

Quantification de la dégradation du paysage agricole et évaluation économique d'un aménagement approprié : cas du bassin versant Douimis (Tunisie)

SIHEM JEBARI*, SANA BOUGUERRA*, ALI CHEBIL*, LAMIA BAHLOUS**,
SARRA TOUZI***

DOI: 10.30682/nm2505g

JEL codes: Q15, Q17

Abstract

In the context of climate change, soil erosion constitutes a significant threat to land conservation, water security, and ecosystem functioning. The study area covers Douimis catchment located in the northern part of Tunisia. The main objectives targeted, as well as the approaches considered in this present paper are 1- to assess the impact of climate change on soil loss based on RUSLE/GIS methodology, 2- to set an adaptation plan based on a participatory approach, then 3- to study its economic viability using Net Present Value (NPV) and Benefit-Cost Ratio (BCR) methods. The results showed that the basin is subject to a significant soil loss of 18 t/ha/year in the current situation. The impact of climate change has increased the erosion risk by 30% in 2050. This risk has been reduced by about 40% when introducing water and soil conservation measures. The economic analysis displayed that the Douimis Basin development plan constitutes an interesting investment opportunity that deserves the attention of local and national authorities in the search for funding. This shows the usefulness of investing in landscape management to prevent the degradation of natural resources.

Keywords: Impact assessment, Climate change, Soil erosion, Adaptation, Development plan, Economic cost.

1. Introduction

Pour assurer un développement durable, l'avenir d'un pays dépend de la gestion de ses ressources en eau et en sol (Hartmann *et al.*, 2024). Ces deux ressources constituent la principale base des moyens de subsistance et du bien-être humains, y compris l'approvisionnement en nourri-

ture, en eau douce et de multiples autres services écosystémiques (Bouguerra *et al.*, 2024 ; Hou, 2023 ; Liu, 2024). En septembre 2015, un agenda comprenant 17 objectifs pour le développement durable (ODD) a été adopté par les dirigeants du monde (ONU, 2015). Ces objectifs visent à s'attaquer, entre autres, à des problèmes clés tels que le stress hydrique, la sécurité alimentaire la perte

* Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts - INRGREF, Tunis, Tunisie.

** Société du Canal de Provence France (agence Tunisie), Tunis, Tunisie.

*** Le Partenariat Global pour l'Eau - Méditerranée (GWP-Med), Athens, Greece.

Corresponding author: bouguerra.sana@gmail.com

de biodiversité, la dégradation des terres et le changement climatique. En 2015, les parties de la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification (CNULCD) se sont appuyées sur les engagements des ODD, particulièrement l'objectif 15, pour formuler un plan de travail pluriannuel complet. Ce dernier vise à atteindre la neutralité carbone et la neutralité en matière de dégradation des terres en mentionnant les aspects suivants : « *Protéger, restaurer et promouvoir l'utilisation durable des écosystèmes terrestres, assurer la gestion durable des forêts et la lutte contre la désertification, arrêter voire inverser la dégradation des terres et mettre fin à la perte de biodiversité* ». En décembre 2015, un accord sur le climat a été conclu par les parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), cherchant à lutter contre la désertification, restaurer les terres et les sols dégradés, notamment les terres touchées par la sécheresse et les inondations, et s'efforcer de parvenir à un monde sans dégradation des sols d'ici 2030. Ces démarches arquent un moment important dans la résolution de ces défis interdépendants et soulignent également l'opportunité de les étudier plus en profondeur.

La dégradation des sols est un processus biologique, chimique et physique. Il peut s'agir de la perte de matière organique, de la baisse de la fertilité et de l'état structurel des sols, de l'érosion, de changements défavorables de la salinité, de l'acidité ou de l'alcalinité, et des effets de produits chimiques toxiques, de polluants ou d'inondations excessives (Roose, 2010 ; Ouvry, 2012). Actuellement, environ 33% des sols du monde sont modérément ou fortement dégradés. Quarante pour cent (40%) de ces sols dégradés se trouvent en Afrique et la plupart se trouvent dans des zones confrontées par la pauvreté et l'insécurité alimentaire. L'impact des dégradations des sols sur la sécurité alimentaire nécessite des actions stratégiques et immédiates (FAO, 2015 & 2016).

Par conséquent, les politiques de gestion des terres apparaissent comme un élément clé pour le développement durable. En même temps, le changement climatique présente d'autres défis, en particulier dans les pays arides où l'eau est déjà rare, les précipitations sont variables et les

options de subsistance sont limitées. Plusieurs études ont souligné la nécessité d'examiner ensemble les problèmes de dégradation des terres sous les effets du changement climatique afin d'assurer la résilience à la fois des écosystèmes et de la population (Doulabian *et al.*, 2021 ; Emadodin *et al.*, 2012).

L'érosion des sols était considérée comme le type de dégradation le plus grave qui menace la sécurité alimentaire et l'économie naturelle des régions, tant au niveau local que mondial (Nunes *et al.*, 2020). Elle est l'un des plus grands problèmes scientifiques du monde. Elle a diverses conséquences négatives, telles que la dégradation des terres, la diminution de la qualité de l'eau, la sédimentation des rivières et la destruction des routes (Kanianska *et al.*, 2024). Ainsi, l'érosion des sols causée par l'activité anthropique dans le bassin versant est un facteur clé de la sédimentation des barrages. Les sédiments sont transportés en aval par le réseau hydrographique, qui finissent par occuper les fonds des retenues d'eau (Irie *et al.*, 2012).

Un modèle approprié d'érosion des sols peut être appliqué pour mesurer les niveaux d'érosion du sol d'une région spécifique. En effet, la modélisation de l'érosion peut être combinée à un outil spatial et statistique pour localiser et mesurer la perte en sol optimisant ainsi une planification environnementale (Bouguerra *et al.*, 2021).

De nombreux modèles mathématiques catégorisés comme empiriques, conceptuels, basés sur la physique ou orientés vers les processus sont disponibles pour estimer l'érosion du sol à différentes échelles spatiales et temporelles. Parmi les plus connus figurent le Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Morgan & Nearing, 2011) ou le modèle européen d'érosion du sol EUROSEM ; Morgan *et al.* (1998) ainsi que la mise à jour des approches empiriques existantes telles que l'équation universelle de perte de sol (USLE) (Wischmeier & Smith, 1965). Actuellement, l'USLE et l'USLE révisée (RUSLE) (Renard *et al.*, 1997) sont de loin les modèles de prévision de l'érosion des sols les plus largement appliqués au niveau mondial et selon (Ghosal et Das Bhattacharya, 2020). Sur la base de son approche forfaitaire à l'échelle du bassin versant et de sa relative simplicité et robustesse, et parce qu'il

représente une approche standardisée. Elle est également considérée comme la méthode la plus efficace pour évaluer la perte de sol en l'absence de mesures. Les modèles les plus connus basés sur la technologie USLE/RUSLE sont le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold, 1998), l'AGricultural Non-Point Source Pollution Model (AGNPS) (Onstad, Bosch, & Anderson, 1989), le Water and Tillage Erosion and Sediment Model (Watem/Sedem) (Van Rompaey, 2001) et la Chinese Soil Loss Equation (Liu *et al.*, 2002).

La Tunisie, comme tous les pays de la méditerranée, est confrontée à des défis environnementaux tels que l'érosion et les phénomènes extrêmes, à savoir les sécheresses et les inondations (Dhehibi *et al.*, 2018). Ces phénomènes ont fréquemment touché le pays au cours des dernières décennies et la hausse des températures a conduit à une situation plus difficile (MARHP, 2022). A savoir, plus de 2.6 millions d'hectares (soit 17% du territoire) de sols, sont sensibles à très sensibles à l'érosion hydrique (DGACTA, 2017).

L'objectif principal de cet article est d'évaluer le niveau de dégradation des ressources en sol dans le contexte actuel et sous contrainte climatique. Plus encore, il aide à identifier les actions d'adaptation à préconiser en termes de gestion

future de ces mêmes ressources, et évaluer la rentabilité économique de ces actions.

Les objectifs spécifiques sont particulièrement : (a) mettre en œuvre la méthode RUSLE/SIG (Equation Universelle de perte en sol combiné au système d'information géographique) en intégrant les données de télédétection, afin d'estimer la distribution spatiale de l'érosion des sols de l'ensemble de la zone d'étude, (b) étudier l'impact du changement climatique sur l'état de dégradation des terres (c) évaluer l'impact d'un plan d'aménagement pour prévenir les pertes en terres (c) évaluer la rentabilité économique de ce plan d'aménagement.

2. Matériels et méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant Douimis appartient à la délégation de Sejnane, gouvernorat de Bizerte. La population dans cette délégation est estimée à 20126 habitants (INS, 2024). Ce bassin, est l'un des affluents de l'unité hydrologique du lac Ichkeul, se situe au Nord Est de la Tunisie (Figure 1). Il couvre une superficie de 89,73 km². Il est drainé principalement par Oued Douimis.

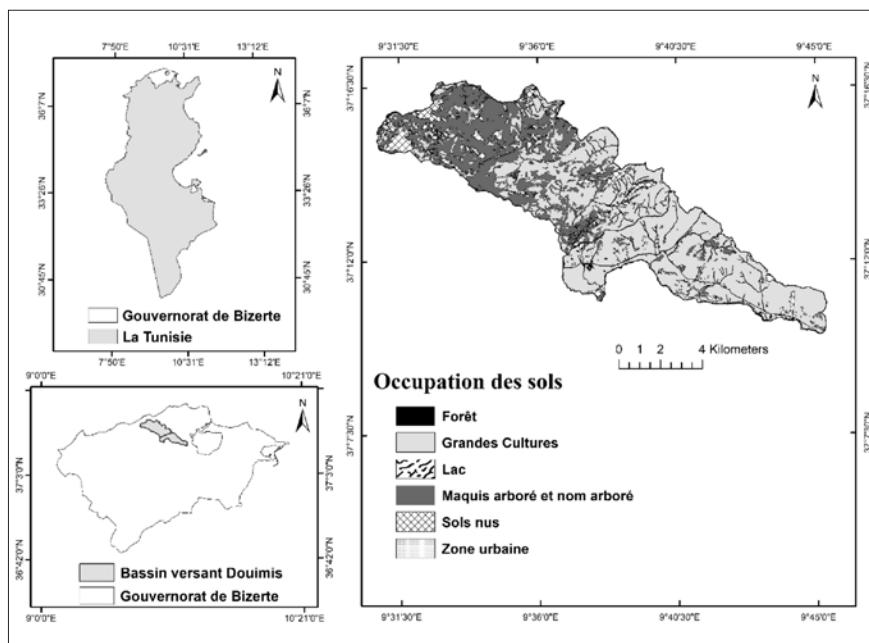
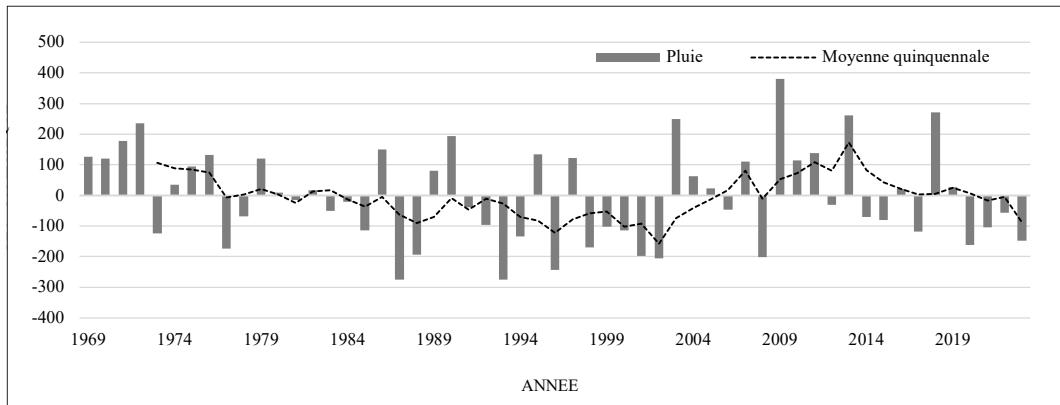


Figure 1 - Localisation et carte d'occupation des sols pour l'année 2023 du bassin versant Douimis.

Figure 2 - Anomalie de la pluie annuelle à la station Bizerte pour la période 1969-2023.



La zone d'étude est soumise à un climat tempéré, caractérisé par une période hivernale humide qui s'étale du mois d'Octobre au mois de février. Le climat est de type humide, alors qu'au cours des mois de Juin, Juillet et Août, le climat varie de sec à très sec. La température moyenne mensuelle de la région est estimée à 18,5 °C. La zone d'étude fait partie de l'étage bioclimatique subhumide, caractérisée par l'irrégularité de la pluviométrie, souvent avec une moyenne annuelle de 520 mm. Il s'agit donc d'un climat méditerranéen tempéré caractérisé par des étés chauds, des hivers doux et pluvieux (Figure 2).

La Figure 2 montre que la région connaît des périodes d'anomalies. En effet, on observe un écart par rapport à la moyenne positif, suivie de périodes d'anomalies négatives. Ces dernières sont marquées par un manque de précipitations par rapport à la moyenne historique. Ces constats sont à l'origine des situations de sécheresse, affectant l'approvisionnement en eau, les cultures agricoles, et les écosystèmes.

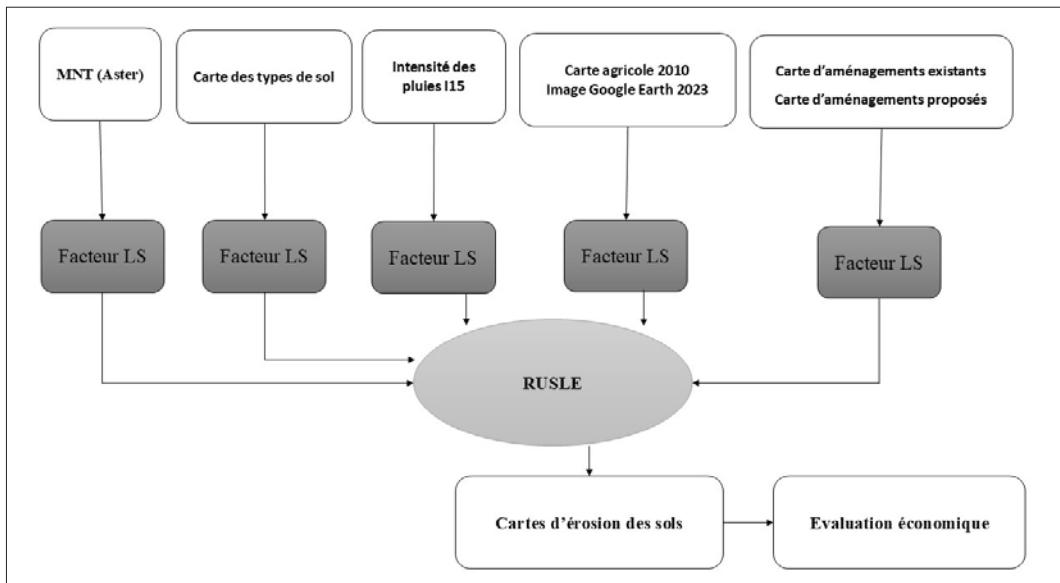
Ce travail est élaboré dans le cadre du programme panafricain «Eau, Climat et Développement pour l'Afrique (WACDEP)». Le programme avait pour objectif d'appuyer la planification des investissements d'adaptation au changement climatique à l'échelle territoriale en recourant aux connaissances et outils scientifiques les plus récentes et en adoptant un processus d'engagement inclusif des parties prenantes. La première étape a porté sur l'évaluation participative de la vulnérabilité au chan-

gement climatique qui a permis de décortiquer la sensibilité et la capacité d'adaptation des écosystèmes naturels et socio-économiques les plus vulnérables. Ceci a permis de discerner les paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour réduire la vulnérabilité de ces écosystèmes et de proposer les solutions d'adaptation les plus appropriées. Une priorisation de ces solutions a été ensuite entreprise, octroyant aux aménagements de conservation des eaux et des sols une haute priorité. La quantification de la dégradation des terres sous contrainte de changement climatique pour une conception adéquate des aménagements à proposer a été essentielle. Les résultats de ce travail de quantification et de conception des aménagements ont été incorporés dans le plan d'aménagement intégré et participatif de gestion des ressources naturelles dans le bassin de Douimis (GWP-MED, 2017).

2.2. Approche méthodologique

La modélisation est un outil crucial pour analyser la dégradation des terres due au changement climatique et évaluer l'impact des plans d'aménagement proposés. En intégrant diverses données (climatiques, hydrologiques, pédologiques, etc.), elle permet de simuler des scénarios futurs et de comprendre les interactions complexes entre ces facteurs environnementaux. Cela aide à anticiper les effets des aménagements sur les écosystèmes et à évaluer l'efficacité des stratégies de conservation ou d'adaptation. Dans le présent travail,

Figure 3 - Diagramme décrivant la démarche méthodologique.



La modélisation des pertes en terres a été mise en œuvre doublement. En premier, pour l'évaluation de l'état de dégradation des sols dans le contexte actuel et en second, sous contrainte climatique. Une réflexion pour la recherche des outils et des points d'entrée pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en sol. Les étapes de la mise en œuvre de l'approche RUSLE/SIG pour estimer les pertes en terres se résument dans la Figure 3.

Afin d'estimer les pertes en sol à l'échelle du bassin versant Doumis, l'Equation Universelle des Pertes Révisée (RUSLE) développée par Renard *et al.* (1997) a été utilisée. La modélisation de l'érosion hydrique sous contrainte climatique a été réalisée en premier temps en considérant l'analyse de la tendance (Jebari *et al.*, 2010). Cette analyse a permis de traiter la série pluviographique régionale et caractériser le facteur de l'érosivité des pluies (R) sous l'impact du changement climatique. Cette démarche garde par ailleurs les autres paramètres constants. En deuxième temps, il a été procédé à l'établissement d'une carte d'occupation du sol relative à l'horizon 2050. Cette carte s'est basée sur l'étude d'adaptation des écosystèmes tunisiens (MARH, 2007). Une simulation combinée intégrant l'érosivité des pluies et la couverture

des sols à l'horizon 2050 a été également établie pour analyser l'effet direct lié à la variation de la pluie et l'effet combiné rattaché au changement de l'occupation du sol.

Outre les simulations et l'évaluation de la sensibilité des terres à l'érosion hydrique en situation actuelle et sous contrainte climatique, l'outil modélisation permet dans la phase de planification, de traduire les orientations d'adaptation en actions d'aménagement. En effet, les composantes du plan d'aménagement et de gestion du paysage agricole ont été construites avec les parties prenantes en schéma d'aménagement. Cette démarche permet d'évaluer l'impact des actions d'adaptation préconisées sur l'état future de dégradation des sols.

2.2.1. Description des données

Le modèle numérique du terrain (TIN), la carte d'occupation des sols, les précipitations et les types des sols sont essentiels pour le modèle RUSLE. Les pluies journalières et pluviographiques [1969-2005] (15min) de la station Sidi Hmed et celles mensuelles [1969-2023] de la station de Bizerte au gouvernorat sont obtenues auprès du l'Institut National de la Météorologie (INM). La carte des sols en Tunisie (CRDS, 1979 ; échelle 1/200 000) a été obtenue par la

Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles (DGAC-TA). La carte agricole considérée émane de la Direction Générale de la Forêt (DGF, 2010).

Le MNT de la zone d'étude présente une résolution spatiale de 30 m et est fourni par la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ASTER GDEM (Version 2: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex>). Des images google earth de résolution 0.5 m pour l'année 2014 et 2023 ont été utilisées au sein de cette étude (September, 2024).

2.2.2. Modélisation de l'érosion hydrique

Il existe plusieurs modèles d'érosion des sols, plus ou moins complexes. L'un des modèles empiriques les plus utilisés pour évaluer l'érosion en nappe et en rigoles est l'USLE, développé par Wischmeier et Smith en 1965. L'USLE a été développé à l'origine, principalement, pour estimer l'érosion des sols dans les terres cultivées ou sur des terrains en pente douce. Il existe deux versions de ce modèle, à savoir, l'une révisée (RUSLE) et la seconde modifiée (MUSLE) (Renard, 1997).

Dans notre cas d'étude l'estimation des pertes en terres à l'échelle du bassin versant Douimis est réalisée à travers la version révisée de l'Equation Universelle des Pertes en Terres RUSLE couplée à un SIG. Cette approche permet d'établir une carte du risque érosif au niveau du bassin versant de Douimis et de connaître les quantités des pertes en sol (t/ha) pouvant être détachées annuellement pour chaque pixel d'un secteur donné. De ce fait, il est possible de localiser les zones de forte érosion hydrique nécessitant une intervention prioritaire. Selon le modèle de Wischmeier et Smith (1957), la perte en sol est une fonction multiplicative qui se présente comme suit :

$$A=R.K.L.S.C.P$$

Avec A, la perte en sol moyenne annuelle (t/ha) ; R, le facteur d'érosivité de la pluie (MJ. mm/ha. H) ; K, le facteur érodabilité du sol (t. h/MJ.mm) ; LS, le facteur topographique (adimensionnel) de la parcelle qui est représenté par la longueur de la pente et son degré, respectivement S et L ; C, le paramètre du couvert végétal (adimensionnel) et P, le facteur des pratiques antiérosives (adimensionnel)

L'érosivité des pluies est définie comme étant la capacité de la pluie à produire l'érosion. Le calcul de l'érosivité des pluies R, est initialement basé sur les données pluviographiques de la station de Sidi hmed pour la période 1969-2005. Chaque intervalle d'averse est caractérisé par une intensité des pluies qui est déduite de la hauteur de l'orage en question. Pour toute averse, l'énergie totale E a été calculé selon la méthode décrite dans (Jebari et al, 2010). Après avoir calculé l'érosivité pour cette période, des simulations ont été réalisés pour estimer la valeur correspondante à l'année 2023.

Le facteur érodabilité du sol K caractérise la sensibilité du sol à l'érosion. Il mesure la plus ou moins grande résistance du sol à la dégradation. Les valeurs du facteur K sont définies en se basant sur la carte des sols en Tunisie (CRDS, 1979; échelle 1/200 000) (Tableau 2).

La topographie est représentée par la longueur de la pente et son degré, respectivement S et L. Pour mettre en évidence l'interaction des deux facteurs dans le processus de l'érosion hydrique des sols, on considère généralement un facteur unique (LS) calculé avec le System d'Information Géographique arcGIS (Renard, 1997).

Le facteur C exprime l'influence des méthodes culturelles, des sols et des cultures sur les pertes en sol par érosion. Ce facteur incorpore les effets du couvert végétal de la séquence des cultures, du niveau de la productivité, de la longueur de la saison de croissance, des méthodes culturelles et de la quantité des résidus laissés sur le sol (Tableau 3). Ajout d'une référence liée à la définition du paramètre P est le facteur des pratiques antiérosives. Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eau de ruissellement ainsi que sa vitesse. Ce facteur limite l'importance de l'érosion. Il représente le ratio des pertes des terres associées à une pratique de conservation des sols associée à la culture en lignes dans le sens de la pente, toutes les autres conditions étant égales par ailleurs. Ce facteur est compris entre 0 et 1 (Cormary et Masson, 1964). Plusieurs travaux antérieurs réalisés en Tunisie dans des contextes hydrologiques et climatiques similaires ont déjà évalué la sensibilité du modèle RUSLE à ses paramètres d'entrée (Zante et Collinet, 2001). Les

résultats de ces études ont été pris en compte pour orienter le choix des paramètres et renforcer la robustesse des simulations produites.

Toute la procédure a été intégrée sous un Système d'Information Géographique (SIG) afin de quantifier et de cartographier l'aléa de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Douimis. Le modèle a été calibré pour l'année 2014, puis une simulation a été réalisée pour l'année 2023. La validation des résultats des pertes en sol considérés par le modèle pour le bassin versant Douimis est faite en se référant aux mesures bathymétriques du barrage Ghezala conduites par la DG/BGTH. La similitude entre les deux bassins versants ci-dessus mentionnés vient par la faible distance qui les sépare (10 km), l'appartenance au même étage bioclimatique et le partage des caractéristiques de l'occupation du sol. Le choix du bassin versant Ghezala comme référence, vient en absence de toute mesure d'érosion et d'envasement à l'échelle de l'unité hydrologique Douimis. Nous nous sommes référés aux données secondaires de l'Observatoire National de l'Agriculture (ONAGRI, 2021), qui rapporte les taux de sédimentation de plusieurs barrages en Tunisie. Plus précisément, nous avons utilisé le taux de sédimentation du barrage de Ghezala (17,3 t/ha/an) comme valeur de référence pour calibrer le modèle.

2.3. Impact du changement climatique sur l'érosion des sols

Les simulations de l'érosion sous contrainte climatique ont été réalisées à travers la modification de deux facteurs du modèle, à savoir : l'érosivité des pluies (R) et l'occupation du sol (C). Le facteur de l'érosivité (R) s'est basé sur les données pluviographiques (intensités de pluie max à pas de temps 15 minutes) de la station de Sidi Hmed située au gouvernorat de Bizerte. La durée d'observation considérée pour cette analyse est de 41 ans (1964 à 2005). Pour les années 2014 et 2023, l'érosivité des précipitations a été calculée en utilisant une série pluviométrique annuelle (1969-2023). Ceci, en raison de l'in disponibilité des intensités de pluie I15. Finalement, la considération de l'effet du changement

climatique en terme du facteur R a été assurée à travers une analyse de la tendance.

Pour le paramètre du couvert végétal (C), l'intégration de l'effet du changement climatique a été faite à travers l'élaboration d'une carte d'occupation du sol à l'horizon 2050 déduite des résultats de l'étude d'adaptation des écosystèmes tunisiens (MARCH, 2007).

2.4. Évaluation de la réduction des pertes en terre selon le schéma d'aménagement préconisé

Les actions suggérées pour une réduction de la vulnérabilité des ressources naturelles aux effets du changement climatique présentent les principes d'une gestion durable et résiliente au changement climatique des ressources naturelles. La combinaison de ces actions doit aboutir à une gestion cohérente et intégrée du paysage et des terres agricoles (GWP-Med, 2017). Dans la présente section, nous faisons référence plus spécifiquement aux actions de développement au niveau des terres privées soumises au régime forestier, le respect de la vocation des terres des cultures, le développement de l'agriculture de conservation, la protection et l'aménagement des terres de cultures par des ouvrages hydroagricoles. La combinaison et la planification spatiale de ces actions constitue le plan résilient au changement climatique de gestion des terres (GWP-Med, 2017). Ce plan de gestion des terres a été élaboré lors des réunions de planification en utilisant une matrice synthétique. Les actions d'aménagement de courts et longs termes sont traduits en cartes thématiques par l'outil SIG. Ce dernier, a permis de simuler les pertes en terres avec l'occupation de sol projetée, occupation qui intègre les mesures d'adaptation proposées. En effet, les discussions entreprises lors des ateliers ont couvert les types d'intervention ainsi que leur faisabilité. Ainsi, le plan d'aménagement a été conçu selon l'approche participative adoptée par le projet. Les aménagements proposés ont couvert une superficie de 48,83 km², soit 55% de la superficie totale du bassin et ont servi à assurer les simulations de quantification des pertes en terres. Le Tableau 1 suivant présentent l'emplacement et les superficies par type d'aménagements proposés. Les me-

Tableau 1 - Superficie des aménagements proposés.

Type d'aménagement	Superficie (ha)
Ados consolidés en espèces pastorales	60
Agriculture de conservation	1250
Bandes enherbées consolidées par l'acacia	198
Bandes alternées	323
Banquettes consolidées par des oliviers	425
Banquettes mécaniques	1060
Réservoir	133
Cordons en pierres sèches	1446
Cuvettes individuelles	803
Non Aménagé	2941
PPI	334

sures proposées ont été définies suite à un processus participatif impliquant les parties prenantes locales. Un dispositif de suivi-évaluation à long terme, incluant des indicateurs d'acceptabilité sociale, est recommandé pour assurer la durabilité des interventions.

2.5. Comparaison des coûts et des avantages de deux situations : sans et avec aménagement

L'évaluation économique du plan d'aménagement se base sur la comparaison des coûts et des avantages de deux situations, à savoir, sans et avec plan d'aménagement. La méthode d'analyse coût/bénéfice a été appliquée par plusieurs auteurs en Tunisie pour l'analyse économique de conservation des eaux et sols (Daly-Hassen *et al.*, 2010; Daly-Hassen *et al.*, 2019, Souissi *et al.*, 2023). Cette méthode permet la prise de décision en matière d'investissement.

Ainsi, la méthode consiste à mesurer le contre-factuel et l'attribution afin de saisir le changement qui peut être spécifiquement à l'apport du projet. Cette comparaison doit prendre en compte la dimension temporelle. En effet, pour tout projet d'investissement les flux des dépenses et des avantages sont répartis dans le temps d'une manière inégale. La durée de vie du projet concernée par l'évaluation est fixée à 30

années au vu de l'importance de l'arboriculture et de l'impact à moyen et long terme des investissements en infrastructure et en aménagements hydro-agricoles.

L'analyse coûts-avantages (ACA) repose sur l'hypothèse que les avantages et les coûts occasionnés après le démarrage du projet doivent être actualisés afin de refléter leur valeur actualisée nette (VAN). A chaque fois qu'on a une VAN supérieure à zéro le projet est jugé rentable.

Mathématiquement la formule de calcul de la VAN en tenant de deux situations s'exprime comme suit (Gittinger, 1982 ; Bojo, 1992 ; De Graaff and Kessler, 2009):

$$VAN_s = \sum_{t=1}^T \frac{AA_{ts} - CA_{ts}}{(1+i)^t}$$

Avec :

VAN_s : Valeur actualisée nette (exprimée en Dinars) dans le scenario S

AA_{ts} : Avantage additionnel de l'année t et scénario S

CA_{ts} : Coût additionnel de l'année t et scénario S

T : Durée du projet exprimé en nombre d'année

i : Taux d'actualisation sociale exprimé en pourcentage

Trois autres critères d'évaluation de la rentabilité du projet ont été considérés. Le Ratio Avantages-Coûts (RAC) est obtenu en divisant la valeur actuelle du total des avantages par la valeur actuelle du total des coûts. Le RAC renseigne sur le nombre de dinars tunisiens (DT) qu'a généré le projet pour chaque (DT) investi sur la période correspondante à la durée de vie du projet. Le taux de rentabilité interne TRI, n'est autre chose que le taux d'actualisation qui annule la somme des flux financiers actualisés et qui donne un RAC égale à l'unité. Le troisième critère est celui du délai de récupération du capital investi.

Les coûts additionnels sont déterminés par le coût d'investissement. Le coût total du plan d'aménagement territorial concerté du bassin versant de Douimis est de l'ordre de 19 272,5 mille DT. La répartition de ce coût par volet d'investissement est comme suit : infrastructures et ressources naturelles 15 155 mille DT, production agricole 3 689, 5 mille DT et accompagnement 435 mille DT. Les investissements pour la

concrétisation des composantes des trois volets seront réalisés durant les cinq premières années d'exécution du projet (GWP-Med, 2017).

L'estimation des avantages additionnels du projet s'est appuyée sur une série d'hypothèses qui reflètent la nature des interventions projetées dans le cadre du projet. Outre le changement dans l'occupation du sol et le redimensionnement des activités agricoles, la productivité de la terre augmentera sensiblement bénéficiant des investissements matériels et immatériels prévus. Toutes les analyses menées suite à l'enquête et aux multiples discussions de groupe sur le terrain avec la forte participation des habitants du BV et des responsables du développement à l'échelle régionale. La comparaison de deux situations permet de mettre en exergue le changement d'un système de production essentiellement céréalier à un système plus diversifié avec des produits à hautes valeurs ajoutées.

Pour le calcul de ces avantages additionnels, nous avons considérés la différence entre marge brute globale MBG avec projet (MBG-AP) et sans projet (MBG-SP). Les marges brutes moyennes des activités agricoles sont égales au produit brut moins les charges variables pour chaque spéculation. Les charges variables sont estimées en se basant sur des fiches technico-économiques représentatives de la moyenne de la zone (GWP-Med, 2017). Les MBG sans et avec projet sont estimés annuellement à 6 058 mille DT et 8 934 mille DT, respectivement. La

MBG-AP, estimée pour une année de croisière, a été pondéré durant les sept premières années du projet pour tenir compte de l'évolution de la production arboricole et maraîchère (nouvelles plantations, nouveau périmètres irrigués) et du rythme d'adaptation des agriculteurs aux nouveaux systèmes de productions plus intensifs et aux nouvelles pratiques d'adaptation au CC.

Pour prendre en considération l'impact de la perte en terre sur la MBG-SP, trois taux d'abaissement de la MBG ont été testés. Le premier est une réduction annuelle de 1% de la MBG-SP (hypothèse réaliste et retenue pour le calcul du TRI) et le deuxième est une réduction du même résultat au rythme de 2% annuellement (hypothèse pessimiste). La troisième hypothèse, très optimiste, avec non-abaissement des résultats sous l'effet de la perte de sol.

3. Résultats et discussions

3.1. Evaluation de l'érosion des sols à l'état actuel

L'érosivité des précipitations est variable d'une année à une autre (Figure 4). L'agressivité moyenne annuelle des pluies sur la zone d'étude est évaluée à 681,6 MJ. mm/ha.h.an.

La quantification des pertes en sol à l'échelle du bassin versant Douimis en situation actuelle (année 2023) a permis de spécifier une valeur moyenne de l'ordre de 17.81 t/ha/an (Tableau

Figure 4 - Variation annuelle de l'érosivité des pluies/ titre graphique une barre de la moyenne devrait être représentée.

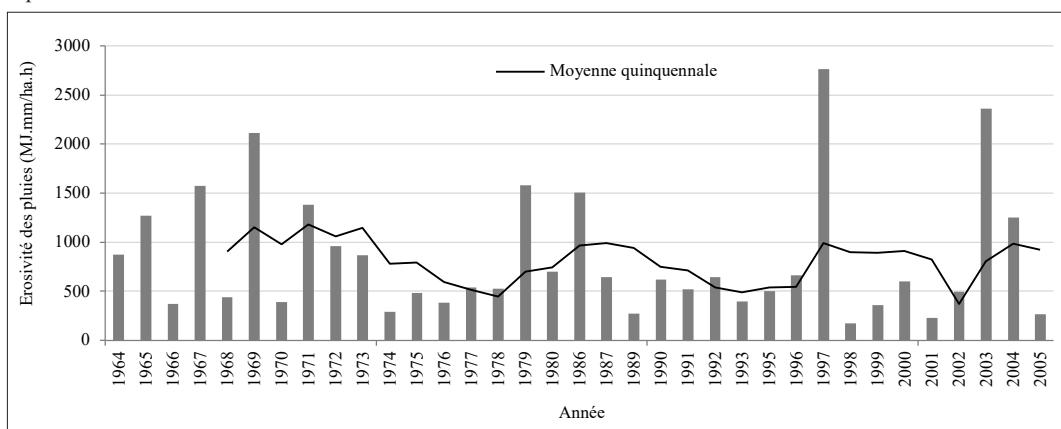
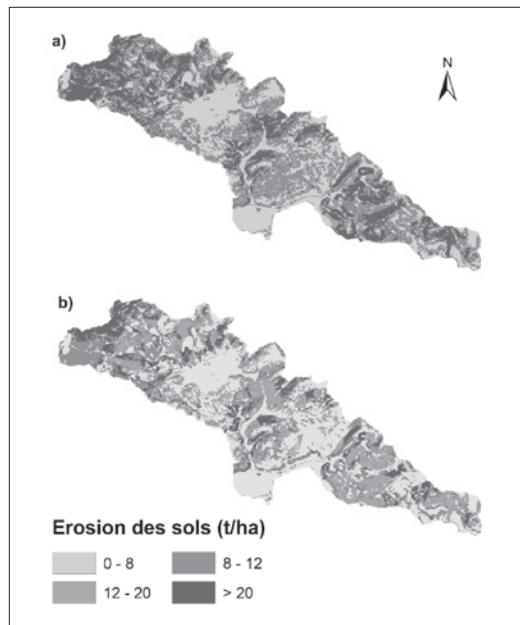


Figure 5 - Répartition spatiale des classes d'érosion des sols a) sous impact du changement climatique et b) en combinant impact changement climatique et plan d'aménagement proposé pour l'horizon 2050.



2). La description du taux de dégradation en considérant les différentes classes d'érosion hydrique montre des proportions bien différentes. En effet, 32% de la superficie totale est soumise à un taux de perte en sol inférieur à 8 t/ha. Une seconde unité s'étend sur 18% de la superficie et se trouve soumise à des pertes en terre qui oscillent entre 8 et 12 t/ha/an. Une troisième unité de grandeur équivalente (22%) montre une érosion hydrique variant de 12 à 20 t/ha/an.

Une quatrième unité qui couvre 28% montre des taux d'érosion hydrique dépassant 20 t/ha/an (Tableau 3). Il s'avère que les valeurs faibles du risque érosif sont concentrées essentiellement dans la partie aval du bassin versant. Alors que les aires à risque élevé sont caractérisées par une végétation clairsemée et des altitudes élevées.

3.2. Evaluation de l'érosion sous impact du changement climatique

L'approche adoptée dans cette étude repose sur l'analyse des tendances historiques observées, conformément au cadre méthodologique exploratoire retenu. L'érosivité future des précipitations a été estimée à 558,912 MJ·mm/ha·h·an, correspondant à une diminution de 18 % par rapport à la situation actuelle. Cette valeur a servi de base pour évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur les pertes en sol. Toutefois une combinaison de cette information à la dégradation du couvert végétal montre un taux moyen de pertes en sol de 23.25 t/ha/an montrant une augmentation globale de l'érosion hydrique de 30% à l'horizon 2050. Le Tableau 2 et la Figure 5a présentent les changements au niveau des superficies des classes d'érosion.

Les changements au niveau de la surface des classes d'érosion sont présentés dans le Tableau 2 et la Figure 5a. Le Tableau 2 illustre la détérioration de la situation sous l'effet du changement climatique. Les surfaces soumises à une érosion sévère augmentent de manière significative, représentant 49 %, soit près de la moitié du bas-

Tableau 2 - Répartition des classes des pertes en sol en situation actuelle, sous impact changement climatique et plan d'aménagement.

Scenario	Etat actuel	Sous impact CC	Avec aménagement
Erosion des sols moyenne (t/ha/an)	17.81	23.25	14.4

Tableau 3 - Répartition des classes des pertes en sol en situation actuelle, sous impact changement climatique et plan d'aménagement.

Classe d'érosion (t/ha/an)	0 - 8	8 - 12	12 - 20	> 20
Superficie en situation actuelle (%)	32	18	22	28
Superficie sous impact du changement climatique (%)	15.25	13.51	22.20	49.04
Superficie sous impact du changement climatique et aménagement (%)	33.5	21	17.5	28

sin versant. Simultanément, le pourcentage de terres faiblement érodées est de 15,25 %, ce qui indique une intensification généralisée des processus d'érosion. Les classes intermédiaires présentent également un déclin, ce qui indique un déplacement des caractéristiques de surface vers les classes les plus érodées. Ces résultats mettent en évidence l'augmentation du risque d'érosion due aux effets du climat futur.

3.3. Évaluation de l'impact des pertes en terre selon le schéma d'aménagement préconisé

En considérant la carte d'occupation des terres résiliente au changement climatique, la simulation entreprise par l'approche RUSLE/SIG a montré une réduction de la vulnérabilité de l'ordre de 30%. En effet, nous avons observé un passage du taux moyen d'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant Douimis de 18 t/ha/an à 14.4 t/ha/an. Une carte des pertes en sol correspondante a été produite (Figure 5b). Ainsi, le plan d'aménagement proposé tiendra compte des actions de conservation des eaux et du sol pour le changement d'occupation du sol. Les pertes en terre estimées pour ce plan d'aménagement sont de 8.3 t/ha/an, alors qu'elles seront de 23.35 t/ha/an sous contrainte climatique et sans action spécifiques à entreprendre. L'introduction de mesures d'aménagement dans un contexte de changement climatique a permis une amélioration notable de la situation. Les superficies faiblement érodées (0–8 t/ha/an) passent de 15,25 % à 33,5 %, dépassant même la situation actuelle. De même, la proportion de terres soumises à une érosion très forte (>20 t/ha/an) revient à 28 %, soit un niveau équivalent à celui d'aujourd'hui. Les classes intermédiaires (8–12 et 12–20 t/ha/an) augmentent également, ce qui suggère une redistribution des superficies vers des niveaux d'érosion plus modérés. Ces résultats démontrent l'efficacité des actions d'aménagement en tant que levier d'adaptation, capables de compenser partiellement les effets négatifs du changement climatique sur l'érosion des sols.

Les simulations indiquent que l'extension des aménagements antiérosifs contribue à la diminution des taux des pertes en terres. Ce constat, vient

confirmer l'importance des aménagements dans l'interception des eaux de ruissellement, l'amélioration de l'infiltration, la réduction de l'érosion des terres, la diminution de l'envasement des retenues, et le développement d'une agriculture familiale et vivrière essentielle pour la population locale. La Figure 5b présente le résultat de la simulation des pertes en sol en considérant l'occupation actuelle avec les aménagements CES projetés.

3.4. Rentabilité économique du plan d'aménagement territorial du bassin versant de Douimis

Les résultats de l'analyse économique sont présentés dans le Tableau 4. Ils montrent que les valeurs de la VAN sont dépendantes des taux d'actualisation. En général, ce projet est rentable pour un taux d'actualisation qui ne dépasse pas les 12% (TRI) et qui est supérieur aux taux considérés dans le calcul de la rentabilité de ce type du projet environnemental (taux social d'actualisation). En effet, le taux social utilisé est faible surtout pour les pays en voie de développement (Daly-Hassen *et al.*, 2019).

Les indicateurs économiques, autres que le TRI, militent aussi en faveur de la poursuite de la mobilisation régionale pour la recherche de financement. Le ratio Bénéfice/Coût du projet dépasse 1.3. Le délai de récupération du capital investi est de 11 années ce qui est relativement court pour ce genre de projet.

Sur la base de ces résultats, le plan d'aménagement du bassin versant Douimis constitue une opportunité d'investissement intéressante qui mérite l'attention des autorités locales et nationale pour la recherche de financement. Le projet, en plus de sa rentabilité monétaire apporte beaucoup d'avantages environnementaux et sociaux qui sont très importants pour la réduction de la pauvreté, l'adaptation au changement climatique la protection des ressources naturelles et l'amélioration des conditions de vie qui ne sont pas comptabilisés dans les calculs du TRI. Toutefois, notre analyse pourrait être améliorée dans le futur tout en considérant des bénéfices non marchands tels que les bénéfices environnementaux, l'améliorations des connaissances scientifiques et la création d'emploi.

Tableau 4 - Indicateurs de l'analyse économique.

Indicateurs	Valeur
TRI (sans dégradation de la MBG-SP)	9%
TRI (dégradation SP de 1% de la MBG-SP annuellement)	12%
TRI (dégradation SP de 2% de la MBG-SP annuellement)	14%
Ratio Bénéfice/Coût actualisation à 5% (dégradation SP de 1% de la MBG-SP annuellement)	1.2
Valeur actualisée nette au taux de 5% (dégradation SP de 1% de la MBG-SP annuellement)	22 121 671 DT
Durée de récupération du capital investi (cash- flow actualisé)	14 années

Finalement, il faut signaler que l'analyse a été menée en utilisant les prix du marché vu que les facteurs de conversion sont en majorité proches de l'unité et le coût d'opportunité de la main d'œuvre est proche du salaire pratiqué. Ainsi, les résultats de l'analyse économique et financière sont très proches.

3.5. Discussion

L'approche RUSLE/SIG permet de nos jours l'identification des zones où les taux de perte en sol sont les plus élevés et par conséquent, éclaire les décideurs et les aménagistes sur le choix adéquat des techniques et des mesures à entreprendre. Appliquée au bassin versant Douimis, l'approche a spécifié la valeur de l'érosion des sols à l'état actuel. Cette dernière dépasse largement le seuil universel des pertes en sol tolérées selon Wishmeir (1964) ainsi que celui décrit par Masson (1971) pour le cas de la Tunisie. Le seuil universel est de 12 t/ha/an et le local ne dépassant pas en moyenne les 8 t/ha/an. Ces seuils sont arrêtés en fonction du climat, du type de roches et de l'épaisseur des sols (Cormary et Masson, 1964). Sachant que la suppression totale de ce phénomène s'avère impossible, les pertes en sol tolérées par l'érosion hydrique visent de ce fait à ce que les pertes soient inférieures à la vitesse d'altération de la roche mère en question (Roose, 1994). Les deux principaux facteurs qui influent sur le phénomène de l'érosion des sols sont les facteurs naturels et les facteurs humains. Les facteurs naturels comprennent les précipitations, la végétation, la topographie et le sol. D'un point de vue macro, les

facteurs liés au terrain et au sol sont relativement stables. Ils ne changeront pas beaucoup pendant des années, des décennies, voire des siècles (Bou Kheir *et al.*, 2008).

La simulation des impacts du changement climatique montre qu'il est très probable que le Bassin Douimis soit confronté à des risques accrus d'érosion hydrique à l'avenir. En outre, cela pourrait être dû aux changements du régime pluvieux et de l'occupation des sols. Ce dernier élément, contribue de manière essentielle aux processus de l'érosion des sols, alors que le changement climatique est susceptible d'intensifier ce phénomène (Belay et Mengistu, 2021 ; Dash & Rajib Maity, 2023). Ces résultats sont également corroborés par des études antérieures selon lesquelles l'érosion des sols est considérablement influencée par les différents types de couverture et d'utilisation des terres (Bouguerra *et al.*, 2021). Le changement climatique, caractérisé par le réchauffement climatique, affecte le processus régional des pertes en sol en modifiant les précipitations, leurs intensités et leurs répartitions spatiales. En effet, à mesure que la température augmente, l'énergie contenue dans l'atmosphère augmente, le flux d'air devient plus actif et l'évaporation devient plus vigoureuse. Cet enchainement de processus affecte la circulation atmosphérique et la configuration spatiale des précipitations en faveur d'évènements pluvieux plus intenses. Ce constat agit directement sur le facteur de l'érosivité qui conditionne la dégradation des sols.

A côté des processus climatiques, nous retrouvons les activités humaines. Ces dernières peuvent aussi bien agraver l'érosion des sols ou bien l'atténuer (Lang *et al.*, 2023). En ef-

fet, ces activités jouent un rôle substantiel dans le contrôle efficace de la dégradation des sols, principalement par le biais de projets de conservation de l'eau et des sols. Le facteur des pratiques de conservation (facteur P) utilisé dans cette étude sert à refléter la manière dont le changement d'utilisation des terres et les actions d'adaptation affectent la perte en sol. L'occupation des sols est considérée comme un reflet concentré des activités humaines, affectant la dynamique et les mécanismes de résistance à l'érosion des sols. Elle modifie à son tour les types de végétation et la couverture de la surface en introduisant des techniques d'aménagement. Cette méthodologie permet de planifier un système et des pratiques de gestion agricole appropriés contribuent également à atteindre les objectifs de développement durable en réduisant l'érosion des sols (Pal *et al.*, 2023).

En Tunisie, l'occupation des sols et les activités humaines sont des facteurs cruciaux de l'érosion des sols (Khemiri *et al.*, 2021). En effet, malgré des efforts cités dans les stratégies antérieures, les taux d'érosion restent supérieurs au taux de formation des sols nécessaires à une agriculture durable (Zhao *et al.*, 2019). Pour résoudre ce problème, il est important d'intensifier les efforts pour lutter contre les effets continus et intensifiés sous les effets du changement climatique. L'amélioration de l'expertise technique est également essentielle pour une atténuation efficace de l'érosion des sols.

Bien que cette étude ait produit des résultats significatifs, il est admis que l'utilisations des scénarios et des projections récentes des changements climatiques à partir de modèles climatiques globaux (GCM) pourraient enrichir davantage les conclusions. Cette limitation pourrait être surmontée dans de futures recherches en intégrant des comparaisons entre les scénarios de concentration de gaz à effet de serre (GES) de type Trajectoires Représentatives de Concentration (SSP) pour une évaluation plus précise. L'absence de données de terrain spécifiques au site d'étude n'a pas permis de valider directement les résultats du modèle, ce qui limite la portée des estimations et souligne la nécessité d'intégrer des mesures locales dans les études futures.

4. Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer l'érosion des sols dans le bassin versant de Douimis en utilisant l'approche RUSLE/SIG. Plus encore, elle a analysé l'impact potentiel des changements climatiques futurs sur la dégradation des sols. Les résultats ont montré que les conditions climatiques actuelles favorisent une érosion modérée à sévère dans certaines zones sensibles, mais que l'intensité de cette érosion pourrait s'aggraver significativement sous l'effet des scénarios du changement climatique prévus.

Face aux effets néfastes mentionnés ci-dessus, un plan d'aménagement intégré et concerté avec les parties prenantes a été développé. Ce plan a inclus des mesures de conservation des eaux et des sols, telles que l'implantation de terrasses, la reforestation ainsi que des pratiques agricoles durables. L'analyse de ce plan, montre que les interventions suggérées peuvent réduire considérablement l'érosion hydrique et protéger les ressources en sols du bassin versant. La participation active des acteurs locaux a non seulement renforcé la pertinence des solutions proposées, mais aussi favorisé leur acceptation et mise en œuvre à moyen et long terme.

L'analyse de la rentabilité du plan d'aménagement montre que le projet constitue une opportunité d'investissement rentable. Le taux de rentabilité interne est de l'ordre de 12 %, le ratio avantage/coût du projet est de 1.3, et la durée de récupération du capital investi est de 11 années ce qui est relativement court pour ce genre de projet. Sur la base de ces résultats, le plan d'aménagement du bassin versant Douimis constitue une opportunité d'investissement intéressante qui mérite de bénéficier de l'attention des autorités locales et nationale pour la recherche de financement. Il est à rappeler que cette analyse pourrait être améliorée dans le futur en utilisant la méthode d'analyse économique élargie par la quantification des bénéfices et des coûts non marchands.

Par conséquent, cette étude souligne l'importance de l'adaptation proactive aux impacts du changement climatique et de la gestion participative des ressources pour préserver l'intégrité environnementale du bassin versant de Douimis et renforcer la résilience des écosystèmes et de

la population qui en dépend. Ces résultats pourraient servir de modèle pour d'autres régions confrontées à des défis similaires en matière d'érosion hydrique, de perte en terres et de changement climatique.

Remerciements

Ce travail est élaboré dans le cadre du programme panafricain «Eau, Climat et Développement pour l'Afrique (WACDEP)». Le programme WACDEP est un programme du Conseil des Ministres Africains de l'Eau (AMCOW) mis en œuvre pour l'Afrique du Nord par le Global Water Partnership Méditerranée (GWP-Med). Pour la Tunisie, le projet a été réalisé en collaboration avec la Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles (DGACTA).

Les auteurs remercient l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), l'Institut National de la Météorologie (INM) et le Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Bizerte pour leurs appuis.

Sihem Jebari acknowledges the support of the TRANS-SAHARA project, funded under Grant Agreement No. 101182176.

Références bibliographiques

- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- Belay T., Mengistu D.A., 2021. Impacts of land use/land cover and climate changes on soil erosion in Muga watershed, Upper Blue Nile basin (Abay), Ethiopia. *Ecological Processes*, 10: 68. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00339-9>.
- Bouguerra S., Jebari S., Tarhouni J., 2021. Spatiotemporal analysis of landscape patterns and its effect on soil loss in the Rmel River basin, Tunisia. *Soil Water Research*, 16: 39-49.
- Bouguerra S., Stiti B., Khalfaoui M., Jebari S., Khaldi A., Berndtsson R., 2024. Modeling ecosystem regulation services and performing cost-benefit analysis for climate change mitigation through nature-based solutions using InVEST models. *Sustainability*, 16: 7201. <https://doi.org/10.3390/su16167201>.
- Cormary Y., Masson J., 1964. *Étude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherches du Génie Rural de Tunisie : application à un projet-type de la formule de perte de sols*.
- Daly-Hassen A., Annabi M., King-Okumu C., 2019. Social and private profitability of tree-based adaptation options to climate change in a dryland of Tunisia. *New Medit*, 18(2): 89-104.
- Dash S.S., Maity R., 2023. Effect of climate change on soil erosion indicates a dominance of rainfall over LULC changes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47: 101373. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101373>.
- De Graaff J., Kessler C.A., 2009. Cost-benefit analysis for land and water management. In: N. Evelpidou N., De Figueiredo T. (eds), *Soil protection in sloping Mediterranean agri-environments*, pp. 91-110. Instituto Politecnico de Bragança.
- DGACTA (Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles), 2017. *Nouvelle stratégie d'aménagement et de conservation des terres agricoles (ACTA)*. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, Tunis, Tunisie, 88 pp.
- Dhehibi B., Zucca C., Frija A., Kassam S.N., 2018. Biophysical and econometric analysis of adoption of soil and water conservation techniques in the semi-arid region of Sidi Bouzid, Central Tunisia. *New Medit*, 2: 15-28.
- Emadodin I., Narita D., Bork H.R., 2012. Soil degradation and agricultural sustainability: an overview from Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 14: 611-625. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9351-y>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture : Protection sociale et agriculture : Briser le cercle vicieux de la pauvreté rurale*. ISBN 978-92-5-208861-5.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2016. *The state of food and agriculture: Climate change, agriculture and food security*. ISBN 978-92-5-109374-0.
- Ghosal K., Das Bhattacharya S., 2020. A Review of RUSLE Model. *J Indian Soc Remote Sens* 48: 689-707. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>.
- Gittinger J.P., 1982. *Economic analysis of agricultural projects*. Washington, DC: Economic Development Institute, The World Bank.
- GWP-Med (Global Water Partnership Méditerranée), 2017. *Méthodologie d'intégration de l'adaptation au changement climatique dans la planification territoriale des aménagements pour la gestion intégrée et durable des ressources naturelles dans le*

- bassin versant de Douimis. Rapport édité par le projet WACDEP Programme Eau, Climat et Développement pour l'Afrique, Appui à la préparation de la 3ème Stratégie de l'aménagement et la conservation des terres agricoles.
- Hartmann L., Walz Y., Hansohm J., Domingos Vellozo L., Walinder E., Andreeva O., Harari N., Hendrickson J., Kinyua I., Parrotta J., Rath D., Sylvén M., Tumuhe C.L., de Vente J., Orr B.J., 2024. Assessing the contribution of land and water management approaches to sustainable land management and achieving land degradation neutrality. *Frontiers in Sustainable Resource Management*, 3, n/a-n/a.
- Hou D., 2023. Soil health and ecosystem services. *Soil Use and Management*, 39: 1259-1266. <https://doi.org/10.1111/sum.12945>.
- INS (Institut National de la Statistique), 2015. *Rapport national genre Tunisie 2015*. Tunis, Tunisia: Institut National de la Statistique.
- Irie M., Kashiwagi K., Ujiie K., Nsiri I., Bouguerra S., 2012. Feasibility of exploitation of the sediment in the reservoirs for the sustainability of surface water resource in Tunisia. *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers Series G*, 68(6): II41-II46.
- Jebari S., Berndtsson R., Bahri A., Boufaroua M., 2010. Spatial soil loss risk and reservoir siltation in semi-arid Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 55(1): 121-137. <https://doi.org/10.1080/02626660903529049>.
- Kaniarska R., Kizeková M., Jančová L., Čunderlík J., Dugátová Z., 2024. Effect of Soil Erosion on Soil and Plant Properties with a Consequence on Related Ecosystem Services. *Sustainability*, 16(16): 7037. <https://doi.org/10.3390/su16167037>.
- Khemiri K., Jebari S., Berndtsson R., Maalel K., 2021. Is climate or direct human influence responsible for discharge decrease in the Tunisian Merguellil basin? *Water*, 13(2748). <https://doi.org/10.3390/w13192748>.
- Lang N., Jetz W., Schindler K. et al., 2023. A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nature Ecology and Evolution*, 7: 1778-1789. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6>.
- Liu B.Y., Zhang K.L., Xie Y., 2002. An empirical soil loss equation. In: *Proceedings of the 12th ISCO Conference*. Beijing: Tsinghua Press.
- Liu J., Pei X., Zhu W., Jiao J., 2024. Water-related ecosystem services interactions and their natural-human activity drivers: Implications for ecological protection and restoration. *Journal of Environmental Management*, 352: 120101. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120101>.
- MARH, GIZ, 2007. *Stratégie nationale d'adaptation de l'agriculture tunisienne et des écosystèmes aux changements climatiques*. Tunis: Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques.
- MARHP (Ministère de l'Agriculture, des Ressources hydrauliques et de la Pêche), 2022. *Phase 5 report of the Water 2050 study*. Tunis, Tunisia.
- Morgan R.P.C., Nearing M.A. (eds), 2011. *Handbook of erosion modelling*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, pp. 1-401.
- Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczen M.E., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A process-based approach for predicting soil loss from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6): 527-544.
- Nunes F.C., Alves L.J., Nolasco de Carvalho C.C., Gross E., Soares T.M., Prasad M.N.V., Pietrzykowski M., 2020. *Soil as a complex ecological system for meeting food and nutritional security*. In: Prasad M.N.V., Pietrzykowski M. (eds.), *Climate Change and Soil Interactions*, pp. 229-269. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00009-6>.
- ONU (Nations Unies), 2015. *Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale des Nations Unies le 25 septembre 2015.
- Ouvry J.F., 2012. Dégradation des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures. In : *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*, pp. 163-176. IRD.
- Pal S.C., Chakrabortty R., Towfiqul Islam A.R.Md., Roy P., Chowdhuri I., Saha A., Alam E., 2023. Land use and climate change-induced soil erosion mapping in a sub-tropical environment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2270129>.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C., 1997. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Washington, DC: USDA-ARS.
- Roose E., 1994. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 438 pp. (Bulletin pédologique de la FAO ; n. 70). ISBN : 92-5-203451-X.
- Roose E., 2010. La dégradation des terres et l'érosion des sols. In : Roose E., Sabir M., Laouina A., Benchakroun F., Al Karkouri J., Lauri P., Qarro

- M. (eds), *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*, pp. 21-31.
- Shahab Doulabian A., Shadmehri Toosi G.H., Calbimonte G.H., Tousi E.G., Alaghmand S., 2021. Projected climate change impacts on soil erosion over Iran. *Journal of Hydrology*, 598: 126432.
- Wischmeier W.H., 1964. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, 2(3): 3-26. ISSN 0029-7259.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1965. *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains* (Agriculture Handbook, n. 282). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.
- Zhao J.L., Yang Z.Q., Govers G., 2019. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: Evidence from erosion plot data. *Geoderma*, 337: 729-741.