Royaume du Maroc



المملكة المغربية

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

Evaluation quantitative et optimisation des services écosystémiques dans le bassin versant de l'Ourika

#### **MEMOIRE DE 3**ème **CYCLE**

Présenté par : Mr. KYENKYEHENE KUSI Kwadwo

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

**OPTION**: Economie Forestière

Soutenu publiquement le 13 Juillet 2017 à 16h00 devant le jury :

#### MM.

M. HAJIB S.	(C.R.F)	Président
Pr. KHATTABI A.	(E.N.F.I.)	Rapporteur
Pr. LAHSSINI S.	(E.N.F.I.)	Co-rapporteur
Pr. HLAL E.	(E.N.F.I.)	Examinateur
Pr. YACOUBI K. M.	(F.S.S)	Examinateur
Dr. BOULEMANE M.	(C.R.F)	Examinateur

ENFI, BP: 511, Bd. Moulay Youssef, Tabriquet, Salé, Maroc - Tél: 0537861149, Fax: 0537862607

#### **Dédicace**

Psaume 27:13

Si je n'avais pas eu la confiance que je verrais la bonté de l'Eternel dans la terre des vivants....!

A El SHADDAI, DIEU TOUT SUFFISANT, fidèle compagnon et seul garant en qui j'ai mis ma confiance.

A mon père BENETT KUSI KYENKYEHENE, pour m'avoir enseigné le droit chemin et m'avoir encouragé, rien ne vaut la quintessence de ses conseils.

A ma mère JULIANA KORAMOAH, douceur inédite, l'être qui m'a appris la patience et la maîtrise de soi et qui a cultivé en moi le sens de responsabilité.

C'est à vous donc, chère mère, que revient tout l'honneur. Mes mots sont bien trop petits et trop faibles pour exprimer toute ma reconnaissance aux efforts inlassables que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

A mes frères Bright, Ernest, Tony et ma sœur Belinda, les quatre anges sans lesquels je ne pourrais parler famille. Avec eux, tout n'est qu'amour, joie et félicité.

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 estimes 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. HAJIB S., Directeur de Centre de Recherche Forestière à Rabat, 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 Pr. HLAL E., Enseignant chercheur à l'ENFI., 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 Pr. YACOUBI K. M., Enseigneur à la Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech., pour son soutien indéfectible et précieux de tout genre. 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 Dr. BOULEMANE M. Chimiste au Centre de Recherche Forestière., 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

La quantification des services écosystémiques fournies par les écosystèmes à l'état actuel et au futur et ce selon divers scénarios de gestion permet de mieux orienter les choix politiques et d'éclairer les décisions quant aux options à mettre en œuvre pour garantir une gestion maximisant les services écosystémiques ; tel est l'objectif assigné à la présente étude. Des scenarios d'occupation du sol ont été définis pour le bassin versant de l'Ourika et qui traduisent différentes options de gestion. Ils ont fait l'objet de simulation et d'évaluation des services écosystémiques qui en découlent.

L'outil d'aide à la décision développé par Natural Capital Project, disponible gratuitement : InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade offs) a été utilisé dans ce travail. Cet outil comprend environ 18 modèles à partir desquels trois ont été choisis à cause de la disponibilité des données d'inputs pour modéliser, quantifier et cartographier les services écosystémiques : le stockage du carbone, la rétention des sédiments et le rendement en eau dans l'état actuel en 2016.

L'outil générateur de scénario d'InVEST a permis de développer les scenarios : tendanciel, catastrophique, idéal et concerté pour le futur (2030) en modélisant, quantifiant et cartographiant les services écosystémiques au niveau du bassin versant de l'Ourika.

Les résultats montrent que le service de contrôle de l'érosion modélisé par la rétention des sédiments et le service de régulation du climat modélisé par le stockage et la séquestration du carbone sont dans un état médiocre actuellement mais peuvent être optimisés dans le futur à travers les options de gestion déclinés par le scenario idéal et concerté. Ces scénarios tiennent compte de la restauration des zones dégradées par les espèces forestières et par certaines pratiques culturales avec la participation de la population. Le service de l'approvisionnement en eau par le rendement en eau qui est dans un état normal actuellement peut être optimisé dans le futur.

**Mots clés :** services écosystémiques, InVEST, scenario, bassin versant de l'Ourika, générateur de scenario

**Abstract** 

This study was carried out with the aim of increasing the ecosystem services by generating

scenarios for the land use and land covers in the Ourika watershed. Ecosystem services were

evaluated in 2016 and in the future (2030) for each scenario in order to bring arguments to

managers and stakeholders leading to the choice of the best decision that can ensure

sustainable provision of ecosystem services.

In order to manage the ecosystems well by increasing the services that they produce,

Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST), a tool which helps in

decision making, developed by the Natural Capital Project with a suite of free, open source

software models was used. This tool comprises of 18 models from which three were chosen

because of the availability of their data to model, value and map the ecosystem services:

carbon storage and sequestration, sediment retention and water yield for the current state in

2016.

Moreover, the scenario generator which is part of the supporting tools of InVEST was used to

generate the four scenarios: trend scenario, catastrophic scenario, ideal scenario and concerted

scenario for the future state in 2030 while modeling, evaluating and mapping the same

ecosystem services in the Ourika watershed.

The results showed that the erosion control service which was modeled by the sediment

retention model and the climate regulation service which was also modeled by the carbon

storage and sequestration model are currently in a mediocre state but can be increased in the

future through the ideal and the concerted scenarios which take into account the restoration of

degraded areas by forest species and some good agricultural practices with the participation of

the local people. The water provision services which was modeled by the water yield model is

currently in a normal state but can be increased in the future by all the 4 scenarios but most

especially the catastrophic scenario which integrates natural disasters and climate change.

**Keywords:** ecosystem services, InVEST, scenario, Ourika watershed, scenario generator.

#### Liste des abréviations

**ARIES:** Artificial Intelligence for Ecosystem Services

**EPM:** Ecosystem Portfolio Model

**ESR:** Ecosystem Services Review

**FAO:** Food and Agriculture Organization

**GIEC:** Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**HWSD:** Harmonized World Soil Database

**InVEST:** Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change

**KWH:** Kilowatt-Hour

**LUCI:** Land Utilisation and Capability Indicator

**MEA:** Millenium Ecosystem Assessment

**MIMES:** Multiscale Integrated Models of Ecosystem Services

MNT: Modèle Numérique du Terrain

**NAIS:** Natural Assets Information System

**SDR:** Sediment Delivery Ratio

**SIG:** Système d'Information Géographique

**SolVES:** Social Values for Ecosystem Services

**USLE:** Universal Soil Loss Equation

#### Sommaire

Dédi	icace	i
Rem	erciem	entsii
Résu	ımé	iii
Abst	ract	iv
Liste	e des ab	oréviations v
Som	maire .	vi
Liste	e des fig	gures x
Liste	e des ta	bleauxxiii
Intr	oductio	n générale1
		I : EVALUATION QUANTITATIVE DES SERVICES
		EMIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OURIKA4
		ronymes4
		5
		n6
		Revue bibliographie8
I		otion des services écosystèmes
		finition
		igine des services écosystémiques
		assification des services écosystémiques
	3.1	Les services de support
	3.2	Les services d'approvisionnement
	3.3	Les services de régulation
	3.4	Les services culturels et sociaux
II éc		s d'aide à la décision pour la quantification et l'évaluation des services niques
	1 Po	urquoi InVEST?12
	2 Int	roduction à InVEST13
	2.1	Le stockage et séquestration du carbone
	2.2	La rétention des sédiments
	2.3	Le rendement en eau
PAR	RTIE II	: Zone d'étude et méthodologie17
I	Zone	d'étude
II	Méth	odologie20

_	1 Le modèle de Carbone	20
	1.1 Les Inputs	23
	1.1.1 La carte d'occupation du sol actuelle	23
	1.1.2 Les stocks de carbone	24
2	2 Modèle de rétention des sédiments	26
	2.1 Les Inputs	28
3	3 Le modèle de rendement en eau	31
	3.1 Les inputs	34
PAR	RTIE III : Résultats et discussions	39
I	Le modèle Carbone	39
II	Modèle de rétention des sédiments	41
III	I Le modèle de rendement en eau	46
Conc	nclusion	49
Réfé	érences bibliographiques	50
SEC'	CTION II : OPTIMISATION DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES	A
	AVERS LA GENERATION DES SCENARIOS DANS LE BASSIN VEI	RSANT DE
$\mathbf{I}$		<b>5</b> (
	OURIKA	
Liste	te des acronymes	56
Liste Résu	te des acronymesumé	56 57
Liste Résu Intro	te des acronymesumé	56 57
Liste Résu Intro PAR	te des acronymesuméeoduction	56 57 57
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  roduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude	56 57 57 60
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes	56576060
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes	5657606060
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes	5657606061
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes	5657606061
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes	565760606161
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  roduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude  1 Situation géographique  2 Situation administrative  3 Situation forestière  4 Géologie et pédologie  4.1 Structure géologiques du bassin  4.2 Caractéristiques pédologiques	5657606061616161
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  Toduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude  1 Situation géographique  2 Situation administrative  3 Situation forestière  4 Géologie et pédologie  4.1 Structure géologiques du bassin  4.2 Caractéristiques pédologiques  Méthodologie	565760606161616161
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  coduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude  1 Situation géographique  2 Situation administrative  3 Situation forestière.  4 Géologie et pédologie  4.1 Structure géologiques du bassin  4.2 Caractéristiques pédologiques  Méthodologie  1 Comprendre les scenarios	56576060616161616161
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  coduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude  1 Situation géographique  2 Situation administrative  3 Situation forestière  4 Géologie et pédologie  4.1 Structure géologiques du bassin  4.2 Caractéristiques pédologiques  Méthodologie  1 Comprendre les scenarios  1.1 Types de scenarios	56576060616161616163
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  Toduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude  1 Situation géographique  2 Situation administrative  3 Situation forestière  4 Géologie et pédologie  4.1 Structure géologiques du bassin  4.2 Caractéristiques pédologiques  Méthodologie  1 Comprendre les scenarios  1.1 Types de scenarios  1.2 Projection Future : Quel avenir attendez vous?	
Liste Résu Intro PAR I	te des acronymes  umé  coduction  RTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail  Zone d'étude  1 Situation géographique  2 Situation administrative  3 Situation forestière  4 Géologie et pédologie  4.1 Structure géologiques du bassin  4.2 Caractéristiques pédologiques  Méthodologie  1 Comprendre les scenarios  1.1 Types de scenarios	565760606161616162636363

	2.1 Quel est l'objectif de l'application d'InVEST?	66
	2.2 Les exigences des scénarios à utiliser dans InVEST	66
	2.3 Le nombre des scénarios	66
3	Développer des récits historiques	67
	3.1 Méthodes communes pour les projections futures	68
4	Créer les cartes de scénario	68
	4.1 Scenario Tendanciel	69
	4.2 Scenario Catastrophique	70
	4.3 Scenario Idéal	70
	4.4 Scenario concerté	71
5	Modélisation des services écosystémiques avec InVEST sur la base 72	se des scénarios
PART	ΓΙΕ ΙΙ : Résultats et Discussion	
I	Scenario Tendanciel	
1	Carbone	76
2		
3	Rendement en eau	82
II	Scenario Catastrophique	85
1	Carbone	88
2	Rétention des sédiments	90
3	Rendement en eau	93
III	Scenario Idéal	96
1	Carbone	99
2	Rétention des sédiments	101
3	Rendement en eau	104
IV	Scenario concerté	106
1	Carbone	109
2	Rétention des sédiments	111
3	Rendement en eau	114
Conc	lusion	118
Conc	lusion générale	120
Référ	rences bibliographiques	122
Anne	xes	126

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

#### Liste des figures

- Figure 1. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika
- Figure 2. Carte d'occupation du sol de bassin versant d'Ourika
- Figure 3. Les données d'input pour le modèle de la rétention des sédiments
- Figure 4. Les données d'input pour le modèle de rendement en eau
- Figure 5. La carte du stockage actuel du carbone dans le bassin versant de l'Ourika.
- Figure 6. La carte de la rétention des sédiments dans le bassin versant de l'Ourika.
- Figure 7. La carte de la perte totale du sol dans le bassin versant de l'Ourika.
- Figure 8. La carte de l'exportation des sédiments dans le bassin versant de l'Ourika.
- Figure 9. La carte du rendement en eau dans le bassin versant de l'Ourika.
- Figure 10. La carte de l'évapotranspiration réelle dans le bassin versant de l'Ourika.
- Figure 11. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika
- Figure 12. Étapes lors du développement de scénarios pour INVEST
- Figure 13. Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et le scenario tendanciel en 2030
- Figure 14. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario tendanciel
- Figure 15. Résultats du modèle du carbone pour le scenario tendanciel
- Figure 16. Comparaison entre les résultats du modèle de la rétention des sédiments en 2016 et en 2030
- Figure 17. Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 et leur pourcentage de changement pour le scenario tendanciel.
- Figure 18. Comparaison des résultats du modèle du rendement en eau pour le scenario tendanciel en 2030 et pour l'occupation du sol en 2016.
- Figure 19. Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et le scenario catastrophique en 2030.

- Figure 20. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario catastrophique
- Figure 21. Résultats du modèle du carbone pour le scenario catastrophique
- Figure 22. Comparaison entre les résultats du modèle de la rétention des sédiments en 2016 et en 2030
- Figure 23. Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 et leur pourcentage de changement pour le scenario catastrophique.
- Figure 24. Comparaison des résultats du modèle du rendement en eau pour le scenario catastrophique en 2030 et pour l'occupation du sol en 2016.
- Figure 25. Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et le scenario idéal en 2030.
- Figure 26. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario idéal
- Figure 27. Résultats du modèle du carbone pour le scenario idéal
- Figure 28. Comparaison entre les résultats du modèle de la rétention des sédiments en 2016 et en 2030
- Figure 29. Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 et leur pourcentage de changement pour le scenario idéal.
- Figure 30. Comparaison des résultats du modèle du rendement en eau pour le scenario idéal en 2030 et pour l'occupation du sol en 2016.
- Figure 31. Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et le scenario concerté en 2030.
- Figure 32. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario concerté
- Figure 33. Résultats du modèle du carbone pour le scenario concerté
- Figure 34. Comparaison entre les résultats du modèle de la rétention des sédiments en 2016 et en 2030
- Figure 35. Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 et leur pourcentage de changement pour le scenario concerté.

Figure 36. Comparaison des résultats du modèle du rendement en eau pour le scenario concerté en 2030 et pour l'occupation du sol en 2016.

Figure 37. Comparaison des services écosystémiques entre les quatre scenarios avec les valeurs en millions.

#### Liste des tableaux

Tableau 1. Les différents outils d'aide à la décision pour l'évaluation des services écosystémiques.

Tableau 2. Les modèles existants pour chaque catégorie des services dans le logiciel InVEST

Table 3. Composants et description des trois étapes du module de carbone.

Table 4. Composants et description des cinq étapes du module de rétention des sédiments.

Table 5. Composants et description des trois étapes du module de rendement en eau

Tableau 6. Catégories de types de scénario

Tableau 7. Pilotes communs de changement de scénarios

Tableau 8. Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario tendanciel 2030

Tableau 9. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario tendanciel dans l'année 2030

Tableau 10. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario tendanciel dans le bassin versant de l'Ourika.

Tableau 11. Evaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour les années 2016 et 2030.

Tableau 12. Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario catastrophique 2030

Tableau 13. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario catastrophique

Tableau 14. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario catastrophique dans le bassin versant de l'Ourika

Tableau15. Evaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour le scenario catastrophique.

Tableau 16. Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario idéal 2030

Tableau 17. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario idéal

Tableau 18. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario idéal dans le bassin versant de l'Ourika.

Tableau 19. Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario concerté en 2030.

Tableau 20. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario concerté

Tableau 21. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario concerté dans le bassin versant de l'Ourika.

Tableau 22. Evaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour le scenario concerté.

#### Introduction générale

L'écosystème offre une large gamme de biens et de services aux bénéfices de l'espèce humaine (Costanza et al., 1997). Les services écosystémiques jouent un rôle très important pour le bien être de l'Homme. En conséquent, l'Homme dépend des écosystèmes pour les services écosystémiques et les bénéfices résultants qui en découlent (Brauman et al., 2007). Ceux – ci incluent des services de soutien (la biodiversité, le habitat, le cycle des nutriments, etc.), des services d'approvisionnement (les aliments directs ou indirects pour les humains, l'eau, le bois etc.), des services de régulation (la régulation du climat, l'érosion, les inondations, etc.) et des services culturels (la récréation, les valeurs esthétiques etc.) (MEA et NU, 2005).

Différents types de facteurs y compris les régimes d'occupation du sol, conditions climatiques et les aménagements peuvent influencer la fourniture future de services écosystémiques. Par exemple, la couverture végétale, en particulier les forêts, peut influencer différemment les services écosystémiques selon les caractéristiques environnementales de chaque région. Il est généralement reconnu qu'une augmentation du couvert forestier réduira le rendement annuel en eau dans un bassin versant donné (Zhang et al., 2001; Brown et al., 2005; Farley et al., 2005). D'autre part, une augmentation de la superficie forestière contribuera à une diminution du ruissellement, avec une réduction conséquente de la charge des sédiments, une augmentation des taux d'infiltration et des dangers liés à l'eau, en particulier les inondations et potentiellement un apport d'eau plus stable pendant les périodes sèches (Ilstedt et al., 2007; Bredemeier, 2011).

Le bassin versant de l'Ourika est un bassin doté de ressources naturelles qui peuvent fournir les services suffisant pour le bien être de la population locale mais c'est une zone qui a un grand risque de la perturbation de ces ressources à travers les fréquences des catastrophes causées par les inondations et la pression anthropique à travers le défrichement et les cultures excessives. Par la suite il y aura un impact négatif sur la fourniture des services écosystémiques dans le futur.

Dans de nombreuses régions du monde, la végétation naturelle est dégagée pour l'agriculture (Zak et al., 2008) et ailleurs, les terres agricoles sont revégétalisées pour la production du bois, la production de carbone ou la protection des bassins versants. Dans de nombreux cas, les changements dans l'occupation du sol affectent la capacité des écosystèmes de continuer à

fournir la qualité et la quantité des biens et services écosystémiques nécessaires à la santé et au bien-être de l'homme (Foley et al. 2005; MEA 2005; Hector and Bagchi 2007).

La gestion des écosystèmes pour répondre à de multiples exigences de la société est devenue un défi majeur pour les décideurs. L'occupation du sol change aussi rapidement en fonction de l'augmentation de la population et des demandes changeantes de la société (Ramankutty et al., 2002, Acevedo et al., 2010). La quantité et la qualité des services écosystémiques fournis par le bassin versant de l'Ourika sont susceptibles de régresser au fur et à mesure si les bonnes pratiques d'aménagement ne sont pas faites.

Par conséquent, la modélisation de la manière dont les aménagements des écosystèmes aura un impact sur la fourniture des services écosystémiques pour améliorer les options de la gestion des occupations du sol ainsi que la planification forestière et paysagère. La compréhension de certains facteurs qui peuvent causer un impact négatif ou positif sur la fourniture des services écosystémiques est essentielle pour la bonne gestion des écosystèmes dans le bassin versant de l'Ourika. La prédiction des effets des changements dans les écosystémiques sur la fourniture des services écosystémiques est devenu un domaine de recherche extrêmement actif (Foley et al. 2005; Zak et al. 2008; Polasky et al. 2011). La génération des scenarios qui se fait par les prédictions est une façon de comprendre comment ces impacts affecteront la fourniture des services écosystémiques. La connaissance de l'état actuel des services écosystémiques et comment ils évoluent dans le futur à travers tous ces facteurs aideront par la suite de prendre des meilleures décisions pour pouvoir optimiser ces services et assurer sa fourniture dans le futur au sein du bassin versant de l'Ourika.

La complexité de la gestion des services écosystémiques nous amène à utiliser un outil d'aide à la décision qui peut les modéliser et générer des scenarios pour pouvoir prendre la meilleure décision afin d'assurer un bon avenir de la fourniture de ces services. InVEST peut montrer clairement où les services seront fournis sur un paysage et la façon dont leur offre risque de changer dans l'espace (Tallis et Polasky, 2009). InVEST est conçu pour répondre à de nombreux types de scénarios dérivés de différents types de processus d'engagement des parties prenantes.

InVEST a été appliqué dans les processus de prise de décision sur plusieurs sites, dont le Willamette Basin (Oregon), Oahu (Hawaï), l'état de Californie, Puget Sound (État de Washington), les Monts de l'Arc Oriental (Tanzanie), le bassin du Haut-Yangtze (Chine), le bassin amazonien et les Andes du Nord (Amérique du Sud) et au niveau national en Équateur

et en Colombie. Cependant, il n'a pas encore été appliqué au bassin versant de l'Ourika dans le contexte de la modélisation des services multiples dans les différents scenarios.

Dans ce contexte, la présente étude a pour objectif de maximiser et d'optimiser les services écosystémiques à travers les différents scenarios afin de prendre la meilleure décision de la fourniture cohérente de ces services dans le bassin versant de l'Ourika. Pour y aboutir, nous nous fixons les objectifs suivants :

- > Evaluer quantitativement les services écosystémiques dans l'état actuel au niveau du bassin versant de l'Ourika
- ➤ Cartographier les services écosystémiques dans le bassin versant
- Elaborer les scenarios d'évolution pour optimiser les services écosystémiques
- Comparer les scenarios après avoir quantifier les services écosystémiques dans l'état futur au niveau du bassin versant de l'Ourika.

### SECTION I: EVALUATION QUANTITATIVE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OURIKA

#### Liste des acronymes

**ARIES:** Artificial Intelligence for Ecosystem Services

**EPM:** Ecosystem Portfolio Model

**ESR:** Ecosystem Services Review

**FAO:** Food and Agriculture Organization

**HWSD:** Harmonized World Soil Database

**InVEST:** Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change

**KWH:** Kilowatt-Hour

**LUCI:** Land Utilisation and Capability Indicator

**MEA:** Millenium Ecosystem Assessment

**MIMES:** Multiscale Integrated Models of Ecosystem Services

**MNT:** Modèle Numérique du Terrain

**NAIS:** Natural Assets Information System

**SDR:** Sediment Delivery Ratio

**SIG:** Système d'Information Géographique

**SolVES:** Social Values for Ecosystem Services

**USLE:** Universal Soil Loss Equation

#### Résumé

La présente étude se penche sur l'évaluation actuelle des services écosystémiques dans le bassin versant de l'Ourika en essayant de les modéliser, les quantifier et les cartographier. Ce qui a permis de savoir l'état actuel de la fourniture des services écosystémiques et les occupations du sol qui maximisent ces services. Par conséquent, une gestion intégrée va être établie pour améliorer l'état de la fourniture de ces services.

L'évaluation et la quantification des services écosystémiques ont été faites en utilisant l'outil InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade offs). Cet outil a été appliqué pour évaluer trois services écosystémiques au niveau du bassin versant de l'Ourika : le stockage du carbone, la rétention des sédiments et le rendement en eau. La carte actuelle de l'occupation du sol pour le bassin de l'Ourika a été utilisée pour évaluer ces services.

Les résultats révèlent que le bassin versant subit une grande perte du sol et exportation des sédiments alors que sa capacité de rétention des sédiments est faible. C'est le couvert végétal qui a retenu plus des sédiments alors que la perte du sol et l'exportation ont été fortes dans les parties non végétalisées. Le stockage du carbone est assez fort au niveau du bassin mais moins important par rapport à la contribution des autres services écosystémiques. En générale le rendement en eau est important dans le bassin versant de l'Ourika étant donné que l'évapotranspiration est faible au niveau de la couverture forestière.

La fourniture des services écosystémiques dans le bassin versant de l'Ourika est dans un état médiocre mais peut être améliorée si les bons aménagements sont pratiqués pour maximiser la fourniture de ces services.

**Mots clés** : services écosystémiques, évaluation, InVEST, bassin versant de l'Ourika, fourniture.

#### Introduction

Les humains reçoivent une série de bénéfices de l'environnement naturel sous forme de biens et de services (Daily et al., 1997). Les services des écosystèmes naturels sont clairement très importants pour nos sociétés: nous ne pourrions probablement pas vivre sans eux (Costanza et al., 1997). Les services écosystémiques sont définis comme les bénéfices que les humains obtiennent des écosystèmes, bien que la relation entre ces services, le bien-être humain et la monétisation des services écosystémiques ne soit pas un nouveau concept (Westman, 1977). La notion de services écosystémiques a attiré plus d'attention ces dernières années et beaucoup de recherches ont été faites pour les analyser.

La majorité de ces services écosystémiques proviennent du bassin versant. Ces services incluent des services d'approvisionnement tels que l'approvisionnement en eau potable, la production d'électricité, l'utilisation industrielle et l'irrigation ainsi que des services de régulation tels que la purification de l'eau et le contrôle de l'érosion. La fourniture de ces services dépende des caractéristiques du bassin versant. Le bassin versant de l'Ourika qui est l'un des sous bassins au niveau du Tensift est caractérisé par des fortes pentes, des sols peu perméables et à l'agressivité du climat, offre un environnement propice au développement de fortes crues (Saidi et al., 2010). Bien que le bassin versant de l'Ourika soit composé des ressources naturelles qui ont une grande capacité de fournir les services écosystémiques, ces ressources sont menacées par une pression anthropique et par les aléas naturels.

La dégradation des bassins versants a permis de mieux prendre conscience des diverses manières dont ces écosystèmes contribuent au bien-être de l'humanité en raison des nombreux services qu'ils procurent, et donc de l'importance de les mettre davantage en valeur (FAO, 2009). Malgré la reconnaissance mondiale croissante de la nécessité de conserver ces écosystèmes, ils sont soumis à de fortes pressions, souvent parce que les bassins versants sont encore considérées comme ayant peu ou pas de valeur pour les humains. Le bassin versant de l'Ourika est un bel exemple de ce constat.

Plusieurs études ont été faites à l'échelle internationale, nationale et régionale pour évaluer les services écosystémiques. Au niveau du bassin versant de l'Ourika, certaines études ont été réalisées sur l'évaluation des services hydrologiques et les impacts des phénomènes catastrophiques sur les ressources naturelles et les infrastructures. Cependant une évaluation intégrée des services écosystémiques multiples n'a pas encore été réalisée. Pour cela, il y a alors un manque de connaissance sur la quantification actuelle de ces services écosystémiques

au niveau du bassin versant de l'Ourika. Une évaluation actuelle de ces services facilitera une meilleure prise de décision sociale concernant la protection et la préservation des écosystèmes fournissant les services.

Il existe de nombreux outils pour pouvoir évaluer et quantifier les services écosystémiques et il n'y a pas mal de recherche qui confirment l'efficacité de l'utilisation d'un outil comme InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) développé par Natural Capital Project (Tallis and Polasky, 2011). Une illustration de cet intérêt croissant est l'énorme nombre d'études qui appliquent InVEST pour évaluer différents services écosystémiques (Guerry et al., 2012; Nelson et al., 2009 et Polasky et al., 2011). L'InVEST est conçu pour informer les décisions concernant la gestion des ressources naturelles. Cet outil est composé de nombreux modèles à partir desquels trois ont été choisi dans ce travail à savoir le stockage du carbone, la rétention des sédiments et le rendement en eau.

La présente étude décrit l'état actuel de ces trois services écosystémiques dans le bassin versant de l'Ourika sous forme des cartes en démontrant les occupations du sol qui fournissent plus de ces services et les autres qui en fournissent moins.

#### **PARTIE I : Revue bibliographie**

#### I La notion des services écosystèmes

#### 1 Définition

Il existe plusieurs définitions des services écosystémiques. Les services écosystémiques sont définis comme les avantages que les humains obtiennent des écosystèmes (Westman, 1977). Costanza et al., 1997 définissent services écosystémiques comme les avantages que les populations humaines tirent directement ou indirectement des fonctions de l'écosystème. Les services écosystémiques sont les aspects des écosystèmes utilisés (activement ou passivement) qui contribue au bien-être humain (Fisher et al., 2009).

#### 2 Origine des services écosystémiques

Les notions de services écosystémiques a l'origine dans le domaine de l'écologie. Dans l'année 1970, le terme service écosystémique a été introduit explicitement dans un rapport nord-américain intitulé « Study of Critical Environmental Problem » dont l'objectif était d'adopter une vision globale des problèmes d'environnement. Il fournit une première liste de services écosystémiques : lutte antiparasitaire, pollinisation des insectes, pêche, régulation du climat, rétention des sols, contrôle des inondations, formation des sols, cycle de la matière organique, composition de l'atmosphère (SCEP, 1970). Selon plusieurs auteurs, l'émergence de la notion de service écosystémique date de l'année 1997 qui correspondant à la parution de l'ouvrage Nature's Services, coordonné par G. Daily et par la publication d'un article dans la revue Nature de Costanza et al. intitulé « The value of the world's ecosystem services and natural capital» (Méral, 2010). Daily dans son ouvrage avait l'objectif de déterminer une base pour mesurer la dégradation des services rendus par la nature à la société (Daily, 1997) alors que Costanza avait l'objectif de développer une approche systématique des différentes dimensions et de l'importance du capital naturel (Costanza, 1997). C'est plutôt dans les années 2001-2005 que le concept de services écosystémiques a été popularisé par le Millenium Ecosystem Assessement (MEA). Le Bilan du Millénaire relatif aux écosystèmes a été commandé par le Secrétaire général des Nations Unies Kofi Annan en 2000, il compile les contributions de plus de 1 300 auteurs et analystes du monde entier (Méral, 2010). L'objectif était d'étudier les conséquences d'une modification de l'écosystème sur le bien-être humain et de poser les bases scientifiques des mesures nécessaires pour améliorer la conservation et l'utilisation durable de ces systèmes et leur contribution au bien-être humain.

#### 3 Classification des services écosystémiques

Le Millenium Ecosystem Assessement, a défini les services écosystémiques comme : « les bénéfices que les humains tirent des écosystèmes » (MEA, 2005). Les catégories de services écosystémiques sont définies (figure 1).

#### 3.1 Les services de support

La fourniture d'un espace de vie aux végétaux et aux animaux et la préservation de la diversité des espèces végétales et animales, constituent des services de support et sont le fondement de tous les écosystèmes et de leurs services. Ce sont les services nécessaires à la production des autres services, c'est-à-dire qui créent les conditions de base au développement de la vie sur terre. Leurs effets sont indirects ou apparaissent sur le long terme. Par exemple, les êtres humains n'utilisent pas directement les services de formation de sol de l'écosystème (services « support »), même si des changements dans ce service affecteraient indirectement les êtres humains par l'effet sur la production alimentaire. Des exemples de services support sont la production primaire, la production d'oxygène atmosphérique, la formation du sol, les cycles bio-géo-chimiques, le circuit de l'eau, et l'offre d'habitat.

#### 3.2 Les services d'approvisionnement

Ils permettent aux hommes d'obtenir des biens commercialisables, par l'exploitation des écosystèmes tels que : la nourriture, les fibres, le combustible, les ressources génétiques, les substances chimiques, les médicaments, les plantes médicinales, les ressources, les matériaux de construction, bois, la faune chassable, etc.

#### 3.3 Les services de régulation

Ce sont des bénéfices obtenus de la régulation des processus des écosystèmes, tels que : le maintient de la qualité de l'air, la régulation du climat, le cycle de l'eau, le contrôle de l'érosion, la purification de l'eau et le traitement des déchets, la régulation des maladies humaines, le contrôle, la pollinisation, la protection contre les tempêtes et contre les inondations, etc.

#### 3.4 Les services culturels et sociaux

Ce sont des bénéfices non-matériels obtenus par les hommes à partir des écosystèmes à travers l'enrichissement spirituel, le développement cognitif, la réflexion, la création, les

expériences esthétiques, comprenant l'offre d'emploi, source d'inspiration, les valeurs esthétiques, des relations sociales, recréation et éco-tourisme, etc.

### II Outils d'aide à la décision pour la quantification et l'évaluation des services écosystémiques

Une recherche importante et en rapide croissance cherche à identifier, caractériser et évaluer les biens et les services des écosystèmes - les avantages que les écosystèmes fournissent aux personnes (MEA, 2005). Cependant, le développement d'outils d'aide à la décision qui intègrent l'écologie, l'économie et la géographie pour soutenir la prise de décision est un phénomène plus récent (Ruhl et al., 2007; Daily et al., 2009). Il existe plusieurs outils qui peuvent évaluer, quantifier, modéliser, attacher une valeur et/ou cartographier les services fournis par les écosystèmes. Bagstad et al., 2013 a identifié 17 outils d'aide à la décision disponibles pour la quantification et l'évaluation des services écosystémiques.

Tableau 1. Les différents outils d'aide à la décision pour l'évaluation des services écosystémiques.

	Outil	Description
1	<b>Ecosystem Services</b>	Accessible au public, processus basé sur les tableaux de
	Review (ESR)	calcul pour évaluer qualitativement les impacts des services
		écosystémiques.
2	Integrated Valuation	Logiciel avec des modèles open sources pour cartographier et
	of Ecosystem Services	évaluer les services écosystémiques, outils autonomes et
	and Tradeoffs	accessibles sur ArcGIS.
	(InVEST)	
3	Artificial Intelligence	Logiciel collaboratif en réseau conçue pour cartographier et
	for Ecosystem Services	évaluer rapidement des services écosystémiques.
	(ARIES)	
4	Land Utilisation and	Logiciel open source pour localiser les zones offrant des
	Capability Indicator	gains ou des pertes potentiels de services dans des scénarios
	(LUCI)	de gestion.
5	Multiscale Integrated	Ensemble itératif de modèles open sources qui peuvent être
	<b>Models of Ecosystem</b>	utilisés à plusieurs échelles pour cartographier et l'évaluer les
	Services (MIMES)	services écosystémiques.

6	EcoServ (Boîte à outil	Adopte une approche «basée sur le service», en utilisant des
	du SIG pour les	informations sur les processus naturels et la manière dont ils
	services ecoystémiques)	offrent des services dans l'environnement.
7	Co\$ting Nature (un	Outil d'accès ouvert sur le Web pour la comptabilité du
	outil d'évaluationn des	capital naturel et l'analyse des services écosystémiques
	services	fournis par des environnements naturels.
	écosystémiques)	
8	Social Values for	Barre d'outils pour ArcGIS pour la cartographie des valeurs
	<b>Ecosystem Services</b>	sociales pour les services écosystémiques en fonction des
	(SolVES)	données d'enquête ou du transfert de valeur.
9	Envision (un outil du	Logiciel open source conçu pour l'échelle du paysage et met
	SIG)	l'accent sur la modélisation basée sur les agents.
10	<b>Ecosystem Portfolio</b>	Outil d'accès ouvert sur le Web pour modéliser les impacts
	Model (EPM)	économiques, environnementaux et de qualité de vie des
		choix alternatifs d'utilisation des terres.
11	InFOREST (un outil	Outil d'accès ouvert sur le Web pour quantifier les services
	pour évaluer les	écosystémiques en Virginie.
	services	
	écosystémiques)	
12	EcoAIM (cadre d'aide	Outil exclusif pour la cartographie des services
	à la décision)	écosystémiques et des préférences des parties prenantes.
13	ESValue (un outil qui	Outil basé sur les tableaux de calcul et dépend des
	estime les services	classements d'une enquête en établissant les préférences des
	écosystémiques)	parties prenantes et les valeurs relatives des écosystèmes.
14	EcoMetrix (outil qui	Basé sur des algorithmes pour déterminer les scores de la
	quantifie l'impact des	fonction de l'écosystème décrivant à quel point chaque
	écosystèmes)	fonction pertinente est atteinte.
15	Natural Assets	Outil qui combine une base de données d'évaluation sous-
	Information System	jacente à une analyse SIG de l'occupation du sol, qui peut
	(NAIS)	être utilisée pour l'évaluation économique en utilisant le
		transfert de points.
16	<b>Ecosystem Valuation</b>	Outil qui quantifie les avantages économiques de la nature à

	Toolkit	inclure dans la prise de décision à des échelles du niveau
		local au global.
17	Benefit Transfer and	Outil conçu pour faciliter l'évaluation économique de
	Use Estimating Model	multiples utilisations récréatives et d'autres services
	Toolkit,	écosystémiques utilisant des données secondaires

Parmi ces outils, il y en a certains qui sont applicables mondialement et d'autres qui sont géographiquement limités. InVEST et ARIES sont peut-être les plus connus des outils de domaine public généralisables (Vigerstol et Aukema, 2011). Il existe quatre outils supplémentaires – Co\$ting Nature, EcoServ, LUCI et Multiscale Integrated Models of Ecosystem Services (MIMES) - sont également explicitement spatiales, des outils de domaine public qui modélisent biophysiquement les services écosystémiques mais n'ont pas encore été aussi largement documentés et appliqués que InVEST et ARIES. Envision, EPM et InFOREST sont des outils qui sont géographiquement limités et spécifique au lieu alors que EcoAIM et ESValue ont une modélisation propriétaire. Les outils qui n'ont pas une modélisation du paysage mais à l'échelle du site sont EcoMetrix et LUCI et les outils spécifique d'évaluation monétaire sont Benefit Transfer and Use Estimating Model Toolkit, Ecosystem Valuation Toolkit et NAIS. InVEST et ARIES utilisent une variété de données spatiales comme inputs et encodent des fonctions de production écologiques dans des modèles déterministes (InVEST et ARIES) et des modèles probabilistes (ARIES).

#### 1 Pourquoi InVEST?

Les modèles déterministes d'InVEST ont été examinés plus largement dans la littérature évaluée par les pairs et peuvent être plus appropriés pour être utilisés dans des contextes où les processus écologiques sont bien compris (Bagstad et al., 2013). Dans notre contexte, les données étaient disponibles et certaines ont été créées pour ce travail et donc InVEST a été considéré comme le meilleur choix. Les modèles probabilistes d'ARIES peuvent être plus appropriés dans des conditions de rareté de données (Vigerstol et Aukema, 2011). ARIES utilise des techniques d'intelligence artificielle pour coupler des modèles de services d'écosystèmes localement appropriés avec des données spatiales basées sur un ensemble de règles de décision codées, la quantification des flux de services écosystémiques et leur incertitude dans un navigateur Web d'outil logiciel autonome (Villa et al., 2011). InVEST détermine la fourniture des services écosystémiques et la valeur en un point sur le paysage en

utilisant la fonction de production écologique et économique, où les inputs sont l'occupation du sol et les données biophysiques à des différentes parties du paysage. Selon Nelson et Daily, 2010, l'approche de la fonction de production présente les résultats plus précis et pertinents pour les politiques. Tout d'abord, les fonctions de production, si elles sont correctement calibrées, peuvent s'inscrire et évaluer les changements de services écosystémiques. En plus, la modification de la fourniture des services écosystémiques et de la valeur en un point sur le paysage peut s'expliquer par des fonctions de production. L'inconvénient majeur de l'utilisation des fonctions de production pour calculer la fourniture de services est qu'elles ont besoin de plus de données et peu d'expertise à appliquer.

#### 2 Introduction à InVEST

InVEST est un outil pour explorer comment les changements dans les écosystèmes sont susceptibles de conduire à des changements dans les bénéfices qui évoluent vers la population. InVEST emploie une approche de fonction de production pour quantifier et évaluer les services écosystémiques. Une fonction de production spécifie l'output des services écosystémiques fournis par l'environnement compte tenu de ses conditions et de ses processus. Une fois qu'une fonction de production est spécifiée, nous pouvons évaluer l'impact des changements terrestres ou aquatiques sur le changement de niveau de la fourniture des services écosystémiques (Sharp et al., 2016). InVEST utilise un cadre simple délimitant la fourniture, le service et la valeur pour lier les fonctions de production aux bénéfices fournis aux humains.

L' «Approvisionnement» représente ce qui est potentiellement disponible dans l'écosystème (c'est-à-dire ce que la structure et la fonction de l'écosystème peuvent fournir)

Le «service» intègre la demande et utilise ainsi des informations sur les bénéficiaires de ce service (par exemple, les personnes vivant, les sites culturels importants, les infrastructures, etc.).

La «valeur» comprend la préférence sociale et permet de calculer les paramètres économiques et sociaux (par exemple, éviter les dommages causés par l'érosion et les inondations, le nombre de personnes concernées).

InVEST est un ensemble de modèles informatiques qui ;

révèle clairement les relations entre plusieurs services;

- > se concentre sur les services écosystémiques plutôt que sur les processus biophysiques;
- > est spatialement explicite;
- > fournit des résultats en termes biophysiques et économiques;
- > est guidé par un scénario;
- ➤ a une approche à plusieurs égards pour traiter la disponibilité des données et l'état de la connaissance du système.

InVEST comprend des modèles de quantification, de cartographie et d'évaluation des bénéfices fournis par les systèmes terrestres, eaux douces et marins. Les modèles sont groupés en 3 catégories :

- i. Services de soutien
- ii. Services définitifs
- iii. Outils pour faciliter les analyses des services écosystémiques

Tableau 2. Les modèles existants pour chaque catégorie des services dans le logiciel InVEST

Services de soutien	Services définitifs	Outils pour faciliter les analyses des services écosystémiques
Qualité de l'eau marine	Stockage et séquestration du carbone	Route DEM (Fonctions de routage hydrologique)
Évaluation du risque d'habitat	Stockage et séquestration du carbone bleu	Analyse de chevauchement
Qualité de l'habitat	Rendement en eau  Rétention des nutriments  Rétention des sédiments  Exposition et vulnérabilité côtière  Atténuation des vagues et réduction de l'érosion  Vues obsolètes	

Loisirs et tourisme naturels	
Production de bois de	
chantier	
Production d'énergie ondulée	
Production aquacole de	
poissons marins	
Production des pêches	
maritimes	
Abondance du pollinisateur	
Production d'énergie	
éolienne offshore	

Dans ce travail, nous avons alors travaillé avec trois services définitifs d'InVEST à savoir le stockage et la séquestration du carbone, la rétention des sédiments et le rendement en eau. Le choix de ces services reste à la disponibilité des données d'inputs et de la littérature locale, le court temps consacré pour chercher les données inexistantes et enfin l'importance et la pertinence de l'utilisation des résultats au profit de la population locale.

#### 2.1 Le stockage et séquestration du carbone

La séquestration et le stockage du carbone terrestre est peut-être le plus largement reconnu de tous les services écosystémiques (Stern, 2007; IPCC, 2006; Canadell et Raupach, 2008; Capoor et Ambrosi, 2008; Hamilton et al., 2008, Pagiola, 2008). Le bassin versant d'Ourika a connu l'initiation d'un processus de reconstitution du patrimoine forestier dans ces dernières années et donc la nécessité d'évaluer les services produits par le domaine forestier. Il y a aussi une forte pression anthropique comme la coupe de bois, le parcours, carbonisation, défrichement etc. Les terrains agricoles progressent au fur à mesure de la conversion de la couverture forestière. Les forêts, les prairies, les tourbières et autres écosystèmes terrestres stockent collectivement beaucoup plus de carbone que l'atmosphère (Lal, 2002). Les forêts occupent presque un tiers de la surface totale du bassin versant d'Ourika et donc c'est un écosystème avec une grande capacité de stockage de carbone. En stockant ce carbone dans le bois, d'autres biomasses et sols, les écosystèmes maintiennent le CO2 hors de l'atmosphère, où il contribuerait au changement climatique. Au-delà du stockage du carbone, de nombreux systèmes continuent à l'accumuler dans les plantes et les sols dans le temps, ce qui amène à la séquestration de carbone supplémentaire chaque année. La perturbation de ces systèmes avec

le feu, la maladie ou la conversion de la végétation (par exemple, la conversion de l'occupation du sol) peut libérer de grandes quantités de CO<sub>2</sub> alors que d'autres changements de gestion, comme la restauration forestière ou les pratiques agricoles alternatives, peuvent conduire au stockage de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Par conséquent, une bonne gestion des écosystèmes terrestres assure une bonne régulation de climat.

#### 2.2 La rétention des sédiments

Le service de rétention des sédiments fourni par les paysages naturels présente un grand intérêt pour les gestionnaires de l'eau. Comprendre où les sédiments sont produits et livrés permet de concevoir des stratégies améliorées pour réduire les charges sédimentaires. Le bassin versant d'Ourika a un grand risque d'érosion mais aussi un grand potentiel de contrôle de l'érosion. Le changement de la charge en sédiments peut avoir des répercussions sur l'irrigation en aval, le traitement de l'eau, les loisirs et la performance des réservoirs (Sharp et al., 2016).

#### 2.3 Le rendement en eau

Le service d'approvisionnement en eau dans un écosystème donné contribue au bien être dans la société de plusieurs façons : la production de l'hydroélectricité, l'eau potable et l'irrigation. Les ressources hydriques sont soumises à plusieurs pressions (surexploitation des nappes phréatiques, déversement des eaux usées non épurées, changement et variabilité climatiques), ce qui entraîne une diminution de la quantité et de la qualité des ressources en eau et a des répercussions sur l'économie et l'environnement du pays (Croitoru et Sarraf, 2017). Le bassin versant d'Ourika a une grande potentialité d'approvisionnement en eau et donc ce service nous amène à évaluer cette capacité.

#### PARTIE II : Zone d'étude et méthodologie

#### I Zone d'étude

Le bassin versant de l'Ourika fait partie du grand bassin versant du Tensift, situé dans le Haut Atlas central à une quarantaine de km au sud du Marrakech. Il couvre une superficie de 576 km².

## Légende Limite du maroc Limite du bassin versant de l'Ourika Limite du bassin versant du Tensift 155 310 620 1,240 Kilometers 930

#### Situation géographique du bassin versant de l'Ourika

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

Le bassin relève du territoire de trois provinces près de 90 % de sa superficie fait partie de la province d'Al Haouz et les 10 % restantes font partie des provinces d'Ouarzazate et de Taroudant (DREF-HA, 2000). Trois principales unités physiographiques caractérisent la zone:

- Le piémont du Haut Atlas avec une altitude de l'ordre de 900m
- Les vallées de l'Oued Ourika et ses affluents
- Les hautes montagnes et les plateaux d'altitude

Sur le plan bioclimatique, le bassin versant de l'Ourika est assujetti 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). La pluviométrie annuelle varie entre 525.9 mm à la station d'Aghbalou et 321.2 mm à la station d'Agouns sur une période de 35 ans (1976-2011). La saison d'été est caractérisée par de forts orages provoquant des pulsations brutales du cours d'eau. La température varie entre -7.2°C et 48.2°C, avec une moyenne de 27.8°C. Le bioclimat à l'Ourika est semi-aride à subhumide à hiver frais et froid, où interfèrent les influences océaniques, continentales et de haute montage.

De point de vue topographique, l'altitude moyenne est de 2500 m avec 75 % des terrains compris entre 1600 et 3200 m. Le point culminant du bassin est celui de Jbel Iferouane culminant à 4001 m, l'exutoire est situé à une altitude de 848 m.

Sur le plan lithologique, 6 % des sols sont perméables, 39 % semi-perméables et 55 % imperméables, ce qui permet de déduire que le bassin versant dans sa quasi-totalité est assez imperméable. Cette lithologie génère des risques d'inondations en favorisant la mobilisation des eaux de ruissellement par les principaux cours d'eaux et l'amplification des crues nuisibles (Saidi et al. 2006).

Sur le plan géologique, le bassin versant de l'Ourika montre deux faciès; une partie septentrionale, située à des altitudes inférieures à 2000 m, composée de dépôts permotriasiques et quartenaires plus tendres; et une partie méridionale, située à des altitudes supérieures à 2000 m, constituée de roches magmatiques et métamorphiques, appartenant au socle de la chaîne atlasique (Biron, 1982). On y rencontre des roches plutoniques, notamment des granites et granodiorites, des roches volcaniques (andésites, rhyolites...) et métamorphiques (gneiss et migmatites).

Le bassin versant de l'Ourika est caractérisé par des formations végétales diversifiées. Des formations arborées, arbustives, buissonnantes et asylvatiques qui couvrent trois domaines climatiques : un domaine océanique, un domaine semi interne et un domaine interne. Le couvert végétal du bassin se trouve en grande partie dans l'étage Oroméditerranéen à base de matorrals de xérophytes épineuses et d'hémicryptophytes d'altitude (Ouhammou, 1986). La même composition domine au niveau du Montagnard, qui est marqué 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, 1991).

#### II Méthodologie

Les trois modèles d'InVEST : carbone, rétention des sédiments et rendement en eau ont été utilisé pour évaluer les services choisis dans ce travail.

#### 1 Le modèle de Carbone

Le modèle du carbone s'est concentré sur quatre compartiments de carbone : biomasse aérienne du sol, biomasse souterraine, sol et matière organique morte. En se basant sur l'occupation du sol et la distribution de carbone, le modèle carbone rassemble la quantité de carbone stockée dans ces quatre compartiments de carbone. La biomasse aérienne du sol est toute la biomasse de la végétation vivante, à la fois boisée et herbacée, au-dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage (IPCC 2006). La biomasse souterraine est toute la biomasse des racines vivantes. Des racines fines de moins de 2 mm de diamètre (le minimum suggéré) sont souvent exclues car celles-ci ne peuvent souvent pas être distinguées empiriquement de la matière organique du sol (IPCC 2006). La matière organique du sol est le carbone organique dans les sols minéraux à une profondeur spécifiée choisie et appliqué uniformément à travers une série chronologique. Les racines fines vivantes et mortes dans le sol (inférieures au minimum suggéré pour la biomasse souterraine) sont incluses partout où elles ne peuvent pas être distinguées empiriquement de la matière organique du sol (IPCC 2006). Il représente le plus grand bassin de carbone terrestre. La matière organique morte comprend la litière ainsi que le bois mort couché et debout. Pour chaque type d'occupation du sol, le modèle nécessite une estimation de la quantité de carbone dans au moins un des quatre groupes des bassins. Plus les données d'inputs sont complètes pour tous les compartiments plus les résultats modélisés seront complets. Le modèle va par la suite appliquer simplement ces estimations à la carte d'occupation du sol pour produire une carte de stockage de carbone dans les compartiments.

**Table 3.**Composants et description des trois étapes du module de carbone. Source: Sharp et al., 2016).

Etapes	Inputs	Processus	Outputs
Service (obligatoire)	Occupation du sol	Calcule le stockage	Stockage Total de
	Carbone dans la	du carbone par pixel	Carbone (Mg/pixel)
	biomasse aérienne du		
	sol		
	Carbone dans la		
	biomasse souterraine		
	Carbone dans la		
	matière organique		
	morte		
	Carbone dans la		
	matière organique du		
	sol		
Service (facultatif)	Carbone éliminé par la	Calcule le carbone	Stockage Total de
	récolte du bois	stocké dans les	Carbone, y compris celui
	Première année de la	produits de bois	dans les produits de bois
	récolte	récoltés par pixel	récoltés (Mg/pixel)
	Fréquence de récolte		
	Demi-vie de produits		
	de bois récoltés		
	Densité du carbone		
	dans le bois récolté		
	Facteur d'expansion de		
	la conversion de la		
	biomasse		
	Occupation du sol	Calcule la différence	Taux des séquestrations
	future	entre les stockages	de carbone
		de carbone	(Mg/pixel/an)

Valeur (facultatif)	Valeur de carbone	Calcule la valeur de	Valeur de carbone
	séquestré	carbone	séquestré
	Taux d'actualisation		(devise/pixel/an)
	Durée de vie		
	Taux annuel de		
	variation du prix du		
	carbone		

# 1.1 Les Inputs

## 1.1.1 La carte d'occupation du sol actuelle

# La carte de l'occupation du sol de l'Ourika

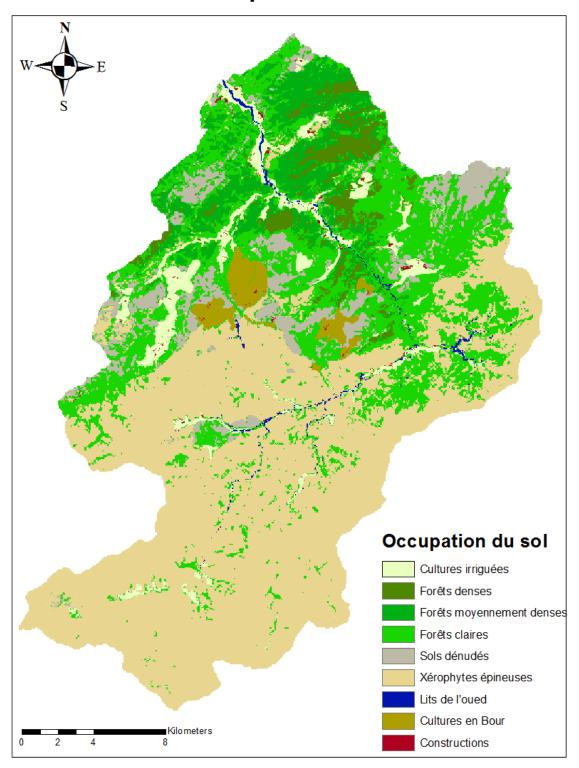


Figure 2. Carte d'occupation du sol de bassin versant d'Ourika.

#### 1.1.2 Les stocks de carbone

C'est un tableau de différentes classes de l'occupation du sol, rempli par de données sur le carbone stocké dans les quatre groupes principaux des bassins de carbone pour chaque classe d'occupation du sol. Les données qui n'existent pas peuvent être accordées la valeur 0. Ce tableau comprend :

- ➤ lucode : c'est un code de nombre entier qui doit correspondre à ce qui existe dans la carte d'occupation du sol. Chaque classe d'occupation du sol doit posséder au moins une valeur unique.
- ➤ C\_above : la densité de carbone dans la biomasse aérienne du sol (tC/ha)
- ➤ **C\_below**: la densité de carbone dans la biomasse souterraine (tC/ha)
- C\_soil: la densité de carbone dans le sol (tC/ha)
- C dead: la densité de carbone dans la matière organique morte (tC/ha)

#### 1.1.2.1 C above

Pour déterminer la biomasse aérienne, nous avons fait des sorties sur le terrain afin de mettre en place la stratification de notre zone d'étude par les critères d'utilisation des sols et des types de végétation. Compte tenu de ces critères, nous avons identifié trois sites correspondant à des modes d'occupation. Il y a plusieurs méthodes de mesure de la biomasse aérienne à savoir les mesures basées sur les données de volume, les mesures basées sur les tables de fréquence, la technique de l'arbre-moyen, la méthode d'analyse de coupes (globale ou localisée) d'arbres et l'estimation de la biomasse aérienne par la télédétection. La mesure de la biomasse de la végétation constituée d'arbres exige un travail considérable et il est difficile d'obtenir une mesure précise vu la variabilité de la distribution des arbres (Hairiah et al., 2001). L'objectif de cette partie était de chercher la biomasse aérienne pour chaque type d'occupation du sol s'il existe. Nous avons considéré la biomasse aérienne comme les arbres, les arbustes et les herbacées. La méthode des mesures basées sur les données de volume a été appliquée aux arbres à cause de sa simplicité et le faite que c'est non destructive, plus adapté, rentable, couramment adopté et familier. La méthode destructive a été appliquée aux arbustes et aux herbacées.

#### i. Arbres

Dans chaque occupation de sol, nous avons installé des parcelles carrées de 50 m par 50 m et tous les arbres sur pied à l'intérieur de la parcelle ont été échantillonnés. La circonférence à

1,30m de hauteur de tous les troncs d'arbres de diamètre supérieur à 10cm, a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban. Il y avait quatre types d'occupation du sol qui contenaient les arbres proprement dit : les forêts denses, forêts moyennement denses, forêts claires et les cultures irriguées. Nous avons trouvé trois espèces pour les forêts denses et claires et quatre espèces pour les forêts moyennement denses. Suivant le principe de la méthode des mesures basées sur les données de volume ou l'estimation de volume décrit par Ravindranath et Ostwald, 2008, nous avons estimé le volume des arbres par rapport aux valeurs de la circonférence à 1,30m et de la hauteur qui ont été converties en termes de poids en utilisant la densité du bois. Pour obtenir le poids en gram, le volume en cm3 de chaque bois d'une espèce donnée a été multiplié par la densité du bois par espèce en g/cm3 trouvé dans la littérature (Zanne et al., 2009).

#### ii. Arbustes et Herbacées

Nous avons installé les parcelles carrées de 5m par 5m qui ont été utilisées pour les arbustes alors que les parcelles de 1m par 1m ont été utilisées pour les herbacées et puis nous avons utilisé les échantillons pour les travaux au laboratoire. On a procédé à la mesure du taux d'humidité. Les masses fraiches et les masses sèches ont été pesées et par la suite nous avons converti les masses en tonne par hectare ce que demande le modèle.

#### 1.1.2.2 **C\_below**

Les méthodes d'excavation des racines du sol ne sont pas pratiques dans la plupart des situations en raison du coût élevé et de la difficulté à déraciner ou à creuser dans une forêt ou une plantation ou un terrain agroforestier. Par conséquent, les deux approches les plus courantes et les plus faisables sont le rapport racine pousse et l'équation allométrique mais nous avons opté pour le rapport racine pousse puisque c'est le plus convenable pour ce contexte d'étude. La moyenne du rapport de 0.26 avec une gamme de 0.18 – 0.30 a été sélectionné dans la littérature et puis cette valeur a été multipliée par la biomasse aérienne d'une espèce donnée pour arriver à la biomasse souterraine (Ravindranath et Ostwald, 2008, Cairns et al., 1997, IPCC, 2006).

#### 1.1.2.3 **C\_soil**

En se basant sur les mêmes types d'occupation du sol, nous avons pris des échantillons du sol à trois niveaux de profondeur (0-10cm, 10-20cm et 20-30cm). Trois types d'échantillon ont

été pris dans chaque occupation du sol principalement dans le but d'estimer par la suite la densité apparente. Nous avons fait passer les échantillons à travers un tamis de 2 mm. Au laboratoire, nous avons appliqué les méthodes d'oxydation par voie humide comme celle de Walkley-Black ou Anne. Le carbone organique présent dans l'échantillon a été oxydé dans un mélange d'une solution de bichromate de potassium (en excès) et d'acide sulfurique à une température contrôlée. Les ions bichromates, qui ont coloré la solution en rouge, étaient réduits en ions Cr3+ qui ont coloré la solution en vert. Il y avait donc une relation entre le Cr3+ formé et la quantité de carbone organique suivant l'hypothèse que l'oxydation d'un atome de carbone de matière organique produit quatre électrons. La méthode a été calibrée en utilisant le glucose comme source de carbone oxydable. Nous avons fait le carbone dans la matière organique du sol pour toutes les occupations du sol sauf les constructions et le lit de l'oued.

#### 1.1.2.4 C dead

Pour déterminer la densité de carbone dans la matière organique morte, nous avons installé les parcelles de 1m par 1m suivant la même classification de l'occupation du sol. Nous avons collecté les échantillons pour les travaux au laboratoire (détermination de leur taux d'humidité). La litière comme le composant principal de la matière organique morte existait dans les occupations forestières ou agroforestieres. Par conséquent, nous avons fait cette partie juste pour quatre types d'occupation du sol à savoir les forêts denses, les forêts moyennement denses, les forêts claires et les cultures irriguées.

#### 2 Modèle de rétention des sédiments

La capacité de chaque bassin à retenir les sédiments a été quantifiée en évaluant l'interaction entre la capacité de rétention des sédiments de chaque occupation du sol, les précipitations, les caractéristiques du sol et la topographie (Mansoor et al., 2013). Le modèle de rétention des sédiments est un modèle spatialement explicite fonctionnant à la résolution spatiale de l'input de MNT sous forme raster. Le modèle calcule pour chaque cellule, la quantité de sédiments érodés, puis le taux de livraison des sédiments (SDR), qui est la proportion de la perte de sol atteignant réellement la sortie du bassin versant. En utilisant l'équation universelle de perte de sol (Wischmeier et Smith, 1978) mis en œuvre dans le module de sédimentation d'InVEST. La perte potentielle de sol de chaque cellule d'occupation du sol est calculée comme suit (Eq 1):

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P$$
 (Eq.1)

D'où

USLE = Perte potentielle moyenne annuelle en sol (t/ha/an)

R = Facteur de pluie et de ruissellement (MJ.mm/ha.h.an)

K = Facteur d'érodibilité du sol (t.h/ha. MJ.mm)

LS = Facteur de longueur et d'inclinaison de la pente

C = Facteur de culture (végétation) et de gestion.

P = Facteur des pratiques de conservation

La rétention des sédiments est calculée en calculant la différence entre la perte potentielle de sol (USLE) du paysage et la perte potentielle maximale du sol (RKLS) qui suppose que le paysage est nu (Mansoor et al., 2013).

Sédiment conservé = RKLS – USLE

**Table 4.** Composants et description des cinq étapes du module de rétention des sédiments. Source: Sharp et al., 2016.

Etapes	Inputs	Processus	Outputs
Fourniture	Occupation du sol	Calcule les	Érosion annuelle
(obligatoire)	Facteur de pluie de	sédiments générés et	moyenne
	ruissellement	retenus à l'échelle	(tonnes/bassin/année,
	Facteur d'érodibilité	des pixels en	tonnes/pixel/année)
	du sol	utilisant USLE et le	Rétention moyenne
	Facteur de culture	routage	annuelle des sédiments
	(végétation)		(tonnes/bassin/année,
	Facteur de pratique de		tonnes/pixel/année)
	conservation		
	MNT		
	Efficacité de rétention		
	des sédiments pour		
	chaque occupation du		
	sol		
	Seuil de pente (%)		
	Seuil d'accumulation		
	de flux		

Service de réservoir	Volume mort du	Soustraire la charge	Charges annuelles de
(obligatoire)	réservoir (Points	des sédiments dans	sédiments générés et
	d'intérêt du réservoir)	le volume mort de	retenus
		réservoir	(tonne/bassin/année)
	Shapefile du Sous-	<del>.</del>	
	bassin hydrographique		
	et Bassin		
	hydrographique		
Service de station de	Charges des sédiments	Soustraire la charge	Rétention moyenne
traitement	permis dans les bassins	des sédiments égale	annuelle des sédiments
(obligatoire)	-	aux charges permis	dans les stations
			d'épuration des eaux
Valeur de drague	Coût moyen de	Calcule la valeur	Coûts de drague évités
évitée	dragage annuel	actuelle des coûts de	(devise/bassin/année,
(facultatif)	(devise)	dragage	devise/pixel/an)
	Durée de vie (années)	•	
	Taux de remise (%)		
Valeur de traitement	Coût annuel moyen	Calcule la valeur	Coût de traitement évité
évité	d'enlèvement des	actuelle des coûts de	(devise/bassin/année,
(facultatif)	sédiments (devise)	traitement	devise/pixel/an)
	Durée de vie (années)	-	
	Taux de remise (%)	<u> </u>	

## 2.1 Les Inputs

La plupart des inputs ont été pris de la bibliographie et certains ont été améliorés pour s'adapter au module SDR comme le bassin hydrographique et l'occupation du sol. Le bassin hydrographique a été produit sur ArcGIS à partir d'un MNT raster. La démarche opérationnelle consiste à utiliser l'outil hydrologie de l'extension d'analyse spatiale d'ArcGIS. Les outils fill, flow direction, flow accumulation et watershed ont été choisis pour produire la carte de bassin versant en modèle raster. Cette carte a été convertie par la suite du

format raster au format vecteur (shapefile) demandée par le module. Une colonne spécifique nommée ws\_id avec un nombre entier s'est ajoutée en tableau attributaire du shapefile. La carte d'occupation du sol existait en format shapefile et donc a été convertie au format raster dans ArcGIS. Les autres données d'inputs comme la carte de facteur de pluie et de ruissellement et la carte de facteur d'érodibilité du sol ont été prises de la bibliographie.

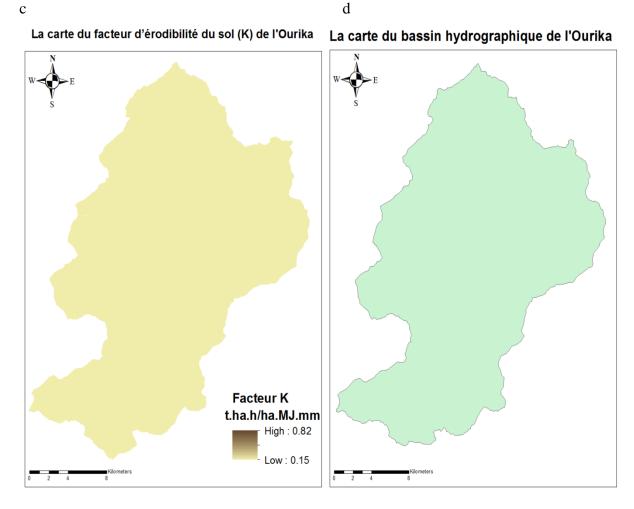
La carte du modèle numérique de terrain de l'Ourika

La carte du facteur de pluie et de ruissellement de l'Ourika

WY
S

MNT
mètres
High: 3994
Low: 857

MONTENS
High: 3994
Low: 857



**Figure 3.** Les données d'input pour le modèle de la rétention des sédiments : a- le modèle numérique du terrain ; b- le facteur de pluie et de ruissellement ; c- le facteur de l'érodibilité du sol ; d- le bassin hydrographique de l'Ourika.

### e. La carte de l'occupation du sol

#### f. Tableau biophysique

C'est tableau au format séparateur point virgule (.csv) contenant des informations du modèle correspondant à chacune des classes de l'occupation du sol. Chaque ligne est une classe d'occupation du sol et les colonnes doivent être nommées et définies comme suit:

- ➤ **lucode** (code d'occupation du sol): un entier unique pour chaque classe d'occupation du sol qui doit correspondre à l'input du modèle raster de l'occupation du sol.
- ➤ usle\_c : facteur de culture (végétation) et de gestion pour l'USLE, une valeur de virgule flottante comprise entre 0 et 1.
- ➤ usle\_p: facteur de pratique de conservation pour l'USLE, une valeur de virgule flottante comprise entre 0 et 1

#### g. Le seuil d'accumulation de débit

Le nombre de cellules en amont qui doit circuler dans une cellule avant qu'elle ne soit considérée comme une partie d'un flux, qui est utilisé pour classer les flux dans le MNT. La valeur par défaut est 1000 avec une résolution de 30m de MNT.

#### h. Kb and ICO

Ce sont des paramètres d'étalonnage qui définissent la relation entre l'indice de connectivité et le taux de livraison des sédiments (SDR). Vigiak et al., 2012 suggèrent que IC0 est indépendant du paysage et que le modèle est sensible à Kb. Jamshidi et al., 2013, nous recommande de définir ces paramètres sur leurs valeurs par défaut (IC0 = 0.5 et Kb = 2), et en utilisant Kb uniquement pour l'étalonnage (Vigiak et al., 2012).

#### i. SDRmax

Le SDR maximum qu'un pixel peut atteindre est, fonction de la texture du sol. Il est défini comme la fraction de particules de terre végétale plus fine que le sable grossier (1000  $\mu$ m, Vigiak et al., 2012). La valeur par défaut est 0,8.

#### 3 Le modèle de rendement en eau

Le rendement en eau dans l'InVEST est défini comme la quantité d'eau qui coule sur le paysage (précipitations moins les pertes de stockage et d'évapotranspiration), (Tallis et al., 2011). Le modèle utilise la précipitation annuelle moyenne (Px), l'évapotranspiration de référence annuelle, la profondeur du sol, la réserve utile en eau disponible pour la plante, la profondeur de la racine de la plante et les caractéristiques d'occupation du sol pour calculer le rendement annuel moyen de l'eau (Yxj) dans chaque pixel (x=1,2,..., X) comme suit:

$$Yxj = \left(1 - \frac{AETxj}{Px}\right) \tag{1}$$

Avec AETxj est l'évapotranspiration réelle (annuelle) sur le pixel x pour l'occupation du sol j (le code de classe de l'occupation du sol, ex ; 0 pour les cultures irriguées, 2 pour les forêts claires etc.), et Px est la précipitation annuelle au niveau de chaque pixel x.

L'approximation de la courbe de Budyko développée par Zhang et al., 2001 est utilisé pour calculer la partition d'évapotranspiration du bilan hydrique ( $\frac{AETxj}{Px}$ ) comme suit :

$$\frac{AETxj}{Px} = \frac{1 + wxRxj}{1 + wxRxj + \frac{1}{Rxj}}$$
 (2)

et

$$wx = Z \frac{AWCx}{Px}$$
 (3)

wx est le coefficient de réserve utile en eau pour les plantes sur pixel x. Ce coefficient sans dimension représente la différence relative dans la façon dont les plantes utilisent l'eau du sol pour la transpiration (Zhang et al., 2001). Le coefficient Z est un facteur saisonnier qui présente la répartition saisonnière des précipitations et les hauteurs pluviométriques avec des valeurs comprises entre 1 et 10. Le coefficient Z va prendre la valeur 10 dans les régions caractérisées par des pluies d'hiver, alors que dans les zones humides avec des pluies réparties tout au long de l'année ou des régions avec des pluies d'été, elle prendra 1. AWCx est la réserve utile en eau dans chaque pixel (en mm).

$$Rxj = \frac{kxjETox}{Px} \tag{4}$$

Rxj est l'indice de sécheresse de Budyko sur pixel x pour l'occupation du sol j (Budyko, 1974). Elle a des valeurs supérieures à 1 dans les pixels qui sont potentiellement arides (Arora, 2002; Budyko, 1974). ETo est l'évapotranspiration de référence du pixel x et kxj est le coefficient d'évapotranspiration des plantes (végétation) associé avec l'occupation du sol j sur le pixel x. ETox représente un indice de la demande climatique et kxj est déterminé par les caractéristiques végétales dans chaque pixel x (Allen et al., 1998).

**Table 5.** Composants et description des trois étapes du module de rendement en eau d'après Sharp et al., 2016.

Etapes	Inputs	Processus	Outputs
Fourniture	Occupation du sol	Calcule le rendement	Rendement annuel
(obligatoire)	Précipitation moyenne	au niveau de pixel	moyen (mm/bassin
	annuelle (mm)	comme la différence	versant/an, mm/pixel/an)
	Evapotranspiration de	entre la précipitation	
	référence moyenne	et	
	annuelle (mm)	l'évapotranspiration	
	Réserve utile en eau	réelle	
	d'un sol (fraction)		
	Coefficient		
	d'évapotranspiration		
	Profondeur de racine		
	(mm)		
	Profondeur de sol		
	efficace (mm)		
	Facteur de saisonnalité		
Service (obligatoire)	Utilisation	Soustraire l'eau	Rendement annuel
	consommatrice par	consommée par les	moyen de l'eau
	l'occupation du sol	différentes	disponible pour la
	Shapefiles des bassins	occupations du sol	production de
	versants et sous		l'hydroélectricité
	bassins versants		(mm/bassin versant/an,
	Coefficient		mm/pixel/an)
	d'étalonnage		
Valeur (facultatif)	Efficacité de la turbine	Estimer l'énergie	Production d'énergie
	(0.7-0.95)	pour un volume	(KWH/bassin
	Volume d'afflux pour	d'eau donnée	versant/an,
	l'hydroélectricité		KWH/pixel/an)
	(fraction)		
	Tête hydraulique (m)		

Cout	d'opération	Calcule la valeur	Valeur actuelle nette
(devis	se)	actuelle nette	(devise/bassin
Prix	d'hydroélectricité	d'énergie produite	versant/an,
Durée	e de vie de la	pendant la durée de	devise/pixel/an)
station	n	vie de barrage	
d'hyd	roélectricité		
(anné	es)		
Taux	d'actualisation		
(%)			

#### 3.1 Les inputs

Les cartes de bassin hydrographique et de sous bassins hydrographiques ont été délimités préalablement en utilisant ArcGIS. Un seul bassin hydrographique et quatorze sous bassins hydrographiques ont été définis à l'Ourika. Les données des caractéristiques du sol de la zone comme la carte de la profondeur de la couche racinaire, la profondeur des racines pour chaque occupation du sol etc. ont été estimées à partir de Harmonized World Soil Database (HWSD) de la FAO. La carte des précipitations annuelles a été créée avec les données existantes de la zone et les outils d'ArcGIS. Pour l'évapotranspiration annuelle et faute de disponibilité, la moyenne générale des données de la station météorologiques d'Oukaimden pendant les années 2006 à 2011 a été utilisées en appliquant. L'équation de 'modified Hargreaves' (Droogers and Allen, 2002) a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration de référence comme suit (Eq 1).

$$ET_{o,(M)Har} = 0.0023R_a (Tmax - Tmin)^{0.653} - (\frac{Tmax - Tmin}{2} + 17.8)$$
 (Eq. 1)

Avec  $ET_{o,(M)Har} = 1$ 'évapotranspiration de référence (mm/jour);  $R_a = 1$  le rayonnement solaire global (MJ/m²/jour); Tmax = 1 température maximale (°C) et Tmin = 1 température minimale (°C).

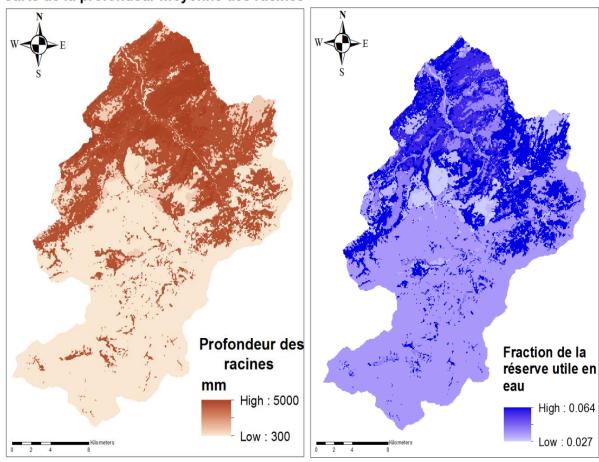
Une nouvelle carte d'occupation du sol de 2016 à été utilisée. La réserve utile en eau dans la zone d'étude a été déterminée par un échantillonnage, la mesure sur le terrain et le prélèvement d'échantillon pour analyse au laboratoire. Les paramètres : humidité à la capacité au champ (HCC), point de flétrissement (PF), densité apparente (DA) et profondeur (Z) ont été mesurés pour calculer la réserve utile en eau du sol à partir de la formule suivante : RU = (HCC – PF) \* DA \* Z. L'humidité à la capacité au champ (HCC) a été calculée en

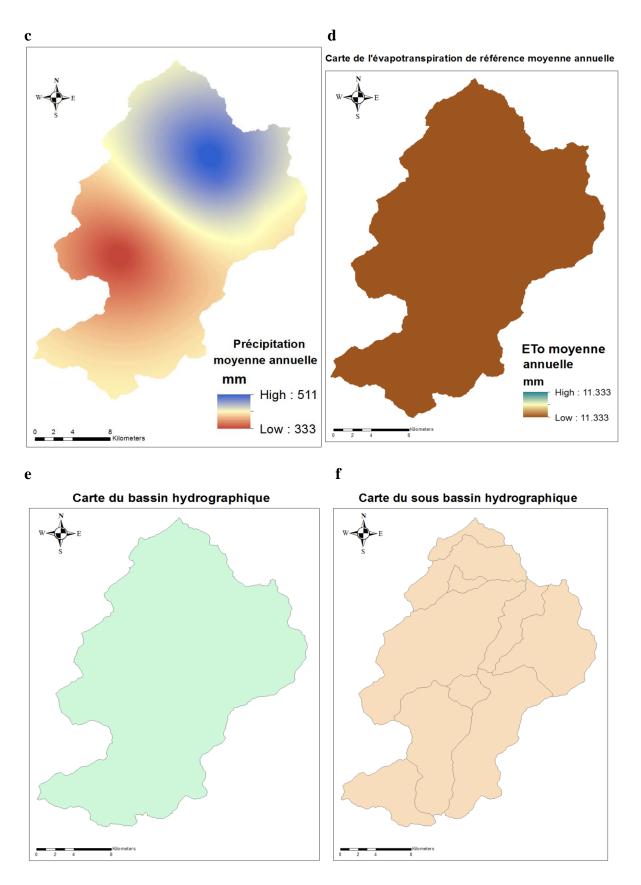
installant un quadra de 100 cm par 100 cm dans trois endroits représentatifs pour chaque occupation du sol. Le sol a été saturé jusqu'à une humidité de 100 % à l'aide de l'humidimètre. Le quadra a été couvert par une plastique par la suite et une colonne du sol a été prélevée à l'aide d'une tarière. L'humidité de chaque profondeur a été mesurée à chaque 5 ou 6 heures jusqu'à sa stabilisation. Le point de flétrissement (PF) a été calculé en choisissant des sites proches du quadra sur lequel l'humidité a été mesurée pour qu'il soit homogène. Un échantillon de chaque profondeur possible jusqu'à 30 cm au maximum a été prélevé et a été ramené au laboratoire. La densité apparente d'un sol été estimée par la formule suivante : D = P/V. P est le poids sec de l'échantillon (mesuré après séchage au laboratoire) et V est le volume déjà déterminé selon le cylindre utilisé (cylindre de 10 /10 cm)

Le calcul a été réalisé au niveau de chaque occupation du sol et a été divisé par la profondeur du sol (les paramètres ont été exprimés en millimètres). La fraction trouvée a été utilisée pour créer la carte de la fraction de la réserve utile en eau du sol pour le bassin versant. Le tableau biophysique a été rempli à partir des données bibliographies.

a b

Carte de la profondeur moyenne des racines Carte de la fraction de la réserve utile en eau du sol





**Figure 4.** Les données d'inputs du modèle de rendement en eau : a- profondeur des racines ; b- la réserve utile en eau du sol ; c- précipitation annuelle ; d- évapotranspiration de référence annuelle ; e- bassin hydrographique ; et f- sous bassin hydrographique de l'Ourika.

#### g. Tableau biophysique

Il comporte les données sur les coefficients biophysiques relatifs aux différentes classes d'occupation du sol. Les lignes correspondent aux différents types d'occupation du sol tandis que les colonnes sont les données suivantes :

- ➤ **lucode** (code d'occupation du sol) : un entier unique pour chaque classe d'occupation du sol et qui correspond aux valeurs dans la carte d'occupation du sol.
- **LULC\_desc**: c'est le nom descriptif des classes d'occupation du sol.
- LULC\_veg: les valeurs de 1 pour le type d'occupation du sol avec une couverture végétale et les valeurs de 0 pour les autres types d'occupation du sol.
- ➤ root\_depth: c'est la profondeur maximale des racines pour les classes d'occupation du sol avec une couverture végétale, c'est un nombre entier en millimètres. Il correspond le plus souvent la profondeur à partir de laquelle se trouve 95% de la biomasse racinaire pour un type de végétation donnée.
- ➤ Kc: c'est le coefficient d'évapotranspiration des plantes pour chaque type d'occupation du sol. Il est utilisé pour déterminer l'évapotranspiration potentielle. Il est basé sur les caractéristiques physiologiques des plantes pour modifier l'évapotranspiration de référence qui se base sur alfa-alfa. La valeur de ce coefficient d'évapotranspiration est décimale dans l'intervalle de 0 à 1,5. Allen et al. 1998 a donné des informations sur la détermination de Kc.

#### h. Paramètre Z

Il correspond à la distribution saisonnière de la précipitation. C'est un nombre réel la valeur à virgule flottante entre 1 à 30. Selon Donohue et al. (2012), ce paramètre peut être calculé comme suit (Eq. 2):

$$Z = 0.2 \times N$$
 Eq. 2

Avec N = Nombre d'événements de pluie par an. En utilisant les données de la station météorologiques d'Oukaimden pendant les années 2006 à 2011, la moyenne de N entre les cinq années est 95 et donc la valeur de Z sera 19.

#### i. Tableau de demande

C'est un tableau avec les classes d'occupation du sol qui montre la consommation d'eau pour chaque type d'occupation du sol. La consommation d'eau est la partie de l'eau utilisée qui est

incorporée dans les produits ou les cultures, consommée par les humains ou le bétail ou autrement retiré du bilan hydrique du bassin hydrographique. Les colonnes sont

- ➤ lucode : un entier unique identifiant chaque classe d'occupation du sol.
- ➤ demande : estimation moyenne de la consommation en eau de chaque type d'occupation du sol. L'utilisation en eau est donnée en mètre cube par an pour un pixel dans la carte d'occupation du sol.

# PARTIE III: Résultats et discussions

## I Le modèle Carbone

# Carte du stockage actuel du carbone (2016)

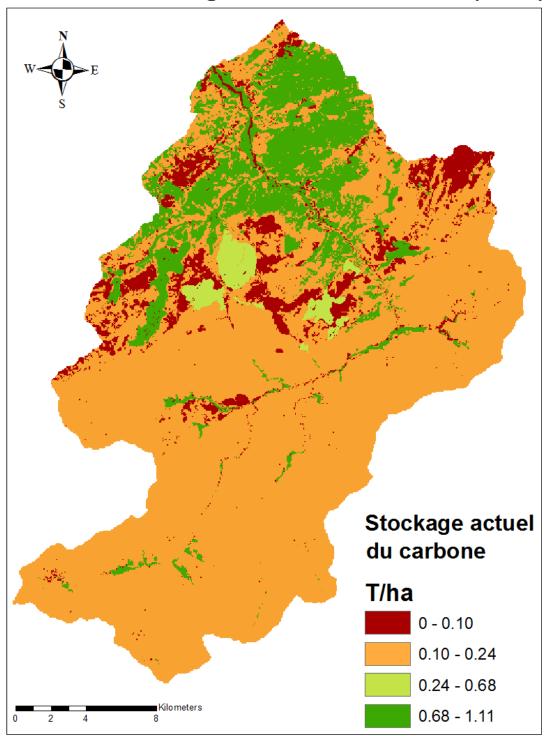


Figure 5. La carte de stockage actuel du carbone dans le bassin versant de l'Ourika.

Le stockage total du carbone dans le bassin versant de l'Ourika s'élève à 1 793 787 tonnes, l'année de base 2016. Cette valeur est très petite par rapport au stockage total du carbone dans le pays qui reste à 223 million tonnes de carbone (FAO, 2010). Les forêts et les cultures irriguées sont les classes d'occupation du sol avec le plus grand stockage du carbone, une moyenne de 0.90 tC/ha (Figure 5). Les cultures en bour possèdent un assez grand stockage du carbone au niveau du bassin, soit une moyenne de 0.46 tC/ha (Figure 5). Les xérophytes épineuses montrent un stockage du carbone réduit par rapport aux forêts et aux cultures, soit une moyenne de 0.17 tC/ha (Figure 5). Les classes d'occupation du sol avec le plus petit taux de stockage du carbone sont les sols dénudés, les lits de l'oued et les constructions, on y compte une moyenne de 0.05 tC/ha (Figure 5). La valeur maximale du stockage du carbone s'élève à 1.1 tC/ha et se trouve dans les classes des forêts et des cultures irriguées alors que la valeur minimale s'élève à 0.0 tC/ha et se trouve dans les classes des sols dénudés, des lits de l'oued et des constructions. La majeure partie de la superficie du bassin versant présente un faible stockage de carbone en général avec une moyenne aux environs de 0.17 tC/ha. La part de surface ayant un grand potentiel de stockage de carbone, forêts et cultures, est très limitée. La moyenne générale du stockage du carbone au niveau du bassin est de 0,25 tC/ha avec un écart type de 0,28 qui est assez faible par rapport à la moyenne maximale. Le stockage du carbone dans le bassin versant n'est pas très grand mais il a un fort potentiel à devenir grand si des mesures adéquates sont prises. Ces résultats révèlent que le couvert végétal contribue largement à la régulation de la fourniture des services ecosystémiques contribuant ainsi au bien être de la population du bassin versant de l'Ourika. Parmi ces services figure le stockage du carbone assuré principalement par le couvert végétal. La performance des écosystèmes forestiers pour le stockage du carbone est ainsi démontrée. Les écosystèmes forestiers du bassin versant de l'Ourika sont constitués d'arbres, de sols, comportant des racines et des matières organiques piègent et stockent du carbone provenant du CO2 de l'atmosphère. Ils contribuent aussi à la régulation du climat. Plus la couverture forestière augment, on aura plus de stockage de carbone et encore plus de service de régulation du climat. Les cultures irriguées aussi contribuent largement au service de régulation du climat par leur grand stock de carbone; et c'est surtout l'agroforesterie dans le bassin qui assure un grand pourcentage de ce stock.

## II Modèle de rétention des sédiments

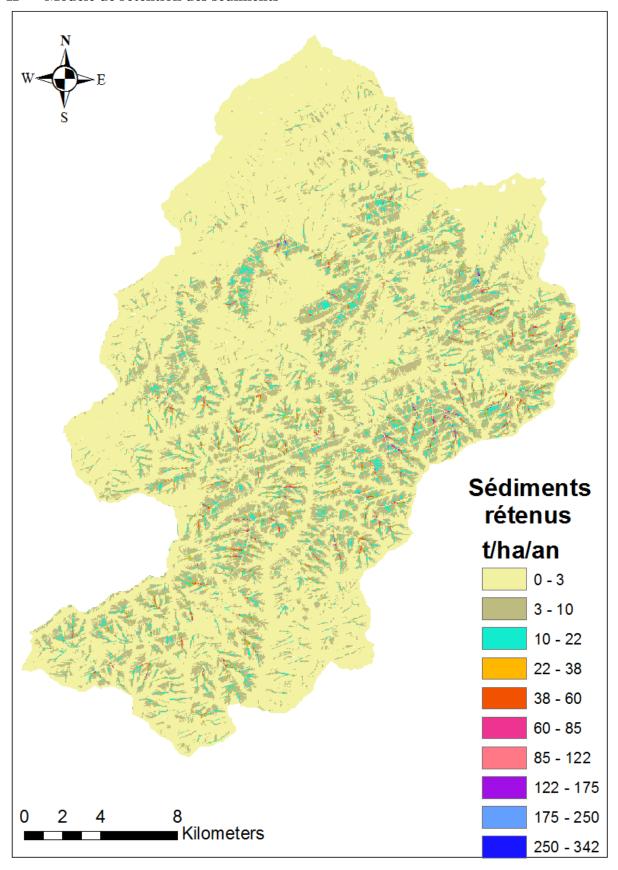


Figure 6. La carte de rétention des sédiments dans le bassin versant de l'Ourika.

La rétention totale des sédiments dans tout le bassin versant est de 23 162 431 tonnes. Le bassin présente une capacité assez forte de rétention des sédiments. La moyenne de rétention des sédiments dans le bassin versant est 2,53 t/ha/an avec un écart type de 7,4 (Figure 6). La moyenne montre que la plupart des zones du bassin n'arrivent pas à retenir des sédiments d'une manière importante.

Les parties du bassin versant qui ont retenu plus des sédiments occupent une proportion réduite alors que celles qui ont retenu moins des sédiments occupent presque la totalité du BVO. La plus grande rétention des sédiments est constatée sous couvert forestier, soit la plus grande moyenne de rétention de 296 t/ha/an (Figure 6). Les cultures irriguées possèdent aussi la grande rétention des sédiments. Les forêts et les cultures jouent un rôle important en matière de la rétention des sédiments. La perte totale du sol dans le bassin versant est 93 130 503 tonnes; cette valeur est très forte et grande en comparaison à la rétention totale des sédiments. Cette valeur explique l'importance de l'érosion au niveau du bassin versant. Celle-ci s'élève, en moyenne à 10,78 t/ha/an avec un écart type de 22,97 dans le bassin versant (Figure 7). Cette valeur est assez grande par rapport à celle de la rétention des sédiments. Les résultats révèlent que le bassin perd 10,78 t/ha/an du sol par l'érosion et retient juste 2,53 t/ha/an de ce sol. Au Maroc, l'érosion hydrique est intense avec des dégradations spécifiques dépassant 20 t/ha/an dans les versants du Rif, entre 10 et 20 t/ha/an dans le pré-Rif, entre 5 et 10 t/ha/an dans les Moyen et le Haut Atlas et moins de 5 t/ha/an dans les autres régions (REEM 2015). L'érosion hydrique est plus intense au niveau du bassin versant de l'Ourika avec une moyenne de 10,78 t/ha/an, elle dépasse les valeurs moyennes déterminées au niveau du Haut Atlas. La comparaison des résultats obtenus avec des études réalisées dans d'autres bassins versants montre la fiabilité relative du modèle appliqué. En effet, le bassin versant de l'Assif el mal (Tensift Al haouz) perd en moyenne 9,38 t/ha/an selon Goufri, 2014. Au niveau du Rif occidental, Moukhchane et al., 1998, montre que les pertes moyennes en sols sur des terrains fragiles du territoire rifain atteignent 17t/ha/an. Le bassin versant de l'Oued Sahla, (Rif central) a donné 22 t/ha/an en moyenne par Sadiki et al., 2009. L'application d'autres modèles a donné des résultats similaires à ceux obtenus par cette modèle et confirment la validité de cette technique. Selon Damnati et al., 2006, par application de la télédétection, 26,6 t/ha/an a été attribué au bassin versant Raouz. Zouagui et Benmansour, 2012, ont trouvé 23 t/ha/an dans le bassin versant Moulay Bouchta du Rif occidental.

L'érosion moyenne annuelle est quatre fois supérieure à la rétention moyenne des sédiments au niveau du bassin. Le couvert végétal arrive quand même à retenir des sédiments en les empêchant d'être exportés du bassin versant; mais ceci reste insuffisant pour contenir l'érosion qui ronge ce bassin. Les endroits érodés du BVO (Figure 7) sont plus importants que ceux conservés (Figure 6). L'exportation totale des sédiments dans tout le bassin versant de l'Ourika est de 19 444 744 tonnes ce qui est moins par rapport à la rétention des sédiments du BVO. L'exportation moyenne annuelle des sédiments s'élève à 2,05 t/ha/an avec un écart type de 6,5 dans le bassin versant. Cette moyenne est moins que celle de rétention des sédiments. Ces sédiments sont exportés vers les endroits où il n'y a pas de forêt ou de culture (Figure 8).

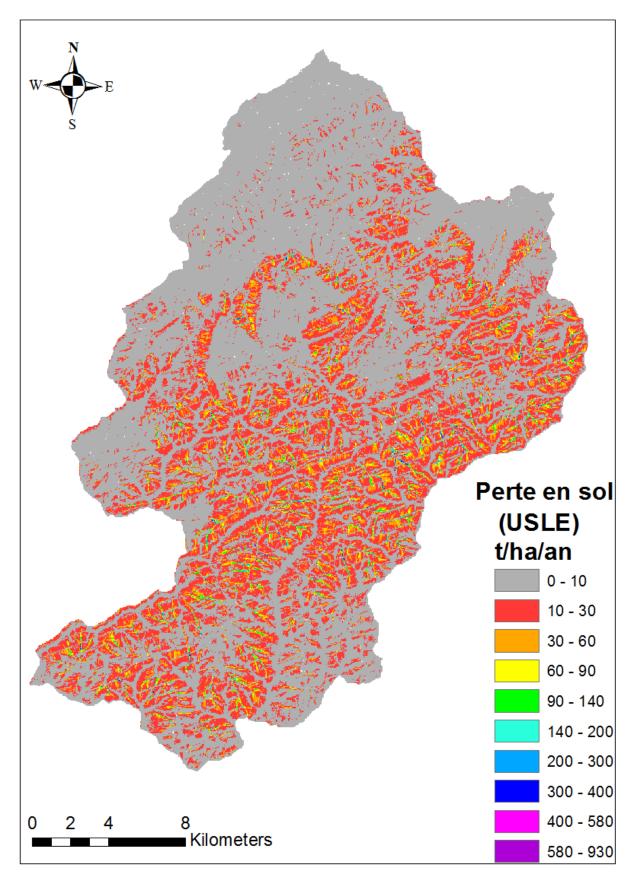


Figure 7. Carte des pertes totales en sols dans le bassin versant de l'Ourika.

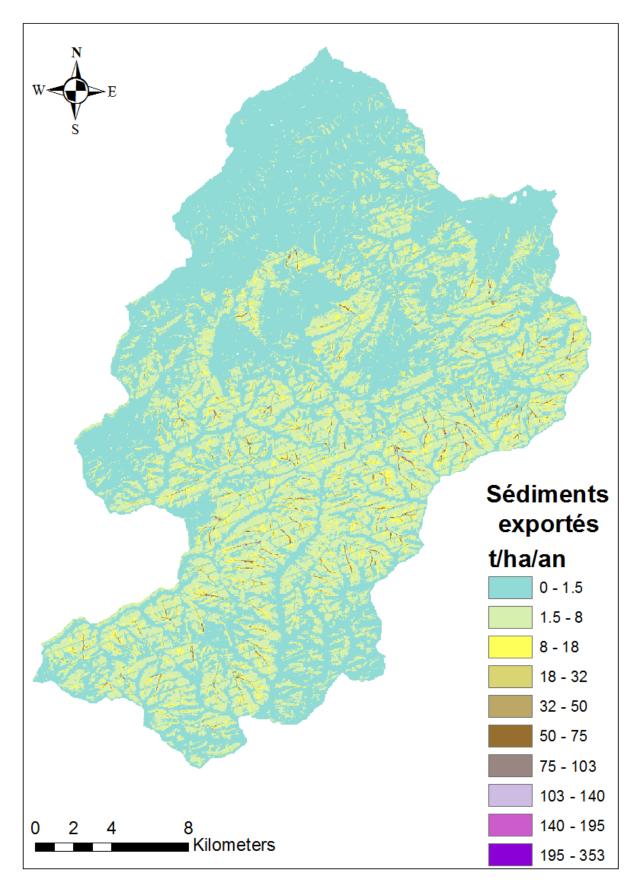


Figure 8. Carte des exportations des sédiments dans le bassin versant de l'Ourika.

# III Le modèle de rendement en eau

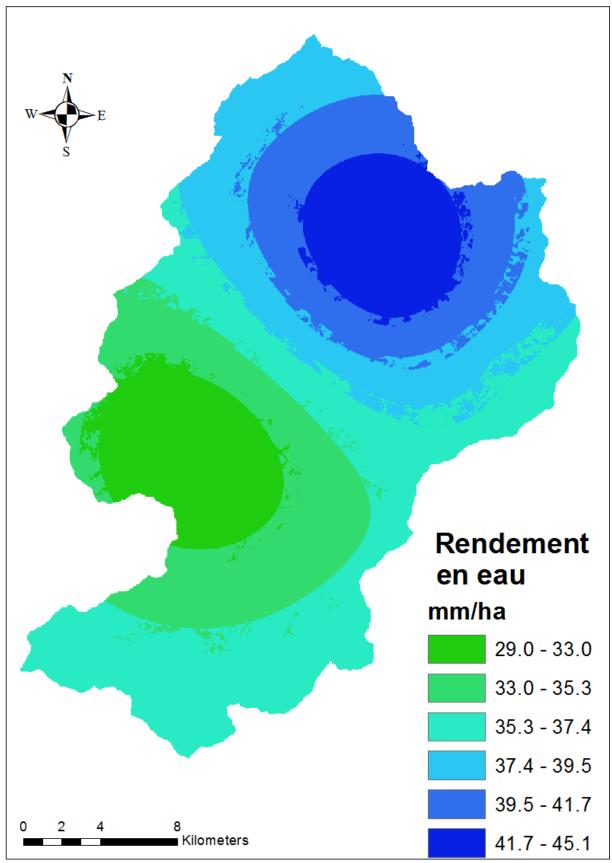


Figure 9. Carte du rendement en eau dans le bassin versant de l'Ourika.

Le volume total du rendement en eau du bassin versant de l'Ourika est 236 598  $043m^3$ . C'est le volume moyen annuel de l'eau qui est produit par le bassin versant. La moyenne du rendement en eau pour le bassin versant est 37,06 mm/ha alors que la moyenne de l'évapotranspiration réelle est 0,65 mm/ha (Figure 9 & 10). Le rendement en eau est la partie restante de l'eau qui va couler à la surface et au sous sol après l'évapotranspiration et la précipitation. Le rendement en eau est alors la quantité de l'eau qui va ruisseler au niveau du bassin. Ce sont les forêts qui représentent le plus grand rendement en eau, soit une moyenne de 27,53 mm/ha. Les xérophytes épineuses représentent le plus petit rendement en eau, soit une moyenne 22,13 mm/ha (Figure 9). Les forêts possèdent la plus grande évapotranspiration réelle au niveau du bassin versant avec une moyenne de 0,84 mm/ha (Figure 10). Les cultures en bour aussi possèdent la même moyenne d'évapotranspiration réelle que les forêts tandis que les cultures en bour possèdent une moyenne 0,58 mm/ha (Figure 10). Les xérophytes épineuses sont les classes de l'occupation du sol avec la plus faible évapotranspiration réelle, soit une moyenne de 0,36 mm/ha (Figure 10). Bien que les forêts contribuent à la plus grande évapotranspiration réelle, elles donnent encore le plus grand rendement en eau au niveau du bassin versant. L'évapotranspiration réelle est la quantité exacte d'eau évapotranspirée par la couverture végétale. La moyenne de l'évapotranspiration montre que les forêts du bassin versant perdent beaucoup d'eau par évapotranspiration (0,84 mm/ha) et dépassent largement la moyenne générale de l'évapotranspiration réelle à 0.65 mm/ha. Ceci révèle l'importance et la place occupée par les forêts (Figure 10). C'est le même cas pour les cultures irriguées dont la moyenne d'évapotranspiration est de 0.84 mm/ha. Une grande quantité d'eau est ruisselée au niveau du bassin versant à 37,6 mm/ha (Figure 9). Si le couvert végétal aide à l'infiltration de l'eau dans le bassin, l'importance de la lame ruisselée s'explique la petite superficie occupée par les forêts. La comparaison des résultats du modèle du rendement en eau montre que la moyenne du rendement en eau est beaucoup plus grande que celle de l'évapotranspiration. La quantité d'eau ruisselée dans le bassin versant est beaucoup plus importante que celle perdue par évapotranspiration. Sur un autre registre, le bassin versant de l'Ourika fournit une quantité d'eau de surface et au sous sol assez suffisante pour subvenir aux nombreuses utilisations de l'homme (eau potable, irrigation et hydroélectricité). Les résultats montrent que le bassin n'a pas assez de couvert végétal important lui permettant d'assurer davantage d'infiltration que d'écoulement.

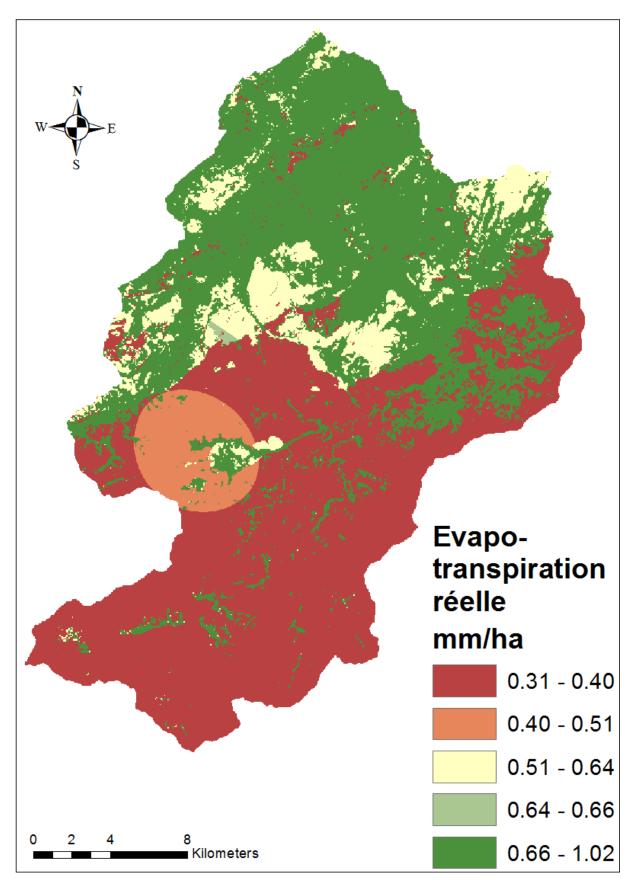


Figure 10. Carte de l'évapotranspiration réelle dans le bassin versant de l'Ourika.

#### Conclusion

Le bassin versant de l'Ourika est une zone avec un grand potentiel des fournitures de services écosystémiques. En considérant trois services étudiés dans le cadre de ce travail, le service de régulation du climat par le stockage du carbone est un service faiblement fourni par le bassin par un stockage total de 1 793 787 tonnes de carbone. Les forêts et les cultures irriguées constituent les occupations du sol avec un large stock de carbone. Plus la superficie des forêts et des cultures augmente, plus le stockage du carbone va augmenter dans le bassin.

Les pertes totales en sol de l'ordre de 93 130 503 tonnes révèlent la grande susceptibilité du bassin à l'érosion. Par contre, la résistance du bassin à l'érosion est faible, elle est traduite par sa rétention totale des sédiments qui est uniquement de 23 162 431 tonnes; les sédiments exportés du bassin s'élèvent par conséquent à 19 444 744 tonnes. L'ampleur de l'érosion et le niveau d'exportation des sédiments interpelle les gestionnaires pour entreprendre des mesures appropriées des aménagements adéquats. La rétention des sédiments est plus forte dans les forêts et sous les cultures irriguées.

Le service d'approvisionnement en eau par le rendement en eau est très important au niveau du bassin. Il s'élève à un rendement de 236 598 043m<sup>3</sup>. Bien qu'il y ait une grande perte en sol par érosion, le bassin fournit par ruissellement de l'eau vu que son rendement dépasse la perte par l'évapotranspiration.

Le couvert végétal joue un rôle prépondérant dans la fourniture de ces services. Un bon aménagement forestier sera bénéfique pour pouvoir préserver ces ressources et encore générer davantage de services écosystémiques du bassin versant. Le reboisement, la restauration des parties dégradées par la forêt, les aménagements sylvo-pastoraux et une bonne gestion des cultures sont fortement recommandés pour assurer la durabilité de la provision de ces services.

Ainsi émergent une série de questions relatives à comment est-ce que ces services seraient à l'avenir ? Le bassin versant de l'Ourika pourrait-il retenir plus des sédiments que ceux qu'il exporte ou perd par érosion? Le bassin versant de l'Ourika peut-il profiter en grande partie de la quantité de l'eau ruisselée? Ces questions vont constituer des jalons pour la deuxième partie de ce travail et dont la réponse permettrait d'éclairer les choix futurs des aménagistes du territoire.

## Références bibliographiques

Acevedo P.M.Á., Farfán A. L., Márquez M., Delibes-Mateos R.R., et Vargas J. M., 2010. "Past, Present and Future of Wild Ungulates in Relation to Changes in Land Use." Landscape Ecology 26 (1), pp.19–31.

**Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., et Smith M., 1998.** Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), p. D05109.

**Arora V.K., 2002.** The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. J Hydrol; 265, pp.164–77.

**Biron P.E., 1982.** Le Permo-Trias de la région de l'Ourika (Haut Atlas de Marrakech, Maroc). Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle de l'université scientifique et médicale, 48p.

**Borselli L., Cassi, P., Torri D., 2008.** Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. Catena 75, pp. 268–277.

**Boyd J., Banzhaf S., 2007.**What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63, pp. 616–626.

**Brauman K.A., Daily G.C., Duarte T.K., Mooney H.A., 2007**. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. Annual Review of Environment and Resources 32, pp. 67–98.

**Bredemeier M., 2011.** Forest climate and water issues in Europe. Ecohydrology 4(2), pp. 159–167.

**Brown A.E., Zhang L., McMahon T.A., Western A.W., Vertessy R.A., 2005.** A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of Hydrology 310 (1–4), pp. 28–61.

Budyko M. I., 1974. Climate and Life, 508 p.

Cairns M. A., Brown S., Helmer E. H., & Baumgardner G. A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia, 111(1), pp. 1-11.

Canadell J.G., et Raupach M.R., 2008. Managing Forests for Climate Change Mitigation. Science320; pp. 1456-1457.

**Capoor K., et Ambrosi P., 2008.** State and Trends of the Carbon Market Washington, D.C.: World Bank Institute, 2008 May, 61p.

**Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L., 2013.** Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. Geomorphology 188, pp. 31–41.

Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., et al., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature; 387, pp. 253–260.

**Croitoru L., et Sarraf M., 2017.** Le Coût de la Dégradation de l'Environnement au Maroc. Environment and Natural Resources Global Practice Discussion Paper 5, 119p.

**Damnati B., Chatt A., Hamani M. et al., 2006.** L'érosion hydrique et sa quantification par le radioélément 137Cs au niveau du bassin versant du barrage Raouz (Région de Tanger-Tétouan). TANCA-01. Workshop sur les techniques analytiques, nucléaires et conventionnelles, et leurs applications, Rabat, 38p.

**Daily G., 1997.** Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems. Washington DC: Island Press, 11p.

**Daily et al., 2009.** Ecosystem services in decision making: time to deliver. Front Ecol Environ, 7(1), pp. 21-28.

**DREF du Haut Atlas., 2000.** Projet de développement du B.V d'Ourika (partie amont). Direction Régionale des eaux et forêts du Haut Atlas – Marrakech, Maroc, pp.17-22.

**Donohue, R. J., M. L. Roderick, and T. R. McVicar., 2012.** Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model, Journal of Hydrology, 35-50, pp. 436-437.

**Droogers P., et Allen R.G., 2002.** "Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions." Irrigation and Drainage Systems, vol. 16, Issue 1, February 2002, pp. 33–45.

**Farley K.A., Jobbagy E.G, Jackson R.B., 2005.** Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. Global Change Biology 11(10), pp. 1565–1576.

**FAO, 2009.** L.S. Hamilton, Étude thématique préparée dans le cadre de l'Évalution des ressources forestières mondiales 2005 Étude FAO: Forêts n° 155. Rome, 53p.

**FAO, 2010.** Global Forest Resources Assessment 2010, main report. FAO FORESTRY PAPER 163, 43p.

Finlayson, M., Cruz, R. D., Davidson, N., Alder, J., Cork, S., de Groot, R. S., & Ratner, B. D., 2005. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis, 80p.

**Fisher B., Turner R.K., Morling P., 2009.** Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological Economics 68, 643–653.

Foley J., Defries R., Asner G. P., Barford C., Bonan G., Carpenter S. R., Chapin F. S., et al. 2005. "Global Consequences of Land Use." Science 309 (5734), pp. 570–574.

Gourfi Abdelali, 2014. Application des modeles USLE et HEUSCH pour l'estimation de la perte en sol et l'envasement du barrage du bassin versant de l'Assif el mal (Tensift al haouz). Mémoire de projet de fin d'étude, 66p.

Guannel G., Papenfus M., Toft J., Marsik M., Bernhardt J., 2011. InVEST 2.2.1 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford, 223p.

Guerry A.D., Ruckelshaus M.H., Arkema K.K., Bernhardt J.R., Guannel G., Kim C., et al., 2012. Modeling benefits from nature: using ecosystem services to inform coastal and marine spatial planning. Int J Biodivers Sci Manag Ecosyst Serv Manag; 1(15), pp. 2151–3732.

**Hamilton K., Sjardin M., Marcello T., et Xu G., 2008.** Forging a Frontier: State of the Voluntary Carbon Markets, Washington, D.C.: Ecosystem Marketplace and New Carbon Finance; 2008, 17p.

**Hector A., et Bagchi R., 2007.** "Biodiversity and Ecosystem Multifunctionality." Nature 448 (7150), pp. 188–190.

**Ilstedt U., Malmer A., Verbeeten E., Murdiyarso D., 2007.** The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: a systematic review and meta-analysis. Forest Ecology and Management 251 (1–2), pp. 45–51.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.** IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan, 2, pp. 48-56.

**Jamshidi R., Dragovich D., Webb A.A., 2013.** Distributed empirical algorithms to estimate catchment scale sediment connectivity and yield in a subtropical region. Hydrol. Process, pp. 2671–2684.

**Kepner W.G., Ramsey M.M., Brown E.S., Jarchow M.E., Dickinson K.J.M., Mark A.F., 2012.** Hydrologic futures: using scenario analysis to evaluate impacts of forecasted 1 R. and use change on hydrologic services. Ecosphere 3, pp. 7–69.

**Lal R., 2004.** Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science 304, pp. 1623-1627.

Mansoor D.K.L., Matlocka M.D., Cummingsa E.C., Nalley L.L., 2013. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa, pp. 6-18.

**Méral P., 2010.** Les services environnementaux en économie : revue de la littérature, Programme SERENA, Document de travail n°2010-05, 50p.

**Moukhchane M., Bouhlassa S., et Chalouan A., 1998**. Approche cartographique et magnétique pour l'identification des sources de sédiments : cas du bassin versant Nakhla (Rif, Maroc). Sécheresse 3, n° 9, pp. 227-232.

Nelson E., Mendoza G., Regetz J., Polasky S., Tallis H., Cameron D.R., et al., 2009. Modeling multiple ecosystem service, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. Front Ecol Environ; 7–1, pp. 4-11.

Nelson E. J., Daily G.C., 2010. Modelling ecosystem services in terrestrial systems, pp. 53.

**Ouhammou, 1896.** Recherche sur l'étagement de la végétation dans le versant de l'oued Ourika, 181p.

**Ouhammou, 1991.** Aperçu sur l'étagement de la végétation dans le bassin versant de l'oued Ourika. Haut Atlas de Marrakech. Bull. Soc. Lin. Lyon, 60: pp. 401-409.

**Pagiola S., 2008.** Payments for environmental services in Costa Rica. Ecological Economics 65 (4): pp. 712-724.

**Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K.A., 2011.** The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the State of Minnesota. Environ Resour Econ; 48: pp. 219–242.

Ramankutty N., Foley J. A., Norman J., et McSweeney K., 2002. "The Global Distribution of Cultivable Lands: Current Patterns and Sensitivity to Possible Climate Change." Global Ecology and Biogeography 11 (5): pp. 377–392.

**Ravindranath N. H., & Ostwald M., 2008.** Methods for estimating above-ground biomass. Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects, pp. 113-147.

Raupach, M. R., & Canadell, J. G., 2008. Observing a vulnerable carbon cycle. In The Continental-Scale Greenhouse Gas Balance of Europe. Springer New York, pp. 5-32.

**REEM, 2015.** Rapport sur l'état de l'environnement au Maroc. Ministère délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement chargé de l'Environnement, 157p.

**Ruhl J.B., Kraft S.E., Lant C.L., 2007.** The Law and Policy of Ecosystem Services. Island Press, Washington, DC, 231p.

Sadiki A., Faleh A., Zezerze J.L., et al., 2009. Quantification de l'erosion en nappe dans le bassin versant de l'Oued Sahla, Rif occidental Maroc. Cahiers géographiques, N6, pp. 59-70.

**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, p p. 41-49.

Saidi et al., 2010. Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc) : Evénements extrêmes en contexte montagnard semi-aride. Comunicações Geologicas, 2010, t. 97, pp. 113-128.

Sharp R., Tallis H.T., Ricketts T., Guerry A.D., et al., 2016. InVEST +VERSION+ User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 72p.

**Stern N., 2007.** The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge and New York: Cambridge University Press, pp. 265–280.

**Study of Critical Environmental Problems (SCEP). 1970.** Man's Impact on the Global Environment. MIT Press, Cambridge. 319 p.

**Tallis H., et Polasky S., 2009.** Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. Ann N Y Acad Sci; 1162: pp. 265–283.

**Tallis H., et Polasky S., 2011.** Assessing multiple ecosystem services: an integrated tool for the real world. In: Kareiva P, Tallis H, Ricketts TH, Daily GC, Polasky S, editors. Natural capital. Theory and practice of mapping ecosystem services New York, USA: Oxford University Press, pp. 34-50.

**Vigerstol K.L., Aukema J.E., 2011.** A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. Journal of Environmental Management 92, pp. 2403–2409.

**Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., Mcinnes J., Roberts A.M., 2012.** Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. Geomorphology 138, pp. 74–88.

**Villa F., Bagstad K., Johnson, G., Voigt, B., 2011.** Scientific instruments for climate change adaptation: estimating and optimizing the efficiency of ecosystem services provision. Economia Agraria y Recursos Naturales 11 (1), pp. 54–71.

Westman W.E., 1977. How much are nature's services worth? Science, 197, pp. 960–964.

**Wischmeier W. H., & Smith D. D., 1978.** Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning, pp. 62-67.

**Zak M. R., Cabido M., Cáceres D., et Díaz S., 2008.** "What Drives Accelerated Land Cover Change in Central Argentina? Synergistic Consequences of Climatic, Socioeconomic, and Technological Factors." Environmental Management 42 (2): pp. 181–189.

Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilic J., Jansen S., Lewis S. L., ... & Chave J., 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum, pp. 351-366.

**Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R., 2001.** Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources; 37: pp. 701–708.

**Zouagui A., Benmansour M., Amenzou N., et al., 2012.** Application la technique de 137Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 1, pp. 53-58.

# SECTION II : OPTIMISATION DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES A TRAVERS LA GENERATION DES SCENARIOS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OURIKA

# Liste des acronymes

CO<sub>2</sub>: Dioxyde de carbone

**GIEC:** Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**InVEST:** Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

**MEA:** Millennium Ecosystem Assessment

#### Résumé

La préservation des écosystémiques est une nécessité pour assurer la fourniture cohérente des services écosystémiques actuellement et dans le futur. La gestion des services écosystémiques offre une perspective holistique pour la planification à l'échelle locale, nationale et mondiale. Souvent, les scénarios sont utilisés pour quantifier et contraster les impacts potentiels des facteurs anthropocentriques ou climatiques de changement sur les services écosystémiques.

Un outil à l'aide de décision gratuitement disponible, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade offs (InVEST), développé par Natural Capital Project qui vise à faciliter les processus de prise de décision et de planification en quantifiant les services écosystémiques dans un contexte spatialement explicite a été utilisé. L'outil de générateur de scénario qui fait partie de l'ensemble des outils de modélisation d'InVEST, publié en 2014 a aidé à développer les scenarios. L'utilisateur peut générer les cartes futures de l'occupation du sol via l'outil.

La présente étude a développé quatre scenarios d'occupation du sol spatialement explicites pour l'année 2030 dans le bassin versant de l'Ourika : le scenario tendanciel, le scenario catastrophique, le scenario idéal et le scenario concerté. Chaque scenario a quantifié les impacts de l'occupation future du sol sur les services écosystémiques à travers trois modèles d'InVEST : le stockage du carbone, la rétention des sédiments et le rendement en eau.

Les résultats révèlent que le scenario idéal a donné la plus grande rétention des sédiments, le stockage du carbone le plus élevé mais le plus faible rendement en eau. C'est le cas contraire pour le scenario catastrophique alors que les scenarios concerté et tendanciel étaient proche du scenario idéal mais loin de scenario catastrophique. En résumé, l'étude montre que les services écosystémiques sont spatialement spécifiques et très affectés par les quatre scenarios. Les meilleures mesures doivent être prises avec ces résultats pour pouvoir optimiser les services écosystémiques au niveau du bassin versant de l'Ourika. Cette étude sera utile pour les créateurs de politiques et les parties prenantes pour une bonne planification et gestion des services écosystémiques afin d'assurer le bien être de la population dans le bassin versant de l'Ourika.

**Mots clés :** services écosystémiques, scenarios, InVEST, générateur de scenarios, bassin versant de l'Ourika.

#### Introduction

Les scénarios sont des récits qui décrivent les futures possibles (McKenzie, Rosenthal et al. 2012). Ils fournissent un aperçu de l'avenir et contribuent à façonner l'imagination sur les événements futurs incertains. Les meilleurs scénarios sont basés sur des récits plausibles, compatibles et cohérents en interne qui sont traduits puis cartographiés (Hulse et Gregory, 2001). Pour raconter l'histoire, les scénarios comprennent des descriptions qualitatives des changements (c'est-à-dire un récit) et des représentations quantitatives (c'est-à-dire des nombres). Les scénarios sont nécessaires pour mettre en évidence les implications des trajectoires alternatives de développement futur sur la fourniture de services écosystémiques.

La préservation de la fourniture des services écosystémiques a pris de plus en plus d'attention ces dernières années. L'analyse des scénarios est couramment utilisée pour évaluer l'impact futur des changements de l'occupation du sol sur les services écosystémiques afin d'éclairer les décisions des parties prenantes quant à l'impact des politiques sur la fourniture optimale des services écosystémiques. (Bennett et al., 2009; Geneletti, 2013).

Selon l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire, les deux tiers de tous les services écosystémiques ont diminué au cours des 50 dernières années. Ce déclin risque d'avoir des impacts négatifs sur le bien-être humain. Le bassin versant de l'Ourika présente des occupations de sol assurant la fourniture de services écosystémiques; certains facteurs garantissent que ces occupations continuent à fournir les mêmes services. Le changement d'occupation du sol influence les propriétés, les processus et les composants de l'écosystème. Il a été identifié comme un facteur important de changement du niveau de fourniture des services écosystémiques (de Groot et al., 2010). Nombreuses études ont montré que le changement de l'occupation du sol peut réduire le niveau des services fournis par les écosystèmes, tels que le stockage du carbone (Tao et al., 2015), le rendement de l'eau (Jia et al., 2014, Lu et Zhuang, 2010) et la conservation des sols (Bai et al., 2012).

Les scenarios donnent l'occasion d'analyser toutes les possibilités qui peuvent affecter d'une manière positive ou négative la fourniture des services écosystémiques dans le futur. Au niveau de l'Ourika, caractérisé par un risque élevé des phénomènes catastrophiques et par l'acuité de la pression anthropique, la fourniture future des services écosystémiques ne vont pas rester à son niveau actuel. Les facteurs existants actuellement au niveau du bassin versant ne sont pas tous favorables au maintien de beaucoup des services écosystémiques. Les

meilleures décisions doivent être prises dès maintenant pour pouvoir maximiser les services écosystémiques au niveau du bassin.

Plusieurs modèles ont été utilisés pour étudier la relation entre le changement dans les écosystèmes et les services écosystémiques dans différents scénarios, y compris InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) (Tallis and Polasky, 2009; Vigerstol and Aukema, 2011). Goldstein et al., 2012 a utilisé InVEST avec Kamehameha Schools, un grand propriétaire du terrain à Hawaï, pour évaluer comment maximiser la fourniture et les revenus des services écosystémiques. Polasky et al. (2010) ont utilisé InVEST pour évaluer la fourniture et la valeur des services écosystémiques et des habitats dans différents scénarios d'occupation du sol à Minnesota. En résumé, InVEST a montré qu'il peut évaluer de manière fiable les services écosystémiques multiples offrant des informations utiles aux décideurs et aux parties prenantes pour assurer les compromis entre fourniture de services écosystémiques et les autres objectifs (Logsdon and Chaubey, 2013; Polasky et al., 2010).

Ainsi, cette étude est une contribution à la meilleure gestion des services écosystémiques par l'application de l'InVEST qui constituera d'une part, la génération des scenarios dans une période de quatorze ans (2016 – 2030) pour savoir comment les services écosystémiques seront dans le futur, et d'autre part, l'évaluation de ces scenarios à travers trois services écosystémiques, afin de prendre la meilleure décision pour la fourniture cohérente et continuelle des services écosystémiques aujourd'hui et à l'avenir dans le bassin versant de l'Ourika

# PARTIE I : Zone d'étude et méthodologie du travail

#### I Zone d'étude

#### 1 Situation géographique

Le bassin versant de l' Ourika se situe dans le Haut Atlas central, appelé Haut Atlas de Marrakech, à 35 km au Sud-sud-est de cette ville entre les parallèles 31°03' Nord et 31°21' Nord et les longitudes 7°36' Ouest et 7°45' Ouest.

Faisant partie du bassin versant de Tensift, il est limité au Nord par la plaine de Haouz, au Sud par le haut bassin de l'Oued Souss et le haut bassin de l'Oued Drâa, à l'Est par le bassin de l'Oued Zat et à l'Ouest par le bassin de l'Ouest Rhéraya.

# Situation géographique du bassin versant de l'Ourika Légende Limite du bassin versant de l'Ourika Limite du bassin versant du Tensift

Figure 11. Situation géographique du bassin versant de l'Ourika

En projection plane, il occupe une surface estimée à 570 km² (Ouhammou, 1986). Les altitudes vont de 900 m à l'exutoire à 4001 m au sommet (Jbel – Iferouane).

Le bassin de l'Ourika est un domaine très montagneux, présentant des altitudes importantes, s'élevant régulièrement du Nord au Sud et des zones fortement encaissées entre de hauts massifs. Il est caractérisé par trois zones : les zones du piémont avec une altitude, la vallée de

l'Oued d'Ourika avec ses affluents, et les zones de hautes montagnes et les plateaux d'altitude

#### 2 Situation administrative

Le bassin versant relève du territoire de trois provinces (DREF-HA, 2000): 90 % de sa superficie fait partie de la province de Haouz et 10 % fait partir des provinces d'Ouarzazate et de Taroudant.

Selon le découpage administratif de 1994, le bassin versant est occupé par les communes suivantes :

- Iguerferouane, Ourika, Tighdiouine, Setti Fadma, Oukaimden (province de Haouz)
- IgheremN'Ougdal, Tidili (province de Ouarzazate)
- Toubkal (province de Taroudant)

#### 3 Situation forestière

Le bassin versant de l'Ourika relève de la compétence de la DREFLCD du Haut Atlas, service provincial de Marrakech, et appartient à 5 triages : Aghbalou, Oukaimden, Tiguenin-N-Oumzil et Tnine, SettiFadma et Agaïouar.

# 4 Géologie et pédologie

#### 4.1 Structure géologiques du bassin

Le bassin versant de l'Ourika se situe précisément sur le flanc Nord de l'Atlas de Marrakech. Il présente de l'Est-nord-est vers l'Ouest-sud-ouest quatre unités structurales (DREF-HA, 2002):

- Zone du Haouz : c'est une zone d'articulation entre la plaine et la zone subatlasique. Elle est constituée d'un substratum primaire recouvert par une épaisse série détritique tertiaire et quaternaire.
- Zone des piémonts: elle est formée d'une zone subatlantique constituée par un ensemble de collines, de cuvettes et de plateaux plus ou moins élevé. Cette zone est caractérisée par la dominance des formations à base de conglomérats datant du Lias jusqu'au Crétacé, des flysch viséens, du calcaire et du grès rouge friables (1ère unité permotriasique)

- Zone des hauts plateaux : c'est la deuxième unité permotriasique constituée généralement d'une épaisse formation de grès, de conglomérats et de marnes rouges.
   Cependant les formations de granite rose à biotite restent dominantes dans cette zone.
- Zone axiale: elle correspond à la zone la plus élevée du Haut Atlas Marrakech, formée essentiellement de terrains précambriens à base de granite rose et de l'andésite de Toubkal.

#### 4.2 Caractéristiques pédologiques

Sous l'influence des facteurs climatiques et de la végétation, la nature lithologique des substrats donne naissance à différents types de sols. On distingue dans la zone, quatre types de roches mères (DREF-HA, 2002) :

- Sols sur roches éruptives : les roches magmatiques sont altérées et aboutissent à des sols plus ou moins profonds et riches
- Sols sur flysch schisto-gréseux : l'évolution de ces types de sol reste liée aux conditions écologiques et leur altération donne naissance à un sol zonal, on distingue :

Sur les versants secs, les substrats affleurent et on y trouve des sols minéraux bruts (lithosols)

- Sols sur les formations permotriasiques de grès rouges et de marnes : ce type de sols s'étend sur une superficie assez importante au niveau du bassin. Ces formations sont constituées par des argilites très tendres, très exploitées à des fins agricoles et soumises facilement au ruissellement (ravinement). Sous des conditions chaudes, l'altération de ces grès aboutit à la formation d'un manteau argilo-sableux donnant naissance à des sols rouges fersialitiques.
- Sols sur calcaire: sous végétation, ces substrats donnent naissance à des rendzines vraies ou brunifiées jusqu'à la formation d'un sol brun calcaire. En exposition Sud et sur de fortes pentes, ces calcaires assèchent le milieu. Sur les colluvions profondes marno-calcaires, se forment des sols fersialitiques.

#### III Méthodologie

Afin de développer les scénarios pour voir toutes les possibilités des conséquences des actions anthropiques et naturelles sur les services écosystémiques du bassin versant dans le futur, nous avons utilisé le modèle générateur de scenario dans l'InVEST. Nous avons examiné les directives et les instructions d'utilisation publiées par Natural Capital Project pour le générateur de scénarios ainsi que la documentation extérieure sur la génération de scenario.

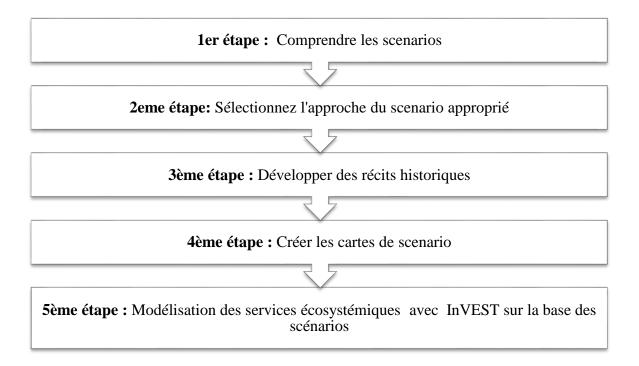


Figure 12. Étapes lors du développement de scénarios pour INVEST

#### 1 Comprendre les scenarios

En générale, tous les types de scenario décrivent un futur possible, reflètent des développements ou des choix futurs importants et incertains, sont plausibles, cohérent en interne et pertinents pour les questions abordées, et finalement ont un composant spatialement explicite (McKenzie, Rosenthal et al. 2012).

# 1.1 Types de scenarios

L'expérience des utilisateurs d'InVEST et d'autres personnes démontre qu'il n'y a pas de recette unique à suivre lors du développement de scénarios (Castella, Ngoc Trung, et Boissau 2005; Borjeson et al. 2006; Van Notten et al. 2003). Il y a quatre types de scenarios

disponibles en utilisant l'InVEST (Tableau 1). Nous avons sélectionné le scenario de la projection future parce que c'est ce qui nous convient pour ce travail et pour le projet.

Tableau 6. Catégories de types de scénario. Source : McKenzie E., A. Rosenthal et al. 2012

Scenario	Objectifs de l'utilisateur	Question posée	Récits historiques
			du scenario
Intervention	Choisissez parmi les	Quelles sont les	Conception de
	interventions alternatives.	meilleures façons	politiques, plans et
	Identifier des interventions	d'atteindre l'avenir	projets réels.
	efficaces et équitables qui	que nous voulons?	
	répondent aux objectifs		
	politiques.		
Exploratoire	Anticiper les circonstances	Où le futur pourrait	Futures possibles
	futures incertaines.	nous prendre?	mais inattendues.
	Testez la façon dont les	Que pouvons-nous	
	politiques font face à un	faire pour préparer?	
	changement inattendu.		
Vision	Atteindre une vision	Quel avenir	Concepts des
	partagée.	désirons-nous?	parties prenantes
	Déterminer comment		des futurs
	atteindre un avenir désiré.		souhaitables ou
	Résoudre les conflits des		indésirables.
	parties prenantes.		
Projection	Évaluer les conséquences	Quel avenir nous	Les découvertes du
future	des politiques actuelles.	attendons-nous?	futur attendu sans
	Comparez les scénarios par		nouvelles
	rapport à la ligne de base		interventions.
	future.		

Identifier les risques ou les	
opportunités probables.	

# 1.2 Projection Future : Quel avenir attendez-vous?

Les projections sont des prévisions de ce qui est probable ou devrait se produire dans l'avenir. Les projections représentent une situation sans les interventions ou les modifications envisagées dans d'autres scénarios. Ils peuvent être basés sur les tendances historiques ou les attentes des parties prenantes. Si une approche très simple est prise, il est possible d'établir une ligne de base qui représente la situation actuelle, en supposant qu'il n'y aura pas de changement futur. Les projections sont parfois appelées scénarios de statu quo, business as usual, référence, benchmark ou non-intervention. (Nelson et al., 2010) ont développé deux versions de scénarios de business as usual pour l'année 2015 qui reflètent les changements attendus dans les terres urbaines et les terres cultivées. Les attentes en matière de changement de l'occupation du sol étaient basées sur des projections à partir de modèles bien calibrés.

# 1.3 Qu'est-ce qui fait un scénario efficace?

Les critères qui rendent les scénarios efficaces varient en fonction du contexte, c'est la raison pour laquelle lors de l'élaboration de scénarios, il est utile d'examiner les 10 questions suivantes (McKenzie, Rosenthal et al. 2012) :

- ➤ **Pertinent :** Est-ce que les scénarios s'alignent sur les problèmes et les questions intéressant les parties prenantes et les décideurs?
- ➤ Participatif : Les parties prenantes sont-elles impliquées de manière significative dans le processus de développement de scénarios et d'évaluation de leurs impacts sur les services écosystémiques?
- ➤ **Légitime :** Le processus de développement des scénarios comprend-il diverses opinions et croyances des parties prenantes?
- ➤ Plausible : Les scénarios racontent-ils des histoires cohérentes qui pourraient se produire?
- ➤ Compréhensible : Les scénarios sont-ils accessibles au public cible?
- ➤ **Distinct :** Les scénarios sont-ils suffisamment différents pour montrer les effets contrastés des services écosystémiques?
- > Scientifiquement crédible : Les scénarios et les cartes sont-ils scientifiquement robustes et crédibles?

- **Complet :** Les scénarios considèrent-ils tous les facteurs pertinents?
- ➤ **Itératif**: Les scénarios sont-ils raffinés et révisés en fonction de la contribution des parties prenantes et des tendances émergentes?
- > Surprenant : Les scénarios contestent-ils les hypothèses et élargissent les perspectives concernant les développements inattendus?

# 2 Sélectionnez l'approche du scénario approprié

#### 2.1 Quel est l'objectif de l'application d'InVEST?

Les utilisateurs d'InVEST ont constaté que la considération la plus importante pour les scénarios est l'objet de l'analyse (Henrichs et al., 2010). Nous avons essayé en développant les scenarios avec InVEST d'anticiper et d'explorer des circonstances futures incertaines et d'identifier les risques ou les opportunités probables des politiques actuelles au niveau du bassin versant de l'Ourika.

#### 2.2 Les exigences des scénarios à utiliser dans InVEST

Nous avons focalisé sur les scenarios qui vont nous aider à prendre les meilleures décisions dans le futur. Les modèles d'InVEST que nous avons utilisé pour faire l'évaluation sont le service d'approvisionnement de l'eau, le service de régulation du climat et le service de régulation de l'érosion et par la suite nous avons fait l'évaluation biophysique et économique pour les scenarios sous forme des cartes et sous les autres formes d'output. Les parties prenantes ont été impliquées dans le développement des scenarios, un scenario spécifique à la population a été développé sur la base des informations obtenues lors des ateliers.

#### 2.3 Le nombre des scénarios

Le choix des scénarios peut affecter les futurs potentiels et les options stratégiques considérées, discutées et réalisées (McKenzie, Rosenthal et al. 2012). Dans ce travail, nous avons développé quatre scenarios à savoir le scenario tendanciel, le scenario catastrophique, le scenario idéal et le scenario concerté. Nous avons choisi quatre parce qu'un scenario ne permet pas de comparer les alternatives et leurs compromis, même si cela permet d'identifier les changements de la situation actuelle vers la situation future. Développer deux scenarios est suffisant, seulement l'analyse limitée à deux scénarios peut ne pas représenter adéquatement la complexité et les nuances nécessaires. L'expérience a montré que deux scénarios

représentent souvent des extrêmes polarisés (par exemple, la conservation par rapport au développement) et ne tiennent pas compte de l'action modérée ou des compromis équilibrés (McKenzie, Rosenthal et al. 2012). Le développement de trois scénarios ou plus permet aux utilisateurs d'InVEST d'évaluer de multiples options et des compromis associés, stimulant un débat plus large sur une gamme de futures et de réponses politiques. Cependant, avec trois scénarios, le scénario moyen peut automatiquement être interprété par erreur comme "très probable" ou "préféré". Avec un nombre pair de scénarios, les parties prenantes sont plus susceptibles d'examiner la gamme complète des options. Avec plus de scénarios, il devient de plus en plus difficile de comparer les différences et de construire des scénarios suffisamment contrastés. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi quatre scenarios, le nombre adéquat pour comparer les scenarios.

## 3 Développer des récits historiques

Pour le développement les récits historiques pour les scenarios, nous nous sommes basés sur les facteurs de changement les plus communs (Tableau 7).

**Tableau 7.** Pilotes communs de changement de scénarios

Catégorie	Facteurs de changement	
Sociale et démographique	Croissance ou déclin de la population	
	Migration	
	Valeurs culturelles	
	Conscience	
	La pauvreté	
	Patrons diététiques	
	Éducation	
	valeurs religieuses	
Economique	Croissance économique	
	Modèles commerciaux et barrières	
	Prix des produits de base	
	Modes de demande et de consommation	
	Revenu et répartition des revenus	
	Développement du marché	
Environnementale	Changement climatique	

	Pollution de l'air et de l'eau Introduction d'espèces non indigènes envahissantes
Politique	Politique macroéconomique Autre politique, par exemple, subventions, incitations, taxes Plans d'utilisation des terres, zonage et gestion Gouvernance et corruption Droits fonciers et régime foncier

### 3.1 Méthodes communes pour les projections futures

Les projections sont généralement des prévisions de ce qui est probable ou devrait se produire à l'avenir. Les projections peuvent être développées en utilisant une gamme de méthodes quantitatives et participatives. Des approches participatives simples peuvent être prises pour élaborer des projections futures, où les parties prenantes réfléchissent à ce qu'elles attendent du futur si les tendances actuelles se poursuivent (Nemarundwe, De Jong et Cronkleton, 2003). Si une approche quantitative est retenue, une gamme de modèles d'évaluation intégrée peut être utilisée, en s'appuyant sur une analyse statistique ou une simulation des tendances passées pour prédire l'avenir. Nous avons appliqué les deux approches en se basant sur les tendances passées et sur l'approche participative. Les activités communes que nous avons suivies pour l'élaboration des projections comprennent l'évaluation des aspects clés de la situation actuelle, la collecte des données sur les tendances historiques et l'utilisation des méthodes participatives et quantitatives pour prédire les changements futurs attendus. Nous avons alors utilisé les prévisions basées sur une analyse statistique des tendances historiques, conduit des ateliers et des enquêtes pour identifier les tendances attendues et analysées, au cours de la phase bureau, les documents de politique ou de planification existants pour identifier les développements prévus.

#### 4 Créer les cartes de scénario

Nous avons alors utilisé l'outil générateur de scenario pour créer toutes les cartes pour les quatre scenarios de ce travail. Les principales composantes des inputs pour cet outil sont i) la

probabilité de transition, ii) les facteurs physiques et environnementaux qui influent le changement et iii) la quantité de changement anticipé dans un scénario donné. L'outil fonctionne à partir d'une seule carte de l'occupation du sol, ce qui le rend utile dans les situations pauvres en données (Sharp et al., 2016).

Nous avons utilisé alors trois types de données d'inputs pour cet outil à savoir l'occupation du sol de base (2016, dans notre contexte), le tableau de transition pour l'occupation du sol qui comprend le pourcentage de changement, la priorité, et la proximité, et la spécification de transition. Pour chaque scenario, nous avons utilisé la carte d'occupation du sol de base de 2016, et par la suite nous avons créé un tableau de transition en considérant le changement du taux de couverture avec la priorité de changement pour chaque type d'occupation du sol.

#### 4.1 Scenario Tendanciel

Les nouvelles orientations pour l'aménagement de l'espace naturel au sein du bassin versant d'Ourika à pour palier les risques d'inondations catastrophiques au cours des trente dernières années ont développé une dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol au cours de la période allant de 2000 à 2014. C'est ces mêmes tendances que nous nous sommes basés pour construire un scenario d'ici jusqu'à l'année 2030. La reconstitution des écosystèmes forestiers qui a été le plus grand avantage au niveau du bassin pendant la période de 2000 à 2014 grâce aux aménagements de lutte antiérosive, la diminution de la pression pastorale et les sources de revenu des activités touristiques pour les habitants ont permis d'alléger la pression sur les ressources forestières. Ainsi, une augmentation de 21.28 % de la couverture forestière du bassin versant, au même temps un recul de 25.14 % des sols dénudés ont été constatés par rapport à leur superficie en 2000 (Rihane, 2015). En suivant le même rythme de changement et en adoptant les mêmes taux de couverture des unités d'occupation du sol du bassin versant entre 2000 et 2014, nous avons alors créé la carte de ce scenario. Les constructions vont aussi augmenter à cause de la croissance démographique et l'augmentation des activés touristiques. Il y avait eu l'évolution des bâtiments longent la voie principale ou proche de l'oued au niveau du bassin (Faress., 2017). Les lits de l'oued n'ont pas été touchés dans ce scenario et maintiennent donc le même taux de couverture. Concernant la couverture forestière, on remarque que les forêts claires vont devenir forêts moyennement denses alors que les forêts moyennement denses deviendront des forêts denses. Le tableau de transition pour l'occupation du sol de chaque type de scenario figure en annexe 1.

#### 4.2 Scenario Catastrophique

Nous avons considéré les évènements hydrologiques extrêmes et le changement climatique comme les grands facteurs pour la création de ce scenario étant donné que le bassin versant de l'Ourika est confronté gravement à ces facteurs. La forte irrégularité des régimes hydrologiques, la prédominance du relief montagneux et la nature des terrains de couverture souvent imperméables font que le ruissellement est important et que les cours d'eau génèrent des crues importantes et violentes (Bouarais, 2015). Ces dernières engendrent parfois des inondations qui peuvent causer des dommages importants pour les infrastructures publiques, les biens de la population, l'agriculture et des vies humaines aussi. La superficie susceptible d'être inondée est essentiellement la zone située au niveau de la vallée (Rihane., 2015). Ces zones correspondent aux constructions et aux terrains agricoles au fond de la vallée, notamment les villages d'Aghbalou, d'Oulmes et de Setti Fadma. Avec ces études, nous avons alors attribué un changement négatif aux constructions, les cultures irriguées et les cultures en bour tandis que les sols dénudés et les lits de l'oued ont subi un changement positif au niveau de leur superficie. Le changement climatique aura surtout des conséquences sur les forêts par les effets de température, de précipitation, et du changement de la concentration du dioxyde de carbone (CO2) et par les effets de l'incendie, les insectes, les pathogènes et les évènements extrêmes. Le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique, avec une forte confiance, une augmentation des températures dans toute l'Europe et la diminution des précipitations dans le sud de l'Europe et la région méditerranéenne, avec une réduction probable de la disponibilité en eau des rivières et des eaux souterraines, ainsi que l'augmentation des phénomènes extrêmes comme les sécheresses, les vagues de chaleur, les fortes pluies, les inondations et les incendies (Kovats et Valentini, 2014).Donc il y aura un changement négatif de la couverture forestière dans le bassin versant. Le tableau de transition des occupations du sol de chaque type de scenario figure en annexe 2.

#### 4.3 Scenario Idéal

Le couvert forestier du bassin versant de l'Ourika est soumis à une dégradation due aux conditions naturelles peu favorables et à la pression anthropique (Meliho et al., 2016). Les écosystèmes forestiers du bassin versant de l'Ourika sont soumis à des effets climatiques et géo-topographiques assez sévères (Rhanem, 2015; Sirtou, 1995). La forêt offre des services importants au niveau du bassin versant et sa dégradation affecte sa capacité les offrir et en

réduisant la qualité et la quantité (Hammi, 2003). La restauration de ces écosystèmes forestiers est un facteur principal dans la génération de ce scenario. Certaines zones, principalement sols dénudés qui vont être restaurées par la forêt. Les aménagements sylvopastoraux seront installés au niveau de certains endroits dégradés. Le couvert forestier augmenterait dans ce scenario à cause des travaux de restauration et de reconstitution par le reboisement. Les cultures seront affectées positivement avec les aménagements sylvopastoraux mais d'une manière assez importante. Le scenario est considéré comme le plus avantageux et le meilleur pour l'augmentation des services écosystémiques mais sans la consultation de la population et les parties prenantes. C'est une proposition basée sur les études et la recherche scientifique qui focalise sur la manière de réduire la dégradation au niveau du bassin et de le restaurer pour pouvoir protéger l'écosystème et l'environnement en général. Certaines espèces forestières seront choisies en raison de leur capacité d'adaptabilité et de résistance aux conditions difficiles pour le reboisement. Le tableau de transition pour l'occupation du sol de chaque type de scenario figure à l'annexe 3.

#### 4.4 Scenario concerté

Le développement de scénario est le meilleur lorsqu'il est adossé à la participation de la communauté (McKenzie, Rosenthal et al. 2012). Les utilisateurs d'InVEST s'appuient sur les parties prenantes pour fournir un aperçu et des commentaires sur des scénarios réalistes (Berg et al., 2015). L'approche participative est très importante car ce sont les parties prenantes qui sont les premières propriétaires et/ou utilisateurs des ressources naturelles. Cela favorise le sentiment d'appropriation des résultats et des idées. Pour obtenir un scenario réaliste, nous avons consulté la population dans les ateliers et les entretiens concernant nos propositions sur l'aménagement des ressources naturelles au niveau du bassin versant. Nous avons alors focalisé sur le scenario idéal qui propose une restauration des espaces dégradés par le reboisement de certaines espèces et les aménagements sylvo-pastoraux. La population préférerait une espèce par rapport à l'autre pour le reboisement, elle veut pratiquer la culture dans un endroit spécifique au lieu du reboisement par les espèces forestières. En général, il y aura des changements dans le scenario idéal mais de manière positive et ce sont les forêts qui ont bénéficié considérablement de ce scenario. La population souhaitera aussi construire et entreprendre des cultures irriguées dans certaines parties du bassin. Ce scenario est le plus préféré parce qu'il s'est construit autour de l'adhésion et la participation des parties prenantes qui se sont mis d'accord sur ses propositions. Le tableau de transition pour l'occupation du sol de ce scenario figure à l'annexe 4.

# 5 Modélisation des services écosystémiques avec InVEST sur la base des scénarios

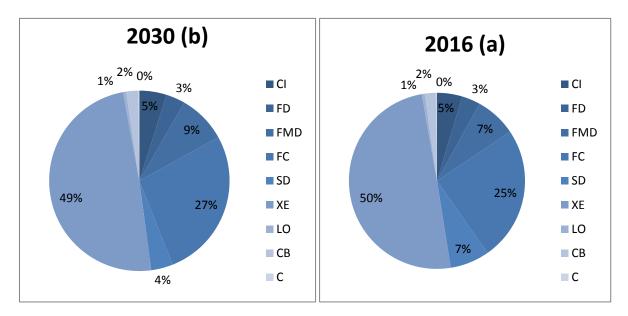
Les trois services écosystémiques sélectionnés ont été modélisés dans les quatre scénarios d'occupation du sol différents. La carte d'occupation du sol de 2016 a été servie comme base de comparaison. La modélisation de la séquestration du carbone, de la rétention des sols et du rendement en eau a été effectuée à travers l'InVEST (Tallis et Polasky, 2009). Les mêmes données d'inputs que la première partie ont été utilisées sauf pour les cartes d'occupation du sol qui correspondaient à chaque scenario et l'évaluation monétaire du carbone séquestré dans le modèle de stockage et séquestration du carbone. Les données économiques du modèle du carbone exigent la valeur d'une tonne de carbone séquestrée (V), le taux d'actualisation du marché (r) et le taux annuel de variation du prix du carbone (c). La valeur sociale recommandée par l'InVEST a été choisie comme la valeur d'une tonne de carbone. La Banque mondiale, 2014 a attribué une valeur sociale au carbone de 253 dirhams/tCO2 (30 \$EU) pour l'année 2015, en augmentant en termes réels jusqu'à 674 dirhams/tCO2 (80 \$EU) pour l'année 2050 (Croitoru et Sarraf, 2017). Etant donné que le carbone est exprimé en tonnes de carbone dans ce modèle, la valeur sociale a été convertie en multipliant 3,67 (44/12) par les 253 tCO2. Le résultat était 928,51 dirhams/tonnes de carbone. Le taux d'actualisation qui reflète la préférence de la société pour des avantages immédiats sur les avantages futurs a été fixé à 6 % (Banque mondiale, 2016). Le taux annuel de variation du prix du carbone a été fixé à 0 %. De ce fait, la valeur sociale du carbone séquestré reste la même peu importe la période de l'année, le futur ou le présent.

# PARTIE II: Résultats et Discussion

#### I Scenario Tendanciel

**Tableau 8 :** Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario tendanciel 2030

Occupation du sol	2016		2030	
	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)
Cultures irriguées	2669,5	4,64	2 808,09	4,88
<b>Forets Denses</b>	1960,21	3,4	1 962,90	3,41
<b>Forets Moyennement</b>	4350,45	7,55	5 002,65	8,69
Denses				
<b>Forets Claires</b>	14207,7	24,67	15 551,19	27,00
Sols dénudés	4165,74	7,23	2 256,66	3,92
Xérophytes Epineuses	28647,4	49,74	28 340,46	49,21
Lits de l'oued	318,273	0,55	319,14	0,55
Cultures en Bour	1153,33	2,01	1 212,39	2,11
Constructions	120,499	0,21	135,90	0,24
Total	57 589,38	100,00	57 589,38	100,00



CI: Cultures irriguée; FD: Forêts denses; FMD: Forêts moyennement denses; FC: Forêts claires; SD: Sols dénudés; XE: Xérophytes Epineuses; LO: Lits de l'oued; CB: Cultures en bourre; C: Constructions

**Figure 13.** Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour (a) la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et (b) le scenario tendanciel en 2030

remarquons les changements dans le taux de couverture des différents types Nous d'occupation du sol comme suit : Forêts denses : +0,01 %, Forêts moyennement denses : +1,14%, Forêts claires: +2,33 %, Sols nus: -3,31 %, Cultures: +0,24 %, Xérophytes Epineuses: -0.53 % et +0.03 % pour les constructions au niveau du bassin versant. Seuls les sols dénudés et les xérophytes épineuses ont régressé mais les restes ont subi un changement positif. La superficie forestière a bénéficié largement de cette tendance. Elle a augmenté avec une superficie de 1996,14 ha, soit un gain de couverture de 3,47 %. Ce sont des forêts claires qui ont gagné plus d'espace, suivi des forêts moyennement denses et les forêts denses. Les cultures ont aussi ont gagné de l'espace avec une superficie totale de 197,65 ha et un gain de la couverture de 0,34 % mais ce sont les cultures irriguées qui ont gagné plus d'espace que les cultures en bour. Les constructions ont augmenté de 15,40 ha soit un gain de couverture de 0.03 %. Les sols dénudés ont diminué largement par 1909,08 ha, soit une diminution de 3,31 %. Les xérophytes épineuses ont perdu 1343,49 ha, soit une perte de 0,53 % de couverture. En générale, le scenario tendanciel favorise largement le couvert végétal au dépens de zones asylvatiques. Par rapport à l'occupation du sol en 2016, ce scenario améliora considérablement les ressources naturelles. La production des services écosystémiques sera aussi améliorée en considérant le fait que ces services proviennent de l'écosystème.

Carte de l'occupation du sol pour le scenario tendanciel (2030)

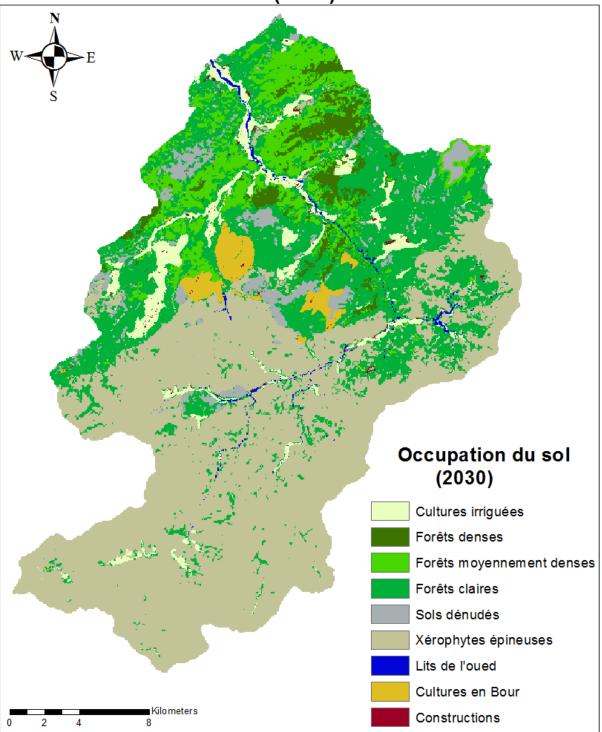


Figure 14. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario tendanciel

# 1 Carbone b a Carte du stockage futur du carbone (2030) Carte du stockage actuel du carbone (2016) Stockage futur Stockage actuel du carbone du carbone 0 - 0.10 0 - 0.10 0.10 - 0.24 0.10 - 0.24 0.24 - 0.68 0.24 - 0.68 0.68 - 1.11 0.68 - 1.11 d c Carte de la valeur du carbone séquestré Carte de la séquestration du carbone Valeur du carbone Carbone séquestré séquestré Dh/ha/an T/ha/an -66.16 -0.10 - -0.00 -66.16 - -0.69 -0.00 - 0.16 -0.69 - 101.77 0.16 - 1.01 101.77-659.66

**Figure 15.** Résultats du modèle du carbone pour le scenario tendanciel : (a) et (b) sont les cartes du stockage du carbone en 2030 et en 2016, (c) est la carte de la séquestration de carbone et (d) est la valeur du carbone séquestré.

La carte du stockage futur du carbone (Figure 15a) montre une différence du stockage par rapport à la carte du stockage actuel du carbone (Figure 15b) à cause des changements de la couverture forestière. La moyenne future du stockage du carbone en 2030 est 0,265 T/ha avec un écart type de 0,28 alors que celle du stockage actuel du carbone en 2016 est 0,252 T/ha avec un écart type de 0,28, soit une différence de 0,027 T/ha pendant les quatorze ans. Etant donné que la superficie de la couverture forestière y compris les forêts denses, les forêts moyennement denses et les forêts claires augmenteront en 2030, cela affectera d'une manière positive sur le stockage du carbone dans le futur. Les cultures irriguées et en Bour subiront une augmentation en 2030, ils contribueront à un changement positif du stockage futur du carbone. La réduction de la couverture des sols dénudés et des xérophytes épineuses ayant le moindre impact sur le stockage actuel du carbone aidera à accroitre le stockage futur du carbone. Nous remarquons que l'occupation du sol ayant actuellement le plus grand stock de carbone (d'une moyenne de 0,895 T/ha) augmenterait en superficie en 2030 ce qui augmenterait la capacité du stockage du carbone du BV (Figure 15a & 15b). Les sols dénudés, dont le stockage moyen du carbone est de 0,05 T/ha vont diminuer significativement en 2030. Les xérophytes épineuses ayant un stockage moyen de carbone de 0,17 T/ha en 2016 vont vraisemblablement diminuer en 2030 particulièrement au niveau de l'espace jouxtant les zones forestières. Seules les cultures en bour ayant un stockage moyen du carbone de 0,46 T/ha vont augmenter légèrement en 2030 (Figure 15a & 15b). Pour le scenario tendanciel, le stockage du carbone augmentera ce qui se traduit par le changement positif de la superficie de la forêt et des cultures. La carte de séquestration du carbone (Figure 15c) montre le stockage additionnel du carbone dans le BV durant cette période de temps, elle correspond à la différence du carbone stocké entre 2016 et 2030 dans le bassin versant d'Ourika. La moyenne du carbone séquestré est 0,013 T/ha/an avec un écart type de 0,08. Les cartes de séquestration (Figure 15c et 15d) présentent des valeurs positives et les valeurs négatives. Les valeurs positives indiquent le carbone séquestré tandis que les valeurs négatives indiquent le carbone perdu. La plupart de la superficie totale du bassin versant a connu une séquestration modérée du carbone avec une moyenne de 0,08 T/ha/an ce qui montre qu'il y avait un changement positif considérable dans les occupations du sol entre les années 2016 et 2030. Les occupations du sol du bassin versant qui ont connu une séquestration du carbone sont les parties qui ont gagné d'espace pendant les quatorze ans. Ce sont les forêts moyennement denses, les forêts claires et les cultures irriguées. Les cultures irriguées et la moitié des forêts moyennement denses ont séquestré le plus grand carbone avec une valeur moyenne de 0,59 T/ha/an alors que les forêts claires et une autre moitié des forêts moyennement denses ont

séquestré aussi un grand carbone à une moyenne de 0,08 T/ha/an(Figure 15c). Ceci est dû au fait que les forêts et les cultures irriguées possédant la plus grande capacité de stockage du carbone gagneront une superficie significative au cours de la période 2016 - 2030. Ceci est aussi valable pour l'évaluation économique du carbone séquestré. La moyenne en dirhams du carbone séquestré dans le bassin versant s'élève à 8,53 Dh/ha/an avec un écart type de 54,71. Les parties perdront du carbone pendant les quatorze années auront une moyenne de 33,4 Dh/ha/an alors que les parties qui séquestreront le plus faible carbone possèderont une moyenne en dirhams à 50,5 Dh/ha/an. Au même temps, les parties du bassin versant qui vont séquestrer la plus grande part de carbone, la somme d'argent qui y sera associée atteindra une moyenne de 380,5 Dh/ha/an.

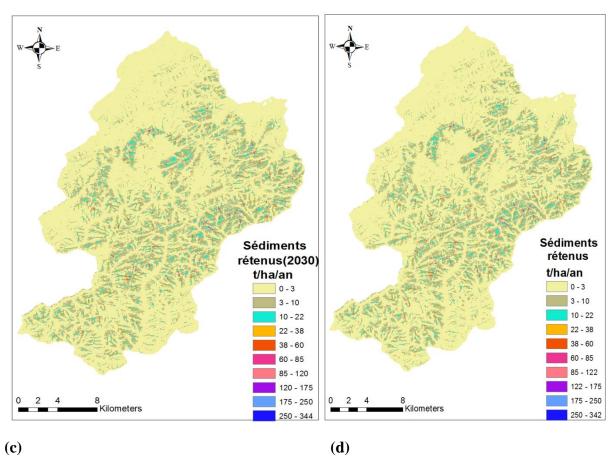
**Tableau 9.** Les résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario tendanciel dans l'année 2030.

Type d'évaluation	Valeur Quantitative	Unités
Stockage Total du carbone en 2016	1 793 787	Tonnes de Carbone
Stockage Total du carbone en 2030	1 886 638	Tonnes de Carbone
Séquestration Totale du carbone	92 851	Tonnes de Carbone
Valeur actuelle nette entre 2016 et 2030	60 673 609	Dirhams

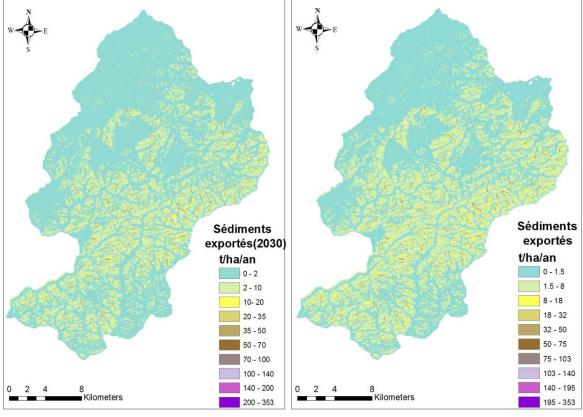
La différence entre le stockage total du carbone en 2030 et celui en 2016 dans le bassin versant est importante et très positive. La séquestration totale du carbone est de 92 851 tonnes. Elle montre que le bassin versant offre des écosystèmes qui peuvent stocker le carbone dans le futur avec une valeur actuelle nette de 60 673 609 dirhams pendant ces quatorze ans. L'augmentation de la couverture forestière et des cultures contribuera largement à expliquer cette séquestration. Si les changements appliqués dans ce scenario continuent pour longtemps, il y aura plus de séquestration du carbone dans le futur. La tendance est très positive pour le service de régulation du climat et cela montre la contribution du bassin versant au contrôle du climat. Le gain pour la séquestration est très grand et énorme au niveau du bassin versant.

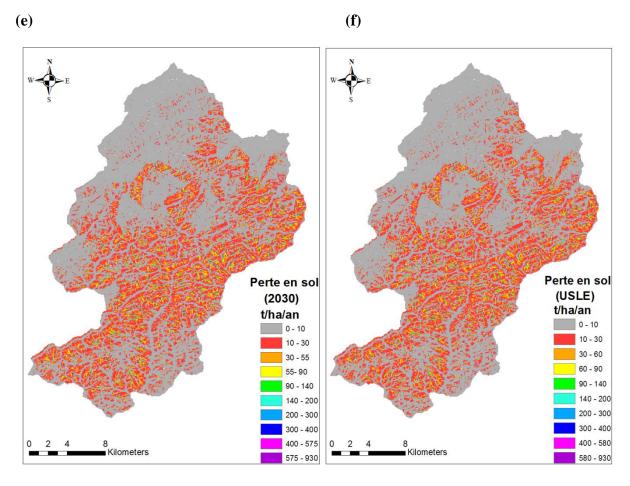
# 2 Rétention des sédiments







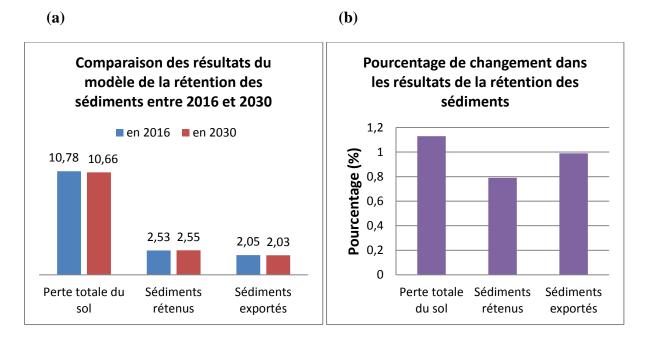




**Figure 16.** Comparaison entre les cartes de rétention des sédiments (a) pour le scenario tendanciel en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016, de l'exportation des sédiments (c) pour le scenario tendanciel en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016, et de la perte en sols (e) pour le scenario tendanciel en 2030 et (f) pour l'occupation du sol en 2016.

Les résultats du modèle de rétention des sédiments montrent qu'il y aura un changement en 2030 par rapport à 2016. L'érosion moyenne annuelle dans en 2016 est de 10,78 t/ha/an avec un écart type de 22,97 alors qu'en 2030, elle atteindra une moyenne de 10,66 t/ha/an avec un écart type de 22,84 (Figure 16e & 16f). La rétention moyenne annuelle des sédiments en 2016 a une moyenne de 2,53 t/ha/an avec un écart type de 7,43 tandis que celle de l'année 2030 a une moyenne de 2,55 t/ha/an avec un écart type de 7,47 (Figure 16a & 16b). L'exportation moyenne annuelle des sédiments en 2016 atteint une moyenne de 2,05 t/ha/an avec un écart type de 6,5 alors que celle de 2030 atteindra une moyenne de 2,03 t/ha/an avec un écart type de 6,47 (Figure 16c & 16d). La différence de l'érosion annuelle moyenne entre les deux années est de 0,12 t/ha/an au cours d'une période de quatorze ans. Cela montre que même si les pertes du sol ont diminué de 0,12 t/ha/an entre 2016 et 2030, la perte reste minime avec un pourcentage de 1,13 % (Figure 17a & 17b). L'augmentation du taux de couverture pour les

forêts explique cette augmentation. La différence de la rétention moyenne annuelle des sédiments entre 2016 et 2030 est de 0,02 t/ha/an ce qui montre que le bassin retiendra peu de sédiments. La capacité de rétention des sédiments du bassin versant augmentera de 0,79 % entre 2016 et 2030, soit un changement peu important durant les quatorze ans (Figure 17a & 17b). La rétention des sédiments représente le plus petit changement positif dans l'année 2030. La différence de l'exportation moyenne annuelle des sédiments entre les années 2016 et 2030 est 0,02 t/ha/an ce qui est la même moyenne que la rétention des sédiments du bassin versant. Entre les années 2016 et 2030, il y aura 0,99 % de sédiments qui vont être exportés ce qui est plus grand que celui de la rétention des sédiments (Figure 17a & 17b). Le bassin versant aura peu d'espace résistant à l'érosion et pouvant retenir des sédiments pendant l'année 2030 à cause de l'augmentation de la superficie forestière (Figure 16). La perte en sol et l'exportation des sédiments vont diminuer en 2030, seule la rétention des sédiments augmentera pendant les quatorze ans (Figure 16). Une différence de 218 638 tonnes pour la rétention des sédiments et l'exportation des sédiments entre les années illustre le changement positif au niveau du bassin versant (Tableau 17). La diminution de la perte en sol par 913 637 tonnes dans tout le bassin versant complèterait ce changement positif.



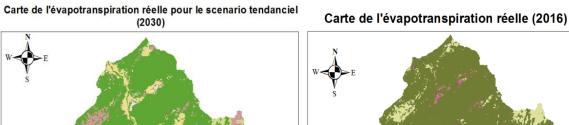
**Figure 17.** Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 (a) et leur pourcentage de changement par rapport au pour le scenario tendanciel (b).

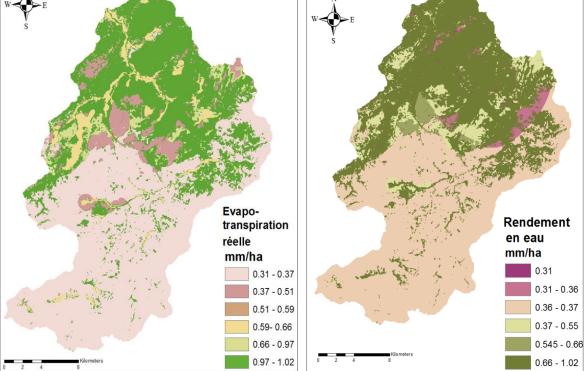
Tableau 10. Les résultats de calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario tendanciel dans le bassin versant de l'Ourika.

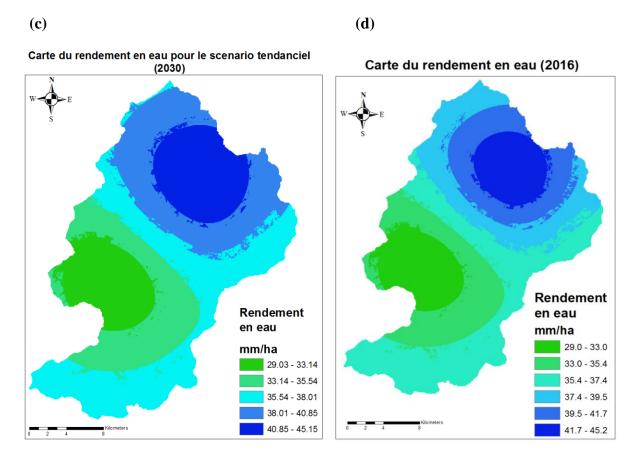
Année	Perte Totale du sol (Tonnes)	Rétention totale des sédiments (Tonnes)	Exportation Totale des sédiments (Tonnes)
2030	92 216 866	23 381 069	19 226 106
2016	93 130 503	23 162 431	19 444 744

#### 3 Rendement en eau

**(b)** (a)







**Figure 18.** Comparaison entre les cartes d'évapotranspiration réelle (a) pour le scenario tendanciel en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016 et du rendement en eau (c) pour le scenario tendanciel en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016.

La moyenne de l'évapotranspiration réelle pour le scenario tendanciel en 2030 (Figure 18a & Tableau 11) est de 0,67mm/ha alors que celle de l'occupation du sol en 2016 est de 0,65mm/ha, une différence de 0,2 mm/ha. Elle décrit l'importance réelle de l'évapotranspiration du cycle hydrologique, indiquant la quantité d'eau (précipitation) perdue annuellement par hectare par évapotranspiration au niveau du bassin versant. Ceci est dû à l'augmentation de la couverture forestière et des cultures. Le rendement en eau va diminuer par 0,2 mm/ha de l'année 2016 avec 37.03mm/ha à l'année 2030 avec 37,01 mm/ha. C'est la même différence que l'évaporation réelle mais dans le sens contraire. Les forêts et les cultures connaîtront la plus grande moyenne de l'évapotranspiration réelle de 0,84 mm/ha en 2016 alors qu'en 2030, seules les forêts présenteraient la plus grande moyenne de 1 mm/ha qui est plus grande que celle de l'année 2016; alors que la moyenne des cultures vont baisser à 0,52 mm/ha en 2030 avec les cultures en bour ayant la faible valeur moyenne. Les xérophytes épineuses auront en 2030 la plus faible moyenne d'évapotranspiration de 0,34 mm/ha alors

que cette moyenne était de 0,37 mm/ha en 2016 (Figure 18a & 18b). Le rendement en eau est défini comme la quantité de l'eau ruisselant dans le paysage. L'augmentation du couvert végétal pour le scenario tendanciel augmenterait l'infiltration et diminuerait le ruissellement ce qui serait traduit par la diminution du rendement en eau en 2030. La couverture forestière a connu le plus grand de rendement moyen en eau au cours des deux années, en 2030 elle serait de 41,58 mm/ha et de 41,3 mm/ha en 2016. Bien que le rendement en eau diminue en 2030, celui de la couverture forestière du même scenario augmentera. Le rendement en eau augmentera en 2030 par 118 227 m³ ceci s'explique par l'importance des précipitations en comparaison à l'évapotranspiration au cours des quatorze années (Tableau 11).

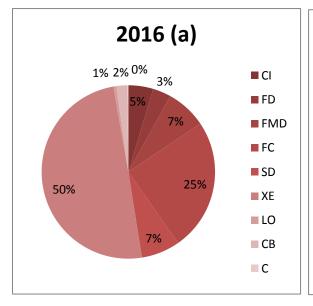
**Tableau 11.** Evaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour les années 2016 et 2030.

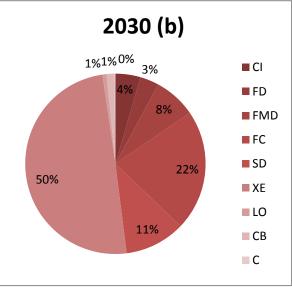
Année	Évapotranspiration réelle moyenne (mm/ha)	Rendement moyen en eau (mm/ha)	Volume du rendement en eau (m3)
2030	0,67	37,01	236 479 820
2016	0.65	37,03	236 598 043

# II Scenario Catastrophique

**Tableau 12.** Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario catastrophique 2030

Occupation du sol		2016	2030	
	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)
Cultures irrigues	2669,5	4,64	2 578,77	4,48
<b>Forets Denses</b>	1960,21	3,4	1 962,90	3,41
<b>Forets Moyennement</b>	4350,45	7,55	4 350,15	7,55
Denses				
<b>Forets Claires</b>	14 207,7	24,67	12 494,25	21,7
Sols dénudes	4165,74	7,23	6 256,24	10,86
<b>Xérophytes Epineuses</b>	28 647,4	49,74	28 623,24	49,7
Lits de l'oued	318,273	0,55	414,81	0,72
Cultures en Bour	1153,33	2,01	801,54	1,39
Constructions	120,499	0,21	107,28	0,19
Total	57 589,38	100,00	57 589,38	100,00





CI: Cultures irriguée ; FD: Forêts denses ; FMD: Forêts moyennement denses ; FC: Forêts claires ; SD: Sols dénudés ; XE: Xérophytes Epineuses ; LO: Lits de l'oued ; CB: Cultures en bourre ; C: Constructions

**Figure 19.** Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour (a) la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et (b) le scenario catastrophique en 2030.

Les taux de changements en pourcentage des occupations du sol entre 2016 et 2030 seront : -0,16 % pour les cultures irriguées, -2,97 % pour les forêts claires, +3,63 % pour les sols dénudés, -0,04 % pour les xérophytes épineuses, +0,17 pour les lits de l'oued, -0,62 % pour les cultures en bour et -0.02 % pour les constructions. Tous les types d'occupation du sol subiront une régression sauf pour les sols dénudés et les lits de l'oued qui gagneront plus d'espace. Les forêts vont régresser gravement de 1713,45 ha, soit un taux de perte à 2,97 % suivis par les cultures avec une superficie de 442,52ha (soit un taux de perte de 0,78 %). Les xérophytes épineuses et les constructions ne subiront pas une grande régression par rapport aux autres occupations mais considérant l'espace qu'elles occupent, leur régression serait assez grande de 120,5 ha à 107,28 ha soit une perte de 13,22 ha avec un taux de 0,02 %. Les forêts moyennement denses et les forêts denses ne vont pas changer puisque toute forme de changement s'est passée dans les forêts claires. Les types d'occupation du sol qui gagneraient de l'espace sont les sols dénudés d'une grande partie et les lits de l'oued. Ils vont gagner plus de surface : 2090,5 ha soit un gain de 3,63 % alors que les lits de l'oued gagneraient 96,54 ha, soit un gain de 0,17 %. Toute éventuelle catastrophe affecterait énormément les ressources naturelles du bassin. Les infrastructures et les constructions en paieraient un lourd tribut.

Carte de l'occupation du sol pour le scenario catastrophique (2030)

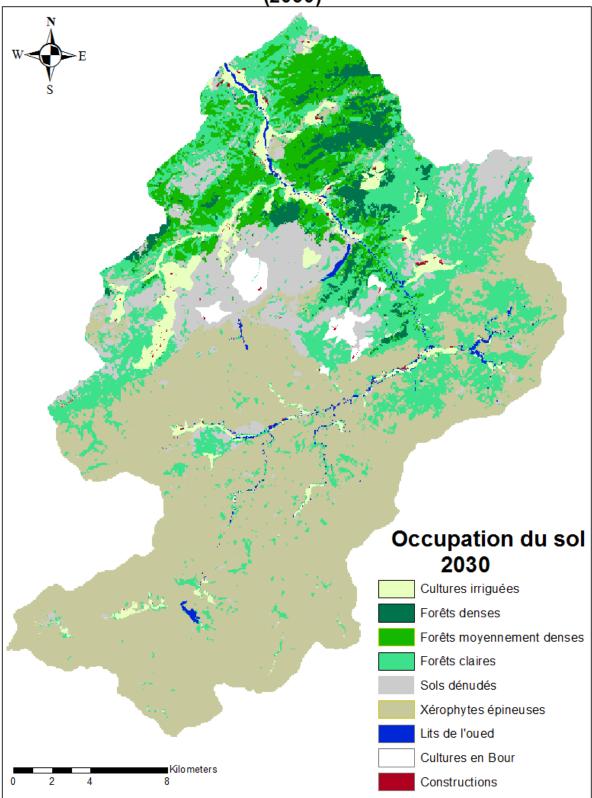


Figure 20. Carte de l'occupation des sols en 2030 pour le scenario catastrophique

-725.82 - -109.25

-109.25 - -106.21

-106.21 - 48.69

# 1 Carbone b a Carte du stockage futur du carbone (2030) Carte du stockage actuel du carbone (2016) Stockage futur du carbone Stockage actuel du carbone T/ha T/ha 0 - 0.10 0 - 0.10 0.10 - 0.24 0.10- 0.24 0.24 - 0.68 0.24- 0.68 0.68 - 1.110 0.68 - 1.11 d $\mathbf{c}$ Carte de la valeur du carbone séquestré Carte de la séquestration du carbone Carbone Valeur du carbone séquestré séquestré T/ha/an Dh/ha/an -725.82

**Figure 21.** Résultats du modèle du carbone pour le scenario catastrophique : a et b sont les cartes du stockage du carbone en 2030 et en 2016, c est la carte de la séquestration du carbone et d est la valeur du carbone séquestré.

-1.11 - -0.17

-0.17 - -0.16

-0.16 - 0.075

En 2016, la moyenne de stockage du carbone est de 0,25 T/ha avec un écart type de 0.28 alors qu'elle serait de 0.24 T/ha avec un écart type de 0,28 en 2030, soit une différence de 0,1 T/ha pendant les quatorze ans (Figure 21a & 21b). Cette diminution s'explique par la réduction du couvert végétal. Les parties avec le faible stock du carbone ont augmenté entre 2016 et 2030 (Figure 21a & 21b). Le stock total du carbone diminuera entre 2016 et 2030 par 53 950 ce qui explique davantage cette baisse en stock du carbone dans le futur (Tableau 13). La moyenne de carbone séquestré serait de -0,01 T/ha/an avec un écart type de 0,05 pendant les quatorze ans ce qui correspond à une valeur de -4,96 Dh/ha/an avec un écart type de 35,29 (Figure 21c & 21d). La diminution des ressources naturelles affecterait encore la séquestration du carbone et sa valeur économique et donc la signification des valeurs négatives. Les sols dénudés ont le plus faible stockage du carbone, soit une moyenne de 0,05 T/ha dans les deux années. Leur superficie augmenterait entre 2016 et 2030 (Figure 21a & 21b). Cela a reflété sur cette diminution du stockage et la séquestration voire la valeur séquestrée (Tableau 13). Les forêts et les cultures ayant la plus grande moyenne de 0,90 T/ha vont aussi régresser en 2030 (Figure 21a & 21b). En général, presque la totalité du bassin versant va connaître une perte moyenne de séquestration de carbone de -0,085 T/ha correspondant une valeur de -58,12 Dh/ha/an (Figure 21a & 21b).

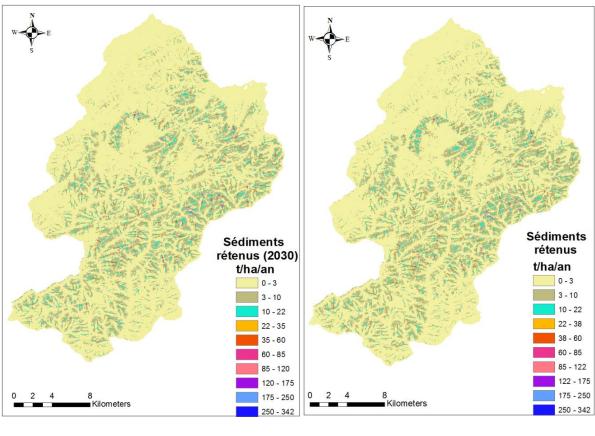
**Tableau 13.** Résultats de l'évaluation quantitative et économique de stockage et de séquestration du carbone pour le scenario catastrophique

Type d'évaluation	Valeur Quantitative	Unités	
Stockage Total du carbone en 2016	1 793 787	Tonnes de Carbone	
Stockage Total du carbone en 2030	1 739 837	Tonnes de Carbone	
Séquestration Totale du carbone	-53 950	Tonnes de Carbone	
Valeur actuelle nette entre 2016 et 2030	-35 253 659	Dirhams	

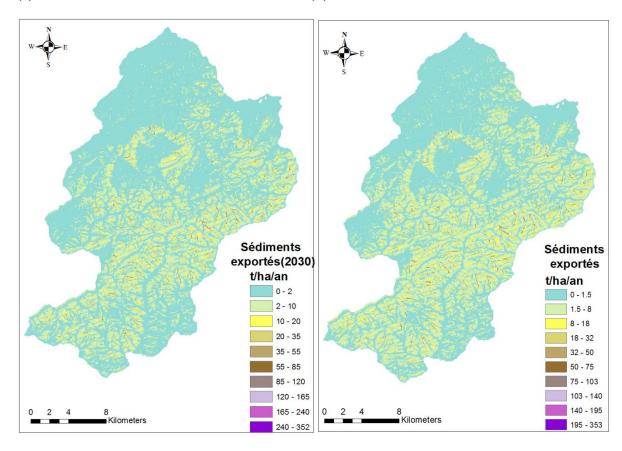
La séquestration totale du carbone au niveau du bassin versant serait de -53 950 tonnes alors que la valeur actuelle nette entre les deux années est -35 253 659 dirhams (Tableau 13). Le scenario catastrophique illustre une perte de carbone en général exprimée par les valeurs négatives et par la suite une perte d'une somme d'argent considérable pendant les quatorze ans. La destruction des ressources naturelles et les écosystèmes induisent dans le futur les dommages de l'ordre de millions de dirhams.

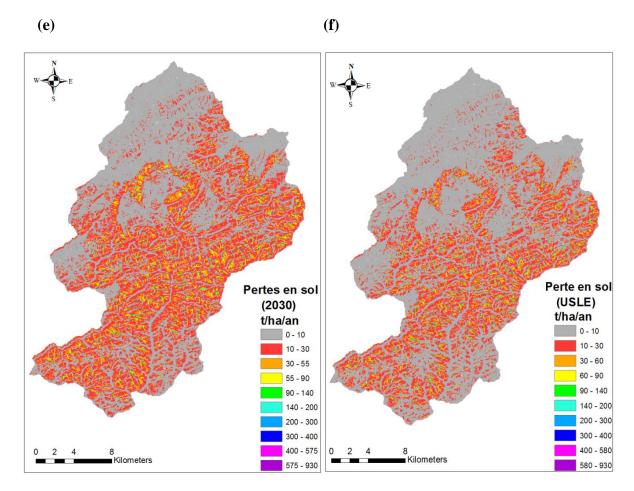
# 2 Rétention des sédiments









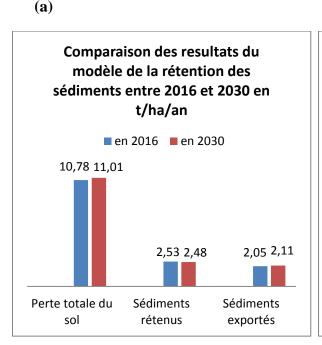


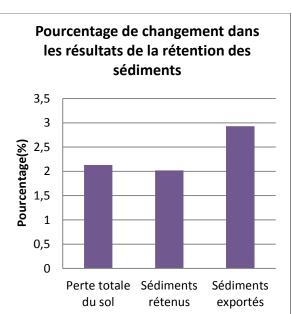
**Figure 22.** Comparaison entre les cartes de la rétention des sédiments (a) pour le scenario catastrophique en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016, de l'exportation des sédiments (c) pour le scenario catastrophique en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016, et de la perte du sol (e) pour le scenario catastrophique en 2030 et (f) pour l'occupation du sol en 2016.

Les résultats de modèles de rétention des sédiments pour ce scenario illustrent qu'un changement négatif aurait lieu entre 2016 et 2030. La moyenne de rétention des sédiments est 2,48 t/ha/an, soit une diminution de 0,05t/ha/an (Figure 23a). La diminution du couvert végétal affecterait gravement le service de rétention des sédiments. Le pourcentage de changement pour la rétention des sédiments entre les deux années est de 2,02 % (Figure 23b). La majeure partie du bassin versant présenterait en 2030 une moyenne faible de rétention des sédiments de 2.5 t/ha/an comparée à celle de 2016 (Figure 22a & 22b). La rétention totale des sédiments diminuera de 448 113 tonnes dans tout le bassin versant pendant les quatorze ans (Tableau 10). La moyenne des sédiments exportés serait de 2,11 t/ha/an en 2030 alors que celle de 2016 est de 2,05 t/ha/an, soit une diminution de 0,06 t/ha/an entre les deux années

(Figure 23a). Le pourcentage de changement de l'exportation des sédiments entre les deux années est de 2,93 % qui représentent le plus grand changement pour les résultats du modèle de rétention des sédiments (Figure 23b). Presque la moitié du bassin versant connaitra une moyenne des sédiments exportés de 35 t/ha/an alors que celle de l'année 2016 était seulement de 7.5 t/ha/an (Figure 22c & 22d). L'exportation totale des sédiments dans tout le bassin versant a augmentera entre 2016 et 2030, de 448 113 tonnes (Tableau 14), même que celle de la rétention des sédiments. Ceci explique le grand pourcentage de changement des sédiments exportés pendant les quatorze ans. L'érosion annuelle moyenne augmentera entre les deux années avec une moyenne de 10,78 t/ha/an en 2016 et de 11,01 t/ha/an en 2030, soit une différence de 0,23 t/ha/an (Figure 14a). Le pourcentage de changement dans l'érosion annuelle moyenne est de 2,13 % pendant les quatorze ans (Figure 23a & 23b). Il y a aurait plus d'endroits ayant une grande moyenne de pertes en sol en 2030 qu'en 2016, ceci qui est dû à la diminution du couvert végétal en 2030 (Figure 22e & 22f). La perte totale en sol diminuerait entre 2016 et 2030 par 1 757 845 tonnes. Les pertes du pourcentage de couvert végétal ne se refléteraient pas selon les mêmes niveaux sur la moyenne des pertes en sols durant la période 2016 - 2030 (Tableau 14 & Figure 23a).

**(b)** 





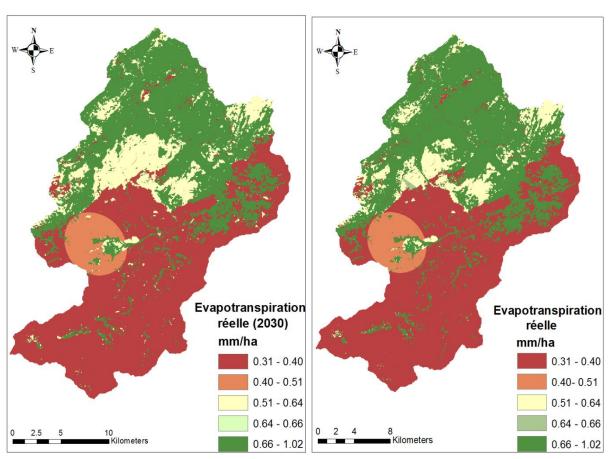
**Figure 23.** Comparaison des résultats du modèle de rétention des sédiments entre 2016 et 2030 (a) et leur pourcentage de changement (b) pour le scenario catastrophique.

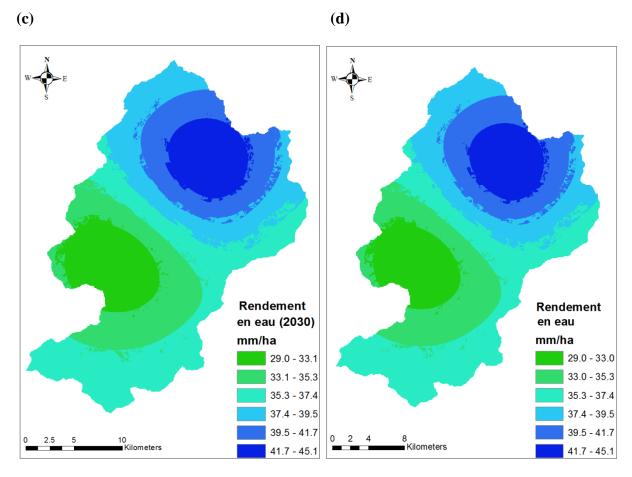
**Tableau 14.** Résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle d'érosion pour le scenario catastrophique dans le bassin versant de l'Ourika.

Année	Perte Totale du sol (Tonnes)	Rétention totale des sédiments (Tonnes)	Exportation Totale des sédiments (Tonnes)			
2030	94 888 348	22 714 318	19 892 857			
2016	93 130 503	23 162 431	19 444 744			

# 3 Rendement en eau

(a) (b)





**Figure 24.** Comparaison entre les cartes de l'évapotranspiration réelle (a) pour le scenario tendanciel en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016 et du rendement en eau (c) pour le scenario tendanciel en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016.

La différence entre l'évapotranspiration réelle entre 2016 et 2030 est de 0.2 mm/ha. Elle est de 0,65 mm/ha en 2016 et de 0,63 mm/ha en 2030 (Tableau 15). Cela indique qu'il y aurait une diminution de l'évapotranspiration réelle entre les deux années qui est expliqué par la diminution du couvert végétal entre 2016 et 2030. Le couvert végétal a la plus grande moyenne de l'évapotranspiration réelle de 0,84 mm/ha alors que les xérophytes épineuses ont la plus faible moyenne d'évapotranspiration réelle, soit 0,31 mm/ha en 2030 et 0,34 mm/ha en 2016 (Figure 24a). Le rendement moyen en eau augmenterait de 37,03 mm/ha en 2016 à 37,05 mm/ha en 2030, soit une différence de 0,2 mm/ha. En 2030, le scenario catastrophique serait caractérisé par une grande disponibilité d'eau comparativement aux valeurs de base de 2016. Dans ce scenario catastrophe, il y aurait davantage d'inondations et de crues. Ceci s'explique par les tendances à plus de ruissellement et par la faible perte de l'eau par évapotranspiration réelle. Bien que ce scénario soit considérablement affecté par la couverture

forestière d'une manière négative, il aura en 2030 la plus grande moyenne de rendement en eau, soit 43,5 mm/ha (Figure 24c). Le volume total du rendement en eau augmentera par 98  $228m^3$  (Tableau15). Ceci s'explique par le fait que ce scenario a favorisé plus les lits de l'oued que le couvert végétal à cause des phénomènes catastrophiques comme les inondations.

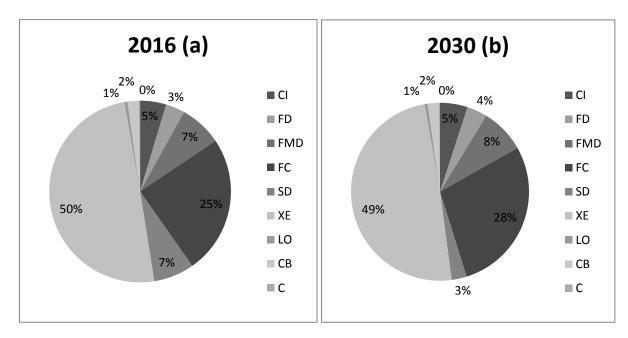
**Tableau15.** Evaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour le scenario catastrophique.

Année	Évapotranspiration réelle moyenne (mm/ha)	Rendement moyen en eau (mm/ha)	Volume du rendement en eau (m3)		
2030	0,63	37,05	236 696 271		
2016	0,65	37,03	236 598 043		

### III Scenario Idéal

**Tableau 16.** Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte d'occupation du sol 2016 et le scenario idéal 2030

Occupation du sol		2016	2030			
	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)		
Cultures irrigues	2669,5	4,64	2 888,37	5,02		
Forets Denses	1960,21	3,4	2 119,86	3,68		
Forets Moyennement Denses	4350,45	7,55	4 654,64	8,08		
Forets Claires	14207,7	24,67	16 344,27	28,38		
Sols dénudés	4165,74	7,23	1 577,70	2,74		
Xérophytes Epineuses	28 647,4	49,74	28 409,31	49,33		
Lits de l'oued	318,273	0,55	319,14	0,55		
Cultures en Bour	1153,33	2,01	1 154,70	2,01		
Constructions	120,499	0,21	121,41	0,21		
Total	57 589,38	100,00	57 589,38	100,00		



CI : Cultures irriguée ; FD : Forêts denses ; FMD : Forêts moyennement denses ; FC : Forêts claires ; SD : Sols dénudés ; XE : Xérophytes Epineuses ; LO : Lits de l'oued ; CB : Cultures en bourre ; C : Constructions

**Figure 25.** Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour (a) la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et (b) le scenario idéal en 2030.

Les changements des taux de couverture pour chaque occupation du sol au niveau du bassin versant sont +0,28 % pour les forêts denses, +0,53 % pour les forêts moyennement denses,

+3,71 % pour les forêts claires, -4,49 % pour les sols dénudés, -0,41 % pour les xérophytes épineuses, +0,001 % pour les cultures en bour et 0,38 % pour les cultures irriguées. Les lits de l'oued et les constructions ne vont pas changer. Les forêts augmenteraient leur superficie par 2600,41 ha soit un gain de 4,22 %; les forêts claires vont subir le plus grand gain de 2136,57 ha, suivis par les forêts moyennement denses avec un gain de 304,19 ha et les forêts denses t connaitront un gain minime de 159,65 ha. Les sols dénudés régresseront de 2588,04 ha, ceci constituerait la résultante des travaux de restauration et des aménagements des endroits dégradés dans ce scenario. Les xérophytes épineuses subiront aussi un changement négatif, soit une perte de 238,09 ha. Les cultures gagneraient de 218,88 ha. Les forêts bénéficieront considérablement dans ce scenario de l'augmentation de leur superficie suite aux travaux de reboisement. Ce scenario présente la meilleure alternative pour le gain d'espace forestier et pour augmenter les ressources naturelles au niveau du bassin surtout le couvert forestier. Les types de l'occupation du sol qui ont resté inchangées sont les parties qui n'ont pas été prises en considération dans le développement de ce scenario.

Carte de l'occupation du sol pour le scenario idéal (2030)

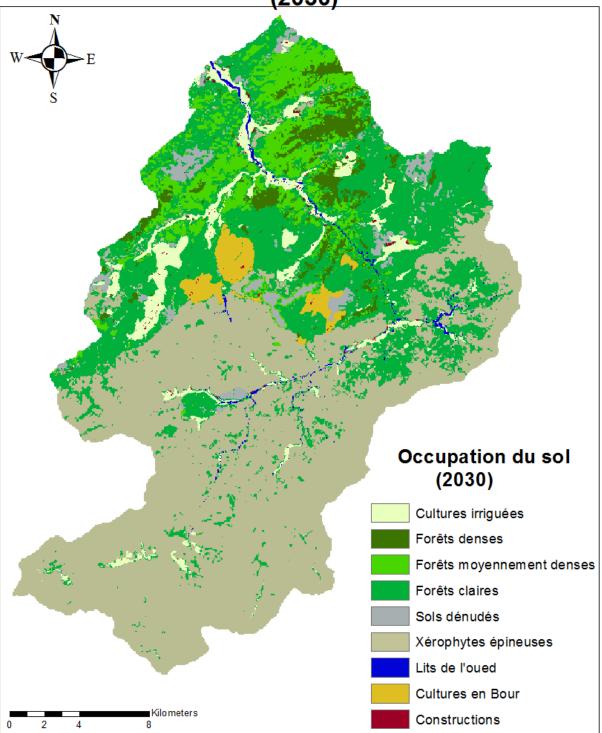


Figure 26. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario idéal

# 1 Carbone b a Carte du stockage actuel du carbone (2016) Carte du stockage futur du carbone (2030) Stockage futur du carbone Stockage actuel du carbone T/ha 0 - 0.10 0 - 0.10 0.10 - 0.24 0.10- 0.24 0.24 - 0.68 0.24- 0.68 0.68 - 1.11 d $\mathbf{c}$ Carte de la séquestration du carbone Carte de la valeur du carbone séquestré Carbone Valuer du carbone séquestré séquestré Dh/ha/an T/ha/an 0 - 0.16 0 - 103.48 103.48 398.39 0.16 - 0.61 398.39 - 657.08 0.61 - 1.01

**Figure 27.** Résultats du modèle du carbone pour le scenario idéal : a et b sont les cartes du stockage du carbone en 2030 et en 2016, c est la carte de la séquestration du carbone et d est la valeur du carbone séquestré.

Le stockage du carbone de l'année 2030 est 0,267 T/ha avec un écart type de 0,28 alors que celui de l'année 2016 est 0,25 T/ha avec un écart type de 0.28, soit une différence de 0,02 T/ha entre les deux années (Figure 18a & 18b). Cette augmentation est due aux aménagements de restauration et aux reboisements des espaces dégradés qui augmenteraient le couvert végétal. Les parties du bassin versant ayant la plus faible moyenne du stockage du carbone 0,05 T/ha en 2016 régresseraient largement en 2030. Ceci contribuerait à l'augmentation du stockage du carbone en 2030 (Figure 27a & 27b). Ce stockage total serait de 1 901 346 tonnes en 2030 contre uniquement 1 793 787 en 2016 (Tableau 17). La moyenne de carbone séquestré serait de 002 T/ha/an en 2030 avec un écart type de 0,09, soit une valeur du carbone séquestré de l'ordre de 9,89 Dh/ha/an avec un écart type de 59,63 (Figure 27c & 27d). Il y aurait une grande partie du bassin versant ayant une grande moyenne de carbone séquestré de 0,44 T/ha/an correspondant à une valeur séquestré de 244,94 Dh/ha/an (Figure 27c & 27d). Ce sont le couvert végétal qui a eu la grande séquestration et la grande valeur du carbone dans le bassin versant de l'Ourika.

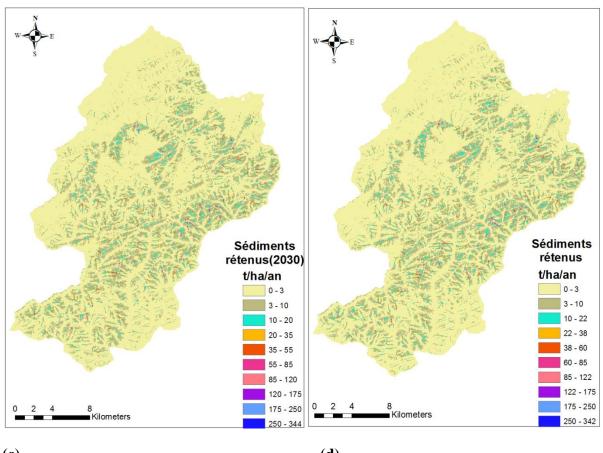
**Tableau 17.** Les résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario idéal

Type d'évaluation	Valeur Quantitative	Unités
Stockage Total du carbone en 2016	1 793 787	Tonnes de Carbone
Stockage Total du carbone en 2030	1 901 346	Tonnes de Carbone
Séquestration Totale du carbone	107 558	Tonnes de Carbone
Valeur actuelle nette entre 2016 et 2030	70 284 140	Dirhams

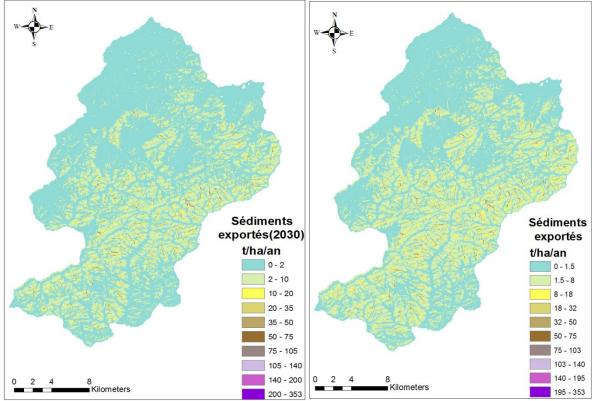
La séquestration totale du carbone dans tout le bassin versant serait 107 558 tonnes de carbone qui est très importante. Elle s'explique par l'augmentation du couvert végétal dans le scenario idéal étant donné que ce dernier présente le plus grand stock du carbone au niveau du bassin versant (Tableau 17). La valeur actuelle nette entre 2016 et 2030 est 70 284 140 dirhams (Tableau 17). Cette valeur indique l'importance et la contribution du couvert végétal au service de stockage et de séquestration du carbone dans le bassin versant de l'Ourika.

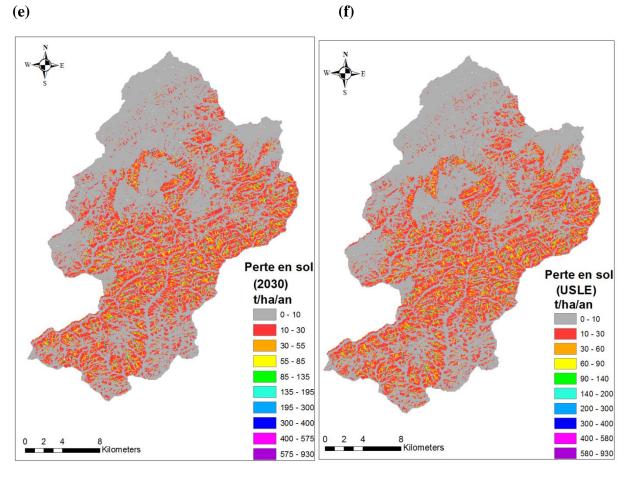
# 2 Rétention des sédiments







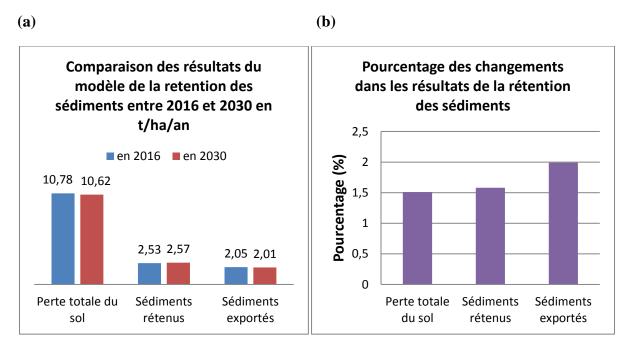




**Figure 28.** Comparaison entre les cartes de la rétention des sédiments (a) pour le scenario idéal en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016, de l'exportation des sédiments (c) pour le scenario idéal en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016, et de la perte du sol (e) pour le scenario idéal en 2030 et (f) pour l'occupation du sol en 2016.

La moyenne de rétention des sédiments en 2030 serait de 2,57 t/ha/an alors qu'elle est de 2,53 t/ha/an pour 2016, soit une différence de 0,04 t/ha/an (Figure 28a, 28b & 29a). Ce changement positif serait traduit par le pourcentage de changement de rétention des sédiments qui est de 1,99 %, soit le plus grand pourcentage de changements entre les résultats des modèles de la rétention des sédiments (Figure 29b). Il existe beaucoup plus d'endroits au niveau du bassin versant qui auront une grande rétention des sédiments en 2030 qu'en 2016 (Figure 28a & 28b). La rétention totale des sédiments augmenterait considérablement entre 2016 et 2030 par 322 040 tonnes (Tableau 18). La moyenne d'exportation des sédiments serait de 2,01 t/ha/an en 2030 alors que celle de l'année 2016 est de 2,05 t/ha/an (Figure 29a). La différence entre les deux années est de 0,04 t/ha/an et le pourcentage de changement pour les sédiments exportés est de 1,58 % (Figure 29b). Il y aurait plus de zones du BV avec la grande moyenne des sédiments exportés en 2030 qu'en 2016 ; ceci explique en grand part les exportations des

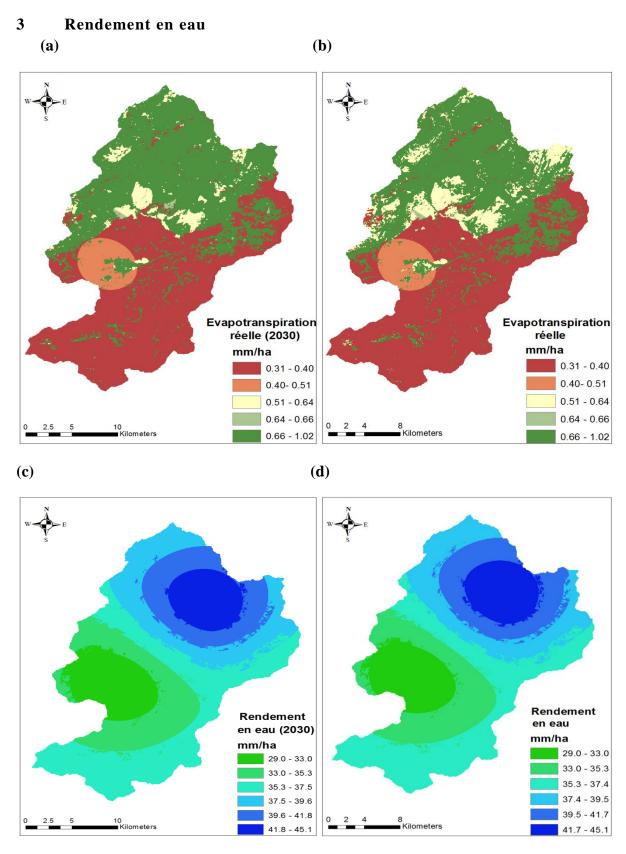
sédiments en 2030 (Figure 28c & 28d). L'exportation totale des sédiments diminuera considérablement en 2030 par 322 040 tonnes (Tableau 18). Celle-ci s'accompagnerait par une augmentation de la rétention des sédiments. La différence des valeurs totales pour la rétention des sédiments et pour l'exportation des sédiments sont les mêmes en tonnes. L'érosion moyenne annuelle de l'année 2030 serait 10,62 t/ha/an alors que celle de l'année 2016 est 10,78 t/ha/an (Figure 29a). La différence est de 0,16 t/ha/ha, soit un pourcentage de changement entre les deux années de 1,51 % qui est assez important (Figure 29b). La perte du sol et l'exportation des sédiments vont augmenter mais c'est la rétention des sédiments qui augmentera le plus (Figure 20b). La perte totale du sol diminuera énormément entre les deux années par 1 257 077 tonnes (Tableau 17). Cette diminution est du à l'augmentation de la superficie végétale par la restauration et le reboisement dans ce scenario.



**Figure 29.** Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 (a), et leur pourcentage de changement (b) pour le scenario idéal.

**Tableau 18.** Les résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario idéal dans le bassin versant de l'Ourika.

Année	Perte Totale du sol (Tonnes)	Rétention totale des sédiments (Tonnes)	Exportation Totale des sédiments (Tonnes)			
2030	91 873 426	23 484 471	19 122 704			
2016	93 130 503	23 381 069	19 444 744			



**Figure 30.** Comparaison entre les cartes de l'évapotranspiration réelle (a) pour le scenario idéal en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016 et du rendement en eau (c) pour le scenario idéal en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016.

L'évapotranspiration réelle moyenne augmenterait de 0,65 mm/ha en 2016 à 0,67 mm/ha en 2030 (Tableau 19). Ceci indique que le scénario idéal connaîtra beaucoup plus de perte d'eau que le scenario de base en 2016 ce qui est dû au fait que le scenario idéal présente une augmentation de la couverture forestière à partir de l'année 2016. Les forêts et les cultures irriguées présenteraient la plus grande évapotranspiration réelle moyenne à 0,84 mm/ha en 2030 dépassant celle de 2016 qui était de l'ordre de 0,7 mm/ha, soit une augmentation assez forte de 0,14 mm/ha (Figure 30a & 30b). Les cultures en bour diminueront considérablement de 0.6 mm/ha en 2030 à 0,55 mm/ha en 2016. L'occupation du sol ayant la plus faible évapotranspiration réelle moyenne est les xérophytes épineuses, soit de 0,34 mm/ha pour 2030 et 0,37 mm/ha pour l'année 2016(Figure 30a & 30b). La différence entre le rendement moyen en eau pour les deux années est de 0,3 mm/ha (37,03 mm/ha en 2016 contre 37,00 mm/ha en 2030) (Tableau 19). Ceci est dû à l'augmentation future du couvert forestier accompagnée par moins de ruissellement et plus d'infiltration. La quantité de l'eau perdue par évapotranspiration est donc aussi grande pour ce scenario. Les forêts resteraient encore l'occupation du sol ayant le plus grand rendement en eau dans tout le bassin versant même si ce rendement diminuerait en 2030 (Figure 30c & 30d). Le volume du rendement en eau et le volume d'approvisionnement en eau augmenteraient par 152 226m<sup>3</sup> entre les années 2016 et 2030 (Tableau 19).

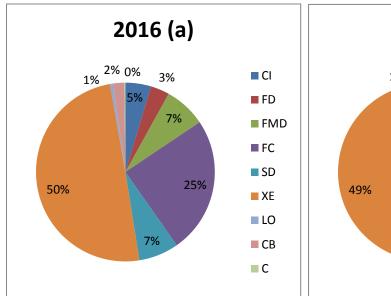
**Tableau 19.** Evaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour le scenario idéal.

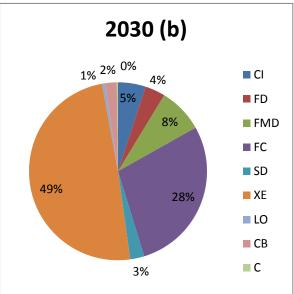
Année	Évapotranspiration réelle moyenne (mm/ha)	Rendement moyen en eau (mm/ha)	Volume du rendement en eau (m3)			
2030	0,67	37,00	236 445 817			
2016	0,65	37,03	236 598 043			

### IV Scenario concerté

**Tableau 20.** Comparaison des superficies et des taux de couvertures des occupations du sol entre la carte de l'occupation du sol 2016 et le scenario concerté en 2030.

Occupation du sol		2016	2030			
	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)	Superficie (ha)	Taux de couverture (%)		
Cultures irrigues	2669,5	4,64	2 888,37	5,02		
<b>Forets Denses</b>	1960,21	3,4	2 119,86	3,68		
Forets Moyennement Denses	4350,45	7,55	4 698,09	8,16		
<b>Forets Claires</b>	14207,7	24,67	16 344,27	28,38		
Sols dénudés	4165,74	7,23	1 476,54	2,56		
<b>Xérophytes Epineuses</b>	28 647,4	49,74	28 403,28	49,32		
Lits de l'oued	318,273	0,55	319,14	0,55		
Cultures en Bour	1153,33	2,01	1 212,39	2,11		
Constructions	120,499	0,21	127,44	0,22		
Total	57 589,38	100,00	57 589,38	100,00		





CI: Cultures irriguée ; FD: Forêts denses ; FMD: Forêts moyennement denses ; FC: Forêts claires ; SD: Sols dénudés ; XE: Xérophytes Epineuses ; LO: Lits de l'oued ; CB: Cultures en bourre ; C: Constructions

**Figure 31**. Les occupations du sol dans le bassin versant de l'Ourika pour (a) la carte actuelle de l'occupation du sol en 2016 et (b) le scenario concerté en 2030.

Nous remarquons qu'il y aurait un changement de tous les types d'occupation du sol dans le scenario concerté sauf pour les lits de l'oued. Ils seraient, soit positifs ou négatifs mais la plupart seraient des changements positifs. Les lits de l'oued n'ont pas changé parce qu'ils n'ont pas été considérés lors de développant de ce scenario étant donné que ce scenario est un accord entre le scenario idéal et l'approche participative. Les changements seraient : +0,38 % pour les cultures irriguées, +0,28 % pour les forêts denses, +0,61 % pour les forêts moyennement denses, +3,71 % pour les forêts claires, -4,67 % pour les sols dénudés, -0,42 % pour les xérophytes épineuses, +0,1 % pour les cultures en bour et +0,01 % pour les constructions. Seuls les sols dénudés et les xérophytes épineux subiraient un changement négatif, soit respectivement 2588,04 ha pour les sols dénudés et 244,12 ha pour les xérophytes épineux. Ceci explique que la grande partie des espaces dégradés sera occupée par un couvert végétal. Les forêts gagneraient la plus grande superficie (2543,86 ha), soit un taux de changement de +4,6 % d'où les forêts denses représenteront 159,65 ha, les forêts moyennement denses représenteront 347,64 ha et les forêts claires représenteront 2136,57 ha. Le gain en superficie de la forêt s'explique par les reboisements et les autres aménagements forestiers réalisés au niveau du bassin versant. Les cultures gagneraient 277,93 ha de leur superficie, soit un taux de changement à 0,48 %. Le scenario idéal a été amélioré par l'approche participative pour arriver au scenario concerté tout en conservant les ressources naturelles et surtout les forêts. Le scenario concerté est le scenario qui a bien favorisé l'augmentation du couvert forestier et au même temps les cultures.

Carte de l'occupation du sol pour le scenario concerté (2030)

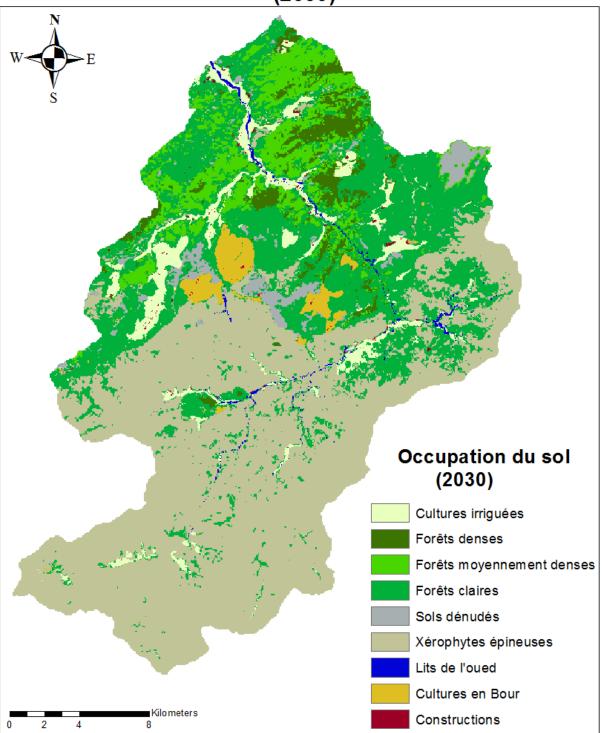


Figure 32. Carte de l'occupation du sol en 2030 pour le scenario concerté

# 1 Carbone b a Carte du stockage futur du carbone (2030) Carte du stockage actuel du carbone (2016) Stockage futur du carbone Stockage actuel du carbone T/ha 0 - 0.10 0 - 0.10 0.10 - 0.24 0.10- 0.24 0.24 - 0.68 0.24- 0.68 0.68 - 1.11 0.68 - 1.11 d c Carte de la séquestration du carbone Carte de la valeur du carbone séquestré Valeur du carbone Carbone séquestré séquestré Dh/ha/an T/ha/an -0.10 - -0.00 -0.69 - 107.47 -0.00 - 0.16 107.47 - 397.79 0.16 - 0.61 397.79 - 659.66 0.61 - 1.01

**Figure 33.** Résultats du modèle du carbone pour le scenario concerté : a et b sont les cartes du stockage du carbone en 2030 et en 2016, c est la carte de la séquestration du carbone et d est la valeur du carbone séquestré.

La moyenne de stockage du carbone de l'année 2030 serait de 0,268 T/ha avec un écart type de 0,28 alors que celle de 2016 était de 0.25 T/ha avec un écart type de 0,28 (Figure 33a & 33b). Il y aurait une augmentation du stockage du carbone entre les deux années, soit une différence de 0,02 T/ha. La cause de cette augmentation serait due à l'augmentation de la superficie de la forêt et des cultures ayant le plus grand potentiel de stockage de carbone. Les zones ayant la moyenne la plus faible de stockage de carbone en 2016 diminueraient considérablement ce qui va se traduire par un changement positif du stockage de carbone en 2030. Les forêts et les cultures vont maintenir leur capacité de stockage de carbone entre les deux années (Figure 33a & 33b). Cela aurait une conséquence positive sur le stockage du carbone qui augmenterait en 2030 à 1 905 729 tC contre 1 793 787 tC en 2016 (Tableau 21). La moyenne de séquestration du carbone serait de 0,02 T/ha/an avec un écart type de 0,09 correspondant à une valeur de 10,29 Dh/ha/an avec un écart type de 60,67 (Figure 33c & 33d). Certaines zones connaitront une perte de carbone pendant les quatorze ans mais d'une façon négligeable alors que les parties qui ont subi une forte séquestration présenteraient une moyenne très forte à 0,81 T/ha/an (Figure 33c). Les zones ayant la plus forte séquestration auraient une valeur moyenne de 513,73 Dh/ha/an (Figure 28d).

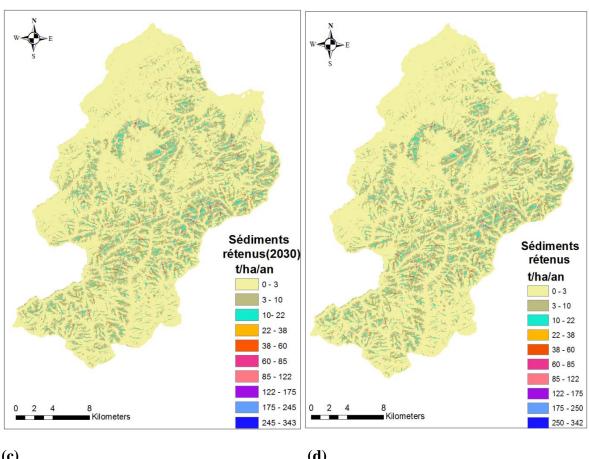
**Tableau 21.** Les résultats du calcul de l'évaluation quantitative et économique du stockage et la séquestration du carbone pour le scenario concerté

Type d'évaluation	Valeur Quantitative	Unités
Stockage Total du carbone en 2016	1 793 787	Tonnes de Carbone
Stockage Total du carbone en 2030	1 905 729	Tonnes de Carbone
Séquestration Totale du carbone	111 942	Tonnes de Carbone
Valeur actuelle nette entre 2016 et 2030	73 148 556	Dirhams

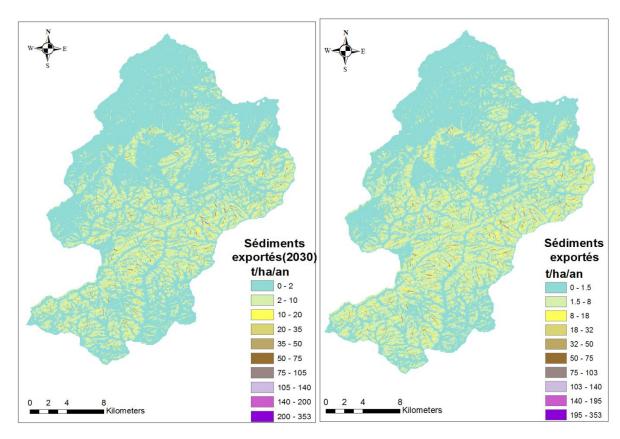
La séquestration totale du carbone dans tout le bassin versant est de 111 942 tC qui est la plus grande séquestration entre les différents scenarios (Tableau 21). Ceci s'explique par les aménagements de restauration mis en œuvre par la population locale. La valeur actuelle nette du carbone séquestré est 73 148 556 dirhams (Tableau 21). Ce scenario est alors le meilleur qui présente la plus grande valeur associée au carbone séquestré.

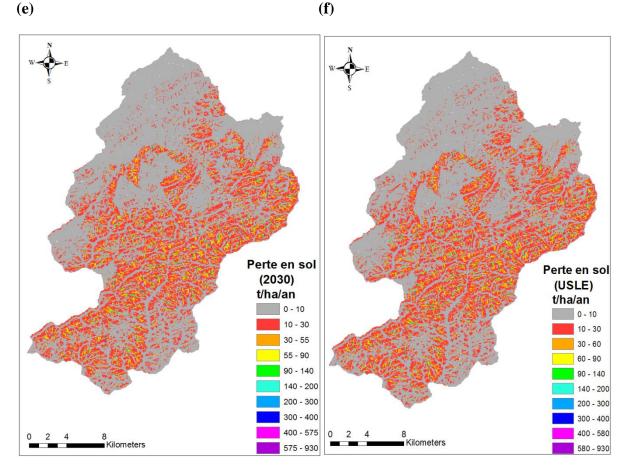
#### Rétention des sédiments







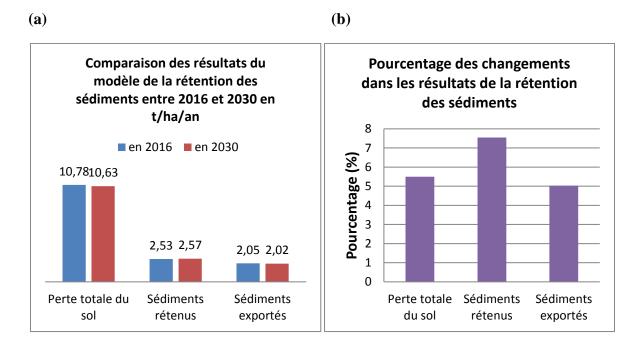




**Figure 34.** Comparaison entre les cartes de la rétention des sédiments (a) pour le scenario concerté en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016, de l'exportation des sédiments (c) pour le scenario concerté en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016, et de la perte du sol (e) pour le scenario concerté en 2030 et (f) pour l'occupation du sol en 2016.

La moyenne de la rétention des sédiments serait de 2,57 t/ha/an avec un écart type de 7,53 en 2030 alors qu'elle est de 2,53 t/ha/an 2016 avec un écart type 7,43 (Figure 35a). La différence des moyennes de rétention des sédiments entre les deux années est de 0,04 t/ha/ha avec un pourcentage de changement à 1,58 % (Figure 35b), le plus grand pourcentage entre les résultats. Ce grand changement positif serait dû à la diminution des espaces vides et l'augmentation du couvert végétal au niveau du bassin versant. L'année 2030 connaitra plus des zones ayant des grandes moyennes de rétention des sédiments alors que l'année 2016 connaitra plus des zones avec les faibles moyennes de rétention des sédiments (Figure 34a & 34b). La rétention des sédiments augmenterait par 299 192tonnes entre 2016 et 2030 (Tableau 22). La moyenne d'exportation des sédiments serait de 2,02 t/ha/an avec un écart type de 6,42 en 2030 tandis qu'elle est de 2,05 t/ha/an en 2016 avec un écart type de 6,5 soit une différence de 0,03 t/ha/an (Figure 30a). Le pourcentage de changement pour l'exportation des

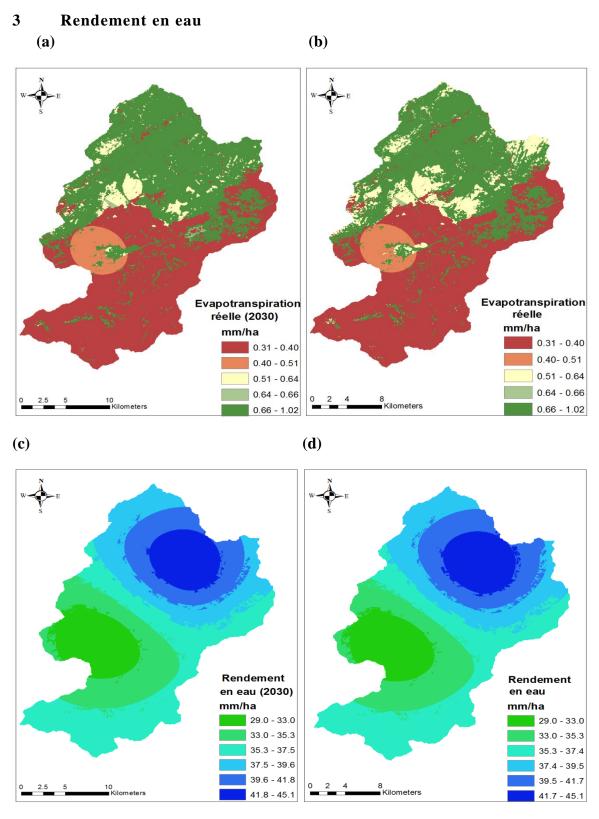
sédiments est de 1,49 %, le plus minime entre les résultats du modèle de la rétention des sédiments (Tableau 22). Ceci serait traduire par l'augmentation des zones ayant la plus grande moyenne d'exportation des sédiments en 2030 (Figure 34b & 34c). L'exportation totale des sédiments diminuerait par 299 192 entre 2016 et 2030 (Tableau 22). La moyenne d'exportation des sédiments augmenterait entre les deux années mais l'exportation totale des sédiments dans tout le bassin versant diminuerait pendant les quatorze ans. L'érosion moyenne annuelle en 2030 est de 10,63 t/ha/an avec un écart type de 22,71 tandis qu'elle est de 10,78 t/ha/an en 2016 avec un écart type de 22,97 soit une différence de 0,15 t/ha/an (Figure35a). Le pourcentage de changement pour les pertes en sol est de 1,41 % (Figure35b). Les pertes en sol diminueront par 1 152 320 tonnes entre 2016 et 2030 (Tableau 22).



**Figure 35.** Comparaison des résultats du modèle de la rétention des sédiments entre 2016 et 2030 (a) et leur pourcentage de changement (b) pour le scenario concerté.

**Tableau 22**. Résultats du calcul de l'évaluation quantitative du contrôle de l'érosion pour le scenario concerté dans le bassin versant de l'Ourika.

Année	Perte Totale du sol (Tonnes)	Rétention Totale des sédiments (Tonnes)	Exportation Totale des sédiments (Tonnes)			
2030	91 978 183	23 461 623	19 145 552			
2016	93 130 503	23 162 431	19 444 744			



**Figure 36.** Comparaison entre les cartes de l'évapotranspiration réelle (a) pour le scenario concerté en 2030 et (b) pour l'occupation du sol en 2016 et du rendement en eau (c) pour le scenario concerté en 2030 et (d) pour l'occupation du sol en 2016.

L'évapotranspiration réelle moyenne augmenterait à 0,67 mm/ha en 2030 de 0,65 mm/ha en 2016 (Tableau 23). Les mêmes moyennes et la même différence de 0,2 mm/ha que celles de scenario idéal (Tableau 22 & 23). Cette montée est due à l'augmentation du couvert végétal qui contribuera largement à l'évapotranspiration réelle. Les forêts présenteraient la plus grande moyenne de l'évapotranspiration réelle de 1 mm/ha en 2030 alors que les xérophytes épineuses présenteraient la plus faible moyenne de l'évapotranspiration réelle de 0,68 mm/ha (Figure 36a & 36b). Le rendement moyen en eau en 2016 est plus grand qu'en 2030 ayant une différence de 0,2 mm/ha (Tableau 23). Ceci serait du à l'augmentation de la couverture forestière et sa montée en évapotranspiration réelle qui ferait à ce que l'eau est plus infiltrée que ruisselée au niveau du bassin versant. La couverture forestière présenterait encore le plus grand rendement moyen en eau de 41,64 mm/ha en 2030 alors qu'elle est de 41,2 mm/ha en 2016, une montée assez importante et une différence de 0,42 mm/ha (Figure 36c & 36d). Le volume du rendement en eau augmenterait de 153 176 m³ entre 2016 et 2030 (Tableau 23). Le scenario concerté favorise le rendement en eau et l'approvisionnement en eau en général.

**Tableau 23.** L'évaluation quantitative des résultats du modèle de rendement en eau pour le scenario concerté.

Année	Évapotranspiration réelle moyenne (mm/ha)	Rendement moyen en eau (mm/ha)	Volume du rendement en eau (m3)		
2030	0,67	37,03	236 444 867		
2016	0,65	37,01	236 598 043		

Rétention des sédiments Sédiments exportés 20 24 23,5 19,5 19 23 19 22,5 22 18,5 SConc STend **SCatas** STend **SCatas** SIdeal SIdeal SConc d  $\mathbf{c}$ Stockage du carbone Perte en sol 96 1,95 95 1,9 94 1,85 93 1,8 92 1,75 91 1,7 90 1,65 STend **SCatas** SIdeal **SConc** STend **SCatas** SIdeal **SConc** f e Séquestration du carbone Rendement en eau 0,15 236,8 0,10 236,7 mètre cube Tonnes 236,6 0,05 236,5 0,00 STend SIdeal **SCatas SConc** 236,4 -0,05 236,3 -0,10 STend **SCatas** SIdeal SConc

b

a

STend: Scenario tendanciel; SCatas: Scenario catastrophique; SIdeal: Scenario idéal; SConc: Scenario concerté

**Figure 37.** Comparaison des services écosystémiques entre les quatre scenarios avec les valeurs en millions. a – d sont les services de régulation et e est le service d'approvisionnement.

La rétention des sédiments présente les changements positifs pour les quatre scenarios mais avec les niveaux différents (Figure 37a). Le scenario catastrophique aurait la plus faible rétention des sédiments suivi par le scenario tendanciel et le scenario concerté ayant une rétention modérée mais le scenario idéal aurait la plus grande rétention totale dans le bassin versant de l'Ourika. Les sédiments exportés présentent aussi des valeurs positives mais plus grandes que celles de rétention des sédiments ainsi il y aurait beaucoup des sédiments exportés que retenus dans le bassin versant (Figure 37b). Le scenario idéal aurait la plus faible exportation des sédiments au niveau du bassin versant. Les scenarios concerté et tendanciel auront une exportation modérée des sédiments alors que le scenario catastrophique aura la plus grande exportation des sédiments, un très grand export par rapport aux autres scenarios. Le stockage du carbone révèle un changement positif pour les quatre scenarios ayant les valeurs positives et bases (Figure 31c). Le scenario idéal aurait la plus faible perte en sol dans le bassin versant alors que le scenario catastrophique présenterait la plus grande perte en sol. Les scenarios concerté et tendanciel auront une perte moyenne. Le scenario catastrophique présenterait le plus faible stockage du carbone dans le bassin versant, un stockage très faible par rapport aux autres scenarios. Le scenario concerté présenterait le plus grand stockage du carbone suivi par les scenarios idéal et tendanciel ayant des stockages du carbone modéré mais très proche à celui du scenario concerté. Il n'y aurait pas de grande différence du stockage du carbone entre ces derniers. La séquestration du carbone donnera les valeurs négatives et positives qui montrent que tous les scenarios ne vont pas séquestrer le carbone pendant les quatorze ans (Figure 37d). Le carbone séquestré serait faible pour tous les scenarios pendant les quatorze ans. Le scenario catastrophique serait le seul ayant une perte du carbone et aucune séquestration dans le futur. Les autres trois scenarios vont séquestrer le carbone; le scenario concerté donnerait la plus forte séquestration du carbone mais le scenario idéal aurait plus de séquestration du carbone que le scenario tendanciel. Les valeurs nettes actuelles du carbone séquestré entre 2016 et 2030 révèlent les sommes positives et négatives qui signifient le gain et la perte du carbone séquestré (Figure 37e). Le rendement en eau présenterait les plus grandes valeurs positives entre tous les résultats et pour tous les scenarios (Figure 37f). Il y aurait de grande différence de changement entre les scenarios à cause d'un grand rendement en eau au niveau du bassin versant. Le scenario catastrophique aurait le plus grand rendement en eau et diffèrerait largement par rapport aux autres. Les scenarios idéal et concerté auraient le plus faible rendement en eau au niveau du bassin versant tandis que le scenario tendanciel aurait le rendement assez élevé que les scenarios idéal et concerté et moyen-faible par rapport au scenario catastrophique.

## **Conclusion**

Le scenario idéal est le scenario ayant la plus grande capacité à continuer à assurer la fourniture des services écosystémiques dans le futur. Il permet d'assurer la rétention de la plus grande quantité des sédiments, le plus moins de sédiments exportés et de perte en sol pour le service de contrôle de l'érosion. Le scenario concerté présente aussi le plus grand potentiel de stockage du carbone, la plus grande séquestration du carbone et le revenu le plus élevé pour le service de régulation du climat. C'est seulement le service d'approvisionnement en eau qui a donné le volume le moins élevé pour le rendement en eau ; cependant, il n'y avait pas de grande différence entre les scenarios et en plus le scenario idéal a augmenté son volume total du rendement en eau considérablement à partir de l'année de base, 2016.

Au contraire, le scenario catastrophique a donné le plus grand service d'approvisionnement en eau à cause de son grand rendement en eau mais tous les autres services y compris le service de contrôle de l'érosion et le service de régulation du climat sont diminué gravement au cours des quatorze années. Le scenario concerté était proche du scenario idéal car ce dernier constituait les mesures les plus adéquates pour arriver à la meilleure décision pour le bien-être de la population du bassin versant.

Le scenario tendanciel a performé mieux que le scenario catastrophique mais reste médiocre par rapport aux scenarios idéal et concerté parce que si on laisse la tendance continuer sans une intervention adéquate, les services écosystémiques ne peuvent pas être optimisés et maximisés d'une manière significative au niveau du bassin versant.

Le logiciel InVEST nous a aidés pour concevoir tous les facteurs possibles qui peuvent influencer la fourniture des services écosystémiques et prendre la meilleure décision par la suite pour bien gérer les services écosystémiques dans le futur. Les services écosystémiques contribuant énormément au bien-être de la population du bassin versant de l'Ourika dans le futur si l'homme n'intervient pas.

Le scenario idéal qui prend en considération la restauration des zones dégradées et le reboisement présente la meilleure façon de gérer les services écosystémiques pour pouvoir optimiser ces services. A l'issue de l'application des mesures de ce scenario, l'érosion qui est le problème majeur au niveau du bassin versant sera contrôlé massivement en retenant autant de sédiments que possible et au même temps la contribution du bassin versant de l'Ourika à la

régulation du climat sera améliorée aussi bien au niveau local, régional que national. L'approvisionnement en eau sera amélioré d'une manière assez importante dans la zone.

Les phénomènes catastrophiques y compris les inondations font partie des problèmes majeurs du bassin versant. Ces phénomènes s'accompagnent d'un autre côté de bénéfices à travers le service d'approvisionnement en eau en mettant à la disposition de l'Homme et un grand volume d'eau qui sera disponible pour son bien-être.

La protection des écosystèmes est un sujet très important et la population doit être sensibilisée pour qu'elle arrive à conserver ces écosystèmes. L'écosystème forestier est l'écosystème qui a donné le plus grand service au niveau du bassin versant ainsi sa préservation et protection est primordiale et elle est prépondérante. Les cultures ont aussi contribué suffisamment à la fourniture des services écosystémiques dans le bassin versant. Alors un système de paiement de services peut être établi pour que toutes ces occupations du sol soient protégées, que la durabilité de fourniture des services écosystémiques soit assurée et à la fin que la population, acteur majeur de ce fonctionnement, soit motivée pour contribuer à leur part à leur bien-être.

# Conclusion générale

InVEST a été appliqué au bassin versant de l'Ourika dans le Haut Atlas central pour modéliser trois services écosystémiques : le stockage du carbone, la rétention des sédiments et le rendement en eau pour l'année de base 2016 comme pour le futur (2030). La génération des quatre scenarios : scenario tendanciel, scenario catastrophique, scenario idéal et scenario concerté nous a amené à avoir les idées sur le comportement de ces services face aux changements positifs et négatifs futur. Les résultats pour l'état actuel des services écosystémiques révèlent que les services au niveau du bassin versant sont dans un bon état actuellement alors que les résultats pour l'état futur des services écosystémiques montrent, que si les mesures appropriées ne sont pas prises, leur fourniture pourrait en pâtir quantitativement et qualitativement.

La rétention des sédiments qui contribue au contrôle de l'érosion et des inondations est plus faible que la perte totale du sol et l'exportation des sédiments. Par conséquent, le bassin versant est capable de contrôler l'érosion jusqu'à un certain niveau dans son état actuel si sa capacité de rétention des sédiments dépasserait la quantité des sédiments exportés. Le service du contrôle de l'érosion sera maximisé dans le futur à travers la restauration et le reboisement des zones dégradées par les espèces forestières et certaines pratiques de cultures avec une approche participative pour augmenter la superficie du couvert végétal. Ce choix décline l'option de gestion « scenario concerté » qui assure la grande quantité de sédiments retenus, soit une augmentation de la rétention de 2 % en 14 ans et la plus petite quantité des sédiments exportés, soit une diminution de 1 %.

Un grand volume d'eau est ruisselé au niveau du bassin versant actuellement qui est expliqué par le service du rendement en eau mais ce volume augmentera dans le futur selon les quatre scenarios. Le scenario catastrophique qui comprend les facteurs des phénomènes catastrophiques et le changement climatique, a donné le plus grand volume du rendement en eau avec une augmentation de 3,4 % en 14 ans. La grande quantité de l'eau qui est ruisselée au niveau du bassin versant est due à la diminution du couvert végétal qui a produit une forte évapotranspiration réelle.

Le service de régulation du climat à travers le stockage et la séquestration du carbone est assez important au niveau du bassin dans l'état actuel mais cela peut être augmenté dans le futur si les stocks de carbone qui ont contribué au sens large à ce service augmentent. L'augmentation du couvert végétal contribue largement à l'augmentation du service de

régulation du climat ce qui est prôné par les scenarios idéal et concerté. Le scenario concerté maximise le service de la régulation du climat par 6,2 % en 14 ans avec une valeur actuelle nette de 73 148 556 dirhams pendant le quatorze ans.

# Références bibliographiques

Bai Y., Ouyang Z., Zheng H., Li X., Zhuang C., & Jiang B., 2012. Modeling soil conservation, water conservation and their tradeoffs: A case study in Beijing. Journal of Environmental Sciences, 24(3), pp. 419-426.

**Banque mondiale, 2014.** Guidance Note on the Social Value of Carbon in project appraisal, 55p.

**Banque mondiale, 2016.** Discounting costs and benefits in economic analysis of World Bank projects, 37p.

**Bennett E.M., Peterson G.D., Gordon L.J., 2009**. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecol. Lett. 12, pp. 1394-1404.

**Berg C., Rogers S., Mineau M., 2015.** Building scenarios for ecosystem services tools: Developing a methodology for efficient engagement with expert stakeholders. Futures 81 (2016), pp. 68–80.

**Borjeson L, M., Hojer K., Dreborg T. E., and Finnveden G., 2006.** "Scenario types and techniques: Towards a user's guide." Futures no. 38 (7): pp. 723–739.

**Bouarais S., 2015.** Contribution à la compréhension des enjeux environnementaux et les 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. 43p.

Castella J. C., Ngoc Trung T., and Boissau S., 2005. "Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: The combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographical information system." Ecology and Society no. 10 (1):27p.

**Croitoru L. et Sarraf M., 2017**. Le Coût de la Dégradation de l'Environnement au Maroc. Environment and Natural Resources Global Practice Discussion Paper #5: 119p.

de Groot R.S., Alkemade R., Braat L., Hein L., Willemen L., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecol. Complex. 7, pp. 260-272.

**DREF du Haut Atlas, 2000.** Projet de développement du B.V d'Ourika (partie amont). Direction Régionale des eaux et forêts du Haut Atlas – Marrakech, Maroc. Pp. 17 -22

**Faress F., 2017.** Impact des inondations sur la planification spatiale : Cas de Setti Fadma. Projet de fin d'étude. Master spécialisé en aménagement et urbanisme. Institut national d'aménagement et d'urbanisme cycle supérieur en aménagement et urbanisme. 62p.

**Geneletti D., 2013.** Assessing the impact of alternative land-use zoning policies on future ecosystem services. Environ. Impact Assess. Rev. 40, pp. 25-35.

Goldstein J.H., Caldarone G., Duarte T.K., Ennaanay D., Hannahs N., Mendoza G., Polasky S., Wolny S., Daily G.C., 2012. Integrating ecosystem-service tradeoffs into landuse decisions. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 109, pp. 7565-7570.

**Hammi S., 2003.** Cartographie des recouvrements de la Végétation naturelle des deux bassins versants de la Rheghaya et de l'Ourika par télédétection spatiale, Haut Atlas de Marrakech, MAROC Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, 43p.

Henrichs T., Zurek M., Eickhout B., Kok K., Raudsepp-Hearne C., Ribeiro T., et al., 2010. Scenario development and analysis for forward-looking ecosystem assessments. Hum. Well-Being, 151p.

**Hulse D.W., et Gregory S.V., 2001.** Alternative futures as an integrative framework for riparian restoration of large rivers. In V. H. Dale, & R. A. Haeuber (Eds.), Applying ecological principles to land management. New York: Springer, pp. 194–212.

Jia X., Shao L., Liu P., Zhao B., Gu L., Dong S., ... & Zhao B., 2014. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (Zea mays L.) under lysimeter conditions. *Agricultural Water Management*, 137, pp. 92-103.

**Kovats S., Valentini R., 2014.** IPCC WGII AR5 – Chapter 23 Europe. 1–93 IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, 93p.

**Logsdon R. A., & Chaubey I., 2013.** A quantitative approach to evaluating ecosystem services. Ecological Modelling, 257, pp. 57-65.

**Lu X., & Zhuang Q., 2010.** Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), pp. 1924-1939.

Meliho M., Khattabi A., Zine El Abidine A., 2016. Etude de la sensibilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant d'Ourika (haut atlas, Maroc). First AMSR Congress and 23rd APDR Congress 'Sustainability of Territories in the Context of Global Changes', 30-31 May 2016, Marrakech, Morocco, pp. 189-196.

**McKenzie E., Rosenthal A., et al., 2012.** Developing scenarios to assess ecosystem service tradeoffs: Guidance and case studies for InVEST users. World Wildlife Fund, Washington, D.C., 39p.

Nelson E., Sander P.H., Marc Conte, Stacie Wolny, Manson S.M., and Polasky S., 2010. "Projecting global land use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models." PloS One no. 5 (12), pp. e14327.

**Nemarundwe N., Wil De Jong, and Peter Cronkleton, 2003.** Future scenarios as an instrument for forest management. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR). 19p.

**Ouhammou, 1986**. Recherche sur l'étagement de la végétation dans le versant de l'oued Ourika, 181p.

**Polasky S., Nelson E., Pennington D., Johnson K.A., 2010.** The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. Environ. Resour. Econ. 48, pp. 219-242.

**Rhanem M., 2015.** La topoclimatologie, un outil au service de l'écologie. Applications et implications possibles au niveau de la gestion des forêts d'altitude des montagnes du Moyen et Haut Atlas (Maroc), pp. 77–107.

**Rihane R., 2015.** Contribution à l'évaluation des services hydrologiques de la forêt et des aménagements antiérosifs dans le bassin versant de l'Ourika. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. Aménagement des forêts. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, 24p.

**Sharp R., Tallis H.T., Ricketts T., Guerry A.D., Wood S.A., et al., 2016.** InVEST VERSION User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 72p.

**Sirtou M., 1995.** Etude hydro-climatologique des bassins du N'Fis, du Rheraya, de l'Ourika et du Zat (MAROC) (Thèse de doctorat). Université de METZ, 142p.

**Tallis H., Polasky S., 2009.** Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. Ann N Y Acad Sci; 1162: pp. 265–83.

**Tao Y., Li F., Wang R., & Zhao D., 2015.** Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: a study from Changzhou, China. Journal of Cleaner Production, *103*, pp. 651-657.

**Vigerstol K.L., Aukema J.E., 2011.** A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. J. Environ. Manag. 92, pp. 2403-2409

Van Notten, Philip W.F., Jan Rotmans, Marjolein B.A., Van Asselt, and Dale S. Rothman. 2003. "An updated scenario typology." Futures no. 35 (5): pp. 423–443

Valentini R., Arneth A., Bombelli A., Castaldi S., Cazzolla Gatti R., Chevallier F., ... & Houghton R. A., 2014. A full greenhouse gases budget of Africa: synthesis, uncertainties, and vulnerabilities. Biogeosciences, 11, pp. 381-407.

## **Annexes**

Annexe 1. Le tableau de transition pour le scenario tendanciel en 2030

Id	Name	Short	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Percent	Area	Priori
		Name										Change	Change	ty
0	Cultures irrigues	Cult- irrigue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	8
1	Forêts Denses	Foret- den	7	0	4	5	0	0	0	0	0	0	0	7
2	Forets Moyennement Denses	Foret- moy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	9
3	Forets Claires	Foret- clair	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.42	0	10
4	Sols dénudes	Sol	0	0	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Xérophytes Epineuses	Xérophy te	8	0	7	7	0	0	0	3	9	0	0	0
6	Lits de l'oued	Oued	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Cultures en Bour	Cult- bour	0	0	0	0	0	0	0	0	9	5	0	8
8	Constructions	Const	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	8

Annexe 2. Le tableau de transition pour le scenario catastrophique en 2030

id	Name	Short Name	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Percent Change	Area Change	Priority
0	Cultures irrigues	Cult- irrigue	0	0	0	0	7	0	9	0	0	0	0	0
1	Forêts Denses	Foret-den	0	0	0	0	5	0	4	0	0	0	0	0
2	Forets Moyennement Denses	Foret-moy	0	0	0	0	5	0	4	0	0	0	0	0
3	Forets Claires	Foret-clair	0	0	0	0	8	0	4	0	0	0	0	0
4	Sols dénudés	Sol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	10
5	Xérophytes Epineuses	Xerophyte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Lits de l'oued	Oued	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	9
7	Cultures en Bour	Cult-bour	0	0	0	0	8	0	6	0	0	0	0	0
8	Constructions	Const	0	0	0	0	8	0	7	0	0	0	0	0

Annexe 3. Le tableau de transition pour le scenario idéal en 2030

id	Name	Short Name	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Percent Change	Area Change	Priority
0	Cultures irrigues	Cult- irrigue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Forêts Denses	Foret-den	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8
2	Forets Moyennement Denses	Foret-moy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	9
3	Forets Claires	Foret-clair	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	10
4	Sols dénudés	Sol	0	5	5	7	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Xérophytes Epineuses	Xerophyte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Lits de l'oued	Oued	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Cultures en Bour	Cult-bour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Constructions	Const	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe 4. Le tableau de transition pour le scenario concerté en 2030

id	Name	Short Name	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Percent Change	Area Change	Priority
0	Cultures irrigues	Cult- irrigue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	6
1	Forets Denses	Foret-den	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8
2	Forets Moyennement Denses	Foret-moy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	9
3	Forets Claires	Foret-clair	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	10
4	Sols dénudés	Sol	1	5	5	7	0	0	0	3	1	0	0	0
5	Xérophytes Epineuses	Xerophyte	3	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0
6	Lits de l'oued	Oued	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Cultures en Bour	Cult-bour	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	6
8	Constructions	Const	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5