surestimé par toutes les méthodes et pour l'ensemble des événements. La surestimation est beaucoup plus grande que celle

résultante de la première calibration. Ce problème est lié à la valeur inchangée du paramètre « Td ».

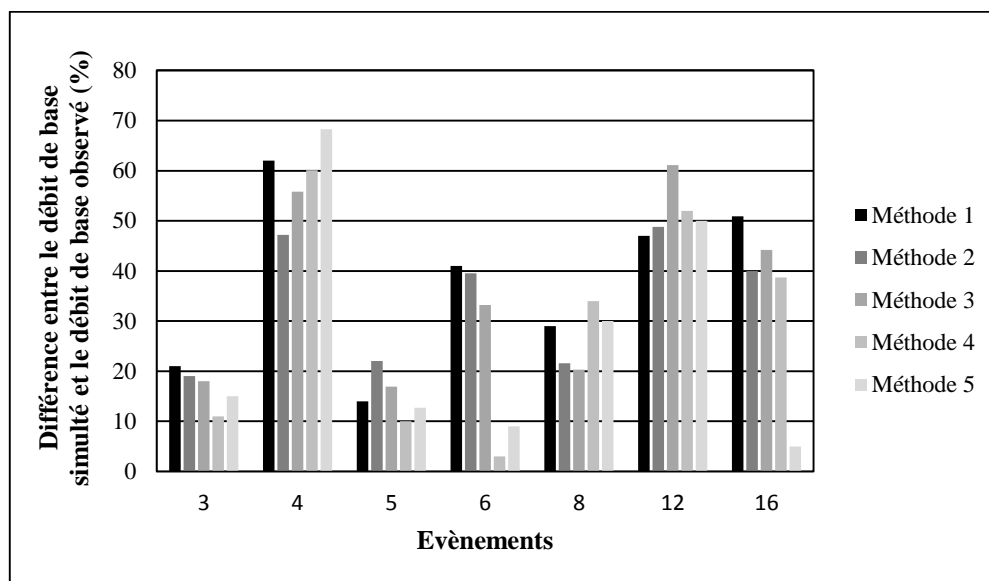


Figure 16. Comparaison entre le débit de base simulé et le débit de base observé après validation par les cinq méthodes utilisées

Les résultats de la validation pour l'averse type IA montrent une bonne performance par rapport à ceux obtenus par l'averse I.

Le premier essai de validation a permis de qualifier la méthode de la moyenne des valeurs annuelles des paramètres (méthode 4) comme étant celle qui donne les meilleurs résultats. En effet, pour les deux types d'averses, cette méthode n'a pas montré de larges différences entre les débits de pointes simulés et ceux observés (entre 0.2 % et 16 %). La même constatation est valable pour les volumes et les débits de base (entre 0.4 % et 49 % et de 2% à 60.1 %, respectivement).

Le modèle est étroitement lié à l'état de la surface du bassin versant, c'est-à-dire que si on considère que l'occupation des sols varie sur de courtes périodes, les jeux de paramètres optimaux suivront d'une manière continue ces variations.

Néanmoins, en reposant sur ce premier essai, on ne peut pas parler d'une validation du modèle, d'une part parce qu'on n'a pas suffisamment d'événements dans chaque année, et d'autre part, car la mauvaise efficacité obtenue pendant la validation ne peut pas être liée uniquement au changement dans l'occupation du sol, mais il faudrait aussi vérifier les hypothèses concernant le choix de la fonction objective, l'estimation du taux d'imperméabilité et la distribution journalière de la pluie.

Afin d'expliquer l'instabilité des valeurs des paramètres, et en partant du principe que la fonction objective agit sur le débit de pointe en faveur du volume et du débit de base, on a employé la fonction objective sur le volume.

Cependant, rien n'a changé en termes de restitution des volumes de crue. D'où la nécessité de tester la part de la fonction de production dans cette défaillance.

Après avoir éliminé la fonction objective des causes probables de la défaillance du modèle, on a vérifié la sensibilité du modèle à la fonction de production permettant d'estimer le volume du ruissellement induit par une hauteur de pluie donnée.

En effet, la donnée principale dans cette transformation est le taux d'imperméabilité du bassin versant qu'on a estimé à partir de la carte d'occupation des sols à 55 %. C'est-à-dire qu'un volume de pluie sous forme d'un parallélépipède dont la base est égale à 55 % de la surface du bassin versant et la hauteur est égale à la hauteur de la pluie, est considéré comme véhiculé sans pertes dans le réseau de drainage. Donc, la surestimation de ce taux peut être à l'origine de la surestimation du volume simulé de la crue.

Afin d'évaluer cette estimation, on a choisi l'événement 16. Ce choix a été dicté par le fait qu'il est le seul qui garde, après calibration, un jeu de paramètres proches des valeurs initiales.

La figure 17 représente la variation du volume simulé en fonction de l'imperméabilité du bassin versant. Elle montre que le volume simulé et l'imperméabilité sont proportionnelles jusqu'à ce qu'on attribue au taux d'imperméabilité des valeurs inférieures à 40 %.

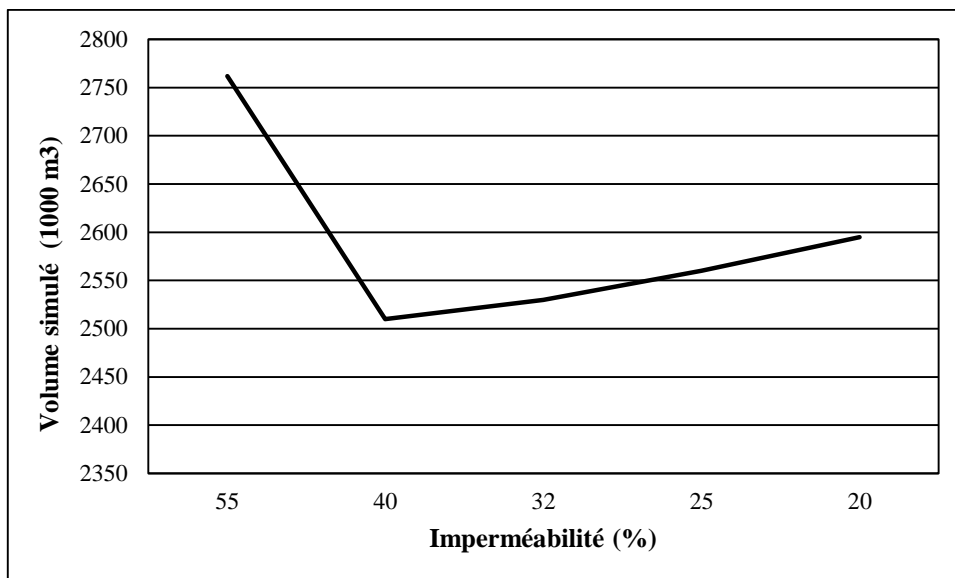


Figure 17. Variation du volume simulé de l'événement 16 en fonction de l'imperméabilité

Cette situation peut être expliquée par le fait qu'en plus de l'imperméabilité du bassin versant, le volume simulé et l'imperméabilité sont affectés par d'autres facteurs. Ainsi, plus l'imperméabilité diminue, plus son influence sur le volume de la crue diminue, chose qui permettra l'augmentation de la part d'influence des autres facteurs.

En outre, on note que lorsque la valeur du taux d'imperméabilité se situe en dessous de 40 %, le volume simulé commence à se décaler du volume observé, ce qui confirme qu'afin de garder la fonction objective nulle, le modèle change les valeurs des paramètres de la fonction de transfert (supposées optimales). Chose qui permet de dire que le facteur affectant le volume du ruissellement est l'une des variables de la fonction de production.

Cette opération a permis de rectifier la valeur du taux d'imperméabilité, d'éliminer son effet sur la surestimation des volumes et d'identifier la source de la mauvaise efficacité du modèle qui ne peut être que la distribution temporelle de la hauteur de la pluie journalière.

Ainsi, on s'est contenté de cette dernière calibration effectuée sur l'événement 16 pour essayer de valider le modèle, tout en rectifiant la valeur du taux d'imperméabilité à 40 % et en utilisant l'averse type IA. Le jeu de paramètre optimal utilisé est :

Tableau 11. Jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation

Paramètre	La fonction de production		La fonction de transfert		Le débit de base		Imperméabilité	Type d'averse
	Ia	CN	T _c	S _t	R _c	T _d		
Valeur optimisée	8.39	70.01	5.05	4.89	0.79	0.1	40	IA

2.2.3.2. La validation du modèle

Suite aux résultats de la dernière calibration, et par application du jeu de paramètres optimisés, le tableau 12 montre que le modèle a pu reproduire le débit de pointe d'une manière acceptable pour l'ensemble des événements, malgré la sous-estimation qui fluctue entre 3.48 % et 32.82 %. Les volumes simulés quant à eux, leur surestimation varie entre 1.49 % pour l'événement 16 et 58.94 % pour le 8.

Pour les débits de base, on remarque que l'événement 12 présente une meilleure simulation par rapport aux autres événements dont le pourcentage d'erreur est élevé.

Tableau 12. Résultats de validation du jeu de paramètres optimal

Evèn.	Qp obs. (m ³ /s)	Qp sim. (m ³ /s)	Diff. (%)	Vol. obs. (10 ³ m ³)	Vol. sim. (10 ³ m ³)	Diff. (%)	Qb obs. (m ³ /s)	Qb sim. (m ³ /s)	Diff. (%)
3	249.0	201.12	-19.23	10 104	10 769.11	+6.58	19.4	10.4	-46.39
4	650.0	436.67	-32.82	34 365	35 161.52	+2.32	12.5	23.58	+88.64
5	823.0	700.41	-14.90	34 417	34 998.01	+1.69	26	13.9	-46.54
6	265.0	187.92	-29.09	7 708	8 100.97	+5.10	1.2	2.07	+72.50
8	290.0	221.59	-23.59	4 412	7 012.3	+58.94	2.4	3.93	+63.75
12	1 030.0	894.16	-13.19	3 651	3 911.15	+7.12	50	61.1	+22.20
16	762.0	592.19	-22.28	25 987	26 375.05	+1.49	12.72	20.03	+57.47

Ces résultats peuvent être expliqués par la valeur fixe du paramètre T_d. Cette valeur handicape l'aptitude de la méthode de la récession exponentielle à simuler le débit total.

Cependant, si on compare ces résultats à ceux du premier essai de validation fait par la méthode de la moyenne annuelle des paramètres, il s'avère que ce nouveau jeu de paramètres est plus performant que le premier dans la simulation du débit de pointe (figure 18).

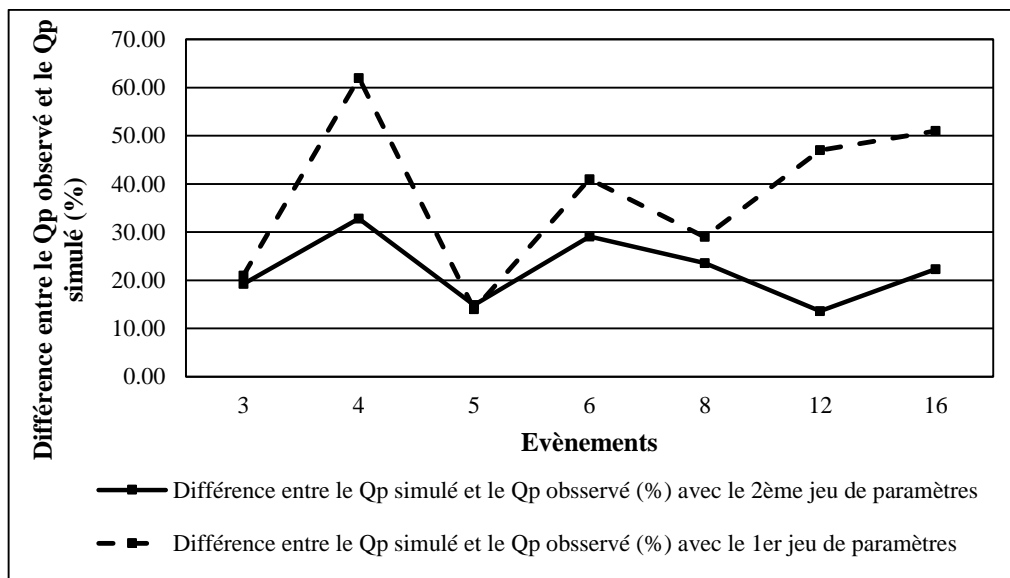


Figure 18. Comparaison entre le débit de pointe simulé et observé pour les deux essais de validation

Ainsi, d'après la figure 19 on peut facilement voir l'effet de la nouvelle calibration sur la diminution de la surestimation. Par conséquent, ce nouveau jeu de paramètres simule mieux les volumes de ruissellement pour l'ensemble des événements, à l'exception des événements 8.

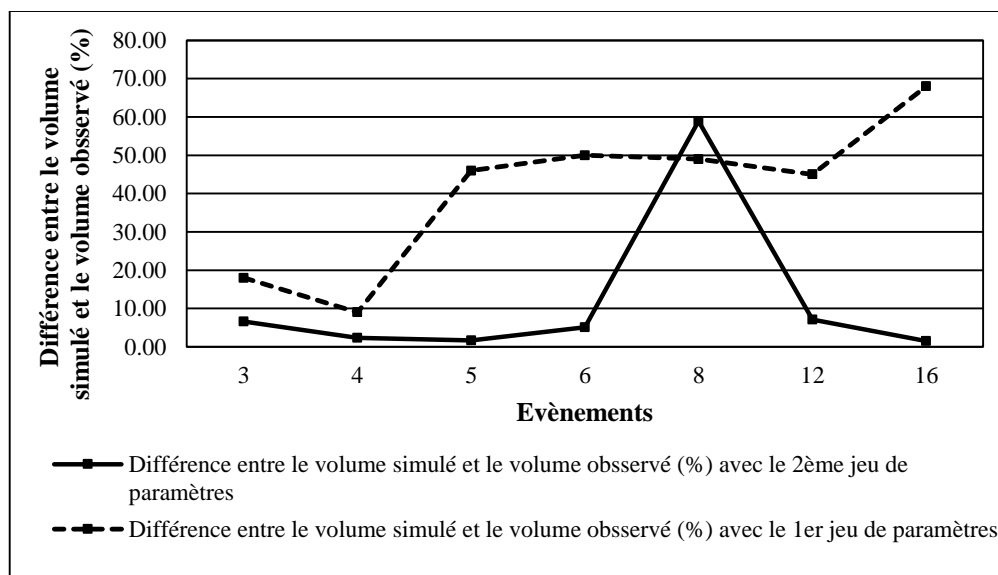


Figure 19. Comparaison entre le volume simulé et observé pour les deux essais de validation

Quant à la restitution du débit de base, la figure 20 montre que le problème lié à la simulation de ce dernier persiste toujours.

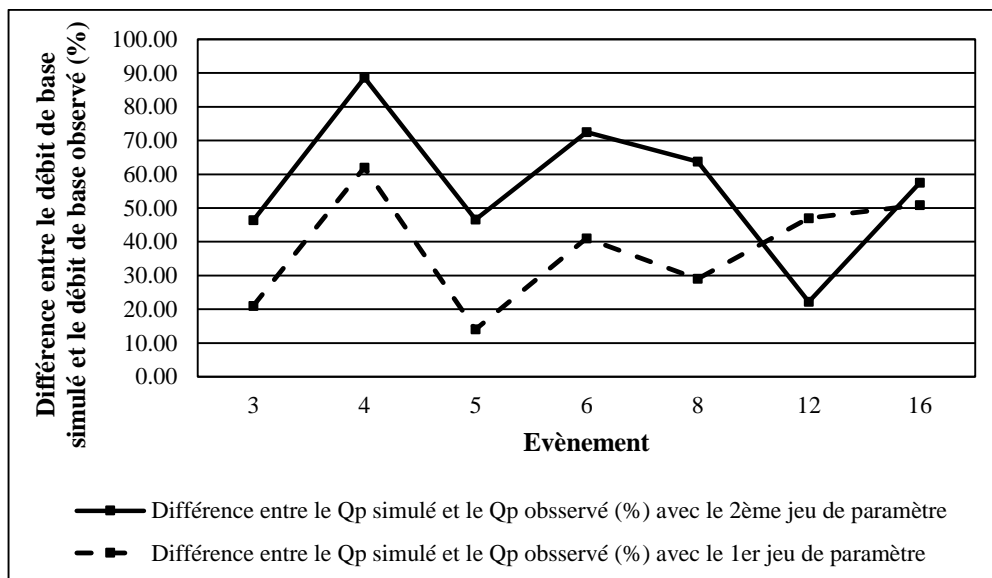


Figure 20. Comparaison entre le débit de base simulé et observé pour les deux essais de validation

Malgré les anomalies confrontées, le modèle a pu être validé sur les événements 5 et 12 pour lesquels les débits et les volumes simulés suivent ceux observés (figure 21 et 22). Ces événements seront utilisés pour la simulation de la réponse du bassin versant aux différents scénarios de changement de l'occupation des sols.

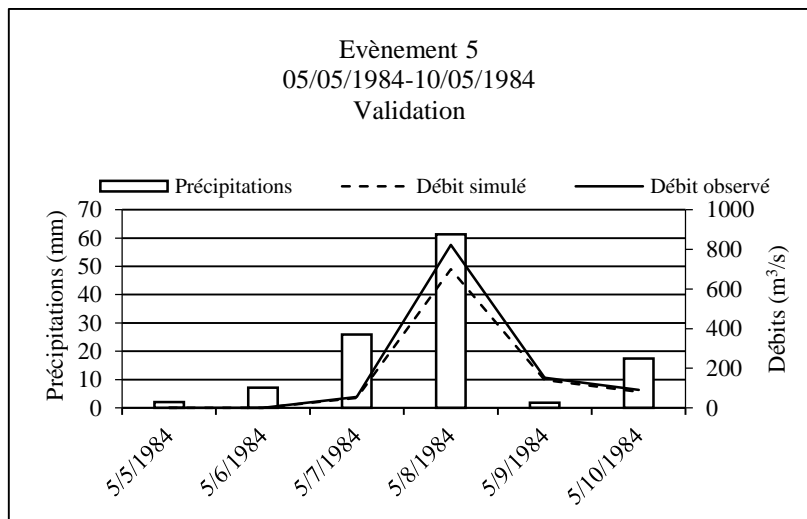


Figure 21. Validation du modèle par les événements 5

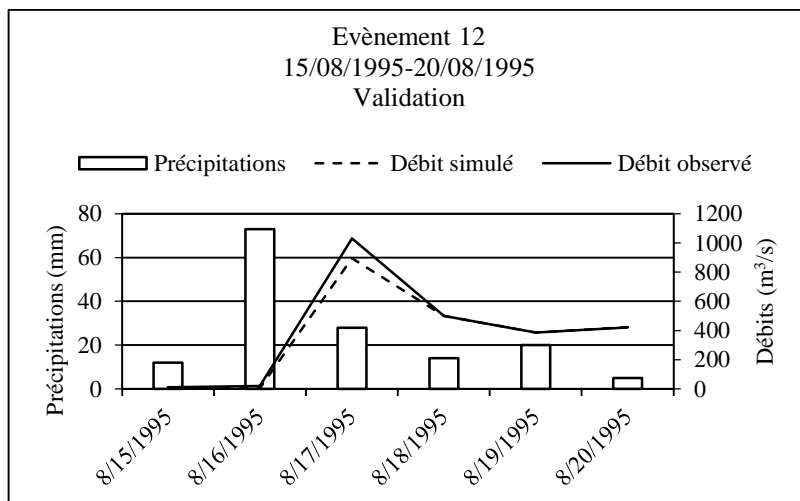


Figure 22. Validation du modèle par les évènements 12

2.2.4. Modélisation hydraulique

L'outil HEC-RAS a été utilisé pour spatialiser l'étendue des crues à travers la modélisation hydraulique des écoulements graduellement variés sous le modèle unidimensionnel de Saint-Venant (USACE, 2010).

Le risque d'inondation (faible, moyen, élevé) est le résultat de la combinaison de l'aléa inondation et de la vulnérabilité des zones avoisinantes. L'aléa repose sur la combinaison des valeurs de récurrence et de submersion. Quant à la vulnérabilité, elle reflète le degré de dommage d'un enjeu soumis à un aléa d'intensité et d'occurrence données (Rifai et al., 2013).

Dans cette étude, la vulnérabilité étudiée est celle de l'occupation des sols. Les niveaux de vulnérabilité pour les différentes occupations du sol au niveau de la vallée de l'Ourika a permis de distinguer entre les zones à vulnérabilité faible (Arboriculture et ripisylves), les zones à vulnérabilité moyenne (terrains de culture) et les zones à vulnérabilité élevée (habitations et infrastructures économiques). Ce facteur a été spatialisé en se basant sur la carte d'occupation des sols réalisée à partir de l'image satellitaire Landsat 8_OLI de l'année 2014. Ainsi, on a défini une zone à risque d'inondations élevé pour les zones fortement anthropisées situées dans une zone d'aléa élevé et, à l'inverse, un risque d'inondation faible pour une zone occupée par les ripisylves et l'arboriculture.

3. Résultats et discussions

3.1. Impact de l'occupation des sols sur le comportement hydrologique du bassin versant de l'Ourika

Dans le but de simuler l'impact de l'occupation des sols sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Ourika, on a utilisé les évènements 5 et 12 pour lesquels le modèle a pu restituer le débit de pointe. Le débit de pointe observé pour l'évènement 5 a été lié à l'état de l'occupation des sols de 1984. Quant à l'évènement 12, il correspond à la fameuse crue de 1995. Pour cet évènement, on l'a lié à l'état de l'occupation des terres de 2000, faute de disponibilité d'une carte d'occupation pour l'année de 1995. Donc et afin de simuler l'impact des changements qu'avaient connu la zone en termes d'utilisation de l'espace, on a prévu deux scénarios. Le premier scénario simule l'impact d'un changement négatif dans l'occupation des sols. Quant au deuxième, il simule celui d'un changement positif.

3.1.1. Détermination des averses quantiles

Pour la détermination des averses quantiles, on a procédé par l'ajustement de différentes lois de probabilité aux débits maximaux instantanés annuels enregistrés au niveau de la station d'Aghbalou par la méthode de maximum de vraisemblance. La loi la mieux adaptée à la simulation des débits extrêmes du bassin versant de l'Ourika est la loi log-normal. Ce résultat concorde avec ceux issus de plusieurs études qui affirment que pour les régimes hydrologiques arides et semi arides, la loi log-normal permet d'obtenir le meilleur ajustement (Dubreuil, 1974).

Le tableau 14 présente les valeurs prévues par le modèle HEC-HMS en termes de débit de pointe.

Tableau 13. Valeurs simulées du débit de pointe pour les averses quantiles

Périodes de retour (ans)	Qp (m ³ /s)
T=2	93.38
T=5	253.04
T=10	405.21
T=20	611.82
T=50	945.60
T=100	1 290.33

Pour un cours d'eau de 5 m³/s de débit moyen, la crue décennale augmente à 253.04 m³/s et la pointe centennale atteint 1290.33 m³/s. Ce sont des pics très élevés pour un bassin versant de 576 km² de surface et présentent un risque hydrologique de grande envergure.

3.1.2. Scénario 1 : Impact d'un changement négatif dans l'occupation des sols

Au niveau de ce scénario, on a simulé l'impact de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits de pointe. La simulation n'a été faite que pour l'évènement 5, vu que l'évènement 12 reflète déjà un état dégradé du couvert végétal.

Pour ce faire, on a utilisé la carte d'occupation des sols de l'année 2000. Cette carte illustre un recul de la superficie de la forêt équivalent à 20.16 % par rapport à sa superficie en 1984. Ainsi, les sols nus et les cultures ont augmenté respectivement de 57.33 % et 24.06 %.

À partir de ces modifications, on a recalculé le nouveau CN du bassin versant qui a passé de 70.01 à 79.51. Le taux d'imperméabilité est évalué à 48 %.

Le tableau 14 montre les valeurs du débit de pointe obtenues pour le scénario étudié ainsi que les résultats en lui associant les averses quantiles. On constate d'après ces résultats que le débit de pointe a augmenté de 31.68 % par rapport à la valeur observée.

Tableau 14. Résultats de simulation de l'impact d'un changement négatif dans l'occupation des sols

	Observé	Simulé	Scénario	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m³/s)	823	700.41	1 083.73	117.1	323.5	484.5	702.7	1 056.9	1 390.59

Si on compare les débits de pointe pendant les six périodes de retour avec ceux du premier scénario, le tableau 15 montre que plus la période de retour est grande plus l'influence de l'occupation des sols sur les débits de pointe diminue. Ce constat a été démontré par l'étude de Jeníček (2007).

Tableau 15. Comparaison entre les averses quantiles et les résultats du 1^{er} scénario

	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m³/s) : averses quantiles	93.38	253.04	405.21	611.82	945.60	1 290.33
Qp (m³/s) : scénario 1	117.1	303.5	484.5	702.7	1056.9	1 390.59
Différence (%)	25.40	19.94	19.57	14.85	11.77	7.77

3.1.3. Scénario 2 : Impact d'un changement positif dans l'occupation des sols

Pour ce deuxième scénario, l'action a été mise sur l'évaluation de l'impact des actions entreprises par le forestier dans le bassin versant de l'Ourika à travers les reboisements et l'arrêt des exploitations ainsi que celui de la dynamique socio-spatiale qu'a connu la zone durant les quatorze (14) dernières années. C'est dans ce but qu'on a utilisé la carte d'occupation des sols de 2014. Cette carte montre que la couverture forestière a connu une évolution de 21.28 % par rapport à sa superficie en 2000. Pendant cette même période, les sols nus ne couvraient pas plus que 12.41 % de la superficie du bassin versant, soit un recul de 25.14 % par rapport à leur superficie en 2000. En parallèle, la superficie agricole a connu une évolution de 107.6 % par rapport à sa superficie en 2000.

En se référant à cette carte et à la carte des types de sols, on a calculé de nouveau la valeur du CN. La nouvelle valeur du CN est de l'ordre de 72.09 et le taux d'imperméabilité est évalué à 43 %.

Afin de simuler l'impact, sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant, de cette dynamique positive qu'avait connu le couvert végétal, on a utilisé l'évènement 12 qui fait référence à un état dégradé de la couverture forestière.

Le tableau 16 montre que la baisse du CN de 79.51 à 72.09, a engendré une baisse de 17.25 % dans les débits de pointe. Toutefois, pour les averses extrêmes, on remarque une diminution de l'influence de l'occupation des sols sur les débits, comme le montre le tableau 17.

Tableau 16. Résultats de simulation de l'impact d'un changement positif dans l'occupation des sols

	Observé	Simulé	Scénario	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m³/s)	1030	894.16	852.34	78.36	210.92	377.12	560.18	831.68	1 205.69

Tableau 17. Comparaison entre les averses quantiles et les résultats du 2ème scénario

	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m³/s) : averses quantiles	93.38	253.04	405.21	611.82	945.60	1 290.33
Qp (m³/s) : scénario 2	78.36	220.92	357.12	560.18	881.68	1 205.69
Différence (%)	16.08	12.69	11.87	8.44	6.76	6.55

3.2. Délimitation des zones inondables

Dans cette étude on a choisi de cartographier les zones inondables pour une crue centennale.

La figure 23 montre la présence d'un risque élevé quant à l'extension latérale des crues et les débordements de l'oued sur ses berges. En effet, les résultats de la modélisation montrent que pour une période de retour de 100 ans, la superficie susceptible d'être inondée est de l'ordre de 2 254 ha, soit 3.91 % de la superficie du bassin versant. Il s'agit essentiellement de la zone située au niveau de la vallée.

Carte des zones inondables dans le bassin versant de l'Ourika (crue centennale)

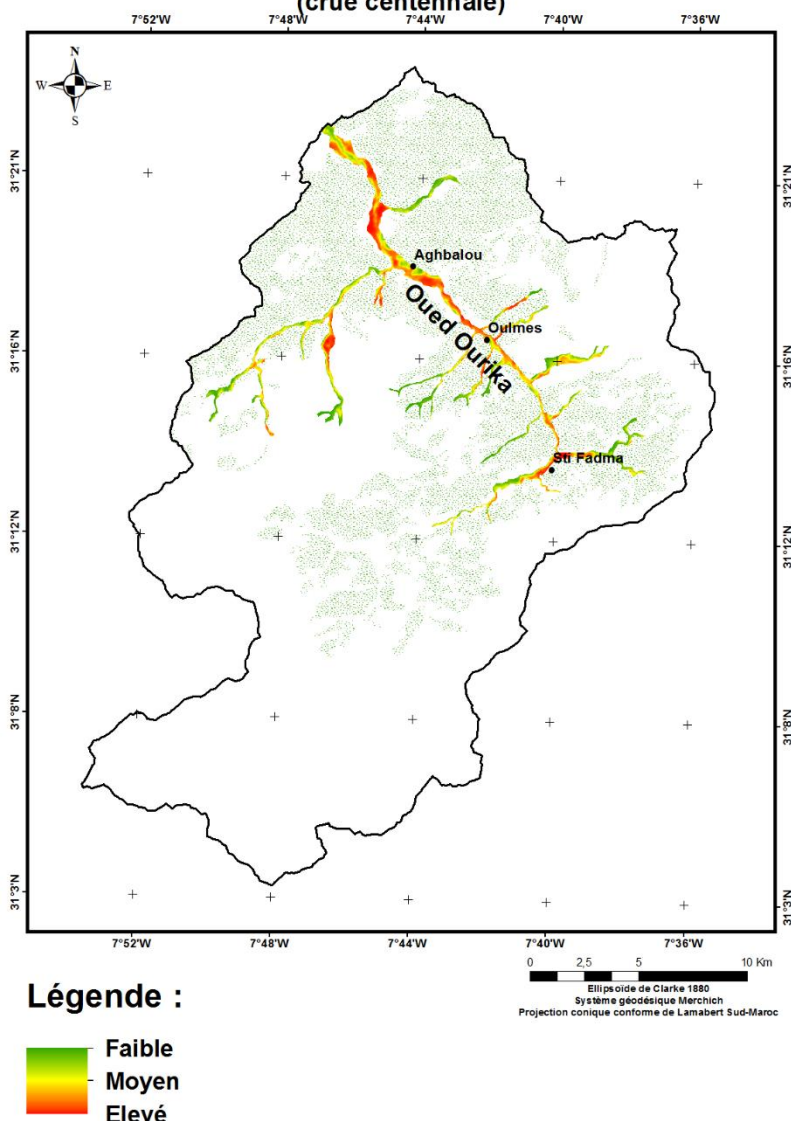


Figure 23. Carte des zones inondables dans le bassin versant de l'Ourika (crue centennale)

A l'issue des résultats obtenus, on constate que les zones à risque élevé d'inondations représentent plus que la moitié de la superficie inondable. Ces zones correspondent aux constructions et aux terrains agricoles situés au niveau de la vallée, notamment les villages d'Aghbalou, d'Oulmes et de Sti Fadma. A ces zones s'ajoute la route provinciale P2017, qui est la seule voie routière reliant la vallée de l'Ourika à la ville de Marrakech.

Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce phénomène. En effet, le relief y joue un rôle très important à travers les hautes altitudes caractérisant la partie amont du bassin versant et qui avoisinent parfois 4000 m, chose qui rend la partie aval plus exposée aux inondations en période forte pluie. A ce premier facteur s'ajoutent les régimes pluviométriques et hydrologiques de l'Ourika qui se caractérise par des hautes eaux de printemps. La pluviosité annuelle est en moyenne de 541 mm par an à la station d'Aghbalou. Elle augmente évidemment avec l'altitude et peut dépasser 700 mm par an en amont du bassin versant.

A ces facteurs s'ajoute l'absence d'une application de la législation relative à la construction en domaine public hydraulique, ainsi que le problème lié au défrichement des forêts en amont, favorisant, le ruissellement des eaux et la réduction de l'infiltration des sols (Rifai et al., 2013).

Conclusion et recommandations

La végétation constitue une composante principale dans la régulation du fonctionnement hydrologique. Les choix en matière de gestion des peuplements forestiers et les modes d'utilisation de l'espace pourraient se répercuter sur la couverture végétale et par conséquent sur son rôle modérateur des crues. Ainsi, la modélisation de l'impact de la dynamique spatio-temporelle qu'avait connu le bassin versant de l'Ourika sur son fonctionnement hydrologique, était indispensable pour la vérification de cette hypothèse.

D'une part, l'intégration des données géospatiales et des variables météorologiques dans le modèle hydrologique HEC-HMS a permis de modéliser le fonctionnement du bassin versant de l'Ourika. D'une autre part, l'utilisation du modèle hydraulique HEC-RAS, a permis de simuler l'étendue de la crue centennale de l'oued.

L'utilisation de l'événement 5 pour simuler la réponse du bassin versant suite à un changement négatif dans l'occupation des sols a montré que les changements opérés en 2000 à travers la diminution de la densité de la couverture forestière et sa dégradation ainsi que l'augmentation du taux de l'imperméabilité du bassin versant, ont provoqué une augmentation de 31.68 % des débits de pointe.

Ainsi, l'utilisation de la crue de 1995 pour simuler l'impact d'un changement positif dans l'occupation a montré une baisse de 17.25 % dans les débits de pointe. Cependant, en présence des événements d'intensité extrême, cet effet n'est pas suffisamment clair.

Quant à la simulation et la spatialisation du risque d'inondation dans la vallée de l'Ourika, met en lumière le risque élevé de débordement de l'oued sur l'infrastructure routière ainsi que sur les habitations et les activités agricoles.

A la lumière de ces résultats, on peut conclure que la forêt joue un rôle important dans l'atténuation des crues. D'où l'importance de la tâche du forestier dans les zones à haut risque d'inondations, comme c'est le cas du bassin versant de l'Ourika.

Toutefois, les résultats de ce travail auraient été plus précis si on avait les données des pluviographes. Dans cette perspective, on recommande ce qui suit :

- reprendre les simulations des événements en utilisant les données des pluviographes pour éviter la surestimation des volumes ruisselés ;

- réaliser des cartes d'occupation des sols pour les projections futures afin de prédire la réponse du bassin versant ;
- étudier l'impact des changements climatiques sur les ressources forestières au niveau du bassin versant et leur répercussion sur son comportement hydrologique.

Ainsi, l'attention doit être attirée vers les dégâts engendrés par les crues avec la nécessité d'élaborer des plans d'occupation des sols capables de préserver les biens et les vies humaines. De plus, une législation ferme est requise en matière de préservation du domaine public hydraulique pour parer aux préjudices récurrents des inondations de l'oued.

A long terme, on recommande d'utiliser la modélisation à temps réel qui se base sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps, pour reconstituer l'hydrogramme des crues au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. C'est un système d'alarme plus efficace vu que le temps de concentration du bassin versant est court, ce qui réduit l'efficacité des systèmes d'annonce des crues reposant sur la mesure de la hauteur d'eau en amont du bassin versant.

Références bibliographiques

- Abott et al., 1986.** An introduction to the European Hydrologic System - Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, vol. 87, p. 61-77.
- Ahbari, 2013.** Le bassin versant de Rhéraya, modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique. Mémoire de fin d'études. Faculté des Sciences et Techniques Gueliz-Marrakech.
- Andréassian et al., 2001.** Evaluer l'impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants : méthodologie et premiers résultats fondés sur les données de l'IFN. *Rev. For. Fr.* liii -3-4-2001.
- Andréassian, 2002.** Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Tome 1. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. Ecole doctorale : Géosciences et Ressources Naturelles Spécialité : Hydrologie. 276 p.
- Andréassian, 2004.** Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La houille blanche/N° 2-2004-31*, pp : 31-35.
- Aussenac, 1968.** Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. Forest.*, 25 (3), pp.: 135-156.
- Beven et al., 1979.** A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, n° 1, p. 43-69.
- Bonn et al., 1992.** Précis de télédétection. Volume 1 - Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte Foy, Québec, 485 p.
- Brocca et al., 2009.** Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrologic Engineering* 14, 153-165.
- Connolly et al., 1997.** Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using simulator data. III. Application to a spatially complex catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 193, p. 183-203.

- Cosandey, 2006.** De la forêt à l'eau. Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. Rev. For. Fr. LVIII -4-2006, pp. 317-328.
- Cosandey et al., 2008.** Rôle joué par la forêt sur l'hydrologie des régions méditerranéennes synthèse des recherches menées en France. Rapport quadriennal (1999-2002) du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, JP Bariot Ed., Toulouse, 2003. Pp. 239-250.
- Delyon, 2014.** Estimation paramétrique ; Cours de Master2 ; Université Rennes I, 117 p.
- Derouiche et al., 1997.** Effet du couvert végétal sur le comportement hydrique et le transport solide dans une pinède a sous-bois arbustif et herbacé, Espagne. Bulletin du Réseau Erosion 17, pp. 24-36, ed. Orstom.
- Descroix, 2003.** Les conséquences hydrologiques de l'évolution des usages des sols. Mémoire de recherche. Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université Joseph Fourier- Grenoble 1 Comité d'habilitation « Sciences de la Planète ». 206 p.
- Dubreuil, 1974.** Introduction à l'analyse hydrologique, Ed. Masson-ORSTOM, Paris, 1974 216 p.
- El Hadraoui, 2013.** Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre.
- Fortin et al., 1986.** Development of a modular hydrological forecasting model based on remotely sensed data for interactive utilization on a microcomputer. International Association of Hydrological Sciences Publication, n° 160, p. 307-319.
- Fortin et al., 2001a.** Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 6, n° 2, p. 91-99.
- Fritsch, 1992.** Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants : opération ECEREX en Guyane française. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. Collection Etudes et Thèses. Paris 1992. 390 p.

- Galea et al., 1993.** Influence du couvert végétal sur l'hydrologie des crues, modélisation à validations multiples. *Hydrol. Continent*, vol. 8, no 1, 1993. Pp. 17-33.
- Gerrits, 2010.** The role of interception in the hydrological cycle. ISBN: 978-90-6562-2488. 126 p.
- Grayson et al., 1992.** Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, vol. 28, p. 2639-2658.
- Jeniček, 2007.** Effects of land cover on runoff process using SCS CN method in the upper Chomutovka catchment. In *Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation 24-26 September [CD-ROM]*. Remote Sensing Department, University of Trier, Trier. S.42-46.
- Kouamé et al., 2007.** Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de côte d'ivoire (Afrique de l'ouest). *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 217-235.
- Leavesley et al., 1995.** The Precipitation-Runoff Modeling System-PRMS. In *Computer models of watershed hydrology*. P. 281-310.
- Morin et al., 1981.** Le modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation. INRS-Eau, Sainte-Foy, Rapport n° 93, 78 p.
- Motevalli, 2012.** Assessing the Effects of Land use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(8): 510-519, 2012. ISSN 1991-8178.
- Musy et al., 1998.** Hydrologie appliquée, Edition *H*G*A*, Bucarest. ISBN : 973-98530-8-0. 369p.
- Meylan et al., 2008.** Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 184 p.
- Narjisse et al., 2001.** Le couvert végétal marocain : Etat de dégradation, acquis et perspectives en matière de conservation et de mise en valeur. *Revue H.T.E N°119*- Juin 2001, pp. 25-29.

- NRCS, 1997.** National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. United States, Department of Agriculture, 762p.
- Ouhammou, 1991b.** Aperçu sur l'étagement de la végétation dans le bassin versant de l'oued Ourika. Haut Atlas de Marrakech. Bull. Soc. Linn. Lyon, 60: 401-409.
- Pietroniro et al., 2005.** A review of Canadian remote sensing and hydrology, 1999-2003. Hydrological Processes, vol. 19, p. 285-301.
- Ramromi, 2007.** Les crues en zone montagneuse semi-aride. Le cas des bassins du R'Dat et du Zat (Haut Atlas, Maroc).
- Rawls et al., 1989.** Estimation of soil water retention and hydraulic properties, p. 275-300.
- Refsgaard et al., 1995.** Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Colorado, 1144 p.
- Rifai et al., 2013.** Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (Nord-Ouest du Maroc). Revue des Sciences de l'Eau 27(1) (2014) 57-69.
- Saadi, 2005.** Conséquences géographiques et socio-économiques des inondations dans la vallée de l'Ourika (Maroc), exemple des crues du 17/08/1995 et du 28/10/1999. Mémoire de fin d'études. Faculté des sciences et technique Gueliz-Marrakech.
- Sabol, 1988.** Clark Unit Hydrograph and r-parameter estimation. Journal of Hydraulic Engineering 114, 103-111.
- Saidi et al., 2006.** 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.
- Salama et al., 2010.** La gestion des ressources en eau face aux changements climatiques. Cas du bassin Tensift (Maroc). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 127-138.
- Schmugge et al., 2002.** Remote sensing in hydrology. Advances in Water Resources, vol. 25, p. 1367-1385.
- Singh et al., 2002.** Mathematical modeling of watershed hydrology. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 7, n° 4, p. 270-292.

Taha, 2003. La prédiction du comportement hydrologique du bassin Awage en utilisant le modèle WMS (Watershed Modelling System). Publi. N° 278, 2003.

Tramblay, 2012. Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine. Rapport interne de l'ABH de Loukous. Maroc. 34p.

USACE, 2010. Hydrologic Engineering Center, River Analysis System (HEC-RAS). User's manual, 790 p.

Conclusion générale

Pendant les trente dernières années, le bassin versant de l'Ourika, a connu une série d'inondations catastrophiques. Cette situation a incité le gestionnaire du territoire à édicter de nouvelles orientations. Les choix du gestionnaire du territoire en matière de gestion des peuplements forestiers, les modes d'utilisation de l'espace ainsi que la dynamique socio-territoriale qu'avait connu la région pourraient se répercuter sur la couverture végétale et par conséquent sur son rôle modérateur des crues.

Dans ce cadre, l'évaluation de l'impact de ces facteurs sur les ressources forestières et ses répercussions sur le rôle de la forêt dans l'atténuation des événements extrêmes, est primordiale pour une meilleure gestion du risque d'inondations.

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation de la télédétection pour l'élaboration des cartes d'occupation des sols correspondant aux dates de 1984, 2000 et 2014. Quant à l'évaluation de la réponse du bassin versant vis-à-vis des changements opérés dans l'occupation des sols, elle repose sur l'utilisation du modèle hydrologique HEC-HMS pour la simulation du fonctionnement hydrologique à travers deux scénarios de changement, et sur l'emploi du modèle hydraulique HEC-RAS pour simuler l'étendue de la crue centennale de l'oued.

Les résultats de cette étude montrent que la couverture forestière a subi une dégradation très accélérée au cours de la période 1984-2000. En effet, le suivi du couvert forestier révèle sa dégradation au cours de la période 1984 à 2000. Il s'agit d'un recul de 20.19 % par rapport à la superficie forestière initiale, soit une superficie de 3 773.14 ha.

La période allant de 2000 à 2014, a connu une augmentation de 21.28 % dans la couverture forestière du bassin versant, soit une superficie de 3 174.28 ha. Pendant cette même période, les sols nus ne couvraient pas plus que 12.41 % de la superficie du bassin en 2014, soit un recul de 25.14 % par rapport à leur superficie en 2000.

Quant aux résultats de la simulation hydrologique, le premier scénario a permis de quantifier l'impact de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits de pointe. Les résultats de la simulation montrent que le débit de pointe a augmenté de 31.68 %.

En ce qui concerne le deuxième scénario, l'action a été mise sur l'évaluation de l'impact des actions entreprises par le forestier dans le bassin versant de l'Ourika à travers les

actions de reboisement et la proscription des exploitations, ainsi que des changements du mode d'utilisation de l'espace. Les résultats des simulations montrent que ce changement a engendré une baisse dans les débits de pointe de 17.25 %. Toutefois, pour les averses extrêmes, on assiste à une diminution de l'influence de l'occupation des sols sur les débits.

Enfin, les résultats de la modélisation hydraulique montrent que pour une période de retour de 100 ans, les zones à risque élevé d'inondations représentent plus que la moitié de la superficie inondable qui se localise essentiellement au niveau de la vallée. Ces zones correspondent aux constructions et aux terrains agricoles, notamment les villages d'Aghbalou, d'Oulmes et de Sti Fadma. A ces zones s'ajoute la route provinciale P2017 reliant la vallée de l'Ourika à la ville de Marrakech.

Ce travail dévoile, d'une part, le rôle modérateur des crues que joue la forêt au niveau du bassin versant de l'Ourika. D'une autre part, le risque de submersion de zones d'activités anthropiques et appelle à repenser l'aménagement du territoire de son sens le plus large pour bien gérer ce risque, le prévoir et prévenir ses effets pervers.

Référence bibliographiques

- Abbott et al., 1986.** An introduction to the European Hydrologic System - Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, vol. 87, p. 61-77.
- Ahbari, 2013.** Le bassin versant de Rhéraya, modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique. Mémoire de fin d'études. Faculté des Sciences et Techniques Gueliz-Marrakech.
- Andréassian et al., 2001.** Evaluer l'impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants : méthodologie et premiers résultats fondés sur les données de l'IFN. *Rev. For. Fr.* liii -3-4-2001.
- Andréassian, 2002.** Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Tome 1. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6. Ecole doctorale : Géosciences et Ressources Naturelles Spécialité : Hydrologie. 276 p.
- Andréassian, 2004.** Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. *La houille blanche/N° 2-2004-31*, pp : 31-35.
- Anonyme, 2002.** Procès-verbal d'aménagement de la forêt d'Ourika, HCEFLCD.
- Aussenac, 1968.** Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. Forest.*, 25 (3), pp : 135-156.
- Bamba et al., 2008.** Influence des Actions Anthropique sur la Dynamique Spatio-Temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas Congo (R.D. Congo). *Sciences & Nature*, VOL. 5, N 1, pp. 49-60.
- Beven et al., 1979.** A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, n° 1, p. 43-69.
- Bonn et al, 2007.** Précis de télédétection : Principe et méthodes, Vol.1, presse de l'université du Québec, Québec.
- Bouarais, 2015.** Contribution à la compréhension des enjeux environnementaux et des jeux d'acteurs qui conditionnent l'exploitation et la gestion des ressources

naturelles dans le bassin versant de l'Ourika. Mémoire de 3ème cycle. Aménagement des Forêts. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs.

- Brocca et al., 2009.** Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrologic Engineering* 14, 153–165.
- Connolly et al., 1997.** Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using simulator data. III. Application to a spatially complex catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 193, p. 183-203.
- Coppin et al., 2004.** Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing* 25(9), pp. 1565-1596.
- Cosandey, 2006.** De la forêt à l'eau. Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. *Rev. For. Fr.* LVIII -4-2006, pp. 317-328.
- Cosandey et al., 2008.** Rôle joué par la forêt sur l'hydrologie des régions méditerranéennes synthèse des recherches menées en France. Rapport quadriennal (1999-2002) du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique, JP Barriot Ed., Toulouse, 2003. Pp. 239-250.
- Dean et al, 2003.** An evaluation of per-parcel land cover mapping using maximum likelihood class probabilities. *International Journal of Remote Sensing*, 24, pp. 2905-2920.
- Delyon, 2014.** Estimation paramétrique ; Cours de Master2 ; Université Rennes I, 117 p.
- Derouiche et al., 1997.** Effet du couvert végétal sur le comportement hydrique et le transport solide dans une pinède a sous-bois arbustif et herbacé, Espagne. *Bulletin du Réseau Erosion* 17, pp. 24-36, ed. Orstom.
- Descroix, 2003.** Les conséquences hydrologiques de l'évolution des usages des sols. Mémoire de recherche. Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université Joseph Fourier- Grenoble 1 Comité d'habilitation « Sciences de la Planète ». 206 p.
- Dubreuil, 1974.** Introduction à l'analyse hydrologique, Ed. Masson-ORSTOM, Paris, 1974 216 p.

- El Alaoui El Fels, 2014.** Simulation et spatialisation du risque d'inondation dans une vallée anthropisée, le cas de la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal*, June 2014 edition, vol.10, No.17, ISSN: 1857 – 7881.
- El Hadraoui, 2013.** Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre.
- Exilien, 2013.** Evolution de l'occupation du sol de 2002 à 2010 et risques hydrologiques cas du versant nord du morne l'hôpital (Port-au-Prince, Haïti). Mémoire de maîtrise en Géographie. Université du Québec à Montréal.
- Fournier, 2008.** Détection et classification de changements. Thèse de Doctorat, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, 134p.
- Fortin et al., 1986.** Development of a modular hydrological forecasting model based on remotely sensed data for interactive utilization on a microcomputer. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, n° 160, p. 307-319.
- Fortin et al., 2001a.** Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 6, n° 2, p. 91-99.
- Fritsch, 1992.** Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants : opération ECEREX en Guyane française. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. Collection Etudes et Thèses. Paris 1992. 390 p.
- Galea et al., 1993.** Influence du couvert végétal sur l'hydrologie des crues, modélisation à validations multiples. *Hydrol. Continent*, vol. 8, no 1, 1993. Pp. 17-33.
- Gao et al., 2006.** Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches-a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 4039-4051.
- Gerrits, 2010.** The role of interception in the hydrological cycle. ISBN: 978-90-6562-2488. 126 p.
- Grayson et al., 1992.** Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, vol. 28, p. 2639-2658.

- Hammi, 2007.** Évolution des recouvrements forestiers et de l'occupation des sols entre 1964 et 2002 dans la haute vallée des Ait Bouguemez (Haut Atlas central, Maroc). *Sécheresse* 18 (2007) 271-277.
- Hay et al., 2006.** Object-based image analysis: strength, weakness, opportunities, and threats (SWOT). 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), 4-5, July, 2006, Salzburg, Austria.
- Inoussa et al., 2011.** Dynamique spatio-temporelle des forêts claires dans le parc national du W du Niger (Afrique de l'Ouest). *Sècheresse*, Vol 22, n°2, pp. 108-116.
- Jeníček, 2007.** Effects of land cover on runoff process using SCS CN method in the upper Chomutovka catchment. In Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation 24-26 September [CD-ROM]. Remote Sensing Department, University of Trier, Trier. S.42-46.
- Kermadi, 2011.** Evolution du régime hydrologique d'un bassin-versant péri-urbain : l'yzeron (ouest lyonnais). Complémentarité de l'analyse des données, de la modélisation et de la cartographie de l'occupation des sols. Journées de Climatologie Lyon, 17-18 mars 2011 - Climat et société : Climat et eau.
- Kouamé et al., 2007.** Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de côte d'ivoire (Afrique de l'ouest). *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 217-235.
- Leavesley et al., 1995.** The Precipitation-Runoff Modeling System-PRMS. In Computer models of watershed hydrology. P. 281-310.
- Lecerf, 2008.** Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne). Thèse de Doctorat de l'Université de RENNES 2, Université Européenne de Bretagne. 326 p.
- Lillesand et al., 2004.** Remote Sensing and Image Interpretation, 5th edition. John Wiley & Sons, NY; Thesis. Univ. of Minnesota.
- Lu et al., 2010.** Land-use and land-cover change detection. Vol.11, N2, pp. 271-288.

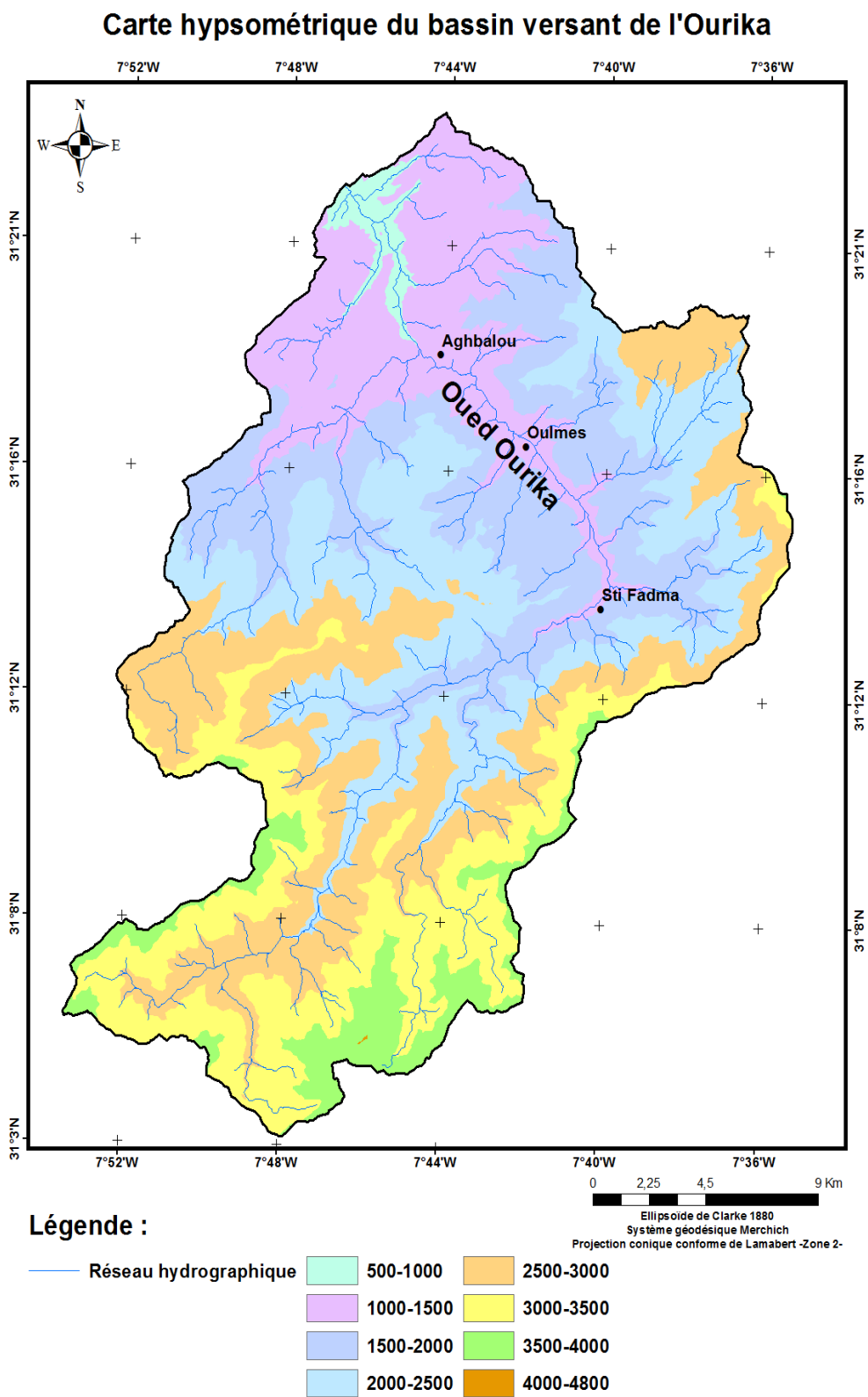
- Morin et al., 1981.** Le modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation. INRS-Eau, Sainte-Foy, Rapport n° 93, 78 p.
- Motevalli, 2012.** Assessing the Effects of Land use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(8): 510-519, 2012. ISSN 1991-8178.
- Musy et al., 1998.** Hydrologie appliquée, Edition *H*G*A*, Bucarest. ISBN : 973-98530-8-0. 369p.
- Meylan et al., 2008.** Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 184 p.
- Narjisse et al., 2001.** Le couvert végétal marocain : Etat de dégradation, acquis et perspectives en matière de conservation et de mise en valeur. Revue H.T.E N°119- Juin 2001, pp. 25-29.
- NRCS, 1997.** National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. United States, Department of Agriculture, 762p.
- Ouhammou, 1991b.** Aperçu sur l'étagement de la végétation dans le bassin versant de l'oued Ourika. Haut Atlas de Marrakech. Bull. Soc. Linn. Lyon, 60: 401-409.
- Pietroniro et al., 2005.** A review of Canadian remote sensing and hydrology, 1999-2003. Hydrological Processes, vol. 19, p. 285-301.
- Ramromi, 2007.** Les crues en zone montagneuse semi-aride. Le cas des bassins du R'Dat et du Zat (Haut Atlas, Maroc).
- Rawls et al., 1989.** Estimation of soil water retention and hydraulic properties, p. 275-300.
- Refsgaard et al., 1995.** Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Colorado, 1144 p.
- Richards et al., 2005.** Remote sensing digital image analysis. An introduction. 4th Edition. 439 p.

- Rifai et al., 2013.** Modélisation des crues des rivières pour la gestion intégrée du risque d'inondation : cas du bassin versant de Tahaddart (Nord-Ouest du Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau* 27(1) (2014) 57-69.
- Saadi, 2005.** Conséquences géographiques et socio-économiques des inondations dans la vallée de l'Ourika (Maroc), exemple des crues du 17/08/1995 et du 28/10/1999. Mémoire de fin d'études. Faculté des sciences et technique Gueliz-Marrakech.
- Sabir et al., 2003.** Organisation spatiale et gestion paysanne des ressources naturelles dans deux terroirs des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). Colloque organisé par l'UMR SAGERT « Organisation Spatiale et Gestion des Ressources et des Territoires Ruraux », Montpellier – France les 25, 26 et 27 février 2003. 11 p.
- Sabol, 1988.** Clark Unit Hydrograph and r-parameter estimation. *Journal of Hydraulic Engineering* 114, 103-111.
- Saidi et al., 2006.** 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.
- Saidi et al., 2010.** Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc) : Événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride. *Comunicações Geológicas*, 2010, t. 97, pp. 113-128.
- Salama et al., 2010.** La gestion des ressources en eau face aux changements climatiques. Cas du bassin Tensift (Maroc). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 127-138
- Schmugge et al., 2002.** Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, vol. 25, p. 1367-1385.
- Singh et al., 2002.** Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 7, n° 4, p. 270-292.
- Singh, 2004.** Variability of aerosol parameters over Kanpur, northern India, *J. Geophys. Res.*, 109, D23206.
- Shaoqing, 2008.** The comparative study of three methods of remote sensing image change detection. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079.

- Sui et al., 2008.** “Chapter 17: Processing of multi-temporal Data and Change Detection”, In Z. Li, J. Chen and E. Baltsavias (Eds.) “Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, ISPRS Congress Book, pp : 227-247, 2008. Publisher : Taylor & Francis Group, London.
- Taha, 2003.** La prédiction du comportement hydrologique du bassin Awage en utilisant le modèle WMS (Watershed Modelling System). Publi. N° 278, 2003.
- Tramblay, 2012.** Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine. Rapport interne de l’ABH de Loukous. Maroc. 34p.
- Zanini et al., 2006.** Analyse de la dynamique du paysage de la plaine du Rhône de 1950 à 2003 sur la base de cartes topographiques. Bulletin de la Murithienne, VOL 124, pp. 89-98.
- USACE, 2010.** Hydrologic Engineering Center, River Analysis System (HEC-RAS). User’s manual, 790 p.

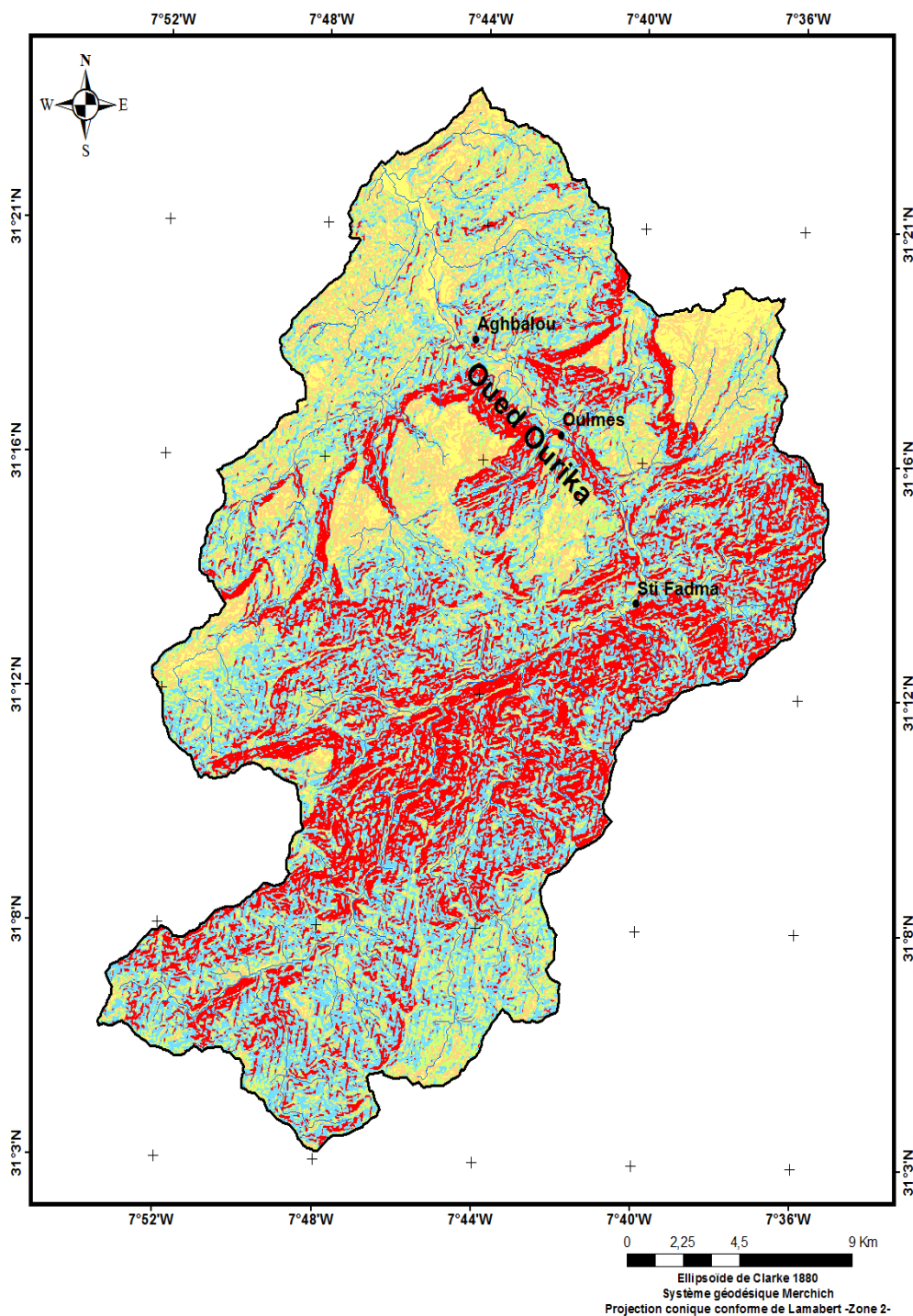
Annexes

Annexe 1. Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ourika

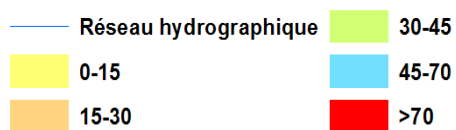


Annexe 2. Carte des pentes du bassin versant de l'Ourika

Carte des pentes du bassin versant de l'Ourika

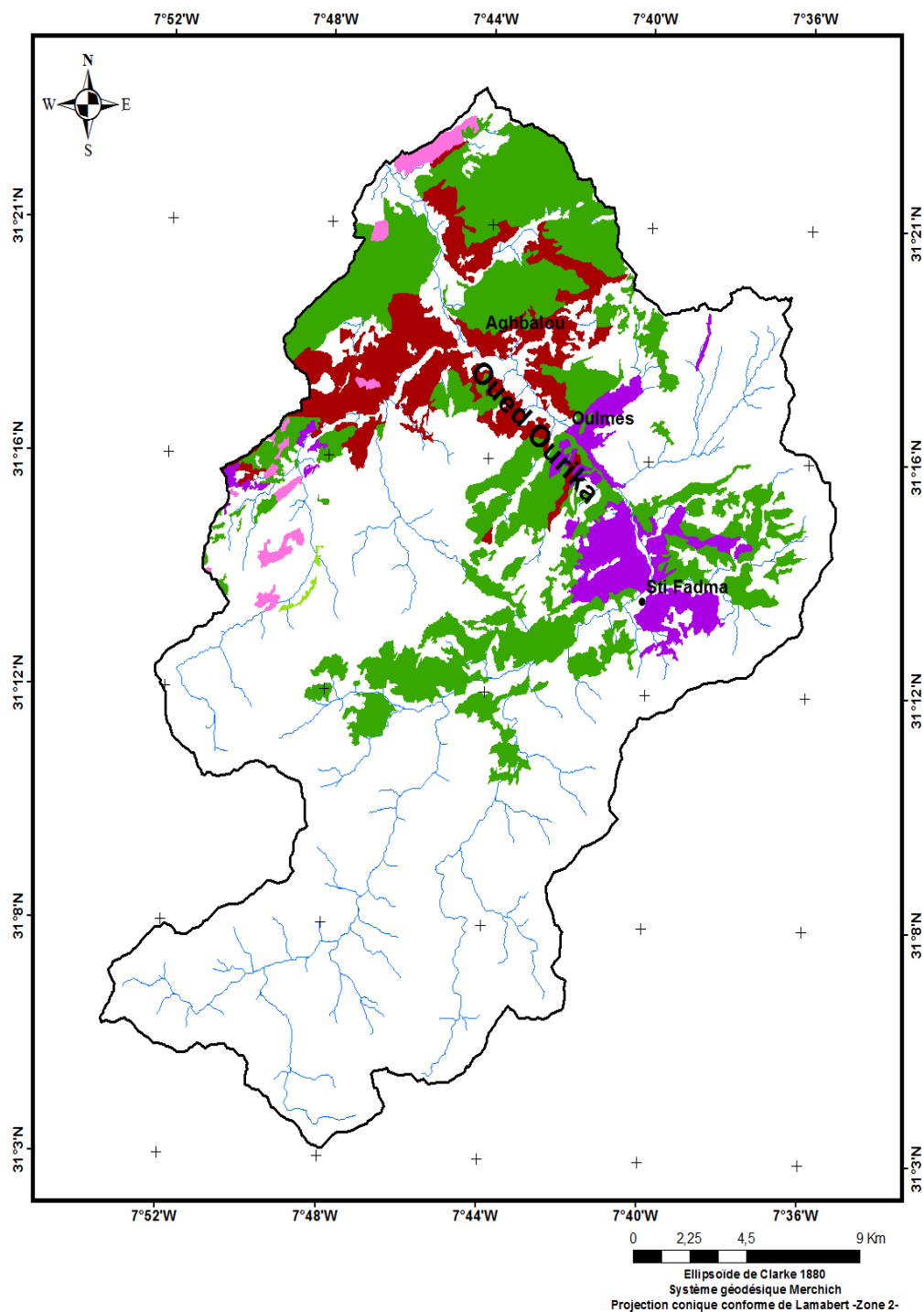


Légende :









Annexe 3. Carte de végétation du bassin versant de l'Ourika

Carte de végétation du bassin versant de l'Ourika



Légende :

- | | |
|---|---|
|  Réseau hydrographique |  Genévriers |
|  Chêne vert |  Reb. résineux |
|  Autres feuillus |  Thuya |