



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

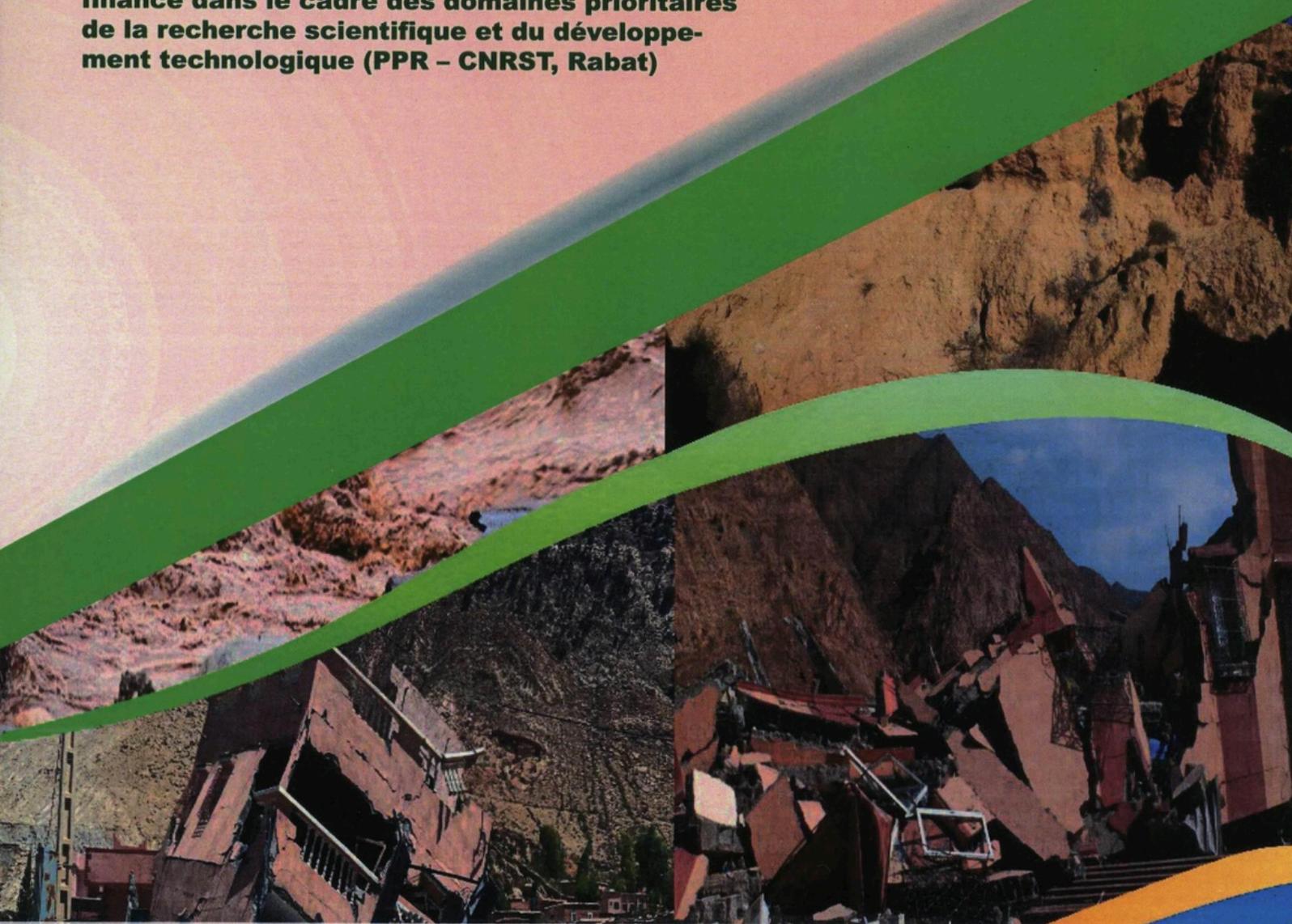


ACTES DU COLLOQUE INTERNATIONAL

**"LES RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES :
TYPOLOGIE, CARTOGRAPHIE ET GESTION"**

CLÔTURE DU PROJET PPR

financé dans le cadre des domaines prioritaires
de la recherche scientifique et du développe-
ment technologique (PPR – CNRST, Rabat)



Ouvrage coordonné par
le Professeur Abdelkader SBAI
Publications de la Faculté des Lettres et Sciences
humaines – Oujda, 2024
211 / 2024
Série : Colloques et séminaires : 92 / 2024

ISBN : 978-9954-689-67-7

Cet ouvrage propose les principales communications présentées
lors du Colloque International sur
les risques hydroclimatiques et géomorphologiques: typologie, cartographie et gestion
organisé à la Faculté des lettres et Sciences Humaines d'Oujda, les 14 et 15 juin 2022

Comité d'organisation

| | |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| AMGHAR Ahmed (FLSH, Oujda) | GAUCHE Evelyne (Université de Tours) |
| BAHKAN Mimoun (Commune d'Arekmane) | GHZAL Mohamed (FLSH, Oujda) |
| BENRBIA Khadija (FLSH, Oujda) | LAAOUANE Mohamed (FLSH, Fès Sais) |
| BOUSLAM Mohamed (FLSH, Oujda) | MOUADILI Omar (FLSH, Oujda) |
| CANTON Maria Yolanda (Université d'Almería) | SABRI Mohamed (FLSH, Oujda) |
| DELLAL Mohamed (FLSH, Oujda) | SBAI Abdelkader (FLSH, Oujda) |
| EL BAYE Allal (FLSH, Oujda) | SOLE-BENET Albert (C.S.I.C.) Almeria |
| EL GHALBI Khallaf (FLSH, Oujda) | TAOUS Ali (FLSH, Fès Sais) |
| EL HARRADJI Abderrahmane (FLSH, Oujda) | TRIBAK Abdellatif (FLSH, Fès Sais) |

Comité scientifique

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| ABAHROUR Mohammed (Fac polydisc. Taza) | EL HAFID Driss (CRMEF, Oujda) |
| ADOUK Nasraddine (Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida) | EL HARRADJI Abderrahmane (UMP, Oujda) |
| AMRAOUI Leila (Université Ibn Zohr, Agadir) | EL HAWARI Abdelghani (Univ. SMBA, Fès) |
| AMYAY Mhamed (Univ. SMBA, Sais- Fès) | EL HAWARI Jawad (Fac polydisciplinaire, Taza) |
| BAHOU Abdelaziz (Université Mohamed V, Rabat) | ELBAYE Allal (Université Mohammed Ier, Oujda) |
| BALLALI Lahcen (Inst. Sup. Prof. Inf. Tech. Santé de Guelmim) | ELGHACHI Mohamed (U. Sultan M. Slimane, Béni.Mellal) |
| BENATA Mohamed (ESCO, Oujda) | ESSADDEK Abdelhak (Université Mohammed Ier, Oujda) |
| BENRBIA Khadija (Université Mohammed Ier, Oujda) | GHAZI Abdelkhalek (Université Ibn Tofail, Kénitra) |
| BENTALEB Aziz (Université Mohamed V, Rabat) | GHZAL Mohamed (Université Mohammed Ier, Oujda) |
| BENZOUAGH (Université Mohamed V, Rabat) | HADDOUTI Khalid ((Université Mohammed Ier, Oujda) |
| BOUBRIA Abdelouahid (Fac polydisc. Taza) | HANCHAN (Université SMBA, Fès) |
| BOUGHABA ABDESSALEM (Univ., Tétouan) | LAAOUANE Mohamed (Univ. SMBA, Fès) |
| BOUKHIDOUS Mimoun (Univ. Mohammed Ier, Oujda) | LABHAR Mohamed (Univ. SMBA, Dhar El Mahraz, Fès) |
| BYOU Taoufik (Université Mohammed Ier, Oujda) | MACHOURI Nadia (Université Mohamed V, Rabat) |
| CHAAOUAN Jamal (Fac polydisc. Taza) | MOUHIDDINE Mohamed (Université Hassan II, Casa) |
| CHAKER Miloud (Université Mohamed V, Rabat) | OUAHMANE Brahim (Université Ibn Zohr, Agadir) |
| DAIBOUN TOUHAMI (Université Ibn Tofail, Kénitra) | SBAI Abdelkader (Université Mohammed Ier, Oujda) |
| DELLAL Mohamed (Université Mohammed Ier, Oujda) | SEHLI Abdelaziz (Université Mohammed Ier, Oujda) |
| EL BOUZIDI Aissa (Université Ibn Tofail, Kénitra) | TAOUS Ali (Univ. SMBA, Sais- Fès) |
| EL FILALI Abdelhakim (U. Sultan M. Slimane, Houribga) | TRIBAK Abdellatif (Univ. SMBA, Fès) |
| EL GHALBI Khallaf (Université Moulay Smail, Meknès) | |

Les textes publiés dans cet ouvrage n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Conférences plénières ----- | 6 |
| Les DIFFERENTS TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE LIES AUX GRANDS RISQUES CLIMATIQUES AU MAROC. ----- | 7 |
| Hanchane, M.----- | 7 |
| Apport de la géomatique dans l'étude de l'érosion: applications au Maroc oriental ----- | 18 |
| Abdelkader SBAI & Omar MOUADILI ----- | 18 |
| La Gestion conservatoire des terres de montagne, moyen de lutte contre les crues éclair ? ----- | 28 |
| Abdellah Laouina. Université Mohamed V, Rabat ----- | 28 |
| الجيولوجيا الطبية والآثار المحتملة للصخور والمعادن على صحة الإنسان ----- | 36 |
| ذ. خلاف الغالبي ----- | 36 |
| Axe 1 : Risques hydroclimatiques et littoraux ----- | 45 |
| <i>Variabilité climatique et impact sur les ressources en eau</i> ----- | <i>45</i> |
| PRÉCIPITATIONS MENSUELLES ET ANNUELLES EN MILIEU ARIDE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED ZIZ (SUD-EST MAROCAIN) : HOMOGÉNÉISATION ET ANALYSE DES TENDANCES ----- | 46 |
| CHANYOUR Yassine, EL ACHARI Ouafaa , HANCHANE Mohamed et OBDA Khalid ----- | 46 |
| ANALYSE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT DANS UN CONTEXTE DE VARIABILITE CLIMATIQUE DANS LE BASSIN D'OUUM ER RBIA (MAROC) ----- | 52 |
| HAMID Meriem, NAFIA Khouldia, AGUERD Jalal, OUZANNI Hassan et EL GHACHI Mohamed ----- | 52 |
| Variabilité et occurrence des pluies journalières maximales annuelles : Cas du bassin versant de l'Oued Adoudou ----- | 58 |
| Hassan NAIT-SI, Abderrahmane OUAMMOU, Abdourrahmane BOUKDOUN et Mahjoub BENBIH ----- | 58 |
| L'ORAGE DE GRELES DU 6 JUIN 2020 DANS LA REGION FES-MEKNES ----- | 64 |
| Hanchane M, Saloui A, Karrouk M-S et El Khazzan B----- | 64 |
| DYNAMIQUE ATMOSPHERIQUE ET CRUES SOUDAINES DANS LE RIF-OCCIDENTAL ----- | 70 |
| Ayoub AL MASHOUDI----- | 70 |
| VALORISATION DES ZONES INONDABLES DANS L'AMENAGEMENT URBAIN : CAS DE LA PARTIE NORD DE LA VILLE DE SETTAT ----- | 76 |
| Abderrahim OUIOUF, Abderrahim BENSMAIL, Radoine MADI, Mohamed EL GHACHI et Omar BENSMAIL----- | 76 |
| CARTOGRAPHY OF NATURAL HAZARDS IN MOROCCO: STUDY OF FLOODS IN THE CITY OF BENI MELLAL ----- | 82 |
| Jaouad Chami, Zouhir Elbachiri, Yahya El khalki, Mohamed En-nejmy et Said Azzoui----- | 82 |
| SYNTHESE HYDROCLIMATIQUE DANS LA PLAINE ALLUVIALE DU SOUS BASSIN DE LA RIVIERE MILO, HAUT NIGER EN GUINEE ----- | 88 |
| Soumaïla CONDE' Dov CORENBLIT et Fodé Salifou SOUMAH----- | 88 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| MODÉLISATION DE LA SENSIBILITÉ DE CERTAINES ZONES DE LA VILLE D'OUJDA FACE AU RISQUE D'INONDATION ET ESTIMATION DE SES POTENTIELS. IMPACTS SOCIAUX ET ÉCONOMIQUES ----- | 93 |
| DJEBBOUR Mounir et SBAI Abdelkader----- | 93 |
| Analyses pluviométriques et modélisation hydrologique au pas de temps mensuel. Application sur le bassin de Tamaloute (HAUTE MOULOUYA - EST du Maroc) ----- | 99 |
| Abdelaziz SEHLI et Abdelkader SBAI----- | 99 |
| Perturbations méditerranéennes, précipitations extrêmes et inondations au nord-est du Maroc ----- | 106 |
| Allal EL BAYE----- | 106 |
| LES RISQUES NATURELS ASSOCIES A LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET LEUR INFLUENCE DANS LE MOYEN SEBOU ET STRATEGIES D'ADAPTATIONS ----- | 112 |
| Soukaina El Aissaoui, Younes El Fater et Abdelhamid Janati Idrissi----- | 112 |
| 2019 RISING AND FLOODING: ANALYSIS AND STAKE FOR PREDICTIVE MANAGEMENT AT BANGUI, CENTRAL AFRICAN REPUBLIC ----- | 118 |
| Cyriaque Rufin NGUIMALET, Jean-Pascal WATERENDJI, Levy Sylver AYISSOU, Chanel Jerry Max NZANGO, Arsène BOMBIA and Alain LARAQUE----- | 118 |
| QUANTIFICATION DU REcul DES FALAISES SUR LE LITTORAL ENTE TIFNIT ET SIDI TOUAL AU SUD D'AGADIR (MAROC). ----- | 125 |
| M'hamed NMISS, Mhamed AMYAY, Abderrahaman OUAMMOU, Mahjoub BEN BIHE, Nadia ATIKI----- | 125 |
| Apport du GPS à l'évaluation de la vulnérabilité de la flèche littorale de la lagune de Nador ----- | 131 |
| Sbai A, Mouadili O, Bahkan M et Hlal M----- | 131 |
| INCIDENCES DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LE SECTEUR TOURISTIQUE AU MAROC : ETUDE DES CRUES DANS LES VALLEES DE TODGHA ET D'OURIKA ----- | 138 |
| Mehdi BOUKIL, Abderrazzak SADIKI et Mohamed HANCHANE----- | 138 |
| <i>Variabilité climatique et sécheresse</i> ----- | <i>145</i> |
| LA SECHERESSE CLIMATIQUE DANS LA MOYENNE MOULOUYA : ETUDE CHRONOLOGIQUE DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE ----- | 146 |
| Auhcine Jamal et Janati Idrissi Abdelhamid----- | 146 |
| Cartographie de la vulnérabilité climatique au niveau de l'espace rural de la province de Berkane: approche statistique et cartographique par les SIG ----- | 153 |
| Mimoun BOUKHIDOUS et Abdelkader SBAI----- | 153 |
| SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF DROUGHT USING THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX IN THE SEBOU WATERSHED, MOROCCO ----- | 160 |
| Abdelaziz EL-BOUHALI, Mhamed AMYAY et Khadija EL OUAZANI ECH-CHAHDi----- | 160 |
| IMPACT DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN ZONES OASIENNES MAROCAINES : CAS DU LAC DE BARRAGE MANSOUR EDDAHBI DANS LE HAUT DRAA ----- | 166 |
| Abderrazzak SADIKI et Mohamed HANCHANE----- | 166 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ETUDE DE LA VARIABILITE THERMIQUE TEMPORELLE DANS LE BASSIN VERSANT DE MELLOULOU de 1970 à 2019 ----- | 172 |
| BERTAL Yassine, MAKRANE Ibrahim et BEN BRAHIM Youssef.----- | 172 |
| IMPACT DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA BIODIVERSITE VEGETALE DANS LA STATION RAS-EL-MA AU NIVEAU DU PARC NATIONAL DE TAZEKKA ----- | 178 |
| HAZYOUN Zineb, ASSEM Najat & EL HAOUARI Mohammed ----- | 178 |
| Axe 2 : Risques géologiques et géomorphologiques ----- | 184 |
| LES ABORDS DU MASSIF DE BOUKHOUALI: CHANGEMENT DES ETATS DE SURFACE ET LA REDYNAMISATION HYDRO-EOLIENNE (MAROC ORIENTAL) ----- | 185 |
| CHAKER Miloud ----- | 185 |
| ASPECTS GÉOMORPHOLOGIQUES POUR L'ÉLABORATION D'UNE CARTE DES RISQUES D'INONDATIONS À PETITE ÉCHELLE LE LONG DE L'OUED LARBAË, VILLE DE TAZA, MAROC ----- | 191 |
| Badr LAYAN, Mahmoud ZEMZAMI et Brahim BOUGDIRA ----- | 191 |
| DYNAMIQUE DES PAYSAGES GEOMORPHOLOGIQUES DES VERSANTS MARNEUX ET SOUS COUVERT FORESTIER DANS LA BASSE VALLEE DE L'OUED TAMRI (HAUT ATLAS ATLANTIQUE -MAROC) ----- | 197 |
| IRIFI Hicham et TRIBAK Abdellatif----- | 197 |
| MODELISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE APPLIQUÉE AU BASSIN VERSANT DE MAZER, PAR LES SIG ET LA MÉTHODE PAP/CAR ----- | 203 |
| KOUCHAR Sara, EL ASSAOUI Naïma, BOUISS Charaf EDDINE et MEZIANE Hanane. ----- | 203 |
| CARTOGRAPHIE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE MASSIF NORD DES KEBDANA (MAROC-NORD - EST). CAS DU BASSIN VERSANT D'OUED AIFER ----- | 209 |
| Abdelouahid SAIDI et Omar MOUADILI----- | 209 |
| ÉROSION DES BERGES ET RISQUE DE PERTE DE TERRES AGRICOLES DANS LA VALLEE DE L'OUED BOUREGREG : CAS DES TRONÇONS DE MAAZIZ ET DE LARBAË SEHOUL (PLATEAU CENTRAL, MAROC) ----- | 215 |
| Idriss SAMMAA et Ali TAOUS ----- | 215 |
| IMPACTS DE L'ÉROSION DES BERGES SUR LES TERRES AGRICOLES DANS LE BASSIN VERSANT DU MAYO-DORBO (MAYO-KEBBI OUEST, TCHAD) ----- | 221 |
| GUIRKI Anastasie, MBELE ABBO Félix, ETAME SONE DIABE----- | 221 |
| PRIORITISATION DES SOUS-bassins VERSANT VULNERABLES A L'ÉROSION HYDRIQUE. CAS D'ÉTUDE : OUED DRADER, PRERIF OCCIDENTAL MAROC ----- | 227 |
| Najia FARTAS, Brahim BENZOUAGH, Bouchta EL FELLAH, Mohamed MASTERE, Mohammed EL BRAHIMI et Khaled Mohamed KHEDHER ----- | 227 |
| USING GPS, REMOTE SENSING, AND GEOAI TECHNIQUES TO MONITOR GEOMORPHOLOGICAL VARIATIONS IN THE MOULOUYA ESTUARY FROM 1956 TO 2023. ----- | 233 |
| HLAL Mohammed, SBAI Abdelkader, BENRIBIA Khadija, CWICK Gary J., EL HARRADJI Abderrahmane & SAIDI Abdelouahid ----- | 233 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| NOUVEAUX RISQUES ET FORMES DE DEGRADATION DANS DES PLAGES DE COTES ANTHROPISEES (CAS EN TUNISIE ET AU MAROC) ----- | 239 |
| Ameur OUESLATI----- | 239 |
| LES DUNES DE L'EMBOUCHURE D'OUM ER-RBIA ----- | 245 |
| ABKHAR Fatima et MOUHIDDINE Mohamed----- | 245 |
| LA DEGRADATION ET LA REDUCTION DE LA CAPACITE PRODUCTIVE DES SOLS DES « PALMERAIES TRADITIONNELLES ET DES NOUVELLES EXTENSIONS » DANS L'OASIS DE FIGUIG ----- | 250 |
| BABA Jawad, EL HARRADJI Abderrahmane et SBAI Abdelkader----- | 250 |
| IMPACTS DES CRUES ET DES ETIAGES SUR LES RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES : CAS DU BASSIN VERSANT DU HAUT INAOUENE ----- | 256 |
| BEN LAGHLAGH Oumaima et NAOURA Jamal ----- | 256 |
| LA DYNAMIQUE DES CRUES INONDABLES EN AVAL DU BASSIN DE L'OUED DERN (ATLAS BENI MELLAL/MAROC) : EXTRACTION ET ANALYSE ----- | 262 |
| Islah EL YAGOUBI, Mohamed EL GHACHI et Hasan OUAKHIR----- | 262 |
| Risques hydrologiques sur le réseau routier dans la région de Debdou (Maroc oriental) ----- | 268 |
| AMGHAR Ahmed, SBAI Abdelkader, BENRABIA Khadija & MOUADILI Omar ----- | 268 |
| DÉTERMINATION DES ZONES PRIORITAIRES A L'AMÉNAGEMENT DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED TAMDA (RIF CENTRAL MAROC) PAR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE PAP/CAR ----- | 274 |
| EL OUAZANI ECH-CHAHDI Khadija, EL-BOUHALI Abdelaziz et AMYAY Mhamed ----- | 274 |
| L'ETUDE DES GLISSEMENTS ROTATIONNELS PAR L'UTILISATION DE TRIPLE-APPROCHE. CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR (PRERIF ORIENTAL – MAROC) ----- | 280 |
| HAMDACH Mustapha, GARTET Jaouad et BENAÏSSA Mohamed ----- | 280 |
| Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrains : cas du quartier Boujibar (ville d'Al Hoceima) ----- | 286 |
| Taoufik BYOU, Abdelhamid ALLAOUI, Khalid OBDA et Ali TAOUS----- | 286 |
| Axe 3 : Risques anthropiques: pollution, feux de forêts et risques industriels, dégradation ----- | 292 |
| Application de la méthode de la Toposéquence pour l'étude de la dégradation du sol dans le bassin versant de l'oued Lebène (Pré-rif central – Maroc). ----- | 293 |
| Ahmed ROUIJEL, Abdelghani HOUARI, Abdelhamid JANATI IDRISSE, Mohamed DAYDAY, Mohamed BOUHARROU, Maryame EL YAZIDI----- | 293 |
| IMPACT OF URBAN DYNAMICS AND CLIMATE CHANGE ON FOREST AREAS THE MAAMORA FOREST IN THE CITY OF KENITRA - AS A CASE STUDY ----- | 300 |
| LEMKIMEL Zahra, ALLIL abdelaziz, DAIBOUN Thami ----- | 300 |
| LE ROLE PROTECTEUR DES FORMATIONS forestières CONTRE LES RISQUES D'EROSION (FORET KORIFLA, PLATEAU CENTRAL MAROCAIN) ----- | 305 |
| BENAMARA Fatima Zohra, TAHIRI Hasna, MACHOURI Nadia et DALLAHI Youssef ----- | 305 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| EVALUATION DE LA DESERTIFICATION DANS LE BASSIN DE LA MOYENNE MOULOUYA BASEE SUR L'ESPACE CARACTERISTIQUE NDVI-ALBEDO ----- | 311 |
| Mohamed LAMAAMRI, Nezha LGHABI, Abdelkhalek GHAZI, Abdelkader SBAI, Abdelhak LIMAME, Halima El MAMRI ----- | 311 |
| Evaluation de la pollution générée par les sous-produits de l'activité oléicole et son impact sur les ressources hydriques dans la province d'Al Haouz (Maroc). ----- | 317 |
| Sihame HAFIDI, El Mostafa MILI, Abderrahim LACHGUER, Laila MANDI, Abdessamad HEJJAJ, Mohammed ETTAKI ----- | 317 |
| HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION, QUALITY ASSESSMENT, AND VULNERABILITY MAPPING OF THE TAMOUDA AQUIFER, UPSTREAM OF THE MARTIL-ALILA PLAIN (INTERNAL RIF, MOROCCO). ----- | 323 |
| Morad CHAHID, Jamal Eddine STITOU El MESSARI, Ouafae KAIBI, Abdelhadi ELOUALI, Mohammed Reda AOULAD MANSOUR, Ali ESSAHLAOUI, and Anton VAN ROMPAYE ----- | 323 |
| Evaluation spatio-temporelle du risque des incendies de forêts dans la province de Taza (Maroc) de 1999 à 2020 ----- | 327 |
| HAMDACH Youssef ----- | 327 |
| Axe 4 : Gestion et stratégies de réhabilitation et de prévention ----- | 333 |
| Land degradation by salinity in semi-arid areas - case of the irrigated perimeter of Tadla, sector of Beni Amir ----- | 334 |
| Najat AKHAL ----- | 334 |
| Risques, vulnérabilité, résilience et durabilité urbaine : le cas du littoral de Dar Bouazza au Sud de Casablanca (Maroc) ----- | 341 |
| A. AMRANI, M. MOUHIDDINE, B. ENNASSIRI E ----- | 341 |
| Aménagements hydrauliques et gestion du risque d'inondation dans l'agglomération de Fès : cas de l'oued El Himmer ----- | 348 |
| Noura RASSAM, Mostafa HMAMOUCHE, Abdelghani HOUARI ----- | 348 |
| La lagune de Marchica entre la dynamique d'Aménagement et les risques naturels ----- | 354 |
| BAHKAN Mimoun et SBAI Abdelkader ----- | 354 |
| Revue des facteurs de pollution et de dégradation du SIBE de la Moulouya et perspectives d'avenir ----- | 360 |
| BENATA Mohamed ----- | 360 |
| ÉVALUATION DE L'ANALYSE MORPHOMETRIQUE ET HYPOMETRIQUE DU BASSIN DE L'OUED AMTER (NORD-OUEST MAROC) A L'AIDE DE TECHNIQUES DE TELEDETECTION ET DE SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ----- | 366 |
| Mohammed EL BRAHIMI, Mohamed MASTERE, Brahim BENZOUAGH, Bouchta EL FELLAH et Najia FARTAS ----- | 366 |

Conférences

plénières

Les DIFFERENTS TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE LIES AUX GRANDS RISQUES CLIMATIQUES AU MAROC.

Hanchane, M.

Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire. USMBA-Fès.

mohamed.hanchane@usmba.ac.ma

Introduction : Contexte climatique du Maroc, problématique et objectifs

En raison de sa position géographique, le Maroc dépend des conditions climatiques des latitudes tropicales au sud et tempérées au nord. Les conditions géographiques locales jouent un rôle dans la variation du climat dans le pays. Le climat méditerranéen prédomine dans la moitié nord du pays. Ce climat se transforme en climat aride désertique au sud et en climat aride steppique à l'est et au sud-est. Les chaînes montagneuses du Rif et de l'Atlas renferment l'ensemble des variations bioclimatiques. (Fig. 1) Les périodes de sécheresse mettent souvent en péril la saison humide. Pendant la saison sèche, les températures sont élevées.

Les conditions atmosphériques en surface sont caractérisées par la prédominance de la haute pression subtropicale (anticyclone des Açores) d'origine dynamique qui se prolonge souvent en dorsale vers l'est du pays, ce qui constitue souvent un obstacle à toute infiltration des perturbations atmosphériques des latitudes tempérées (Fig. 2). La dépression thermique saharienne prédomine au sud du pays, entraînant fréquemment des masses d'air chaud et sec vers le pays, en particulier pendant la saison chaude. La position atmosphérique moyenne de ces deux centres d'action change fréquemment au fil du temps, ce qui permet l'établissement de divers types de temps (pluvieux, sec, chaud,...).

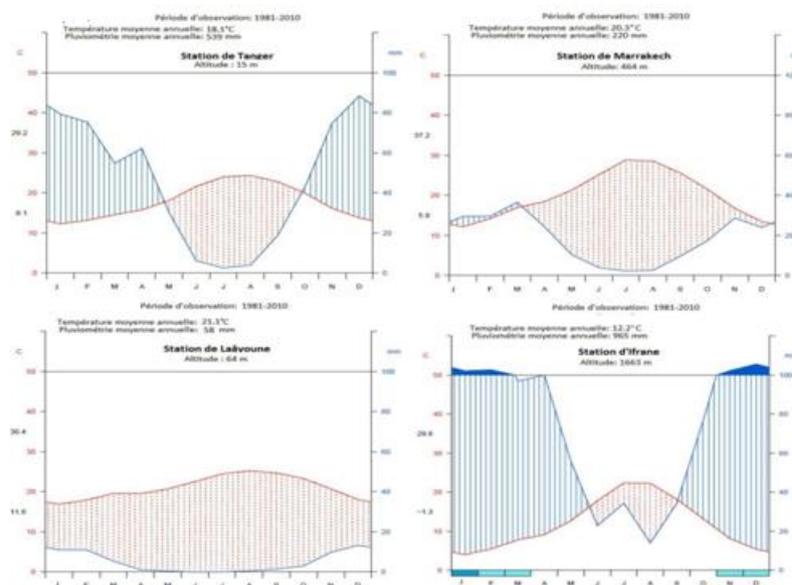


Figure 1 : Diagramme ombrothermique de Gausse

Stations de Tanger (climat méditerranéen de type Cs), Marrakech (climat steppique de type BS), Laâyoune (climat désertique de type BW) et d'Ifrane (climat montagnard méditerranéen de type Ds). Pour le diagramme d'Ifrane, sur l'axe horizontal des mois, les cases en bleu indiquent les Tmin extrêmes en dessous de 0°C. (Le seuil de 100 mm est dépassé pendant les mois froids). © Hanchane, M.

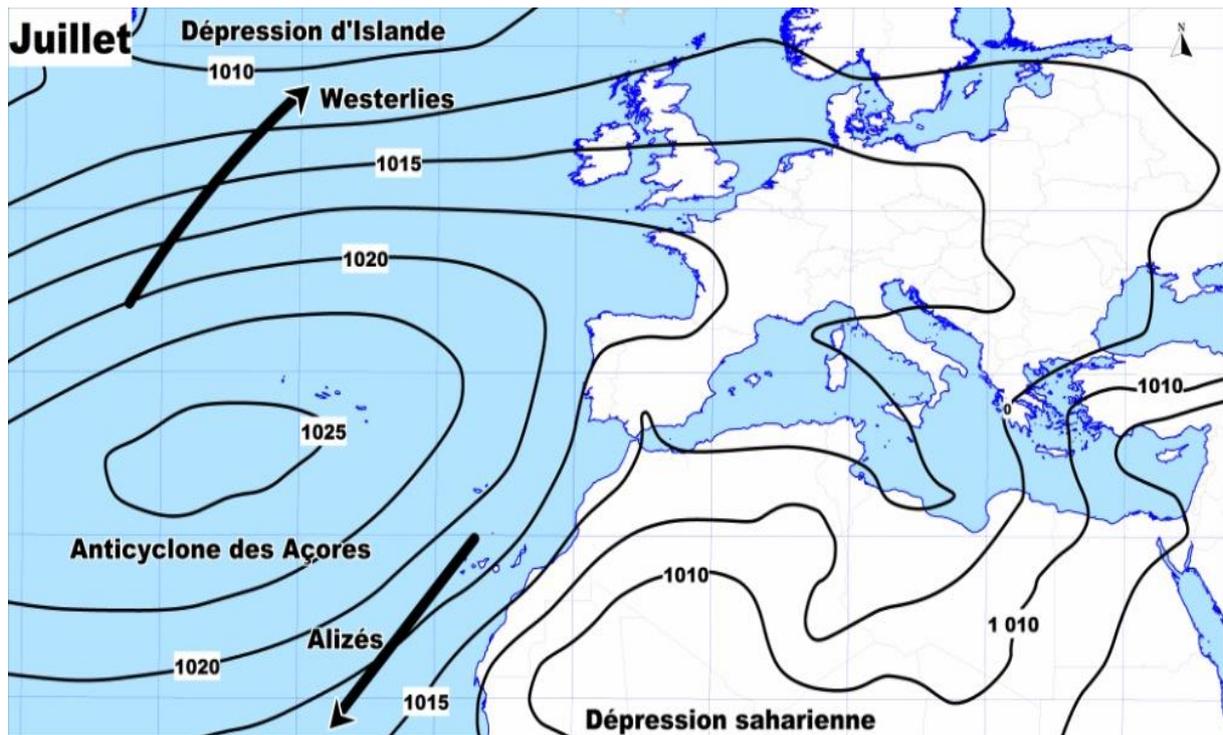


Figure 2 : Position de l'anticyclone des Açores et de la dépression saharienne (Moyenne : Juillet 1981-2010
Source : NOAA/ESRL Physical Sciences Laboratory)

Au Maroc, il y a peu d'études sur le lien entre les types de circulations atmosphériques et les types de temps (Benarafa, 1997 ; Delannoy et Lecompte, 1980 ; Born et al, 2010). La moitié nord du Maroc a été soumise à une classification automatique des types de circulation en utilisant les principes de la classification subjective de Lamb. Afin d'obtenir davantage d'informations sur la classification automatique des types de circulation (ou Circulation Weather Types : CWT), nous recommandons au lecteur de se référer aux travaux de recherche menés par Jenkinson et Collinson (1977) et Jones et *al* (1993). La classification des CWT est automatisée grâce au package SynoptReg développé sous R par Lemus (2019).

Le but de la présente étude est d'établir le lien entre les types de CWT qui expliquent les types de temps extrêmes. Les récentes études ont toutes montré une augmentation des températures extrêmes minimales et maximales, exprimés par des journées chaudes et de nuits chaudes respectivement, ainsi que par des événements pluviométriques extrêmes. On suppose que ces tendances actuelles des types de temps extrêmes sont expliquées par une modification des tendances au niveau des types CWT. Quant aux types de temps sec, ils sont largement étudiés à un pas de temps mensuel par plusieurs études au Maroc. Ils sont souvent associés à liés à des configurations atmosphériques de type Oscillation Nord Atlantique positive qui est due, d'une part, à un renforcement de l'anticyclone des Açores et à son étalement sur la Méditerranée sous une forme d'une dorsale, et d'autre part, à un creusement de la dépression d'Islande qui un indicateur d'un rejet des dépressions des latitudes tempérées vers le Nord de l'Europe. L'inverse se produit lors d'une Oscillation Nord Atlantique négative qui se traduit au Maroc souvent des conditions atmosphériques instables.

L'objectif de cette étude est de mettre en relation les différents types de CWT qui expliquent les différents types de temps extrêmes. Toutes les études récentes ont démontré une hausse des températures extrêmes minimales et maximales, représentées par des journées chaudes et des nuits chaudes respectivement, ainsi que par des précipitations extrêmes. Les tendances actuelles des types de temps extrêmes sont supposées être causées par une modification des tendances au niveau des types CWT. En ce qui concerne les différents types de temps sec, ils sont fréquemment examinés à un rythme mensuel par diverses études au Maroc. Ils sont fréquemment liés à des configurations atmosphériques de type Oscillation Nord-Atlantique positive, qui sont causées, d'une part, par un renforcement de l'anticyclone des Açores et son extension sur la Méditerranée sous forme de dorsale, et d'autre part, par un creusement de la dépression d'Islande qui témoigne d'un rejet des dépressions des latitudes tempérées vers le Nord de l'Europe. Au contraire, lorsqu'une Oscillation Nord-Atlantique négative se produit, cela se manifeste souvent au Maroc par des conditions atmosphériques instables. Il est possible que ces deux dernières configurations atmosphériques se succèdent pendant deux hivers consécutifs (Fig. 3) ou sur des périodes de temps plus courtes, d'environ une décade, par exemple.

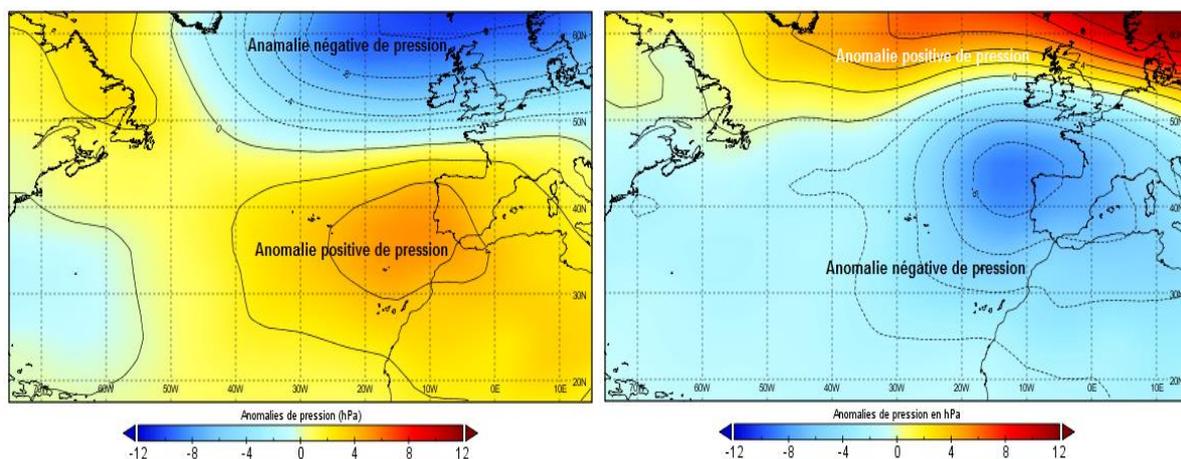


Figure 3 : Anomalies de pression pendant la saison d'hiver (DJF) lors d'une phase NAO (+) de l'année 1994-1995 et NAO (-) de l'année 1995-1996. Les anomalies de pression sont calculées par rapport à la période climatique 1981-2010 (lignes continues = anomalies positives; lignes discontinues: anomalies négatives).

Source : NOAA/ESRL Physical Sciences Laboratory

Il est indéniable que les conditions météorologiques extrêmes représentent un danger pour le pays. Effectivement, les fortes précipitations entraînent des inondations qui causent des dommages aux infrastructures, en particulier dans les zones vulnérables et moins résistantes ; cela s'est déjà produit à plusieurs reprises dans de nombreux territoires du pays. Les températures élevées, à la fois le jour et la nuit, ont un impact sur la santé humaine, en particulier pour les allergiques ou les asthmatiques, ainsi que sur la production agricole et les écosystèmes forestiers en augmentant l'évapotranspiration et en accroissant le stress hydrique.

Dans cette étude, les résultats concernant les CWT pour l'ensemble du territoire marocain sont pour la première fois présentés, ce qui constitue un catalogue national des différents types de circulations, dont la fréquence varie en fonction des mois et dont la tendance peut varier au

fil du temps. De plus, elle mettra en évidence les différentes formes de circulation les plus spécifiques aux types de temps extrêmes.

1. Les plus grands événements météorologiques extrêmes du pays : Tendances et synthèse de quelques résultats

Effectivement, il est possible d'expliquer la variabilité inter et pluriannuelle des précipitations par la circulation atmosphérique à grande échelle, mais cela ne s'applique pas à la variabilité au niveau quotidien, qui correspond aux différents types de temps météorologiques. Il est important que d'autres caractéristiques aux échelles sous-synoptiques jouent un rôle crucial : c'est le cas des CWT. Le changement de position et de configuration des deux principaux centres d'action les plus importants sur le pays, l'anticyclone des Açores et la dépression saharienne, ainsi que la cyclogenèse locale illustrée par des dépressions, notamment au large du Portugal, sur le golfe de Cadix, sur l'île de Madère ou même sur l'île des Baléares, sont mis en évidence par cette échelle sous-synoptique.

Dans ce paragraphe, nous exposons les résultats de synthèse concernant l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des extrêmes de précipitations et de températures au Maroc. Cette analyse a été réalisée en utilisant des données quotidiennes et en calculant les tendances des indices d'extrêmes climatiques établis à l'aide du programme informatique RclimDex, développé par l'équipe d'experts pour détecter les changements climatiques et les indices (27 indices) (Expert Team on Climate Change Detection Indices – ETCCDI-) (Zhang et Yang, 2004).

Les données utilisées s'étendent de 1960 à 2016 et font référence à des données quotidiennes concernant la pluviométrie, les températures maximales et minimales de 11 stations représentatives du climat du Maroc (classification de Köppen) : climat méditerranéen, climat méditerranéen montagnard, climat aride steppique et climat aride désertique.

D'après les résultats obtenus relatifs aux températures maximales, il est observé une baisse très importante des jours relativement frais (TX10) et une augmentation très importante des jours relativement chauds (TX90) pour toutes les stations (Tab. 1). Une hausse généralisée, très importante, est également observée pour l'indicateur des durées des séquences chaudes et des nuits tropicales (TR20). À l'exception d'Essaouira, l'indice SU a également enregistré une hausse très importante. À l'exception d'Agadir, Marrakech et Agadir, il n'y a pas de variations significatives dans le minimum des températures maximales (TXn). Néanmoins, les températures maximales (TXx) augmentent de manière très importante uniquement dans les stations continentales. En ce qui concerne les températures minimales (Tab. 1), on constate une augmentation significative et continue des nuits relativement chaudes (TN90) ainsi que du maximum des températures minimales (TNx). En revanche, on observe une forte diminution des nuits relativement fraîches. Ainsi, l'ensemble des résultats montre une augmentation généralisée des niveaux de température diurnes et nocturnes.

Tableau 1 : Tendances des indices relatifs aux températures maximales et minimales quotidiennes pour quelques stations marocaines (période : 1960-2016). © Hanchane, M.

NS : Non significative ; S : Significative ; HS : Hautement significative ; THS : Très hautement significative.

| | Laâyoune | Agadir | Essaouira | Casablanca | Tanger | Oujda | Fès | Ifrane | Midelt | Marrakech | Ouarzazate | Spécificités des indices thermiques |
|--------------|----------|--------|-----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|------------|--------------------------------------------------------|
| DTR | NS | D TH S | NS | D TH S | A TH S | NS | A TH S | A TH S | NS | NS | NS | Amplitude thermique diurne |
| SU25 (SU) | A TH S | A TH S | NS | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | Jours d'été avec une température d'au moins 25 °C |
| TNn | A TH S | A TH S | NS | A TH S | NS | A TH S | NS | A HS | A HS | A HS | A S | Minimum des températures minimales |
| TNx | A TH S | NS | NS | A S | A HS | A TH S | A TH S | A TH S | A HS | A HS | A TH S | Maximum des températures minimales |
| TN10p (TN10) | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | NS | D TH S | D TH S | Nuits relativement fraîches |
| TN90p (TN90) | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | Nuits relativement chaudes |
| TR20 | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | Nuits tropicales avec une température d'au moins 20 °C |
| TXn | NS | A TH S | NS | A S | NS | NS | NS | NS | NS | A HS | NS | minimum des températures maximales |
| TXx | NS | NS | NS | NS | A HS | A TH S | A HS | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | maximum des températures maximales |
| TX10p (TX10) | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | D TH S | jours relativement frais |
| TX90p (TX90) | A HS | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | jours relativement chauds |
| WSDI | NS | NS | NS | | | | | | | | | |
| WSDI 1 | A HS | A TH S | A TH S | A HS | A TH S | A TH S | A TH S | A TH S | | A TH S | A TH S | indicateur des durées des séquences chaudes |

Les précipitations mettent en évidence la particularité de la station d'Essaouira, de Fès et d'Ouarzazate. À la différence de nombreuses études généralistes, la première a été caractérisée par une augmentation spécifique à 5 indicateurs pluviométriques, la seconde par une augmentation assez importante pour seulement deux indices et la troisième par un seul

indicateur (Tab. 2). On observe une baisse dans certains indices pour les autres stations, dont le nombre varie d'une station à l'autre. Ces résultats montrent qu'à la différence des indices des températures maximales et minimales, il est difficile de généraliser les tendances des précipitations.

Tableau 2: Tendances des indices relatifs aux précipitations quotidiennes pour quelques stations marocaines (période : 1960-2016). © Hanchane M.

NS : Non significative ; S : Significative ; HS : Hautement significative ; THS : Très hautement significative.

| | Laâyoune | Agadir | Essaouira | Casablanca | Tanger | Oujda | Fès | Ifrane | Midelt | Marrakech | Quarzazate | Spécification de l'indice | Unité |
|-------------|----------|--------|-----------|------------|--------|--------|------|--------|--------|-----------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| CDD | | | | | | | | | | | | Nombre annuel maximum de jours secs consécutifs (lorsque PR < 1,0 mm) | jours |
| CWD | | | | | | | | | | | | Nombre annuel maximum de jours humides consécutifs (lorsque PR > 1,0 mm) | jours |
| RX1D AY | | | A S | | | | | | | | | hauteur maximale des précipitations d'un jour par an | mm |
| RX5D AY | | | A S | | | D HS | | | | | | hauteur maximale des précipitations de 5 jours par an | mm |
| R20 MM | | | A HS | | D HS | D HS | | | | | | nombre de jours de précipitations d'au moins 20 mm | jours |
| R10 MM | | | A S | | D S | D HS | | D TH S | | | | nombre de jours de précipitations d'au moins 10 mm | jours |
| SDII | | | A TH S | | | D S | A S | | D S | | | intensité simple des pluies journalières en mm/j | mm/j |
| R95P TOT | | | | | D HS | | A HS | | | | | Pourcentage de jours pluvieux (précipitations quotidiennes > 95e centile) | % |
| R99P TOT | | | | | | | | | | | | Pourcentage de jours extrêmement pluvieux (précipitations quotidiennes > 99e centile) | % |
| PRCP TOT | | | | | D HS | D TH S | | | D S | | A HS | total pluviométrique annuel (P >=1mm) | mm |

2. Comment les CWT sont-ils liés aux risques climatiques? Mise en œuvre et résultats obtenus

Pour établir un lien entre les CWT et les risques climatiques, une méthode a été développée. Les CWT sont calculés en utilisant les points de pression qui surplombent les latitudes marocaines (voir figure 2). Les CWT sont établis en se basant sur la classification objective de (Lamb, 1972 ; Jenkinson & Collison, 1977) et automatisée par (Lemus-Canovas et al, 2019). Pour obtenir davantage d'informations, il faut se référer à ces sources.

Les réanalyses NCEP (Source : National Centers for Environmental Prediction) fournissent les données de la pression atmosphérique au niveau de la mer (SLP) pour la période 1960-2023(Fig. 4). Les 27 types de CWT ont été classés : anticyclonique, cyclonique, 8 directionnels (directions selon la rose des vents), 16 hybrides (combinaisons entre A/C et directionnels) et U (indéfini).

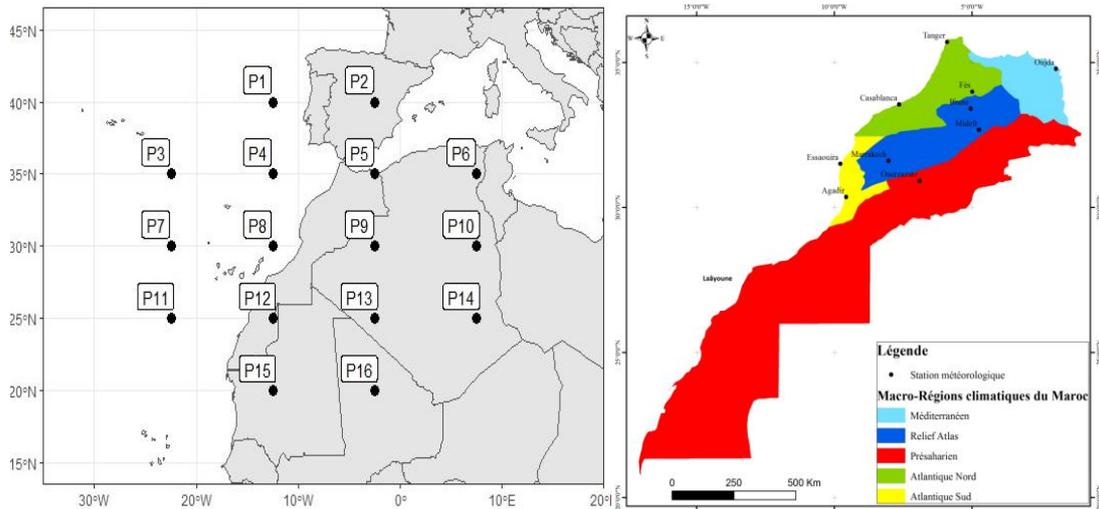


Figure 4: Points des données de la pression atmosphérique de surface utilisés dans la classification des CWT (à gauche) ; Figure 5 : Position géographique des stations climatiques

Les données quotidiennes des précipitations ainsi que des températures maximales et minimales, enregistrées à 11 stations (source : DMN), couvrent la période de 1960 à 2016 (Fig. 5). En se basant sur ces données, les types de temps météorologiques suivants ont pu être identifiés : les nuits chaudes ($T_{min} > 90^{\text{ème}}$ percentile), les journées chaudes ($T_{max} > 90^{\text{ème}}$ percentile), les journées pluvieuses (pluviométrie entre 0.8-10 mm) et les journées à pluviométrie extrême (>50 mm).

Afin de diminuer le nombre de catégories de CWT obtenues (Fig. 6), nous avons réalisé une analyse en composantes principales utilisant une rotation de type Varimax (ACPR-Varimax). On a interprété les 8 composantes (CP) obtenues en fonction des types CWT qui les représentent le mieux (Fig. 10). Grâce aux scores des huit composantes, nous avons pu étudier leurs tendances. On a établi le lien entre les CP et les 4 types de temps mentionnés précédemment.

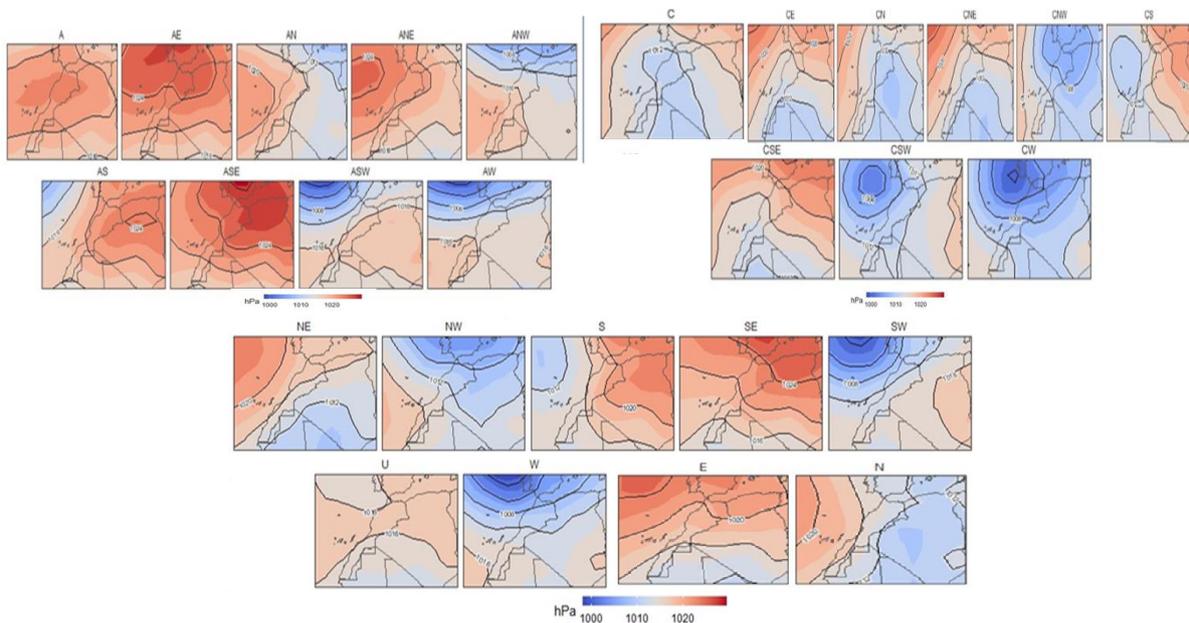


Figure 6 : Catalogue des CWT du Maroc (période 1960-2023) © Hanchane, M.

- Les types CWT associés aux nuits chaudes

Les résultats obtenus démontrent que le type NE est dominant dans l'explication des nuits chaudes pour toutes les stations. Toutefois, il convient de mettre en évidence certaines nuances. La fréquence relative des NE est de plus de 40% entre Essaouira et Agadir, suivie par les CWT de types E et N. Dès la station de Casablanca, la fréquence relative du CWT de type NE augmente considérablement, atteignant plus de 60 %, et des valeurs maximales sont enregistrées à Ifrane, Ouarzazate et Midelt, qui sont plus ouvertes au secteur aride de l'Est du pays. De plus, les stations Essaouira et Agadir sont affectées par les nuits chaudes presque tous les mois de l'année. Les autres stations sont limitées à la période de mai-octobre (Fig. 7).

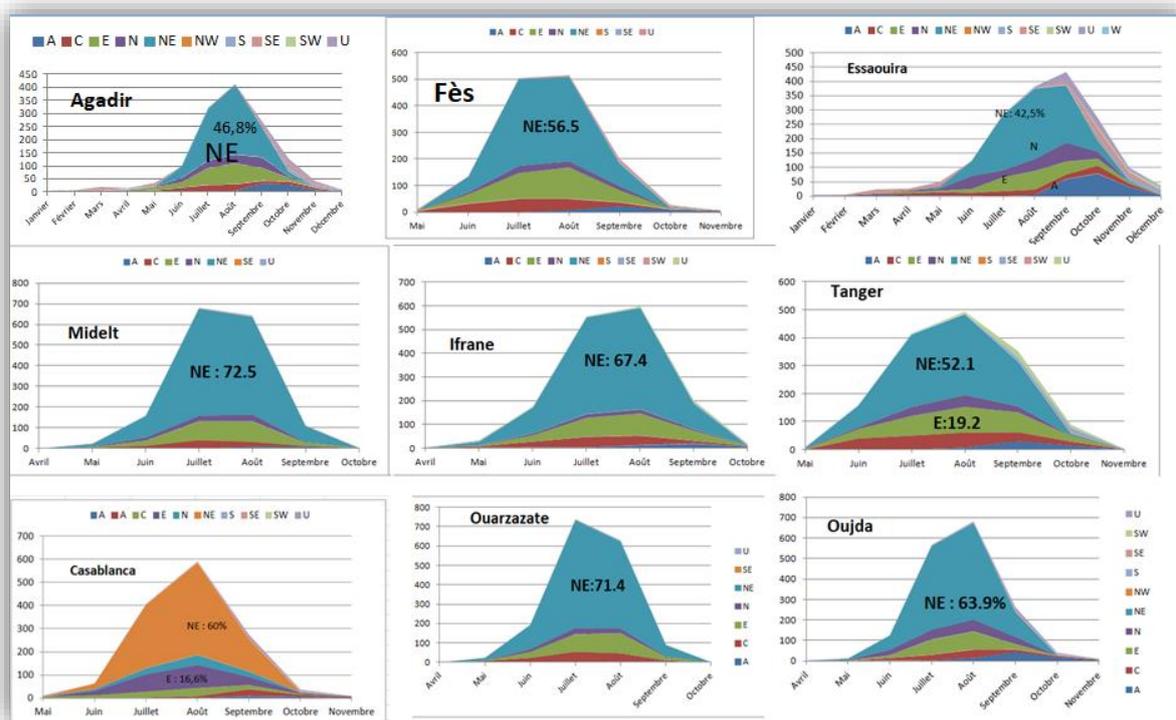


Figure 7 : CWT associés aux nuits chaudes © Hanchane, M.

- Les types CWT associés aux journées chaudes

En règle générale, les journées chaudes sont liées aux CWT de types E et NE d'Agadir et d'Essaouira (environ 40% pour les deux) et à la station de Casablanca (60% en deux). Le CWT de type Nord-Est se développe au nord de Casablanca et dans les stations continentales et de montagne. Dans les stations d'Agadir et d'Essaouira, les journées chaudes sont plus fréquentes que dans les stations côtières et surtout dans les stations continentales au cours de l'année. Il est important de noter une augmentation secondaire des journées chaudes au mois de mars pour les stations d'Agadir et d'Essaouira, qui sont liées au CWT classé Est (Fig. 8).

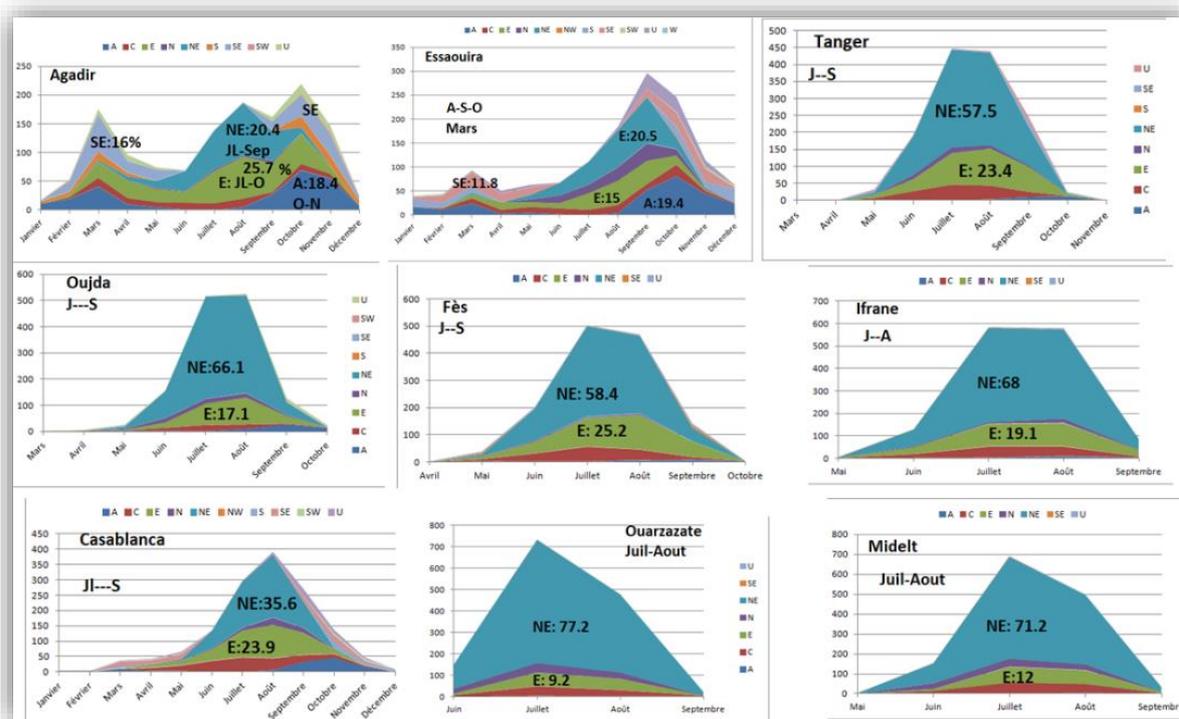


Figure 8 : CWT associés aux journées chaudes. © Hanchane, M.

- Les types CWT associés aux jours pluvieux (0.8 à 10 mm)

Les temps pluvieux sont généralement liés aux WCT cyclonique (C), anticyclonique (A) et directionnel Nord (N), à l'exception de la station d'Ouarzazate où les types NE et C sont prédominants. Les jours de pluie à la station d'Agadir sont généralement de type C. Les jours pluvieux des stations ouvertes sur le secteur Est du pays (Ifrane, Midelt et Ouarzazate, Oujda) sont souvent liés au type NE. La pluviométrie de ce type de circulation NE est importante, surtout pendant l'été. Par contre, les types N, C et A fournissent de la pluie pendant la saison humide (Fig. 9).

1. Classification des CWT et analyse des tendances des composantes CP

Après une ACP mode-S (période 1980-2023), la réduction des 27 types de circulation (WT) a été effectuée en utilisant une matrice de données, avec les coordonnées géographiques en variables et les jours en lignes. L'ACP a permis d'obtenir 8 composantes (Fig. 10). On a examiné ces dernières en fonction de la pertinence des tendances de leurs scores (séries temporelles) et de leur représentativité par rapport aux CWT. Chaque est représentée par un ou plusieurs types de CWT. Il convient de souligner que le CWT de type W (ouest) est le plus significatif en ce qui concerne sa contribution aux précipitations des jours pluvieux.

L'étude des évolutions des scores des 8 composantes CP a mis en évidence une tendance notable à l'augmentation de CP7 et une tendance notable à la baisse de CP2. Le type NE est principalement représenté par la CP7, suivi de loin par le type E (Est), tandis que les types NE et N (Nord) sont représentés par la CP2.

Oujda les 17, 18 et 19 mai 2024

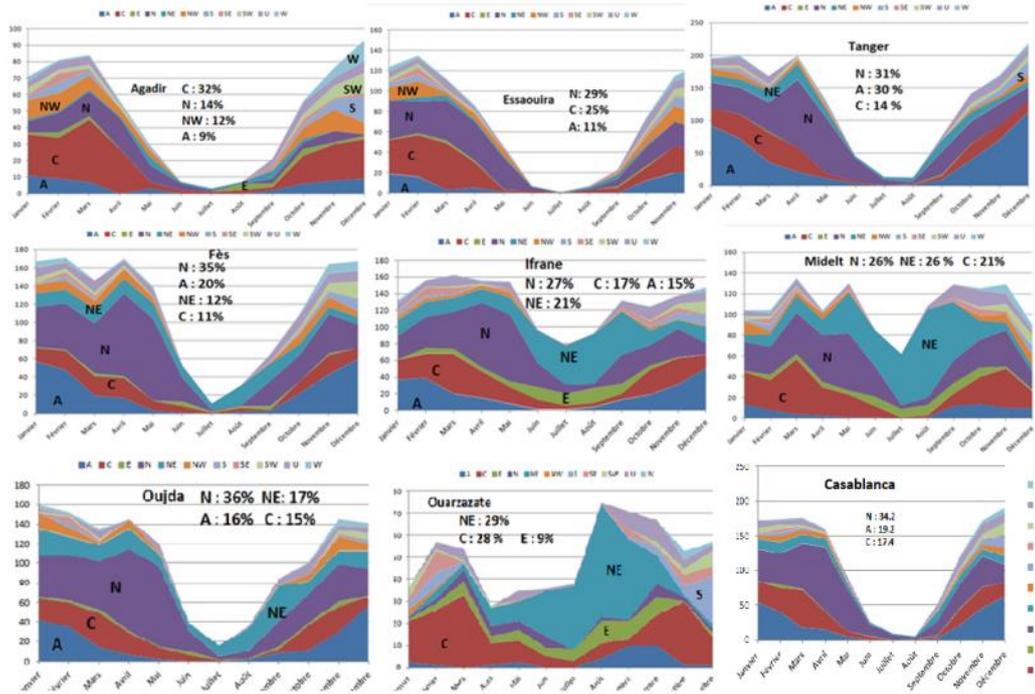


Figure 9 : CWT associés aux jours pluvieux. © Hanchane, M.

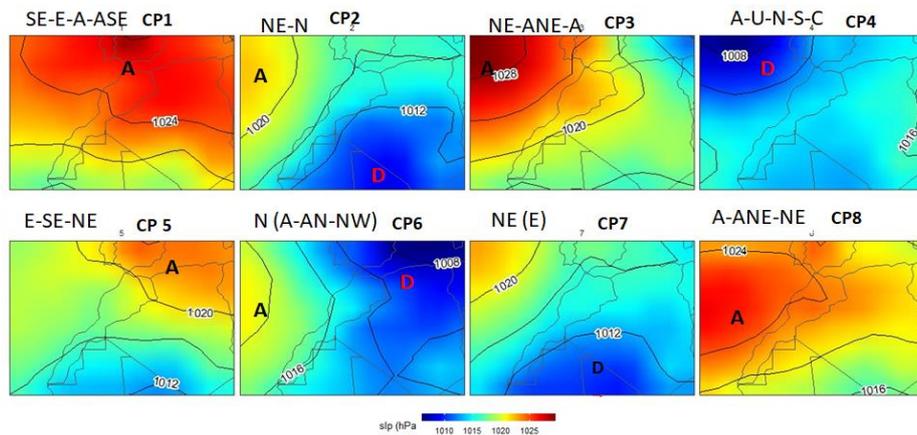


Figure 10 : Les composantes CP des WCT après ACPR-Varimax. © Hanchane, M.

Conclusion

Le pays est vulnérable aux aléas climatiques, tels que les températures élevées, la sécheresse et les précipitations intenses. Les conséquences socio-économiques de ces risques sont négatives. Leur apparition témoigne souvent de la grande variabilité des conditions climatiques du pays. L'analyse statistique de cette variabilité a été l'objet de nombreuses études, mais très peu d'entre elles ont tenté de faire le lien entre cette variabilité et la dynamique atmosphérique. Effectivement, cette échelle sous-synoptique met en évidence le changement de la configuration atmosphérique des deux principaux centres d'action les plus importants sur le pays, l'anticyclone des Açores et la dépression saharienne, ainsi que la cyclogenèse locale représentée par des dépressions, notamment au large du Portugal, sur le golfe de Cadix, sur l'île de Madère ou même sur l'île des Baléares. On met en évidence cette dynamique atmosphérique en utilisant une classification automatique des types de circulation (CWT : Circulation Weather Types). Grâce à cela, 27 types de CWT ont été classés : anticycloniques (A), cycloniques (C),

directionnels (Est, Nord,...) et hybrides (C-Nord, AC-Sud,...). Dans cette étude, il a été démontré que les journées et les nuits chaudes augmentent et sont liées au CWT de type NE. L'augmentation de ce genre de circulation explique donc l'augmentation des vagues de chaleur pendant la journée et la nuit. Pour la CP2, la réduction des types NE et N peut entraîner une baisse des précipitations pendant les mois chauds et les mois humides de l'année, respectivement.

Bibliographie

Born, K., Fink, A., Knippertz, P. 2010. Meteorological processes influencing the weather and climate of Morocco. In book: Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa, Publisher: Springer Editors: P. Speth, M. Christoph, B. Diekkrüger, M. Bollig, A. H. Fink, H. Goldbach, T. Heckelei, G. Menz, B. Reichert, M. Rössler. 150-163.

Delannoy H., Lecompte M. 1980. Utilisation de l'analyse factorielle des correspondances pour l'étude, des précipitations quotidiennes: un exemple au Maroc. *Méditerranée*, Troisième série, Tome 40, 4-1980. Recherches climatiques en régions méditerranéennes. pp. 29-36.

Jenkinson, A.F. and Collison, F.P. 1977. An Initial Climatology of Gales over the North Sea. Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62, Meteorological Office, Bracknell.

Jones P.D., Hulme M., Briffa K.R. 1993. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Climatol*, **13**, pp. 655–663.

Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J.A., Trapero, L., Martin-Vide, J., 2019. Combining circulation weather types and daily precipitation modelling to derive climatic precipitation regions in the Pyrenees. *Atmos. Res.* **220**, 181–193. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2019.01.018>.

Apport de la géomatique dans l'étude de l'érosion: applications au Maroc oriental

Abdelkader SBAI & Omar MOUADILI

Université Mohamed Ier, Oujda (Maroc). Sbaiabdelkader59@gmail.com

Résumé: L'objectif de cette étude est d'évaluer l'apport de la géomatique dans l'étude de l'érosion hydrique, la dynamique littorale et des dunes. Plusieurs sites d'étude ont été choisis au Maroc oriental : embouchure de la Moulouya, couloir de Taourirt – Guercif, Hauts plateaux, Haut Atlas oriental et oasis de Tafilalt. L'étude montre que la géomatique permet de déterminer la cinématique de ces sites en 3-D avec une résolution temporelle annuelle et une précision inférieure au centimètre. Des mesures réalisées entre 2006 et 2023 ont permis de montrer les variations spatiales et temporelles de la cinématique du trait de la côte et du déplacement des dunes ainsi que la direction et la surface de développement des badlands. Les résultats présentés prouvent que la géomatique permet de suivre en continu la cinématique d'entités géomorphologiques aux déplacements faibles et lents et pourrait donc constituer, dans un système d'alerte, un complément aux techniques de géodésie conventionnelles.

Mots-clés: géomatique, érosion, littoral, dune, badlands, Maroc oriental

Contribution of geomatics in the study of erosion: applications in eastern Morocco

Abstract: The objective of this study is to evaluate the contribution of geomatics in the study of water erosion, coastal dynamics and dunes. Several study sites were chosen in eastern Morocco: Moulouya mouth, Taourirt – Guercif corridor, High plateaus, Eastern High Atlas and Tafilalt oasis. The study shows that geomatics makes it possible to determine the kinematics of these sites in 3-D with an annual temporal resolution and an accuracy of less than one centimeter. Measurements carried out between 2006 and 2022 have shown the spatial and temporal variations in the kinematics of the coastline and the displacement of the dunes as well as the direction and surface of development of the badlands. The results presented prove that geomatics makes it possible to continuously follow the kinematics of geomorphological entities with weak and slow movements and could therefore constitute, in a warning system, a complement to conventional geodesy techniques.

Keywords: geomatics, erosion, coastline, dune, badlands, eastern Morocco

Introduction

La géomatique est une discipline qui regroupe les connaissances et technologies qui permettent de produire, traiter, stocker, et visualiser de façon numérique les données à caractère spatial. Elle regroupe en plus des méthodes d'acquisition de données (télédétection, photogrammétrie, topométrie, lasergrammétrie, GPS, etc.), la géodésie, la cartographie, les SIG et l'analyse spatiale. C'est un domaine qui a émergé grâce à l'informatisation naissante que la société a connue dans les années 1970 et 1980 et qui continue à évoluer profondément suite aux nouvelles avancées technologiques et l'entrée dans une nouvelle ère digitale.

Elle est devenue un outil indispensable destiné à l'aménagement du territoire, aux transports, à la protection de l'environnement, à l'urbanisme, à la gestion agricole et forestière, à la prévention des risques naturels...

L'érosion est un phénomène naturel qui peut s'aggraver sous l'action combinée de conditions climatiques et anthropiques particulières. De façon générale, elle dépend de l'importance et de la fréquence des agents d'érosion (pluie et ruissellement), des types de sols, de la topographie et de l'occupation du territoire.

L'objectif de cet article est de présenter quelques exemples de l'utilisation de la géomatique dans l'étude du phénomène de l'érosion.

I. Application à l'étude de l'érosion des sols, de l'érosion littorale et de l'érosion éolienne

I.1. Application à l'étude de l'érosion des sols

Pour étudier l'érosion des sols et évaluer le degré de dégradation de certaines ressources naturelles, nous avons pris le bassin d'Oued El Abed situé au nord-est du Maroc, au sud-ouest de Taourirt. Sa superficie est de 317 km² à l'exutoire (confluence avec la Moulouya) ; sa longueur est de 41km ; sa largeur est de 10km. La dénivellation est de 744 m (hauteurs comprise entre 265 m et 1009 m). Le bassin ne représente que 0,6% du bassin versant de oued Moulouya qui est de 53726 km².

Pour estimer la perte en sol, l'équation universelle de Wischmeier et Smith (1978) a été utilisée. Après avoir calculé les différents facteurs du modèle USLE, nous avons calculé les superficies des pertes en sol selon des classes. Les zones à forte érosion représentent 15 km² d'un total de 317 km², soit 5%. Les terres caractérisées par une érosion très forte s'étendent sur environ 16,5 km². La dégradation spécifique moyenne du sol dans le bassin est estimée à 6,37 t/ha/an (Sbai et Mouadili, 2021, Mouadili, 2021).

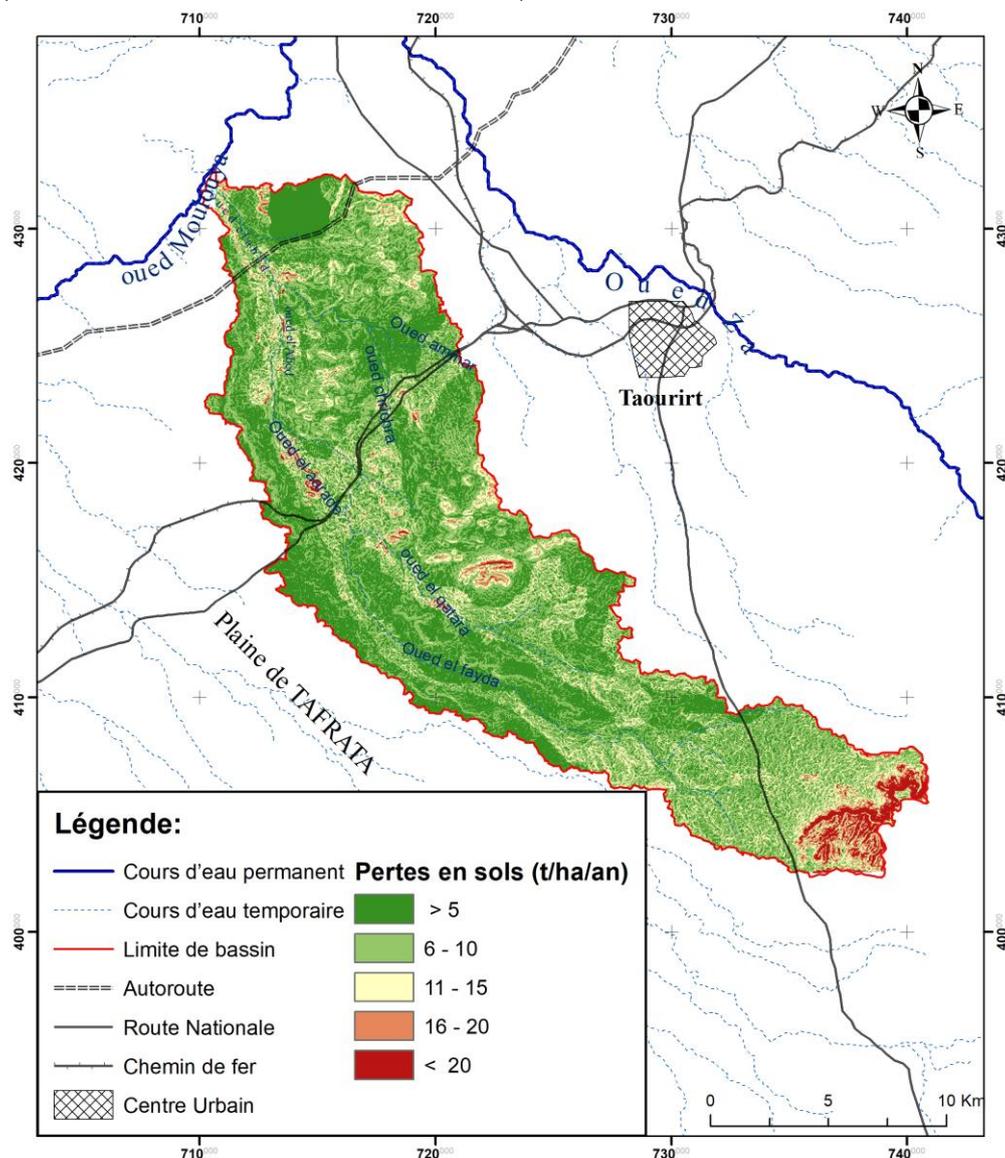


Fig.1. Carte d'érosion des sols (A)

I.2. Application à l'étude de l'érosion du littoral de Saidia-Ras El Ma

L'embouchure de la Moulouya connaît une dynamique importante. Elle a fait l'objet de mesures par photo-intéprétations multi-dates (Sbai et Bouazza, 2002, Salmon et al., 2012). La vitesse d'érosion a été estimée à 8m/an de 1958 à 1988. La bande côtière adjacente à la ville de Saidia a également connu des changements en fonction des conditions climatiques. Le taux d'érosion moyen est d'environ 0.5m par an (Fig.2).

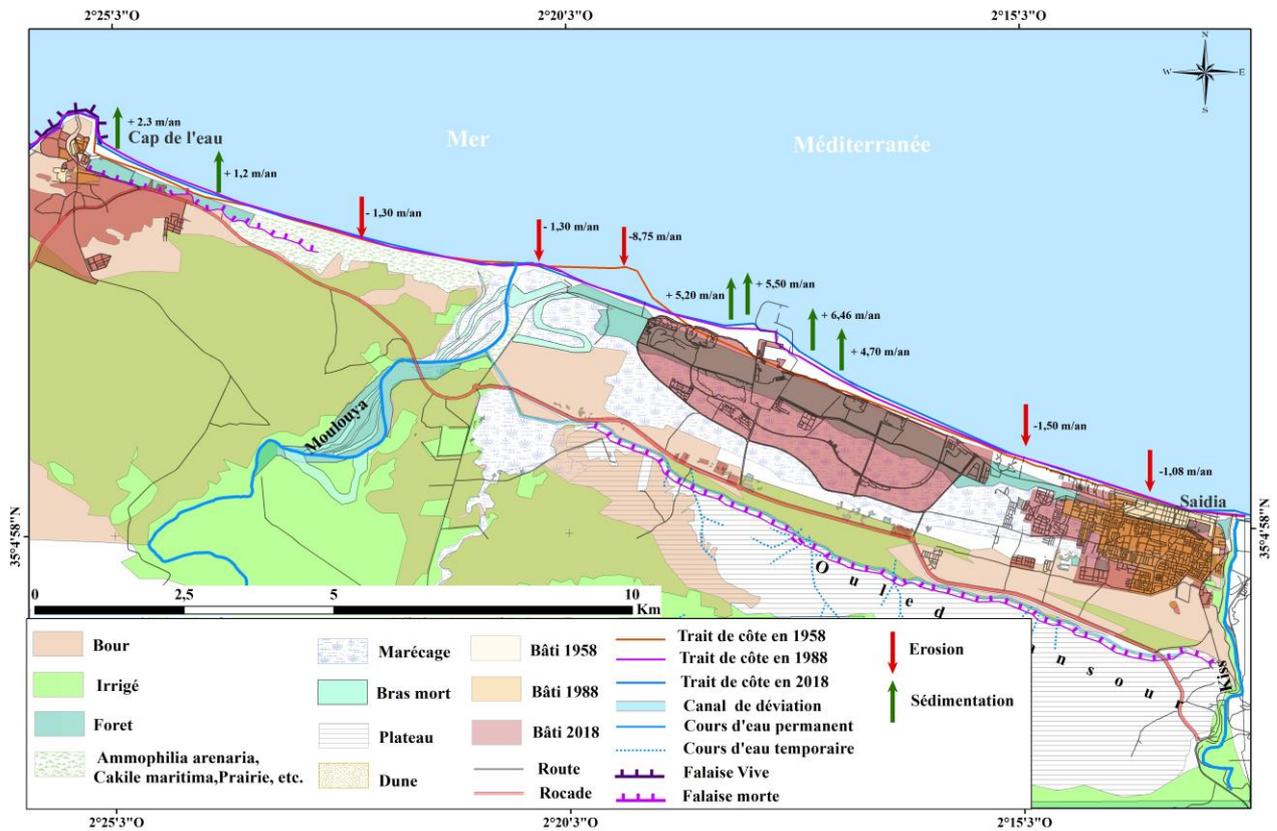


Fig.2. Evolution du littoral de Saidia entre 1958 et 2018

I.3. Application à l'étude de l'érosion éolienne en marge de l'oasis du Tafilalet (Sud-est du Maroc)

Le problème de l'ensablement est l'un des risques naturels inquiétants qui menace l'écosystème oasien, car il provoque la dégradation des ressources en sols de la région. Le suivi sur une période de dix ans (2011 à 2021), montre les différentes évolutions quantitatives et morphologiques de ces dunes en croissant. Les formes morphologiques des accumulations de sable reflètent la nature de leur dynamique, la direction du mouvement des vents dominants dans la région, ainsi que plusieurs autres facteurs naturels, notamment la planéité topographique, et la rareté du couvert végétal, voire son absence. L'étude a également montré, en suivant une dune en croissant qui exprime la dynamique du phénomène pour la même période mentionnée ci-dessus, que l'ensablement connaît une dévolution importante, puisque la distance du déplacement de la dune a atteint environ 120m, ce qui équivaut à 12 mètres par an (Fig.3).

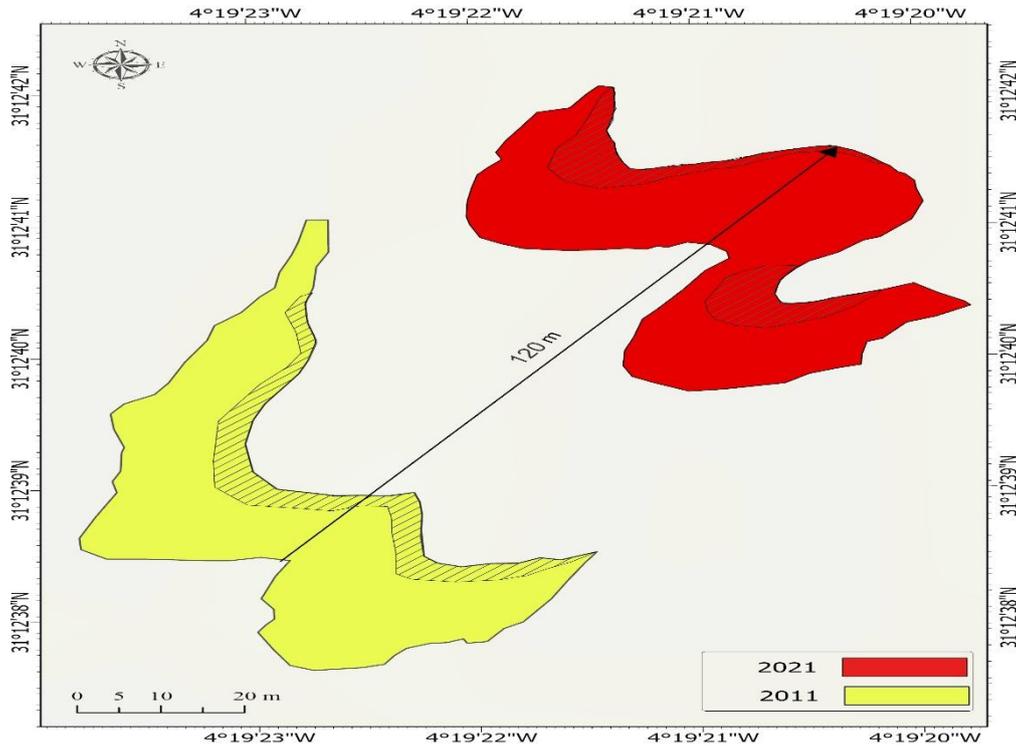


Fig.3. Evolution morphologique de la dune en croissant entre 2011 et 2021

II. Apport du GPS dans l'étude de la dynamique littorale et éolienne au Maroc nord-est

II.1. Apport du GPS dans l'étude de la dynamique littorale au Maroc nord-est

L'objectif est d'évaluer, par une étude de terrain, le potentiel du GPS (*Global Positioning System*) pour la surveillance de la dynamique littorale. Le site d'étude est l'embouchure de la Moulouya. Des mesures GPS réalisées entre 2013 et 2021 ont permis de montrer des variations spatiales et temporelles de la cinématique de l'embouchure de la Moulouya.

Entre 2013 et 2022, nous avons un semis de 6610 points. Nous constatons visuellement, sur la figure 4, que la ligne de côte s'est retirée de 172 m sur la rive droite et de 106 m sur la rive gauche. Quant à la flèche littorale qui s'est construite, elle s'est déplacée vers le sud-est de 350m.

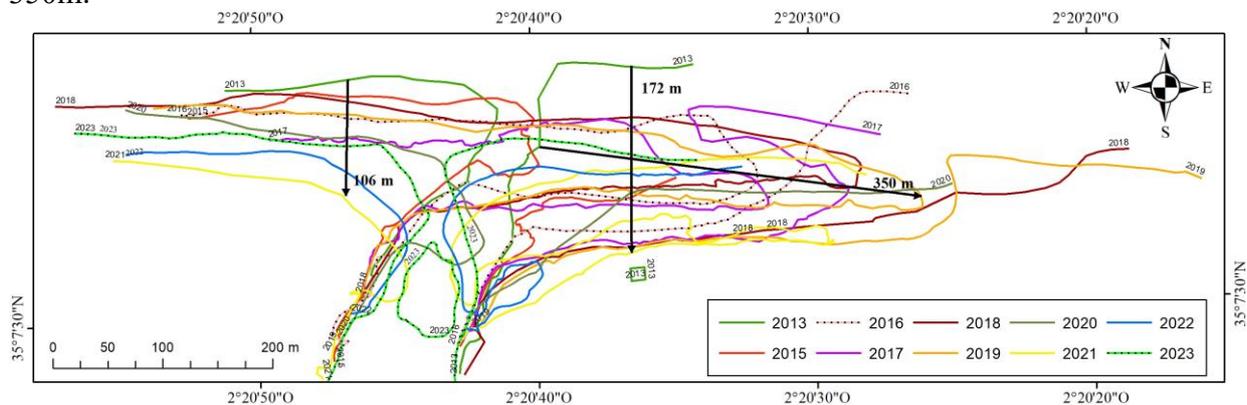


Fig.4. Dynamique de l'embouchure de la Moulouya et de la côte entre 2013 et 2023

II.2. Apport du GPS dans l'étude de la dynamique éolienne au Maroc nord-est

Le suivi des dunes de Bouarfa et du Chott Tigri entre 2013 et 2023 (Fig.5) indique des vitesses moyennes respectives de 6 et 3 m/an pour les dunes de Bouarfa et 5 et 10m/an pour les dunes du Tigri. Ces variations annuelles sont probablement à attribuer aux vitesses de vents (Sbai et Mouadili, 2023).

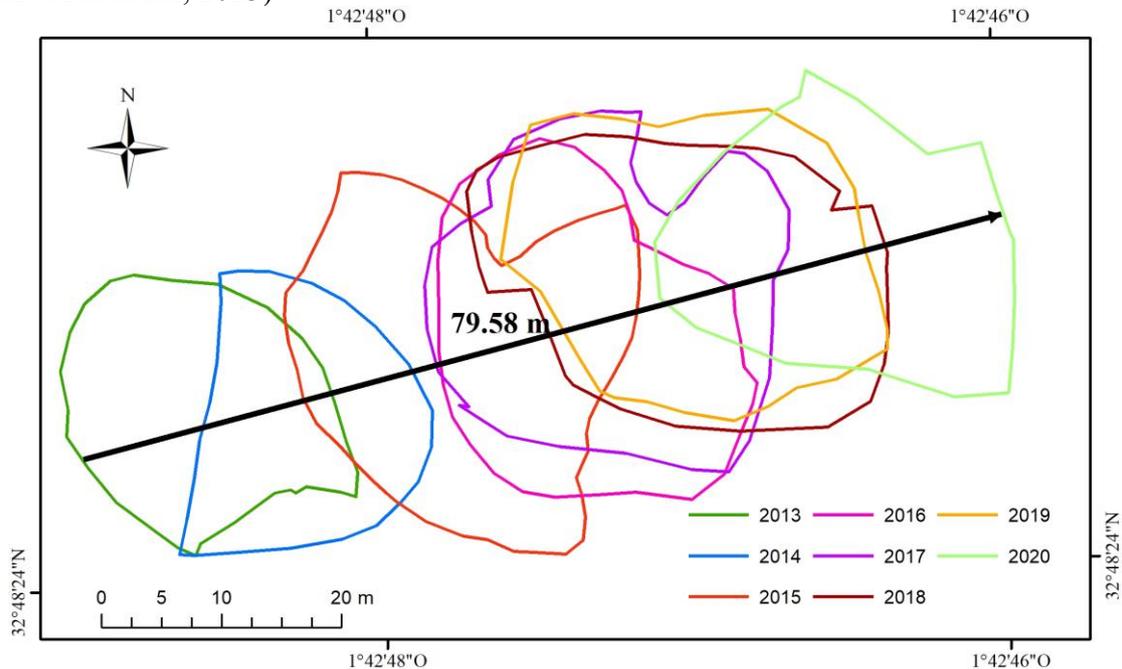


Fig.5. Evolution des positions de la dune 2 au Chott Tigri

III. Apport des outils modernes de relevés topographiques dans l'étude de l'érosion régressive (badlands) au Maroc nord-est

Trois cas de ce phénomène ont été mesurés avec des outils modernes de relevés topographiques:

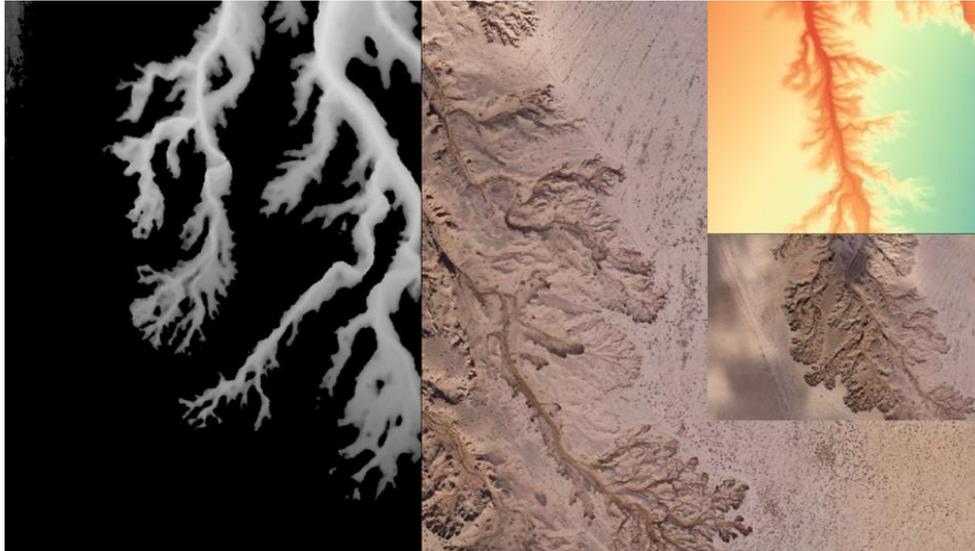
- **Scanner** Laser 3D de type Leica ScanStation P40, précision inférieure à 1 cm,
- **Drone** - UAV de type Phantom 4 Pro – DJI , dont la précision est inférieure à 5 cm,
- Station **GPS** Leica 1200 dans laquelle la marge d'erreur est inférieure à 5 cm.

L'érosion a été mesurée par ces différentes méthodes afin de déterminer le volume de perte en sol par érosion régressive (ravine), qu'on trouve dans des sites localisés (badlands) et pas dans d'autres et afin de comparer les résultats de ces méthodes. Le cas de Sehb El Faïda (près d'Oued El Gattara) est caractérisé par une dynamique très rapide.

III.1. Comparaison des méthodes de mesure de l'érosion avec les dispositifs de relevé topographique (drone, scanner 3D et GPS)

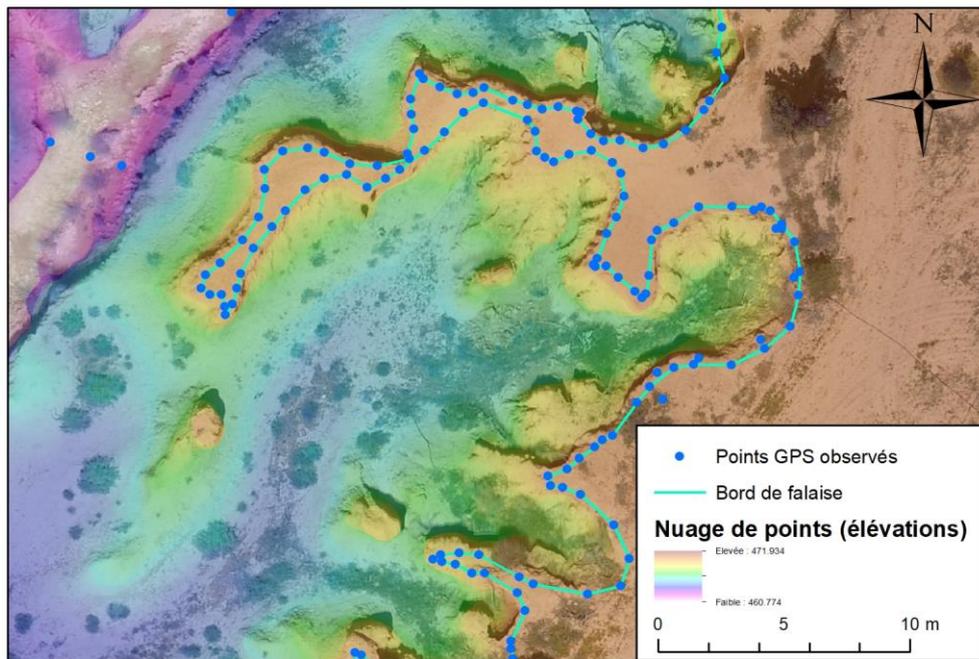
La figure 6 montre la vue d'ensemble après assemblage des clichés pris par le drone (mosaïque). Après traitement, le modèle numérique de surface (DSM)¹ a été extrait. Il s'avère également que ce modèle, extrait par drone, est très similaire au nuage de points obtenu par le scanner 3D (Fig.7), à Sehb El Ghazel, qui montre clairement les bords des falaises.

¹ Digital Surface Model / Modèle Numérique de Surface.



Source: Mesures par Drone UAV, le 9 décembre 2020

Fig.6. Photographies par drone après assemblage, traitement et extraction du modèle numérique de surface DMS, cas d'el Qattara



Source: Mesures de terrain par GPS, Drone UAV et Scanner 3

Fig.7. Exemple de points levés par GPS, Drone et Scanner 3D, cas de Sehb El Ghazel

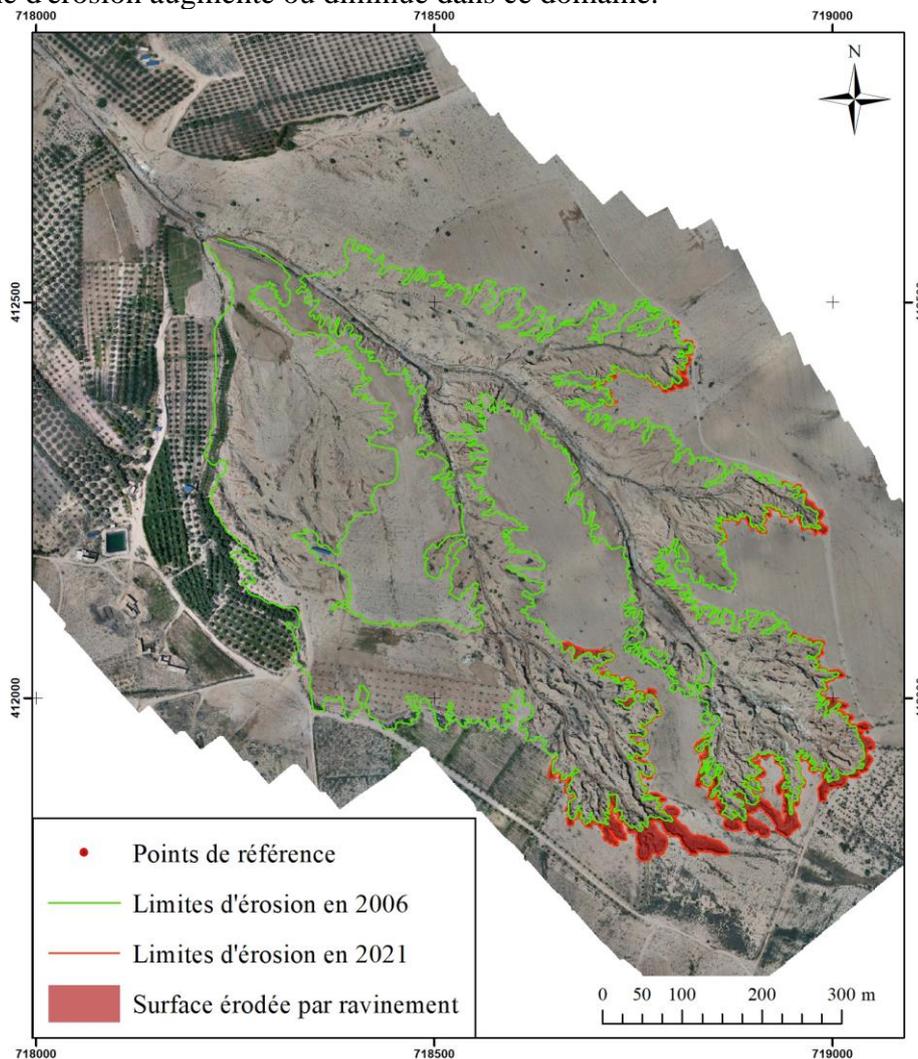
La figure 7 montre bien la différence entre les points levés par les différentes méthodes et outils du relevé topographique, notamment au bord de la falaise.

Les points bleus concernent les observations par GPS, et le nuage de points dégradé en couleurs selon les hauteurs est issu du scanner 3D ou du drone.

III.2. Mesure et détermination de la direction de l'érosion par ravinement, calcul de la superficie des terres dégradées et quantification du volume de perte en sol, au cours de la période 2006 et 2021

Il ressort du site de Sehb El Faïda qu'une large zone a été perdue à cause de l'érosion régressive depuis 2006, mais elle n'est active que dans certains sites et pas dans d'autres sur ces badlands, ce qui signifie que la zone qui connaît une dynamique rapide est confinée à certaines directions et quelques falaises (Fig.8). Il connaît la perte d'une superficie estimée à 14 568 m², depuis 2006. Cette surface s'ajoute aux badlands qui sont estimées à plus de 40 hectares sur ce site.

La longueur de la ligne d'érosion, qui connaît une activité rapide à **Sehb El Faïda**, s'étend sur 4058 m en 2021 par rapport à 2006, où elle ne dépassait à peine 4 000 m. Cela est dû à la convergence de certains badlands, où l'évolution du ravinement se dirige vers un point de rencontre, ce qui montre que la zone derrière ce point s'isole, puis se développe en badlands, puis la ligne d'érosion augmente ou diminue dans ce domaine.



Source : Drone UAV en date du 17 avril 2021.

Fig.8. Évolution de la ligne et de la surface d'érosion entre 2006 et 2021 à Sehb El Faïda

La zone d'évolution du ravinement a contribué à la perte de gros volumes de sol et dans différentes directions (Fig.9), malgré le fait que les conditions climatiques de cette période soient connues. Elles se caractérisent par la sécheresse, le manque de précipitations, l'irrégularité et parfois la violence sur une surface fragile. Mais que se passerait-il si les conditions climatiques et les précipitations étaient supérieures au volume actuel pour la période

étudiée ? Cela signifie que de grandes quantités de pertes en sol estimées à des milliers de tonnes ont été perdues ou seront perdues, en raison de la fragilité du terrain (Mouadili O et Sbai A, 2022) et de ses caractéristiques naturelles qui ne supportent pas la pression, qu'elle soit humaine ou naturelle (Mouadili et al., 2019; 2022).

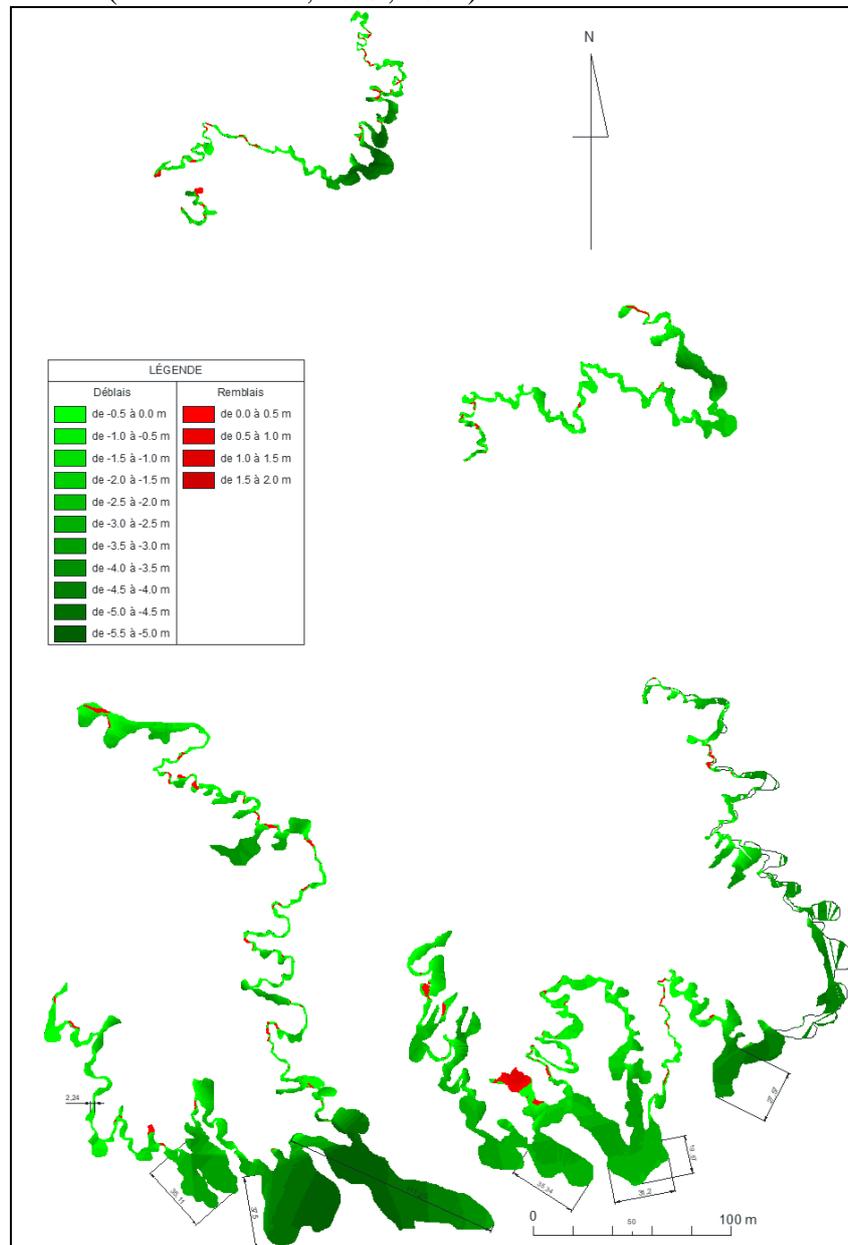


Fig.9. Volume et profondeur de perte en sol, et le sens d'évolution des badlands à Sehb El Faïda

Depuis 2006, le site de Sehb El Faïda a perdu environ 38596 m^3 avec une superficie de 14568 m^2 , soit un volume de 26493 m^3 par hectare. Puisque la densité de sol brut à Sehb El Faïda est estimée à $1,156$ tonnes par m^3 , le site a perdu $30\,625$ tonnes de sol pendant 15 ans, et nous concluons qu'il perd 2041 tonnes/ha/an.

Le ravinement à Sehb El Faïda s'étend vers le sud-est selon le sens de l'écoulement, de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, avec une moyenne de trente mètres pendant la période étudiée dans de nombreuses zones, soit deux mètres par an, et chaque mètre représente mille tonnes de sol, à l'exception de la ravine au milieu de l'extrême sud, où l'expansion a atteint $111,25$ mètres pendant 15 ans. C'est-à-dire à une vitesse de $7,42 \text{ m/an}$, soit environ 300 tonnes

par mètre pendant une année. La profondeur de ce ravinement dépasse souvent 5 m, ce qui explique l'énorme volume de perte en sol par ce site, et l'envasement des barrages Mohammed V et Mechraa Hammadi.

Conclusion

La géomatique est donc adaptée à la mesure des déplacements lents de la ligne du rivage, des dunes, des badlands... Son utilisation au Maroc oriental est d'une grande importance pour la mesure et le suivi des phénomènes morphodynamiques. Les résultats obtenus permettent de quantifier ces phénomènes avec une précision millimétrique. Plusieurs cas ont été étudiés. Il s'agit notamment de l'érosion hydrique, l'érosion littorale, l'érosion éolienne et le ravinement généralisé, qui se développe en badlands. Cette étude s'est faite avec des approches et des outils différents: photointerprétation, imagerie satellitale, levés topographiques modernes et très précis comme le scanner 3D, le drone et la station GPS.

L'érosion a été mesurée par ces différentes méthodes afin de pouvoir comparer les résultats. Il s'avère que ces outils sont complémentaires les uns aux autres et que chaque dispositif présente des avantages et des inconvénients.

Après avoir déterminé la méthode la plus appropriée pour mesurer l'érosion, la quantité en perte de sol, les variations spatiales et temporelles de la cinématique du trait de la côte et du déplacement des dunes ainsi que la direction et la surface de développement des badlands ont été extraits.

L'utilisation de la géomatique pour ce type d'application est cependant limitée par le coût du matériel. En dépit de ces difficultés, la géomatique a la capacité de suivre la dynamique d'entités géomorphologiques aux déplacements faibles et lents et pourrait donc constituer, dans un système d'alerte, un complément aux techniques de topométrie conventionnelles.

Références bibliographiques

- Abulude F.S., Akinnusotu A. & Adeyemi A. (2015). Global Positioning System and its wide applications. *Continental J. Information Technology* 9 (1): 22 - 32, 2015. <http://www.wiloludjournal.com>
- Benata M (2021) - La Moulouya, fleuve marocain qui n'atteint plus la mer. <https://www.initiativesfleuves.org/actualites/moulouya-fleuve-marocain-natteint-plus-mer>
- Chevalier P-A (2002) - *Fondements mathématiques du positionnement Par GPS*. Une introduction didactique à la géométrie du GPS: 3^{ème} partie. http://mayerwin.free.fr/telechargement/gnss_triangulation.pdf. 21 p.
- Dixon T (1991) - The Global Positioning System. *Rev. Geophys.* 29. P.249–276.
- Dominguez J-M (2005) - Topographie: découvrir le fonctionnement du GPS. <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dossiers/d/physique-topographie-decouvrir-fonctionnement-gps-504/page/2/>.
- Duranthon J.-P. (2000) - Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance de sites naturels instables. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 228, 47-57.
- Elliott Kaplan and Christopher Hegarty (2005). *Understanding GPS – Principles and Applications*. ISBN: 1580538940.
- GILBERT C (1993) - Portable GPS systems for mapping: features versus benefits. *Earth Observation Magazine*, 10, 43-48.
- Guochang X (2007) - *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Springer Science & Business Media, 5 oct. 2007 - 340 p.
- Herring T.A. (1996) - The Global Positioning System. *Science*, 96, 32-38.
- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, COLLINS J (2013) - *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer Science & Business Media.

- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E (2007) - *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 20 nov. 2007 - 518 p.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (1997) – *GPS - Theory and practice*, 4th Ed., Springer, Wien, New-York. 389 p.
- Larson K.M. and Agnew D.C. (1991) - Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement, 1. Precision and accuracy, *J. Geophys. Res.* 96. P. 16547–16565.
- Leick A. (1995) - *GPS Satellite Surveying*. Wiley, New York, 256 p.
- McNamara J. (2008). *GPS for Dummies*. ISBN: 0470156236
- Mouadili O (2021), « Érosion hydrique et dynamiques environnementales dans les bassins d'Oued Tlagh et d'Oued El Abed (Taourirt, Est du Maroc) – Approches géomatiques ». Thèse de doctorat. Dép.de Géographie. FLSH, Université Mohammed I – Oujda. 421 p.
- Mouadili O et Sbai A (2022). Modes d'occupation des sols et leur impact sur le milieu environnemental, cas dans le couloir Taourirt-Guercif (nord-est du Maroc). *Revue Rawafed d'Etudes et de Recherches Scientifiques en Sciences Sociales et Humaines*, Volume 6, Numéro 3, 6(3) Numéro de série 13. En langue arabe.
- Mouadili O, Sbai A et Benrbia Kh (2022). Impact de la faiblesse des services de base et de la vulnérabilité sociale sur la dynamique environnementale et les ressources naturelles: Cas des bassins d'Oued Tlagh et Oued El Abed (Couloir de Taourirt-Guercif, Nord-Est du Maroc). Ouvrage collectif «La dynamique des ressources et des activités économiques dans les campagnes marocaines et perspectives de durabilité». Centre démocratique arabe des études stratégiques, politiques et économiques. Allemagne.
- Mouadili O, Sbai A, El Harradji A et El Hafid I (2019). Le risque d'érosion hydrique entre fragilité des équilibres écologiques et exploitation humaine; Cas du bassin d'Oued El Abed. Actes du Colloque National sur les Aléas Hydroclimatiques et Géomorphologiques au Nord-Est du Maroc: aléas, vulnérabilités et aménagement. Oujda, 26 décembre 2017. Publications de l'UMP, Oujda. En langue arabe.
- Salmon,M; Sbai,A; Boumeaza,T; Benata,M & Ozer,A (2010) - L'érosion des côtes meubles de l'extrême nord-est du Maroc. *Bulletin de la Société Géographique de Liège (BSGLg)*. 54. 97-105. En hommage au Professeur André OZER. Liège. 24 avril 2010.
- Sbai A, Mouadili O, Oukada M, Saidi A et Bahkan M (2015) -Apport du GPS au suivi de la dynamique littorale et éolienne. Application au Maroc nord-est. *21^{ème} rencontre des géomorphologues marocains*. Casablanca 16-17 décembre 2015.
- Sbai A, Mouadili O, Saidi A et Bahkan M (2016) - Le GPS en géomorphologie dynamique. Application au suivi de la dynamique littorale et éolienne (Maroc nord-est). *La 3^{ème} Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG*. Oujda les 22 et 23 novembre 2016. Centre d'Etudes et de Recherche Humaines et Sociales, Oujda (CERHSO). P.397-403. <http://www.ump.ma/fr/ouvrages/actes-du-colloque-international-des-utilisateurs-du-sig-3eme-edition>
- Sbai A. et Bouazza A. (2002) - Evolution géomorphologique et dynamique récente de la plaine littorale de Saïdia (Maroc Nord-est). *Colloque national: Le littoral méditerranéen oriental: diagnostic et choix de développement et d'aménagement*. Oujda les 13 et 14 février 2002. P.3-30.
- Sbai, A et Mouadili, O (2021) - Le risque d'érosion hydrique entre fragilité des équilibres environnementaux et perspectives de durabilité: Cas du bassin versant d'oued El Abed, Maroc. *Revue marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. Vol. 9 No 4 (2021): (Décembre 2021). Soumis: avr 5, 2021. Publiée: déc 15, 2021. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/issue/view/83
- WISCHMEIER W. H, SMITH D. D, (1958) - Rainfall enegy and ist relationship to soil loss. *Trans. AGU* 39, pp285-291.

La Gestion conservatoire des terres de montagne, moyen de lutte contre les crues éclair ?

Abdellah Laouina. Université Mohamed V, Rabat

Résumé: Les eaux issues du château d'eau montagneux permettent l'irrigation des piémonts et des plaines ; Or la dégradation des terres d'amont et son extension récente représentent une menace pour l'avenir de cette relation. L'enjeu est donc de régulariser les écoulements et de garantir un débit suffisant, tout en réduisant les impacts négatifs des crues subites.

Les eaux de ruissellement direct subissent lors de leur cheminement, de gros prélèvements par évaporation physique. Par ailleurs, elles causent sur leur parcours de multiples dégâts. Plus de 1/3 de la lame écoulee est perdue en ruissellements sauvages à effet positif nul et par contre responsables d'effets nuisibles multiples. Un aménagement bien conçu devrait permettre de bénéficier de cette eau.

Pour atteindre ces objectifs,

- il faut réduire dans les champs et parcours, la part du ruissellement direct, au profit de l'infiltration,
- dans les lieux vulnérables et durant les situations météorologiques initiant du ruissellement, il faut éviter la concentration de ce dernier et empêcher la formation de rigoles;
- accroître l'infiltration lors des crises d'intensité, mais sans saturer les profils lors des pluies persistantes, afin d'éviter les mouvements de masse, ce qui suppose d'orienter l'eau en surplus vers des évacuateurs de crue aménagés.
- la multiplicité de facteurs rentrant en ligne de compte oblige donc à faire le choix d'une diversification des actions et d'une intégration des traitements biologiques et mécaniques.

Devant l'immensité de la tâche, on est en droit de se poser la question: quelle option d'aménagement adopter? La gestion durable des terres, consistant dans une intensification raisonnée, fondée sur l'exploitation des potentiels et la gestion des états de surface du sol, représente l'option gagnante à plusieurs niveaux.

Les usages raisonnés des ressources vont au minimum agir dans un sens de régularisation des débits d'écoulement et avoir pour résultat de relever les étiages. L'autre effet sera de réduire l'érosion des sols et donc limiter le rythme de l'envasement. Mais pourra-t-on obtenir en sus une augmentation importante de débit, sans générer des crues éclair responsables de dégâts en aval ?

Mots-clés: Gestion conservatoire, montagne, lutte contre les crues éclair, Maroc

Conservation management of mountain lands, a means of combating flash floods?

Abstract : The water from the mountainous water tower allows the irrigation of the foothills and plains; However, the degradation of upstream lands and its recent extension represent a threat to the future of this relationship. The challenge is therefore to regulate flows and guarantee sufficient flow, while reducing the negative impacts of flash floods.

Direct runoff water undergoes large amounts of withdrawal by physical evaporation as it travels. Furthermore, they cause multiple damages along their route. More than 1/3 of the surface area is lost in wild runoff with no positive effect but responsible for multiple harmful effects. A well-designed development should make it possible to benefit from this water.

To achieve these objectives:

- it is necessary to reduce the share of direct runoff in fields and rangelands, in favor of infiltration,
- in vulnerable places and during meteorological situations initiating runoff, it is necessary to avoid the concentration of the latter and prevent the formation of channels;
- increase infiltration during crises of intensity, but without saturating the profiles during persistent rain, in order to avoid mass movements, which requires directing excess water towards designed spillways.
- the multiplicity of factors coming into play therefore obliges us to choose a diversification of actions and an integration of biological and mechanical treatments.

Faced with the immensity of the task, we are entitled to ask ourselves the question: which development option should we adopt? Sustainable land management, consisting of reasoned intensification, based on the exploitation of potential and the management of soil surface conditions, represents the winning

option on several levels.

Reasoned uses of resources will at least act in the sense of regulating flow rates and have the result of raising low water levels. The other effect will be to reduce soil erosion and therefore limit the rate of siltation. But will we also be able to obtain a significant increase in flow, without generating flash floods responsible for damage downstream?

Keywords: Conservation management, mountains, fight against flash floods, Morocco

Introduction

Les montagnes du Maroc regroupent en majorité, des ruraux marginalisés, avec un taux de 59% d'analphabètes et une part élevée de petits exploitants ne possédant qu'une infime partie de la SAU du pays. Ces zones de relief élevé et découpé fournissent par contre 63% des écoulements, alors que seule une petite partie de l'eau précipitée s'infiltré, compte tenu de la forte dégradation des sols. On est donc en droit de penser que le scénario gagnant serait celui d'une restauration des terres qui permettrait à la fois de relever significativement les étiages, à travers plus de drainage interne et d'améliorer la productivité des petites exploitations. Plus d'eau retenue par les sols ou utilisé pour l'arrosage, permettrait ainsi de sortir ces populations de la marginalité, d'éponger les flots de crue et de contribuer à rétablir les équilibres socio-économiques entre les divers espaces du pays.

Il se pose donc la question: de quel taux peut-on améliorer ou au moins maintenir les débits, et en même temps réduire les risques de crue, alors que nous sommes dans un contexte de climat qui change, avec notamment le phénomène du réchauffement qui relève l'ETP et le déficit en eau, de réduction générale des précipitations et de l'enneigement et d'exagération de la magnitude des événements extrêmes ?

La bibliographie relate des exemples de réussite en termes d'aménagement. C'est le cas du Tigré éthiopien (Reij,1997) où la restauration des terres de l'amont a permis de relever fortement la part de l'infiltration de l'eau qui alimente des nappes souterraines et des sources en aval, permettant la généralisation de l'irrigation de piémont. Cette situation de continuum hydrogéologique amont aval, avec des nappes d'amont alimentant celles de l'aval a permis de relever fortement le niveau de l'aquifère. L'irrigation a donc pu être étendue de manière conséquente.

Climat et Hydrologie : Irrégularité et changement du climat

La bibliographie montre par ailleurs que la relation changement climatique – hydrologie n'est pas simple et que le changement en cours ne réduit pas forcément les débits et qu'il peut même les relever. C'est le cas au Sahel, dans le bassin du Nakambe au Burkina Faso. Malgré la baisse de la pluviométrie depuis 1970, les débits et les coefficients d'écoulement augmentent régulièrement (Gbohoui, 2021). Mais, les crues sont plus précoces et plus intenses, ce qui signifie que les débits journaliers augmentent mais la crue est moins étalée dans le temps. Cette augmentation des écoulements est liée à la rétraction des zones de végétation naturelle, remplacées par des cultures et des sols nus générant plus de ruissellement. Ce surplus d'écoulement n'est souvent pas profitable, ni pour l'environnement ni pour l'économie. En effet ces eaux de ruissellement sont fortement chargées en particules, parce que les sols sont plus fragiles suite à la réduction de la biomasse végétale et à l'ablation des horizons humifères. On a ainsi perdu les conditions de stabilité structurale, à même de favoriser l'infiltration et réduire la part du ruissellement direct, responsable de l'érosion de surface. Par ailleurs, les crues montrent un effet de concentration dans le temps, sans doute accompagnée d'un renforcement

de la puissance de l'écoulement et donc de la capacité de détachement des particules et de transport d'une charge plus grande. Plus d'eau, mais une eau plus chargée, signifie qu'un effet de dégradation a atteint l'amont et qu'un effet d'envasement peut porter atteinte aux réservoirs, aux canaux de dérivation d'aval ainsi qu'à la qualité de l'eau.

Les effets négatifs du ruissellement direct et de l'érosion représentent l'évolution que sont entrain de connaître les versants des montagnes et des steppes au Maroc, avec un renforcement de la magnitude des événements, mais sans augmentation des modules hydrologiques. Car, depuis 1980, le nombre d'années sèches n'a pas cessé d'excéder celui des années pluvieuses avec pour conséquence la tendance à coupler assèchement et déficit en eau.

Une bonne partie des eaux de ruissellement ne rejoint pas les talwegs principaux, pour être prise en compte dans l'appréciation hydrologique des stations. Il s'agit de ruissellements qui ne dépassent pas le stade des ravins et s'évaporent sur les glacis et cônes de déjection des pieds de versants et de chaînes montagneuses. Ces eaux sauvages détachent des particules, les entraînent puis les abandonnent dès la réduction de leur puissance. Cette part élevée de la lame d'eau de surface est représentée par des ruissellements directs, au parcours limité, non comptabilisés dans les débits, mais responsables d'ablation et de dommages à l'habitat et aux infrastructures

Pour l'ensemble du pays, la lame d'eau ruisselée varie entre 0 et plus de 500 mm ; elle est inférieure à 50mm dans les montagnes arides avec évaporation d'environ 90% du volume précipité ; dans les milieux semi-arides elle varie de 50 à 200 mm alors que dans les milieux subhumides la lame écoulée dépasse 200mm et même 500 mm dans les massifs les plus humides de la chaîne du Rif, pour un coefficient de ruissellement de 30 à 44%. Ainsi, la façade atlantique du Haut et du Moyen Atlas, sur une superficie de plus de 31000 km² débite une lame d'eau de plus de 6 km³, alors que le Rif débite autant sur une superficie plus petite, mais dont une bonne partie ne peut être aisément utilisée du fait de la pente des cours d'eau de la façade méditerranéenne.

Depuis 2016, l'assèchement manifeste constitue une tendance effective au changement du climat. Peu de retenues de barrage ont reçu, en une année, un volume d'apport capable d'atteindre ou d'approcher la capacité originelle de l'ouvrage (Fig.1).

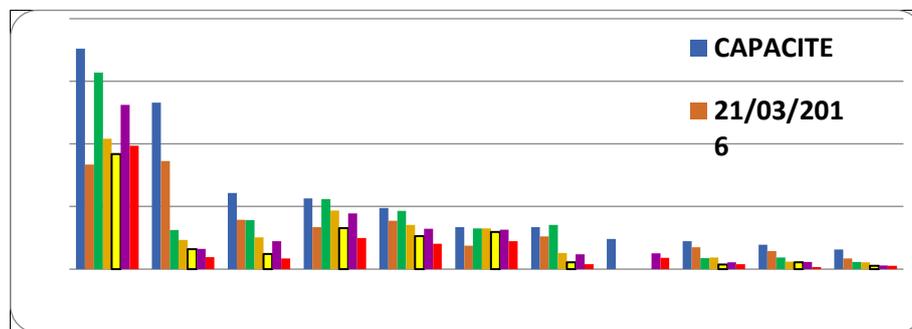


Fig. 1: Capacité des retenues en Mm³ et niveaux de remplissage à diverses dates

Le cas désolant est celui du bassin de l'Oum Rbia, cours d'eau classé traditionnellement en première place, du fait de sa régularité vantée par les travaux de Loup (1962). Le volume de la retenue du barrage Al Massira, le second du pays a baissé à 9% de la capacité en février 2023 puis à 4.64% le 4 février 2024. Pourtant, aussi bien l'Oum Rbia que deux de ses affluents, El Abid et Lakhdar reçoivent une part élevée d'alimentation karstique. Les nappes du Lias² ont-elles si peu d'influence sur le régime hydrologique, du fait de l'assèchement du climat et de la réduction de l'enneigement ? Par ailleurs, des fluctuations importantes se perpétuent et même se renforcent. Au barrage Mohammed V sur la Moulouya, le volume de remplissage de 5.1% de la capacité de la retenue, le 22 mai 2023 a grimpé à 10.6% la semaine suivante pour s'élever à 63.1% le 12 juin. En janvier 2024, il

² La crue d'El Hajeb, sur le versant NW du Moyen Atlas en 1997 pose le problème du rôle du karst dans l'atténuation attendue des pics de crue, suite à un événement météorologique exceptionnel. Il se trouve que la crue d'El Hajeb a atteint la démesure, malgré l'environnement calcaro-dolomitique du site.

était retombé à 24% après un été et un automne secs.

L'origine de l'élévation du niveau de remplissage de certaines retenues, lié à des crues et non à un remplissage habituel lors de pluies durables peut se lire à travers le tableau et la figure qui suivent et qui représentent l'évolution du volume de quelques grands barrages entre 2023 et 2024. Il s'agit de deux années très sèches, elles mêmes enregistrées après une succession d'années déficitaires. Entre 2023 et 2024, le taux de remplissage de la plupart des grands barrages a fortement reculé. C'est notamment le cas du Sebou, de l'Oum Rbia, du Loukkos et du Bouregreg. Par contre les barrages sur le Tensift, le Draa, le Ziz ont progressé car leur alimentation provient essentiellement de crues locales, liées à des situations d'orages survenues dans un contexte de steppes ayant connu une dégradation avancée des terres.

Tableau 1. Taux de remplissage de grands barrages (par ABH)

| Taux % | Loukkos | Moulouya | Sebou | Bouregreg | Oum Rbia | Tensift | Souss Massa | Draa | Ziz |
|----------|---------|----------|-------|-----------|----------|---------|-------------|------|-----|
| 4/2/2023 | 59 | 25 | 41 | 28 | 9 | 40 | 14 | 14 | 21 |
| 4/2/2024 | 39 | 24 | 36 | 21 | 5 | 49 | 11 | 21 | 27 |

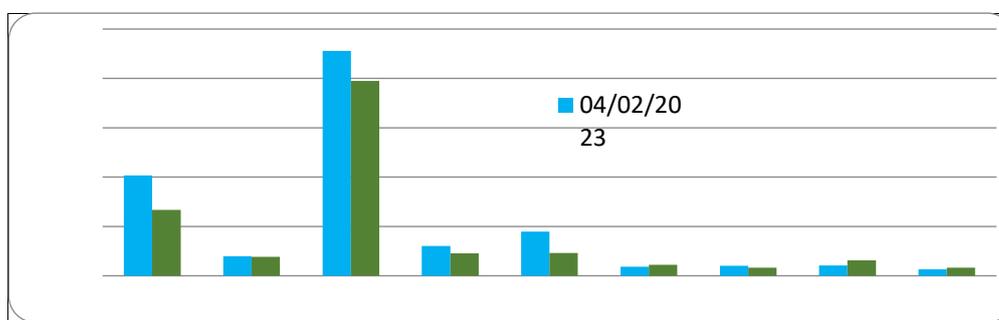


Fig. 2 : Volume des eaux en Mm³ dans les retenues de grands barrages (par ABH)

C'est dans les piémonts steppiques que les crues sont les plus soudaines et les plus dévastatrices, avec des transformations paysagères radicales, mais le remaniement du matériel de la charge solide reste souvent local et n'aboutit que rarement dans les axes hydrographiques. Le seul bénéfice de l'eau réside dans l'épandage sur les surfaces de glacis ou de maader et donc le développement de la biomasse herbacée ou de cultures annuelles après la crue. Globalement, plus de 1/3 de la lame écoulée est perdue en ruissellements sauvages, à effet positif nul et par contre responsable d'effets nuisibles multiples. Un aménagement bien conçu devrait permettre de bénéficier de cette eau.

L'eau de la montagne et problèmes d'aménagement

Les eaux issues du château d'eau montagneux permettent l'irrigation des piémonts et des plaines; Or la dégradation des terres d'amont et son extension récente représentent une menace pour l'avenir de cette relation. L'enjeu est donc de régulariser les écoulements et de garantir un débit suffisant, tout en réduisant les impacts négatifs des crues subites.

A l'échelle du pays, la pluviométrie moyenne était jusque récemment³ de 210 mm, sur 71 Mha, soit 150 km³ d'apport pluviométrique. L'ETP représente environ 75-80% de cet apport. Les ressources en eau disponibles et exploitables étaient en principe de 21 km³, issus du ruissellement direct, du drainage des sols et de la recharge de la nappe phréatique. 80% de ces ressources servaient à l'irrigation de 1.6 M ha, avec une dose moyenne d'irrigation de 10000 m³/ha.

L'amont, château d'eau du Maroc jouait ce rôle grâce à la réception de plus de pluie que la moyenne du pays, de la neige et des structures de roches magasins, fournissant aux piémonts

³ Les dernières années, avec la succession d'années déficitaires à très sèches, ce chiffre n'est plus d'actualité.

l'essentiel des débits mesurés en aval. A ces conditions s'ajoute le facteur biomasse (naturelle ou plantée) qui accroît l'infiltration des eaux de pluies. Là où la biomasse couvre bien le sol, une bonne partie de l'eau de pluie infiltrée produit de la matière végétale et de la vapeur d'eau ; c'est ce qu'on appelle de l'eau « verte ». L'autre partie, drainée plus ou moins en profondeur, alimente un écoulement retardé et régularisé non destructeur.

Par contre, toutes les terres dégarnies de biomasse ou portant un couvert dégradé produisent du ruissellement direct, à effet érosif dans les champs et les parcours, mais qui devient de plus en plus destructeur à mesure qu'il se concentre dans les ravins et talwegs. C'est cette eau « bleue » qui va alimenter les retenues de barrages en eau et en sédiments, mais aussi générer des crues sur les piémonts et fonds de vallées et envaser les retenues.

L'enjeu est donc de favoriser la part de l'eau verte pour produire du bois, du fourrage, des fruits, des légumes et obtenir une bonne part d'eau régularisée. Et ainsi éviter la désertification des terres, les crues destructrices et l'envasement des infrastructures hydrauliques.

De plus en plus, on enregistre des magnitudes et fréquences élevées des processus de dégradation. Les taux d'envasement des barrages souvent construits en situation de piémont menacent les ouvrages d'écourter leur durée et leur capacité de régularisation. Des crues violentes se multiplient et notamment en automne et en été, à l'image de l'année 2019. Le changement climatique intervient pour aggraver tout cela, en relevant l'évaporation, en réduisant dans certaines zones les pluies et l'enneigement, mais surtout en accentuant les aléas et en les multipliant, notamment les crues éclair.

L'essentiel de l'explication de ces évolutions réside dans l'effet anthropique, lui-même lié à une situation sociale de marginalité. La montagne représente $\frac{1}{4}$ de la superficie du pays, avec une moyenne annuelle de pluie de 331mm, soit 60 km^3 ou 40% de l'apport pluviométrique global. Elle produit $12,1 \text{ km}^3$ d'eau superficielle, soit 63 % des eaux de surface du pays. Cela s'explique par le coefficient de ruissellement de 27% contre une moyenne nationale de seulement 12%. Elle abrite $\frac{1}{5}$ de la population du Maroc, avec une densité rurale excessive par rapport aux ressources (33 h/km^2 en montagne contre 19 au Maroc), notamment dans le Rif (90 h/km^2). Intervient en plus l'importance des micro-exploitations, puisque les exploitations de moins de 5ha représentent 80% du nombre total, mais ne couvrent que moins d' $\frac{1}{3}$ de la surface agricole. Ce sont donc de nombreuses exploitations non viables, dans lesquelles l'élevage représente un complément principal, nourri aux dépens des terres forestières et des parcours collectifs, en plus des prélèvements sur d'autres ressources comme le bois des forêts et des formations steppiques. Cela donne une situation de conflit permanent avec les forestiers qui explique en partie le surpâturage et la dégradation des terres.

Le programme national de l'eau 2020-2027, élaboré en janvier 2019, suite à un hiver très sec avec une réserve en eau des barrages de 49% en moyenne⁴, a proposé la construction de 20 barrages permettant de relever la capacité de plus de 5 Mds m^3 et d'un nombre important de petits barrages, en plus de toute une série d'autres mesures. Ce choix indique la persistance de l'approche sectorielle et techniciste qui tarde encore à avantager la démarche intégrée proposant des mesures à caractère social.

⁴ avec 28% pour l'OumRbia et 25% pour le Souss

Les eaux de ruissellement direct subissent lors de leur cheminement, de gros prélèvements par évaporation physique; par ailleurs, elles causent sur leur parcours de multiples dégâts. Plus de 1/3 de la lame écoulée est perdue en ruissellements sauvages à effet positif nul et par contre responsables d'effets nuisibles multiples. Un aménagement bien conçu devrait permettre de bénéficier de cette eau.

La part infiltrée de la pluie a plusieurs intérêts: une biomasse plus fournie, une meilleure protection du sol, le drainage d'un excédent vers la nappe phréatique. Mais les cas de continuum entre les eaux souterraines d'amont et d'aval sont rares, du fait de la faible épaisseur des sols et de leur discontinuité dans l'espace en montagne. Il reste le cas fameux des nappes karstiques du Moyen Atlas qui s'enfouissent sous les sédiments de la plaine du Saïs. Plus souvent, les nappes phréatiques des piémonts sont alimentées par les précipitations et les eaux des écoulements superficiels issus des hauteurs.

L'enjeu est triple et nécessite de concilier entre plusieurs secteurs demandeurs:

- la satisfaction des besoins de la montagne et l'amélioration des conditions de vie, car actuellement, la montagne profite peu de l'eau qu'elle produit et seules 16% des exploitations de montagne sont irriguées ; en plus, la montagne connaît les effets du retard de développement, pauvreté, micro-exploitations, pression humaine;
- le potentiel de transfert d'eau vers le bas pays, pour l'irrigation et autres utilisations; ce secteur a toujours été jugé prioritaire, car doté d'un potentiel productif élevé, dans un contexte de coût moindre ;
- la réponse aux besoins écologiques de l'amont, notamment l'équilibre des zones humides.

Pour atteindre ces objectifs,

- il faut réduire dans les champs et parcours, la part du ruissellement direct, au profit de l'infiltration,
- dans les lieux vulnérables et durant les situations météorologiques initiant du ruissellement, il faut éviter la concentration de ce dernier et empêcher la formation de rigoles;
- accroître l'infiltration lors des crises d'intensité, mais sans saturer les profils lors des pluies persistantes, afin d'éviter les mouvements de masse, ce qui suppose d'orienter l'eau en surplus vers des évacuateurs de crue aménagés.

La multiplicité de facteurs rentrant en ligne de compte oblige donc à faire le choix d'une diversification des actions et d'une intégration des traitements biologiques et mécaniques

Devant l'immensité de la tâche, on est en droit de se poser la question : quelle option d'aménagement adopter ? La gestion durable des terres, consistant dans une intensification raisonnée, fondée sur l'exploitation des potentiels et la gestion des états de surface du sol, représente l'option gagnante à plusieurs niveaux.

Le choix pour la gestion durable des terres et une agriculture de restauration des sols, en encourageant les petits paysans de l'amont à assurer un usage agro-pastoral attentif aux possibilités comme à la vulnérabilité des ressources naturelles, soucieux de fournir du travail aux jeunes et des produits alimentaires de qualité pour le pays et l'exportation peut se concevoir tout en visant l'optique de relever les débits des rivières débouchant en plaine.

Malheureusement, ce n'est pas ce schéma qui est entrain de se réaliser. Les statistiques agricoles montrent que la SAU montagneuse a eu tendance à s'étendre entre les deux recensements agricoles de 1996 et 2016. 316000 ha ont été défrichés et mis en culture. Or, en montagne, l'espace cultivé se composait des quelques terrains faciles et fertiles, ceux des dépressions, de certains fonds de vallées élargies, de hauts plateaux, comme dans le Moyen Atlas d'Ifrane, en plus de versants aménagés grâce à la construction de terrasses ou de murettes. Ce n'est que dans le Rif que la SAU gagnait des versants de pente assez forte, du fait de la nature meuble de certains substrats. Les nouvelles extensions agraires n'ont pu se réaliser que sur des terrains vulnérables.

Dans les services agricoles, on annonce le choix pour l'arboriculture sur pente, dans un but annoncé de protection, mais dans les faits, sans réaliser les précautions anti-érosives nécessaires. On s'approprie des parcours collectifs et on grossit le troupeau, en s'associant à des urbains, avec ce que cela génère comme surpâturage. Cela n'augure rien de bon, la dégradation va s'amplifier et avec elle l'envasement des retenues. L'effet des crues va aussi s'amplifier.

Les usages raisonnés des ressources pourraient au minimum agir dans un sens de régularisation des débits d'écoulement et avoir pour résultat de relever les étiages. L'autre effet serait de réduire l'érosion des sols et donc limiter le rythme de l'envasement. Mais pourra-t-on obtenir en sus une augmentation importante de débit? Il se pose plusieurs bémols sérieux:

- La gestion durable des terres et de l'eau en montagne ne pourra avoir d'effet sensible sur le débit que si les actions d'aménagement atteignent un niveau de réalisation conséquent. Or, le PNABV⁵ a montré qu'avec ½ Mm³ de ravins traités, ½ Mha de sols aménagés (dont 25% en reboisement, 15% en amélioration pastorale, 49% en arboriculture avec banquettes...), l'érosion n'a pas baissé, les crues ont même eu tendance à se renforcer et à se multiplier et l'envasement reste à un taux élevé de 75Mm³/an. On a enregistré quelques réussites spectaculaires, à l'échelle expérimentale, de démonstration ou à l'échelle d'une communauté sociale. Mais l'effet général est limité, car, ce qui doit être visé, c'est une réponse globale, mesurable à l'échelle des grandes unités. Le changement ne peut être considéré comme réussi que si une masse critique de réussites est effectivement mise en route.
- Le changement climatique semble contrecarrer cet objectif, vu la succession d'années de pluviosité déficitaire et de saisons d'automne et de printemps excessivement chaudes : le déficit guette le bilan d'eau. Les modèles du changement climatique prédisent à la fois plus d'évaporation, moins de précipitations et donc un bilan d'eau défavorable. Et plus d'événements extrêmes à forte intensité, des pluies érosives, très chargées, responsables d'envasement supplémentaire des retenues.
- En perspective du développement agricole-rural et de diversification des produits de niche, en montagne, on projette d'étendre l'irrigation, mieux desservir en eau potable les douars et alimenter des projets de tourisme rural, ce qui signifierait une consommation locale d'eau en accroissement et une ponction sur l'eau destinée à l'aval qui endure un stress hydrique prononcé dans plusieurs régions. Après le dernier séisme, les responsables gouvernementaux semblent enfin découvrir la situation de marginalité que vivait la montagne et semblent, il faut l'espérer, déterminés à la corriger. Le 2 février 2024 le projet de loi n° 57.23 a été voté, entérinant la création de l'Agence de développement du Haut-Atlas

⁵ Plan National d'aménagement des bassins versants

Donc avec le changement climatique et du fait des nouvelles ponctions envisagées, la montagne pourrait ne pas produire plus d'eau, pour en fournir plus aux plaines, avec en plus, la réduction de capacité des barrages, du fait de l'envasement.

Ce scénario pessimiste nous interpelle et devrait nous inciter à prendre des chemins vertueux pour corriger les tendances négatives :

- Il est fondamental d'accélérer les actions visant à généraliser une gestion de restauration des terres, dans un contexte de participation active de tous les acteurs locaux.
- Il faut notamment s'adapter au changement climatique en favorisant le recouvrement de biomasse et la résilience des sols.
- Il faut enfin dans une perspective de développement de la montagne, opérer les bons choix en s'inspirant de la culture séculaire des habitants de ces milieux.

Conclusion

Les efforts de Gestion Durable des Eaux et des Terres (GDET) des montagnes et des terrains de collines accidentées permettent en principe de garantir la sauvegarde des ressources en eau en aval et la durabilité des aménagements hydrauliques réalisés à un coût élevé. Les mesures hydrologiques réalisées à l'échelle de la parcelle et sur micro-bassin, ou utilisant diverses techniques - notamment le suivi des états de surface des sols et du couvert végétal, la simulation de pluies sur microparcelles et le suivi hydrologique de micro-bassins - montrent clairement l'intérêt hydrique et morpho-sédimentaire des dispositifs de gestion conservatoire des eaux et des sols. Le développement durable de la montagne signifie aussi l'instauration d'une sécurité alimentaire relative, d'un équilibre écologique des sols, de la biomasse et de la biodiversité et d'un bilan hydrique caractérisé par la disponibilité de l'eau en réponse aux besoins, ainsi que par l'avantage aux processus modérés par rapport aux mécanismes responsables de déstabilisation.

Références

- Gbohoui P. 2021, Modélisation hydrologique de bassins emboîtés du Nakanbé au Burkina Faso dans un contexte de changement global. Université Montpellier, Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement.
- Reij C., Toulmin C. et Scoones I., 1997 Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique, Karthala, 360 p.
- Loup (1962) L'Oum er Rebia. Etudes sur une grande rivière des montagnes marocaines. Revue de géographie alpine, tome 50, n°4, p. 519-555

الجيولوجيا الطبية والآثار المحتملة للصخور والمعادن على صحة الإنسان

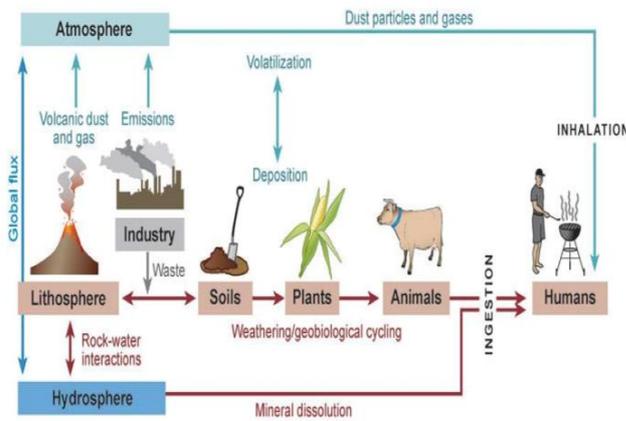
ذ. خلاف الغالبي

(جامعة المولى إسماعيل بمكناس- المغرب)

البريد الإلكتروني: k.elghalbi@umi.ac.ma

ما الجيولوجيا الطبية؟

تمثل الجيولوجيا الطبية مجالا علميا حديا متعدد الحقول (الشكل 1) الذي يهتم بدراسة آثار المواد والعمليات الجيولوجية على الحيوان والنبات وعلى صحة الإنسان وتتداخل فيها الآثار والتأثيرات المتبادلة بين كل من الغلاف الجوي والغلاف الصخري والغلاف المائي والغلاف الحيوي (الشكل 2).



الشكل 2: سلسلة المواد الأرضية بين الغلاف الجوي والغلاف

المائي والغلاف الصخري ومسارات امتصاص الجسيمات والغازات

والعناصر داخل النباتات والحيوانات والإنسان.

الشكل 1: الجيولوجيا الطبية مجال علمي متعدد

الحقول

وتعتبر الجيولوجيا الطبية تخصصا حديثا وحقلا علميا في صعود، حيث شهدت العقود الثلاثة الأخيرة تأسيس عدد من الجمعيات العلمية وإصدار مجموعة من المجلات والدوريات بالإضافة إلى صدور عدد لا بأس به من المؤلفات التي توصل لهذا التخصص العلمي المركب. بالإضافة إلى تنظيم المؤتمرات والندوات والملتقيات العلمية والأيام الدراسية على المستوى العالمي (كالمؤتمر الدولي للجيولوجيا الطبية والذي نظمت دورته العاشرة في مكسيكو خلال من 6 إلى 9 غشت 2023) وعلى المستوى الإقليمي أو القاري (كالمؤتمر الدولي للجيولوجيا الطبية في إفريقيا والذي نظمت دورته الأولى في جوهانسبرغ سنة 2014 ودورته الثانية سنة 2018) وحتى على المستوى المحلي (كمؤتمر نيجيريا الأول للجمعية الدولية للجيولوجيا الطبية والمنعقد بجامعة إبادان من 12 إلى 14 دجنبر 2018).



الشكل 3: نماذج من الكتب الصادرة حديثاً في مجال الجيولوجيا الطبية

نظرة تاريخية

أشارت العديد من الثقافات القديمة إلى العلاقة بين البيئة والصحة والمتمثلة في كثير من الأحيان في الحديث عن مشاكل صحية كانت مرتبطة بالبيئات المهنية (Duffin, 2013). وتحتوي النصوص الطبية الصينية التي يعود تاريخها إلى القرن الثالث قبل الميلاد على عدة إشارات إلى العلاقات بين البيئة والصحة، فقد صرح كيميائي أسرة تانغ، تشين شاو وي Chen Shao-Wei أن الرصاص والفضة والنحاس والانتيمون والذهب والحديد كانت سامة. على سبيل المثال، كان تضخم الغدة الدرقية، الذي يحدث نتيجة النقص الشديد في اليود، منتشرًا على نطاق واسع في الصين القديمة واليونان ومصر، وكذلك عند الإنكا في البيرو. وحقيقة أن هذه الحالة كانت تعالج في كثير من الأحيان بالأعشاب البحرية، وهي مصدر جيد لليود، تشير إلى أن هذه الحضارات القديمة كان لديها درجة معينة من المعرفة فيما يتعلق بمعالجة أوجه القصور الغذائي بالمكملات الغذائية الطبيعية. لقد أدرك أبقراط، وهو طبيب يوناني من العصر الكلاسيكي، أن الصحة والمكان مرتبطان ارتباطًا سببيًا وأن العوامل البيئية تؤثر على توزيع الأمراض (Bunell et al, 2007, p: 274). كما أن الطبيب اليوناني جالينوس في القرن الأول الميلادي، قد أعاد لاحقًا التأكيد على الخطر المحتمل لأنشطة التعدين عندما لاحظ أن الضباب الحمضي غالبًا ما يرتبط بأنشطة استخراج النحاس (عبد، 2021. ص: 7).

الأضرار الصحية للمعادن في التراث العلمي العربي الإسلامي

لقد كان الوعي بالأضرار الصحية للمعادن حاضرا منذ البداية عند علماء المسلمين، يقول إخوان الصفا بخصوص عدد من المعادن الترابية: وأما منافعها ومضارها فهي معروفة بين الناس وقد ذكرت في كتب الطب بشرحها⁶؛ ويضم الجدول 1 الأضرار الصحية لمجموعة من المعادن كما نص عليها في بعض كتب التراث المعدني العربي الإسلامي، تؤكد على أن استخدام بعض المعادن في طهي الطعام أو الأكل في

⁶ - "رسائل إخوان الصفا وخلان الوفا". م: 2. ص: 111.

آنيتهأ (كالرصاص) أو تلوث الماء بجريانه فيها أو تلوث الهواء بانبعاث دخانها فيه (كالزئبق)، من شأنه أن يتسبب في أمراض متنوعة وخطيرة بل قد تكون مميتة (الغالبى، 2017).

الجدول 1: الآثار الصحية للمعادن في عدد من مصادر التراث المعدني الإسلامي (الغالبى، 2018، ص: 405).

| المصدر | مضاره وتأثيرات السلبية على صحة الإنسان | المعدن |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| إخوان الصفا | من أدمن الأكل والشرب في أواني النحاس أفسد مزاجه، وعرضت له أعراض | النحاس |
| القزويني | من اتخذ منه أنية لطعامه أو شربه يتولد فيه أمراض لا دواء لها | |
| ابن سينا | يتجنب ترك المواد الدسمة والمالحة والحلوة والمرّة في أنية النحاس والشرب منها لأن ذلك يترك زنجارية والزنجار سم قاتل. | |
| الدمشقي | مداومة أكل الطعام في أوانيّه تورث ضعف الكبد والصفرة في الوجه ومداومة الشرب من أنيّه تورث الاستسقاء | الأسرب (رصاص) |
| ابن البيطار | يتسبب في علة القولنج عند السباكين العاملين في معادنها | الفضة |
| الدمشقي | وفي شربه سمية كالزنجار | الفيروزج |
| إخوان الصفا | فيه خاصية سم من سقى سحاليته تقطعت أمعاؤه وأمراضه وألهب معدته وإن شرب وهو صحيح أضر | الدهنج |
| التيفاشي | من سقى من محكه أو سطله إنسانا كان سما ومعط الأمعاء وأحدث في البدن سقما لا يذهب سريعا | |
| البيروني | بل تفسد رائحته الصناع والصاغة وتودي بهم إلى التهيج والتورم والفالج | الزئبق |
| القزويني | من دنا من الزئبق إذا مسته النار أفلجه ودخانها يحدث أسقاما رديئة مثل: الرعدة والفالج وذهاب السمع وصفرة اللون والرعشة في الأعضاء والبخر في الفم ويبس الدماغ.. ومن أقام عنده مات | |
| الرازي | من سقى الزرنبيخ المصعد حدث له منه مغص شديد وقروح في الأمعاء رديئة | الزرنبيخ |
| البيروني | إن العين ترمد وتفسد بالنظر في مرآة معمولة من الطاليقون | الطاليقون |
| القزويني | والملوك اتخذوا منه أواني فغلب عليهم المرة السوداء فاحتاجوا إلى العلاج وتعبوا | حجر عنبري |
| القزويني | وهو سم قاتل يحبس البول وإذا طلي به الإبطرد الفضلات إلى القلب | مرداسنج |
| الرازي | الإكثار منه محرق للدم ويضعف البصر ويقلل المنى ويورث الحكمة والجرب. | الملح |

الأهداف الرئيسية للجيولوجيا الطبية

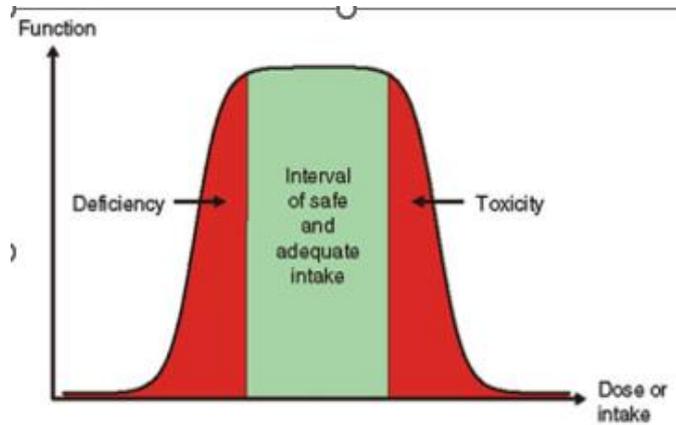
للمشتغلين والمهتمين والممارسين الجيولوجيا الطبية خمسة أهداف رئيسة هي: تحديد الحالات الشاذة الجيوكيميائية في التربة والرواسب والمياه التي قد تؤثر سلباً على صحة الإنسان والحيوان؛ تحديد الأسباب البيئية للمشاكل الصحية المعروفة، بالتعاون مع الباحثين في مجال الطب الحيوي/الصحة العامة والبحث عن حلول لمنع هذه المشاكل أو تقليلها؛ تقييم الآثار الصحية المفيدة للمواد والعمليات الجيولوجية. طمانة

ضرورية للصحة الجيدة: فالكالسيوم والفسفور والمغنيسيوم والفلورايد مطلوبة للوظائف الهيكلية في العظام والأغشية؛ أما الصوديوم والبوتاسيوم والكلوريد ضرورية للحفاظ على توازن الماء والإلكتروليتات في الخلايا؛ في حين يمثل الزنك والنحاس والسيلينيوم والمنغنيز والمولبيدينوم، المكونات الأساسية للإنزيمات أو بمثابة ناقلات (الحديد) للروابط الأساسية في عملية التمثيل الغذائي. وللعناصر الكيميائية أهمية أيضاً في عمل نظام الغدد الصماء: مثلاً، يُعد اليود مكوناً أساسياً في هرمون الغدة الدرقية (Gerald & Combs, 2013, pp: 179-180).

يؤدي النقص في العناصر النزرة الأساسية إلى الإصابة بالأمراض؛ أما الزيادة عن الحاجة منها فتؤدي إلى التسممات (الشكل 5).



الصورة 1: شخص مصاب بتضخم كبير للغدة الدرقية



الشكل 5: كفاءة الوظائف حسب الكمية المتناولة من العناصر النزرة الأساسية (Lindh, 2013).

*- نقص مادة اليود: العلاقة بين المواد الجيولوجية ونقص العناصر النزرة موثقة جيداً بالنسبة لليود. وتشمل اضطرابات نقص اليود تضخم الغدة الدرقية (الصورة 1)، والفدامة (التخلف العقلي مع التشوهات الجسدية)، وانخفاض معدل الذكاء، والإجهاض، والعيوب الخلقية. في الصين القديمة واليونان ومصر وكذلك بين الإنكا، أعطي الأشخاص المصابون بتضخم الغدة الدرقية الأعشاب البحرية لتوفير اليود اللازم. وما يزال تضخم الغدة الدرقية مرضاً خطيراً في أجزاء كثيرة من العالم، حيث يوجد في الصين وحدها 425 مليون شخصاً (40% من سكان العالم) معرضين لخطر الإصابة باضطراب الاتصال المباشر. وإجمالاً، هناك أكثر من مليار شخص، يعيش معظمهم في البلدان النامية، معرضين لخطر الإصابة باضطراب الاتصال المباشر. وتجدر الإشارة إلى أن محتوى اليود في مياه الشرب، في جميع الأماكن التي يرتفع فيها خطر الإصابة بتضخم الغدة الدرقية IDD، يكون منخفضاً جداً بسبب انخفاض تركيزات اليود في الأساس الصخري (Fuge, 2013).

*- /سمية الزرنيخ (Arsenic) (Smedley & Kinniburgh, 2013): مركبات الزرنيخ والزرنيخ هي مواد مسرطنة للإنسان. قد يحدث التعرض للزرنيخ من عدة مصادر بشرية، بما في ذلك التعدين والمبيدات الحشرية والمستحضرات الصيدلانية والزجاج والالكترونيات الدقيقة، والمصادر الطبيعية الأكثر شيوعاً. يحدث التعرض للزرنيخ عن طريق الابتلاع والاستنشاق والاتصال بالجلد والطريق الوريدي إلى حد ما. وتعتبر مياه الشرب الملوثة بالزرنيخ مشكلة صحية عامة كبيرة. وقد سجل التعرض الحاد والمزمن للزرنيخ عن طريق مياه الشرب في العديد من بلدان العالم، حيث إن نسبة كبيرة من مياه الشرب ملوثة بتركيزات عالية من الزرنيخ. وتشمل الآثار الصحية العامة المرتبطة بالتعرض للزرنيخ أمراض القلب والأوعية الدموية والأوعية الدموية الطرفية، والشذوذات التنموية، والاضطرابات العصبية والسلوكية العصبية، والسكري، وفقدان السمع، والتليف البابي، واضطرابات الدم (فقر الدم، ونقص الكريات البيض...) والسرطان. تحدث معدلات وفيات أعلى بكثير ومعدلات وفيات تراكمية لسرطانات الجلد والرئة والكبد والمثانة البولية والكلى والقولون في العديد من المناطق الملوثة بالزرنيخ.

وقد بينت الاختبارات والتحليلات التي أجريت على مياه الآبار والأودية وعلى التربة وعلى المخلفات المنجمية بنواحي إيميضر وبوعازر، أن قياسات تركيز الزرنيخ المسجلة (11 جزء من المليون في مياه وادي أوحميدي و191.22 في تربة ضيعة سيدي بلال و2459.69 في مخلفات المناجم بمنطقة تاغوني-بوعازر)، تتجاوز بكثير معايير منظمة الصحة العالمية (0.1 جزء من المليون بالنسبة للمياه السائلة و1 جزء من المليون بالنسبة للتربات ومخلفات المناجم). الأمر الذي يشكل أخطاراً حقيقية على الصحة العامة وعلى البيئة⁸.

ب- التأثيرات الصحية لغبار الهباء الجوي:

تشكل كرات الغبار السميكة المميزة للمواقع القريبة نسبياً من مصادر الغبار عدداً من المخاطر على صحة الإنسان ورفاهيته، والتي تشمل حوادث النقل، وتدمير المحاصيل، وتهيج العين. عند استنشاقها، يتم طرد العديد من جزيئات الغبار الكبيرة في النهاية عن طريق البلغم. ومع ذلك، فإن استنشاق جزيئات الغبار الكبيرة (< 10 ملم) قد يشكل خطراً على الصحة إذا كانت المعادن سامة، بغض النظر عن مكان تواجدها في الجهاز التنفسي. من بين جزيئات الغبار الدقيقة (القطر أقل من 10 ملم) التي تظل معلقة في الغلاف الجوي لفترات أطول بكثير (الجزء القابل للتنفس)، فإن معظمها ما بين 10 و5 ملم تصبح محاصرة في الجهاز التنفسي العلوي وتتم إزالتها في النهاية عن طريق السعال. غالباً ما تخرق الجسيمات الدقيقة التي يزيد قطرها عن 5 مم عمقاً أكبر في الرئتين لتسبب داء السحار السيليسي، وداء الأسبستوزيس، وأمراض الرئة الأخرى. وقد أظهرت الأبحاث الحديثة في الصين أنه كلما زادت كثافة الغبار المحيط، ارتفعت معدلات

⁸ - انظر تحقيق جريدة المساء. العدد 2243. الصادر بتاريخ 2013/12/12.

الإصابة بأمراض الجهاز التنفسي المزمنة (قد تؤدي أيضا إلى تفاقم مشاكل القلب) ومعدلات الوفيات المرتبطة بها (Derbyshire, 2013).

ج- التعرض للعناصر المشعة

قد تتراكم المعادن الثقيلة والنويدات المشعة الملوثة التي لم تتم إزالتها أثناء تصنيع الأسمدة في التربة، وقد يؤدي استمرار استخدام الأسمدة في التربة إلى مشاكل مع المحاصيل المعرضة لامتناسص الملوثات. على أية حال، من أجل تقدير الأثر البيئي لاستخدام الأسمدة، من الضروري تقييم انتقال النويدات المشعة وتوزيع تركيزها في المصفوفات البيئية مثل التربة والغطاء النباتي والحليب وغيرها. وقد أجري التوصيف الإشعاعي للنويدات المشعة الموجودة في صخور الفوسفات، والجبس الفوسفوري، وحمض الفوسفوريك، والأسمدة الفوسفاتية (DAP، NPS، NPK، TSP، TAP) في المغرب لتوفير قاعدة بيانات لتقييم التأثيرات البيئية والإشعاعية. وقد أجريت قياسات تركيز النشاط باستخدام كل من مطياف ألفا وغاما. كما قدرت معدلات الجرعة الفعالة السنوية المقابلة وإجمالي خطر الإصابة بالسرطان مدى الحياة (ELCR) لمناقشة الخطر الإشعاعي. وتبين من حساب إجمالي خطر الإصابة بالسرطان مدى الحياة، أنه مرتفع في صخور الفوسفات والجبس الفوسفوري ومطابق لمستويات السلامة في حامض الفوسفوريك ومعظم الأسمدة الفوسفاتية (Qamouche et al, 2020).

عموما يمكن التحكم في المخاطر الإشعاعية باتباع التدابير الوقائية الآتية: تدريب عمال المناجم فيما يتعلق بالفيزياء الصحية والسلامة؛ تحسين البيئة المعيشية للمناجم والمسكن؛ واعتماد المبادئ التوجيهية للحماية من الإشعاع للحد من التعرض للإشعاع.

الفوائد الصحية للمواد الجيولوجية.



الصورة 2: معادن تستخدم في المجال الطبي والصحي.

يهتم مجال الجيولوجيا الطبية الناشئ بتأثير المواد الجيولوجية والعمليات الجيولوجية على صحة الحيوان والإنسان. وقد ركزت معظم الأبحاث على المشاكل الصحية الناجمة عن زيادة أو نقص العناصر النزرة، والتعرض للغبار المحيط وغيرها من المشاكل الصحية ذات الصلة بالجيولوجيا، والتي يمكن تطبيق أدوات أو تقنيات أو قواعد بيانات علوم الأرض عليها.

لم يركز سوى القليل من الاهتمام على الآثار الصحية المفيدة للصخور والمعادن (الصورة 2) والعمليات الجيولوجية. ولعل التعرف على هذه التأثيرات المفيدة منذ فجر الإنسانية وتشمل فوائد الصحة العاطفية والعقلية والجسدية⁹.

خاتمة:

تتمثل أهداف الجيولوجيا الطبية في تحديد العوامل الجيولوجية الضارة وتحديد ظروف التعرض التي تعزز تدهور الظروف الصحية ووضع مبادئ واستراتيجيات وبرامج وأساليب سليمة ضرورية للقضاء على المخاطر الصحية أو تقليلها. ويعد التفاعل والتواصل ضروريًا بين مجتمعات علوم الأرض والطب الحيوي والصحة العامة لحماية صحة الإنسان من الآثار الضارة للعوامل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية في البيئة. ويوصى بإدراج الجيولوجيا الطبية في مناهج التعليم العالي حتى يكون الطلاب على دراية بالعلاقة بين الجيولوجيا والصحة وتشجيعهم على ممارسة مهنة في الجيولوجيا الطبية.

إن التخصص العلمي الناشئ بسرعة للجيولوجيا الطبية يعدُّ بزيادة قاعدة معارفنا المتعلقة بالصحة البيئية، يمكن أن تساهم بشكل ملموس في تحسين ظروف عيش المجتمعات البشرية على المستوى العالمي.

لائحة المصادر:

- 1- إخوان الصفا وخلان الوفا (1995): "رسائل إخوان الصفا وخلان الوفا". إعداد وتحقيق عارف عامر. منشورات عويدات. بيروت-باريس. ط: 1. 5 مجلدات.
- 2- عبد محمود فاضل (2021): "الجيولوجيا الطبية: مفاهيم وتطبيقات". مكتب واكي. بغداد. 380 ص.
- 3- الغالبي خلاف (2017): "الخصائص والمنافع الطبية للمعادن في التراث العلمي العربي الإسلامي والعلاقة بين مجالي الطب والجيولوجيا". أشغال المؤتمر العالمي الأول لتاريخ العلوم التطبيقية والطبية عند العرب والمسلمين. 2-4 ماي 2017. جامعة الإمام محمد بن سعود الإسلامية. الرياض. المملكة العربية السعودية. السجل العلمي 1. ص-ص: 379-418.

⁹ - للاطلاع أكثر على الآثار الصحية والاستخدامات الطبية الإيجابية للمعادن والصخور والمواد الجيولوجية، يرجع إلى مقالتنا: "الأضرار الصحية للمعادن في التراث الطبي العربي الإسلامي من خلال كتاب (القانون في الطب) لابن سينا".

4- الغالبي خلاف (2018): "إسهام الحضارة العربية الإسلامية في علوم الأرض: التعدين والمعادن والجيولوجيا الطبية". أطروحة لنيل دكتوراة الدولة في الآداب. كلية الآداب والعلوم الإنسانية. جامعة محمد الأول. وجدة. 521 ص.

5- الغالبي خلاف (2019): "الأضرار الصحية للمعادن في التراث الطبي العربي الإسلامي من خلال كتاب (القانون في الطب) لابن سينا". مجلة إعجاز الدولية للتأمل والبحث العلمي. العدد 4. ص-ص: 1-17. المودن مولاي إدريس (2013): "هؤلاء "ضحايا" مناجم الهولدينغ الملكي". جريدة المساء. العدد 2243. ص-ص: 19-21.

6- Bunell. J.E ; Finkelman. R.B ; Centeno. J.A and Selinus. O (2007) : "Medical Geology: a globally emerging discipline". *Geologica Acta*. Vol : 5. N° 3. Pp : 273-281.

7- Gerald. F & Combs. Jr (2013) : "Geological Impacts on Nutrition". In *Essentials of Medical Geology*". Revised Edition. Pp : 129-177.

8- Derbyshire. E (2013) : "Natural Aerosolic Mineral Dusts and Human Health". In *Essentials of Medical Geology*". Revised Edition. Pp : 455-475.

9- Duffin. C.J (2013): "Geology as Medecine and Medics as Geologists". In «A History of Geology and Medecine». Duffin, C.J., Moody, R. T. J. & Gardner-Thorpe, C. (eds). Geological Society. London. Special Publications, 375. Pp :1-6.

10- Fuge. R (2013) : "Soils and Iodine Deficiency". In *Essentials of Medical Geology*". Revised Edition. Pp : 417-430.

11- Lindh. U (2013) : " Biological Functions of the Elements ". In *Essentials of Medical Geology*". Revised Edition. Pp : 129-177.

12- Quamouche. K ; Chataine. A ; Elyahyaoui. A ; Moussaif. A; Touzani. R ; Benkdad. A ; Amsil. H ; Laraki. K & Marah. H (2020): "Radiological characterization of phosphate rocks, phosphogypsum, phosphoric acid and phosphate fertilizers in Morocco : An assessment of the radiological hazard impact on the environment". *Materials Today: Proceedings* 27. Pp : 3234–3242.

13- Selinus. O ; Alloway. B ; Centeno. J.A ; Finkelman. B ; Fuge. R ; Lindh. U & Smedley. P (2013) : "Essentials of Medical Geology" Revised Edition. Springer. Canada. 807p.

14- Smedley. P.L and Kinniburgh. D G (2013) : "Arsenic in Groundwater and the Environment". In *Essentials of Medical Geology*". Revised Edition. Pp : 279-310.

Axe 1 : Risques hydroclimatiques et littoraux

**Variabilité climatique
et impact sur les
ressources en eau**

**PRÉCIPITATIONS MENSUELLES ET ANNUELLES EN MILIEU ARIDE DU
BASSIN VERSANT DE L'OUED ZIZ (SUD-EST MAROCAIN) :
HOMOGENÉISATION ET ANALYSE DES TENDANCES**
CHANYOUR Yassine ⁽¹⁾, EL ACHARI Ouafaa ⁽²⁾, HANCHANE Mohamed ⁽³⁾ et OBDA Khalid ⁽³⁾

⁽¹⁾ Docteur en géographie physique, USMBA-Fès, yassinechanyour@gmail.com

⁽²⁾ Docteure en géographie physique, USMBA-Fès.

⁽³⁾ Professeur-chercheur, USMBA-Fès.

Résumé: Les données collectées auprès de l'agence hydraulique Guir-Ziz-Rheriss ont été traitées, corrigées et analysées à l'aide du package Climatol (version 4.0.0) développé dans le logiciel R pour homogénéiser les données pluviométriques. A travers ce travail, nous avons défini la signification et les amplitudes des tendances pluviométriques annuelles et mensuelles en utilisant le test de Mann-Kendall et l'estimateur de pente de Sen, tout en comparant les résultats des données brutes et homogénéisées. Le bassin de Ziz a un climat subdésertique, et le processus d'homogénéisation a révélé quelques stations pluviométriques avec des tendances positives significatives à des niveaux de confiance allant de 90 % à 95 %. D'après les données brutes et homogénéisées, la majorité de ces stations sont situées dans la zone du Haut Atlas (CR1), où il existe une grande variabilité spatio-temporelle des précipitations d'une année à l'autre. L'objectif essentiel de cette contribution scientifique est d'analyser la variabilité spatio-temporelle des précipitations mensuelles et annuelles et d'étudier leurs tendances à travers les données pluviométriques homogénéisées par le package Climatol (version 4.0.0) de 7 stations sur une période (1957-2018).

Mots-clés : Précipitations – homogénéisation - pente de Sen – tendance - Ziz.

**MONTHLY AND ANNUAL PRECIPITATION IN THE ARID ENVIRONMENT OF
THE ZIZ WATERSHED (SOUTH-EAST MOROCCO): HOMOGENISATION AND
TREND ANALYSIS**

Abstract: Data collected from the Guir-Ziz-Rheriss hydraulic agency were processed, corrected, and analyzed using the Climatol package (version 4.0.0) developed in R software to homogenize rainfall data. In this work, we defined the significance and amplitudes of the annual and monthly rainfall trends using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator while comparing the results of the raw and homogenized data. The Ziz basin has a sub-desert climate, and the homogenization process revealed a few rainfall stations with significant positive trends at confidence levels ranging from 90% to 95%. According to the raw and homogenized data, the majority of these stations are located in the High Atlas zone (CR1), where there is considerable spatiotemporal variability in rainfall from one year to the next. The main objective of this scientific contribution is to analyze the spatiotemporal variability of monthly and annual rainfall and to study their trends through rainfall data homogenized by the Climatol package (version 4.0.0) from seven stations over a period (1957–2018).

Keywords: Precipitation – homogenization -Sen Slope – trend - Ziz.

INTRODUCTION

De nombreuses études ont montré des fluctuations significatives des précipitations à l'échelle régionale et temporelle dans la région méditerranéenne (Rodriguez-Puebla et al., 1998). La région se distingue par une alternance de périodes pluvieuses et sèches, ainsi que par des variations d'altitude et de continentalité. Les pays du Maghreb, à savoir l'Algérie, la Tunisie et le Maroc, sont les plus gravement touchés par ce problème de la diminution successive des précipitations (Zamrane et al., 2021). Le climat de la région d'étude est également caractérisé par une forte variabilité interannuelle des précipitations et d'importantes irrégularités temporelles dans les précipitations, ce qui entraîne des périodes de sécheresse qui peuvent être suivies d'intervalles extrêmement humides ou d'événements pluvieux intenses. Les études antérieures ont examiné la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans le Ziz et ses régions et ont confirmé, que depuis les années 1980, la zone d'étude observe une baisse des

précipitations, d'autres une phase déficitaire jusqu'en 1956, une phase normale excédentaire jusqu'en 1970 et en fin, une sécheresse prolongée à partir de cette année (Yassine, 2018).

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des précipitations mensuelles et annuelles dans le bassin versant de Ziz pour comprendre les principales caractéristiques pluviométriques et leurs répartitions spatiales dans la région.

1. Description de la zone d'étude

La zone d'étude, d'une superficie d'environ 11.000 km², est limitée au nord par le bassin de la Moulouya, au nord-ouest par le bassin de l'Oum Errabia, à l'ouest par le bassin de Draa, à l'est par le bassin de Guir et au sud par le territoire algérien. Elle comprend les provinces de Midelt et d'Errachidia (Fig.1). La région choisie comme exemple pour cette étude est située dans l'extrême sud-est du Maroc, entre 30°30' et 32°30' de parallèle nord et 3°30' et 6° de longitude ouest (B.V Ziz à Foum Mzghida, 11.000 Km²).

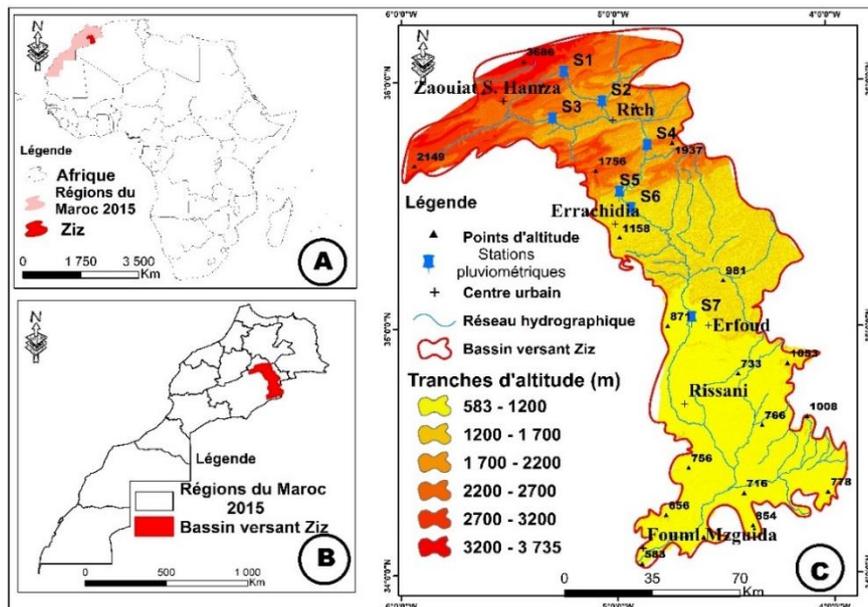


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

2. MATERIEL ET METHODES

Les données obtenues sont fournies par l'agence hydraulique Guir-Ziz-Rheriss. Le choix des stations est une étape indispensable dans toute étude climatique. Dans un premier temps, nous avons essayé d'intégrer le plus grand nombre possible de stations qui sont les mieux réparties spatialement sur le territoire de la zone d'étude et qui offrent une longue série d'observations. Les données pluviométriques mensuelles obtenues concernent 7 stations sur une période d'observation de 61 années (1957-2018).

Dans cette étude, nous avons utilisé le test séquentiel de Man-Kendall (Sneyers, 1975), (Mann, 1945) ; (Sen, 1968); (Wang, 2008) pour évaluer l'importance des tendances. Chaque série temporelle est évaluée comme une série ordonnée selon le principe directeur du test. Chaque point de données de la série est comparé au point suivant. La valeur initiale de la statistique S est fixée à 0, ce qui indique qu'aucune tendance n'a encore été identifiée. Ensuite, si l'observation de l'année suivante (x_j) est supérieure à celle de l'année précédente (x_k), elle est augmentée de 1, sinon elle est diminuée de 1 (**Equa.1**). En parallèle, Z a une moyenne de 0 et un écart-type de 1, ce qui suggère que sa distribution est normale. Si la probabilité est supérieure au seuil de $\alpha\%$ (valeur p), l'hypothèse nulle est rejetée. Cela indique qu'il y a moins de $\alpha\%$ de chances que la tendance ait été découverte par accident. Par conséquent, à $\geq 100-\alpha\% \hat{=}$, elle est statistiquement significative. Il s'agit d'un test visant à déterminer si la tendance des données est nulle, ou s'il n'y a pas de tendance significative. La plage de la valeur p (α) est comprise

entre 0,001 et 0,1 (Equa.2).

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sig}(x_j - x_k)$$

with: $\text{sig}(x_j - x_k) = 1$ if $x_j - x_k > 0$
 $\text{sig}(x_j - x_k) = 0$ if $x_j - x_k = 0$
 $\text{sig}(x_j - x_k) = -1$ if $x_j - x_k < 0$

Equa.1

$$Z = \frac{(S-1)}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}} ; \text{if } S > 0 ; Z = 0 ;$$

$$\text{if } S = 0 ; Z = \frac{(S+1)}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}} ; \text{if } S < 0$$

Equa.2

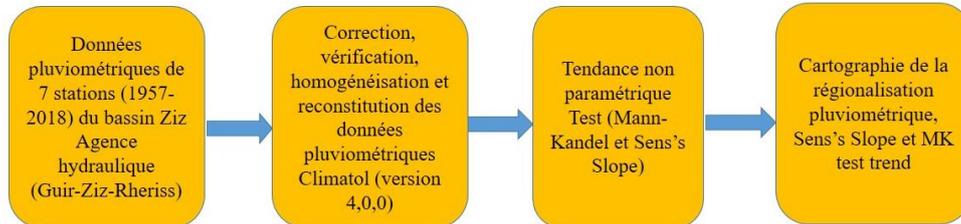


Figure 2 : Démarches Méthodologiques à suivre

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Vérification et homogénéisation des données pluviométriques

La différence absolue des valeurs mensuelles moyennes entre les deux séries de données est de 6,81 mm en novembre et de 0,14 mm et 0,05 mm en mai et juillet, respectivement (Fig.3.C). L'altitude a un impact important sur la distribution spatiale des précipitations dans la zone étudiée, car les précipitations augmentent avec l'altitude.

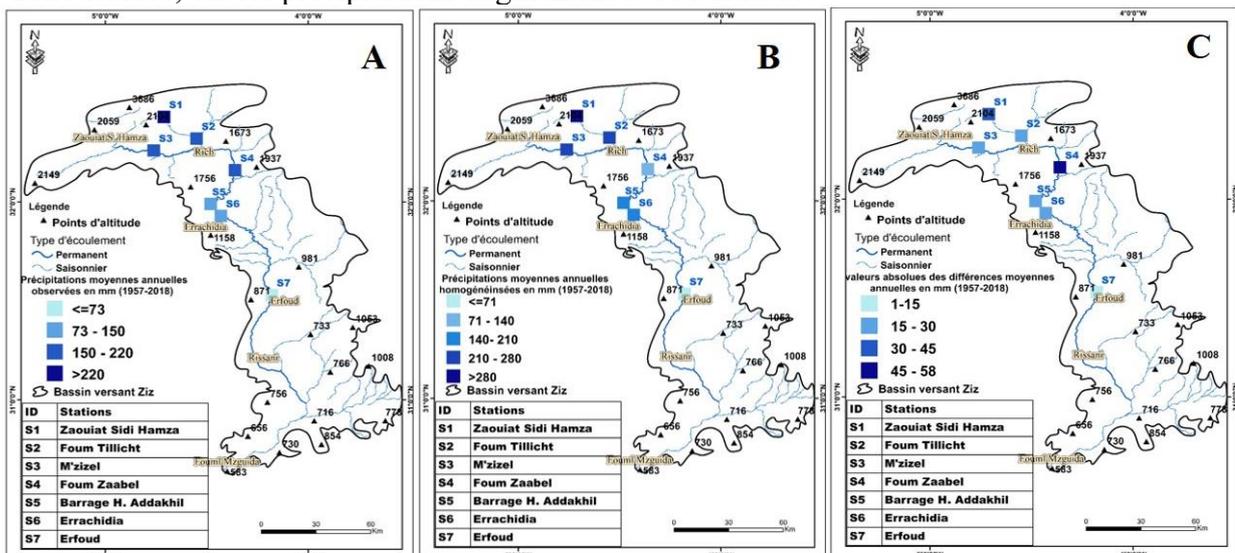


Figure 3. La différence absolue avec la moyenne observée et homogénéisée et une comparaison des moyennes annuelles des deux séries de données

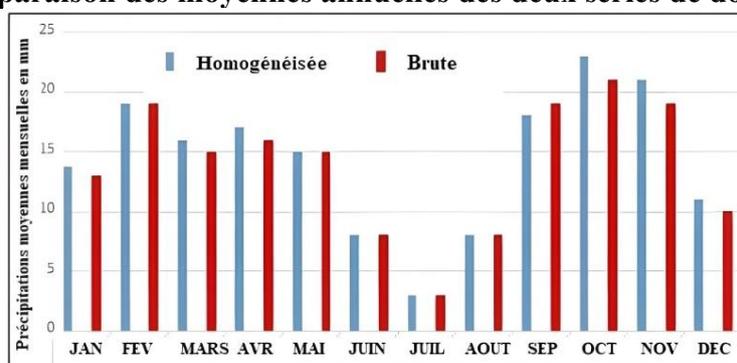


Figure 4. Moyenne mensuelle des données brutes et homogénéisées du bassin de Ziz

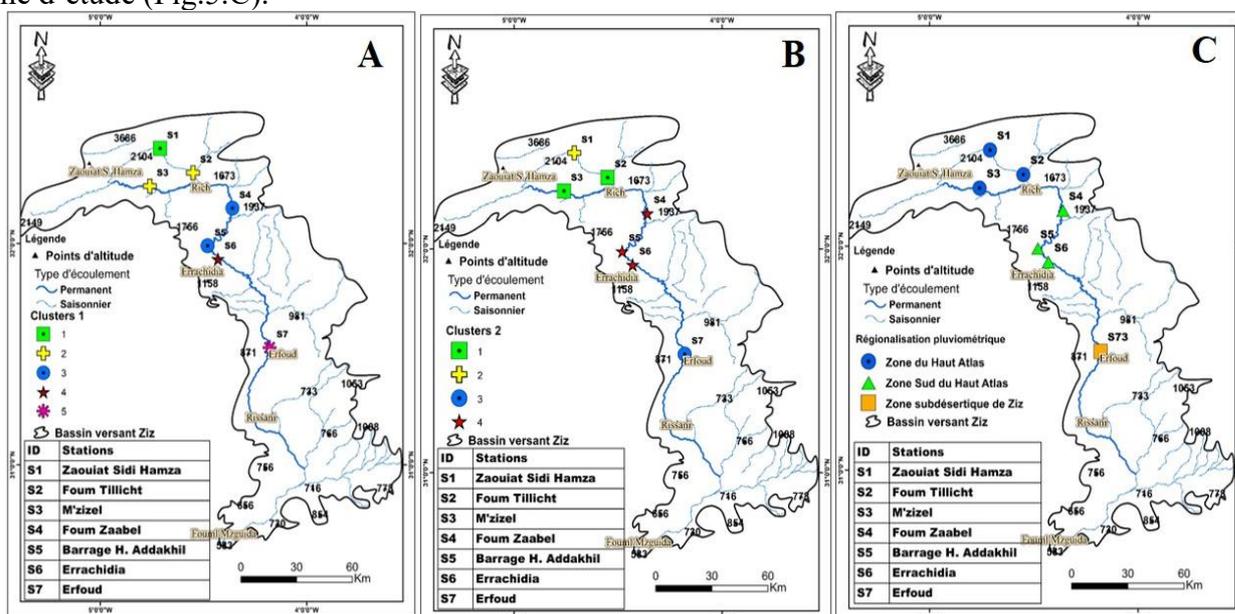
Par exemple, la station de Zaouiat Sidi Hamza (S1) située au sommet du Haut Atlas oriental (1665 m) reçoit une moyenne de 311 mm/an, mais la station d'Erfoud située à l'extrême

sud du bassin ne reçoit que 72 mm/an (Fig.3.B). En fait, le secteur montagneux (du Haut-Atlas et de l'Anti-Atlas) reçoit plus de précipitations que toute autre partie de la zone d'étude. Le module pluviométrique dépasse 200 mm dans toutes les unités du Haut Atlas mais il est inférieur à 70 mm dans la partie aval du bassin versant de Ziz. La figure 4 illustre le lien entre les moyennes annuelles des données homogénéisées et les données brutes.

Une brève comparaison des résultats obtenus à partir des données brutes et des données homogénéisées des précipitations annuelles moyennes révèle que la distribution spatiale des précipitations varie du nord au sud. La partie aval de Ziz ne reçoit que $\frac{1}{4}$ des précipitations qui tombent en amont. L'analyse des précipitations moyennes annuelles dans le bassin de Ziz met en évidence le rôle déterminant du relief dans la répartition spatiale des précipitations.

3.2. Régionalisation pluviométrique

Les trois zones sont les suivantes (1) une zone semi-aride du Haut Atlas située au nord de la chaîne montagneuse ; (2) une zone de transition (au sud des montagnes), située entre les sommets et la région subdésertique de Ziz ; et (3) une zone subdésertique, située au sud de la zone d'étude (Fig.5.C).



que les mois de janvier et de février constituent le pic hivernal. Dans cette zone, deux secteurs peuvent être identifiés : la zone sud du sillon sud-atlasique près de Foug Zaabel (S4) et la zone amont du barrage Hassan Addakhil (S5 et S6) avec des apports semi-arides au nord.

C. Zone subdésertique de Ziz

Entre 1957 et 2018, la seule station pluviométrique de cette zone est la station d'Erfoud a enregistré des précipitations annuelles moyennes (72 mm). En réalité, cette période est généralement sèche. De même, on constate que la station d'Erfoud (39 ans en dessous de la moyenne de 72 mm) a un nombre important d'années moyennes sèches.

Les moyennes mensuelles des données brutes et homogénéisées montrent une différence absolue de 2,5 mm et 3,12 mm entre octobre et septembre, respectivement, ce qui représente le maximum automnal. Les valeurs minimales pour juillet, août et juin sont d'environ 0,03 mm, 0,72 mm et 1,07 mm, respectivement.

3.3. Analyse des tendances

Sur des séries temporelles brutes et homogénéisées, le test de l'estimateur de Mann-Kendall et de la pente de Sen est utilisé pour déterminer les niveaux d'occurrence, d'amplitude et de signification de 95 % et 99 % des tendances annuelles possibles (Abahous et al., 2020). La pente de Sen a été appliquée aux données homogénéisées et le test non paramétrique de Mann-Kendall a été utilisé aux seuils alpha $\alpha = 0,01, 0,05$ et $0,10$ pour examiner les tendances annuelles des précipitations à toutes les stations du bassin versant de Ziz. Les résultats cartographiés montrent des tendances négatives statistiquement significatives à haute et basse altitude (Fig.6). Il y a donc une variation notable dans la quantité de tendances identifiées. En fait, le processus d'homogénéisation permet de trouver davantage de sites présentant des tendances notables. Les tendances calculées présentent de grandes variations.

La station de Zaouiat Sidi Hamza (S1), qui fait partie du Haut Atlas (partie amont de Ziz), présente la meilleure distribution des tendances positives hautement significatives. Les stations situées au nord du sillon Sud-Atlasique (S2 et S3), ainsi que les autres stations de la zone Sud du Haut-Atlas (S4, S5 et S6), ainsi que la zone subdésertique de Ziz (S7), ne sont pas significatives.

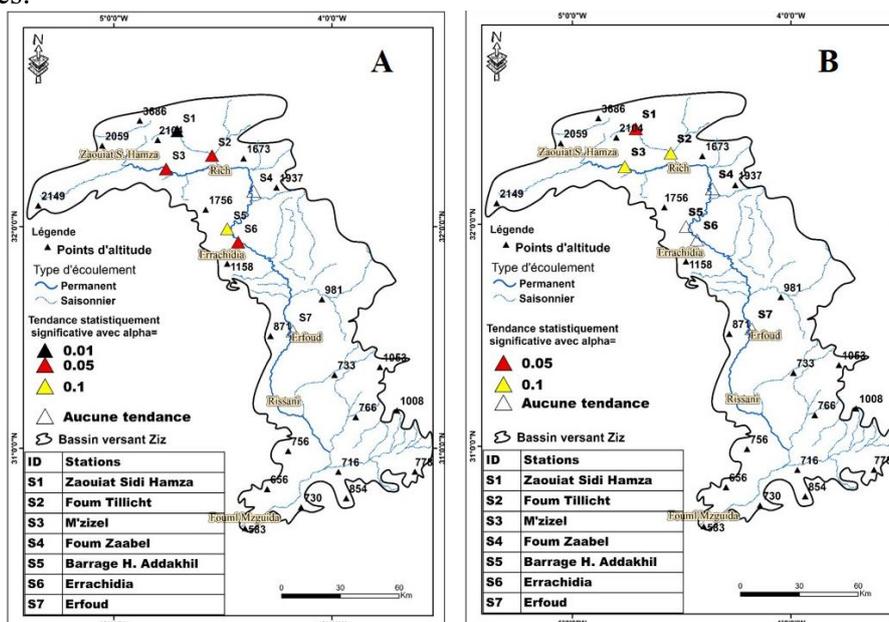


Figure 6. Distributions spatiales des tendances significatives des précipitations avant (A) et après (B) homogénéisation

Avant l'homogénéisation, les données de 3 stations (S2, S3 et S6) présentent une tendance négative statistiquement significative ($\alpha = 0,05$), tandis qu'une seule station (S1)

présente une tendance négative significative ($\alpha = 0,01$).

Seules les données homogénéisées présentant une tendance négative statistiquement significative aux niveaux de confiance de 95% et 99% sont étudiées en termes de développement du pays (mm/an). Au niveau de confiance de 99%, les valeurs de changement pour les stations présentant une tendance négative statistiquement significative varient de -1,78 à -0,48. Les valeurs de changement varient de -2,75 à -1,05 pour les stations présentant une tendance négative statistiquement significative au niveau de confiance de 95% (Abahous et al., 2020).

Conclusion

Cette étude porte sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans le bassin versant de Ziz face au problème de discontinuité spatiale et temporelle des données pluviométriques. A l'échelle nationale, plusieurs études ont été menées sur la reconstitution et l'homogénéisation des séries pluviométriques et l'étude de la variabilité et des tendances pluviométriques. Nous avons choisi les algorithmes de Climatol (version 4.0.0) pour effectuer le processus de reconstitution des données en nous basant sur les suggestions de plusieurs études de recherche. Dans notre étude, il apparaît fiable et opérationnel en termes de contrôle, de reconstitution, d'homogénéisation des données pluviométriques, de vérification des résultats et de regroupement des stations pluviométriques présentant des aspects pluviométriques similaires. La régionalisation des précipitations mensuelles a permis de distinguer 3 zones : (i) la zone du Haut-Atlas ; (ii) la zone sud du Haut-Atlas ; (iii) la zone subdésertique de Ziz. L'analyse fréquentielle des régimes pluviométriques mensuels a montré que les pics mensuels varient selon que l'année climatique est normale ou non ; en année sèche, le mois totalement sec est le mois de juillet pour les 3 sous-régions, alors qu'en année très humide, le maximum pluviométrique est enregistré en octobre pour les sous-régions 1 et 2 et en novembre pour la sous-région 3.

Références bibliographiques

- Abahous, H., Guijarro, J. A., Sifeddine, A., Chehbouni, A., Ouazar, D., & Bouchaou, L. (2020). Monthly precipitations over semi-arid basins in Northern Africa: Homogenization and trends. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6095–6105.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259.
- Rodriguez-Puebla, C., Encinas, A. H., Nieto, S., & Garmendia, J. (1998). Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(3), 299–316.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Sneyers, R. (1975). *Sur l'analyse statistique des séries d'observations*. Secrétariat de l'Organisation météorologique mondiale.
- Wang, X. L. (2008). Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(3), 368–384.
- Yassine, C. (2018). *Hydrologie des milieux arides et présahariens du Sud-est marocain Cas du bassin versant de l'oued Daoura*.
- Zamrane, Z., Mahé, G., & Laftouhi, N.-E. (2021). Wavelet analysis of rainfall and runoff multidecadal time series on large river basins in Western North Africa. *Water*, 13(22), 3243.

ANALYSE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT DANS UN CONTEXTE DE VARIABILITE CLIMATIQUE DANS LE BASSIN D'OUUM ER RBIA (MAROC)

HAMID Meriem¹, NAFIA Khouldia¹, AGUERD Jalal¹, OUZANNI Hassan¹ et EL GHACHI Mohamed¹

Laboratoire Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine, Université Sultane Moulay Slimane, Faculté des Lettres et Sciences Humaines - Beni Mellal. E-mail : al.ghofrane2011@gmail.com

RESUME: Le présent article vise à analyser la relation pluie-débit et à identifier son évolution afin de révéler l'impact de la variabilité hydroclimatique sur la ressource en eau dans le bassin d'Oum Er Rbia. L'étude s'est basée sur les données des précipitations pluviométriques et des débits, couvrant la période (1980-2020), et proviennent de cinq stations hydroclimatiques, implantées sur l'oued d'Oum Er Rbia et sur les principaux affluents. Dans cette étude, l'analyse de la relation pluie/débit a été faite via le coefficient d'écoulement standard et le cumul de déficits de pluie. Les résultats obtenus montrent que la variabilité marque fortement les régimes hydro-climatiques dans ce bassin. La baisse des précipitations, caractérisant les phases de sécheresse, entraîne souvent un déficit d'écoulement. Par conséquent, elle affecte négativement la ressource en eau dans le bassin. Les résultats obtenus montrent également que l'intensité du déficit d'écoulement, enregistrée durant les phases sèches, est relativement moins importante que celle du déficit du cumul des pluies, en signalant ainsi l'importance de l'apport de la nappe dans l'alimentation de l'écoulement dans le bassin d'Oum Er Rbia.

Mot clés : Relation pluie-débit, variabilité hydro-climatique, déficit, ressource en eau, bassin d'Oum Er Rbia

ANALYSIS OF THE RAIN-FLOW RELATIONSHIP IN A CONTEXT OF CLIMATIC VARIABILITY IN THE OUM ER BIA BASIN (MOROCCO)

ABSTRACT: The aim of this article is to analyse the rainfall-flow relationship and identify its evolution in order to reveal the impact of hydroclimatic variability on water resources in the Oum Er Rbia basin. The study was based on rainfall and flow data covering the period 1980–2020 from five hydroclimatic stations on the Oum Er Rbia wadi and its main tributaries. In this study, the rainfall/discharge relationship was analysed using the standard runoff coefficient and cumulative rainfall deficits. The results show that variability is a major feature of the hydro-climatic regimes in this basin. The drop in rainfall that characterises drought phases often results in a runoff deficit and consequently has a negative impact on water resources in the basin. The results obtained also show that the intensity of the runoff deficit, recorded during dry phases, is relatively less significant than that of the decline in precipitation, thus signalling the importance of the contribution of the water table in supplying runoff in the Oum Er Rbia basin.

Keywords: Rain-flow relationship, hydroclimatic variability, deficit, water resources, Oum Er Rbia basin

INTRODUCTION

Dans un contexte mondial, caractérisé par un réchauffement global, le climat au Maroc, a enregistré ces dernières décennies une augmentation de la température, associée d'un déclin considérable des précipitations (Sebbar, 2013). En outre, les projections climatiques disponibles affirment que la variabilité climatique pourrait s'accroître et le phénomène d'aridification devrait s'amplifier au cours du 21^e siècle. Ainsi, le stress hydrique risque de s'accroître (Sbaa et Vanclooster, 2017), en exacerbant les tensions sur l'usage de l'eau. Dans ce contexte, le bassin d'Oum Er Rbia constitue un exemple pertinent des bassins qui souffrent d'une crise hydrique inquiétante. De ce fait, le présent article vise à analyser la relation pluie-débit dans ce bassin,

en examinant son évolution, afin de révéler l'impact de la variabilité hydroclimatique sur la ressource en eau. Notamment que cette ressource constitue la composante principale de l'économie dans le bassin. Du fait qu'elle conditionne le développement de plusieurs secteurs vitaux comme l'agriculture, l'industrie (phosphates), le tourisme et l'énergie.

1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin d'Oum-Er-Rbia (OER), situé au centre du Maroc atlantique, avec une superficie de 35000 km². Ce bassin se caractérise par une structure topographique hétérogène, englobant les plaines, les plateaux et les hautes montagnes du moyen et du haut Atlas, dont le point culminant atteint plus de 4000m d'altitude (Irhil Mgoun avec 4 071 m d'altitude) (Loup, 1962). Son climat est méditerranéen, de type aride à semi-aride. Ce climat est marqué également par une variété spatiale de nuances climatiques : il est arrosé sur les hautes reliefs, modéré dans les zones côtières et aride à semi-aride dans le reste du bassin (Hamid et El Ghachi, 2023). Au niveau hydrologique, le bassin est connu par sa richesse en ressources en eau. Qu'il s'agisse des ressources souterraines ou des ressources superficielles. Le réseau hydrographique est assez dense, surtout sur la rive gauche d'Oued Oum Er Rbia. Il englobe le principal cours d'eau du bassin, qui est le fleuve d'Oum Er Rbia, et plusieurs influents, dont les plus importants sont : Oued Al Abid, Oued Ahansel, Oued Tassaout et Oued Lakhdar. Ces cours d'eau alimentent les grands barrages du bassin, et contribuent ainsi, à l'approvisionnement en eau potable et à l'alimentation en eau de plusieurs secteurs économiques dans le grand bassin d'OER.

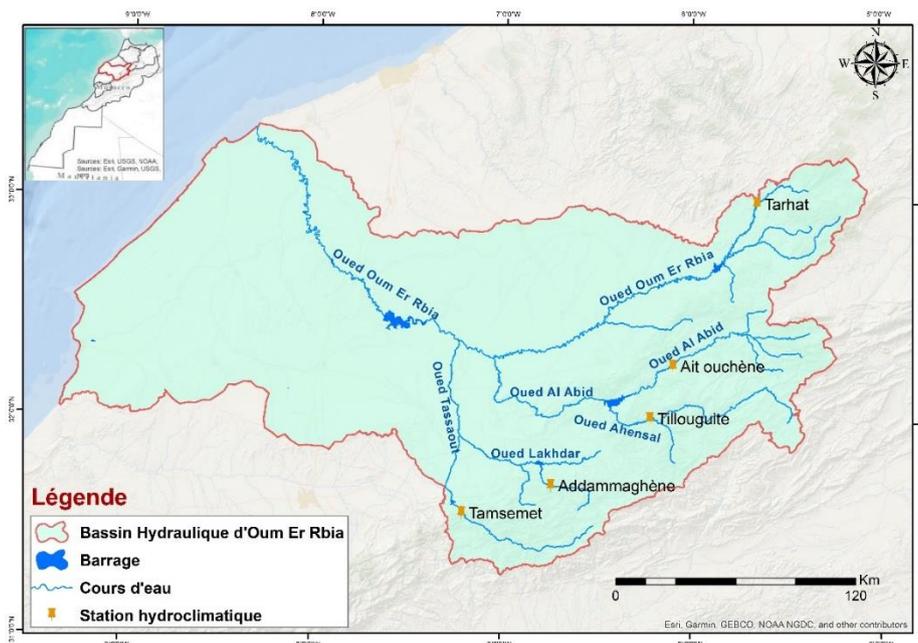


Figure 1: Carte du bassin hydraulique d'Oum Er Rbia

2. Données et méthodes

Les données hydroclimatiques utilisées dans cette étude proviennent de l'agence du bassin hydraulique d'Oum Er Rbia (ABHOER). Elles se composent des cumuls annuels des pluies et des moyennes annuelles des débits de cinq stations, situées en amont des principaux cours d'eau du bassin d'OER (Tab.1). Les données collectées couvrent la période (1980-2020).

Tableau 1: Caractéristiques des stations hydroclimatiques

| Station | X | Y | Z |
|--------------|--------|--------|------|
| Ait Ouchène | 434147 | 185125 | 993 |
| Tarhat | 476192 | 266933 | 880 |
| Tillouguite | 422684 | 158733 | 1603 |
| Tamsetmet | 328348 | 111297 | 1458 |
| Addammaghène | 373019 | 124992 | 1122 |

L'analyse de la relation pluie/ débit a été faite à travers les indices statistiques suivants :

Cumul de déficit de pluie :

Le cumul de déficit de pluie permet de déterminer et visualiser le déficit de pluie. Il se calcule comme suit (formule 1) : $Z_i = IPS_{i-1} + IPS_i$ (1)

IPS_{i-1} est la valeur de l'indice pluviométrique standardisé de l'année $i-1$ et IPS_i est la valeur de l'indice pluviométrique standardisé de l'année i .

En fait, l'IPS est un indice pluviométrique créé par Mckee et al. (1993), permettant de déterminer le caractère humide ou sec d'une période. Il se calcule selon la formule suivante

$$(formule\ 2) : IPS = \frac{P_i - P_m}{\sigma} \quad (2)$$

Avec : P_i : cumul annuel de pluie ; P_m : moyenne interannuelle de pluie ; σ : l'écart type

Coefficient d'écoulement

Le calcul du coefficient d'écoulement standard (Cr) permet de caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler et de connaître les changements des états de surface. Ce coefficient a été évalué comme le rapport entre l'indice hydrométrique et l'indice pluviométrique (formule 3).

$$Cr = IDS/IPS \quad (3)$$

Avec IDS : Indice de sécheresse des débits et IPS : indice pluviométrique standardisé.

En fait, l'IDS représente le pourcentage d'écart du débit à la moyenne sur le long terme. Il est appelé également l'écart moyen du débit (EMD). Il est souvent utilisé pour dégager les périodes humides et déficitaires, et ainsi déterminer les variations et les déficits du débit. Il se calcule comme suit (formule 4):

$$IDS = \left(\frac{D_i}{D_m} \right) - 1 \quad (4)$$

Avec D_i : le débit du mois ou de l'année i ; D_m : le débit moyen de la série sur l'échelle temporelle considérée.

3. Résultats et discussion

Selon les résultats du cumul de déficit de pluie, relatés dans la figure 2, il s'avère que les fluctuations interannuelles marquent le régime pluviométrique dans le bassin d'OER. Ces fluctuations sont issues de la variabilité climatique, caractérisant le climat au Maroc (Sebbar,

2013). D'autre part, la figure 2 montre également que le caractère déficitaire constitue l'aspect le plus dominant de l'évolution du régime pluviométrique. En effet, en dépit de l'occurrence de quelques années humides, telles que 1989 et 1996/97, le déficit caractérise l'évolution des précipitations pluviométriques durant la période (1980-2007). Ce caractère a été marqué par l'intensité et la persistance, surtout au cours des périodes : 1980/81, 1983/85 et 2005/07. En fait, ces périodes coïncident avec les années des sécheresses, qui ont frappé le pays entier. Dès 2008, une légère allure excédentaire a revêtu le cumul de déficit pluviométrique. Mais, elle a fait tout de suite un déclin, au profit d'un nouveau déficit.

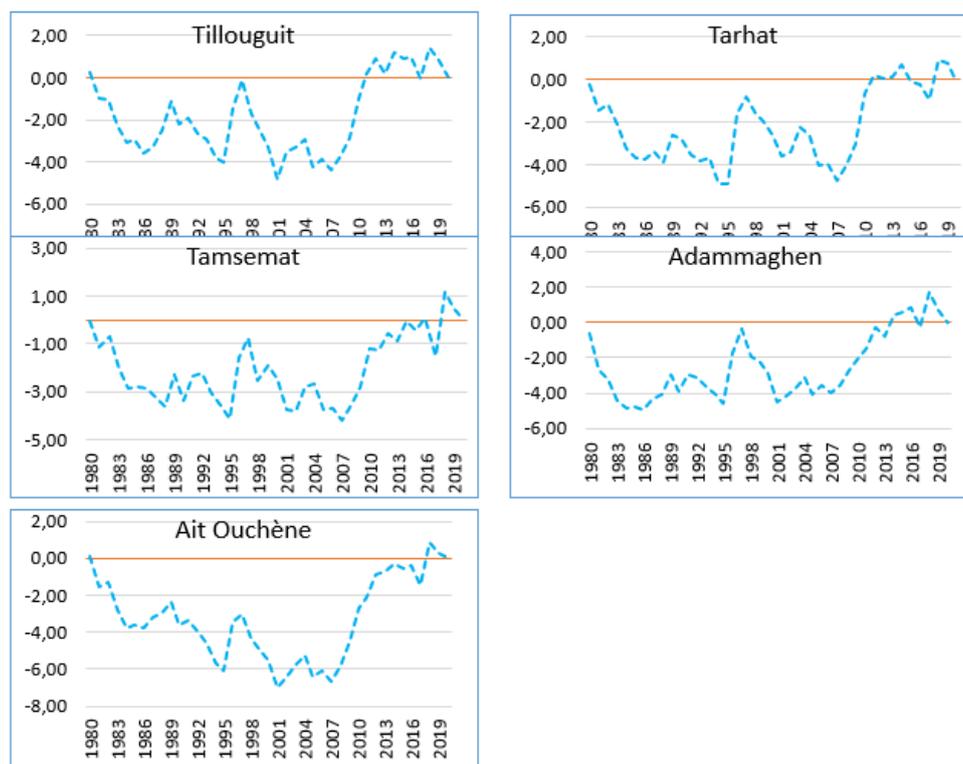


Figure 2: Cumul de déficit de pluie durant la période (1980-2020)

Les variations du coefficient d'écoulement, calculé pour chaque station (fig. 3), montrent également que le caractère déficitaire marque tous les principaux cours d'eau du bassin d'OER. L'aspect excédentaire concerne seulement des courtes périodes, coïncidant généralement avec les années humides, à savoir les années 1982, 1996 et 2010. Ce constat révèle ainsi, l'ampleur de l'influence des pluies sur l'écoulement dans le bassin d'OER. Suite à cette influence, la ressource en eau dans le bassin constitue le premier secteur menacé par les variations hydroclimatiques. Plusieurs études, menée dans le bassin (à savoir Quadem et al., 2019) ont montré d'emblée que la ressource en eau dans le bassin enregistre, durant les phases sèches, un déclin considérable, notamment au niveau des barrages. Ainsi plusieurs secteurs vitaux, à savoir l'agriculture, l'eau potable, sont négativement impactés.

D'autre part, malgré que le caractère déficitaire revête à la fois les variations du cumul de déficit de pluie et du coefficient d'écoulement, on constate que l'intensité et la persistance du déficit était plus remarquable sur le cumul de déficit pluviométrique, en signalant ainsi l'importance de l'apport de la nappe dans l'écoulement dans le bassin d'OER. Ce constat est aussi confirmé par d'autres études, menées sur les sous bassins d'OER (à savoir: Chakir, 2022). En outre, l'examen de la figure 3 montre également que l'intensité de déficit du coefficient d'écoulement est moins importante, au niveau de la station de Tarhat, en révélant l'importance des sources dans l'écoulement en amont du fleuve d'Oum Er Rbia, ce qui est déjà confirmé par les résultats d'El Orfi (2023).

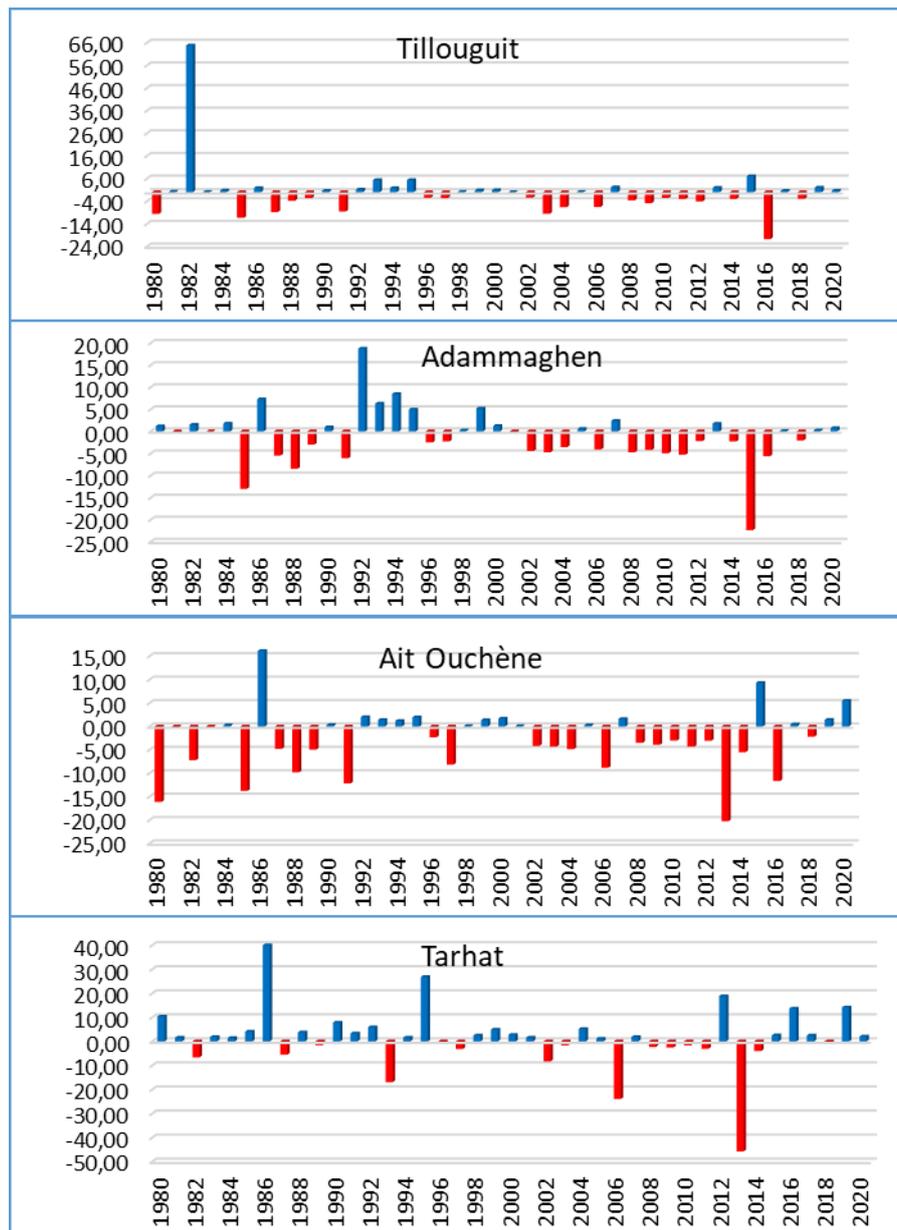


Figure 3: le coefficient d'écoulement durant la période (1980-2022)

Conclusion

Le bassin d'OER se caractérise par une forte variabilité hydroclimatique. Durant la période (1980-2020), les fluctuations marquent considérablement le régime pluviométrique. Les débits ont enregistré aussi des variations importantes. Pendant, les phases humides le caractère excédentaire marque le coefficient d'écoulement, dans tous les cours d'eau du bassin d'OER, en montrant l'importance de l'influence des pluies sur le débit, et par la suite sur le remplissage des barrages, et sur la ressource en eau en général. En revanche, durant les phases sèches, le déficit affecte aussi le coefficient d'écoulement. Néanmoins, l'intensité de ce déficit demeure relativement moins importante, que celle du déclin des précipitations, en signalant ainsi l'apport de la nappe dans l'écoulement dans le bassin d'Oum Er Rbia.

Bibliographie

- Chakir M., (2022), دراسة إحصائية للشح والنضوب المائي بحوض واد تساوت (عالية سد مولاي يوسف): التحديد والاستخلاص (الأطلس الكبير- المغرب) والنمذجة وإشكالية التدبير (1978-2020). Thèse, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal (Maroc), 408 p.
- El Orfi, T., (2023), Quantification, modélisation et usages des ressources en eau dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Amont du barrage Ahmed El Hansali, Maroc), Thèse, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal (Maroc), 268 p.
- Hamid, M. and EL Ghachi, M., (2023). Variabilité de la température dans le bassin hydraulique d'Oum Er Rbia (Maroc), durant la période (1990-2020): Étude des anomalies et des tendances. Revue Internationale de la Recherche Scientifique (Revue-IRS), 1(2), Pp 137-146.
- Hamid M. et El Ghachi, M., (2022), Vers la compréhension du fonctionnement hydrologique anthropique à l'aval de la confluence de l'Oued Oum Er Rbia avec l'Oued Al Abid : suivi, mesure et analyse (Bassin d'Oum Er Rbia – Maroc), Monitoring II : Production et valorisation des données hydrométriques, FLSH Beni Mellal, LDPRP, Pp. 89-98.
- IPCC, (2014), Climate Change 2014: Mitigation of climate change, URL: <http://www.ipcc.ch>
- IPCC, (2022), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- Qadem, A., El Ghachi, M., and Layati, E. (2019) : “ contribution de la télédétection à l'étude de l'évolution spatiotemporelle de la retenue du barrage Bin El Ouidane (Le haut Atlas central, Maroc) ”, Geomagreb 15, pp. 41-47.
- Sbaa M. et Vanclooster M., (2017). La gestion des ressources en eau au Maroc face aux changements climatiques, état des lieux et alternatives technologiques d'adaptation. Water resources management in Morocco, climate change and technology adaptation alternatives. Annales des Sciences de la Santé, N° 14, Vol. 1, Pp 24-53.
- Sebbar A., (2013), Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935- 2005) : Réactualisation de la carte des précipitations. Thèse, Université Hassan II, Casablanca (Maroc), 187 p.

Variabilité et occurrence des pluies journalières maximales annuelles : Cas du bassin versant de l'Oued Adoudou

Hassan NAIT-SI¹, Abderrahmane OUAMMOU¹, Abdourrahmane BOUKDOUN¹ et Mahjoub BENBIH¹

¹Université Ibn Zohr, FLSH, Laboratoire GEAMDD, Cité Dakhla, BP 29/8, 80060, Agadir, Maroc.
Hassan.naitsi1994@gmail.com

RESUME: Le bassin versant de l'Oued Adoudou a connu plusieurs épisodes d'inondations intenses, en raison de ses caractéristiques morphométriques propices à la génération des crues extrêmes et de la variabilité pluviométrique qui se caractérise par des épisodes intenses et brutaux. Les pluies journalières maximales (Pjmax) font partie des variables hydro-climatiques significatives dans les études des risques hydrologiques tels que les inondations et l'érosion. Pour ce faire, nous nous focalisons sur la variabilité des Pjmax enregistrées dans quatre stations d'observations dans la zone. Ensuite, une analyse fréquentielle sera réalisée à l'aide de plusieurs lois statistiques afin d'estimer l'occurrence des Pjmax qui caractérisent notre bassin versant.

Mots-clés : Variabilité pluviométrique - Analyse fréquentielle - Pjmax - Bassin versant de l'oued Adoudou - Risques hydrologiques.

VARIABILITY, TREND AND OCCURRENCE OF ANNUAL MAXIMUM DAILY RAINFALL

ABSTRACT: The Oued Adoudou watershed has experienced several episodes of intense flooding, due to its morphometric characteristics, which are conducive to the generation of extreme floods, and its rainfall variability, which is characterized by intense and sudden episodes. Maximum daily rainfall (Pjmax) is a significant hydro-climatic variable in studies of hydrological hazards such as flooding and erosion. To this end, we focus on the variability of Pjmax recorded at four observation stations in the area. Then, a frequency analysis will be performed using several statistical laws to estimate the occurrence of Pjmax that characterize our watershed.

Keywords: Rainfall variability - Frequency analysis - Maximum daily rainfall - Adoudou watershed - Hydrological risks.

INTRODUCTION

Au cours des 20 dernières années, les risques liés à l'aléa pluviométrique tels que les inondations, sont devenus un risque majeur au Maroc en particulier dans les bassins versants situés au pied des montagnes (comme le cas du bassin versant de l'oued Adoudou), causant des dégâts catastrophiques aux infrastructures et à la vie humaine. Les valeurs extrêmes des précipitations et notamment les précipitations journalières maximales annuelles (Pjmax) présentent un intérêt tout particulier chez les hydrologues et les hydrauliciens dans les études des risques d'inondations. L'analyse fréquentielle des Pjmax est l'un des méthodes de quantification de l'aléa pluviométrique, elle fournit des éléments indispensables pour la construction d'infrastructures afin de protéger la population et leurs biens. En conséquence, cette étude se focalise sur l'utilisation de la méthode d'analyse fréquentielle des Pjmax annuelle pour quatre stations météorologiques afin d'estimer leurs périodes d'occurrences pour concevoir des infrastructures résistantes aux inondations, telles que les digues, levées, murs de protection contre les crues, etc., ce qui est essentiel pour l'adaptation et la planification futures.

1. BASSIN VERSANT ANTI-ATLASIQUE AVEC DES CARACTÉRISTIQUES INFLUENÇANT LA GÉNÉRATION DE CRUES

Le bassin versant de l’oued Adoudou se situe dans le centre Ouest du Maroc, entre les parallèles 29° 15’ et 29° 50’ Nord. Il est drainé par son cours d’eau principale, l’oued Adoudou et ses principaux affluents ; l’oued Tamdroust et l’oued Bounaâmane couvrant une surface de 834,3 Km². Il est limité au Nord-Ouest par l’océan Atlantique, au Nord par les complexes dunaires de Boughrara, au Nord-Est par une grande partie de la plaine de Tiznit et par les hauteurs montagneuses de l’Anti-Atlas occidentale à l’Est, au Sud et à l’Ouest (*fig.1*). L’oued Adoudou prend naissance dans la boutonnière de Kerdous au Sud-Est du bassin, puis il s’écoule vers l’aval où il rejoint plusieurs affluents provenant de l’Anti-Atlas occidental et la plaine de Tiznit pour enfin déboucher dans l’océan Atlantique au Nord-Ouest avec une longueur de parcours de 97,3 km.

Les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin d’Adoudou influencent l’allure et la fréquence des écoulements de surface et favorisent ainsi la naissance des crues torrentielles par temps de pluies orageuses (*Nait-si, H. et al. 2022*). Dans le contexte climatique le bassin versant de l’oued Adoudou, comme tous les bassins des zones arides, est caractérisé par des précipitations rares et souvent irrégulières dans le temps et l’espace, marqué par des extrêmes pluviométriques brutaux conduisant à la genèse de crues extrêmes qui menace les infrastructures et les activités humaines.

2. DONNÉES ET METHODES

Dans notre zone d’étude les stations météorologiques sont limitées en nombres et mal réparties dans l’espace. Les quatre stations disponibles se situent aux alentours de notre bassin versant. Les données pluviométriques collectées ont été fournies par l’Agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa (*ABHSM*), l’Institut National de la Recherche Agronomique (*INRA*) et la Direction Générale de la Météorologie (*DGM*) (tab1).

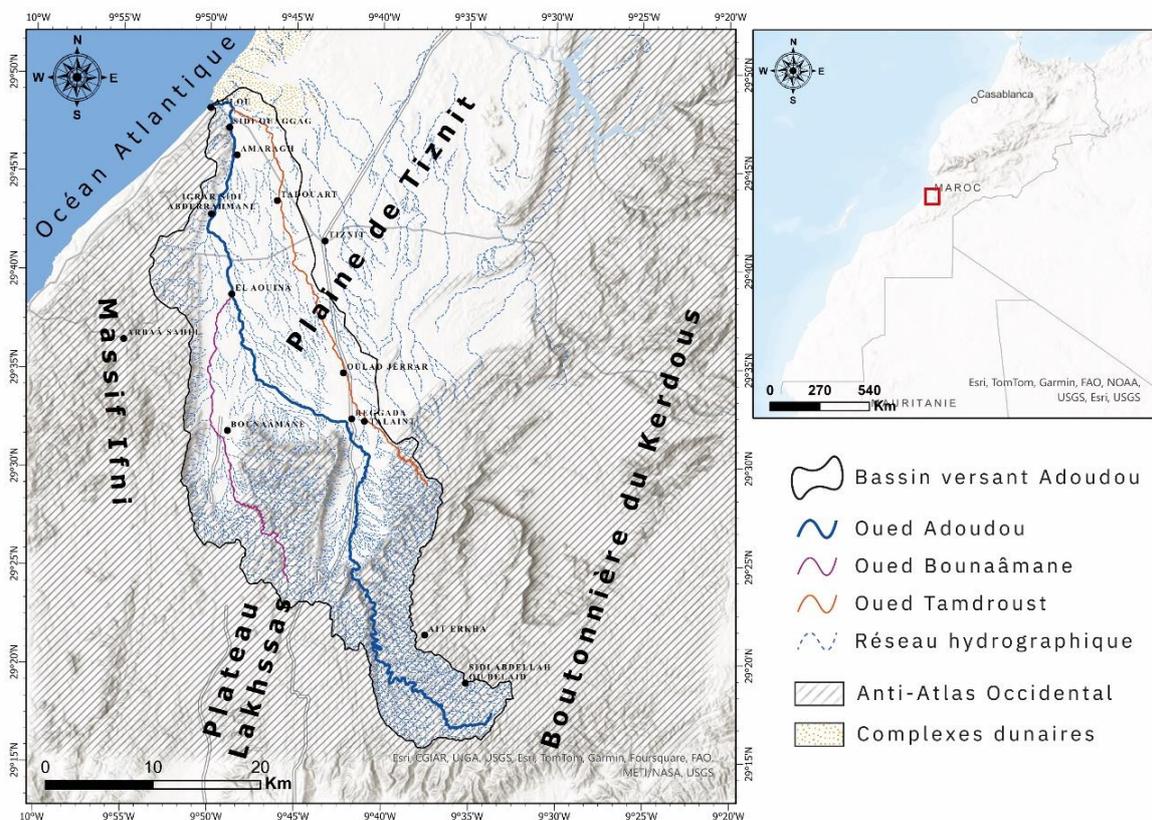


Figure 4: Situation géographique du bassin versant de l'oued Adoudou

Tableau 2: Stations climatiques et leurs distributions géographiques

| Station | Distance de l'océan (Km) | Coordonnées Géographiques (Lambert Sud Maroc) | | | Périodes |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|--------|-------|-----------|
| | | X (m) | Y (m) | Z (m) | |
| Tiznit | 19 | 80500 | 308000 | 225 | 1989-2015 |
| Ouijjane | 47 | 102300 | 297500 | 250 | 1977-2019 |
| Youssef Ibn Tachfin | 32 | 104500 | 323700 | 125 | 1971-2018 |
| Amaghouz | 70 | 133700 | 309500 | 650 | 1978-2018 |

L'analyse fréquentielle, réalisée à l'aide du logiciel HYFRANPLUS (2003), est une méthode qui permet d'examiner la variabilité d'une série de données, avec comme objectif principal est d'utiliser des mesures d'événements passés pour estimer les probabilités futures d'occurrence (*St-Hilaire, A. 2005*).

Méthodologiquement, l'étude fréquentielle consiste d'abord à classer les valeurs de l'échantillon par ordre croissant, en attribuant à chaque variable son rang de classement dans la série. Ensuite, on calcule la fréquence expérimentale des variables F en se basant sur l'équation suivante :

$$F = (r - 0.3) / (N + 0.4)$$

Avec : **r** représente le rang de chaque valeur et **N** est l'effectif de l'échantillon

Les données de P_Jmax des stations ont été ajustées selon plusieurs lois de probabilité (loi GEV, loi Normale, loi Log-Normale, loi Gumbel, loi Gamma et loi Pearson Type III). Les critères d'Akaike (**AIC**) proposé par Akaike (1974) et Bayésien (**BIC**) proposé par Schwarz (1978) sont représentés. Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée pour chaque station en tenant compte de l'erreur d'estimation et du nombre de paramètres à ajuster (*St-Hilaire, A. 2005*).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

- Variabilités des pluies journalières maximales annuelles

La variabilité des pluies journalières maximales annuelles (*fig.2*) montre une irrégularité interannuelle, ainsi qu'une variabilité remarquable de la quantité des précipitations entre les stations avec des écarts significatifs à l'amont (station Amaghouz). Les valeurs maximales enregistrées en 2014 témoignent d'un événement extrême avec une intensité de pluie très élevée à l'amont par rapport à l'aval (155.3 mm à Amaghouz, 92.9 mm à Youssef Ibnt Tachfin, 83.3 mm à Ouijjane et 54 mm à Tiznit). Les valeurs les plus faibles ont été observées en 1981, 1992, 1994 et 2015.

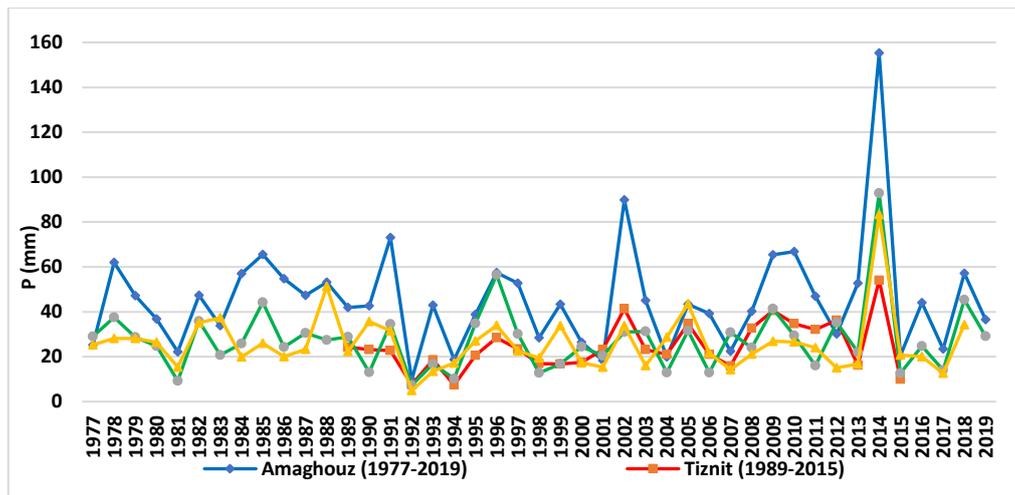


Figure 5: Variabilités des précipitations journalières maximales annuelles

- Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales (PJmax)

Les meilleurs ajustements pour les stations avec une intervalle de confiance de 95% obtenus par l'application de deux critères ; d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC), sont la loi Gamma pour la station de Tiznit (fig.4) et la loi Log Normale pour les stations d'Amaghouz, Oujjane et Youssef Ibn Tachfin (fig.3).

L'étude fréquentielle permet d'estimer le temps de retour des précipitations journalières maximales annuelles. Par exemple, pour une période de retour de 2 ans, la station d'Amaghouz enregistre une valeur de PJmax annuelle estimée à 41 mm, cela ne signifie pas que l'avènement de la pluie se reproduira régulièrement tous les deux ans, mais qu'il a ½ (50%) de chance de se reproduire chaque année ou plusieurs fois dans une seule année.

Le tableau 2 présente les quantiles estimés à partir des lois de probabilité les plus ajustées de chaque station pour différents temps de retour. On remarque que l'intensité des PJmax annuelles estimées (fig.5) varie de manière significative de l'amont (Amaghouz) vers l'aval (Tiznit, Oujjane et Youssef Ibn Tachfin) ce qui confirme que les averses affectant l'amont de la zone d'étude sont significativement plus intenses que celles affectant l'aval. Ces averses intenses induisent des écoulements importants de l'amont vers l'aval, conduisant à des inondations catastrophiques.

Oujda les 17, 18 et 19 mai 2024

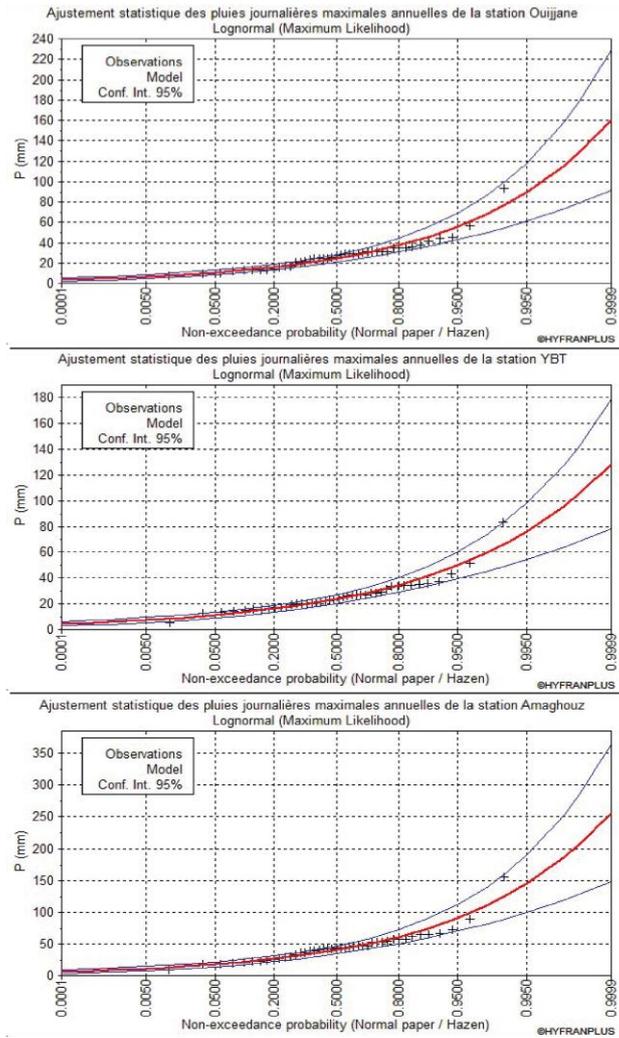


Figure 6: Ajustement par loi Log Normale des pluies journalières maximales annuelles pour les stations de Oujjane, Youssef Ibn Tachfin et Amaghouz

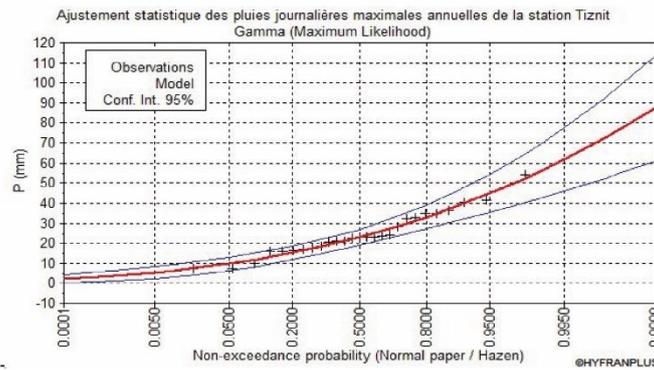


Figure 7: Ajustement par loi Gamma des pluies journalières maximales annuelles pour la station de Tiznit

Tableau 3: Temps de retour des pluies journalières maximales annuelles

| Temps de retour | Tiznit | Amaghouz | Oujjane | Youssef Ibn Tachfin |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| 200 ans | 61.8 mm/j | 145 mm/j | 89.6 mm/j | 76 mm/j |
| 100 ans | 56.9 mm/j | 128 mm/j | 79 mm/j | 67.9 mm/j |
| 50 ans | 51.9 mm/j | 112 mm/j | 68.8 mm/j | 60 mm/j |
| 20 ans | 44.9 mm/j | 91 mm/j | 55.9 mm/j | 49.8 mm/j |
| 10 ans | 39.3 mm/j | 76 mm/j | 46.5 mm/j | 42.2 mm/j |
| 5 ans | 33 mm/j | 61 mm/j | 37.2 mm/j | 34.5 mm/j |
| 2 ans | 23 mm/j | 40.2 mm/j | 24.3 mm/j | 23.5 mm/j |

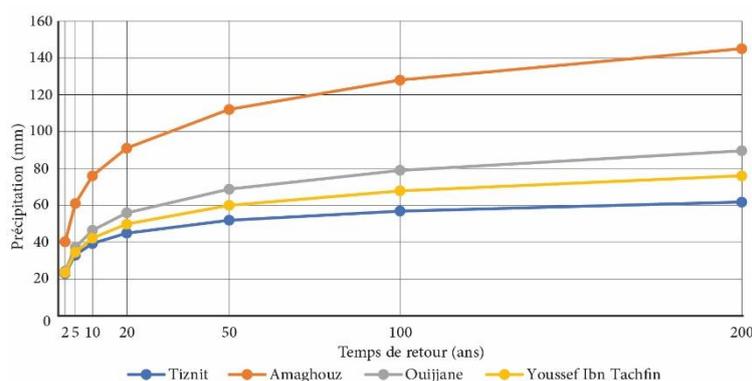


Figure 8: Temps de retour des pluies journalières maximales annuelles

CONCLUSION

Le régime pluviométrique joue un rôle crucial dans la génération des inondations. Une forte intensité des précipitations concentrées pendant une courte période conduit à des violentes crues, tandis que l'intensité et la torrencialité de ces crues sont fortement influencées par les caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Adoudou. Les précipitations journalières maximales annuelles sont irrégulières, révélant des extrêmes significatifs, surtout au cours des deux dernières décennies. Le temps de retour de ces PJmax annuelles pour chaque période estimée montre une forte variabilité entre l'amont et l'aval. Par ailleurs, l'analyse fréquentielle des pluies journalières maximales présente un intérêt tout particulier en termes d'aide à la prise de décision et de planification dans le domaine de la gestion des risques d'inondations, elle fournit des éléments indispensables pour la construction d'infrastructures hydrauliques telles que les digues, levées, murs de protection contre les crues, etc., ce qui est essentiel pour l'adaptation et la planification futures afin de protéger la population et leurs biens.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CIOBOTARU N., DEAK G. (2015). La variabilité des précipitations et des crues dans le bassin versant de la șușița (roumanie). XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015.
- DAVIES J., POULSEN L., SCHULTE-HERBRÜGGEN B., MACKINNON K., CRAWHALL N., HENWOOD W.D., DUDLEY N., SMITH J., GUDKA, M. (2017). Conservation de la biodiversité des zones arides. UICN, PNUE-WCMC et CNULCD, xii +84p.
- EL YADARI S., JANATI IDRISI A., HARADJI A., HANCHANE M. (2018). Les précipitations exceptionnelles et les inondations au bassin versant d'Inaouene. Colloque International Oujda 9 et 10 novembre 2018.
- HABIBIC B., MEDDIA M., BOUCEFIANE A. (2012). Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui. Revue « Nature & Technologie ». C- Sciences de l'Environnement, n° 08/Janvier 2013. Pages 41 à 48.
- NAIT-SI H., OUAMMOU A., NMISS M. (2022). Apport du SIG dans l'analyse physique et hydrographique dans bassin versant Anti-Atlasique. Cas du bassin versant de l'oued Adoudou. Colloque International : Les risques hydroclimatiques et géomorphologiques : typologie, cartographie et gestion. Oujda les 14 et 15 juin 2022.
- ST-HILAIRE A. (2005). Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan. Rapport de recherche R832 de l'INRS-ETE, 23 pages.
- VAUCHEL Ph. (2000-2004) Hydraccess : Base de données hydrométriques sous Access 2000. Dakar, IRD, 21pages.
- VAUCHEL Ph. (2004) - Hydraccess : Gestion et traitements de données hydrologiques sous Office 2000, Montpellier, IRD, 11 p.

L'ORAGE DE GRELES DU 6 JUIN 2020 DANS LA REGION FES-MEKNES

Hanchane M¹, Saloui A², Karrouk M-S³ et El Khazzan B¹

mohamed.hanchane@usmba.ac.ma

¹ : FLSH Dhar El Mehraz (USMBA Fès) ; ² : FLSH Mohammadia (UH2 Casablanca) ; ³ : FLSH Ben M'Sik (UH2 Casablanca)

Résumé: Un fort orage de grêle s'est abattu sur Fès et ses environs, le 6 juin 2020 en fin de journée. Il a causé de nombreux dégâts au niveau des champs agricoles, notamment les rosacées et l'oléiculture. Il s'est abattu même, exceptionnellement, en milieu urbain (ex. ville de Fès) provoquant ainsi de nombreux dégâts matériels au niveau du parc automobile de la ville. Il s'est accompagné de vents et de grêlons (diamètre supérieur à 5 mm) en se mêlant de la pluie. En devenant de plus en plus récurrent au cours de ces dernières années, c'est un phénomène qui se produit d'habitude au début de l'été dans des zones géographiques continentales à proximité de la montagne, suite à une différence de température entre la surface et la haute troposphère. Le présent article envisage d'élucider les mécanismes de la dynamique atmosphérique qui sont à l'origine de son déclenchement au niveau de la région de Fès Meknès. Cette compréhension peut servir pour prévoir ce risque et constituer un support pour sa prévention.

Mots clés: Risque climatique ; orage de grêle; dynamique atmosphérique ; Région Fès-Meknès.

The hailstorm of June 6, 2020 in the Fez-Meknes region

Abstract: A strong hail storm hit Fez and its surroundings on June 6, 2020 at the end of the day. It caused a lot of damage to agricultural fields, particularly rosaceae and olive growing. It even fell, exceptionally, in an urban environment (e.g. city of Fez), thus causing a lot of material damage to the city's vehicle fleet. It was accompanied by winds and hailstones (diameter greater than 5 mm) mixing with the rain. Becoming more and more recurrent in recent years, it is a phenomenon which usually occurs at the beginning of summer in continental geographical areas close to the mountain, following a temperature difference between the surface and the upper troposphere. This article aims to elucidate the mechanisms of atmospheric dynamics which are at the origin of its triggering in the region of Fez Meknes. This understanding can be used to predict this risk and provide support for its prevention.

Keywords: Climate risk; hailstorm; atmospheric dynamics; Fez-Meknes region.

Introduction

Bien que les orages soient très peu fréquents en été, ils suscitent toujours la crainte avec leurs nuages imposants, leurs éclairs spectaculaires, leurs grêlons, leurs pluies torrentielles et leurs vents puissants. Un tel phénomène s'est produit à Fès et ses environs, le 6 juin 2020 en fin de journée. Il s'agit d'un orage de grêlons, d'un diamètre d'environ 5 mm, se mêlant à la pluie et accompagné de vents violents. Le phénomène est survenu après une vague de chaleur quelques jours précédant l'événement. Il se produit exceptionnellement en cette période chaude de la saison d'été dans des régions marocaines où la géographie est marquée par la continentalité et l'orographie. L'événement orageux s'est propagé de la ville de Meknès, et dans un intervalle d'une heure, il a atteint la ville de Fès et ses alentours avant d'atteindre les environs de Taza. Au niveau de la ville de Fès et ses environs, il a causé de nombreux dégâts au niveau des cultures horticoles et agricoles (photo 1) qui sont estimés à 9100 hectares couvrant 27 communes rurales dans la région Fès-Meknès, en particulier dans les provinces de Meknès, Sefrou, Ifrane, El Hajeb, Fès, Moulay Yaacoub, Taza et Boulemane (la province de Taounate, située plus au nord a été épargnée). Il s'est abattu même, exceptionnellement, en milieu urbain de Fès, provoquant ainsi de nombreux dégâts matériels qu'on a observé au niveau du parc automobile de la ville (brise des vitres et bossellement de la carrosserie) (photo 2) et des arbres urbains (photo 3). Il a été accompagné d'inondations rapides au niveau de la ville de Fès. Suite à cet événement, les habitants de Fès ont déploré le décès d'un très jeune enfant de 14 ans. Un sentiment de panique et des interprétations populaires diverses (fins du monde, châtiment de dieu, ...) ont été exprimés *via* les réseaux sociaux.

Selon de nombreux témoignages, un tel phénomène, s'il est bien connu par la population des montagnes d'Imouzzer et d'Ifrane, n'a jamais été enregistré dans la ville de Fès, au moins lors de la période climatique récente. Par ailleurs, la ville de Séfrou l'a bien enregistré lors de l'été 1986 qui est connu, par la population *séfrioui*, par l'année des « pierres ». En terminologie anglaise on associe, effectivement, l'averse de grêle aux « pierres » en le nommant "*Hailstorm*". Notre perception lors de son déclenchement nous permet de l'imaginer ainsi.

Malgré la rareté de ce phénomène au Maroc, il a été décrit dans des documents historiques et des références très anciennes. On cite la lithographie de Honoré (1808-1879) représentant les giboulées de Mars au Maroc (figure 1) et le rapport technique historique (1958) de "Headquarters Quartermaster research and engineering US Army" sur la dimension du "Hail" et sa distribution dans le monde. En citant notre pays, ce rapport indique le recensement de 2 cas à Casablanca, 1 à Marrakech et 6 à Tanger durant la période 1940-1949.

Dans un contexte du changement climatique, il est particulièrement intéressant d'évaluer si les orages de grêle ont augmenté en ampleur ou en intensité au cours des dernières années. Malheureusement, cette information n'est pas disponible à l'heure actuelle au sein de la communauté des climatologues marocains. Par ailleurs, des études pionnières reliant les orages de grêle aux types de circulation atmosphérique à l'échelle régionale ont été réalisées par plusieurs auteurs (Aran et al, 2011). D'autres études pionnières ont apporté des explications au phénomène (Browing et al., 1976 ; Knight and Khigh, 2001). Ainsi, le présent article apporte des éclaircissements sur les processus de formation des orages de grêle et vise à décrire la situation synoptique et dynamique et à effectuer une analyse de l'instabilité atmosphérique à l'origine de l'orage de grêle. Cette compréhension peut servir pour prévoir ce risque et constituer un support pour sa prévention surtout qu'il s'est répété à la même période de l'année pendant deux années consécutives 2021 et 2022.



Photos 1 à 3 (de gauche à droite) : Dégâts provoqués au niveau d'un champ de pommier aux environs d'Imouzzer; brise des vitres de voitures (ville de Fès); chute des arbres urbains (ville de Fès)



Figure 1 : Lithographie représentant une tempête de grêle au Maroc à la taille de pierres (Source: Les Giboulées de Mars, dans le Maroc. Daumier, Honoré, 1808-1879. <https://commons.und.edu/daumier-prints/1403/>)

2. Analyse synoptique et dynamique de l'orage de grêle du 6 juin 2020

Les processus de formation des orages accompagnés de grêle soulignent l'importance de l'ascendance dans de l'air chaud de surface et le refroidissement en altitude. L'analyse synoptique du 6 juin 2020 nous permettra de dégager la dynamique atmosphérique explicative d'un tel événement. Les cartes météorologiques de surface de DWD (Deutscher Wetterdienst) montrent, 3 jours avant l'événement de grêle (18 UTC le 03/06/2020), une occlusion froide au large des côtes atlantiques marocaines soulevant ainsi à la fois le front chaud et la masse d'air chaud (Fig. 2a). Ce front occlus froid a connu un déplacement vers le nord (vents de sud) et s'est allongé ensuite vers l'ouest (près du Golf de Cadix) avant de disparaître le 6 juin 2020 à 00 UTC. Les vents de sud au large des côtes marocaines qui s'organisaient au tour du minimum dépressionnaire de Madère expliquent le déplacement vers le nord du front occlus. Le prolongement vers l'est du front occlus est accompagné du creusement d'une petite vallée dépressionnaire qui a traversé la région Fès-Meknès le 5 juin 2020 avant de se transformer, le 6 juin 2020, en marais barométrique. Cette vallée dépressionnaire a orienté un flux de sud à sud-ouest qui apporté de l'air chaud humide en provenance des régions sub-équatoriales. En effet, un système nuageux élevé et profond (Figure 2b) a couvert l'ensemble des sommets montagneux de l'Atlas en les abordant par leurs flancs sud à sud-est. En revanche, un système nuageux, couvrant tous les niveaux d'altitude, a accompagné le système dépressionnaire au large des côtes marocaines et s'est déplacé vers le nord-est, en direction de la dépression creuse qui est située au nord de l'Europe de l'ouest, tout en poursuivant le déplacement des vents maximaux (ou jet streak ~ 160 km/h). Le Jet-stream à cette altitude a favorisé les ascendances dans de l'air chaud au dessus de la région Fès-Meknès. Dans la troposphère moyenne (500 hPa), on observe un creux dont l'axe est situé à quelques degrés à l'ouest du pays (Figure 2c). Les mouvements ascendants sont favorisés en aval du creux (c'est-à-dire sur son flanc est), en raison de l'advection du tourbillon positif. Le creux s'étend jusqu'à la haute troposphère (200 hPa), et est associé à une divergence sur la région. En plus, des ondes courtes ont été observées à 500 hPa au niveau de la région Fès-Meknès (Figure 2d). Elles indiquent que la région a connu de très petits contrastes de température chaude/froide et des mouvements d'air verticaux ascendants ou descendants forcés. Elles annoncent un système météorologique fort, surtout qu'elles sont fortement courbées. En effet, le passage des creux à ondes courtes à proximité de Fès et ses environs a forcé de petites zones de divergence horizontale et un mouvement ascendant forcé, entraînant ainsi des précipitations accompagnées de la grêle.

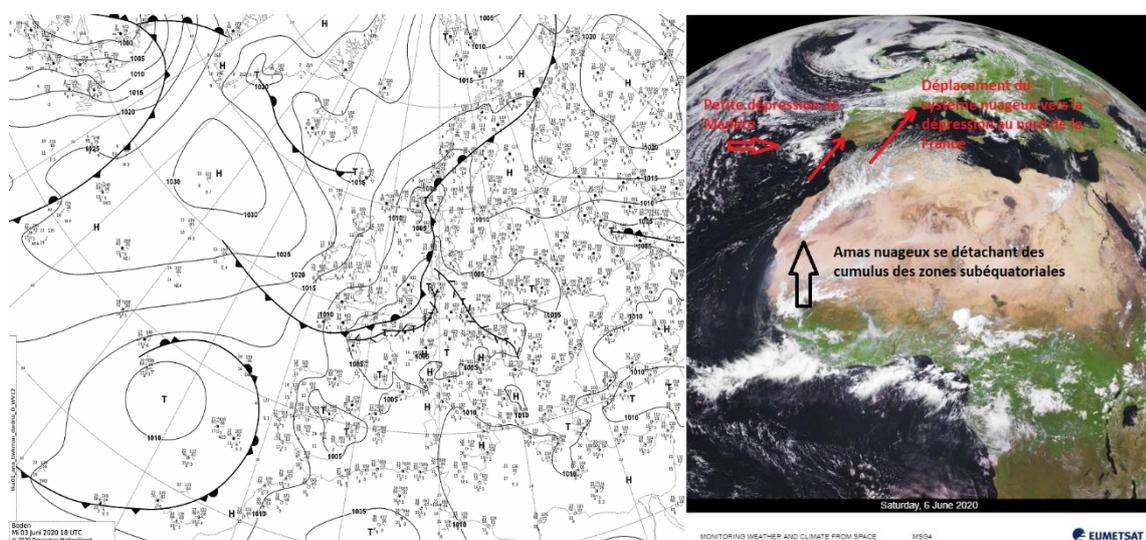


Figure 2a (à gauche) Situation météorologiques synoptique de surface (6 juin 2020 à 18h UTC) (source : www.wetter3.de); Figure 2b (à droite) : Image satellitaire (source Eumetsat) montrant le déplacement d'un amas nuageux sur le Maroc

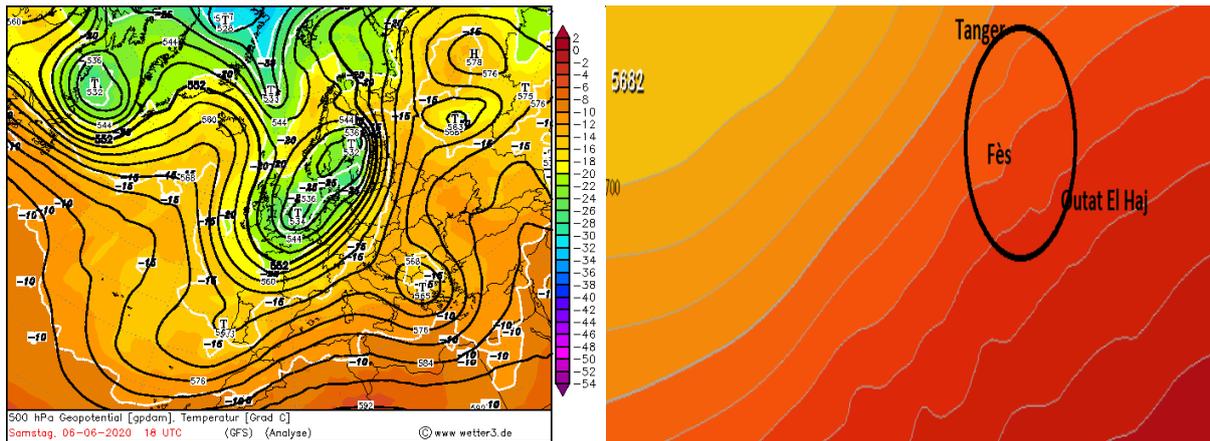


Figure 2c (à gauche) : Surface isobarique 500 hPa et épaisseur de la couche 0-556 damgp le 6 juin à 18h UTC (source : wetter3.de) ; Figure 3d (à droite) : Ondes courtes à 500 hPa au niveau de la région Fès-Meknès (source : <https://meteologix.com/ma/reanalysis/ecmwf-era5/morocco>).

2. Processus dynamiques de formation de l'orage de grêle du 6 juin 2020

D'une manière générale, les orages se produisent à une méso-échelle (une dizaine à quelques centaines de kilomètre) et se caractérisent par une convection profonde au niveau de la troposphère. En moyenne, leur durée de vie est d'environ 15 à 30 mn et couvrent une étendue de 2 à 3 km². Des nuages de type cumulonimbus leur sont associés. Ils permettent le réajustement rapide des déséquilibres thermiques et hydrométrique entre les basses couches en amenant la chaleur et l'humidité vers le sommet de la troposphère et l'air froid et sec depuis la haute altitude jusque vers le sol. Les processus de formation d'un orage de grêle lors d'une convection profonde mettent en jeu la flottabilité de l'air et le cisaillement.

2.1.La flottabilité

La flottabilité est la force qui agit sur une parcelle d'air en réponse à une différence de densité entre la parcelle et l'air environnant. Les augmentations de température et de la teneur en vapeur d'eau en basse couche contribuent à augmenter la flottabilité de l'air. Les ascendances lors de la formation d'un orage rompent l'équilibre hydrostatique entre la flottabilité et la force du gradient de pression verticale (FGPV) ; la flottabilité dépasse la FGPV. Les processus de base liés à la flottabilité dans une atmosphère instable nécessitent que l'air ascendant soit plus chaud que l'air environnant. Cette condition est appelée instabilité. L'indice de soulèvement (LI) est un simple paramètre utilisé pour caractériser le degré d'instabilité dans un environnement donné. Il est calculé en soulevant une particule d'air représentative à partir de la surface, le long de l'adiabatique sèche, jusqu'à son niveau de condensation par ascendance, puis le long de l'adiabatique saturée jusqu'à une altitude supérieure, généralement 500 hPa. Ensuite, il faut soustraire la température de la particule soulevée de la température observée à cette altitude. L'événement du 6 juin 2020 affiche des valeurs légèrement négatives de LI, annonçant ainsi un potentiel de convection moyen. Une estimation plus complète de l'instabilité convective est la différence de température entre la courbe d'ascendance et le milieu environnant, à toutes les altitudes, à partir du niveau de convection libre jusqu'au niveau d'équilibre. Cette mesure correspond à l'énergie potentielle de convection disponible (CAPE : l'énergie disponible dans un kilogramme d'une parcelle d'air en J/kg). Elle est mesurée entre le niveau de convection libre, jusqu'au niveau d'équilibre thermique supérieur (altitude maximale du nuage formé). Plus précisément, il décrit l'instabilité de l'atmosphère et se rapproche de la force du courant

ascendant au sein d'un orage. Sa valeur a connu une augmentation entre 16 et 19 h lors de l'événement du 6 juin 2020. Son maximum (entre 1069 et 1229 J/kg) est enregistré au large des côtes marocaines, entre Laârache et Casablanca. Une autre valeur maximale est enregistrée à Outat El Haj, au sud-est de Fès (entre 600 et 800 J/kg). Vers 19 h, on enregistre une valeur de 400 J/kg à Fès (Figure 3b). Les valeurs du CAPE inférieures à 1000 indiquent une instabilité marginale avec un risque d'orage léger. Les valeurs comprises entre 1000 et 2500 présentent un potentiel convectif modérément instable et un risque d'orage modéré.

Malgré une instabilité convective modérée au niveau de la région Fès-Meknès, un apport d'humidité a joué un rôle important dans l'augmentation de la flottabilité de l'air ascendant. En effet, Un front de point de rosée ou ligne sèche marquent la frontière entre l'air chaud et sec provenant du sud et l'air chaud et humide sous influence atlantique a été identifié. L'advection d'air chaud et humide maritime provient du sud-ouest du pays par des vents violents (40 à 50 km/h) du sud-ouest soufflant à 850 hPa. La ligne sèche représente une région d'instabilité et a joué un rôle important dans le développement de l'orage violent le 6 juin 2020. Elle est à identifier sur la carte de point de rosée de la région Fès-Meknès qui provient de meteologix (Figure 3a). Nous notons la différence de 18°C entre les températures de points de rosée à Fès et au sud de Boulemane. Sa position et sa largeur, liée à la topographie du terrain (effet local de méso-échelle), se retrouvent dans une région montagneuse où il y a une pente du terrain aidant le réchauffement différentiel diurne sur les pentes orientées vers le nord.

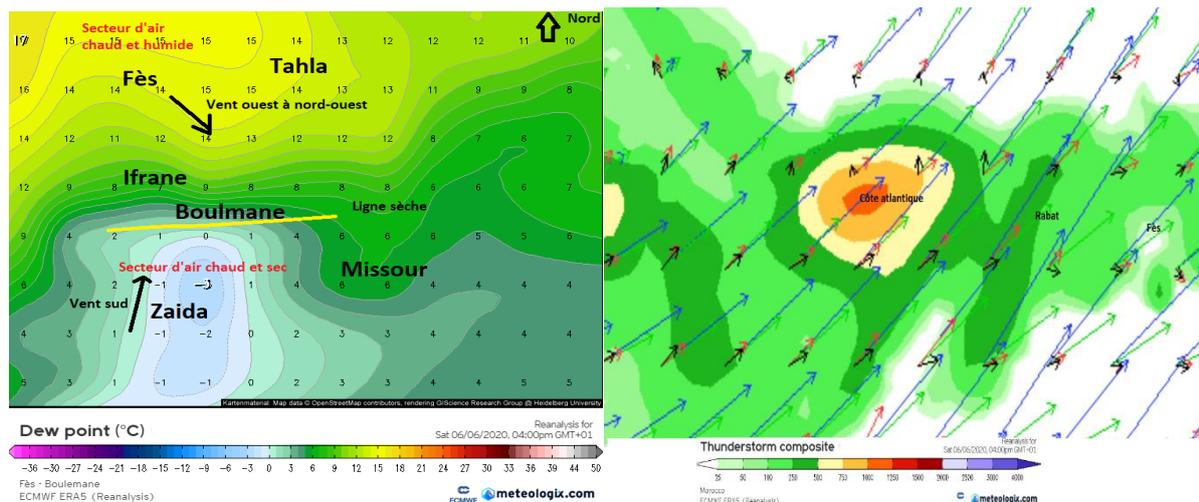


Figure 3a (à gauche) : Ligne sèche et température de point de rosée au niveau la région Fès-Meknès ; Figure 3b (à droite) : carte composite montrant en ombrage l'énergie potentielle convective disponible (CAPE), les vecteurs de vent par ordre de hauteur sont noirs (10 m), rouge (850 Mo), vert (500 Mo) et bleu (300 Mo) (: <https://meteologix.com/ma/reanalysis/ecmwf-era5/morocco>).

La combinaison de ces éléments a favorisé des mouvements ascendants de l'air chaud et l'ascendance du système nuageux en provenance des régions subéquatoriales qui est riche en humidité, déclenchant ainsi une convection profonde.

2.2. Le cisaillement vertical

Le cisaillement vertical du vent est une variation en vitesse et en direction du vent en fonction de l'altitude. Il est important pour le développement d'orages violents. On distingue le cisaillement de vitesse vertical, qui est une augmentation significative de la vitesse du vent avec la hauteur, et du cisaillement directionnel vertical qui correspond à un changement significatif de la direction du vent avec la hauteur. Au niveau de la région Fès-Meknès, on assiste à un

cisaillement vertical en vitesse et en direction (Figure 3b). Entre la surface et la couche 850 hPa (1.5 km), les vents sont de direction ouest à nord-ouest et ils sont du même ordre de grandeur. Entre 500 et 300 hPa, les courants aériens sont de sud-ouest et leurs vitesses augmentent considérablement. Il est à remarquer que malgré un CAPE très fort à proximité du littoral marocain, le cisaillement directionnel vertical est pratiquement nul. On note que le fort cisaillement de vitesse et le fort cisaillement directionnel à proximité de la région Fès-Meknès est la meilleure situation pour produire un courant ascendant tournant. Cette situation peut produire des supercellules unicellulaires. Le cisaillement de vitesse rapide a permis à l'orage de se déplacer rapidement et a aidé à maintenir le courant ascendant et descendant séparé tandis que le cisaillement directionnel a contribué à faire pivoter le courant ascendant dans l'orage. Cette situation explique la production de grosses grêles et de fortes pluies le 6 juin 2020 dans la région Fès-Meknès. Quant à la situation observée à proximité des côtes marocaines, elle a produit probablement des systèmes convectifs à méso-échelle (MCS). Enfin, le changement de la direction de vitesse du vent avec l'altitude dans un sens anti-horaire témoigne d'une advection d'air froid dans la région Fès-Meknès lors de l'événement du 6 juin 2020.

Conclusion

L'orage de grêle qui s'est abattu sur la région de Fès-Meknès la journée du 6 juin 2020 a été spectaculaire surtout au niveau de la ville de Fès. L'analyse synoptique et la dynamique atmosphérique de cette situation météorologique montre la complexité des phénomènes qui se sont intervenus pour l'expliquer. Ils se sont produits aussi bien à une échelle synoptique qu'à une échelle locale. L'apport d'amas nuageux humide des régions sub-équatoriales, des advections maritimes d'air frais de l'ouest et forces de cisaillement du vent ont contribué frottement aux conditions d'instabilité de cet événement orageux.

Bibliographie

- Aran M., Pena J.C., Torà M. 2011. Atmospheric circulation patterns associated with hail events in Lleida (Catalonia). *Atmospheric Research*, **100**. 428–438.
- Browning K.A., Fankhauser J.C., Chalon J.-P, Eccles P.J, Strauch R.G., Merrem F.H., Musil D.J., May E.L., Sand W.L. 1976. Structure and evolving Hailstorm, Part V : Synthesis and implications for hailstorm growth and hail suppression. *Monthly weather review*, **104**. 603-610.
- Hull B.B and Quartermaster Research & Engineering Center, Environmental Protection Research Division (coll.). 1957. **Hail Size and Distribution** (Technical report). Ed. Quartermaster Research & Engineering Center, Environmental Protection Research Division (US). 89 pages.
- Knight C. A., Knight N.C. 2001. Hailstorms (chapter 6). In. Severe Convective Storms (C. A. Doswell III (ed.)). *Meteorological monographs*, **28** (50). 223-254.

Webographie :

- <https://commons.und.edu/daumier-prints/1403/>
www.wetter3.de
<https://meteologix.com/ma/reanalysis/ecmwf-era5/morocco>
<https://www.eumetsat.int/>

DYNAMIQUE ATMOSPHERIQUE ET CRUES SOUDAINES DANS LE RIF- OCCIDENTAL

Ayoub AL MASHOUDI

Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Abdelmalek Essaadi. Tétouan. ayoub.almashoudi@etu.uae.ac.ma

RESUME: Cet article se concentre sur les inondations dans le Rif occidental du Maroc, une région particulièrement vulnérable. Nous analysons les données hydrologiques et météorologiques pour comprendre les mécanismes des crues dans cette région. Notre étude montre que les crues dans le Rif occidental sont souvent déclenchées par des précipitations exceptionnelles, exacerbées par des conditions météorologiques particulières. Nous utilisons des images et des cartes météorologiques pour étudier ces événements, en mettant l'accent sur une crue spécifique en octobre 2008. Nos résultats montrent une corrélation entre les changements météorologiques et les inondations, mettant en évidence l'importance de la compréhension des conditions atmosphériques pour anticiper de telles catastrophes.

Mots-clés : la dynamique atmosphérique – crues soudaines – Rif occidental - gouttes froides.

ATMOSPHERIC DYNAMICS AND FLASH FLOODS IN THE WESTERN RIF

Abstract: This article focuses on floods in the Western Rif of Morocco, a particularly vulnerable region. We analyze hydrological and meteorological data to understand the mechanisms of flooding in this area. Our study shows that floods in the Western Rif are often triggered by exceptional precipitation, exacerbated by specific meteorological conditions. We use images and weather maps to study these events, with a focus on a specific flood in October 2008. Our results demonstrate a correlation between meteorological changes and floods, highlighting the importance of understanding atmospheric conditions to anticipate such disasters.

Keywords: atmospheric dynamics - flash flood - western Rif - Cut-Off Low

INTRODUCTION

Les inondations, considérées à la fois récurrentes et destructrices Nsangou et al (2022), représentent 48,2 % des catastrophes naturelles enregistrées en 2013 dans le monde, faisant près de 32 millions de victimes, soit 33,2 % du nombre total de personnes touchées par les catastrophes naturelles (CRED, 2014). Les études qui ont abordé la question des inondations dans les bassins fluviaux se sont concentrées sur leur causes et conséquences spatiales. Bien que les inondations soient principalement causées par des facteurs naturels, certaines interventions humaines peuvent exacerber leur gravité Youssef et al (2016).

Pour obtenir une compréhension globale de l'impact des remontées d'eau dans certains territoires du Rif occidental, nous examinons des cas spécifiques d'inondations exceptionnelles sur le territoire. Cette analyse consistera à corréliser certaines données hydrologiques quotidiennes enregistrées depuis l'an 2000 avec les enregistrements quotidiens correspondants des précipitations. De plus, pour approfondir notre compréhension de cette problématique, nous avons procédé à une analyse approfondie des mécanismes atmosphériques contribuant à la formation des régimes météorologiques précédant ces inondations (Robertson AW et al., 2015; Tolika K, Skoulikaris C, 2023). Il s'agit d'examiner et d'analyser les conditions atmosphériques au niveau Géopotential 500 hPa et au niveau de la mer.

1. Description de la zone d'étude

La chaîne du Rif est située au nord du Maroc (Fig. 1), et est climatiquement influencée par la présence de deux côtes : l'océan Atlantique et la mer Méditerranée. Le Rif occidental,

localisé à l'extrême nord-ouest du pays, est délimité au nord par le détroit de Gibraltar, au sud par la plaine occidentale, à l'est par la mer Méditerranée et à l'ouest par l'océan Atlantique. Le sommet de Jabal Al-Aqraa est considéré comme le point culminant de la région, atteignant une altitude de 2 159 mètres. Le Rif occidental fait partie de la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima, composée de quatre provinces et de deux préfectures, et sa structure orographique distinctive influence les caractéristiques générales du climat dans cette zone.

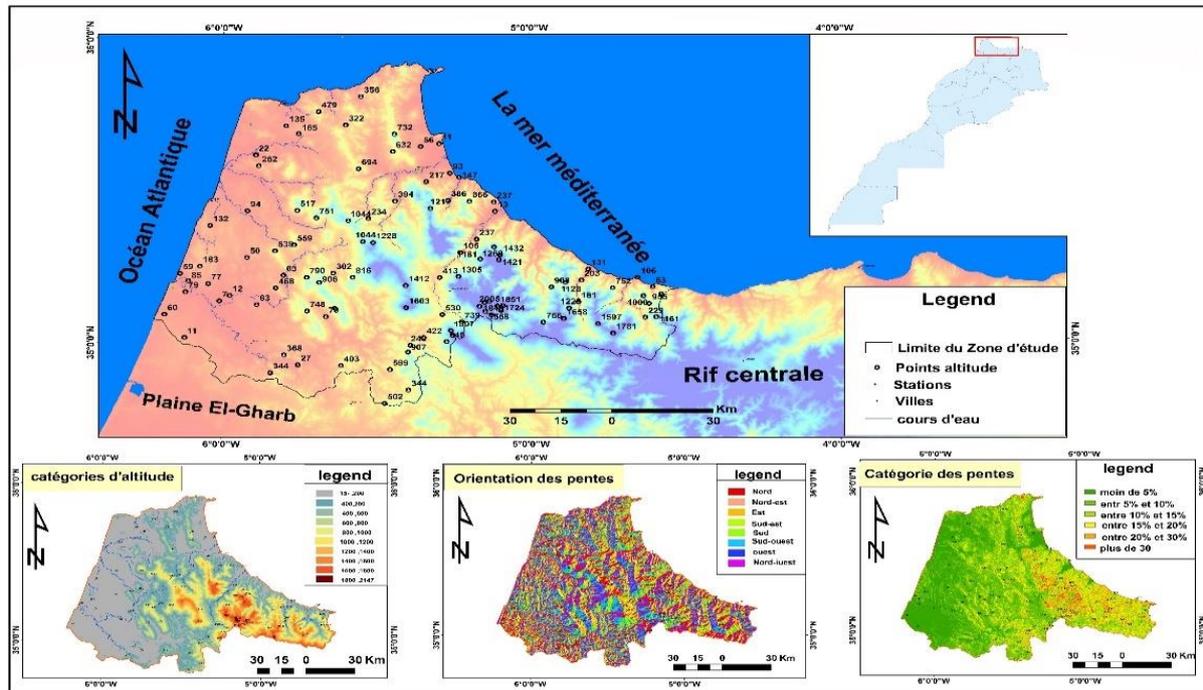


Figure 1. Localisation de la zone d'étude. (Source : réalisation personnelle, basée sur les cartes topographiques à l'échelle 1/50000 ainsi que sur le modèle numérique de terrain (MNT))

L'ouest du Rif est marqué par des précipitations abondantes, entraînant une densité élevée des cours d'eau. Ces cours d'eau présentent des canaux profonds et un taux de ruissellement élevé en raison des pentes abruptes du terrain et de la surface dure et imperméable du sol. La zone d'étude se caractérise par une grande richesse et diversité bioclimatiques, biogéographiques, géomorphologiques et géologiques. La palette végétale y est diversifiée et unique, comprenant plus de 1000 espèces végétales, dont 17 espèces forestières connues, 35 espèces endémiques, 15 espèces très rares et 11 espèces plutôt rares. De plus, on y trouve des espèces rares d'armoise (Hmimsa, Y. 2006).

2. MATERIEL ET METHODES

La région Rif ouest a été confrontée à des épisodes d'inondations récurrents depuis le début des années 2000, occasionnant des dommages substantiels aux infrastructures locales (Fig. 2) Ces inondations sont attribuables à des conditions météorologiques exceptionnelles ayant engendré des précipitations extraordinaires dans la région. Le tableau (1) expose des exemples d'événements pluvieux ayant déclenché des inondations dans les zones rurales de l'ouest.

| Années | Mois | Jours | Précipitations (mm) | Débit m ³ /s |
|--------|------|-------|---------------------|-------------------------|
| 2000 | 12 | 24 | 22 | 183 |
| | | 25 | 33 | 181 |
| | | 26 | 39,5 | 1237 |
| | | 27 | 8,8 | 282 |
| 2008 | 10 | 22 | 28,9 | 2.85 |
| | | 23 | 109,2 | 243 |

Oujda les 17, 18 et 19 mai 2024

| | | | | |
|------|---|----|------|------|
| | | 24 | 3,2 | 486 |
| 2009 | 1 | 22 | 15,0 | 453 |
| | | 23 | 42,5 | 263 |
| | | 24 | 30,0 | 1340 |
| | | 25 | 61,0 | 421 |
| 2021 | 2 | 28 | 4,2 | |
| | 3 | 1 | 48,0 | |
| | | 2 | 23,0 | |

Table. 1. Les événements hydroclimatiques les plus marquants dans la station de Torreta « Rif occidental » de 2000 à 2021

Malgré l'absence de données hydrologiques détaillées sur la nature de ces crues, l'analyse des images recueillies constituera une bonne alternative pour approfondir notre compréhension de ces événements (Fig. 2). Les cartes synoptiques jouent un rôle fondamental en facilitant l'analyse des phénomènes météorologiques. Notre méthodologie d'analyse des inondations repose principalement sur l'utilisation de ces cartes, lesquelles sont largement exploitées dans la recherche scientifique pour classer les événements météorologiques dans différentes régions et établir des liens avec des facteurs climatiques distincts. Dans cette étude, nous nous concentrons sur l'analyse d'un modèle d'inondation spécifique ayant affecté le Rif occidental, en particulier l'événement du 24 octobre 2008, en raison de son impact sur plusieurs régions du Maroc (Al Mashoudi A et al., 2024).



Figure. 2. Effets des crues sur l'infrastructure dans le Rif occidental

RESULTATS ET DISCUSSION

Le mois d'octobre 2008 a connu deux périodes pluvieuses distinctes. La première a eu lieu pendant le tiers initial du mois, avec une précipitation d'environ 148,2 mm enregistrée à la station de Torretta sur une période de trois jours. Ensuite, le temps s'est stabilisé durant le deuxième tiers d'octobre. Cependant, l'instabilité est réapparue le 21 octobre et a persisté pendant environ une semaine. Les précipitations ont progressivement augmenté, atteignant leur pic le 23 octobre avec un total d'environ 161,2 mm. En conséquence, notre étude se focalisera sur le phénomène météorologique observé au cours de la dernière période du mois, cette phase étant d'une importance primordiale en raison de son potentiel à induire une augmentation significative du niveau de la vallée de Martil. Ceci est d'autant plus préoccupant que le débit de la vallée a atteint 486 m³/s à la station de Torreta.

L'analyse des cartes au géopotential 500 hPa révèle que la zon d'étude a connu une résurgence d'instabilité à partir du 21 octobre, attribuée à une descente polaire marquée. Cependant, l'impact de cette perturbation est devenu significativement plus prononcé à partir du 22 octobre, lorsque la partie nord du domaine marocain est tombée sous l'influence d'une "goutte froide" (fig. 3). Cette configuration atmosphérique a facilité des précipitations substantielles dans diverses stations du Rif occidentale, s'étendant sur cinq jours, du 22 octobre au 26 octobre. Les fortes précipitations ont entraîné des inondations, entraînant le débordement de la vallée. Ces événements hydrologiques ont eu des impacts sur les installations et l'infrastructure dans le rif occidentale, comme le montrent les images 1, 2 et 3, dans (Fig. 2).

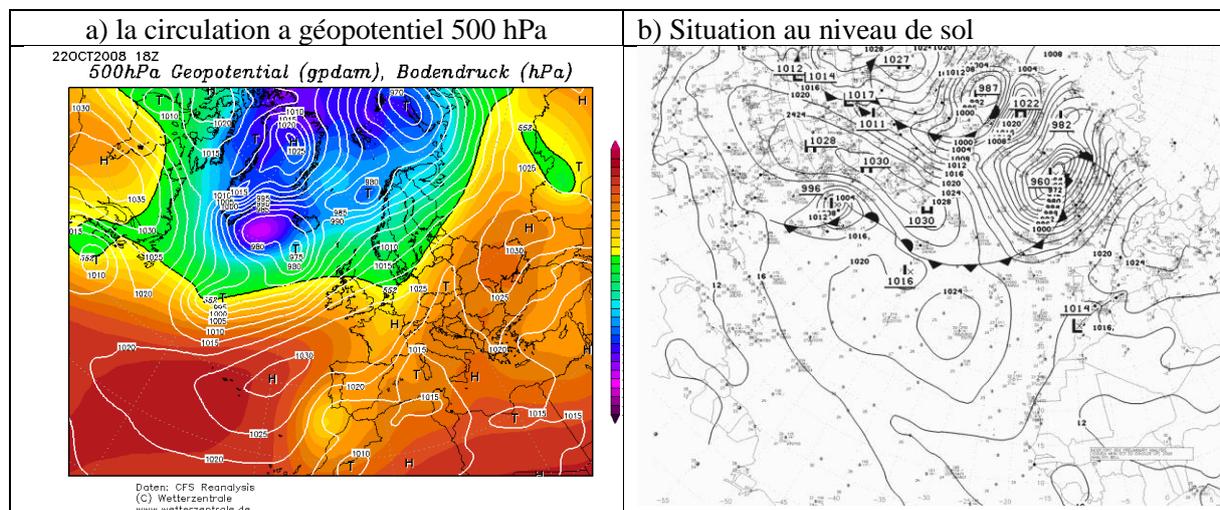


Fig. 3. La situation météorologique de 22/10/2008

Un examen plus approfondi des conditions météorologiques au niveau de la surface (0) le 19 octobre indique la présence d'un système de basse pression (973 hPa) situé au nord de l'océan Atlantique, accompagné de plusieurs fronts froids. À partir du 22 octobre, certains de ces fronts ont progressé à travers l'interface atlantique, suivant une trajectoire générale nord-ouest/sud-est avant d'atteindre la région marocaine. Cette progression a entraîné des précipitations dans plusieurs endroits pendant cette période.

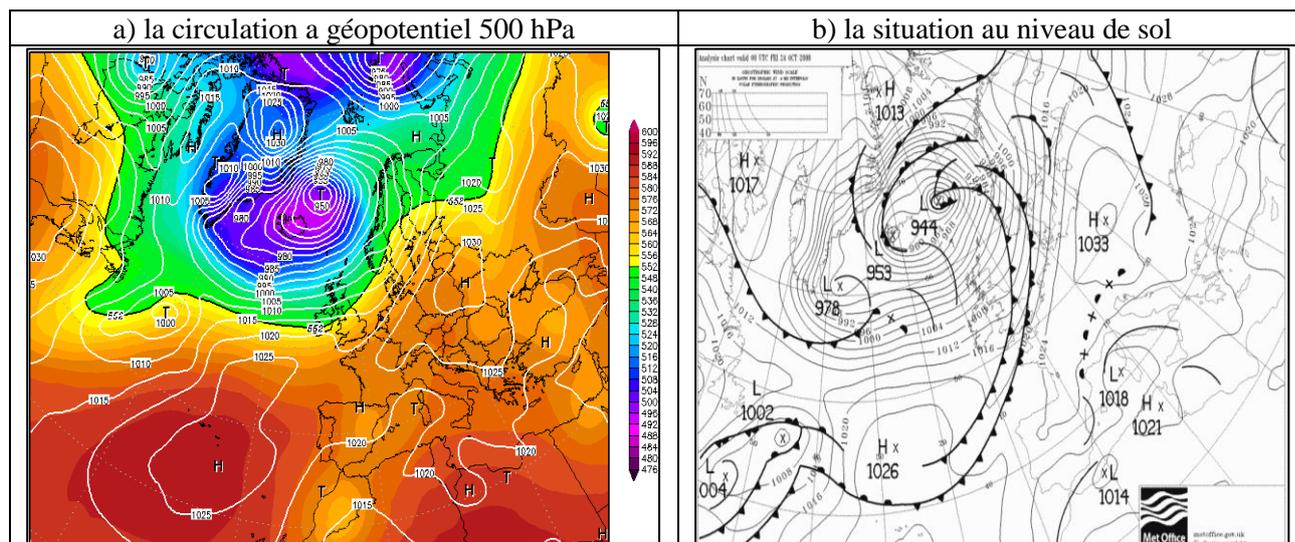


Fig. 4 : La situation météorologique de 24/10/2008

Les conditions météorologiques que nous tentons d'élucider sont étroitement liées aux transformations rapides qui se sont produites dans la structure atmosphérique entre le 21 et le 24 octobre. Cette séquence a débuté comme un schéma atlantique pour passer ensuite à un schéma méditerranéen. Plusieurs facteurs ont contribué à cette transition, le plus important étant la stabilité du système de haute pression sibérien situé sur l'Europe, dont la valeur atteint 1030 hPa. Cette stabilité a conduit à l'enfermement (blocage) de la perturbation méditerranéenne de trois directions : nord, nord-ouest et est, en raison de la forme en croissant assumée par ce système de haute pression. Par conséquent, le système de basse pression est resté ancré au-dessus de la mer Méditerranée pendant une période prolongée. Les régions côtières du nord-est, en particulier, ont connu l'afflux d'air avec une trajectoire sud-ouest vers nord-est, donnant lieu au phénomène connu sous le nom de « retour de l'est » (fig. 4ab). Ce phénomène se manifeste souvent par la présence d'une « goutte froide » sur la carte à 500 hPa, qui peut être positionné soit au-dessus de la mer, soit sur le continent. La région orientale du Rif, en particulier, a grandement bénéficié de cette configuration atmosphérique, un trait notable observé à partir du 23 octobre 2008.

CONCLUSION

En conclusion, cette recherche ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer la gestion des ressources en eau dans la région du Rif occidental. L'intégration d'outils de prévision météorologique avancés et la mise en œuvre proactive de mesures d'atténuation des inondations peuvent renforcer la capacité de la région à faire face aux phénomènes météorologiques extrêmes. L'importance cruciale de l'analyse météorologique est mise en évidence pour comprendre l'interaction complexe entre les modèles météorologiques et les ressources en eau. Grâce à une analyse continue et à une interprétation judicieuse des données météorologiques, la région peut s'adapter aux changements climatiques et concevoir des stratégies de gestion de l'eau à long terme.

Références bibliographiques

AL MASHOUDI A., AKALLOUCH A., ZIANI M. & MOUSAOUI M. (2024). *Exploring the impact of weather patterns on exceptional flooding events in the Nekor watershed, NE Morocco*. *Environmental & Socio-economic Studies*, 12(1) 1-12.

CRED., *Annual Disaster Statistical Review (2014)*. The numbers and trends, Université Catholique de Louvain, Bruxelles, Belgique. 2014. 50 p.

Hmimsa Y. (2006). Importance des agrosystèmes traditionnels de montagne pour une dimension humaine et culturelle du projet de la réserve de biosphère transfrontalier Maroc-Andalousie. Rapport Final d'Etude, Fac. Sc. Uni. Abdelmalek Essaadi, Tetouan, Maroc.

NSANGOU D, KPOUMIE A., MFONKA Z., NGOUH A. N., FOSSI D. H., JOURDAN C., ... & NGOUPAYOU J. R. N. (2022). *Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau*. Scientific African, 15, e01043.

ROBERTSON A. W., KUSHNIR Y., LALL U., & NAKAMURA J. (2015). *Weather and climatic drivers of extreme flooding events over the midwest of the United States*. Extreme events: observations, modeling, and economics, 113-124.

ROYAUME DU MAROC, MINISTÈRE DE DE L'EQUIPEMENT ET DES TRANSPORTS. *Impacts des Conditions Climatiques sur les Infrastructures de Transport Années 2008-2009-2010*.

TOLIKA K., & SKOULIKARIS C. (2023). *Atmospheric circulation types and floods' occurrence; A thorough analysis over Greece*. Science of The Total Environment, 865, 161217.

YOUSSEF A. M., SEFRY S. A., PRADHAN B., & ALFADAIL E. A. 2016. *Analysis on causes of flash flood in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) of 2009 and 2011 using multi-sensor remote sensing data and GIS*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(3), 1018-1042.

VALORISATION DES ZONES INONDABLES DANS L'AMENAGEMENT URBAIN : CAS DE LA PARTIE NORD DE LA VILLE DE SETTAT

Abderrahim OUIOUF.¹, Abderrahim BENSMAIL.², Radoine MADI.², Mohamed EL GHACHI.² et
Omar BENSMAIL.³

1. Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme, Rabat, Maroc. ouiouf1@gmail.com
2. Université Sultan Moulay Slimane. Faculté des lettres et des sciences humaines Béni Mellal. Laboratoire dynamique des paysages et des patrimoines. Maroc (Abderahim.bensmail@gmail.com)
3. Université de Lorraine. Nancy. Centre Européen Universitaire-France – (omar.elbensmail@gmail.com).

RESUME : Les inondations sont parmi les risques naturels les plus catastrophiques, les plus fréquentes et touchent le plus grand nombre des individus. La ville de Settata a connu une série d'inondations de l'oued Boumoussa depuis 1955 jusqu'à 2002. Après chaque crue, cet oued a connu un certain nombre d'aménagements depuis 1959 et jusqu'en 2004 pour protéger la ville de Settata contre le passage de crues d'un débit maximal de 200 m³/s. La partie nord de cet oued est marquée par l'absence d'aménagement.

Dans cette optique, le présent projet vise à étudier les inondations menaçant les abords d'oued Boumoussa au nord de la ville de Settata, en se basant sur la modélisation hydrologique et hydraulique. Nous avons procédé par la suite à la proposition des variantes d'aménagement de l'Oued Boumoussa afin lutter contre les risques des inondations et valoriser le paysage urbaine par l'aménagement des berges.

Mots-clés : Risque d'inondation – Cartographie des zones inondables – modélisation hydraulique, modélisation hydrologique.

VALORISATION OF FLOOD AREAS IN URBAN DEVELOPMENT: CASE OF THE NORTHERN PART OF THE CITY OF SETTATA

ABSTRACT: Floods are among the most catastrophic natural hazards, the most frequent and affect the greatest number of individuals. The town of Settata has experienced a series of floods of oued Boumoussa since 1955 until 2002. After each flood, this river has undergone a number of improvements since 1959 and until 2004 to protect the town of Settata from the passage of floods with a maximum flow of 200 m³/s. the northern part of this wadi is marked by the absence hydraulic landscaping.

With this in mind, this project aims to study flooding threatening the Boumoussa wadi north of the city of Settata, based on hydrological and hydraulic modelling. we subsequently proposed the development variants of the Oued Boumoussa to fight against the risks of flooding and enhance the urban landscape by the renovation of of this area.

Keywords: Flood risk – Flood zone mapping – hydraulic modelling, hydrological modelling.

INTRODUCTION

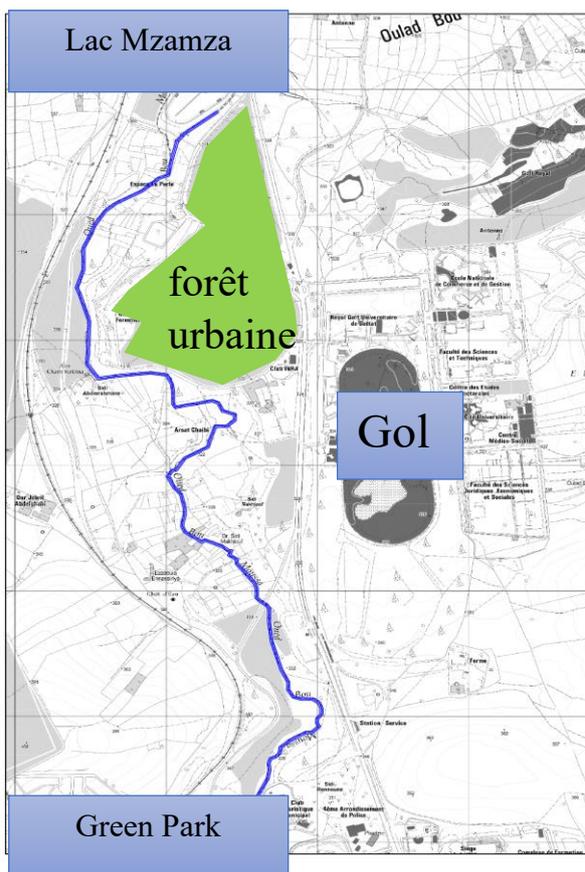
Au Maroc les inondations constituent un problème récurrent et chronique. Elles affectent le plus grand nombre de personnes. Elles génèrent moins de dégâts et moins de décès mais leur impact touche une grande tranche de la population. 638 484 personnes sont affectées entre 1900 et 2019.10

Ce travail vise à étudier les inondations menaçant les abords d'oued Boumoussa au nord de la ville de Settat, en se basant sur l'analyse de l'aléa hydrologique et de la vulnérabilité des enjeux exposés, et la simulation cartographique des crues. Après nous avons proposé des aménagements de lutte contre le risque des inondations et des aménagements pour valoriser le paysage urbaine des berges de ce oued.

1. Description de la zone d'étude

La ville de Settat a connu une série d'inondations d'oued Boumoussa depuis 1955 jusqu'à 2002. Après chaque crue, cet oued a connu un certain nombre d'aménagements depuis 1959 et jusqu'en 2004 pour protéger la ville de Settat contre le passage de crues d'un débit maximal de 200 m³/s. la partie nord de cet oued est marquée par l'absence de tout aménagement

La zone d'étude concerne la partie de l'oued Boumoussa non aménagée au nord de la ville de Settat, d'un linéaire de 3.9Km. cette zone s'étale entre Green Park et le lac Mzamza en passant par la forêt urbaine.



Carte1: situation de la partie d'oued Boumoussa non aménagée



Photo1: Aval de la zone d'étude Digue Lac Mzamza



Photo2: Amont de la zone d'étude-exécutoire du canal aménagé de l'oued

¹⁰ Ministère de l'Intérieur, 2020 « Stratégie nationale de gestion des risques des catastrophes naturelles 2020 - 2030 -Livret de présentation ».

Les berges de l’oued Boumoussa au niveau de l’aire d’étude sont caractérisées par :

- La présence de propriétés foncières non encore valorisées ou gelées par les dispositions actuelles du plan d’aménagement. Ces propriétés constituent des terrains vagues, partiellement plantés, dont l’état sauvage à l’écart, en font un lieu de non sécurité et une décharge à ciel ouvert recevant des rejets de toutes sortes: déchets de matériaux de constructions ou issues des activités artisanales et de services (ateliers de mécanique, tôlerie, soudeurs,).
- L’oued Boumoussa traverse l’aire de l’étude du Sud au Nord et la coupe en deux secteurs. L’absence de liaisons internes entre ces deux secteurs pose des problèmes d’accessibilité et de circulation au niveau de l’aire d’étude, dont l’impact affecte négativement la liaison entre les deux rives
- Un écoulement à ciel ouvert des eaux usées dans l’oued caractérisé par des odeurs nauséuses et leurs impacts négatifs sur l’environnement.

2. MATERIEL ET METHODES

L’aboutissement de ce travail interpelle l’instrumentalisation de quelques techniques et logiciels de modélisation, ainsi que des outils d’investigation.

En plus des relevés du terrain et des enquêtes ont été réalisées via des entrevues directes avec des personnes ressources. Les relevés entrepris se sont appuyés fondamentalement sur une documentation cartographique à savoir : les plans topographiques de restitution, le plan d’aménagement, la carte hydrologique, les photographies aériennes...

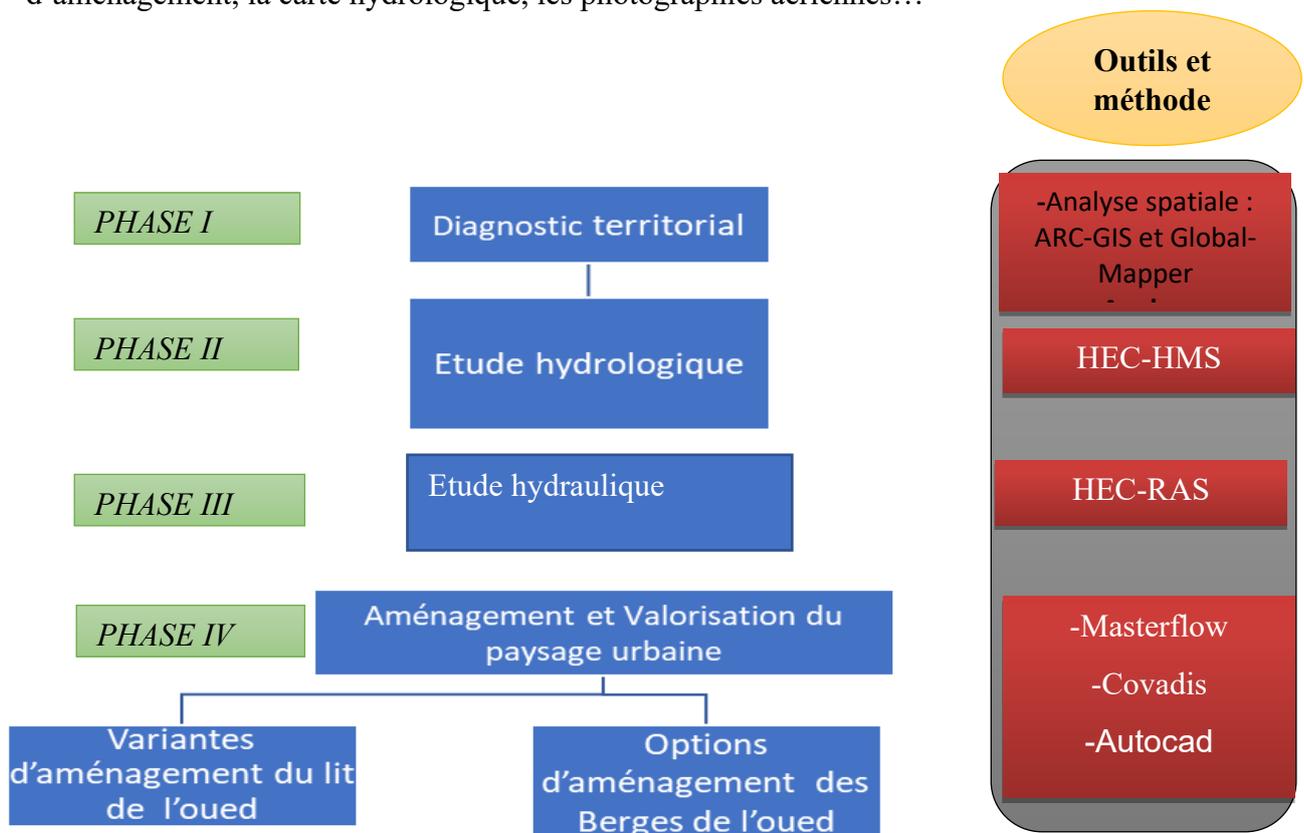


Figure 9: Schéma de la méthodologie

3. RESULTATS ET DISCUSSION

a- Modélisation hydrologique

L'estimation des débits de pointe des crues ainsi que leur temps de retour a présenté l'un des principaux objectifs de la modélisation hydrologique. La modélisation hydrologique (par l'application d'un modèle événementiel pluie-débit Hec-Hms) nous a permis d'estimer les débits de pointe des crues menaçant la partie nord de la ville de Settat ainsi que leurs fréquences (10,25, et 100 ans).

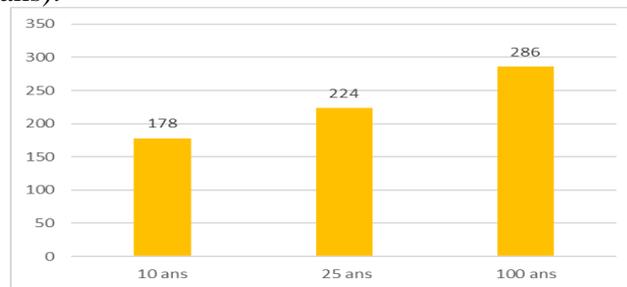


Figure 10 : Débits de pointe correspondant à une pluie de projet de 24h

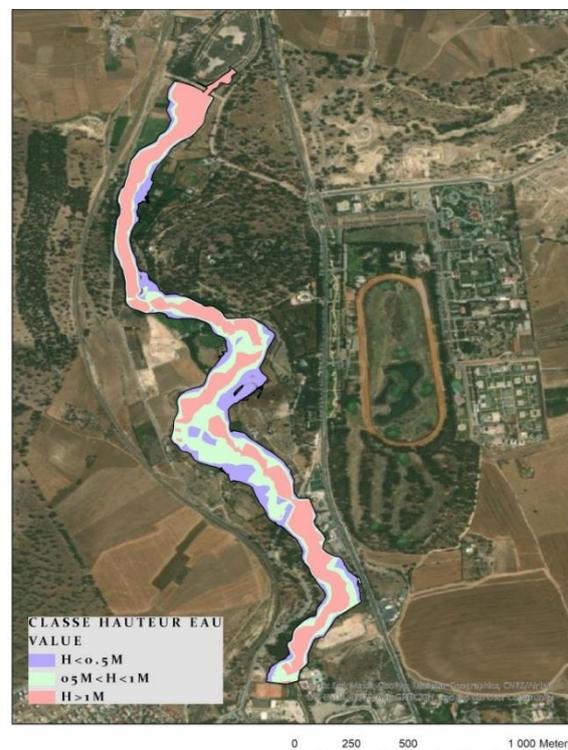
En l'absence d'observations hydrométriques, la validation de ces résultats doit susciter beaucoup d'attention. Nous nous sommes basés sur les formules empiriques régionales, le débit calculé par la méthode de Fuller II est proche de nos résultats. Enfin nous avons constaté que ces résultats sont proche des valeurs adoptés dans les études hydrologiques de l'oued Boumoussa élaboré en 2003 et 2020.

b- Etude hydraulique

La simulation hydraulique par HEC-RAS nous a permis une visualisation du comportement de l'eau dans l'Oued. Elle montre que l'aléa dans la zone est globalement fort. Il résulte de l'importance combinée des lames d'eau et des vitesses d'écoulement maximales obtenus. Dans la zone Les hauteurs d'eau dépassent 0.5m au niveau du lit mineur de l'oued Boumoussa, alors que les vitesses franchissent 0,5 m/s. Par conséquent, le danger d'inondation est fort.

La modélisation hydraulique permet de calculer la cote maximale atteinte par l'eau au passage de la crue. Ces cotes permettent de cartographier les zones inondées et d'identifier les sections qui présentent des débordements. La zone inondable de période de retour de 100 ans est caractérisée par les éléments suivantes :

- Surface : 45ha,
- Largeur minimum : 65m,
- Largeur maximum : 230m,



Carte2 : classification de la hauteur de la lame d'eau

c- Comparaison des résultats avec les autres délimitations des zones inondables

Dans ce projet on a fait une comparaison du résultat de la délimitation des zones inondables avec les zones inondables intégrés dans le plan d'aménagement de la ville de Settât et celle de l'étude du Plan de Prévention des Risques d'Inondation (2021).

La superposition des couches vectorielles avec le logiciel Arc gis a permis de constater les faits suivants :

- En général la zone inondable du PPRI coïncide avec à nos résultats (44ha)
- La surface de la zone inondable intégrée dans le plan d'aménagement qui est de 79ha dépasse celle du PPRI (presque le double).
- 35 ha des terrains sont gelés par le document d'urbanisme sous prétexte qu'ils sont inondables.
- Le décalage maximum de la zone inondable intégrée dans le plan d'aménagement et notre délimitation est de 324m



— ZONE INONDABLE PA SETTAT
— ZONE INONDABLE - PFE
— ZONE INONDABLE PPRI 2021

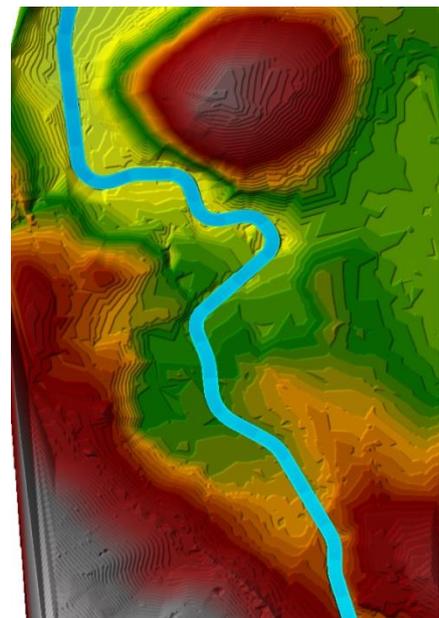
Carte 3 : comparaison des résultats

a- Aménagement de l'oued Boumoussa

Pour l'aménagement de l'oued, on a étudié deux variantes. La variante principale consiste à ne pas revêtir le canal et de le laisser en terre. La seconde variante consiste à le revêtir en béton.

Les résultats de la situation après aménagement de la variante du canal à ciel ouvert revêtu en béton sont les suivantes : Le transit de la crue de projet de 300 m³/s est assuré par le canal à ciel ouvert qui aura une largeur à la base de 25m pour la variante principale (canal en terre) et de 3.5 m pour la seconde variante (revêtement en béton), une profondeur de 4m et des berges avec des talus 1.5 H/1 V.

L'avantage de la solution du revêtement du canal par du béton réside dans l'emprise plus faible qu'il nécessite en traversant le milieu urbain. Mais son principal inconvénient réside dans le surcoût qu'il engendre par rapport à la variante en terre.



Carte 4 : La lame d'eau du canal après aménagement

b- Valorisation du paysage urbain par l'aménagement des berges de l'oued Boumoussa

Pour valoriser la zone inondable, on propose le principe d'aménagement suivant :

- Aménagement d'une coulée verte
- Renforcer et restructurer le réseau viaire et le réseau de déplacements doux en vue d'améliorer l'accessibilité et la circulation dans l'aire d'étude et afin de permettre le raccordement et l'intégration de ce dernier dans la ville
- Réaffectation des terrains gelés provisoirement par le plan d'aménagement en liaison avec le problème des inondations et ce après réalisation des travaux de calibrage de l'oued Boumoussa (sports et loisirs).
- Trouver une solution à l'écoulement des eaux usées de la ville dans l'oued Boumoussa et aux odeurs.

CONCLUSION

Les résultats obtenus au terme de ce travail offrent une vision générale sur le comportement de l'oued Boumoussa lors des débits de pointe. L'aléa d'inondation dans la zone est globalement fort

En l'absence d'observations hydrométriques, la validation des résultats des modélisations hydrologiques et hydrauliques doit susciter beaucoup d'attention. Il ne faut pas afficher une confiance aveugle dans les résultats de la modélisation hydraulique.

Les zones inondables de l'oued Boumoussa peuvent représenter une opportunité pour aménager autrement les territoires, voire un bon argument à mobiliser afin de rehausser la qualité du paysage et le développement de projets urbains.

Références bibliographiques

- Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia 2021 « Etude d'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation au niveau des villes de Mediouna, Nouacer, Mohammedia, Berrechid et de Settat ».
- Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia. 2014 « Etude de protection contre les inondations des villes de Settat et de Benslimane, et du centre d'Ahlaf ».
- Akka, H. 2010 « Problématique des inondations au Maroc cas de la province de Settat ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Mastère spécialisé en Management et Ingénierie des Services d'Eau et d'Assainissement. Institut agronomique et vétérinaire de Rabat et Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Direction Des Aménagements Hydrauliques.2003 « Etude de protection de la ville de Settat contre les crues de l'oued Boumoussa (rapport diagnostic) ».
- El Gasmi. E. H. Al.2014 « Les écoulements superficiels dans le plateau de Settat-Ben Ahmed et la plaine de Berrechid : hydrographie endoréique» : <https://www.researchgate.net/publication/342658771>
- La Région de Casablanca Settat.2020 « Etude pour l'identification et la gestion des risques naturels au niveau de la région de Casablanca Settat».International Journal of Innovation and Scientific Research.

CARTOGRAPHY OF NATURAL HAZARDS IN MOROCCO: STUDY OF FLOODS IN THE CITY OF BENI MELLAL

Jaouad Chami¹, Zouhir Elbachiri,¹ Yahya El khalki¹, Mohamed En-nejmy² et Said Azzoui²

1.. Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal

2 Université Cadi Ayyad, Marrakech

Abstract: In recent years, the world has become increasingly aware of several types of natural disasters, and the phenomenon of floods is one of the most frequent natural disasters in large areas of the world. This may be due to the radical changes that our planet is experiencing at the level of climate change and the level of the environmental system. On this basis, it has become necessary to deal with the threat of floods scientifically by studying it from different aspects so that we can mitigate its material and moral impact. Beni Mellal is one of the Moroccan cities most exposed to floods because of its geographical location (Dier), which has rainfall concentrated in time and place. In light of the possibility of this danger, in this article, we will examine the mechanisms for monitoring the degree of danger for the various neighbourhoods of the city, relying on geographic information systems, that is, determining a map of the areas threatened by floods.

Key words: natural hazards, floods, cartography, Beni Mellal city.

Résumé : Au cours des dernières années, la conscience mondiale s'est accrue face aux nombreuses formes de catastrophes naturelles. Parmi celles-ci, les inondations constituent l'une des plus fréquentes, touchant de vastes régions du globe. Ce phénomène peut être attribué aux changements radicaux que notre planète subit au niveau du climat et du système environnemental. En conséquence, il est devenu crucial de traiter scientifiquement le risque d'inondations en l'étudiant sous divers angles afin d'en atténuer les impacts matériels et moraux. La ville de Beni Mellal figure parmi les villes marocaines les plus exposées aux inondations en raison de sa situation géographique (Dier) caractérisée par des précipitations intenses et concentrées dans le temps et l'espace. Face à l'éventualité de ce danger, cet article examinera les mécanismes de surveillance du niveau de risque pour les différents quartiers de la ville, en s'appuyant sur les systèmes d'information géographique (SIG) pour établir une cartographie des zones menacées par les inondations.

Mots clés : dangers naturels, inondations, cartographie, ville de Beni Mellal

1. Introduction

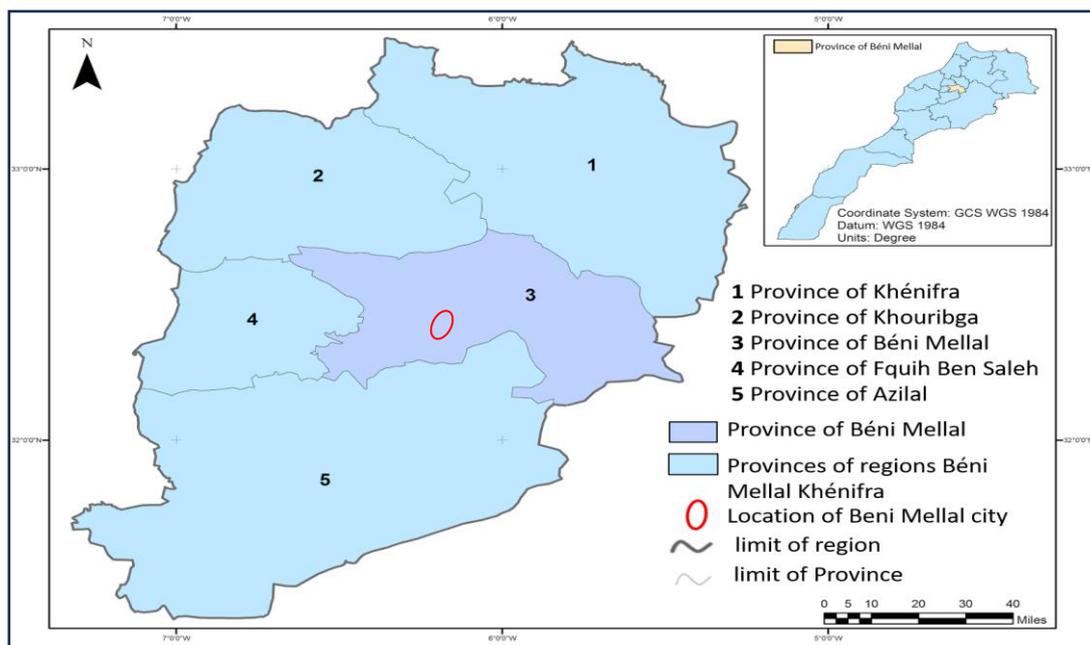
Natural hazards of all kinds form an integral part of human life, and despite their solidity, strength, and severity, humans try to coexist with them and reduce their material and moral impact. Hydrological risks are considered one of the risks that constantly threaten humans. They are no longer an exceptional event, but they have become a global rule since the end of the last century. This is due to the severity of the climate changes that our planet has experienced in recent decades (Azhari M, Loudyi D (2019)). The repercussions of hydrological risks on human life and their impact on their facilities and activities impose on various actors the necessity of contemplating this natural phenomenon and understanding its mechanisms.

According to the International Committee on Climate Change report, more than 90% of natural hazards are related to water. The study area, the city of Beni Mellal, is one of the areas that is known for the frequency of natural disasters associated with floods. This is due to its geographical location extending in a transitional area between the mountain and the plain, in addition to the in-depth hydrographic network, which are essential factors that place the city in front of a natural danger that comes with a severity that is mainly related to the volume of rainfall.

Thinking about means of protecting and mitigating natural risks has become necessary for territorial actors and academics. Geographic information systems are one of the most advanced means of understanding such studies, whether collecting, storing, processing, or producing information in the form of data and graphics. Approaching this phenomenon with cartographic work will contribute significantly to developing awareness of these risks among the local population. It will also enhance urban development work among territorial operators. (El Khalki, Y., & Benyoucef, A. (2005)).

2. The field of study

The study area, the city of Beni Mellal, is geographically located within the Beni Mellal Atlas, located at its northern foot, at latitude 32.34° north and longitude 6.35° west. It is a transitional area (Dier) between the Atlantic Mountain chain and the Tadla Plain. The city's urban area extends over an area estimated at 53 km^2 , and the population is 192,676 people according to the 2014 census. The area of Dier is an area with distinct topographical and hydrographic characteristics, as the location of the city penetrates a group of hydrographic axes (The valley of Kiko, The valley of El Khandaq, Ain El Ghazi, Sabek, and the valley of Day). These are valleys with a south-north orientation, thus making the city a fragmented and intermittent area. These valleys form small basins, threatening the city with the danger of floods, mainly because the region receives significant amounts of rainfall, often thundery and concentrated in time and space.



Maps 1: Study Area Localisation

3. Spatial diagnosis of the city of Beni Mellal

3.1 The city's topography is an equipped base for floods to occur

The city of Beni Mellal is geographically located within the Beni Mellal Atlas, specifically in the Dier area. The heights overlooking the city from the southern side reach more than 2,200 meters above sea level, but the heights in the city do not exceed 700 metres. It is a field divided by a group of valleys. The city's topography is generally not clearly defined due to the transitional location between the mountain and the plain (Dier).

3.2 Slopes: a significant factor in the occurrence of floods

Talking about slopes requires us to bring in spatial dimensions outside the city limits because the latter is located at the foot of the mountain. Therefore, it is located at the end of solid slopes, and the latter is responsible for the occurrence of floods. In general, from the map of the slopes of the Ben Mellal region, we find the dominance of solid slopes in the south of the city. This area corresponds to the mountainous region, where they exceed 50 degrees and decrease as we head towards the north, reaching between 5 and 18 degrees in the city's centre and the far north to less than 3 degrees. In light of this significant difference in the degree of slope, the city centre and its north are most threatened by floods.

3.3 Hydrographic network

The Beni Mellal region has an essential hydrographic network that is diverse in shape and size. These rivers are distributed into three small basins: the valley of Kiko, the valley of El Khandaq, the valley of Ain El Ghazi, the valley of Day, and then the valley of Sabek. These basins meet at the Valley of Day north of Beni Mellal. We will shed light on each valley separately to further clarify its peculiarities.

The Valley of Kiko originates from the south of the city of Beni Mellal, specifically from the Al-Moudj area, where the altitude exceeds 1400 metres. Then its slopes take a south-north direction to surround the city from the western façade, crossing National Road No. 8 at Safia Mills near the regional centre for education and training, and after approximately 7 kilometres. This valley finds its outlet in the hydro-agricultural canal, which flows into the Day Valley.

As a result of the valley's frequent floods, the Tadala Regional Office for Agricultural Investment prepared it by building the shores of the valley with stones and reinforced cement. However, due to several factors, most notably the strength of the slopes and the water current, this stream was known to erode its shores in a group of convex areas, which led to its collapse. Add to that the solid load and the sediments left behind that covered the bottom of this valley, thus reducing the height of the shores. The combination of these factors poses a real threat to a group of villages located in the north of the city, where the slopes are weak, and the height of the shores is reduced. Narrow crossings are all factors that contribute to the flow of water outside the first stream of the valley, thus exposing the neighbouring towns to flooding.

The Valley of Al-Khandaq: Al-Khandaq valley penetrates the city of Beni Mellal from its south to its north, dividing it into two parts and passing through a group of modern residential neighbourhoods starting from Jnan Al-Taher in the south to Al-Masirah 2 neighbourhood in the north. It crosses main streets, such as Mohammed V Street near Marjane, Ibn Khaldoun Street near the University of Arts, and National Road No. 8 near the International Clinic. These crossings are considered among the most sensitive points and the most threatened by floods, mainly because they are characterized by narrowness and the presence of a solid load, leading to a decline in the height of the valley's shores. As we move towards the north, the slopes decrease, and the rate of sedimentation increases with the possibility of increasing the strength of the water current, which ultimately leads to water overtaking the built-up buildings and thus exposing a group of neighbourhoods to waterlogging, especially Al-Masirah 2 and Nakhila neighbourhoods.

This extends over approximately 7 kilometres. This length is characterized by a significant variation in the level of slopes, which are vital in the south, moderate in the city centre, and weak in the north. This variation increases the risk of flooding, especially in the city's northern section.

Ain El Ghazi Valley: This valley starts at the foot of Tasmit Mountain in the south and runs alongside the city from the eastern side, crossing a group of villages, including the Ain El Ghazi

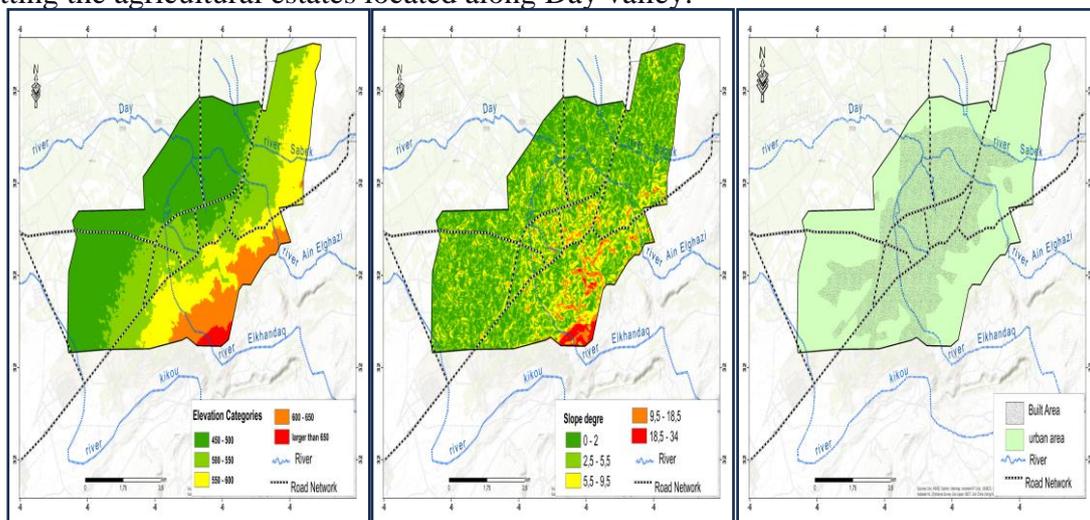
and Oulad Draid. The mainstream disappears immediately after Regional Road No. 3208 is cut off and becomes like torrents spreading throughout the fields south of Regional Road.

The real threat to this valley appears largely in the Ain al-Ghazi area, which is characterized by randomness. Most of the houses are built in the middle of the valley, and due to the lack of preparation for it, floods are very likely. With forgetting, the Oulad Draid region is also very threatened by the danger of floods due to its geographical location, represented by its presence in the lower part of the valley, where the slope is significant, and there needs to be more initialization.

The Valley of Day: This valley starts in the city's centre, specifically in the Castor neighbourhood. It then takes a south-north direction and crosses several residential neighbourhoods, such as the Mohammadi, Lalla Aicha, Ksar Ghazafat, Boughnes, and Laveray neighbourhoods. Its waters meet those of the Al-Khandaq, Sabik, and Ain al-Ghazi valleys.

The features of this basin are united within the urban area of Beni Mellal, which led to the absence of the main water stream, especially south of National Road No. 8. Its features begin to appear directly north of National Road No. 8 at Baghdad Street, where this stream was prepared as a purification canal that flows directly into the groomed stream in the Laveray neighbourhood.

The north's neighbourhoods, especially Laveray, Ghazafat, and Boughnes, are exposed to water flooding their streets and alleys. This is mainly because the prepared stream contains solid sediments from human projectiles, which are construction waste. From the above and through field observations, we found that the area's most vulnerable to the threat of floods are the residential neighbourhoods located in the north of the city, starting with the Al-Masirah 2 neighbourhood, the Laveray neighbourhood, and the Ghazafat neighbourhood... without forgetting the agricultural estates located along Day valley.



Maps 2: Study Area Elevation Maps 3: Study Area Slope Maps 4: Hydrographic Network

4 . The importance of the cartographic approach to monitoring hydrological risks

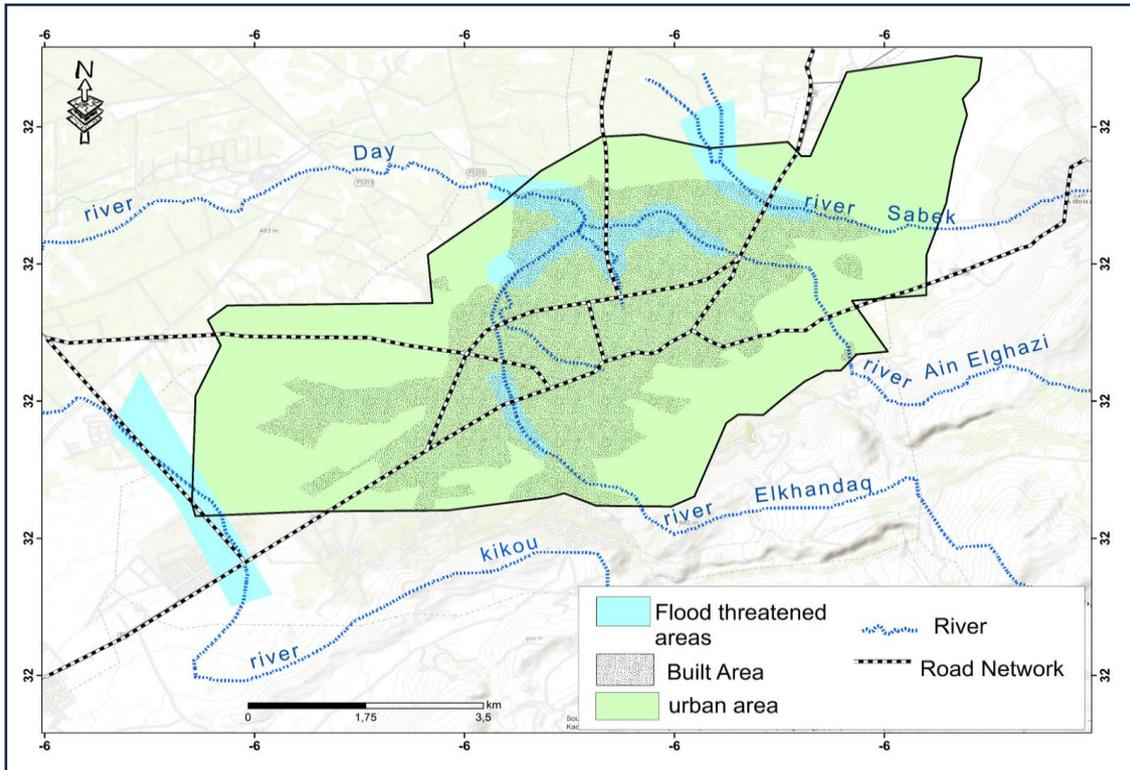
Due to the technical development witnessed in geographic information systems, the cartographic approach is considered one of the most essential approaches adopted in earth sciences, especially in applied field studies. Geography has harnessed this tool to represent and study natural and human geographical phenomena. Representing geographic phenomena in thematic maps is a compelling reason to rely on this approach because it allows us to deal with these maps flexibly, as they can be modified occasionally. (Meghan, A., Christophe, V., hazel, F., sally, priest., (2011))

In this article, we will highlight the role of the cartographer in monitoring the location and degree of flood risk in the city of Beni Mellal as a fundamental problem threatening the city. We will work to produce a flood risk map, relying on a set of mechanisms, the most important of which are collecting

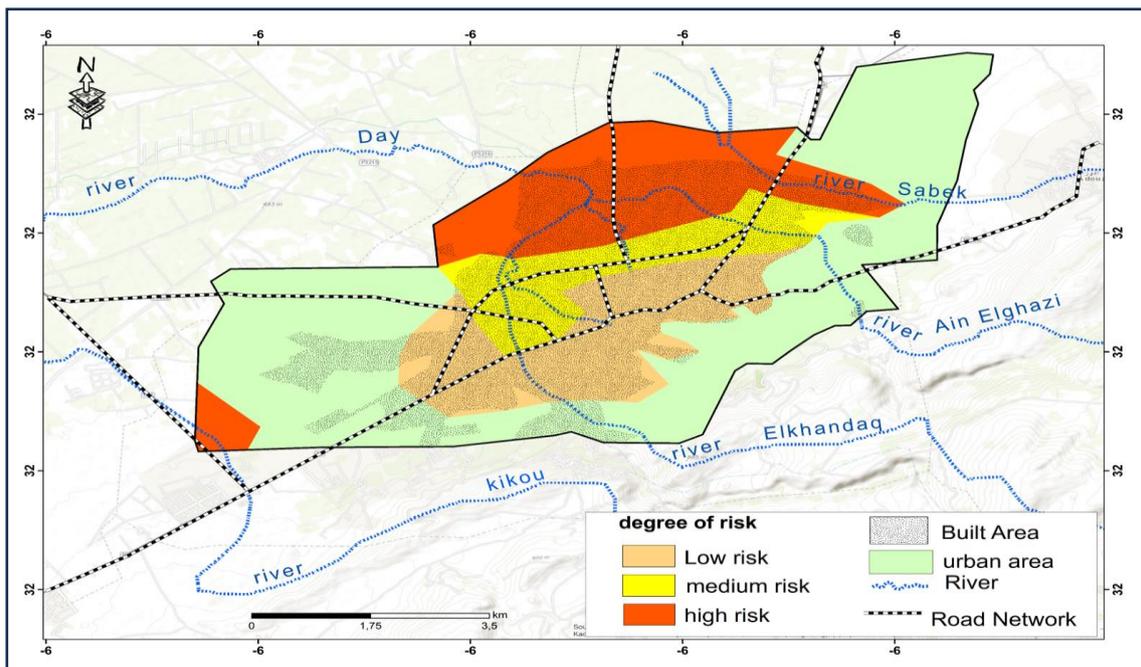
data from the various facilities concerned, field observation and taking photographs. Then, geographic information systems programs and the capabilities they provide to address this phenomenon, in addition to taking aerial photographs (Omid. G & Bakhtiar. F(2018))

- Using Arc Gis 10.7.1 to produce maps.
- Using the Hydrology Tools in Arc Gis 10.7.1 with the Arc Hydro 10.1 addon
- Use Global Mapper to read and download the digital elevation model.
- Using Earth Explore to extract aerial images.

5. Hydrological risk map is a mechanism to reduce risks



Maps 5: Flood Hazard Map



Maps 6: Flood Severity Risk

According to the flood risk map, the area's most at risk of flooding are located in the north and west of the city, specifically in the Hay Al Massira 2 and Hay Nakhila neighbourhoods. These areas are located at the confluence of valleys, which act as collection points for water from the Wadi Al Khandaq and Wadi Ain Ghazi. The same applies to the industrial area, which the Wadi Kikou crosses.

By analyzing the flood map, conducting field observations, and considering a set of physiometric characteristics of the area, we have developed a map of flood hazard levels. The map shows three levels of hazard:

- + High hazard: The northern area where the valleys converge.
- + Medium hazard: The central part of the city.
- + Low hazard: The southern part of the city, where there are higher elevations and steep slopes.

6. Conclusion:

This study revealed that Beni Mellal is a city highly susceptible to flooding, particularly in the northern part of the urban area and along the banks of the wadis (riverbeds). This is primarily attributed to its geographical location and frequent sudden rainfall events in the region. To mitigate the impact of flooding, we adopted a cartographic approach (Geographic et al.) to identify the areas at risk and evaluate the spatial distribution of flood hazards within the city. The study identified three main areas with high flood risk:

- + The northern part of the city, where the risk of flooding increases due to the confluence of multiple wadis.
- + Low-lying areas along the wadis are prone to flooding during heavy rainfall events.
- + Areas with inadequate drainage infrastructure can lead to waterlogging and flooding.

7. References

- Azhari M, Loudyi D (2019) "Downscaling climate projections and hydrologic responses for regional water resources assessment: the case of the Oum Er Rbia river basin, Morocco". *J Eng Res Appl* 7:49–58
- El Khalki, Y., & Benyoucef, A. (2005). "Crues et inondations de l'oued El Handak: Genèse, impact et propositions d'aménagement (Atlas de Beni Mellal) ». *Études de Géographie Physique*, n° XXXII. p: 47-61.
- Meghan, A., Christophe, V., Hazel, F., and Sally, priest. (2011), "Flood Hazard Research Centre, Flood Risk Management Consortium Methods for creating a flood Risk Assessment tool".
- Omid Ghorbanzadeh, Bakhtiar Feizizadeh, and Thomas Blaschke, 2018, "Multicriteria risk evaluation by integrating an analytical network process approach into Gis-based sensitivity and uncertainty analyses", Taylor & Francis, pp. 127 – 151.
- Wachal, D.J., and Hudak, P.F., (2000): "Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA". *GeoJournal*, vol. 51, p. 245-253.

SYNTHESE HYDROCLIMATIQUE DANS LA PLAINE ALLUVIALE DU SOUS BASSIN DE LA RIVIERE MILO, HAUT NIGER EN GUINEE

Soumaïla CONDE¹, Dov CORENBLIT² et Fodé Salifou SOUMAH³

1 Université Julius Nyerere Kankan, BP 209, Kankan, Guinée

2 Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, UMR 5245 CNRS-UPS-INPT, 31062 Toulouse cedex 9, dov.corenblit@uca.fr

Auteur correspondant : condedandela@gmail.com , Téléphone : +224 622 11 17 16

3 Centre de Recherche et de Documentation pour le Développement intégré de la Base Guinée, Kindia, lifsoumah@gmail.com, Téléphone : 623 75 30 11

RESUME: La Guinée jouit d'un climat tropical soudano-guinéen caractérisé par l'alternance de deux saisons de durée variant selon les régions naturelles : la saison sèche pendant laquelle souffle l'Harmattan et la saison pluvieuse régie par la mousson ouest-africaine. La synthèse des données hydroclimatiques disponibles dans la plaine alluviale du Haut Niger en Guinée au cours des cinquante dernières années montre un déficit hydrique depuis 1970. L'action humaine s'accroît dans les plaines alluviales, où se trouvent les plus fortes agglomérations. Les plaines de la Guinée n'ont cessé de subir la pression anthropique depuis plusieurs dizaines d'années. Ce phénomène soulève de nombreuses interrogations au sujet du devenir de ces immenses ressources naturelles. La zone d'étude connaît d'importantes perturbations pluviométriques qui se traduisent par une variabilité hydrométrique pour les débits des cours d'eau. La synthèse du bilan hydrologique de 1951 à 2016 à la station de l'Aéroport de la Kankan (une des Préfecture de la Haute Guinée) confirme la baisse de la pluviométrie.

Mots-clés: Hydroclimatique, plaine alluviale, Niger, rivière Milo Guinée

1. INTRODUCTION

Le bassin versant de la rivière Milo est l'un des plus importants des sous bassins du haut Niger en Guinée (figure 1). Il couvre une superficie de 13 500 km². La rivière Milo était navigable pour des bateaux à fond plat entre Kankan et son embouchure sur le fleuve Niger, puis jusqu'à Bamako. De 1987 à 1989, cette rivière a été fortement influencée par l'exploitation des mines de diamant du village de Banankoro dans la région de Kérouané. La compréhension du cycle annuel de ces eaux est d'une importance capitale car, des milliers de gens s'approvisionnent à partir de cette ressource indispensable.

Une meilleure connaissance de ce précieux patrimoine est une priorité pour les populations de la localité. Actuellement, la rivière subit plusieurs pressions suite aux activités humaines notamment les activités agropastorales, minières et de constructions anarchiques.

La forte variation pluviométrique, alternance de mousson et de saison sèche, devrait permettre de comprendre et de suivre les différents pools d'eau (eau de rivière, eau de nappe) et leur mélange au cours du temps.

La synthèse des données climatiques disponibles au niveau de la région de Kankan a été faite. Les données mensuelles de pluviométrie de la station météorologique de l'aéroport de Kankan de 1951 à 2016 ont été collectées, celles concernant le débit de la rivière Milo entre 1951 à 2016 ont été synthétisées également.

Dans cette zone pré sahélienne le régime des basses eaux et d'étiage de ces cours d'eaux se trouvent toujours conditionnés par l'état de remplissage des nappes de leurs bassins versants en fin de saison des pluies et de leur loi de tarissement (Bamba *et al.*, 1996).

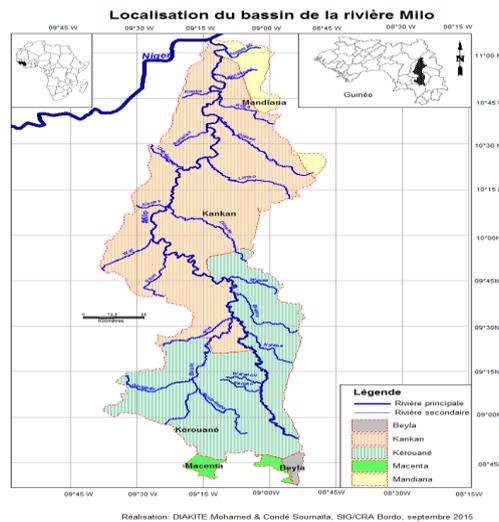


Figure 1. Carte de la rivière Milo et son bassin versant

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les stations de prélèvement d'eau sont réparties entre deux sites choisis. Il s'agit du site de Kérouané et le site de Kankan. Au niveau de chaque site, des campagnes de mesures et d'échantillonnages des eaux de surfaces ont été effectuées le long de la rivière Milo, dans les puits et les annexes hydrologiques du Milo (2015 à 2016). La première campagne de prélèvement de 2015 a eu lieu au mois de mai avant la mousson (basses eaux), puis en août-septembre une seconde, juste après la mousson au moment des hautes eaux. La seconde campagne a été organisée en 2016 au mois de mai également. Les échantillons d'eau prélevés ont été collectés dans les flacons hermétiques de 10 ml de façon à éviter tout fractionnement isotopique par évaporation. Les paramètres physico-chimiques comme la température, le pH et la conductivité sont mesurés sur le terrain avec une sonde multiparamètre WTW. Au laboratoire, l'analyse des majeurs a été réalisée à la plateforme PAPC d'Ecolab par chromatographie ionique avec un Dionex Ics-5000+ pour les anions, et un Dionex DX-120 pour les cations.

3. RESULTATS

3.1. Variabilité du climat du bassin

La région de la Haute Guinée, autour du bassin du Milo est caractérisée par un climat de savane avec un hiver sec (Aw selon la classification de Köppen-Geiger) avec une pluviométrie moyenne de 1480 ± 240 mm et un taux d'évapotranspiration de 900 à 1600 millimètres environ. La période la plus chaude se situe entre novembre et avril, avec des températures qui peuvent dépasser 38°C , une moyenne mensuelle de l'ordre de 33°C (Figure .2).

La mousson d'Afrique de l'Ouest arrive de mai à octobre accompagnée de températures parfois inférieures à 20°C . Les moyennes mobiles déterminées à intervalle de quatre ans de la pluviosité dans la région de Kankan ont permis de distinguer des périodes : - une période humide durant les années 1950 à 1971 ; - une période sèche de 1972 à 1993, -une tendance à la moyenne de 1994 à 2008. Un retour de la période sèche a été observé entre 2009-2014 (Figure 3).

Oujda les 17, 18 et 19 mai 2024

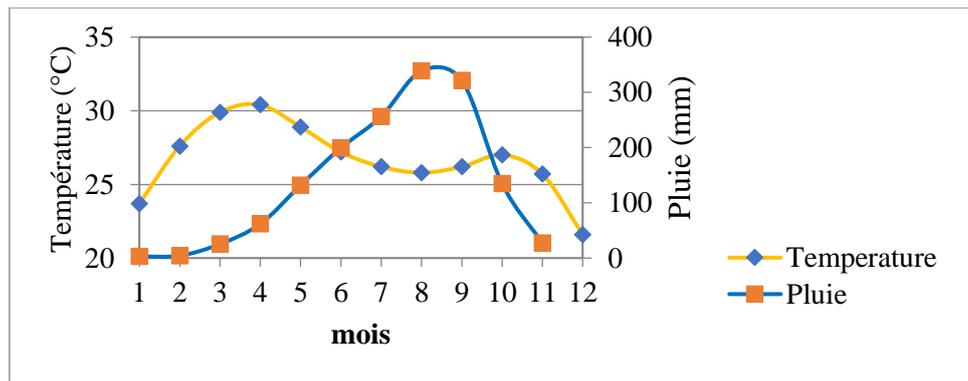


Figure 2. Moyenne mensuelle de la température et de la pluviométrie entre 1980 à 2009 enregistrée à la station météorologique de Kankan.

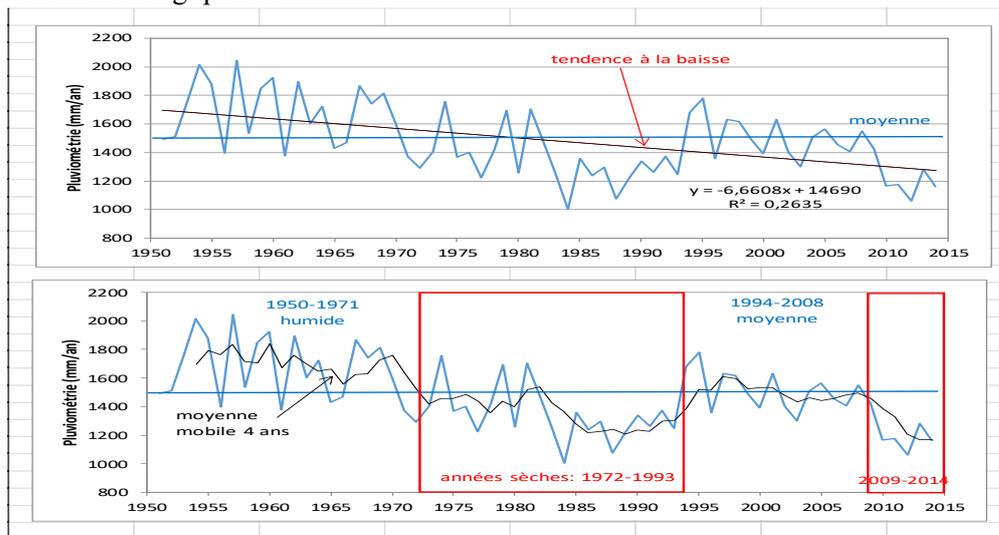


Figure 3. Variation de la pluviométrie de 1951 à 2014, (Données Pluviométrie Aéroport Kankan).

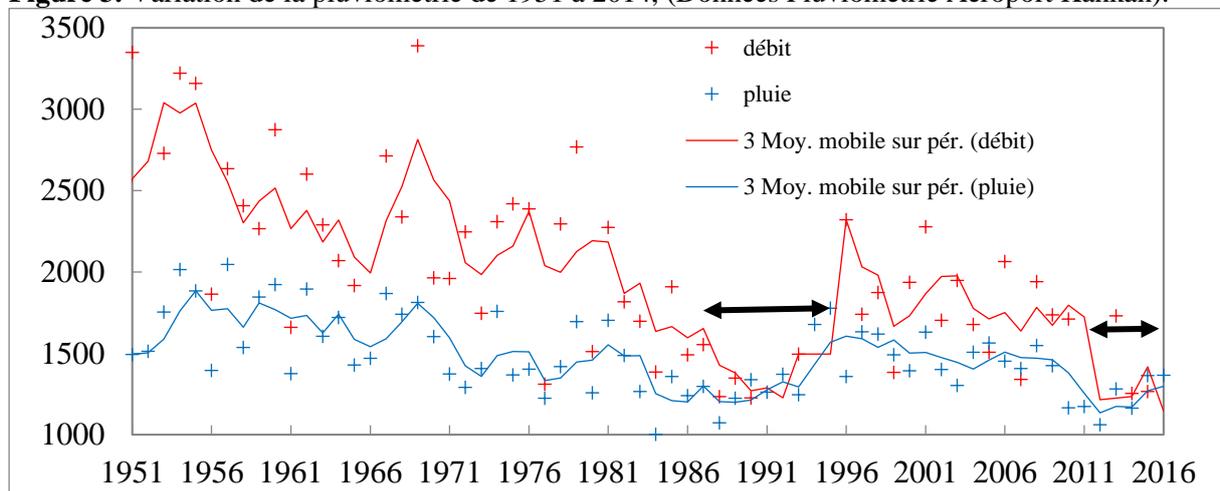


Figure 4. Comparaison des débits de la rivière Milo à la station de jaugeage de Kankan et de la pluviométrie de 1951 à 2016. Les variables varient légèrement dans le même sens surtout au niveau des années 1991 et 2011 donnant une corrélation forte positive caractéristique d'un climat local très similaire sur le bassin amont de la rivière Milo.

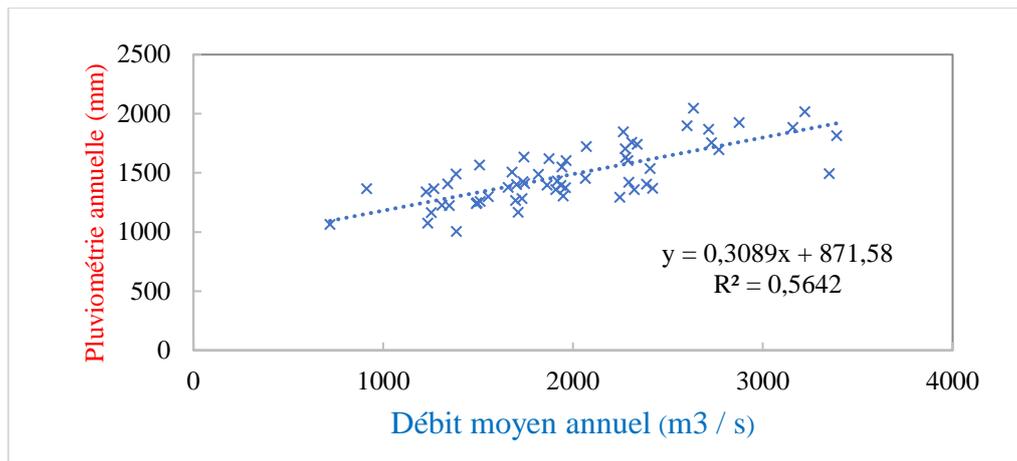


Figure 5. Corrélation entre les débits de la rivière Milo et la pluviométrie au niveau de la ville de Kankan entre 1951 à 2016. Il existe une corrélation positive entre le débit et la pluviométrie. Une pluviométrie forte entraîne un débit fort de cette rivière. La rivière a régime irrégulier et dépend des précipitations, fort pendant la mousson et faible pendant l'harmattan.

3.2. Caractéristiques des eaux prélevées entre 2015 et 2016

Les échantillons d'eau prélevés après traitement ont conduit aux résultats suivants :

Les **conductivités** déterminées à partir des échantillons (eaux de surface, des puits et des forages) varient respectivement entre $103 \pm 74 \mu\text{S} / \text{cm}$ pour les eaux de surface (Milo et affluents), $100 \pm 71 \mu\text{S} / \text{cm}$ dans les puits et $246 \pm 173 \mu\text{S} / \text{cm}$ dans les forages (eaux des nappes).

Les valeurs du **pH** mesurées lors des prélèvements de 30 et 23 échantillons d'eau effectués respectivement en 2015 et 2016 sont comprises entre 5, 92 et 7,48 avec en moyenne $6,98 \pm 0,42$. Ces valeurs confirment une neutralité des eaux du bassin hydrographique de la rivière. Les **températures** varient de $25,0$ à $33,3^\circ\text{C}$ dans le Milo et dans ses annexes (affluents), avec une moyenne de $28,2 \pm 1,7^\circ\text{C}$. Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques mesurés dans les Hydrosystèmes sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1. Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux de surfaces (Milo et annexes) et des eaux souterraines (Puits et Forages).

| Hydrosystèmes | Température ($^\circ\text{C}$) | pH | Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| Eau du Milo | $27,6 \pm 1,6$ | $7,16 \pm 0,27$ | 42 ± 9 |
| Eau des annexes | $28,2 \pm 1,7$ | $6,58 \pm 4,65$ | 100 ± 71 |
| Eau souterraine | $29,25 \pm 20,68$ | $6,21 \pm 4,39$ | 246 ± 174 |

Les analyses chimiques (analyse de chromatographie élémentaire) effectuées au laboratoire d'écologie fonctionnelle et environnement de Toulouse ont révélé la présence des ions dont les concentrations moyennes exprimées en milligramme par litre (Tableau 2) en fonction des sources d'eau sont faibles.

Tableau 2. Concentration moyenne en milligramme par litre des ions (2015)

| Source | F ⁻ | Cl ⁻ | N-NO ³⁻ | P-PO ₄ ³⁻ | Na ⁺ | N-NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ |
|--------|----------------|-----------------|--------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|------------------|------------------|
|--------|----------------|-----------------|--------------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|------------------|------------------|

Oujda les 17, 18 et 19 mai 2024

| | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Milo | 0,04 | 0,86 | 0,20 | 0,02 | 6,37 | 0,00 | 2,29 | 2,10 | 5,60 |
| Mares | 0,04 | 1,14 | 0,32 | 0,06 | 5,16 | 0,01 | 3,02 | 1,51 | 4,36 |
| Puits | 0,04 | 6,06 | 2,27 | 0,02 | 12,16 | 0,00 | 2,65 | 2,06 | 5,56 |

4. DISCUSSION

Les résultats hydrologiques et hydro-chimiques obtenus au cours de cette étude sont comparés avec les autres études faites à Kankan (M2 de Momou Kpghomou, 2012), et en Côte d'Ivoire (Ahoussi et al., 2011 ; Kamagate et al., 2011). Ce sont surtout les ions Cl^- et Na^+ qui sont responsables de l'augmentation de la conductivité dans les eaux de nappe. Cette faible conductivité des eaux de surface se justifie par leur caractéristique « système ouvert » (Kamagate et al., 2011) à l'atmosphère.

5. CONCLUSION

Cette synthèse hydrologique permet de comparer le débit de la rivière Milo et la pluviométrie au niveau de la ville de Kankan, et au cours de ces dernières dizaines d'années, la bonne corrélation entre les deux signaux montre que le climat semble assez homogène sur l'ensemble du bassin de la rivière Milo.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Bamba, F., Diabaté, M., Mahé, G., & Diarra, M.** (1998). Variabilité hydrologique sur le haut bassin du fleuve Niger. *Revue Malienne de Science et de Technologie*, 4, pp. 6-22.
- Bamba F., MAHE G., BRICQUET J.P., OLIVRY J.C.** (1996). Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du haut Niger et de la cuvette lacustre. In. Fritsch J.M. Paturol J.E. & Servat E. (Eds) : *Réseaux hydrométriques réseaux télématiques réseaux scientifiques. Nouveaux visages de l'hydrologie régionale en Afrique au XIIème* Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 p.
- Kamagate B, Gone DL, Doumouya I, Ouattara I, Ouedraogo M, Bamba A, Savane I.** (2011). Relation nappe-rivière dans le bassin versant du Bandama en milieu de socle fissuré en Côte d'Ivoire : approche couplée hydrochimie-téledétection. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5 (1), pp. 206-216.

MODÉLISATION DE LA SENSIBILITÉ DE CERTAINES ZONES DE LA VILLE D'OUJDA FACE AU RISQUE D'INONDATION ET ESTIMATION DE SES POTENTIELS. IMPACTS SOCIAUX ET ÉCONOMIQUES

DJEBBOUR Mounir et SBAI Abdelkader

Université Mohamed premier, Dynamique des Milieux Arides, Aménagement et Développement Régional
60000, Oujda, Maroc. moundjeb13@gmail.com

Résumé: Avant le processus de planification urbaine, les parties prenantes doivent tenir compte des zones exposées au risque d'inondation. Cependant, dans de nombreuses zones, les urbanistes ne tiennent pas compte de cette norme, ce qui entraîne une expansion urbaine au détriment des cours d'eau, entravant ainsi le flux et provoquant des inondations. C'est le cas à Oujda, où la ville s'est étendue aux dépens de plusieurs cours d'eau principaux, entravant la circulation dans de nombreuses zones. La dangerosité des inondations est accrue par la présence de quartiers densément peuplés le long des rives des Oueds, entraînant la destruction des infrastructures et la perte de nombreuses vies. Ainsi, cette étude a identifié les zones les plus sensibles au risque d'inondation en les modélisant en fonction de critères tels que l'altitude, la pente, la nature de l'utilisation des terres, la proximité des cours d'eau, les précipitations et la densité des cours d'eau. La ville d'Oujda a ensuite été classée en cinq catégories majeures en fonction du degré de danger, allant de très faible à très élevé. Il a été constaté que de nombreuses zones sont fortement exposées au risque d'inondation. De plus, les pertes économiques résultant de la destruction des infrastructures, qu'elles soient résidentielles ou publiques, ont été estimées, ainsi que le nombre d'habitants exposés au risque d'inondation.

Mots-Clés: Risque, inondation, cartographie, modélisation, sensibilité, SIG, Oujda.

ملخص

قبل عملية التخطيط الحضري، يجب على الفاعلين الأخذ بعين الاعتبار المناطق المهددة بخطر الفيضان، غير أنه في الكثير من الأحيان لا يراعي المخططون هذا المعيار، مما يؤدي إلى التوسع الحضري على حساب الأودية وعرقلة حركة الجريان، وبالتالي حدوث الفيضان، وهو ما تعرفه مدينة وجدة والتي توسعت على حساب مجموعة من الأودية الرئيسية مما يعرقل حركة الجريان في الكثير من الأحيان. وما يزيد من خطورة الفيضان هو تواجد أحياء كبرى ومكتظة بالسكان على ضفاف الأودية، الشيء الذي يترتب عنه تدمير البنية التحتية وسقوط العديد من الضحايا. بذلك تم في هذه الدراسة تحديد المناطق الأكثر حساسية لخطر الفيضان عن طريق نمذجتها معتمدا على معايير أهمها الارتفاع والانحدار وطبيعة استعمالات الأرض والقرب من الأودية والتساقطات المطرية وكثافة الأودية، ثم تصنيف مدينة وجدة إلى خمسة أصناف كبرى تبعا لدرجة الخطورة من درجة ضعيفة جدا إلى درجة مرتفعة جدا. وتبين أن هناك العديد من الأحياء المهددة بشكل كبير بخطر الفيضان، كما تم تقدير الخسائر الاقتصادية الناتجة عن تدمير المنشآت سواء السكنية أو البنية التحتية، بالإضافة إلى تقدير عدد الساكنة المهددة بخطر الفيضان.

الكلمات المفتاحية: خطر، فيضان، كرطوغرافيا، نمذجة، حساسية، نظم المعلومات الجغرافية، وجدة.

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, avec l'intensification des changements climatiques, l'impact des catastrophes naturelles sur les conditions économiques et sociales est devenu un sujet d'attention mondiale, en particulier le risque des inondations, surtout en milieu urbain. Les inondations sont les plus courantes parmi tous les risques environnementaux, en raison de la répartition géographique étendue des vallées et de l'implantation humaine à proximité. L'expansion urbaine et la déforestation contribuent à l'augmentation des inondations (Vlachos, E, 1995). Les inondations sont souvent des catastrophes naturelles entraînant des pertes directes en termes de biens sociaux et économiques, de blessures physiques, voire de traumatismes psychologiques (R. G. Awopetu 2013). Les inondations peuvent être rapides, progressives ou soudaines, et peuvent conduire à l'isolement de communautés ou de zones, parfois nécessitant l'évacuation de vastes régions (Carter, W. Nick. 1991). Les conséquences sociales et économiques des inondations incluent la perte et la destruction de biens et de vies sur une période variable (Nasir R, 2007). Selon Armand Colin (2001), la qualification d'une catastrophe naturelle est liée à des critères définis en trois éléments essentiels pour évaluer l'ampleur de la catastrophe. On ne peut parler de catastrophe naturelle que si le nombre de décès dépasse 100, que les pertes économiques sont estimées à plus de 10 millions de dollars, tandis que les pertes environnementales atteignent 10 tonnes. La ville d'Oujda a connu une expansion significative au cours des dernières décennies, mais cette expansion s'est faite à proximité de plusieurs cours d'eau, entraînant périodiquement des inondations causant des pertes matérielles et humaines. Ainsi, nous avons évalué le degré de risque des inondations des principaux cours d'eau au nord de la ville d'Oujda, selon cinq niveaux allant de faible à très fort. Ensuite, nous avons identifié les zones exposées au risque d'inondation pour chaque niveau, suivi de l'estimation des pertes humaines et économiques pouvant être causées par chaque niveau.

1- Situation de la zone d'étude

La ville d'Oujda est située au nord-est du Maroc (Fig.1). C'est la capitale administrative de la Région de l'Oriental. Elle fait partie de la préfecture d'Oujda-Angad, créée en 1994. La ville se trouve à 17 kilomètres de la frontière algérienne et à 60 kilomètres de la mer Méditerranée. Elle se situe à 15°4' ouest et 34°40' au nord de l'équateur. Elle est limitée par la province de Berkane au nord, la province de Taourirt à l'ouest, la province de Jerada au sud, et la frontière Maroc-algérienne à l'est. À l'échelle de la ville d'Oujda, elle est limitée à l'est et au nord par les communes d'Ahl Angad et Isly, et au sud-ouest par la commune de Sidi Moussa Lemhaya.

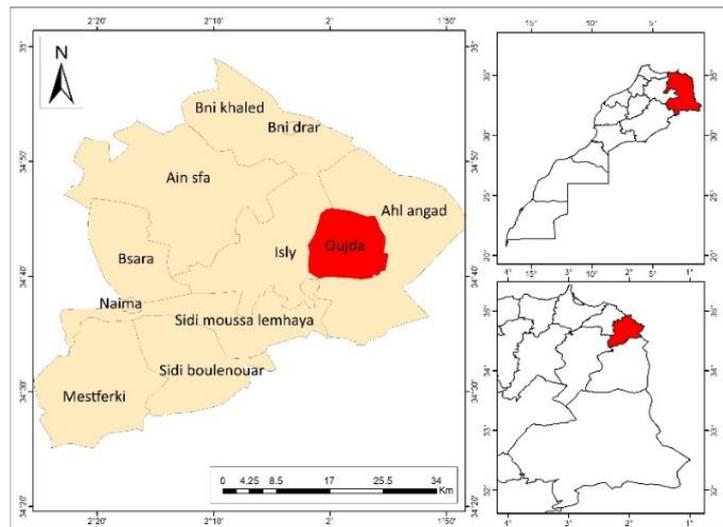


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

Pour les caractéristiques bioclimatiques, la ville d'Oujda est considérée comme une zone de transition entre la zone aride à faibles précipitations et la fréquence d'événements météorologiques quotidiens exceptionnels, et le climat semi-aride avec une humidité relative.

2-Méthode de l'étude

Cette étude aborde les zones exposées au risque d'inondation des principaux cours d'eau provenant du nord de la ville. Pour ce faire, elle a utilisé des outils méthodologiques tels que l'observation et l'inspection sur le terrain, ainsi que des travaux cartographiques dans le but d'identifier les quartiers exposés au risque d'inondation et de diagnostiquer les pertes matérielles qui pourraient résulter des inondations. De plus, l'étude a impliqué une revue de la littérature, ainsi que des interactions avec les parties prenantes pour estimer la population résidant à proximité des zones menacées par le risque d'inondation, suivie de l'évaluation des pertes humaines.

3- Résultats et discussion

3-1. L'évaluation de la sensibilité de la ville d'Oujda au risque d'inondation

La ville d'Oujda a connu une expansion urbaine significative depuis son indépendance jusqu'à aujourd'hui, contribuant à la croissance de plusieurs quartiers résidentiels le long des vallées. Comme le montre la Figure 2, on observe que la plupart des quartiers situés le long des vallées du côté nord sont plus exposés au risque d'inondation. Cela est dû à leur proximité avec les vallées, à leur densité, ainsi qu'à la faible pente, à la hauteur et à la nature de l'utilisation des terres, notamment les zones construites. Parmi les quartiers les plus menacés par le risque d'inondation (Fig.3), on trouve les quartiers Al Mer Ali, Mharchi, Sidi Lakhder, Angadi, quartier Al Nour, Al Haj Omar, le quartier industriel, et d'autres. Ces quartiers ont été exposés à plusieurs reprises au risque d'inondation.

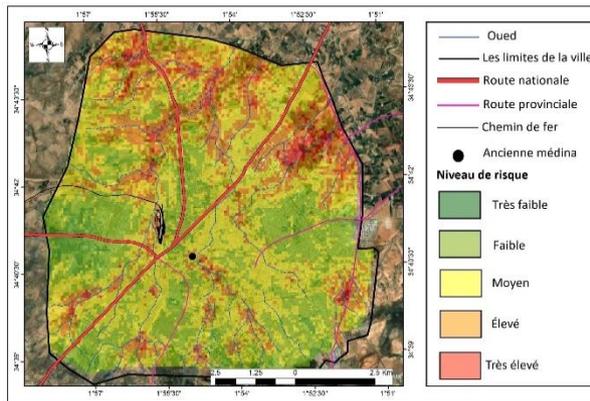


Figure 2: Sensibilité de la ville d'Oujda au danger des inondations des vallées

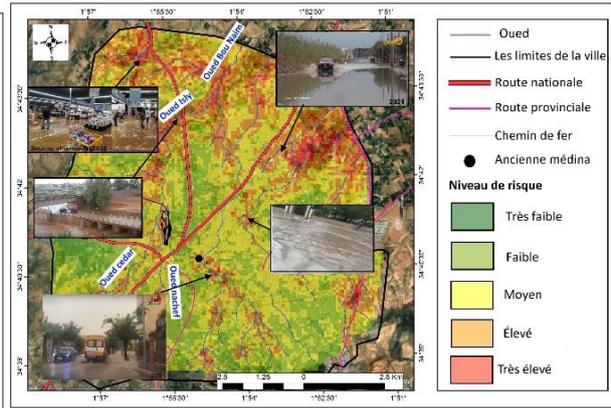


Figure 3: Exemples d'inondations à Oujda

Il ressort de la figure 4 que les zones très gravement menacées s'étendent sur une superficie de 3,2 km², tandis que les zones gravement menacées s'étendent sur une superficie de 25 km². Les zones à risque modéré s'étendent sur une superficie de 2,6 km². 40 km², alors que les zones à faible risque s'étendent sur une superficie de 20 km². Quant aux zones non exposées au risque des principales vallées, elles ne représentent que 3 km².

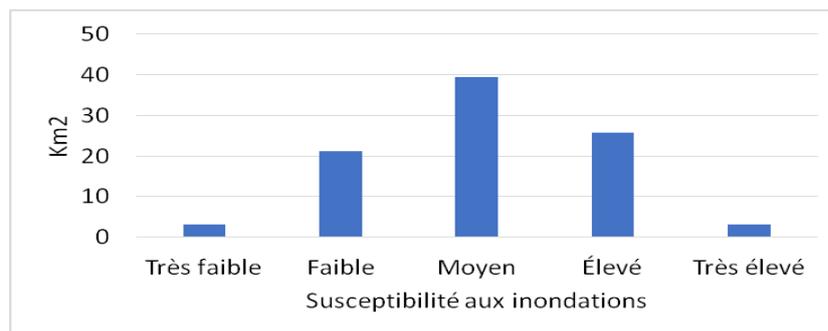


Figure 4 : Superficie des zones menacées par le risque d'inondations en fonction du niveau de risque

Au niveau des quartiers menacés par le danger d'inondation des principaux cours d'eau, on constate, à partir du tableau 1, que 129 quartiers se situent dans des zones exposées à un risque d'inondation élevé. En revanche, 109 quartiers se trouvent dans une plage de risque modérée, tandis que 83 quartiers sont dans une situation de risque faible.

Tableau 1: Répartition des quartiers de la ville d'Oujda selon le niveau de risque

| Niveau de risque | Nombre de quartiers |
|------------------|---------------------|
| Très faible | 15 |
| Faible | 71 |
| Moyen | 109 |
| Élevé | 83 |
| Très élevé | 46 |

3-2 Les défis du risque d'inondation des principaux cours d'eau sur le plan économique et social

Les inondations dans de nombreux quartiers entraînent l'obstruction des routes, parfois même leur destruction, en particulier les principales routes, ce qui peut entraîner l'isolement de plusieurs quartiers. De plus, les ponts et les maisons sont exposés à la destruction.

Ce qui aggrave le danger des inondations des principaux cours d'eau est la présence de plusieurs quartiers résidentiels sur leurs rives. Le nombre de bâtiments fortement menacés par les inondations est d'environ 868, y compris environ 20 espaces verts, un cimetière, 4 établissements éducatifs, ainsi qu'une partie du quartier industriel dans cette zone. De plus, on trouve 7 mosquées, un grand théâtre, et 25 vergers dans la même zone (Tableau 2).

Tableau 2 : Nombre d'utilisations des terres fortement menacées par les inondations

| Maisons | Espaces Verts | Cimetière | Établissements éducatifs | Quartiers industriels | Mosquées | Marchés | Terres agricoles | Théâtres |
|---------|---------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|---------|------------------|----------|
| 2868 | 39 | 1 | 3 | 1 | 7 | 4 | 33 | 1 |

En ce qui concerne la zone à risque élevé, plus de 13 938 maisons s'y trouvent. On y trouve également un grand hôpital, 28 mosquées, 4 cimetières, 61 espaces verts, 5 hôtels, ainsi que 4 stations de transport, 42 vergers, 12 marchés, un quartier industriel, et d'autres éléments (Tableau 3).

Tableau 3 : Nombre d'utilisations des terres fortement menacées par les inondations

| Maisons | Espaces verts | Cimetière | Établissements éducatifs | Quartiers industriels | Mosquées | Marchés | Terres agricoles | Hôtels | Transport | Hôpital |
|---------|---------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|---------|------------------|--------|-----------|---------|
| 13938 | 61 | 4 | 5 | 1 | 28 | 12 | 42 | 5 | 4 | 1 |

Quant au réseau routier (Tabl.4), les routes qui s'étendent dans la zone très exposée atteignent 83,6 km, tandis que les routes dans la zone exposée s'étendent sur 363,4 km. Cela rend l'accès difficile à plusieurs quartiers sujets aux inondations. Les principales routes sont particulièrement vulnérables aux inondations, en particulier celles à l'entrée nord de la ville et à l'ouest. En 2022 et 2023, la ville a connu des inondations qui ont entraîné l'immersion de la route située à l'entrée nord de la ville, de la route nationale et de l'autoroute reliant Oujda à la ville d'El Ayoun Sidi Mellouk sous les eaux de pluie.

Tableau 4: Longueur du réseau routier menacé par le risque d'inondation selon le niveau de risque

| Niveau de risque | Réseau routier |
|------------------|----------------|
| Très élevé | 83.6 |
| Élevé | 363.4 |

En ce qui concerne le niveau humain (Tabl.6), environ 15 000 personnes sont gravement menacées par le risque d'inondation des principaux cours d'eau, tandis que plus de 110 000 personnes sont gravement menacées par ce risque.

Tableau 6: Estimation du nombre d'habitants menacés par le risque d'inondation selon son niveau.

| Niveau de risque | Nombre d'habitants |
|------------------|--------------------|
| Très élevé | 15500 |
| Élevé | 110000 |

Conclusion

La modélisation des risques naturels est une démarche fondamentale vers laquelle les urbanistes devraient se diriger, en raison de son utilité considérable dans la gestion du territoire. En modélisant le risque d'inondation des principaux cours d'eau à Oujda, il apparaît que plusieurs quartiers sont situés dans une zone à risque élevé, soit plus de 129 quartiers, ce qui pourrait entraîner des pertes économiques importantes. Les infrastructures les plus importantes, telles que la gare, la station de bus, l'hôpital, les cimetières, les établissements éducatifs et les grands marchés, se trouvent également dans cette zone. La population concernée est significative, avec plus de 125 000 personnes menacées par ces risques. Ainsi, il est impératif pour les urbanistes de prendre en considération le facteur de risque des cours d'eau lors de

Bibliographie

- Carter, W. Nick. 1991. Disaster Management – Disaster Managers' Handbook. Manila, Philippines: Publication of the Asian Development Bank.
- Hanna A. Megahed, Amira M. Abdo, Mohamed A. E. AbdelRahman, Antonio Scopa and Mohammed N. Hegazy , (2023), Frequency Ratio Model as Tools for Flood Susceptibility Mapping in Urbanized Areas: A case Study from Egypt, MDPI, <https://doi.org/10.3390/app13169445>.
- Logesh N., Tune U., Muthusankar G., Bavinaya Palpanabhan K., Lakshumanan C., (2021), Flood Susceptibility Analysis in Chennai Corporation Using Frequency Ratio Model, Journal Of the Indian Society Of Remote Sensing.
- Nasir R., Zainah Z. and Khairudin R. Psychological effects on Victims of the Johor Flood 2006/2007. <http://dx.doi.org/10.5539/ass.v8n8p126>.
- R. Kaaviya, V. Devadas, (2021), Water resilience mapping of Chennai, India Using analytical hierarchy process, Ecological Processes, <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00341-1>.
- Vlachos. E, (1995). Socio-economic impacts and consequences of extreme floods, U.S.- Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods, Perugia (Italy).
- دجبور منير (2022)، نحو حكامه بيئية حضرية بمدينة وجدة، رسالة ماستر. كلية الآداب والعلوم الإنسانية، جامعة محمد الأول.
- الحافظ ادريس (2006)، نشأة وتدبير الأخطار الهيدرولوجية داخل المدارات الخضرية: حالة وجدة وبركان والسعيدية (المغرب الشرقي). أطروحة نيل الدكتوراه، كلية الآداب والعلوم الإنسانية سايس – فاس، جامعة سيدي محمد بن عبد الله.

Analyses pluviométriques et modélisation hydrologique au pas de temps mensuel. Application sur le bassin de Tamaloute (HAUTE MOULOUYA - EST du Maroc)

Abdelaziz SEHLI et Abdelkader SBAI

Département de Géographie. FLSH. Université Mohammed Premier, Oujda

Résumé: La réponse hydrologique d'un bassin versant, est la traduction de la réaction de ses composantes, suite à un événement pluvieux. L'étude de ce dernier selon des méthodes appropriées, ainsi que selon l'objectif et le résultat recherché, est primordiale pour atteindre un degré de précision important quant à l'évaluation des potentialités hydriques, la prévision ou la prévention et la lutte contre les risques (inondation ou sécheresse).

A travers cet article, on a essayé de présenter les résultats d'analyses et de simulations focalisées sur les données pluviométriques (pluies annuelles, pluies journalières maximales), et ce, pour une série chronologique de 1990 à 2020. On a déterminé les probabilités au non dépassements, les intervalles de récurrences et les périodes de retour, ainsi que les courbes de l'IDF (Intensité-Durée-Fréquence), pour le sous bassin de Tamaloute situé à l'extrême amont du bassin versant de la Moulouya (Maroc oriental). A travers la modélisation par le modèle génie rural au pas de temps mensuel, on a déterminé le comportement du bassin en question, quant aux fluctuations constatées au niveau des réservoirs de production et de routage suite aux événements pluvieux enregistrés mensuellement.

Mots clés: Pluviométrie, Modélisation, IDF, Probabilités au non dépassement, Haute Moulouya.

RAINFALL ANALYZES AND HYDROLOGICAL MODELING ON A MONTHLY TIME STEP. APPLICATION IN THE TAMALOUTE BASIN (UPPER MOULOUYA - EASTERN MOROCCO)

Abstract: The hydrological response of a watershed is the translation of the reaction of its components, following a rainy event. The study of the latter using appropriate methods, as well as according to the objective and the desired result, is essential to achieve a significant degree of precision in the evaluation of water potential, forecasting or prevention and the fight against risks (flood or drought). Through this article, we have tried to present the results of analyzes and simulations focused on rainfall data (annual rainfall, maximum daily rainfall), and this, for a chronological series from 1990 to 2020. We have determined the probabilities of non-exceedance, recurrence intervals and return periods, as well as IDF (Intensity-Duration-Frequency) curves, for the Tamaloute sub-basin located at the extreme upstream of the Moulouya watershed (Eastern Morocco). Through modeling by the rural engineering model at monthly time steps, we determined the behavior of the basin in question, with regard to the fluctuations observed at the level of the production and routing reservoirs following the rainy events recorded monthly.

Key words: Rainfall, Modeling, IDF, Non-exceedance probabilities, Upper Moulouya.

Introduction

L'analyse de l'évènement pluvieux à plusieurs échelles est à la base de l'étude d'évaluation d'un tel bassin versant. Plus l'analyse cible des critères pointus, plus la compréhension de la réponse hydrologique s'approfondit. L'utilisation des logiciels spécialisés dans le traitement de l'évènement pluvieux est très utile pour affiner l'analyse et obtenir des résultats reposants sur un fondement scientifique. La modélisation hydrologique est un outil indispensable pour comprendre la nature de la réaction du bassin suite à l'évènement pluvieux. Elle permet de constituer une base scientifique menant à une prise de décision avec conscience quand il s'agit d'actions d'évaluation, de planification et de prévision des ressources hydriques.

Présentation de la zone d'étude et méthode de recherche

Présentation du site étudié

Tamaloute est un sous bassin situé à l'extrême amont du bassin versant de la Moulouya (Fig.1). Il occupe une surface de 622 Km². La pluie moyenne constatée durant la série chronologique (1990-2020), est 368mm.

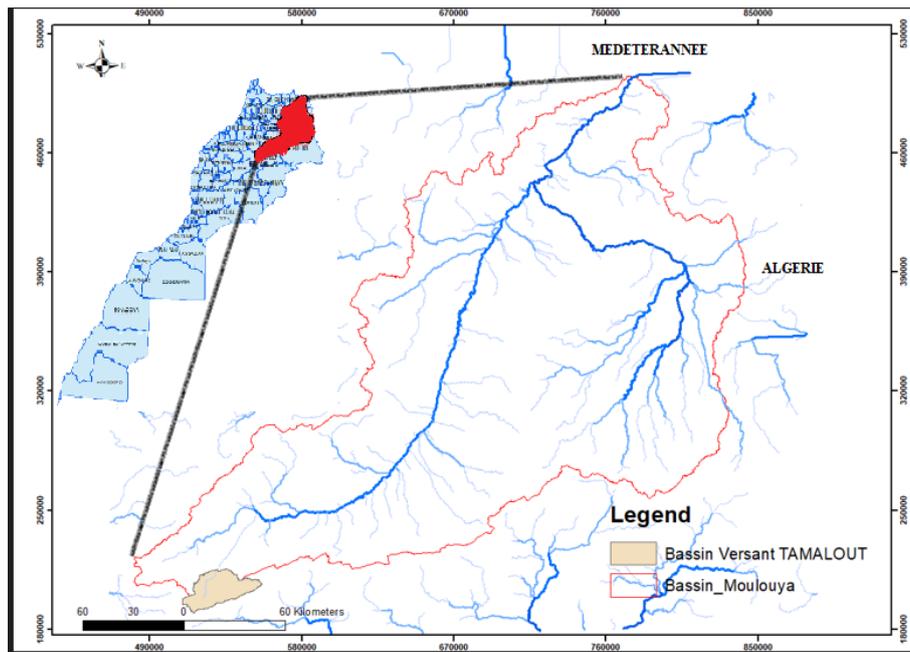


Figure 1 : Localisation du bassin versant de Tamaloute

La pluviométrie enregistrée dans ce bassin est aléatoire (Fig.2). Un maximum a été observé en 1996 avec 699mm ; la chute a continué jusqu'à 2002. Le contexte pluviométrique tend vers une légère hausse jusqu'à 2005, puis une autre chute en 2006 suivie d'une hausse presque continue vers 2010. Après cette date, des chutes et des hausses s'alternent sous le seuil de 500mm qui s'est avéré maximum pour cette dernière décennie.

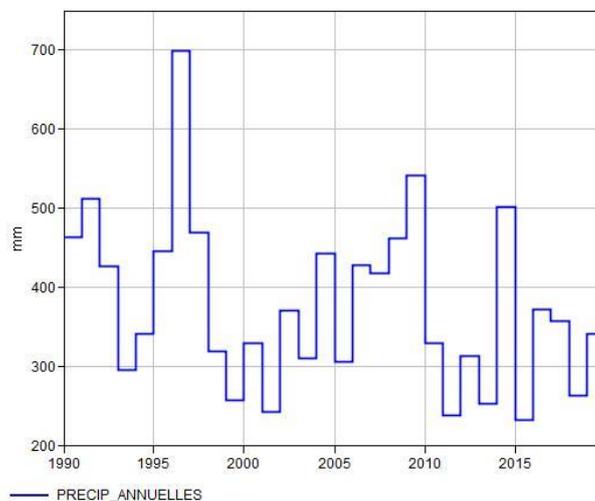


Figure 2 : Répartition temporelle de la pluie annuelle de l'amont à l'aval du bassin versant de Tamaloute (1990-2020)

Matériels et méthodes

On a opté pour l'utilisation de quelques logiciels hydrologiques, tels que: HEC-DSS, HEC-SSP, Hyfran-plus, GR2A, pour effectuer des analyses fréquentielles sur les pluies annuelles, les pluies journalières maximales et les débits instantanés. Les données brutes utilisées relèvent de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, et du complément obtenu à partir du site : <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, qui fournit des ensembles de données météorologiques issues des recherches de la NASA. On a essayé de déterminer les probabilités au non dépassement des seuils pluviométriques annuelles, mensuelles et

journalières selon plusieurs intervalles de récurrence. Les courbes de l'IDF (Intensité-Durée-Fréquence) ont été construites pour caractériser l'évolution de l'évènement pluvieux en fonction de la durée. Une modélisation avec le modèle génie rural a été appliquée au pas de temps mensuel pour apprécier la nature et le comportement hydrologique du bassin en question.

Résultats et discussion

Analyse fréquentielle des pluies annuelles du bassin versant de Tamaloute

La loi statistique présentant le meilleur ajustement pour notre échantillon est celle de la distribution du Pareto généralisé (Fig.5). La majorité des observations appartiennent à l'intervalle de confiance limité entre 5% et 95%.

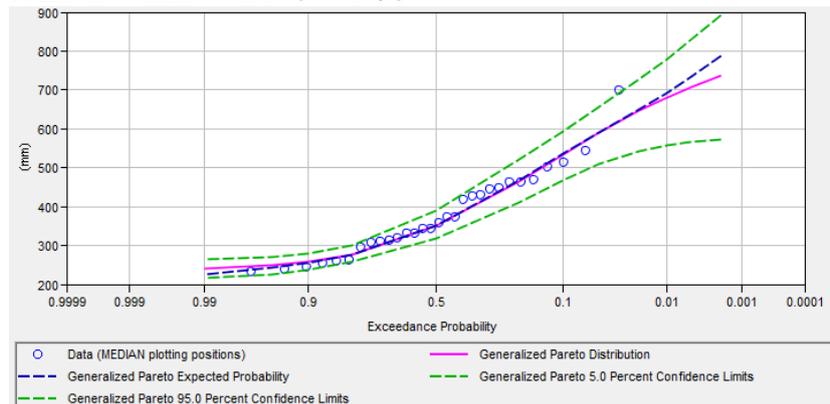


Figure 5 : Probabilité de dépassement pour les pluies annuelles enregistrées dans le bassin de Tamaloute (Ajustement par la loi de distribution générale de Pareto).

La simulation effectuée pour connaître les valeurs de la pluviométrie moyenne, ainsi que celles probables selon la limite de confiance de 5% et 95%, et qui correspondent aux périodes de retour fixées, montre que la moyenne arithmétique des pluies enregistrées et qui est de 368mm, appartient à la période de retour de 2 ans. Tandis que le maximum enregistré en 1996 (699mm) s'approche de la valeur moyenne qui correspond à une période de retour de 200ans. La majorité des observations apprtiennent aux périodes de retour de 2ans et 5ans (Tabl.1).

Tableau 1 : Résultats obtenus par la loi de distribution générale de Pareto

| Période de retour | Moyenne (mm) | Valeurs probables (mm) | Limites de confiance | |
|-------------------|--------------|------------------------|----------------------|--------|
| | | | 5% | 95% |
| 2 | 350,59 | 350,93 | 389,75 | 319,14 |
| 5 | 466,09 | 469,17 | 521,35 | 412 |
| 10 | 534,27 | 535,63 | 594,42 | 467,18 |
| 20 | 589,4 | 590,27 | 656,12 | 508,38 |
| 50 | 646,43 | 650,72 | 727,91 | 541,73 |
| 100 | 680,1 | 691,34 | 779,83 | 556,53 |
| 200 | 707,32 | 733,54 | 829,11 | 565,63 |
| 500 | 735,49 | 787,24 | 892,29 | 573,22 |

Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales

Le traitement statistique effectué sur la série des pluies relatives au bassin de Tamaloute, montre que le maximum enregistré de la pluie journalière était de 72,5 mm, tandis que le minimum était de 14,3mm. La moyenne de ces pluies journalières maximales est de 32,1 mm (tableau 2).

Tableau 2 : Statistique des Pjmax (bassin de Tamaloute, 1990-2020)

| Nombre d'individus : 34 | Caractéristique de l'échantillon |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Minimum | 14.3 |
| Maximum | 72.5 |
| moyenne | 32.1 |
| Déviatoin standard | 14 |
| Mediane | 27.7 |
| Coefficient de variation (Cv) | 0.437 |
| Skewness coefficient (Cs) | 0.999 |
| Kurtosis coefficient (Ck) | 3.19 |

Les pluies journalières maximales qui dépassent le seuil de 40 mm ont une probabilité au non dépassement de plus de 80% (Fig.6).

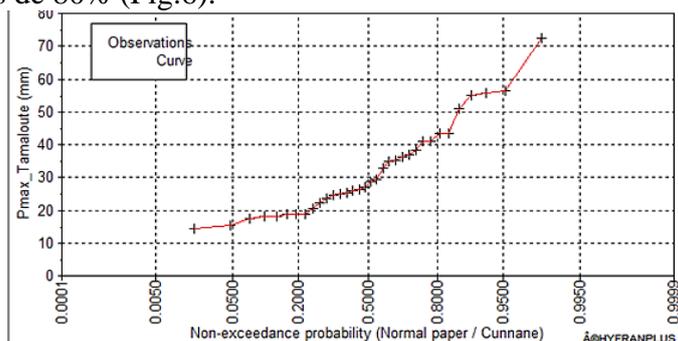


Figure 6 : Probabilités au non dépassement des Pjmax du bassin versant de Tamaloute

Le traitement de la durée étudiée, montre que les intervalles des Pjmax 10-20mm, 20-30mm, 30-40mm, 40-50mm, 50-60mm et 70-80mm représentent respectivement les rapports suivants: 23.52%, 35.35%, 17.67%, 11.67%, 11.67% et 2.94%. Il ressort que les pluies maximales journalières qui caractérisent ce bassin sont comprises entre 20 et 30mm (Fig.7).

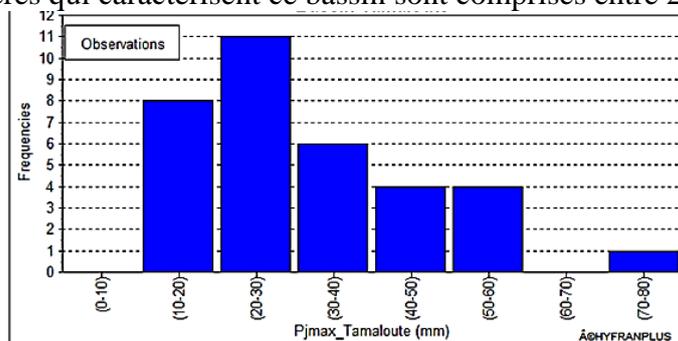


Figure 7 : Fréquences des Pjmax du bassin versant de Tamaloute

A travers l'extension de la série chronologique des pluies jusqu'à 2023, on peut constater que rare sont les pluies journalières maximales qui dépassent 45mm. Cette exception a été enregistrée uniquement cinq fois en: 2000, 2015, 2020, 2021 et 2022 (Fig.8).

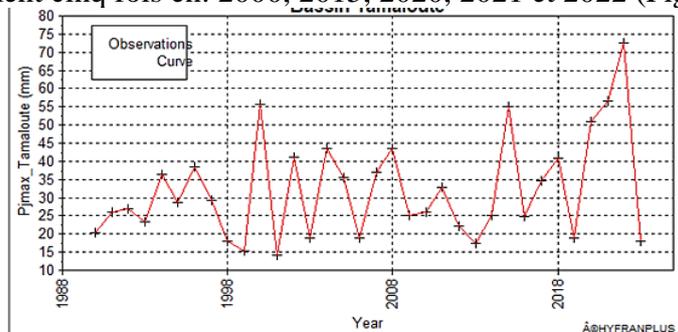


Figure 8 : les Pjmax enregistrées dans le bassin versant de Tamaloute (1990-2023)

Détermination des pluies maximales journalières selon les intervalles de récurrence 10, 20, 50 et 100ans

Pour déterminer les valeurs des pluies journalières maximales correspondants aux périodes de retour décennale, vingtennale, cinquantiennale et centennale, on avait recours au choix du teste d'indépendance (Wald-Wolfowitz), permis par le logiciel Hyfran-Plus. L'hypothèse nulle correspond à l'indépendance des observations. Après confirmation de l'acceptation de cette hypothèse à un niveau de confiance 5%, on a cherché la loi qui offre le meilleur résultat. Cette démarche a conduit au choix de la loi d'ajustement du Gamma (Maximum Likelihood).

L'ajustement statistique par la loi du Gamma (figure 9), montre que la fréquence décennale est connue par une P_{jmax} qui est de 49,7mm. La fréquence centennale est à 70,4 mm (Tabl.3).

Tableau 3: Périodes de retour de chaque P_{jmax} (bassin de Tamaloute)

| Période de retour | P _{jmax} | Probabilité au non dépassement | Intervalle de confiance |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 10 | 49.7 | 0.9 | 41.7 – 57.7 |
| 20 | 56.4 | 0.95 | 46.5 – 66.3 |
| 50 | 64.6 | 0.98 | 52.2 - 77 |
| 100 | 70.4 | 0.99 | 56.1 – 84.7 |

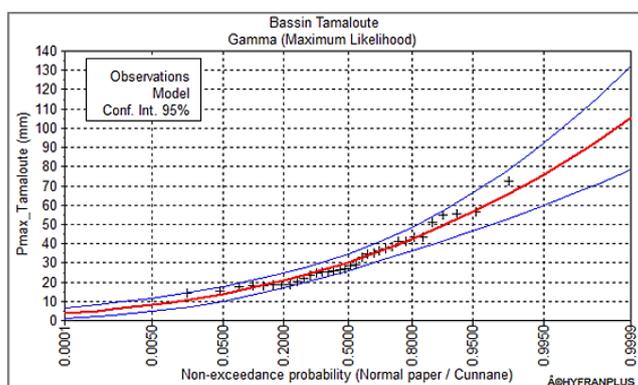


Figure 9 : Ajustement des P_{jmax} enregistrées dans le bassin versant de Tamaloute par la loi du Gamma.

Construction des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)

Les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) donnent la fréquence (ou son inverse: la période de retour) au cours d'un événement pluvieux d'une intensité maximale moyenne pendant une certaine durée.

Afin d'affiner l'analyse des P_{jmax} selon les intervalles de récurrences choisis (en ajoutant autres périodes de retour de 2, 25 et 75 ans), la construction des courbes intensités, durées fréquences, s'avère très utile pour apprécier l'évolution de l'intensité en fonction d'une durée de 24 heures. Le dimensionnement d'un tel ouvrage de traversée ou d'évacuation peut tirer profit des résultats offerts par ces courbes IDF (Fig.10).

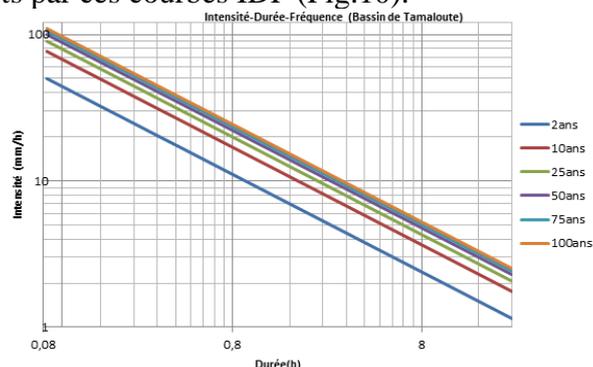
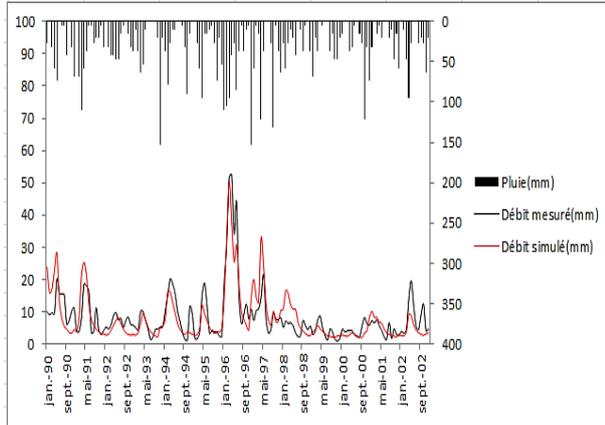


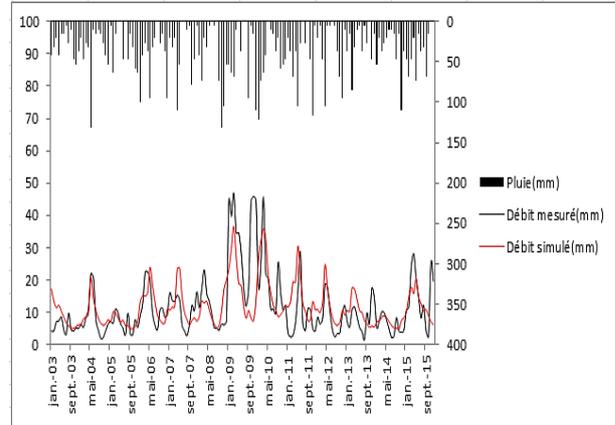
Figure 10 : Les courbes IDF du bassin versant de Tamaloute

Modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps mensuel

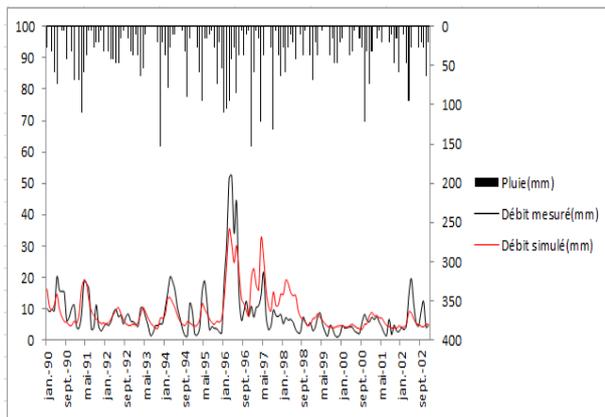
Afin de suivre le comportement du bassin versant de Tamaloute quant à sa réponse hydrologique vis-à-vis de l'effet des pluies mensuelles, on a utilisé le modèle génie rural pour le calage (Fig.11 et 12) et la validation (Fig. 13 et 14) sur les sous périodes (90-2002) et (2003-2015), du fait que les données hydrométriques disponibles couvrent uniquement cette période.



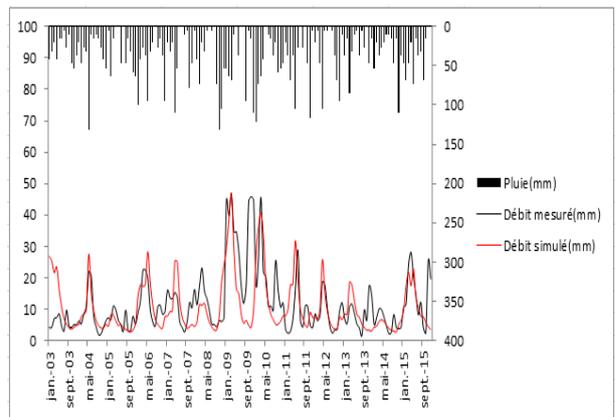
Figures 11 : Calage sur la période 90-2002



Figures 12 : Calage sur la période 2003-2015



Figures 13 : Validation sur la période 90-2002



Figures 14 : Validation sur la période 2003-2015

En somme, on constate que les critères d'efficacité (critère de Nash) sont satisfaisants et significatifs, ce qui confirme la robustesse du modèle dans la simulation au pas de temps mensuel. Plusieurs constatations peuvent être tirées des hydrogrammes obtenus par cette modélisation quant au comportement du bassin vis-à-vis de la réponse hydrologique. On se contente de présenter uniquement le résultat figurant l'évolution de la capacité du réservoir sol (Fig.15) et du réservoir de routage (Fig.16) au cours de la sous période 2003-2015.

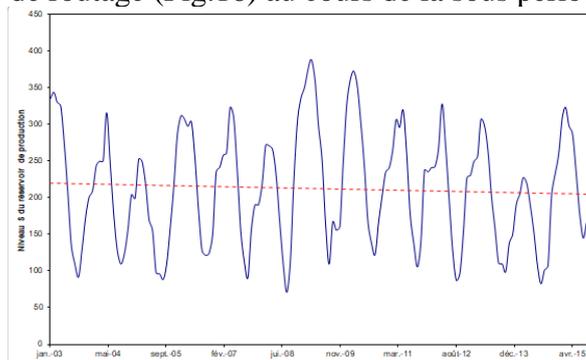


Fig.15. Evolution de la capacité du réservoir de production du bassin de Tamaloute (2003-2015)

Les fluctuations mensuelles de la capacité d'infiltration du réservoir sol sont sensibles aux pulsations pluviométriques, notamment à partir de 2008 où la capacité de production a augmenté. Mais l'année 2013 mentionne un abaissement très remarquable dû à l'effet conjugué d'une évapotranspiration élevée et une faible pluviométrie, ajoutant à ceci l'effet incontournable de l'état du couvert végétal et son impact sur le taux d'infiltration. La tendance générale de la capacité du réservoir de production est à une légère baisse de 2003 à 2015.

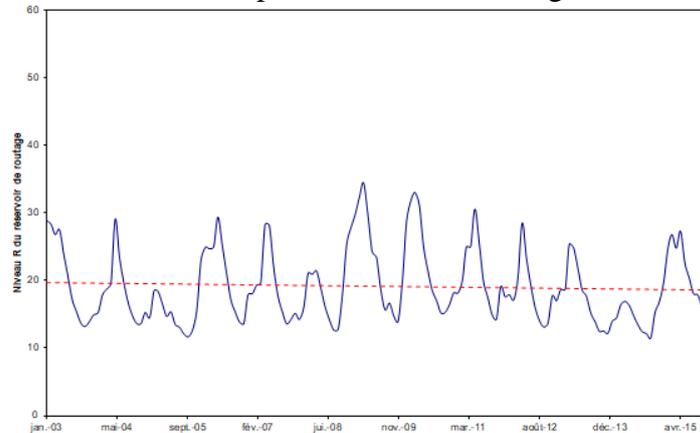


Fig.16. Evolution de la capacité du réservoir de routage du bassin de Tamaloute (2003-2015)

Le réservoir de routage (eau gravitaire) a marqué un soulèvement à partir de 2008, et vu les valeurs du paramètre X2 (Paramètre d'échange souterrain), le système est toujours en gagne, du fait de l'apport souterrain du bassin hydrogéologique. En général, la tendance est aussi à une légère baisse durant la période étudiée.

Conclusion

Le traitement et l'analyse effectués sur les enregistrements pluviométriques et hydrométriques à l'aide de plusieurs logiciels, montre qu'à l'échelle annuelle, la majorité des observations appartiennent aux périodes de retour de 2ans et 5ans. Les pluies journalières maximales comprises entre 20 et 30mm représentent la fréquence la plus élevée (35,35%) de l'ensemble des observation durant les trois dernières decennies. Ce rapport de fréquence ne dépasse guère la pluie journalière maximale de la période de retour de 10ans qui est de 49,7mm. La réponse hydrologique du bassin de Tamaloute est tributaire de l'intensité des averses et de l'état d'humidité du sol. La réponse tardive constatée d'après les hydrogrammes obtenus par la modélisation au pas de temps mensuel, montre la contribution du système aquifère (échange souterrain) dans l'alimentation du réservoir de routage. La tendance générale est à une légère baisse depuis 2003, que ce soit pour le réservoir de production ou de routage.

Bibliographie.

- Beirlant, J., de Wet, T., Goegebeur, Y., (2006). A goodness-of-fit statistic for Pareto-type behaviour. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 186, 99-116.
- El Adlouni, S., Bobée, B. et Ouarda, T. B.M.J (2008). On the tails of extreme event distributions in Hydrology. *Accepté au Journal of Hydrology*.
- Evaluation of runoff estimation from GRACE coupled with different meteorological gridded products over the Upper Blue Nile Basin ,October 2023*Journal of Hydrology Regional Studies*.
- Mouelhi., S. (2003) : Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. 323 p.
- Rezzoug., F. (2014) : Modélisation de la relation pluie-débit par les modèles conceptuels à réservoir, (Application au bassin versant de l'ISSER) 126 p.

Perturbations méditerranéennes, précipitations extrêmes et inondations au nord-est du Maroc

Allal EL BAYE

Université. Mohammed Premier, Oujda, FLSH,

Département de Géographie, Maroc

elbayeall@gmail.com

Résumé: Plusieurs exemples de jours pluvieux témoignent de cette concentration pluviométrique. Il arrive qu'une tranche pluvieuse quotidienne recueille plus du tiers du total pluviométrique annuel. Ces précipitations extrêmes génèrent souvent des crues éclair débordantes, qui surprennent par l'ampleur des désastres et des dévastations qu'elles laissent derrière elles, aggravés, entre autres, par les conditions géographiques de petits bassins versants. La fréquence apparente, pendant ces dernières décennies, du nombre de ces crues et des inondations, ne peut en aucun cas signifier le rôle d'éventuels «changements climatiques» puisque de très grandes inondations avaient déjà été citées dans les sources historiques pendant les siècles derniers.

Afin d'identifier les différentes structures atmosphériques qui ont caractérisé ces jours de pluies extrêmes, nous aurons recours à l'analyse des facteurs météorologiques qui se fera essentiellement par le biais des cartes météorologiques (niveau sol et 500 hPa), par les images satellitaires....

Mots clés : perturbations méditerranéennes, précipitations extrêmes, crues éclair, inondations, bassins versants, nord-est du Maroc.

Introduction

Si le climat "méditerranéen", dans notre région, est souvent caractérisé par une forte sécheresse climatique et hydrographique, en revanche, les abats d'eau liés, entre autres, aux perturbations méditerranéennes sont connus, parfois, par leur aspect violent. La répartition des précipitations, dans ce cas, est très restreinte, à la fois, dans le temps et dans l'espace. La structure aérologique leur octroie un caractère d'une forte concentration et une grande irrégularité. Cet aspect violent des précipitations est à l'origine des inondations qui ont eu lieu dans le **nord-est** du Maroc qui ont marqué la mémoire collective, et façonné les paysages des vallées et des zones urbanisées. Ces inondations augmentent les risques hydrologiques qui sont liés en premier lieu à la vulnérabilité des espaces dans notre région avant qu'ils soient dus aux phénomènes naturels dont les précipitations intenses, donc aux aléas.

La fréquence apparente, pendant ces dernières décennies, du nombre de ces crues éclair et des inondations, ne peut en aucun cas signifier le rôle d'éventuels «changements climatiques» puisque de très grandes inondations avaient été citées dans les sources historiques pendant les siècles derniers.

L'objectif principal de cet article est d'exposer, de discuter et d'échanger au sujet des systèmes méditerranéens, sujet très peu abordés, dans la littérature, du moins dans le milieu des climatologues marocains. Donc, cette mise au point sur les perturbations méditerranéennes sera exposée à partir d'un prototype météorologique d'un épisode de deux jours les 17 et 18 novembre 2003. Il est à signaler dans ce sens qu'un autre exemple similaire à cet épisode où les tranches journalières ont dépassé les 100mm, il s'agit de la fin du mois d'octobre 2008 et surtout des 26 et 27...

1) PERTURBATIONS MEDITERRANEENNES :

Ce sont des systèmes aux caractères "subtropicaux" qui naissent et se développent aux latitudes "méditerranéennes" (entre environ 20 et 40° N et S). Subtropicales, voire tropicales, parce qu'elles sont alimentées par des poussées de l'air chaud en provenance plus loin au sud qui entrent au contact avec les descentes polaires. Cet adjectif qualificatif est lié à la dynamique de l'atmosphère, aux anticyclones et aux dépressions qui sont responsables d'un climat de transition au niveau de la Méditerranée en particulier et aux latitudes subtropicales en général. L'ensemble prend un aspect tourbillonnaire et la masse nuageuse s'organise autour de vortex de taille réduite et de forme ramassée, une taille très inférieure à celle des perturbations dites de "front polaire". Ce sont des systèmes qui "*ne correspondent évidemment en rien au modèle "norvégien" ni pour la taille, ni pour les processus*" (J.P. VIGNEAU, 1985).

"Trois traits semblent attachés, concurremment ou non, à leur mise en place sur la Méditerranée et ses rives: la formation d'un vortex que traduit l'aspect tourbillonnaire de la masse nuageuse, un effet de blocage de la circulation, une alimentation en air d'origine tropicale" (idem' 1987) :

1.1- Le vortex : ce que nous qualifions de vortex sont des tourbillons aérologiques, de tailles réduites.

Ils sont visibles sur les images satellitaires par des amas nuageux d'une forme ramassée. Ils gardent une taille inférieure à celle des perturbations dites de « Front polaire ». Ils sont générés par un système né du contact de descentes polaires et de poussées subtropicales, voire tropicales. Ces vortex, quand ils sont bloqués au nord vers l'Europe occidentale par l'étirement (dorsale) de l'anticyclone des Açores et/ou de l'anticyclone centré sur l'Europe, ou à l'Est du Maroc Oriental, ils génèrent des pluies fortes et un total pluviométrique très apprécié.

1.2- Le blocage : il s'agit du blocage de la perturbation méditerranéenne par l'anticyclone en la bordant par le nord et par conséquent, la perturbation se trouve isolée de la masse d'air froid du nord. De part et d'autre de l'anticyclone, on retrouve deux systèmes perturbés de natures différentes, un d'ouest «océanique» au nord et un système méditerranéen au-dessus de la Méditerranée-Maghreb à caractère subtropical au sud. Parfois, l'anticyclone prend une forme incurvée de l'Océan Atlantique au niveau du Maroc jusqu'à la Mer Noire et la Turquie en passant par l'Europe pour exprimer sa force et sa puissance...

1.3- Alimentation en air chaud : c'est de l'air chaud en provenance du sud, parfois de très loin, souvent continental, parfois océanique du large de la Mauritanie-Sénégal, continentalisé puisqu'il traverse le Sahara. Cet air chaud peut être considéré comme le «carburant» qui alimente le système et lui donne une force et un certain dynamisme...

Leurs **structures aérologiques** se résument en la présence des vallées courtes et bien développées en latitude (à faible longueur d'onde et à forte amplitude), des courants de sud et des gouttes. Ces configurations surmontent souvent une dépression centrée sur la Méditerranée-Maghreb. Le Maroc méditerranéen se trouve dans une situation de transition ($1010 < P < 1020$ hPa) ou dans une situation dépressionnaire ($P < 1010$ hPa). Le flux, par conséquent est du nord en général, il témoigne de l'entrée de l'air méditerranéen. Sans trop être affirmatif, on pense que les pluies intenses sont souvent «le produit» d'une structure composée en premier lieu de la couple «goutte-dépression»...

Le flux qui prédomine est le «célèbre retour d'est» (**doc.4**) qui ramène l'air méditerranéen et qui vient se buter contre les versants nord-est des montagnes méditerranéennes.

A noter que la fréquence des perturbations méditerranéennes dans l'année semble modeste par rapport aux systèmes océaniques. En revanche, leur apport moyen journalier en eau est supérieur à celui des océaniques, du moins dans le nord-est du Maroc. Dans une étude sur le couloir d'Oujda-Taourirt (période 1981-1985), les perturbations méditerranéennes représentent 22% de l'ensemble des systèmes

frontaux pluvieux ou exempts de précipitations (A. EL BAYE. 1990). Le même constat a été prouvé par d'autres recherches réalisées sur la Basse Malwya, le Rif Central et le Rif Occidental.

2) LA MISE EN PLACE DU SYSTEME :

Les documents 1 et 2 qui illustrent les 17 et 18 novembre 2003 confirment la mise en place de la perturbation méditerranéenne à travers la forme ramassée de l'amas nuageux qui s'enroule autour d'un vortex.

2.1- Les images satellitaires :

Le 17 (doc.1.1) on observe, au centre du système perturbé qui couvre la Méditerranée occidentale, la formation d'un vortex à couverture très discontinue sur le Maroc-Algérie et sur la mer entre l'Andalousie et le Maroc. Ils constituent des «pacqués» nuageux irréguliers, très élevés et donc, bien développés qui «jaillissent» de la nappe.

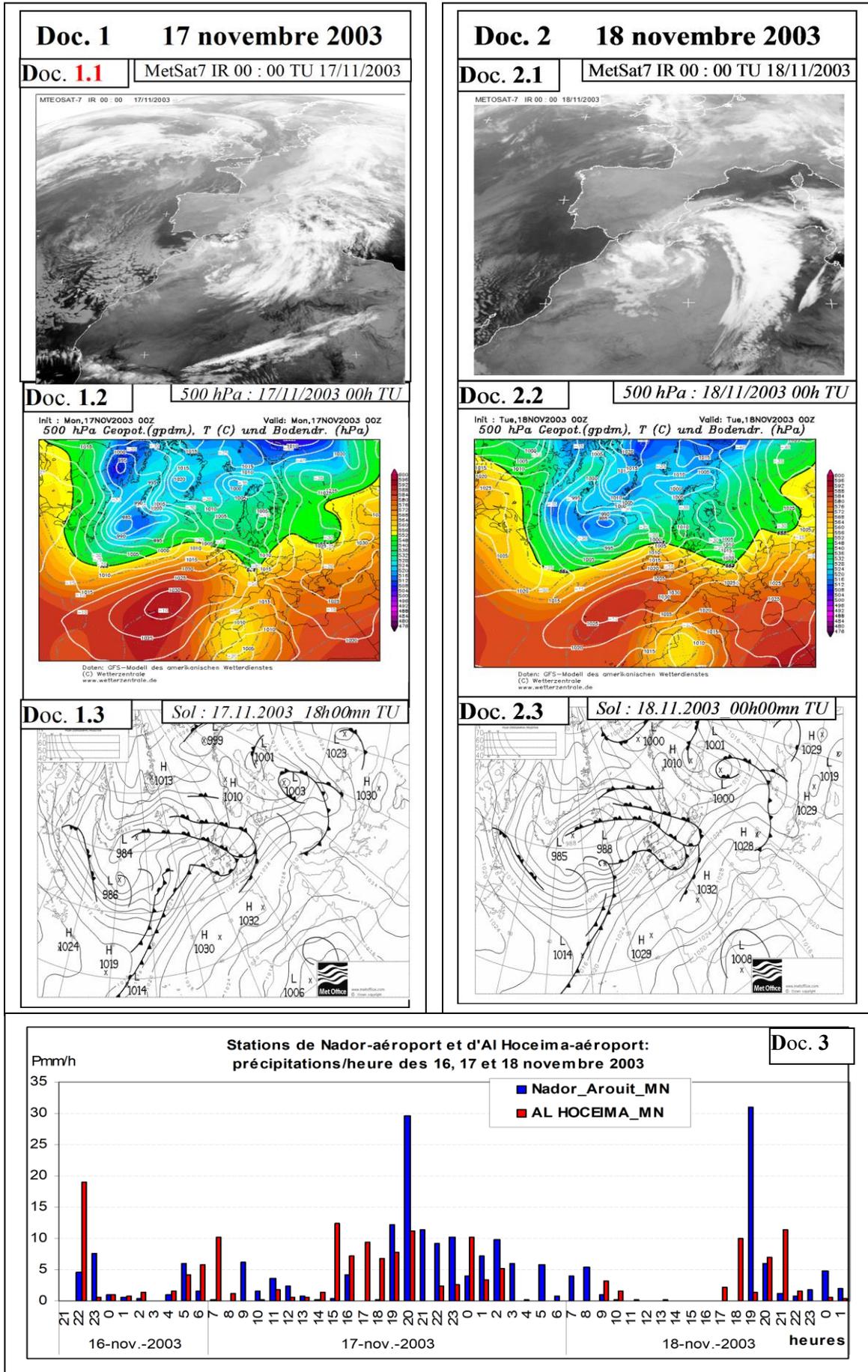
Le 18 (doc.2.1), le NE du Maroc se trouve dans le vortex sous des nuages isolés de l'amas nuageux. Ce dernier forme un ensemble en spirale, et se distingue de l'alignement nuageux discontinu qui s'étendait la veille de la mer Baltique au Maroc-Algérie. La perturbation méditerranéenne est donc à son «apogée».

Sur les deux images satellitaires, l'enroulement de l'amas nuageux fait bénéficier la région d'un flux de nord-est appelé dans le jargon météorologique «**retour d'est**». Ce dernier s'engouffre dans les petits bassins versants, à fortiori urbanisés ou dominant des centres urbains et orientés en général vers l'est, le nord ou le nord-est (**doc.4**). Par conséquent, ce retour d'est ascendant donne des précipitations très intenses causant des inondations dans les agglomérations. Sous de telles intensités, ces petits bassins versants, qui ont longtemps été sous-estimés et souvent ignorés par les projets d'aménagements faute d'informations fiables à leur sujet, sont capables de débits très importants.

2.2- La cartes 500hPa :

La topographie 500hPa nous apportent que depuis le 11 novembre 2003 on assiste à la descente de l'air froid matérialisée par la configuration d'une vallée large et bien développée sur le large de l'Europe. Cette descente froide progresse vers le sud en attirant des advections chaudes sur sa face orientale.

A partir du 16, un courant d'ouest vient d'isoler une goutte froide au-dessus de l'Ibérie. Les 17 (**doc.1.2**) et 18 (**doc.2.2**), cette goutte de -20° se détache de son origine pour migrer vers le sud et s'installer cette fois sur le Maroc-Algérie. On a remarqué que les jours les plus arrosés dans la région sont souvent ceux qui s'accompagnent d'une goutte froide. Cette dernière crée une forte instabilité dans l'atmosphère qui est due essentiellement à la forte amplitude thermique entre le sol et le niveau 500hPa, cette amplitude peut atteindre 40° à 50° en moyenne, d'où sa forte instabilité...



2.3- Les cartes-sol (niveau 0) :

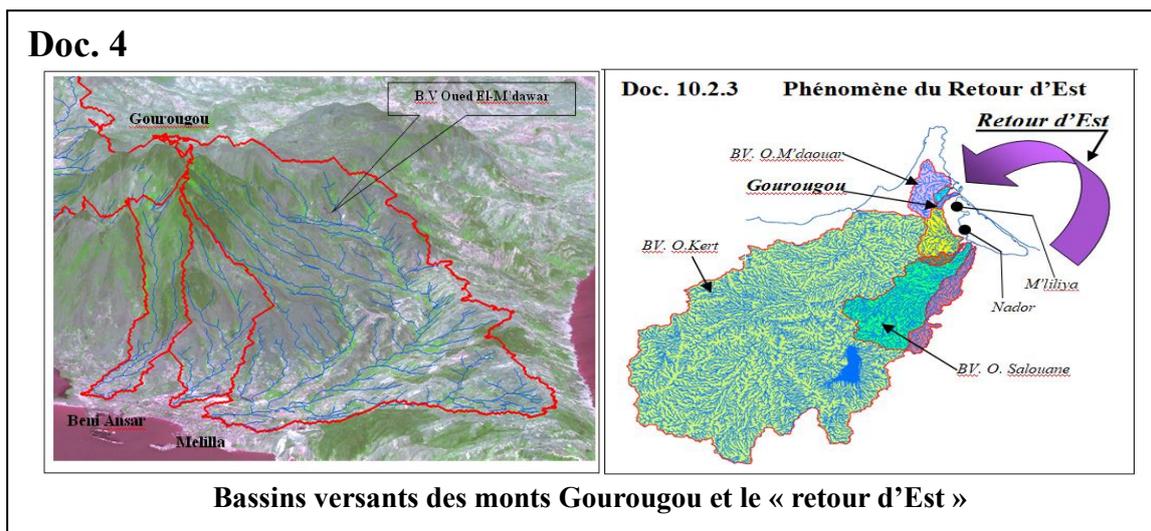
Le 16 novembre 2003, le champ de pression est un couloir dépressionnaire méridien joignant la mer de Barents (nord des pays scandinaves) au Maroc-Algérie. Une perturbation atlantique centrée sur le golfe de Gascogne fait passer un front froid d'abord sur l'ouest du Maroc à 02h 44mn, puis sur le NE marocain dans la soirée du 16 (Doc.3). Cette situation a donné 35.1mm de pluies à Al-Hoceima-aéroport, 23.2mm à Nador-aéroport mais seulement 1.2mm à Oujda-Angad...

Les 17 (doc.1.3) et 18 (doc.2.3), le couloir dépressionnaire indiqué ci-dessus a été fermé par un vrai rempart anticyclonique qui prend une forme incurvée de l'Atlantique au large du Maroc jusqu'à la Méditerranée orientale en passant par la France. Il bloque et isole la perturbation à cheval sur la mer Méditerranée et le Maghreb et qui tourne autour d'elle sans pouvoir se déplacer vers l'ouest.

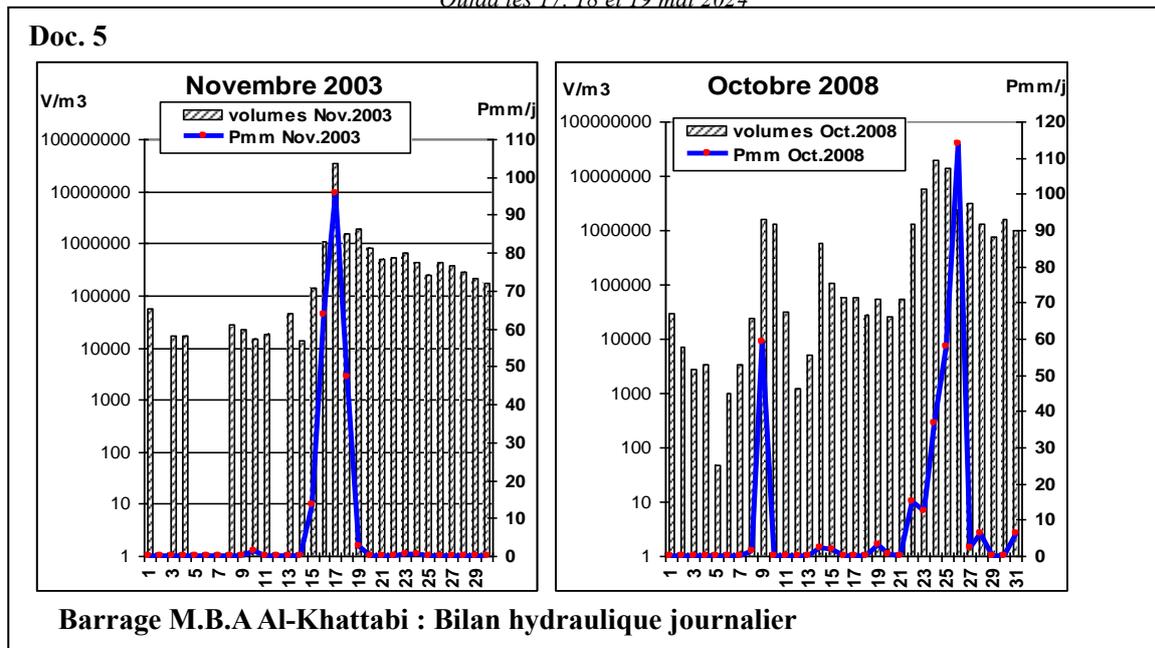
L'alimentation en air chaud se confirme par la présence du flux de sud à sud-est à l'avant du front, donc d'origine saharienne, il passe par l'est algérien et la Tunisie avant d'arriver sur la mer Méditerranée. Cet air méditerranéen trop chargé en humidité, arrivera sur la région du côté nord-est, c'est donc le «retour d'est».

Les tranches de pluies quotidiennes s'inscrivent parmi les records que la région a pu enregistrer (127mm à Nador-aéroport, 121.9mm à la station de jaugeage Tamallaht sur l'oued N'kkour, 95mm à Al-Hoceima-aéroport...). Il faut signaler ici qu'il s'agit d'un épisode de trois à quatre jours et qui totalisent 209mm à Nador (les 16, 17 et 18) et 186.4mm à Al-Hoceima (les 15, 16, 17 et 18 novembre).

L'intensité des précipitations (doc.3) montre l'essentiel des quantités de pluies horaires et que les records sont autour de 30mm/h. Les épisodes pluvieux (quelques jours successifs), provoquent souvent des crues éclair et par la suite, des inondations. Ces crues remplissent à elles seules jusqu'à 70%, voire le total des capacités des barrages selon des rapports de l'agence du bassin versant : «Cette situation a enregistré le remplissage total des retenues du barrage M.B.A Al-Khattabi durant les 24 heures allant du 17/11/2003 à 13h au 18/11/2003 à 13h [...] le débit maximum entrant au barrage a été de 1200m³ et a été enregistré le 18.11.2003 à 1h [...] le débit de pointe enregistré le 26 octobre 2008 est estimé à 2500m³/s avec un temps de remontée a été moins de 30mn à la station de Tamallaht...», A.B.H. Al-Hoceima, 2011 (Doc.5).



Oujda les 17, 18 et 19 mai 2024



Conclusion

Il est certain que les systèmes méditerranéens représentent une grande diversité. Nous avons exposé ici un exemple qui résume les grands mécanismes atmosphériques de la mise en place de ces systèmes. Les outils de l'analyse sont certes insuffisants mais néanmoins, ils nous ont permis d'identifier les facteurs principaux qui sont à l'origine du fonctionnement et de la genèse des perturbations méditerranéennes. La grande question que l'on doit se poser est la suivante : y aurait-il un fonctionnement similaire à celui qu'on vient d'exposer concernant d'autres climats méditerranéens en d'autres régions ou d'autres climats à travers la terre tout court ?

Références bibliographiques

الباجي علاء، 2022: "البحر الأبيض المتوسط ومناخ المغرب: الخصائص العامة والخصوصيات الإقليمية - شمال شرق المغرب نموذجاً- أطروحة لنيل دكتوراه الدولة في الجغرافيا، تخصص علم المناخ، جامعة عبد الملك السعدي، كلية الآداب والعلوم الإنسانية، تطوان، يوليوز 2022، 323ص.

EL BAYE A., 1990 : "Recherches sur l'ambiance climatique dans le couloir d'Oujda-Taourirt", Doctorat de 3^{ème} cycle, Toulouse, 448 p.

EL BAYE A., 1993: "De la circulation aux temps : l'exemple des très beaux temps dans le nord-est du Maroc", Actes du colloque de Bourgogne , Dijon (sept. 1992), publications de l'Association Internationale de Climatologie; vol.V, p.p. 221-224. pub.Fac.Lettres, Rabat, p.p. 43-57.

EL BAYE A., 1997 "A propos des perturbations au Maroc et leur structure aérologique". Actes du colloque de Rabat (Janvier 1994), l'Association Nationale de Climatologie (ANACLIM),

VIGNEAU J.P., 1985 : "Climat et climats des Pyrénées orientales". Thèse de Doct. d'Etat, Dijon, 618 p.

VIGNEAU J.P. , 1987 : "1986 dans les Pyrénées Orientales : deux perturbations méditerranéennes aux effets remarquables". Rev. Céog. des Pyr. Et du S.O., T.58, fasc 1, pp. 23-54.

Références électroniques :

Ducrocq V., AULLO G. et SANTURETTE P.: 2003 "Politique de gestion des inondations en France: l'exemple du Gard, application au bassin des Gardons". La Météorologie - n° 42 - août 2003 http://www.ohmfv.fr/Documents/confs/M_Lescure_Vulnerabilite.pdf

LESCURE Michel, 2004 : "Les précipitations intenses et les inondations des 12 et 13 novembre 1999 sur le sud de la France". Actes des Journées Techniques/ Risques Naturels: Inondation, Prévision, Protection /Batna 15 et 16 décembre 2004.

http://pluiesextremes.meteo.fr/media/upload/19991112/Article_LA_METEOROLOGIE_num_42_aout_2003.pdf

RAYMON F., ULLMANN A. et CAMBERLIN P. 2016 : "Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen: quelles tendances entre 1950 et 2013? ", *Cybergeo*: Environnement, Nature, Paysage, document 760, mis en ligne le 07 janvier 2016, <http://journals.openedition.org/cybergeo/27410>

LES RISQUES NATURELS ASSOCIES A LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET LEUR INFLUENCE DANS LE MOYEN SEBOU ET STRATEGIES D'ADAPTATIONS

Soukaina El Aissaoui¹, Younes El Fater² et Abdelhamid Janati Idrissi³

Equipe de recherche : Milieux Naturels ; Aménagement et Dynamiques socio-spatiales, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, sais –Fès

1. Étudiante chercheuse en pôle doctoral. *Email : Soukaina.elaisaoui2@usmba.ac.ma*
2. Étudiant chercheur en pôle doctoral. *Email : elfateryounes@gmail.com*
3. Prof. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, sais –Fès *Email : abdelhamid.janati@gmail.com*

Résumé: Les risques liés aux changements climatiques sont parmi les problèmes les plus importants au Maroc. Ils exigent des stratégies d'adaptation et des programmes d'interventions urgents afin de protéger les populations des menaces naturelles. Au cours de ces dernières décennies, de nombreuses régions du Maroc ont été soumises aux effets néfastes des risques hydroclimatiques, plus particulièrement au cours des phases d'inondation et de sécheresse, qui ont affecté les biens des populations, endommagé les espaces agricoles et les infrastructures routières. Le bassin moyen de l'oued Sebou situé au Nord du Maroc dans la limite sud du Prérif, est l'une des zones les plus vulnérables aux risques liés au climat. Il a été plusieurs fois exposé aux événements pluviométriques exceptionnels surtout lors des années humides comme en 2008-09 et en 2009-10, responsables d'inondations catastrophiques. D'autre part, il y a eu des épisodes fréquents de sécheresses. Cet article a pour but d'identifier les caractéristiques des changements climatiques au niveau du bassin du Moyen Sebou. Cette étude vise aussi à discuter l'impact de la variabilité climatique sur les mutations spatiales du bassin de l'oued Sebou qui nécessite une adaptation pour une meilleure gestion des ressources naturelles.

Mots clés: Risques, Changements Climatiques, Inondation, Sécheresse, Moyen Sebou.

NATURAL RISKS ASSOCIATED WITH CLIMATE VARIABILITY AND THEIR INFLUENCE IN THE SEBOU MIDDLE AND ADAPTATION STRATEGIES

Abstract: Climate change risk is the most significant topics in Morocco. They require urgent adaptation strategies and intervention programs to protect populations from natural threats. In recent decades, many regions of Morocco have confronted to the effects of hydroclimatic risks, especially during flood and drought phases, which have affected people's property, damaged agricultural areas and infrastructure. The middle basin of the Wadi Sebou, located in northern Morocco on the southern side of the Prérif, is one of the most vulnerable areas to climate risks. Several times the region has exposed to exceptional rainfall events, especially during wet years such as 2008-09 and 2009-10, which caused catastrophic flooding. On the other hand, there have been frequent episodes of droughts. The purpose of this article is to identify the characteristics of climate change in the Middle Sebou basin. This study also aims to discuss the impact of climate variability on the spatial changes of the Wadi Sebou basin, which requires adaptation for better management of natural resources

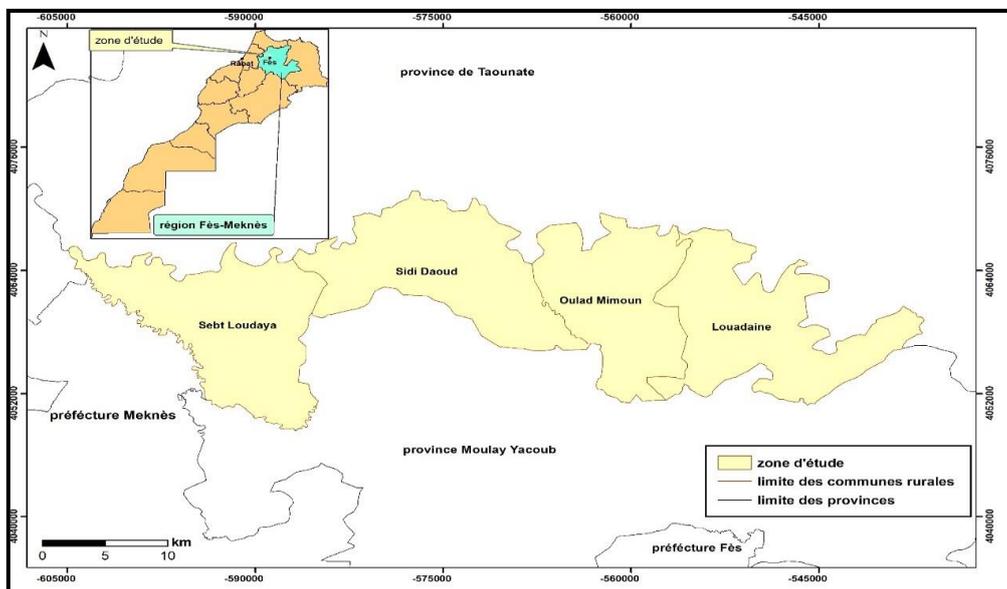
Keywords: Risks, Climate Change, Flood, Drought, Middle Sebou.

Introduction

Le changement climatique est considéré comme le plus grand défi auquel l'humanité est confrontée, étant donné les changements catastrophiques majeurs qui sont susceptibles de se produire sur les plans économique, social et environnemental. Les modèles climatiques ont prédit que la terre connaîtra un réchauffement croissant au cours du 21^e siècle. Le climat de la région de Fès-Meknès appartient au domaine méditerranéen qui se caractérise par la présence de deux phases climatiques au sein de l'année : une période fraîche et pluvieuse entre octobre et avril et une autre sèche entre mai et septembre. Mais cette particularité peut changer selon les années surtout pendant les phases de sécheresses.

1. Description de la zone d'étude

Sur le plan administratif, cette zone se situe dans la vallée du Moyen Sebou et se rattache à la province de Moulay Yacoub, au sein de la région de Fès-Meknès. Elle est constituée des communes Louadaine, Oulad Mimoun, Sidi Daoud et Sbet Loudaya. Elle est bordée au nord par la province de Taounate, et à l'ouest par la préfecture de Meknès (fig.1).



Carte n°1 : Situation géographique de la zone d'étude

Le cadre naturel de la zone étudiée dans le Moyen Sebou est caractérisé par plusieurs caractéristiques qui sont imprimées par la nature géologique et géomorphologique du terrain ayant pour conséquence la présence dans cette zone pré-rifaine d'un relief marqué par une topographie constituée de basses collines avec des altitudes moyennes de 300 m. La couverture végétale du sol est caractérisée par une diversité visible d'un endroit à l'autre, mais généralement elle est faible dans les zones Est et Nord sur le côté droit de l'oued Sebou où le sol est représenté par le type vertisols principalement.

La zone d'étude est incisée par un réseau hydrographique important caractérisé par sa densité et sa force, car on rencontre plus de quatre oueds à écoulement permanent et saisonnier qui se jettent dans la vallée principale de la zone. En outre la région étudiée porte une importante charge humaine active le long de la vallée du Sebou, d'où il en résulte un taux élevé de la croissance démographique dans les communes étudiées selon les statistiques de 1994, 2004 et 2014.

2. Méthodes et résultats

2.1. Méthode SPI (Indice standardisé des précipitations)

Le Maroc a connu des conditions difficiles causées par la persistance et la sévérité de la sécheresse depuis les années 1970 (Sebar et al., 2013). La zone d'étude n'a pas échappé à ces conditions difficiles, elle se caractérise par une irrégularité des précipitations annuelles et interannuelles. Cette variabilité occasionne des périodes déficitaires qui peuvent se prolonger en périodes de sécheresse. Pour étudier l'irrégularité interannuelle et dégager les périodes humides et les périodes Sèches, nous avons appliqué l'indice standardisé des précipitations (SPI).

Pour calculer l'SPI, on utilise seulement les données des précipitations annuelles. L'SPI permet de quantifier l'écart-type des précipitations d'une période par rapport aux précipitations moyennes de la série étudiée. La règle de calcul est :

$$SPI = (P_i - P_m) / \sigma$$

P_i : le cumul de la pluie pour une année i ;

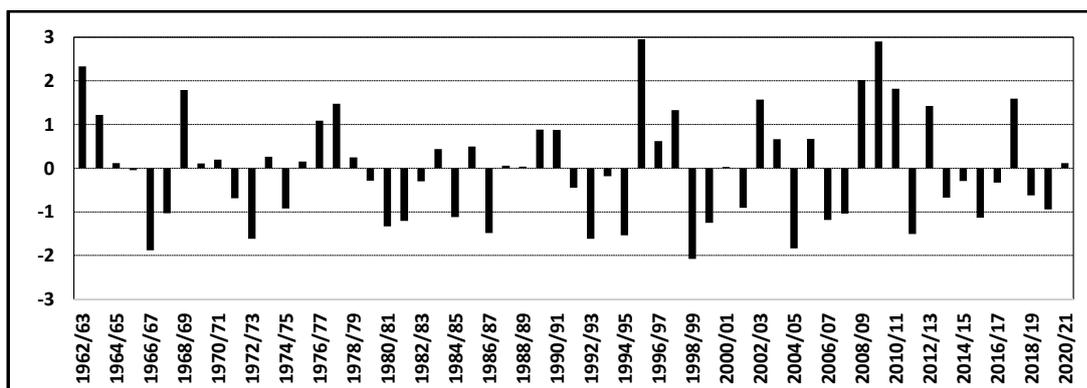
P_m : la moyenne des pluies annuelles observées pour une série donnée ;

σ : l'écart-type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

L'indice SPI est parmi les nombreux indices d'appréciation de la sécheresse pluviométrique. Il permet de calculer des déficits pluviométriques et détermine les périodes ou cycles humides, ainsi que les cycles secs. Suivant les valeurs de l'indice SPI, une classification de la sécheresse est effectuée (Tableau 1).

Tableau n°1: Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).

| Classes du SPI | Degré de la sécheresse |
|----------------|------------------------|
| SPI > 2 | Humidité extrême |
| 1 < SPI < 2 | Humidité forte |
| 0 < SPI < 1 | Humidité modérée |
| -1 < SPI < 0 | Sècheresse modérée |
| -2 < SPI < -1 | Sècheresse forte |
| SPI < -2 | Sècheresse extrême |



Source :

les données de l'Agence du Bassin de Sebou à Fès

Figure n°1: Valeurs annuelles de l'Indice Standardisé des Précipitations de la station de Azzib Soltan entre (1962-2021).

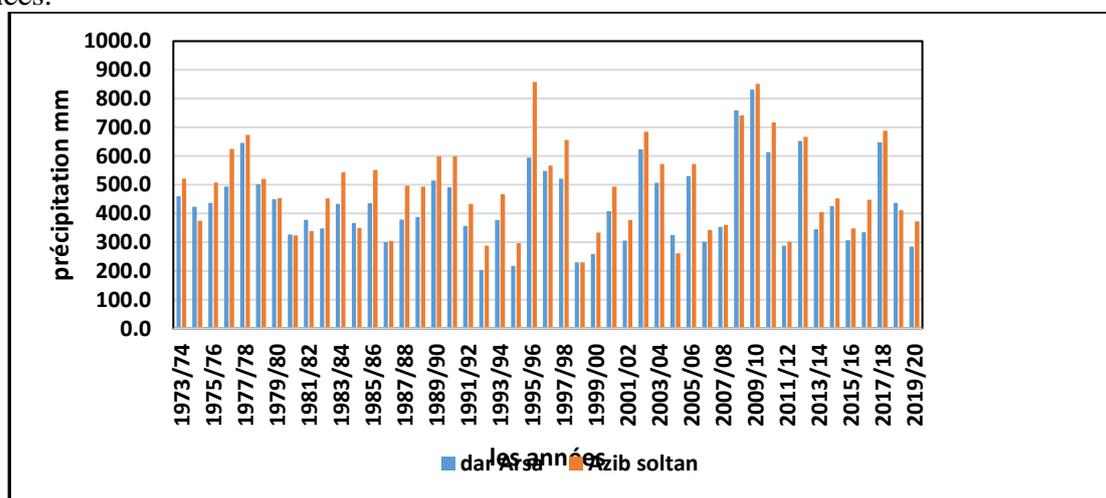
La station Azzib soltane a connu environ 27 années humides au cours de la période (1962-63/2010-11). En revanche, on a détecté environ 28 années sèches. Ces données montrent

que cette station a reçu des précipitations importantes par rapport aux autres stations, par exemple Dar Arsa.

Il est à noter que cette situation confirme l'état de sécheresse que le Maroc a connu en général depuis les années quatre-vingt, malgré la présence de quelques années pluvieuses qui ponctuent cette longue période sèche et le rôle qu'elles ont pu jouer dans l'atténuation de la sévérité de cette sécheresse.

2.2. Les inondations: cas de l'année 2008-2009/2009-2010

Les changements climatiques au Maroc se sont manifestés par l'abondance pluviométrique de l'année 2008-2009, des intensités journalières automnales record ont été enregistrées, en particulier dans le nord du Royaume. Des précipitations hivernales abondantes accompagnées de neiges ont chuté sur le Haut et le Moyen Atlas, le Rif et les plateaux de l'Oriental. Dans le bassin du Sebou, l'activité cyclonique des deux années est à l'origine d'apports d'eau excédentaires apportés par des crues exceptionnelles des sous bassins rifains et moyen-atlasiques. Les barrages ayants atteint leur maximum de recharge n'ont pu jouer leur rôle de protection contre les inondations qui ont ravagé la plaine du Gharb pendant ces deux années.



Source : les données de l'agence du bassin Sebou à Fès

Figure n°2 : les précipitations annuelles des stations Azib soltane et Dar Arsa au cours de la période (1973-2020)

Sur la base des données disponibles au niveau des communes et administrations publiques de l'Agence Hydraulique du Bassin du Sebou, nous pouvons mesurer l'importance des pluies tombées et l'impact des pertes dues aux inondations. D'après les cumuls annuels enregistrés pour les deux années, on relève que la majorité des stations du bassin de Sebou affichent des hauteurs supérieures à 600 mm. La zone rifaine exposée aux flux perturbés océanique humide est la plus arrosée avec des valeurs annuelles excédant 1200 mm pour quatre stations en 2008-09.

Pour le Moyen Sebou, les données hydrologiques utilisées sont celles des deux stations de Dar Arsa durant la période 1973/2020, situées au milieu de la zone étudiée, et d'Azib Soltane de 1962 à 2020. Pour le Moyen Sebou, d'après la figure n° : 2 les précipitations annuelles s'élevaient à 759 mm en 2008-2009, 831 mm en 2009-2010 à Dar Arsa. A la station Azib Soltane, les pluies ont atteint 741 mm et 851 mm en et 2008-2009 et 2009-2010. Ainsi la plupart des inondations majeures, survenues dans l'oued Sebou, ont été causées par des précipitations journalières exceptionnelles dans le bassin versant du Sebou: 140 mm en décembre et 122,4 en janvier au Rif en 2009.

Lors des deux années hydrologiques 2008-09 et 2008-09, le Maroc a connu une des situations pluviométriques efficients relative à une circulation atmosphérique méridionale récurrente. Ces types de circulations permettent l'advection vers le sud des masses froides issues de la région polaire au sol et en altitude. Les latitudes subtropicales et prenant en compte les effets du réchauffement global sont soumis à une forte évaporation d'où la présence d'un air tropical maritime fortement humidifié au voisinage du Maroc en particulier pendant la période automnale. Les coulées polaires et les gouttes froides qui en découlent ainsi que les forts contrastes entre les masses tropicales et les masses polaires au sol ont généré des dépressions bien creusés au sol à l'origine d'importantes perturbations qui ont concerné le Maroc en particulier à la saison automnale en 2008-09 (Janati., 2006) et la saison hivernale en 2009-10.

2.3. Les effets des inondations dans le bassin de Sebou.

L'inondation est un phénomène naturel réalisés pour qui résulte de l'augmentation des hauteurs d'eau et leur débordement sur lit habituel. Plusieurs facteurs, se combinent pour générer les inondations: précipitations intenses, topographie, couverture végétale, sol, lithologie, forme du bassin versant, et anthropiques (l'installation au bord des cours d'eau, absence des procédures de protection...).

Ainsi les sommets, très arrosés du Moyen Atlas en octobre le 9 et le 10, ont provoqué une crue exceptionnelle dans le Haut Sebou estimée à 2600 m³/s à l'entrée du barrage Allal Fassi, la plus volumineuse depuis le début des enregistrements, ce qui n'a pas empêché d'inonder les vallées du Moyen Sebou en aval à cause des opérations d'écêtement de la retenue d'eau. La station ONEP en aval près de Fès a subi des dommages importants.

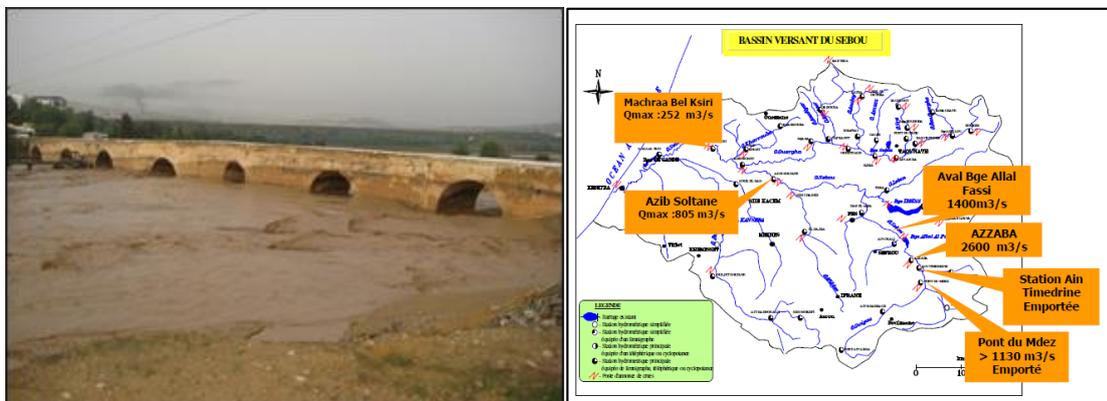


Photo n° 1 : la crue du 10 octobre au niveau du pont Saadien près de Fès

Figure n° 3 : Les débits engendrés par la crue d'octobre 2008 au niveau du bassin du Sebou

Face à la recrudescence des événements climatiques extrêmes ces dernières années, le Maroc a mis en place le plan de protection contre les inondations dont les objectifs sont :

- Le renforcement des moyens d'action des institutions travaillant dans le domaine de veille et d'observation et d'alerte contre les inondations en particulier au niveau de toutes les agences des bassins hydrauliques à travers le pays en concordance avec le Centre royal de télédétection spatiale et la direction de la météorologie nationale.
- L'amélioration des moyens d'alerte précoce pour permettre aux citoyens de se protéger contre les phénomènes climatiques extrêmes notamment les pluies torrentielles pouvant provoquer des inondations ce système a permis d'identifier les zones à risque selon le degré d'exposition aux conditions climatiques.

- L'adoption d'un plan intégré de lutte contre les catastrophes naturelles et le renforcement de moyens pour y faire face. Ce plan adopté en 2016 comporte trois programmes sectoriels notamment la programmation de promotion des investissements dans les projets de réduction de l'impact des catastrophes naturelles et qui sont financés en partenariat avec le Fonds de lutte contre les répercussions des catastrophes naturelles.

Conclusion

Le phénomène du changement climatique constitue le défi principal du climat marocain. Le pays a toujours été soumis à une variabilité climatique importante avec l'alternance des périodes de sécheresse et des périodes de pluie. Cependant, depuis la fin des années 1980 du siècle dernier, ces changements sont devenus plus sévères et violents. Cela se reflète dans la fréquence d'événements climatiques très extrêmes, comme la sécheresse prolongée que le pays a connue entre 1980 et 2007, ce qui a été considéré comme un événement climatique exceptionnel. Par ailleurs, l'avènement de quelques années très pluvieuses ont été à l'origine d'inondations massives dans certaines régions, en particulier dans le bassin du Sebou. Ces inondations qui ont marqué les années 1996, 1997, 2001, 2002, 2008, 2009 et 2010, ont prouvé parfois l'incapacité des barrages à lutter contre l'inondation comme en 2008 et 2009 au niveau de la plaine du Gharb. Sous l'influence du réchauffement climatique, nous avons observé aussi une augmentation des intensités pluviométriques à cause de l'accroissement de l'évaporation, ce qui rend les inondations beaucoup plus sévères. Néanmoins, la tendance actuelle vers l'assèchement climatique représente le défi majeur que doit affronter le Maroc dans le futur dans sa quête d'adaptation avec ce changement climatique.

Bibliographie

ABHS : donne climatique, Agence du bassin hydraulique de Sebou Fès .

Janati Idrissi Abdelhamid 2010 : n°6, pp. 105-119 Situations pluviométrique extrêmes et impact engendres au Maroc cas de l'année 2008-2009.page 105-106.

المملكة المغربية وزارة الداخلية ولاية جهة فاس مكناس عمالة إقليم مولاي يعقوب دائرة أولاد جامع لمطة قيادة أولاد ميمون الجماعات القروية مونوغرافية الجماعات المدروسة 2020 تقرير حول الوضعية العامة بقيادة أولاد ميمون .
يزمي زطابط محمد 2020. 'الجيو مرفولوجية النهرية واستغلال المجال النهري بوادي سبو الأوسط سافلة فاس أطروحة لنيل الدكتوراه في الجغرافيا.

2019 RISING AND FLOODING: ANALYSIS AND STAKE FOR PREDICTIVE MANAGEMENT AT BANGUI, CENTRAL AFRICAN REPUBLIC

Cyriaque Rufin NGUIMALET⁽¹⁾, Jean-Pascal WATERENDJI⁽¹⁾, Levy Sylver AYISSOU⁽²⁾, Chanel Jerry Max NZANGO⁽³⁾, Arsène BOMBIA⁽⁴⁾ and Alain LARAQUE⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, B.P. : 1037 – Bangui, République Centrafricaine - E-mail: cyriaque.nguimalet@univ-bangui.org - Tél : +236 75 50 56 78 / 72 83 62 25.

⁽²⁾ GIE-SCEVN Port de Brazzaville MPILA. BP. 179, Brazzaville, République du Congo – Email :

levy_ayissou@yahoo.fr

⁽³⁾ GIE-SCEVN, B.P.: 1143, Bangui, République Centrafricaine – E-mail: abombia@yahoo.fr

⁽⁴⁾ University of Orleans, Laboratory CEDETE EA-1210, 10 Rue de Tours, 45065 Orléans, France – E-mail:

chanelnzango@yahoo.fr

⁽⁵⁾ GET-UMR CNRS/IRD/UPS-UMR 5563 du CNRS, UR 234 de l'IRD; OMP, Toulouse, France – E-mail:

alain.laraque@ird.fr

Abstract: This paper examines the 2019 rising of October-November from the Ubangi River and the flooding effect on its previous bed at Bangui. Thus, from October 19 to November 4, 2019, the Ubangi at Bangui discharge increased from 8,500 to 12,400 m³/s, meaning 3,900 m³/s in 16 days, which corresponds to a surplus of 244 m³/s per day. ADCP gauging was given 11,125 m³/s of mean Q for a scale elevation of 685 cm on October 26, equivocating to 11,500 m³/s according to the calibration curve. It presents different frequencies according to statistical distributions and studied periods: 10 years (1911-2019), 70 years (1971-2019), and 110 years (1981-2019), respectively, both GEV and Lognormal distributions and 8 years, 30 years and 40 years with Gumbel distribution having weak quintiles. These results establish periods' shortening of the available series and the Q_{maxi} weakness in declining hydroclimatic context, revealing rare to scarce frequencies of 2019 Q_{maxi}. They are tools for decision-making according to the difference in importance between the quintiles. Thus, estimated risings/flood management is due to monitoring an existing gauging station network for hydroclimatic data and an early warning approach to the catchment.

Keywords: Ubangi River at Bangui, 2019 rising, flooding, estimated management, Central African Republic.

CRUE ET INONDATION 2019 : ANALYSE ET ENJEU POUR UNE GESTION PREVISIONNELLE A BANGUI, REPUBLIQUE CENTRAFRICAINE

Résumé : Cet article examine la crue d'octobre-novembre 2019 de l'Oubangui à Bangui, et l'effet inondant sur son ancien lit à Bangui et Bimbo. Ainsi, du 19 octobre au 4 novembre 2019, le débit de l'Oubangui à Bangui est passé de 8 500 à 12 400 m³/s, soit 3 900 m³/s en 16 jours, correspondant à un gain de 244 m³/s par jour. Les jaugeages par ADCP ont donné 11 125 m³/s de débit moyen pour une cote à l'échelle de 685 cm le 26 octobre, équivalant à 11 500 m³/s d'après sa courbe de tarage. Le Q_{maxi} a été atteint le 4/11/2019 avec 12 400 m³/s pour une cote de 750 cm. Différentes fréquences ont été obtenues selon des lois statistiques et les périodes étudiées : respectivement 10 ans (1911-2019), 70 ans (1971-2019) et 110 ans (1981-2019) avec les lois GEV et Log normale, et 8 ans, 30 ans et 40 ans avec Gumbel ayant de faibles quantiles. Ces résultats établissent un raccourcissement des périodes de la série disponible et la faiblesse des Q_{maxi} en contexte hydroclimatique déficitaire, attribuant des fréquences rares à très rares au Q_{maxi} 2019. Celles-ci sont des outils d'aide à la décision selon l'importance des écarts entre les quantiles. Ainsi, une gestion prévisionnelle des crues/inondations implique une surveillance du réseau existant des stations pour des données hydroclimatiques, et l'alerte précoce dans tout le bassin.

Mots clés : Oubangui à Bangui, crue 2019, inondation, gestion prévisionnelle, République Centrafricaine.

INTRODUCTION

Risings and floods are associated phenomena of short duration, from a few days to some months, in isolated years (BRAVARD, 2000), whose intensity and frequency depend on rainfall and the degree of environmental anthropisation. Since 1970, drought has caused low water levels in the rivers of humid Africa, reducing the volume and duration of risings in the 1970s and 1980s (OLIVRY et al., 1998). This hydrological drought persists in the Congo Basin (LARAQUE et al., 2020; NGUIMALET, 2022) and has varying degrees of impact on the annual regime of the Ubangi River at Bangui (WESSELINK et al., 1996). Then two levels of impact characterize its flows: from a low impact over the 1971-1982 period (-3%), this drought effect has been severe since 1983, with a -22% reduction compared with the interannual average over the 1983-2013 period (NGUIMALET and ORANGE, 2019). At its peak on 4 November (12,400 m³.s⁻¹), the 2019 rise caused around 30,000 victims in Bangui (Fig.1). The rapid rise in the water level led to significant flash flooding. So, what is the width of the 2019 Q_{maxi}? Moreover, what are its frequencies during the periods targeted in this study? The hypothesis is that the fulgurating nature of the 2019 rise is a possible reproduction of 1999. This article, therefore, analyses the hourly and daily dynamics, calculates the 2019 Q_{maxi} frequency in distinct periods, and oversees predictive management of risings.

PRESENTATION OF THE STUDY AREA

The Ubangi River is born from the confluence of the Uele, from the DRC (Democratic Republic of Congo) on the left bank, and the Mbomu, from the CAR (Central et al.) on the right bank. Its catchment area at Bangui (4°22' North-18°35' East - altitude: 336 m) covers 499,000 km² (CALLED et al., 2009), where the hydrometric station of international reference is located at the Oubangui Hôtel foot. In Bangui, the eastern fringe of the city, with its outlet, represents 0.005% of the basin's total surface area, i.e. 23 km² (Fig. 1). Downstream, the city spreads out in its central bed, with housing, infrastructure, and facilities (football pitches, markets, churches, primary schools, refreshment stands, etc.). Running East-west as far as Bangui, the Ubangi River collects the Kotto, Bangui-Ketté, Ouaka, Kémo, and Ombella rivers in its middle course (Fig. 2). The dominant relief in the basin is the plateau resulting from the bulging of the Central African shield in the Cenozoic. Mountain ranges frame this plateau at the eastern ends of the catchment: SE with the Upper-Uele (1,700 m) in the DRC and NE at the Kotto Upper-basin (1,300 m) in the CAR (CALLED et al., 2009).

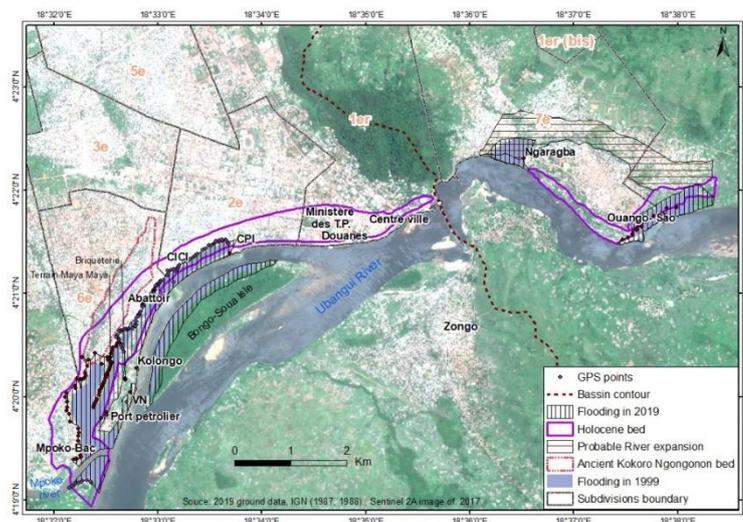


Fig. 1: Urban fringe along the Ubangi River Basin at Bangui with flooded areas over its previous bed on October-November 2019.

These are stepped flattening surfaces, i.e. the Central African surface, which extend into the DRC, particularly in Bangui with the Daouba-Kassai (650 m: 4°24'49" N-18°37'29" E) and Gbazabangui (570 m at 4°22'38" N-18°34'55" E, and 4°22'31" N-18°35'23" E) Hills, and the Zongo's on the left bank. The escarpments dominate the Ubangi River plain.

Over ¾ of the basin's surface area is underlain by Precambrian-age bedrock (Mestraud, 1982), which is underlain by the Kombélé Palaeozoic glacial deposits and the Cretaceous sandstone-conglomerate of Mouka-Ouadda. In addition, the wet tropical climate' Sudano-Guinean variant predominates in the basin, with average annual rainfall ranging from 1,700/1,600 mm in the south to 1,200 mm in the north—rising peaks in Bangui in October and November, giving this river a boreal tropical regime. Vegetation in the basin comprises dense, semi-deciduous forests in the south and savannah types (trees, shrubs, and grass) in the north (Fig. 2). Dense rainforest is found on the Bangui Hills and around Bangassou and in the Uele Valley in the DRC. Savannah covers 70% of the basin and is affected by seasonal bushfires. Otherwise, the population is 3,496,728 inhabitants, of which 1,126,730 inhabitants live in the CAR, with Bangassou (Mbomou) and Alindao (Basse-Kotto) accounting for more than half the population and 2,369,998 inhabitants in the DRC, mainly in the Bas and Haut-Uele. Primary sector activities dominate (slash-and-burn agriculture, artisanal mining, firewood and charcoal production, transhumant livestock farming, etc.), especially around the Ubangi, Uele, and Mbomu valleys.

STUDY METHODOLOGY

Rising monitoring on the hydrometric scale between 19 October and 4 November 2019 allowed us to estimate its rise at hourly and daily intervals and translate the water levels into discharges.

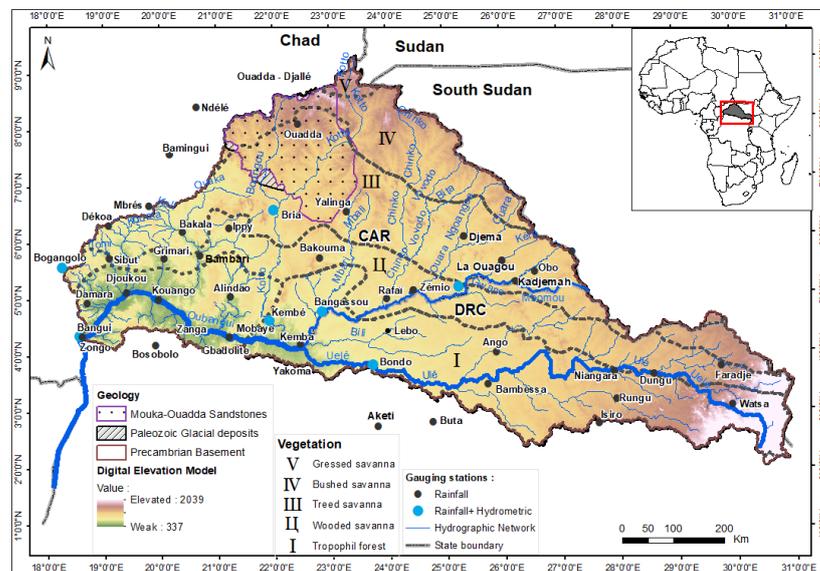


Fig. 2: Topography, hydroclimatic network and geology of the Ubangi River basin at Bangui (source: this study).

This was also the case from 5 to 16 November in the areas affected by flooding. To complete the rating curve, gauging using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) was carried out on 26 October 2019 in two sections of the Oubangui, 1.5 km wide. Among other things, the entire series of maximum mean daily flows (Q_{maxi}) used to calculate the frequency of the 2019 Q_{maxi} with the *HyfranPlus* software using the GEV (Generalized Extreme Value distribution), Gumbel, Lognormal, and Weibull distributions, maximum likelihood method, in different periods: 1911-2019, 1935-2019, 1971-2019 and 1981-2019. Multi-source data were

also collected to spatialize the flooded areas in 2019: ten field trips using two GPS units, digital photos, and topographic maps of Bangui, one at 1:20,000 scale (IGN, 1987) and the other at 1:50,000 scale (IGN, 1988). The identification of flooded sites and GPS readings was materialized using ArcGIS 10.2 software by digitization during the rising maximum. A layer of flooded areas from 1999 was superimposed on those from 2019 on a Sentinel 2A satellite image background from 13/05/2017 in RGB (or red, green, blue) colour composition. This background combines channels 2-3-4 with information such as the Ubangi River, vegetation zones, urban buildings, etc.

MAIN RESULTS

The 2019 October-November rising and ADCP gauging

The Ubangi River at Bangui discharge rose from 8,500 to 12,400 m³.s⁻¹, i.e. 3,900 m³.s⁻¹ in 16 days or 244 m³.s⁻¹ per day. The Q_{maxi} reached on 4/11/19 with 12,400 m³.s⁻¹ for a level of 750 cm on the scale. From 19/10 to 31/10/2019, the water level rose from 592 to 735 cm, i.e. +143 cm in 12 days, corresponding to an average rise of 12 cm/day, and the discharge increased from 8,500 to 12,020 m³.s⁻¹, i.e. 293 m³.s⁻¹ per day. The flooding intensified at the end of October, with a rise of more than 1 cm/h, or 24 cm in 24 hours! The level remained at 745 cm from the morning of 03 to 04/11, then rose to 750 cm at 11.15 am, an increase of 5 cm in just a few hours. The 750 cm level was maintained until 05/11 at 12:15 and fell to 740 cm on 8/11 at 11:01, i.e. -2.5 cm/day four days after the peak (750 cm). ADCP gauging gave an average discharge of 11,125 m³.s⁻¹ for a scale height of 685 cm, corresponding to 11,500 m³.s⁻¹. This Doppler gauging at high water confirms the stability of the section and the robustness of its calibration curve at medium and high water. What about the return periods of this Q_{maxi} (12,400 m³.s⁻¹)?

Frequencies of the 2019 rising peak per period

The 2019 Q_{maxi} (12,400 m³.s⁻¹) return periods are generally low, ranging from 8 years (GEV) to 11 years (Weibull) over the 1911-2019 period and from 13 years (Lognormal) to 17 years (Weibull) over the 1935-2019 period. On the other hand, the return periods are high over the 1971-2019 period with the Gumbel distribution (30 years) and the GEV and Lognormal ones with 70 years each. These results are close for quintiles from 2 to 50 years and different for 100 years and more for all distributions and distinct periods (Table 1). The frequencies range from low to low for the 1911-2019 and 1935-2019 periods and from high to very high for the 1971-2019 and 1981-2019 periods. The highest frequencies were recorded over the driest and most extended 1981-2019 period. The Gumbel frequencies are different from the others from the 20-year quintiles onwards (Table 1) and relatively low: 8 years (1911-2019), ten years (1935-2019), 30 years (1971-2019), and 40 years (1981-2019). This has two advantages: i) it stretches the extreme frequencies towards the higher values of the cumulative frequencies, and ii) it is easier to implement than other, more elaborate laws; however, it remains a reliable means of estimating return periods (BRAVARD and PETIT, 1997).

Spatial expansion of the 2019 flooding

The areas of river water expansion were slightly more significant in 2019 (3.23 km²) than in 1999 (2.6 km²) (Figure 1). In addition, three floods (1975, 1999, and 2019) were recorded in the current dry period. The 1975 flood was distinguished from the last two by its abundance and gradual/increasing modes (Figure 3): the first in mid-September, the second at the end of September, and the last on 25/10/1975 with 12,700 m³.s⁻¹. A very different pattern from the last two (1999 and 2019) is noted, exceeding 6,000 m³.s⁻¹ in mean water on 23 August, which

may be explained by the weak effect of this hydrological drought in the 1970s, in contrast to the 1980s. This spatialization of floods defines the sectors vulnerable to these phenomena (NGUIMALET, 2022) with a view to a comprehensive flood risk management plan. This plan should integrate early warning and water level monitoring services for effective policy decision-making.

PERSISTENT IMPACT OR BREAKDOWN OF THE DECLINING HYDROCLIMATIC CONTEXT ON THE STUDIED RIVER REGIME

Over the 1981-2020 period, only twelve Q_{maxi} of the Ubangi River at Bangui are higher than the interannual average (8,127 $m^3.s^{-1}$) out of thirty-nine in this series, proving weak runoff. In Central Africa, a non-uniformity of rainfall recovery shows a punctual or episodic character (2 to 4 years of humidity) into the Ubangi River at Bangui and the Sangha at Ouesso basins in Northern of the Congo River upper-basin. It comprises short dry and wet periods/years and storms likely to generate Hortonian flows (risings). This confirms the drought amplification in 1980 throughout Africa, affecting runoff and aquifers in the river basins (OLIVRY et al., 1998; NGUIMALET and ORANGE, 2019). In the Ubangi River case, the dry period (1971-2019) recorded a break in 1980, and two homogeneous periods: 1971-1980 and 1981-2019. The 1971-1980 period showed low flows. Meanwhile, the 1981-2019s were long and dry, with a marked deficit. This situation of extreme hydrological variability should prompt political decision-makers to prevent its societal effects.

PREDICTIVE MANAGEMENT OF RISINGS IN THE UBANGI RIVER BASIN

There needs to be more data for monitoring hydroclimatic phenomena: three climatological stations (Bangui, Berberati, and Bouar) since 2013, none in the DRC basin part, and the only hydrometric station in Bangui.

Table 1: Return periods of the 2019 Q_{maxi} in different periods

| Return periods (years) | 1911-2019 | | | | 1935-2019 | | | | 1971-2019 | | | | 1981-2019 | | | |
|------------------------|------------------------|--------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|---------|
| | Q_{maxi} (m^3/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | GEV | Gumbel | Lognormal | Weibull | GEV | Gumbel | Lognormal | Weibull | GEV | Gumbel | Lognormal | Weibull | GEV | Gumbel | Lognormal | Weibull |
| 2 | 9,570 | 9,390 | 9,480 | 9,780 | 9,240 | 9,050 | 9,150 | 9,450 | 8,180 | 8,100 | 8,200 | 8,400 | 7,960 | 7,880 | 7,970 | 8,160 |
| 5 | 11,400 | 11,500 | 11,300 | 11,500 | 11,000 | 11,100 | 10,900 | 11,100 | 9,620 | 9,700 | 9,610 | 9,870 | 9,330 | 9,410 | 9,320 | 9,570 |
| 8 | | 12,400 | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 12,400 | 12,900 | 12,400 | 12,300 | 11,900 | 12,400 | 12,000 | 11,900 | | | | 10,600 | | | 10,100 | 10,200 |
| 11 | | | | 12,400 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | 12,400 | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | 12,400 | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | 12,400 | | | | | | | | | |
| 20 | 13,200 | 14,200 | 13,400 | 13,000 | 12,700 | 13,700 | 13,000 | 12,500 | | | | 11,100 | | | 10,800 | 10,800 |
| 30 | | | | | | | | | | | 12,400 | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | 12,400 | | |
| 50 | 14,100 | 15,900 | 14,700 | 13,700 | 13,500 | 15,300 | 14,100 | 13,200 | | | | 11,700 | | | 11,700 | 11,300 |
| 70 | | | | | | | | | 12,400 | | 12,400 | | | | | |
| 100 | 14,700 | 17,200 | 15,500 | 14,100 | 14,100 | 16,600 | 15,000 | 13,600 | | | | 12,100 | | | 12,300 | 11,700 |
| 110 | | | | | | | | | | | | | 12,400 | | 12,400 | |
| 200 | | | | | | | | | | | | 12,400 | | | | |
| 500 | 15,900 | 20,200 | 17,500 | 15,000 | 15,100 | 19,400 | 16,800 | 14,400 | 13,900 | 16,300 | 14,100 | 12,800 | 13,500 | 15,800 | 13,600 | 12,400 |
| 1000 | 16,200 | 21,500 | 18,300 | 15,300 | 15,500 | 20,700 | 17,600 | 14,700 | 14,400 | 17,300 | 14,700 | 13,000 | 13,900 | 16,700 | 14,200 | 12,600 |

To this end, extreme hydroclimatic experts are the best advocates for restoring hydro-rainfall networks and funding scientific research in these areas to develop civil protection in the country. On 1 November 2019, heavy flooding displaced 30,000 people in Bangui, compared with 10,000 in 1999.

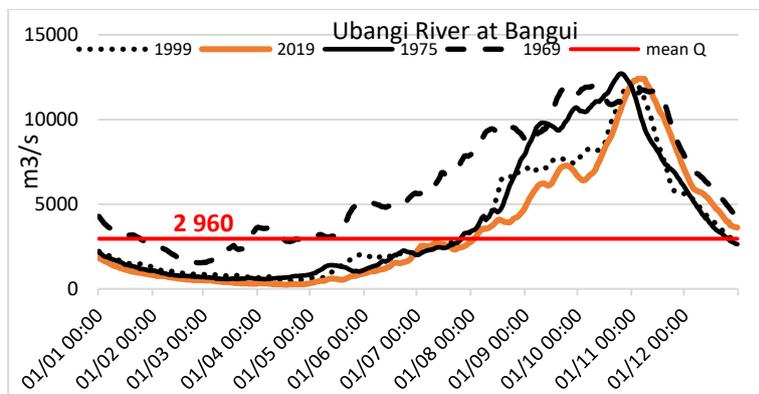


Fig. 3: Daily flood trends in 1969, 1975, 1999 and 2019 on the Ubangi at Bangui, compared to the interannual average discharge (1981-2020).

Evacuating flood-prone neighbourhoods in good time involves flood forecasting. This requires meticulous maintenance of the hydrometric stations on the Ubangi River upstream of Bangui. This approach would involve rehabilitating stations on the Ubangi (Mobaye and Kemba) and Mbomu (Bangassou) Rivers and creating others on the Uele (at Yakoma or Bondo) in the DRC and Ubangi (at Kouango/Possel) rivers to engage disasters early warning. For that, it is less costly to manage a hydrometric network than to rescue displaced populations and repair the damage caused by the vagaries of nature. Such action effectiveness is based on a national budget that is renewable and not dependent on foreign subsidies.

CONCLUSION

The 2019 rising peak (12,400 m³.s⁻¹) is the highest on the Ubangi River since 1981. It is the second highest in twenty years after 1999. In sixteen days, the discharge of the Ubangi River at Bangui rose from 8,500 to 12,400 m³.s⁻¹, an increase of 3,900 m³.s⁻¹, or 244 m³.s⁻¹ per day. Its frequency varies according to the period and the used distributions (GEV, Gumbel, Lognormal, and Weibull): it is generally low over long (1911-2019 and 1935-2019) and rare to infrequent over short (1971-2019 and 1981-2019) periods.

The 2019 rise duplicates 1999, with virtually the exact start date and peak. Furthermore, the spatial expansion of the flood waters from the 2019 rise reflects the scale of the damage recorded in the context of the anarchic occupation of the Ubangi River's central bed (or Holocene bed) in the southwest of Bangui. This is borne out by the 3.7 km² of flooded surface area in 2019, compared with 2.6 km² in 1999. The experienced phenomenon in 2019 raises the stake of predictive management for future disasters by rehabilitating measurement networks (rain, flow, temperature, evaporation, etc.) and creating others if possible. Therefore, Monitoring these extreme weather events is essential to developing climate resilience at a national or regional level, rather than waiting for people to be affected before the political authorities "react".

REFERENCES

BRAVARD J.-P. (2000). Les extrêmes hydrologiques : handicaps réductibles ou composantes patrimoniales à sauvegarder?, in J.-P. Bravard (coord.). *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, SEDES, 5-14.

- BRAVARD J.-P., PETIT F. (1997). *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. A. COLIN, Coll. U, Paris, 222 p.
- CALLEDE J., BOULVERT Y., THIEBAUX J.-P. (2009). *Le bassin de l'Oubangui*. IRD Éditions, Collection : Monographies.
- Institut Géographique National ou IGN (1987). Carte topographique au 1 : 20 000e. Bangui, République centrafricaine. Paris
- IGN (1988). Carte topographique au 1 : 50 000e. Bangui, République centrafricaine (en quatre feuilles). Paris.
- LARAQUE A., MOUKANDI N'KAYA G.D., ORANGE D., TSHIMANGA R., TSHITENGE J.M., MAHE G., NGUIMALET C.R., TRIGG M.A., YEPEZ S., GULEMVUGA G. (2020). Recent budget for hydroclimatology and hydro sedimentology of the Congo River in Central Africa. In: DESCROIX L., MAHE G., LARAQUE A., RIBOLZI O., LACOMBE G. (eds). "Multiscale impacts of anthropogenic and climate changes on tropical and Mediterranean hydrology". *Water*, 12 (9), 2613 [36 p.].
- MESTRAUD J.L., avec la collaboration de BESSOLES B. (1982). « *Géologie et ressources minières de la République Centrafricaine. État des connaissances à juin 1963* ». Édit. BRGM, collection *Mémoires*, vol. 60, Orléans, 186 p.
- NGUIMALET C. R. (2022). « Géohistoire des crues de l'Oubangui et problématique des inondations fluviales à Bangui, République Centrafricaine ». *Physio-Géo*, 17, 2022, 125-150. *Physio-Géo* [En ligne], Volume 17, 2022, mis en ligne le 21 août 2022, consulté le 22 août 2022. URL: <http://journals.openedition.org/physio-geo/14285>.
- NGUIMALET C.R., ORANGE D. (2019). « Caractérisation de la baisse hydrologique actuelle de la rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine ». *La Houille Blanche*, n° 1 : 78-84. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019010>
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., MAHE G. (1998). « Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies ». *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, Actes de Colloque (Abidjan'98, Abidjan, Côte d'Ivoire), IAHS Publication, 252, p. 189-197.
- WESSELINK A., ORANGE D., FEÏZOURE C., RANDRIAMIARISOA, 1996. "Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin-versant de type tropical humide : l'Oubangui (République centrafricaine)". In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, CHEVALLIER P. et POUYAUD B. édit., IAHS Publication, 238, p. 179-194.

QUANTIFICATION DU REcul DES FALAISES SUR LE LITTORAL ENTE TIFNIT ET SIDI TOUAL AU SUD D'AGADIR (MAROC).

M'hamed NMISS¹, Mhamed AMYAY¹, Abderrahaman OUAMMOU², Mahjoub BEN BIHE ², Nadia ATIKI ³

¹ Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Équipe de Recherche : Milieux naturels, Aménagement et Dynamique Socio-Spatiales (MNADSS), mhamed.nmiss@usmba.ac.ma ; ² Université Ibn Zohr, Équipe de Recherche : Géographique, Aménagement, Démographie et Développement. (GEAMDD) ; ³ Université Abdelmalek Saadi, Équipe de recherche : Milieux naturels et dynamique spatiale.

RÉSUMÉ : Les falaises littorales se présentent comme des formes dynamiques caractérisées par une variabilité en termes d'équilibre. Elles se développent dans des roches de natures différentes (dures ou assez dures, friables) et évoluent principalement en réaction à l'attaque de leur base par la mer. Sur le littoral atlantique marocain, entre Tifnit et Sidi Toual, le paysage littoral dominant est celui des basses falaises taillées dans un complexe dunaire post SIM 5. Leur évolution dépend de la conjonction de plusieurs facteurs lithologiques, hydrodynamiques, subaériens et anthropiques. Cette contribution vise à mettre en relief l'évolution et la dynamique du recul des falaises en exposant le cas du secteur littoral entre Tifnit et Sidi Toual. L'évaluation de recul a été réalisée à l'aide des systèmes d'informations géographiques (SIG). Pour ce faire, une comparaison entre les photos aériennes de 1986 et les orthophotos de 2018 a été entreprise en utilisant la méthode surfacique. Cette méthode a été complétée par la création de plusieurs transects à l'aide de l'outil DSAS afin de quantifier l'évolution des falaises. Les résultats obtenus révèlent un taux de recul moyen annuel de 0,37 cm/an sur le secteur sud de Tifnit et un taux de 0,22 cm/an dans le secteur de Sidi Toual. Cependant, des zones fortement exposées à l'érosion littorale sont à noter, avec un taux maximal de 0,56 cm/an, tandis que d'autres, légèrement érosives, enregistrent un taux de 0,06 cm/an. Cette variabilité en termes d'évolution est liée principalement au facteur lithologique qui joue un rôle déterminant dans la dynamique de recul des falaises.

Mots clés : Falaise littorale, DSAS, méthode surfacique, Tifnit, Sidi Toual.

QUANTIFICATION OF COASTAL CLIFF RETREAT BETWEEN TIFNIT AND SIDI TOUAL SOUTH OF AGADIR (MOROCCO).

ABSTRACT: Coastal cliffs manifest as dynamic forms characterized by variability in terms of equilibrium. They develop in rocks of different natures (hard or fairly hard, friable) and primarily evolve in response to the sea's attack on their base. Along the Moroccan Atlantic coast, between Tifnit and Sidi Toual, the predominant coastal landscape consists of low cliffs carved into a post-SIM 5 dune complex. Their evolution depends on the conjunction of several lithological, hydrodynamic, subaerial, and anthropogenic factors. This contribution aims to highlight the evolution and dynamics of cliff retreat by examining the case of the coastal sector between Tifnit and Sidi Toual. The retreat assessment was conducted using Geographic Information Systems (GIS). To achieve this, a comparison between aerial photos from 1986 and orthophotos from 2018 was undertaken using the areal method. This method was complemented by creating several transects using the DSAS tool to quantify cliff evolution. The results reveal an average annual retreat rate of 0.37 cm/year in the southern Tifnit sector and a rate of 0.22 cm/year in the Sidi Toual sector. However, areas strongly exposed to coastal erosion note a maximum rate of 0.56 cm/year, while others, slightly erosive, record a rate of 0.06 cm/year. This variability in terms of evolution is mainly linked to the lithological factor, which plays a decisive role in cliff retreat dynamics.

Keywords: Coastal cliff, DSAS, areal method, Tifnit, Sidi Toual.

INTRODUCTION

Sur le littoral entre Agadir et Aglou, les falaises littorales prédominent le paysage côtier de la région. Il s'agit des formes taillées dans des formations quaternaires du pléistocène supérieur. Ces formations constituées principalement par des dunes grésifées présentent une grande diversité morphologique avec des hauteurs contrastées. L'évolution et la dynamique de ces falaises résultent de la conjonction de plusieurs facteurs lithologiques, hydrodynamiques, subaériens et anthropiques. À l'exception de quelques travaux portant sur la reconstitution de la paléogéographie et du paléoclimat des falaises littorales (Oliva, 1972 ; Ouammou 1993, Barrada 1996 ; Weisrock et al., 1998), la quantification du recul des falaises a été peu étudiée. Dans cette contribution nous tenterons d'approcher la dynamique contemporaine des falaises à travers une analyse multidécennale de leur évolution en comparant les photos aériennes de 1986 aux orthophotos de 2018. Nous voulons à travers cette analyse diachronique, le calcul du taux de recul moyen des falaises surtout dans les sites les plus touchés par l'érosion marine. La compréhension des processus et des mécanismes responsables du recul des falaises est primordiale pour une meilleure connaissance du milieu côtier surtout dans un contexte d'élévation du niveau de la mer et de la fréquence des tempêtes.

Présentation de la zone d'étude

Sur le littoral au sud d'Agadir qui appartient à l'aire du parc national Souss Massa, la morphologie littorale est très diversifiée. Il se caractérise par une alternance des plages extrêmement étendues et des falaises littorales à profils variées (Nmiss, 2023). Le secteur littoral entre Tifnit et Sidi Toual se localise à 30 km au sud de la ville d'Agadir, il s'agit d'une côte à falaise dressée à la verticale, dynamique et en perpétuelle évolution (Fig.1). La hauteur de ces falaises oscille entre 5 et 15 mètres et se caractérise par une alternance des dunes et des paléosols roses témoin du système soltanien et intra-soltanien (Barrada, 1996).

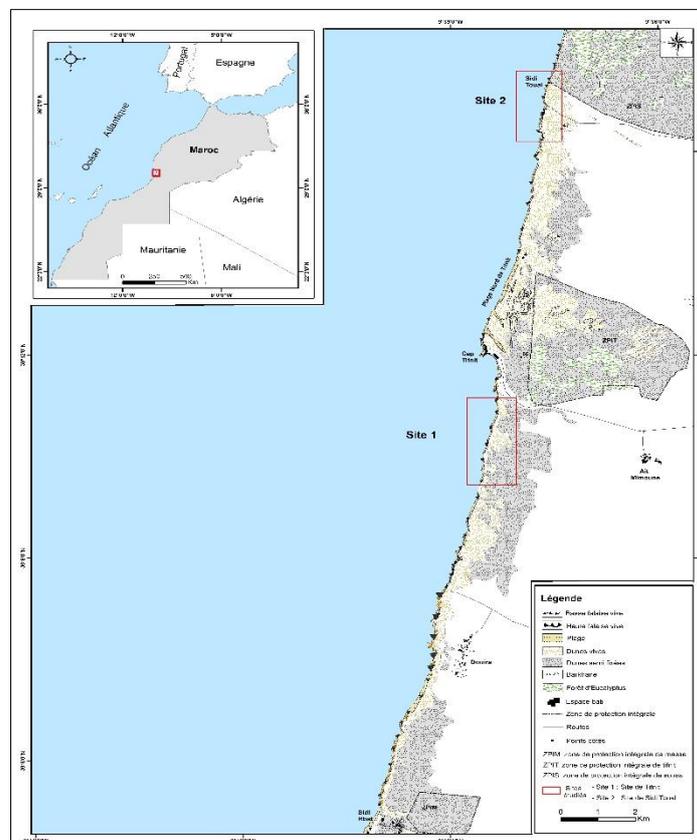


Figure 1. Localisation des sites étudiés.

Fortement exposée à la houle et aux vagues provenant du secteur NNW, ce secteur littoral présente une dynamique de recul remarquable à l'échelle régionale. La hauteur significative des vagues dans cette zone varie entre 2 à 3 m avec une période moyenne de 10 (s).

Sur le secteur littoral entre Tifnit et Sidi Toual, les falaises cotières sont associées à une plateforme littorale très développée qui dévoile, à marée basse, un estran rocheux. Cette plateforme traduit le recul progressif des falaises soumises à l'action des vagues. Sa largeur varie de quelques mètres pour le plus étroit jusqu'à des dizaines de mètres pour le plus large. Ainsi, leur élévation varie aussi considérablement et s'étend jusqu'à au-dessous du niveau marin. Cette plate forme littorale est pentue (1,5 à plus de 4°) et s'étende en continu du pied de la falaise jusqu'au niveau des plus basses mers

1. METHODES ET DONNEES

Il existe de nombreuses méthodes et techniques pour suivre la dynamique des falaises, telles que les mesures sur le terrain et la photo-interprétation (photo-aériennes et images satellitaires). Celles-ci ont été parmi les premières techniques utilisés pour quantifier le taux de recul des falaises, mais aujourd'hui, les techniques de suivi deviennent de plus en plus sophistiquées et précises.

Pour quantifier le recul des falaises entre Tifnit et Sidi Toual, les données spatiales utilisées sont des photos aériennes verticales de la mission 1986 avec une échelle de 1/20000 et des orthophotos de 2018 issues du satellite Pléiade de haute résolution spatiale de 0,5m (Tab 1). Bien que ces données révèlent des situations ponctuelles et spontanées, elles peuvent surtout par comparaison mettre en évidence les différentes de l'évolution du littorale (Nmiss et al, 2019). De point de vue méthodologique, et comme pour les plages la quantification du recul des falaises implique quatre étapes : le géoréférencement des données, le choix et la numérisation du trait de côte, le calcul des taux de recul basé sur la surface entre deux traits de côte successifs et le calcul de la marge d'erreur (Nmiss et al 2021, Nmiss et al 2023).

Afin de calculer le taux de recul des falaises littorales de manière précise, il est important de déterminer une ligne de référence. Dans cette étude, nous avons choisi de définir cette ligne par le sommet de falaise conformément à plusieurs travaux (Bray et Hooke, 1997 ; Basara, 2019) car la limite du pied de falaise est plus incertaine en raison des variations des accumulations sédimentaires et des phénomènes d'ombrage (Fig 2). Pour obtenir cette ligne de référence, nous avons procédé à la vectorisation manuelle du sommet de falaise de chaque document utilisé.

| Données spatiales | | Date de prise | Echelle | Source de données |
|------------------------------------------|------------------|---------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Photos-aériennes | | - 22/03/1986 | - 1/20000 | Agence National de conservation foncière du cadastre et de la cartographie, Service de documentation technique |
| Images satellitaires et orthophotographs | Orthophotographs | - 29.10.2018 | 0.5m | https://visor.grafcan.es/agadir |

Tableau 1. Données de suivi du recul des falaises.

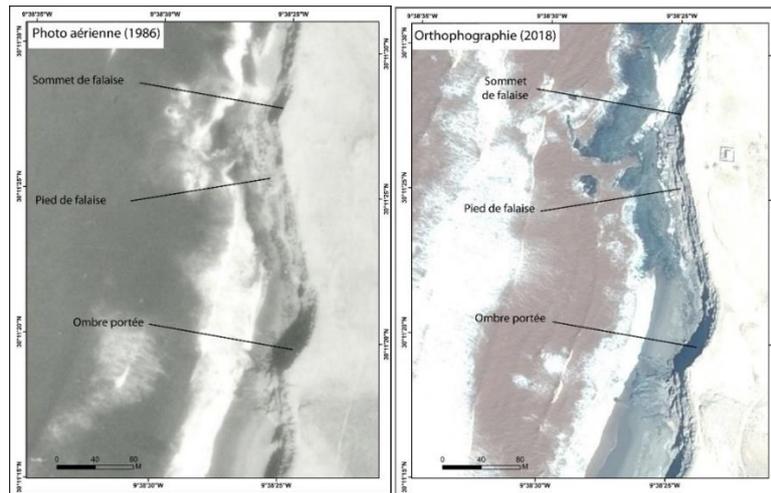


Figure 2. La ligne de référence « sommet de falaise » adoptée pour l'étude diachronique

Pour calculer les surfaces perdues et le taux de recul, nous avons utilisé la méthode surfacique qui consiste à mesurer la surface érodée entre deux sommets de falaise en mètre carré. La méthode consiste à tracer des polygones entre les traits de sommet de falaise utilisés pour obtenir des surfaces perdues. Ces surfaces sont pondérées par le linéaire côtier et par l'intervalle de temps entre les deux dates. Ainsi, le taux moyen annuel de recul est obtenu en utilisant la formule suivante : $Tx = \frac{S}{L \times A}$ Avec **Tx**, le taux de recul moyen annuel (m/an); **S**, la surface érodée entre deux sommets de falaise (m²) ; **L**, le linéaire de falaise sur lequel la surface est mesurée (m) et **A**, le nombre d'années séparant les deux levés.

Cependant, la méthode surfacique utilisée dans cette étude pour la quantification d'évolution des côtes à falaise comporte des incertitudes qui proviennent principalement du géoréférencement des données et la numérisation du trait de côte. En effet, l'erreur liée au géoréférencement (QM) est estimée de 1,1 pixel, soit 1,1m. Pour ce qui est la marge d'erreur liée à la digitalisation du trait de côte, elle est estimée à $\pm 2,5$ m. Afin d'estimer la marge d'erreur globale, nous avons additionné les différentes sources d'erreurs, puis à la diviser par l'intervalle de temps (32 ans). La marge d'erreur globale entre 1986 et 2018 est d'ordre de $\pm 3,6$ m soit une marge d'erreur annuel de 0,112 m/an. Afin d'obtenir des informations plus précises sur l'évolution des falaises et pour mettre en évidence la variabilité du phénomène de recul, nous avons créé simultanément 100 transects sur le site de Tifnit et 33 transects sur le site Sidi Toual à l'aide de l'outil DSAS (Digitale Shoreline Analysis System). Cela nous a permis de quantifier l'évolution des falaises et de déterminer les zones les plus touchées par l'érosion.

2. RESULTAT ET DISCUSION

L'étude comparative des photos aériennes et des orthophotos du satellite pléiade permet de quantifier la cinématique de recul des falaises littorales entre 1986 et 2018. Pour le site de Tifnit, nous avons observé une surface perdue de 25455 m², avec un taux de recul moyen des falaises de 0,37 m/an (Fig 3(a)). Pour le site de Sidi Toual, les résultats ont révélé une surface perdue de 5088 m², avec un taux de recul moyen de 0,22 m/an (Fig 3 (b)). Cependant, ces résultats ne mettent pas en lumière la variabilité spatiale survenue au cours de la période d'analyse, car certains secteurs présentent un faible recul tandis que d'autres subissent une érosion plus marquée. Les résultats obtenus à partir de l'outil DSAS démontrent une hétérogénéité en termes de recul de la falaise, suggérant que la dynamique de l'érosion varie considérablement d'un endroit à l'autre. Sur le site de Tifnit (Site 1) certains secteurs sont fortement exposés à

l'érosion, notamment ceux situés entre les transects 21 et 35, enregistrant un taux de 0,54 m/an (transect 35). D'autres secteurs sont légèrement érosifs, tels que ceux situés à l'extrémité sud du site, affichant un taux de 0,06 m/an (transect 99) (Fig 4 (A)). Sur le site de Sidi Toul (Site 2), les résultats obtenus indiquent deux secteurs très distincts en termes de recul de la falaise. Le premier secteur, se situe au nord du site, enregistre un taux de recul annuel de 0,1 m/an. Le deuxième secteur, plus au sud, fait face à érosion importante, avec un taux maximal de recul de la falaise de 0,52 m/an (Fig 4 (B)).

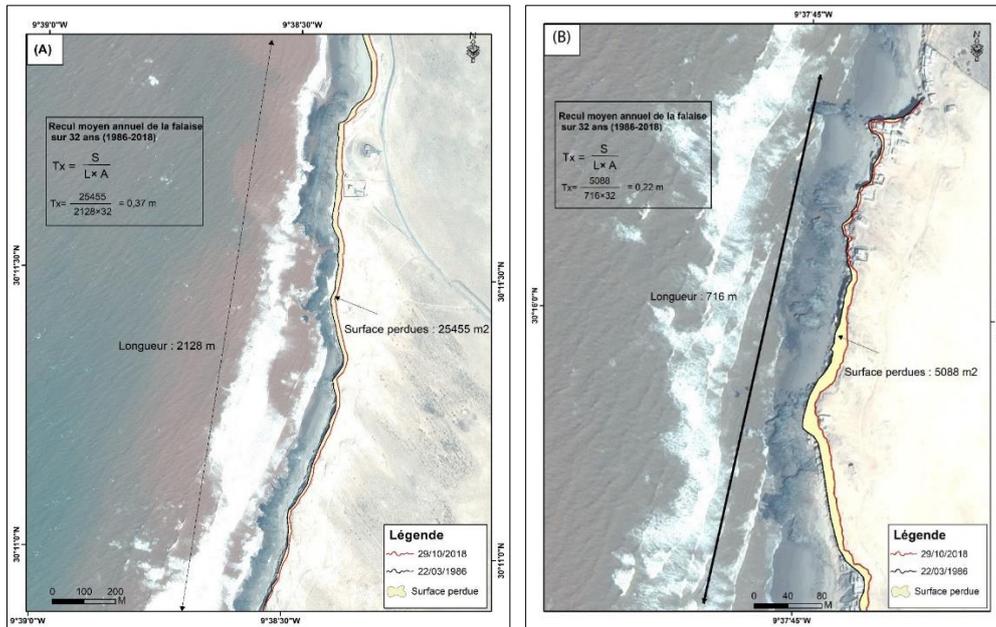


Figure 3. Surface perdue entre 1986 et 2018. (A) Site de Tifnit ; (B) Site de Sidi Toul.

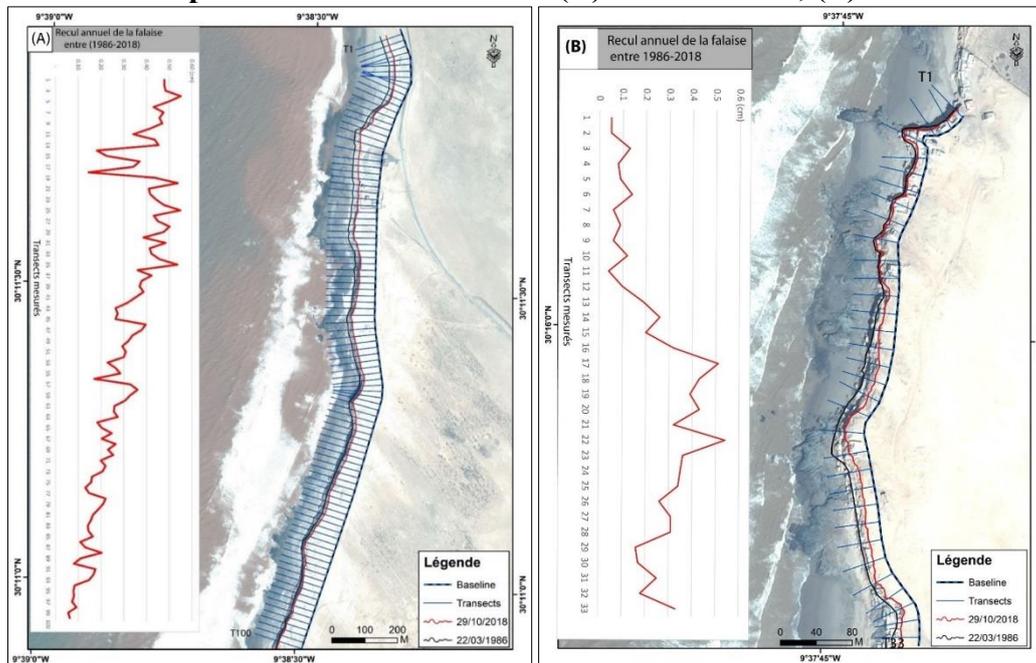


Figure 4. Taux de recul annuel des falaises. (A) Site de Tifnit ; (B) Site de Sidi Toul.

Sur le secteur littoral entre Tifnit et Sidi Toul, plusieurs facteurs interviennent simultanément pour expliquer la dynamique d'évolution des falaises. Dans un premier temps, les facteurs marins et géomorphologiques tels que l'exposition du trait de côte, la hauteur et la période des vagues, ainsi que la fréquence des événements météorologiques de forte énergie (tempêtes), ont un

rôle crucial dans la dynamique et l'évolution des falaises littorales. Lors des grandes marées ou pendant les tempêtes, les vagues viennent attaquer le pied de la falaise où l'assaut répété des vagues fragilise les parois. Le choc des vagues entraîne une compression de l'air qui contenue dans des joints ou des fractures dans la roche, puis un effet soudain de décompression lorsque les vagues se retirent. Dans un deuxième temps, le facteur lithologique et les processus subaériens jouent également un rôle primordial dans l'évolution des falaises. En effet, les zones les plus touchées par l'érosion correspondent généralement à des formations friables. De sa part, les précipitations et les variations de température, jouent un rôle important dans la préparation des matériaux et sont donc des facteurs déclencheurs de l'évolution des falaises. Dans un troisième temps, l'intervention humaine peut accélérer le recul des falaises et compromettre leur stabilité. Cette intervention se manifeste le creusement des dizaines de troglodytes de manière informelle dans les couches friables, ce qui augmente considérablement le risque d'érosion des falaises.

CONCLUSION

L'étude diachronique du recul des falaises, accompagnée d'un travail de terrain, permet de mieux comprendre la dynamique actuelle des falaises et d'expliquer les facteurs et les processus responsables de leur évolution. Les résultats obtenus dans cette étude ont révélé que les taux de recul des falaises littorales varient considérablement d'un endroit à l'autre. Cette variation peut s'expliquer par l'interaction complexe de plusieurs facteurs de force interne et externe. Les cycles d'évolution des falaises côtières du secteur littoral entre Tifnit et Sidi Toual sont contrôlés par un large éventail d'agents et de processus d'érosion, à savoir les forçages marins, les forçages subaériens et les propriétés du massif rocheux.

Références bibliographiques :

- BARRADA M. (1996).** *Evolution morphologique littoral des Chtouka Ouest (Maroc) depuis l'Ouljien.* Thèse de doctorat (N.R), université Nancy II. 232 p.
- BASARA N. (2019).** *L'érosion des littoraux à falaises meubles en Bretagne : aléa, enjeux et gestion du risque.* Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale. 413 p.
- BRAY M.J., HOOKE J.M. (1997).** *Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise.* Journal of Coastal Research, pp. 453-467.
- NMISS M., 2023.** *Morphologie et dynamique actuelle du littoral atlantique marocain entre oued Massa et oued Souss.* Thèse de doctorat, université Sidi Mohamed Ben Abdellahe, Fès. 303 p.
- NMISS M., ANTHONY E., AMYAY M., OUAMMOU A. (2022).** *Multi-decadal shoreline change, inherited coastal morphology and sediment supply in the Souss-Massa littoral cell (Morocco), and a prognosis with sea-level rise.* Journal of African Earth science, 196, 1-12 p.
- NMISS M., AMYAY M., OUAMMOU A. (2021).** *Dynamique du trait de côte d'une plage peu anthropisée cas de la plage Sidi Ouassai, Massa (Maroc atlantique).* Publication de la faculté des lettres et des sciences humaines, 249-255 p.
- NMISS M., AMYAY M., ATIKI N. IRIFI H. (2019).** *Apport des SIG et de la télédétection dans le suivi de la dynamique de la ligne de rivage et dans l'aménagement des espaces côtiers: Application sur le littoral de la baie d'Agadir (Maroc).* Publication de la faculté des lettres et des sciences humaines ; série de séminaires et débats 15/2019, 51-59 p.
- OLIVA P. (1972).** *Aspects et problèmes géomorphologiques de l'Anti-Atlas occidental.* Revue de Géographie du Maroc, n° 21. pp.48-77.
- OUAMMOU A. (1993).** *Evolution morphologique récente du bas plateau de Tiznit (Maroc).* Thèse de doctorat (N.R), université Nancy II. 145 p.
- WEISROCK A., BARRADA M. (1998).** *Morphogenèse éolienne littorale au Pléistocène supérieur (Soltanien) et à l'Holocène dans les Chtouka-ouest, Maroc Atlantique.* Quaternaire, 9, (2), 1998, pp.117-131.

Apport du GPS à l'évaluation de la vulnérabilité de la flèche littorale de la lagune de Nador

Sbai A, Mouadili O, Bahkan M et Hlal M

Université Mohamed Ier, Oujda. sbaiabdelkader59@gmail.com

Résumé. La lagune de Nador, située au nord-est du Maroc, est la plus grande lagune au Maroc et la deuxième en Méditerranée. C'est une zone humide d'une grande valeur écologique et économique. Elle ne cesse d'évoluer depuis sa genèse et subit une pression naturelle et anthropique. L'objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité de la flèche littorale de la lagune. Elle est basée sur l'analyse des profils topographiques au cours des dix dernières années. L'évolution topographique de la flèche littorale est suivie depuis 2013, ce qui permet d'avoir une base de données suffisamment étendue dans le temps pour permettre la compréhension de sa morphodynamique. La reconnaissance topographique de la flèche répond à 2 objectifs: la connaissance de profils transversaux permettant d'apprécier sa vulnérabilité par rapport au risque de submersion marine et l'outil de gestion de la flèche littorale. Les levés ont été effectués à l'aide d'un GPS différentiel qui permet l'acquisition de données avec une forte précision. Les données topographiques permettent d'aboutir à des indicateurs géomorphologiques pour évaluer les dynamiques morpho-sédimentaires de la flèche littorale. Les résultats de l'évolution de la flèche littorale, pour la période étudiée, montrent un taux d'érosion important et une accretion au niveau de la nouvelle passe. Ces résultats font référence aux actions anthropiques, et aux variations climatiques au cours de cette période. En effet, la flèche est en proie à une augmentation des activités économiques, notamment lié au tourisme, entraînant urbanisation, aménagements littoraux et concentration de la population. Ces effets ont accentué le phénomène d'érosion et le déséquilibre du bilan sédimentaire au niveau de la flèche littorale de la lagune de Marchica. Dans ce contexte, la caractérisation des changements et des risques est nécessaire à la gestion de cette zone sensible en constante évolution.

Mots-clés: Vulnérabilité, dynamique, flèche littorale, lagune de Nador, Maroc nord-est.

Contribution of GPS to the assessment of the vulnerability of the littoral spit of the Nador lagoon

The Nador Lagoon, located in the northeast of Morocco, is the largest lagoon in Morocco and the second in the Mediterranean. It is a wetland of great ecological and economic value. It has continued to evolve since its genesis and is under natural and anthropogenic pressure. The objective of this study is to assess the vulnerability of the coastal dune of the lagoon. It is based on the analysis of topographic profiles over the past ten years. The topographic evolution of the coastal dune has been monitored since 2013, which provides a sufficiently extensive database over time to allow an understanding of its morphodynamics. The topographic reconnaissance of the dune meets two objectives: the knowledge of transverse profiles allowing us to appreciate its vulnerability concerning the risk of marine submersion and the management tool of the coastal dune. The surveys were carried out using a differential GPS which allows the acquisition of data with high precision. The topographic data lead to geomorphological indicators to assess the morpho-sedimentary dynamics of the coastal dune. The results of its evolution for the period studied show a significant erosion and accretion rate at the new pass level. These results refer to anthropogenic actions and climatic variations during this period. Indeed, the dune is plagued by increased economic activities, mainly linked to tourism, leading to urbanization, coastal development and population concentration. These effects accentuated the erosion phenomenon and the imbalance of the sediment balance at the level of the coastal dune of the Marchica lagoon. In this context, characterising changes and risks is necessary to manage this constantly evolving, sensitive area.

Keywords: Vulnerability, dynamics, coastal dune, Nador lagoon, northeastern Morocco. Changement climatique, impact anthropique et vulnérabilité des milieux

INTRODUCTION

La flèche littorale de la lagune de Nador est vulnérable à l'érosion côtière, à une montée probable du niveau de la mer, et à la pression anthropique. Depuis 1958, le recul moyen de la côte est de quelques mètres par an (Sbai et Bouazza, 2002; Salmon et al, 2010). L'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de l'énergie des vagues risquent d'aggraver l'érosion côtière sur une grande partie de la flèche littorale (Sbai et al., 2014; 2016).

L'objectif de cette étude est d'évaluer la vulnérabilité de la Marchica face à la l'érosion littorale et à la submersion marine et de mieux comprendre les processus physiques qui contrôlent l'érosion de la flèche littorale pendant les événements extrêmes.

Suite au développement des outils de la géomatique, nous avons acquis un GPS Leica 1200 afin de suivre l'évolution du littoral. Plusieurs mesures ont été prises pour analyser l'évolution de la flèche et son érosion littorale.

1. Présentation de la zone d'étude

La Marchica se situe sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc (figure 1). Elle s'étend sur 22 km d'Arekmane, au sud-est, à Bni Nçar au nord-ouest. C'est l'une des plus importantes lagunes du pourtour méditerranéen. Elle combine des topographies basses, une urbanisation intense et un intérêt écologique et économique important. En outre, elle présente plusieurs conflits d'usage des ressources côtières et a fait l'objet de création d'une Agence pour l'aménagement du site de la lagune.

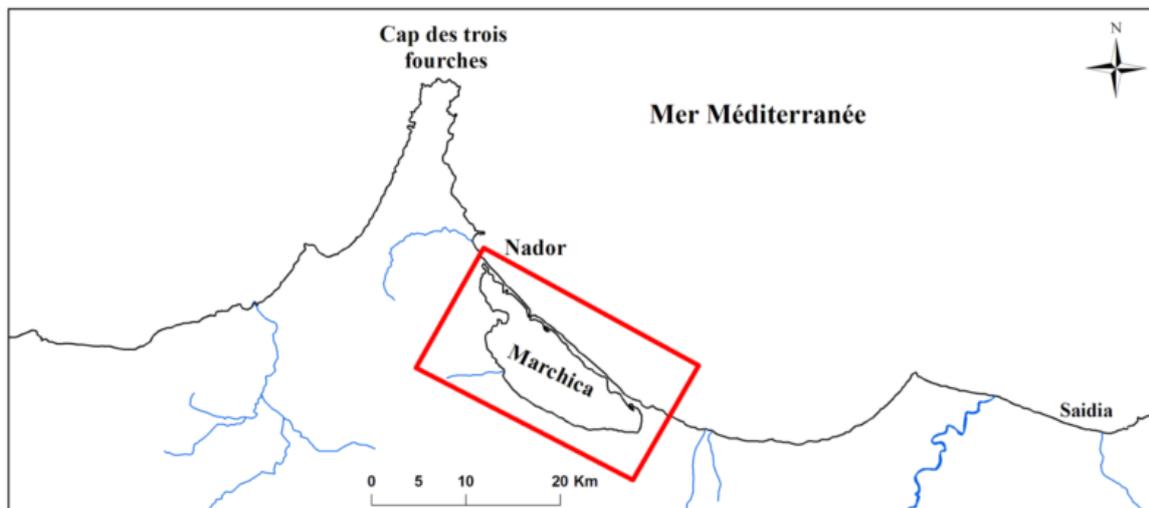


Fig.1. Localisation de la Marchica sur le littoral méditerranéen du Maroc.

La zone d'étude présente un climat méditerranéen sec et chaud en été et humide et frais en hiver avec des écarts thermiques saisonniers importants et des précipitations peu abondantes (360 mm à Nador). Les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 18°C. La vitesse moyenne du vent est de 4,3 m/s à Nador-Taouima. Les marées enregistrées dans la région sont toutes semi-diurnes et classées comme microtidales. La hauteur des vagues varie selon les sites, avec des valeurs de 0.3 à 2,5 pour Melilia (<http://www.puertos.es>).

Les principaux écosystèmes sont les dunes, la forêt et les marécages. La Marchica connaît une érosion importante au niveau d'Arekmane. L'anthropisation de la côte a des impacts géomorphologiques et environnementaux catastrophiques.

La présence au niveau de la Marchica d'une plaine facilite sa mise en valeur agricole (Plaine de Bouarg). La plage de sable présente un grand intérêt pour le tourisme balnéaire.

Depuis 2009, son statut a été renforcé par l'adoption d'un projet d'aménagement sur une superficie de près de 2.000 hectares. Sept projets sont programmés: la Cité d'Atalayoun, la Cité des Deux Mers, la ville nouvelle de Nador, la Baie des Flamants, Marchica sport, les Vergers de Marchica et le village des pêcheurs.

2. Matériel et méthodes

Les images satellitales Google Earth dont la précision est inférieure à 50 cm ont été utilisées. Elles sont rectifiées géographiquement et projetées en coordonnées Lambert. L'image de 2013 a été choisie pour comparer sa ligne de côte avec les profils relevés.

Les levés au sol ont été réalisés par GPS Leica 1200 dans un format de correction instantanée entre 2013 et 2022. La marge d'erreur est inférieure à 1 cm. Des piquets sont installés sur place pour servir de référence (Photos 1 et 2).



Photos 1 et 2. Stations fixe (1) et mobile (2) et mesure RTK (8 octobre 2017)

Au total, vingt neuf profils transversaux ont été levés pour montrer la vulnérabilité de la flèche littorale. Ensuite, sept transects ont été retenus pour suivre l'évolution de la flèche (Fig.2).

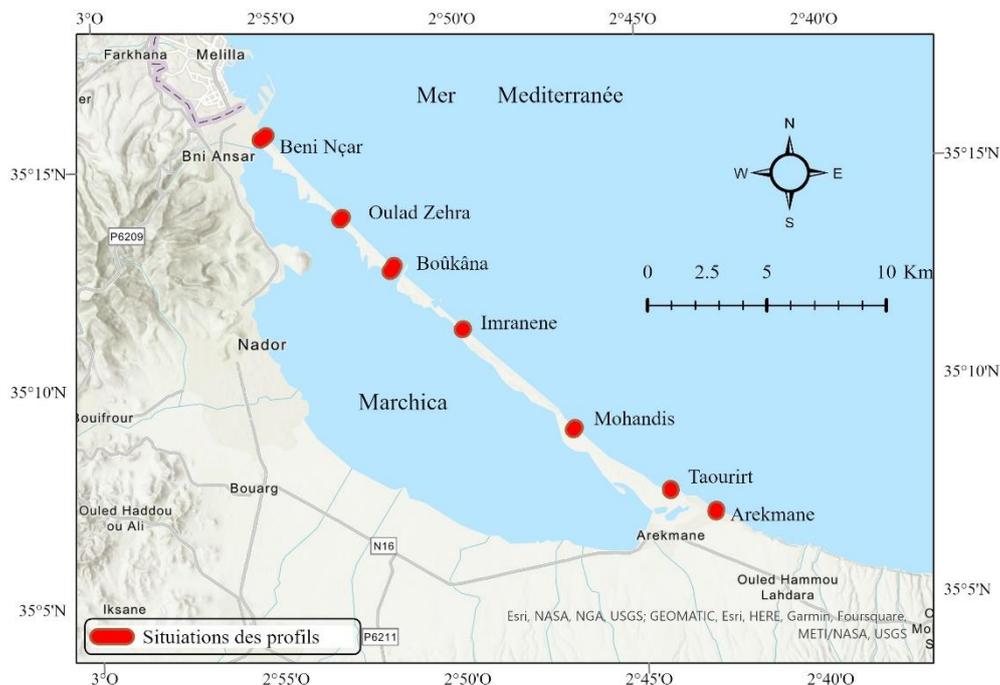


Fig.2. Position des profils réalisés sur la carte topographique

Dans un deuxième temps, les données subissent un post-traitement: importation et exportation par le logiciel Leica Geo Office 7, puis traitement des données et exportation en shapefile ou en ASCII à l'aide des logiciels Covadis d'Autocad, Surfer ou ArcGIS.

3. Résultats et discussion

3.1. Le système plage – dune

La portion du littoral étudiée est composée de plages et de dunes blanches. Ces entités sont naturellement mobiles et continuellement façonnées par la houle, la marée, les courants et les vents. La dune a un rôle de protection contre les vagues afin de les empêcher d'envahir les terres. Par endroit, apparaissent des zones basses qui témoignent de l'avancée de la mer. Ces anciennes passes ne sont plus actives que pendant de fortes tempêtes.

La morphologie des plages évolue dans le temps, ce qui entraîne une variation du stock de sédiments. Un bilan négatif est synonyme d'érosion, à l'inverse, il y a accrétion lorsqu'il est positif. Par beau temps, les sédiments sont transportés vers la côte, ce qui entraîne une accrétion. En période de tempête, c'est le processus inverse, le bas de plage est érodé.

3.2. Le recul du trait de côte depuis 1958

La mobilité du trait de côte résulte de l'action des fluctuations du niveau des eaux, des vents, des courants et des agitations, etc. sur le littoral. La surfréquentation des cordons dunaires près des plages détruit la végétation ou empêche son développement et expose ainsi le sable à l'action éolienne. Mais les ouvrages côtiers et les extractions de matériaux interviennent aussi en modifiant les échanges sédimentaires.

La partie sud-est de la flèche littorale est soumise à l'érosion côtière. La vitesse de recul est de 57 m entre 1958 et 2013, soit 1m/an. Cela a pour conséquence de générer des risques dans les zones à enjeux, ainsi plusieurs villas sont atteintes par le recul du trait de côte (Bahkan, 2016 ; Photos 3 et 4).



Photo.3. Erosion littorale active et villas menacées (13 mai 2023) Photo.4. Action entreprise pour la protection par l'érosion

Dans le cas des côtes à falaises d'Arekmane, le recul se fait par effondrement de pans de falaises limoneuses surplombants dont le pied a été sapé par les vagues.

3.3. Suivi topographique

Plusieurs campagnes ont été réalisées depuis 2013. Il est possible de calculer la distance entre deux mesures selon l'année de référence (ligne de côte de 2013). Cette méthode permet le calcul de l'avancée ou du recul de la ligne de côte. Elle consiste à calculer la distance par rapport à l'année de référence en chaque profil. En effet, l'ensemble des profils permet de déterminer au mieux l'état du littoral selon les années.

La première observation est le recul du trait de côte clairement identifiable correspondant à l'érosion de la plage (Tabl.1). Le recul le plus marqué est identifiable à Bni Nçar et Taourirt (Tabl.1). On peut y noter des valeurs approximatives d'environ 13 à 25 m en moyenne d'après les distances mesurées sur les profils.

Tabl.1. Déplacement de la ligne de côte par rapport à l'année de référence 2013

| | Arekmane Centre | Taourirt | Mohandis | Bni Nçar 1 | Bni Nçar 2 | Bni Nçar 3 | Boukana |
|-------------|-----------------|---------------|-------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2014 | | | | 0.07 | | | |
| 2015 | | | | 0.02 | | | |
| 2016 | | | | | | | |
| 2017 | 2.64 | -10.38 | 9.68 | -9.15 | -23.32 | -13.6 | 2.65 |
| 2018 | 4.48 | -2.24 | 6.47 | -5.05 | -17.44 | -8.26 | 2.98 |
| 2019 | 1.25 | -1.4 | 6.48 | -6.26 | -21.08 | -7.21 | 3.85 |
| 2020 | 2.75 | -17.26 | 1.91 | -7.39 | -23.44 | -8.3 | 4.04 |
| 2021 | 4.5 | -13.7 | | -12.41 | -24.68 | -8.32 | -10.22 |
| 2022 | -3.88 | -7.72 | | -14.69 | -25.67 | -11.52 | 8.7 |
| Min | -3.88 | -17.26 | 1.91 | -14.69 | -25.67 | -13.6 | -10.22 |

Le recul du trait de côte est bien souvent synonyme d'une destruction plus ou moins importante de la plage et de la dune active et donc d'une diminution du stock sédimentaire (Fig.3). On peut observer une érosion à l'est (1.16m) et une accrétion à l'ouest (1.42m).

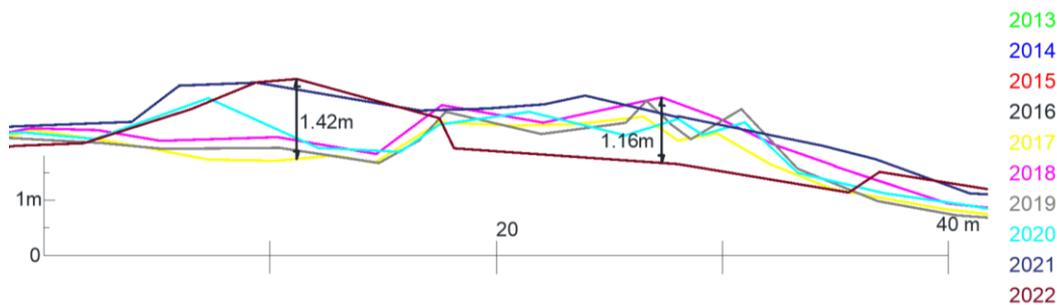


Fig.3. Illustration du recul et de l'avancée de la flèche littorale entre 2017 et 2022

Plus au sud-est (Fig.4), la plage présente un élargissement. Cela prouve qu'il y a eu accrétion due à la jetée de la passe qui bloque le transit sédimentaire (Photo 5).

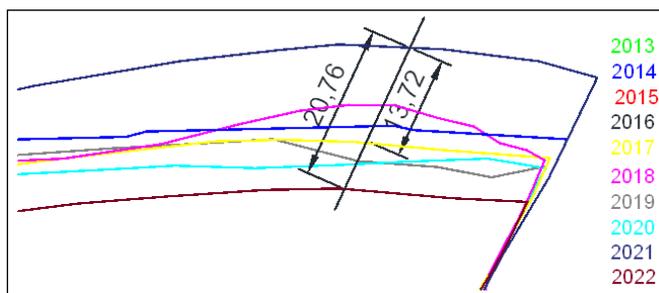


Fig.4. Accrétion au niveau de Boukana.



Photo.5. Accrétion au niveau de la digue

ouest de la nouvelle passe. 19-10-2019

Lorsque on analyse la plage, on peut voir que le haut de plage est généralement en érosion, ce qui est cohérent puisque les variations saisonnières provoquent une érosion de la plage en hiver et une accrétion en été.

3.3. Les submersions marines

Elles envahissent les terrains bas situés en dessous du niveau de la marée mais aussi parfois d'autres terrains si les eaux marines franchissent les zones basses, a fortiori lors des tempêtes. Elles apparaissent à la suite de la rupture ou de la destruction d'un cordon dunaire.

Le cordon dunaire est le site avec l'altitude la plus basse dans la zone d'étude: 0-4 m (Fig.5). Dans ce secteur, on peut observer que partout la côte entière est sujette à inondation, sauf une portion de la dune légèrement sauvegardée: El Mouhandis.

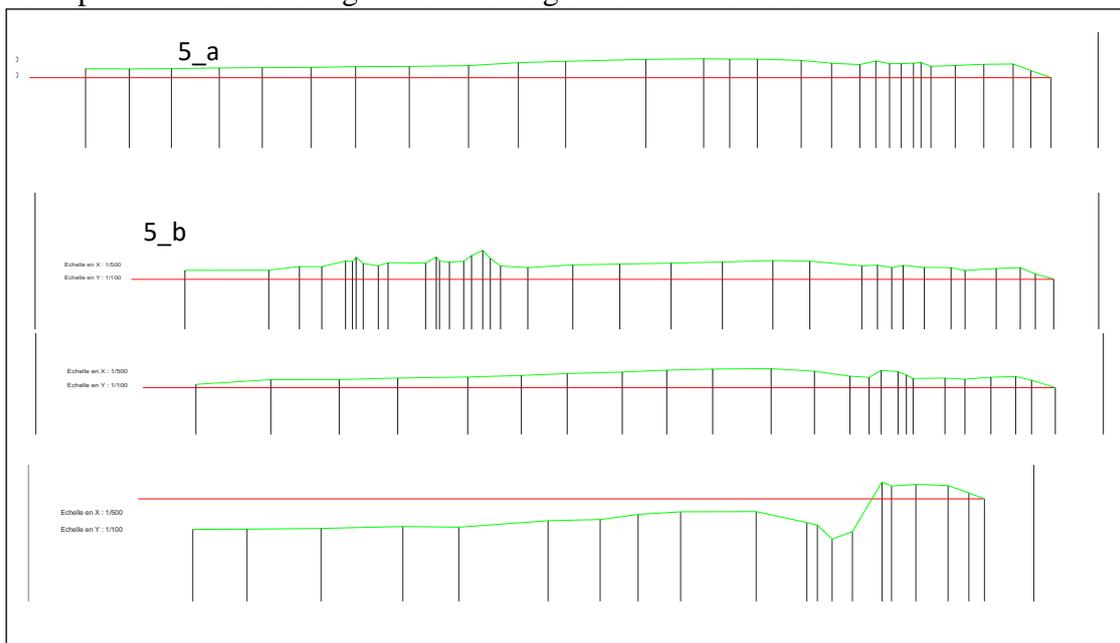


Fig.5. Profils topographiques transversaux issus de levé GPS montrant la faible altitude du cordon dunaire

La flèche littorale a connu des périodes successives d'ouverture et de fermeture. On remarque que ces ouvertures sont la plupart du temps situées au nord-ouest de la passe de Boukana, alors que les ouvertures qui sont situées au sud-est sont anciennes, et leurs dates ne sont pas connues. Ces ouvertures permettent au lac d'échanger ses eaux avec la mer. Il est à noter que ces passes ont souvent été percées par de fortes tempêtes de mer, où l'ouverture se produit en un jour ou deux, et que ces tempêtes peuvent produire parfois plus d'une passe.

3.4. Vulnérabilité et impacts des risques associés à l'élévation du niveau de la mer

L'analyse des zones d'inondation potentielle et les estimations de la vulnérabilité sont basées sur une approche empirique à partir des évaluations faites par l'IPCC sur l'élévation du niveau de la mer et les scénarios extrêmes de la marée astronomique (Sbai et al., 2014). Les changements les plus importants des trois scénarios de submersion apparaissent dans la partie nord-ouest de la flèche littorale et au niveau d'Arekmane. Plusieurs simulations réalisées à partir d'un modèle numérique d'élévation montrent que l'élévation du niveau marin pourrait entraîner la submersion de ces régions d'ici la fin du siècle.

L'analyse a été limitée aux abords de la Marchica qui sont plus affectés par une élévation du niveau de la mer. Pour cette raison, il est clair que les chiffres et les discussions présentés sont sous-estimés et que les zones d'inondation potentielle dans la région étudiée sont plus grandes du fait du développement socio-économique futur et de l'évolution morphodynamique actuelle. Quant à l'impact sur l'environnement, des pertes écologiques importantes peuvent se produire. Dans la perspective de l'élévation future du niveau marin, une grande partie des marécages subirait les conséquences d'une submersion par les eaux libres et/ou d'un engorgement par les eaux phréatiques à salinité accentuée.

Sur le cordon dunaire où trois projets sont programmés (Baie des Flamants, Cité des Deux Mers, village des pêcheurs), la perte de plages et les dommages seront importants. Il n'y a actuellement aucune construction de défense côtière placée le long du rivage.

Pour la ville d'Arekmane, parmi les régions sujettes à inondation dans les deux scénarios, l'attention est attirée au nord-est qui représente une zone très basse.

L'intensification du processus érosif est notable, ce qui expose les constructions basses aux processus morphodynamiques. Ce rivage présente un haut degré de verticalisation, à une telle ampleur que la perte de plage, ou le danger par érosion, impliquerait de grandes pertes économiques et une désorganisation sociale.

La mise en œuvre de politiques publiques pour la protection des zones côtières et d'inondation est suggérée dans deux optiques: (1) expansion et consolidation de connaissance scientifique du phénomène de submersion marine, et (2) gestion et établissement de mesures adaptatives pour minimiser son impact.

Conclusion

La flèche littorale de Nador se présente comme une région très vulnérable. Si l'élévation du niveau marin suit les estimations faites par l'IPCC, les conséquences pourraient devenir fâcheuses pour cette portion du littoral. La submersion des côtes basses se traduirait par la perte des marais doux qui constituent des écotones d'une grande richesse écologique et d'une certaine rareté sur les rives internes. Elle aura également des impacts tant sur les plans économiques que morphologiques.

Les divers profils réalisés ont permis de montrer la vulnérabilité de la flèche littorale. Ainsi, au vu des résultats obtenus, le GPS semble un outil important pour le suivi du trait de côte en zone sableuse. Les différentes campagnes de mesures réalisées ont permis d'obtenir des données à différentes dates et ainsi de les comparer pour observer les évolutions morphologiques. La méthode de comparaison actuelle, à savoir la différence altimétrique des profils, est tout à fait justifiée pour ce type de suivi du littoral et permet très clairement de voir les déplacements de sédiments.

On a ainsi pu mettre en évidence les zones d'érosion et d'accrétion et les zones sujettes aux submersions marines. Ces données, combinées avec des données bathymétriques, permettront de mieux comprendre les processus physiques en œuvre, afin d'améliorer les modèles de prédiction et donc d'anticiper au mieux les impacts sociétaux et environnementaux.

Références bibliographiques

<http://www.puertos.es>

Bahkan, 2016. Dynamisme de l'urbanisme et de l'aménagement de la bande littorale de la Marchica, province de Nador (nord-est du Maroc). Thèse. Doct.UMP. Oujda. 798 p.

IPCC -Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change. 2007. The Physical Science Basis. Accessible at: <http://www.ipcc.un.org>.

Salmon M; Sbai A; Boumeaza T; Benata M & Ozer A. 2010. L'érosion des côtes meubles de l'extrême nord-est du Maroc. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* (BSGLg). 54. 97-105. En hommage au Professeur André OZER. Liège. 24 avril 2010.

Sbai A, Lasgaa H, Bahkan, Oukada M et Mouadili O. 2014. Vulnérabilité et impacts des risques associés à l'élévation du niveau de la mer sur la Marchica (Maroc nord-est). 2ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG. Meknès 20-21 novembre 2014. P 183-187. 183 Zhang K., Douglas B. C. et Leatherman S. P. 2004. Global Warming and Coastal Erosion. *Climatic Change* (2004) 64: 41.

Sbai A, Mouadili O, Saidi A et Bahkan M. 2016. Le GPS en géomorphologie dynamique. Application au suivi de la dynamique littorale et éolienne (Maroc nord-est). *La 3^{ème} Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG*. Oujda. 22 et 23 novembre 2016. Centre d'Etudes et de Recherche Humaines et Sociales, Oujda. P.397-403. <http://www.ump.ma/fr/ouvrages/actes-du-colloque-international-des-utilisateurs-du-sig-3eme-edition>

Sbai A. et Bouazza A. 2002. Evolution géomorphologique et dynamique récente de la plaine littorale de Saïdia (Maroc Nord-est). *Colloque national: Le littoral méditerranéen oriental: diagnostic et choix de développement et d'aménagement*. Oujda les 13 et 14 février 2002. P.3-30.

INCIDENCES DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES SUR LE SECTEUR TOURISTIQUE AU MAROC : ETUDE DES CRUES DANS LES VALLEES DE TODGHA ET D'OURIKA

Mehdi BOUKIL¹, Abderrazzak SADIKI¹ et Mohamed HANCHANE¹

1) Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire, USMBA, 30000, Fès, Maroc. Mehdi.boukil@usmba.ac.ma;
sadiki.abderrazzak.geo@gmail.com ; mohamed.hanchane@usmba.ac.ma

Résumé: L'industrie du tourisme est intrinsèquement liée aux conditions climatiques et affectée par les changements du climat mondial. Cette étude vise à évaluer l'impact des risques hydro-climatiques sur le secteur touristique au Maroc, en se concentrant sur les inondations en deux vallées montagneuses (Ourika et Todgha). Les résultats obtenus ont montré que les sites sélectionnés sont significativement affectés et peuvent se traduire par la faiblesse de leur attractivité.

Mots-clés : Risques hydro-climatiques, secteur touristique, sécurité des touristes.

Abstract: IMPLICATIONS OF HYDROCLIMATIC RISKS ON THE TOURIST SECTOR IN MOROCCO: STUDY OF FLOODS IN THE TODGHA AND OURIKA VALLEYS

The tourism industry is intrinsically linked to climatic conditions and affected by changes in the global climate. This study aims to assess the impact of hydro-climatic risks on the tourism sector in Morocco, focusing on floods in two mountain valleys (Ourika and Todgha). The results obtained showed that the selected sites are significantly affected and can result in the weakness of their attractivity.

Keywords: Hydro-climatic risks – tourist sector – tourist safety.

INTRODUCTION

Le tourisme joue un rôle crucial dans le développement économique, social et culturel de nombreux pays du monde. Il est un secteur clé pour la création d'emplois, la génération de devises étrangères et la promotion de l'échange culturel. Il apporte ainsi une contribution significative à l'économie de nombreux pays, stimulant la croissance et favorisant le développement durable. Cependant, les destinations touristiques dans toute leur diversité sont parfois frappées par des événements naturels ou anthropiques (aléas climatiques, risques naturels, événements politiques ou sociaux violents, etc.) qui mettent en péril leur activité touristique et par conséquent leur croissance (Marie *et al.*, 2018). Le risque d'inondations est le plus crucial de ces risques, qui affectent le secteur touristique et d'autres activités humaines.

Dans le monde contemporain, les inondations représentent un risque naturel majeur. C'est l'un des risques naturels qui fait le plus de victimes, en occasionnant environ 20000 victimes par an (Simona et Cedric, 2007). La région méditerranéenne, par exemple, a vécu plusieurs inondations qui constituent une menace de plus en plus importante, avec des précipitations qui dépassent les 200 mm en 24 heures, et parfois même en un laps de temps qui ne dépasse pas les 6 heures (Ducrocq, 2006). Les inondations deviennent donc de plus en plus redoutées, et elles surviennent souvent à cause d'une vulnérabilité importante (Bennani, 2020). Au registre des épisodes marquants, le Maroc a connu des événements hydrologiques douloureux, comme ceux de l'été 2019 ou de l'automne 2014, sans oublier l'événement tristement célèbre d'août 1995 de l'oued Ourika (des centaines de morts). Au voisinage, l'Algérie a également connu en novembre 2001 des précipitations de 261 mm en 24 heures à Alger et des inondations qui ont causé d'importantes pertes humaines, d'environ 800 morts (Argence *et al.*, 2008). Les bassins versants espagnols ont également connu une augmentation des inondations et des événements pluviométriques intenses, à partir de 1996, notamment à l'Ouest et au sud-ouest du pays en automne et en hiver (Benito et Machado, 2012), mais aussi

en d'autres régions, comme à Barcelone en 2002. (Provitolo, 2007) ou à la côte sud-est (Pérez-Morales *et al.*, 2015).

Au Maroc, le phénomène des inondations est ressenti de plus en plus fortement surtout depuis les années 90, en raison notamment de l'extension des espaces urbains et périurbains, sur des zones fluviales inondables (Taous *et al.*, 2010). La variabilité des précipitations est une donnée structurelle du climat marocain. D'une année à l'autre, la quantité de pluies varie d'une façon considérable, selon la dynamique et l'origine des masses d'air qui surplombent le pays (Kessabi et Hanchane, 2020). Les changements dans les régimes de précipitations entraînent des impacts importants sur la disponibilité des ressources en eau, et affectent également les activités touristiques, notamment les pluies exceptionnelles qui provoquent des inondations et les crues des vallées. Ce qui entraîne des déplacements, des dommages aux infrastructures et met en danger la sécurité des touristes. Cette étude vise à explorer les risques d'inondation sur deux vallées montagneuses : la vallée d'Ourika dans la partie occidentale du Haut Atlas et la vallée de Todgha dans sa partie orientale.

1. Présentation de la zone d'étude

La vallée d'Ourika se situe dans le Haut Atlas de Marrakech, situé entre 7°30' et 7°60'W et 31° et 31° 20N (Fig. 1). Le bassin s'étend sur une superficie de 503 km², et les pentes sont raides et varient de 11 à 40 %. Grâce à ces pentes, la vallée est considérée comme torrentielle et sujet à des crues brusques. Le cours de l'oued a été influencé par des roches cristallines dures en amont et des formations sédimentaires plus flexibles en aval, créant ainsi des vallées peu profondes. (Bennani *et al.*, 2019).

La vallée de Todgha se situe sur le versant sud du Haut Atlas, au sud est du Maroc, entre les longitudes 4°10 et 6°W et les latitudes 30°40 et 32°N (Fig. 1). La vallée de Toudgha est caractérisée par un climat aride, avec des précipitations annuelles inférieures à 200 mm. Cependant, la vallée est confrontée aux risques d'inondation. (Ouchala et Lokrifa, 2019).

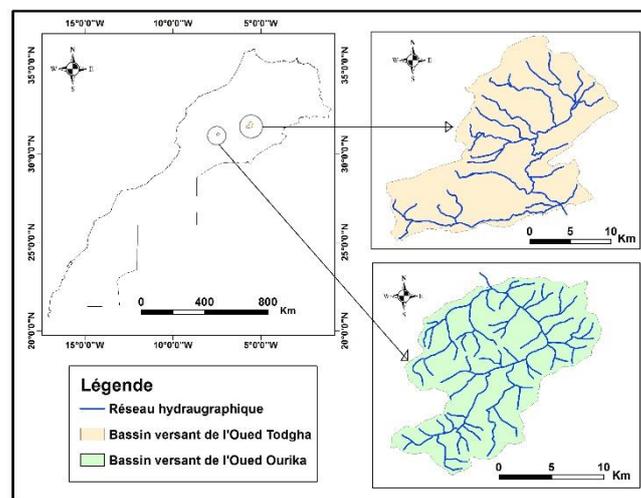


Figure 1. Situation géographique de la vallée d'Ourika et de la vallée de Todgha.

2. DONNEES ET METHODOLOGIE

Afin d'explorer et d'analyser les implications des risques hydroclimatiques sur l'activité touristique dans la zone d'étude, une analyse de la littérature existante a été entreprise. Cette analyse a été conçue pour fournir une perspective éclairée sur les événements extrêmes, notamment les inondations, qui ont eu un impact significatif sur les sites touristiques étudiés. En menant une revue systématique et méticuleuse de la littérature scientifique pertinente, nous avons approfondi notre analyse des sources disponibles, nous permettant ainsi d'explorer

minutieusement les dates, les caractéristiques et les répercussions des incidents ayant perturbé les activités touristiques dans la zone d'étude. De plus, cette revue nous a permis de relever les diverses causes des inondations, incluant les facteurs morphologiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques, ainsi que leurs interactions complexes, éclairant ainsi notre compréhension des risques associés. Par la suite, des entretiens (Tab. 1) ont été réalisés sur le terrain afin de recueillir des données sur les risques hydro-climatiques, en particulier les inondations. Cela a permis d'identifier les impacts qu'ils causent au secteur touristique, ainsi que de définir la façon dont ils doivent être traités pour formuler des solutions concrètes pour protéger les résidents, les touristes et les biens.

Tableau 1. Entretiens avec les acteurs clés de l'industrie touristique dans la zone d'étude.

| <i>Acteurs clés de l'industrie touristique</i> | <i>Nombre d'entretiens</i> | <i>Principaux thèmes abordés</i> |
|------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agences de voyages et guides | 10 | Identification des risques hydro-climatiques. Planification des voyages en fonction des conditions météorologiques et adaptation des itinéraires en cas de risques, préparation aux situations d'urgence. |
| Chauffeurs de transport touristique | 6 | Conduite sécurisée sur les routes par temps défavorable, préparation aux conditions météorologiques extrêmes, communication efficace avec les passagers en cas d'incidents. |

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Les bassins d'Ourika et de Todgha entre attractivité touristique et risque d'inondations

L'un des sites touristiques les plus touchés par les inondations catastrophiques est la région d'Ourika, située à proximité de la ville de Marrakech. Connue pour sa beauté naturelle et ses paysages spectaculaires, la vallée d'Ourika attire de nombreux touristes chaque année, qu'ils soient en voyage organisé ou en séjour individuel, tout en sachant que des excursions journalières s'y dirigent au départ de Marrakech. Cependant, les inondations soudaines et violentes peuvent compromettre la sécurité des visiteurs et endommager les infrastructures touristiques installées pour profiter des flux de touristes. Ces installations qui se varient en cafés, restaurants, maison prêtes à louer ce qui souligne l'importance de prendre en compte ce risque lors de la planification des voyages et des activités touristiques dans la région.

Au départ de Marrakech : excursion d'une journée dans la vallée de l'Ourika, dans les montagnes de l'Atlas  

Par Marrakesh Travel Services

●●●●● 120 avis



À propos

Visitez les villages de montagne et les cascades de la vallée de l'Ourika lors d'une excursion d'une journée au départ de Marrakech, qui comprend une randonnée au départ de Setti Fatma, des arrêts photo dans les spectaculaires montagnes de l'Atlas et la visite d'une coopérative d'huile d'argan. Non seulement cette visite de la vallée de l'Ourika offre le confort du transfert depuis et vers les hôtels de Marrakech, mais vous voyagez dans un monospace climatisé pour une confortable journée d'exploration.

Réservez votre place

à partir de
18,00€
par adulte

Réservez sur Viator ↗

Photo 1. Publicité d'excursion journalière vers la vallée de l'Ourika (source : Tripadvisor.com).

Le deuxième site étudié est celui de la vallée de Todgha. Les atouts touristiques naturels, environnementaux et humains de la vallée de Todgha sont considérables et variés, ce qui en fait un choix attractif pour les touristes marocains et étrangers. Ce site offre un paysage oasien (la Palmeraie, Gorges, balades pédestres) à admirer, une architecture traditionnelle inestimable (Kasbahs et Ksars), des traditions et festivités locales (mariages, Moussems) à connaître et à vivre et une hospitalité des gens très reconnue. Elle est visitée chaque année par plus de 22000 visiteurs (80% étrangers (Fr, It, Ang, Por, Sui, All) et 20% des nationaux) ce qui offre aux établissements touristiques concernés environ 23900 nuitées annuelles (Ait Hassou et Yahyaoui, 2008). Située au sud-est du Maroc et faisant partie d'un circuit touristique très prisé, reliant le désert de Merzouga à Ouarzazate via la ville de Tinghir, les gorges de Todgha constituent une étape incontournable pour les voyageurs explorant cette partie du pays. Cependant, nos enquêtes de terrain avec les transporteurs touristiques et les agences de voyages ont révélé que des inondations peuvent survenir de manière imprévisible, compromettant la sécurité des visiteurs et entravant l'accès aux gorges ainsi que les activités touristiques planifiées.

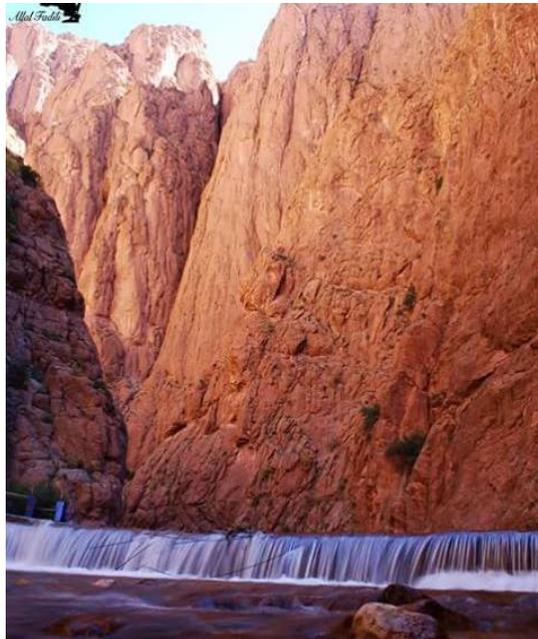


Photo 2. Gorges de Toudgha renommée mondiale (source : enquête de terrain. 2024).

3. 2. Historique des crues des vallées de Todgha et de l'Ourika

La combinaison de caractéristiques naturelles attractives, allant des formations géologiques remarquables aux sources d'eau apaisantes, fait de la vallée de l'Ourika et des gorges de Todgha des destinations incontournables pour les voyageurs en quête de découvertes naturelles exceptionnelles. Toutefois on a répertorié leur éventuelle exposition aux risques de crues. Les crues, bien que rares, pourraient avoir des conséquences significatives sur la sécurité des visiteurs et l'intégrité des infrastructures touristiques.

3.2.1 Historique des crues de la vallée d'Ourika

La vallée d'Ourika a connu des crues tristement célèbres par leurs effets destructifs et mortels. Soumise à un climat semi-aride à subhumide, et étant sous l'emprise de redoutables orages d'été, la vallée connaît souvent des pulsations brutales et violentes de son cours d'eau principal et de ses affluents. Les événements hydrologiques extrêmes du 2 novembre 1987, du 14 juillet 1989, du 17 août 1995 ou du 28 octobre 1999 par exemple ont attiré l'attention par leurs débits de pointe exceptionnels (respectivement 650, 823, 1030 et 762 m³/s). Ces crues de

l'oued Ourika sont généralement nées à partir de pluies intenses et localisées dans l'espace. (Saidi *et al*, 2003). Le 17 août 1995, une crue exceptionnelle et tristement célèbre par ses dégâts humains et infrastructurels a impressionné l'opinion publique nationale et internationale par sa puissance et sa soudaineté. Cette crue n'a duré que 3 heures, avec un temps de montée d'à peine dix minutes. Le débit est passé à la station d'Aghbalou de 30 m³/s à 20 heures à une pointe de l'ordre de 1030 m³/s à 20h10 et les eaux mobilisées ont atteint un volume de 3,3 millions de mètres cubes pendant ces trois heures apocalyptiques.

En 28 octobre 1999, une forte crue a frappé la vallée. Cette crue est caractérisée par un énorme volume d'eau durant 24 heures. En effet plus de 25 millions de mètres cubes d'eau sont passés par l'exutoire du bassin, et le débit de pointe a atteint 762 m³/s. Ce débit a augmenté dans un laps de temps de 9h, et le pic a été enregistré à 17h30. Selon la direction de l'agriculture de Marrakech, cette crue a provoqué une vingtaine de maisons détruites et plusieurs hectares de terres agricoles endommagés (Bennani, 2020).

3. 2. 2. Historique des crues de La vallée de Todgha

L'oued Todgha est le cours d'eau le plus important qui intéresse la ville de Tinghir, c'est aussi le principal affluent de l'oued Rhéris. Vue sa situation au pied du versant sud du Haut Atlas, la vallée de Todgha fait bénéficier des pluies venant de l'Ouest et de la fonte des neiges, aussi des torrents, violents parfois, se déversent et envahissent la vallée. La vallée de Todgha est classée dans la typologie de vallée à grande fréquentation touristique et palmeraies importantes pour l'économie locale. Les gorges de Todgha ont été classées 17^{ème} sur les 391 sites inventoriés à l'échelle nationale où le degré du risque de vies humaines est très élevé, et il est estimé élevé pour les constructions, l'infrastructure et l'économie. L'écoulement dans les gorges est très rapide, les vitesses sont comprises entre 4 et 7m/s et l'écoulement est en moyen légèrement torrentiel. La vallée de Todgha connaît une grande activité touristique (nationale et internationale) surtout dans les gorges de Todgha, au niveau desquelles l'oued de Todgha est rétréci avec des berges verticales. Son lit est utilisé comme chemin de transit entre la vallée de Todgha et les sites de montagne en plus hautes altitudes (Oubezza, 2014).

La vallée de Todgha a connu des inondations catastrophiques dont les plus marquantes sont celles des années 1965, 2006 et 2008. Pendant les derniers jours d'octobre 2006, de fortes précipitations ayant entraîné des inondations sans précédent dans la région. Le 28 octobre 2006, il a été enregistré 1444 m³/s comme débit maximal, et la charge de l'oued Todgha du même jour a atteint 38 Mm³ dont la majorité a été perdue sans profit. L'eau des inondations a envahi la vallée de Todgha en long et en large, causant la détérioration de l'infrastructure, agricole et économique, ainsi que des centaines de familles sans abri. Selon le personnel de l'hôtel « Yasmina », situé sur la rive droite de l'oued Todgha au niveau des gorges, lors des inondations de 28 octobre 2006 qui a duré quatre jours, l'eau a atteint environ 2,5 mètres de hauteur au niveau dudit hôtel et l'écoulement dans les gorges de Todgha était très rapide avec des vitesses comprises entre 4 et 7m/s, ce qui a détruit l'infrastructure ainsi que les touristes ont été isolés pendant plusieurs jours (Oubezza, 2014).



Photo 3. (à gauche) Commerces et habitations emportés par la crue du 17 août 1995 (Source : ABHT).

Photo 4. (à droite) Inondation de l'Oued Todgha le 28 Octobre 2006 (source : Oubezza, 2014).

4. Développement de politiques de gestion des risques d'inondation

La splendeur des paysages touristiques naturels, qui attirent tant de visiteurs, est parfois entachée par les risques naturels auxquels ils sont exposés, tels que les inondations. Alors que les voyageurs sont captivés par la beauté époustouflante des gorges, des déserts et des vallées pittoresques, ils doivent également être conscients des dangers potentiels que représentent les phénomènes naturels imprévisibles. Les inondations, en particulier, peuvent soudainement menacer la sécurité des touristes, perturber leurs plans de voyage et interrompre leurs expériences mémorables dans ces sites naturels. Cette réalité crée un défi pour l'industrie touristique et souligne l'importance d'une planification minutieuse, d'une gestion des risques efficace et de la sensibilisation des voyageurs aux dangers environnementaux dans ces destinations prisées. En adoptant des mesures préventives appropriées et en intégrant la gestion des risques dans la planification touristique, il est possible de garantir une expérience sûre et agréable pour les voyageurs tout en préservant la beauté et l'intégrité des paysages naturels.

Ainsi suite aux entretiens menés avec les guides, les agences de voyages et les chauffeurs de transport touristique, il est essentiel d'examiner les résultats obtenus afin de formuler des politiques de gestion des risques d'inondation adaptées au contexte touristique :

Sensibilisation aux risques d'inondation : Les entretiens ont révélé que la plupart des acteurs sont conscients des risques d'inondation dans les zones touristiques, notamment dans les gorges et les vallées. Cependant, certains guides et chauffeurs ont exprimé le besoin d'une sensibilisation accrue aux signes précurseurs d'inondation et aux mesures de sécurité à prendre en cas d'urgence.

Planification des itinéraires : Les agences de voyages ont souligné l'importance de prendre en compte les risques d'inondation lors de la planification des itinéraires touristiques. Elles ont mentionné la nécessité de disposer d'informations précises sur les conditions météorologiques et les risques hydrologiques pour ajuster les itinéraires en conséquence et garantir la sécurité des voyageurs.

Protocoles d'urgence : Les guides et les chauffeurs de transport touristique ont mis en avant l'importance de disposer de protocoles d'urgence clairs en cas d'inondation. Ils ont souligné la nécessité de former le personnel touristique à réagir rapidement et efficacement en cas de crise, en mettant l'accent sur l'évacuation des voyageurs vers des zones sûres et la coordination avec les autorités locales.

CONCLUSION

Le risque d'inondation reste un facteur naturel fortement présent dans le climat du Maroc, à l'instar des autres pays méditerranéens. Cependant, la fréquence des inondations semble distincte dans les zones montagneuses telles que les vallées de l'Ourika et Todgha dans le Haut Atlas, où d'importantes précipitations sont enregistrées, souvent soudaines et concentrées dans le temps et dans l'espace. Ce qui menace la population et les activités économiques, notamment le tourisme, considéré comme un secteur vital dans la politique de développement du Maroc. Ainsi, le processus de planification du développement de l'attractivité touristique au Maroc doit prendre en compte, d'une part, la possibilité et la prévision des risques de différentes formes (blocage de routes dus à la neige, bloquant la route, vents violents, tempêtes de sable, etc.), et formuler des plans de gestion des risques et des événements exceptionnels qui affectent l'activité touristique, d'autre part, conformément à une vision globale qui intègre tous les acteurs du secteur touristique au Maroc.

BIBLIOGRAPHIE

- Ait Hassou A., Yahyaoui A. 2008. Planification stratégique et développement touristique de la Vallée de Toudgha (Tinghir). Colloque International « Tourisme oasien : formes, acteurs et enjeux ». Université Ibn Zohr, Agadir (Maroc), Faculté Polydisciplinaire d'Ouarzazate, 23-25 octobre 2008, Maroc.
- Argence S., Lambert D., Richard E., Chaboureau J. P., Söhne N. 2008. Impact of initial conditions uncertainties on the predictability of heavy rainfall in the Mediterranean: A case study, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 1775–1788.
- Benito G. Machado M. J. 2012. Floods in the Iberian Peninsula. Chapter In book: *Changes of Flood Risk in Europe*; Edition: IAHS Special Publication 10 ; Chapter: 21 ; Publisher: IAHS Press and CRC Press/Balkema. Editors: Kundzewicz Z.W.; 12p.
- Bennani O. 2020. *Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride : cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc)*. Thèse de doctorat en Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III; Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech, Maroc, 162p.
- Bennani O., Druon E., Leone F., Tramblay Y., Saidi M-E. 2019. A spatial and integrated flood risk diagnosis. *Disaster Prevention and Management*, 28 (5), pp.548-564.
- Ducrocq V. 2006. Crues rapides dans le midi de la France, *Dossier Pour la Science*, 51: 82-85.
- Kessabi M., Hanchane M., 2020. Le risque de la sécheresse et la variabilité pluviométrique dans la région de Fès-Meknès à travers l'indice de précipitation normalisé et corrélation avec l'Oscillation Nord Atlantique. Ouvrage collectif : *Risques naturels, environnementaux et sociaux dans l'espace marocain : Mécanismes, gestion, et problématiques de l'aménagement*. Faculté des langues, Arts et sciences sociaux, Maroc, pp 3-18.
- Marie D, Boualem K, Eric L.L, Larbi S 2018, *Risques, résilience et pérennité des destinations touristiques : une introduction*. Etudes caribéennes Journal Open Edition. Accessible at : <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.13938>
- Oubezza A. 2014. Etude hydrologique pour la protection contre les inondations - Etude de cas: Le haut bassin de Todgha (commune Todgha Al Oulia), province de Tinghir. *Memoire Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques*. USMBA, FST, Fés.
- Ouchala M., Lokrif A. 2019. Gestion intelligente des risques naturels : le cas de Todgha-Tinghir (Texte arabe). *International Journal of Planning, Urban and Sustainable Developmentl*. Vol 6, Issue 3, 80-90.
- Pérez-Morales A., Gil-Guirado S., Olcina-Cantos J. 2015. Housing bubbles and the increase of flood exposure. Failures in flood risk management on the Spanish south-eastern coast (1975–2013). *Journal of Flood Risk Management*; Volume 11, Issue S1, S302-S313. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12207>
- Provitolo D. 2007. Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. *Annales de géographie* 1(653): 23-40. <https://doi.org/10.3917/ag.653.0023>
- Saidi M.E, Daoudi L., Aresmouk M.E.H. Blali A. 2003. Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard, exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc). *Sécheresse*, Volume 14-2, Paris, 107-114.
- Simona N., Cedric L. 2007. Gestion durable des zones inondables dans le Delta du Danube (Roumanie). Dans : *Ires Journées Scientifiques Inter-Réseaux de l'AUF, Gestion Intégrée des Eaux et des Sols*. Ressources, Aménagements et Risques en Milieux Ruraux et Urbains, 6- 9 novembre 2007, Hanoi, Vietnam, 10 p.
- Taous A., Obda K., Amyay M., Laouane M., Tribak., Akdim B., Marques M. A., Furdada G., Julià R. 2010. Cartographie et zonage de l'aléa d'inondation à Taza (Maroc). Application de la méthode géomorphologique intégrée. *Géomagheb*, n° 6, pp 1-9.

Variabilité climatique et sécheresse

LA SECHERESSE CLIMATIQUE DANS LA MOYENNE MOULOUYA : ETUDE CHRONOLOGIQUE DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE

Auhcine Jamal¹ et Janati Idrissi Abdelhamid²

Equipe de recherche : Milieux Naturels ; Aménagement et Dynamiques socio-spatiales, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, sais –Fès

Email : jamal.auhcine@usmba.ac.ma

Email : abdelhamid.janati@gmail.com

Résumé : Dans le cadre du changement climatique actuel de la terre, le Maroc, y compris le bassin versant de la Moulouya souffre d'une sécheresse climatique accrue qui devient de plus en plus longue. Cette sécheresse successive avait des impacts néfastes sur les bilans hydriques et de ce fait sur l'économie agricole dans le bassin de la Moulouya. Les séries pluviométriques observées reflètent d'une manière claire l'irrégularité des apports pluviométriques durant les dernières décennies. En effet, les fluctuations marquées au sein des séries statistiques observées amplifient la vulnérabilité du bassin de la Moulouya exposé aux événements climatiques extrêmes y compris la gravité de la sécheresse qui résulte de l'irrégularité accrue des pluies et de la tendance vers la diminution des apports, ce qui implique des conséquences négatives sur les ressources hydriques dont dispose le bassin de la Moulouya. En effet, situé dans un contexte morphoclimatique méditerranéen semi-aride, le bassin de la Moyenne Moulouya est gravement menacé par les effets néfastes dus à l'insuffisance des ressources en eau, à cause de la succession des événements secs. À cet égard, le dérèglement de la durée des épisodes humides au profit des épisodes secs et un fait qui exacerbe le risque de la sécheresse dans la région étudiée dont les conséquences sont graves sur le bilan hydrologique des cours d'eau et des eaux souterraines.

Mots clés: La sécheresse climatique, la Moyenne Moulouya, le changement climatique, la variabilité climatique, précipitations.

In the context of the current climate change, Morocco, including the Moulouya watershed, is suffering from an increased climatic drought that is becoming longer. This successive drought had a detrimental impact on water balances and on the agricultural economy in the Moulouya basin. The observed series reflect clearly the irregularity of rainfall in recent decades. Indeed, the fluctuations of the observed statistical series amplify the vulnerability of the Moulouya basin exposed to extreme climatic events, including the severity of drought resulting from the increased irregularity and the downward trend of rainfall, which implies negative consequences on the water resources in the Moulouya basin. Located in a semi-arid Mediterranean morphoclimatic context, the middle Moulouya basin is seriously threatened by the damaging effects due to the insufficiency of water resources, owed to the succession of dry events. In this regard, the decrease of wet episodes exacerbates the risk of drought in the region, which has serious consequences on the hydrological balance of rivers and groundwater.

Keywords: Climate drought, Middle Moulouya, climate change, climate variability, precipitation.

INTRODUCTION

Durant les dernières décennies, le bassin de la Moulouya souffre d'un stress hydrique accrue dû à la succession des années sèches. Ces années sèches qui vont devenir de plus en plus longues et sévères (Ngadi M. ,1995 ; Sebbar et al., 2011) surtout dans la Moyenne Moulouya qui se situe dans un contexte climatique semi-aride qui présente de fortes analogies avec les zones présahariennes telles que l'aridité et les fortes amplitudes thermiques (Raynal R. ,1961), puisque toute la région est ouverte aux influences sahariennes et également l'effet de la continentalité et de l'abri orographique en raison de la disposition de la chaîne atlasique qui joue un rôle d'obstacle contre les influences humides de l'Ouest. Pour étudier ce type des événements climatiques extrêmes comme la sécheresse, il est nécessaire de suivre analyser les séries pluviométriques afin de bien comprendre leur irrégularité et évaluer la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie annuelle dans le cadre du changement climatique actuel. D'autre part, et pour déterminer les épisodes secs qui se définissent comme un événement climatique extrême, lié essentiellement à un manque de la pluviométrie, nous allons effectuer une étude chronologique de la pluviométrie annuelle dans la Moyenne Moulouya durant la période 1980-81/2018-19 en se basant sur cinq stations pluviométriques.

1. Situation de la zone d'étude

Bordée par la Basse Moulouya au Nord et le compartiment de la haute Moulouya au Sud, limitée par le Moyen Atlas à l'Ouest et par la frontière avec les Hautes Plateaux à l'Est, la Moyenne Moulouya fait partie du bassin versant de la Moulouya et occupe une vaste superficie dans ce bassin (Figure 1). Elle s'étend sur 17000 km², ce qui représente 33% environ du bassin de la Moulouya.

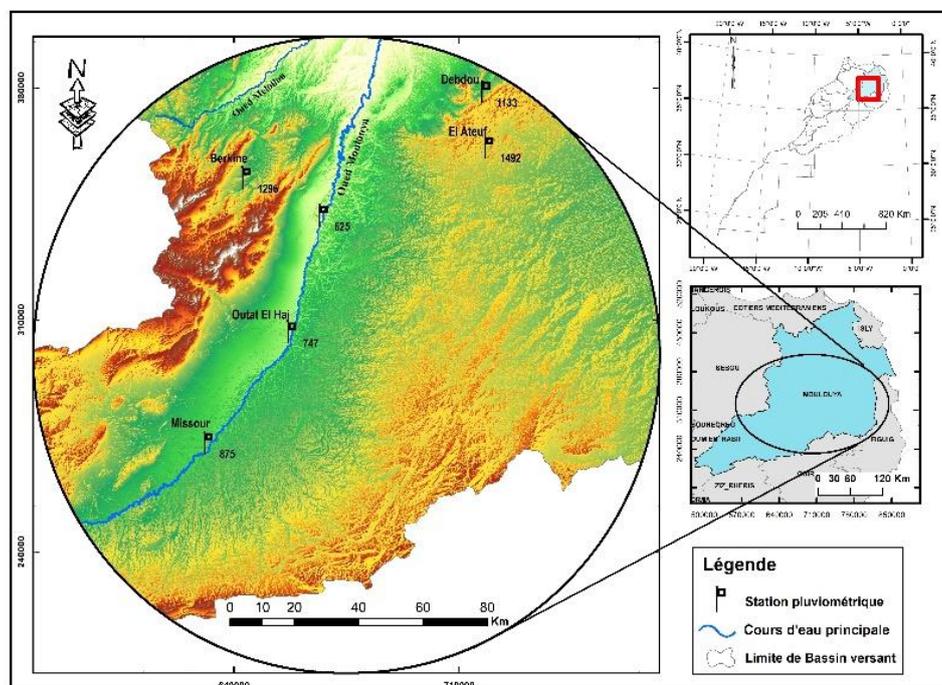


Figure n° 1 : la situation géographique de la Moyenne Moulouya
(Source ; MNT 30 m, la carte topographique de la zone d'étude + nos traitements)

Du point de vue géographique, cet espace correspond aux hauts plateaux et leurs bordures se situe entre les latitudes 32° 50' et 33° 50' et de part et d'autre de la longitude 4° ouest (Combe et Simont, 1971).

2. Méthode de travail

Cette étude a pour objectif de déterminer le déficit pluviométrique annuel durant une période donnée en utilisant l'indice standardisé de précipitation SPI (Standardized Precipitation Index). Cet indice amène à analyser le degré de la sécheresse climatique durant une période déterminée (Wu et al., 2006 ; Ghenim et al., 2011 ; OMM, 2012 ; Soro et al., 2014), il est calculé comme suite :

$$SPI = (X_i - X_m) / S_i$$

X_i : La somme des précipitations pour chaque année en mm.

X_m : Pluie moyenne annuelle pour la période étudiée.

S_i : Ecart type des précipitations sur la période étudiée.

McKee et al. (1993) a développé une classification pour l'indice standardisé de précipitation qui comporte huit classes, allant de l'excès d'humidité à la sécheresse extrême (Tableau n° 1).

| | |
|-----------------|----------------------|
| 2,0 et plus | Extrêmement humide |
| de 1,5 à 1,99 | Très humide |
| de 1,0 à 1,49 | Modérément humide |
| de -0,99 à 0,99 | Proche de la normale |
| de -1,0 à -1,49 | Modérément sec |
| de -1,5 à -1,99 | Très sec |
| -2 et moins | Extrêmement sec |

► Tableau n° 1 : Valeurs de l'indice SPI (McKee et al. 1993)

1. Répartition spatio-temporelle différent de la pluie annuelle

Depuis les années quatre-vingt les apports pluviométriques précipités ont connu une grande variabilité spatiale et temporelle, qui s'est aggravée en raison de la succession des années sèches survenues au Maroc durant les années 80 et 90, comme le démontre l'étude des séries des données des stations pluviométriques au niveau de la Moyenne Moulouya.

3.1. Précipitations annuelles inégalement réparties

Au niveau de la Moyenne Moulouya on constate que la répartition spatiale de la pluviométrie annuelle pendant la période 1980-81 et 2018-19 est assez contrastée (Figure n° 2). La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 490 mm au niveau des sommets du Moyen Atlas vers l'Ouest de la Moyenne Moulouya et 114 mm le long de la moyenne Moulouya en passant à l'isohyète 223 mm sur les Hautes Plateaux. La quasi-totalité de la cuvette sédimentaire de la Moyenne Moulouya reçoit entre 170 et 193 mm comme une moyenne annuelle des apports. Toutefois, les pluies moyennes annuelles augmentent selon deux principales directions à savoir de l'Est vers l'Ouest et du Sud vers le Nord. Il est à noter que la pluviométrie augmente en fonction de l'altitude puisque les stations qui situent sur des altitudes importantes comme celles de Debdou (1133 m) qui reçoivent des précipitations importantes atteignant 300 mm comme moyenne annuelle.

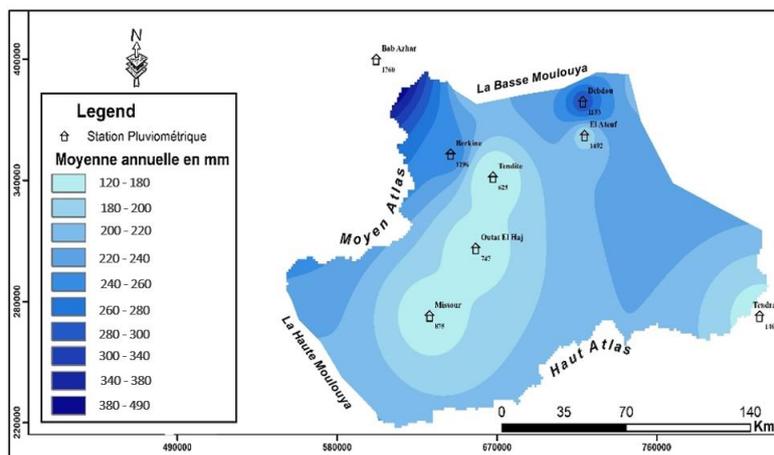


Figure n° 2 : Carte isohyète de la région étudiée (1980-81 / 2018-19)
(Source ; Données de l'ABHM + nos traitements)

3.2. Répartition temporelle assez différente de la pluviométrie annuelle

En générale, nous constatons un accroissement de la pluviométrie en fonction d'altitude au niveau de la zone d'étude. Puisque les stations de Debdou (1133 m) et celle de Berkine (1296 m) sont les plus arrosées dans la moyenne Moulouya à cause de plusieurs facteurs géographiques comme l'effet de l'altitude et l'exposition des versants avec des apports pluviométriques assez importants dépassant 400 mm (Figure n° 3).

Au cours de la période 1980-1981 à 2018-2019 la station de Debdou a enregistré des apports annuels très importants dépassant la moyenne de 327 mm. Les hauteurs de pluies varient d'un maximum de 563.5 mm en 2008-09 à un minimum de 85.4 mm en 1982-83, c'est-à-dire un écart de 478.1 mm. La pluviométrie annuelle à la station de Berkine dans le Moyen Atlas varie de 441.7 mm en 2008-09 à 103.7 mm en 1992-93 soit un écart de 338 mm.

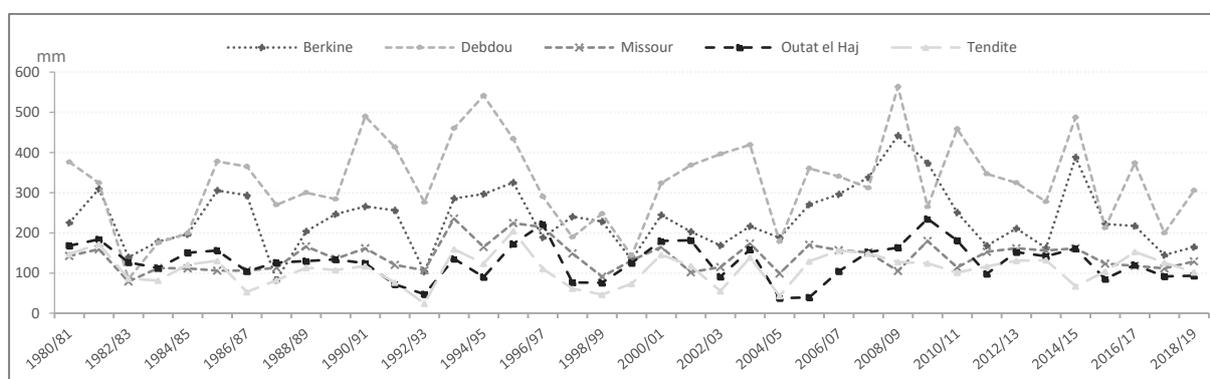


Figure n° 3 : Pluies annuelles au niveau des stations de la Moyenne Moulouya (1980-81 /2018-19)

La variabilité pluviométrique dans la vallée moyenne de la Moulouya est très importante et les apports annuels sont les plus fiables dans toute la région étudiée. En amont de la vallée moyenne dans le secteur d'aridité sèche à la dépression fermée Missour-Outat EL Haj, la station de Missour reçoit des apports annuels variant d'un maximum de 235.4 mm en 1993-94 à un minimum de 78.8 mm en 1982-83 avec un écart de 156.6 mm. A la station de Outat El Haj, les années sèches sont plus fréquentes varient d'une année à l'autre autour d'une moyenne de 128.1 mm. La série pluviométrique illustre un maximum de 183.8 mm en 1981-82 et un minimum de 47 mm en 1992-93. De plus, en aval de la vallée moyenne de la Moulouya, la station de Tendite enregistre une moyenne annuelle de l'ordre de 110.4 mm. L'année la plus arrosée est celle de 1995-96 (204.5 mm) et la moins pluvieuse est celle de 1992-93 (24.4 mm) qui est considérée comme l'année la plus sèche dans toutes les séries statistiques étudiées.

2. Résultat et discussion

L'examen de l'indice standardisé de précipitation mesuré au niveau des stations étudiée dans la Moyenne Moulouya au cours de la période 1980-81/2018-19, montre la fréquence élevée des années déficitaires le long de la vallée de la moyenne Moulouya (Tableau n° 2). Elles représentent 58.9 % à Outat El Haj, 56.4 % à Tendite, 53.8 % et seulement 41 % à Berkine et 38.4 % à la station de Debdou. Les années humides au cours desquelles les précipitations ont dépassé la moyenne annuelle sont élevées au niveau des stations qui se situent à des altitudes importantes à environ de 61.5 % à Debdou, 58.9 % à Berkine, 46.1 % à Missour, 43.5 % à Tendite et 41 % à la station de Outat El Haj. Les apports pluviométriques enregistrés au cours des dernières décennies dans la zone étudiée indiquent l'importance de la variabilité et/ou

l'irrégularité climatique, liée au changement climatique actuel, en particulier aux années successives de sécheresse.

| Station | Extrêmement humide | | Très humide | | Modérément humide | | Proche de la normale | | Modérément sec | | Très sec | | Extrêmement sec | | Total | |
|--------------|--------------------|-------|-------------|--------|-------------------|--------|----------------------|--------|----------------|-------|----------|-------|-----------------|-------|-------|---------|
| | Nbr | % | Nbr | % | Nbr | % | Nbr | % | Nbr | % | Nbr | % | Nbr | % | Nbr | % |
| Missour | 0 | 0.00% | 3 | 7.69% | 4 | 10.26% | 31 | 79.49% | 1 | 2.56% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% | 39 | 100.00% |
| Outat el haj | 0 | 0.00% | 2 | 5.13% | 4 | 10.26% | 30 | 76.92% | 2 | 5.13% | 1 | 2.56% | 0 | 0.00% | 39 | 100.00% |
| Tendite | 0 | 0.00% | 3 | 7.69% | 3 | 7.69% | 29 | 74.36% | 2 | 5.13% | 2 | 5.13% | 0 | 0.00% | 39 | 100.00% |
| Berkine | 0 | 0.00% | 2 | 5.13% | 1 | 2.56% | 34 | 87.18% | 2 | 5.13% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% | 39 | 100.00% |
| Debdou | 2 | 5.13% | 4 | 10.26% | 7 | 17.95% | 25 | 64.10% | 1 | 2.56% | 0 | 0.00% | 0 | 0.00% | 39 | 100.00% |

Tableau n° 2 : Répartition de la part de nombre d'années sèches et humide selon les valeurs de SPI

En revanche, le suivi et l'analyse des valeurs de SPI au niveau des stations étudiées (Figure n° 4) montre la grande fréquence des années sèches dans la Moyenne Moulouya. Cette fréquence varie entre 7 années dans le secteur d'aridité sèche au niveau de la dépression fermée Missour-Outat El Haj jusqu'à la station de Tendite et 5 années au niveau des sommets du Moyen Atlas à la station de Berkine. En effet, la station de Missour à l'amont de la Moyenne Moulouya a enregistré trois périodes sèches assez longues qui ont duré entre 5 et 8 ans ; la première de 1982-82 à 1987-88 et la deuxième de 1998-99 à 2002-03 et la troisième de 2010-11 à 2018-19. La station de Outat El Haj a connu cinq périodes sèches : de 1988-89 à 1995-96, 1997-98/1999-00, 2002-03/2004-05, 2011-12/2013-14 et de 2015-16 jusqu'à 2018-19. En ce qui concerne, la station de Tendite en aval on relève une période sèche de 1986-87 jusqu'à 1992-93, et puis de 1996-97/2000-01 et une autre de 2012-13 jusqu'à 2018-19. Enfin à la station de Berkine la période sèche la plus longue était entre 2010-11 à 2015-16.

Ainsi, d'après l'examen de l'indice SPI au niveau des stations étudiées on constate que la Moyenne Moulouya est caractérisée par des valeurs de sécheresse intenses au cours des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, puisque les indices de SPI sont compris entre la normale (-0.01) et très sec (-1.8).

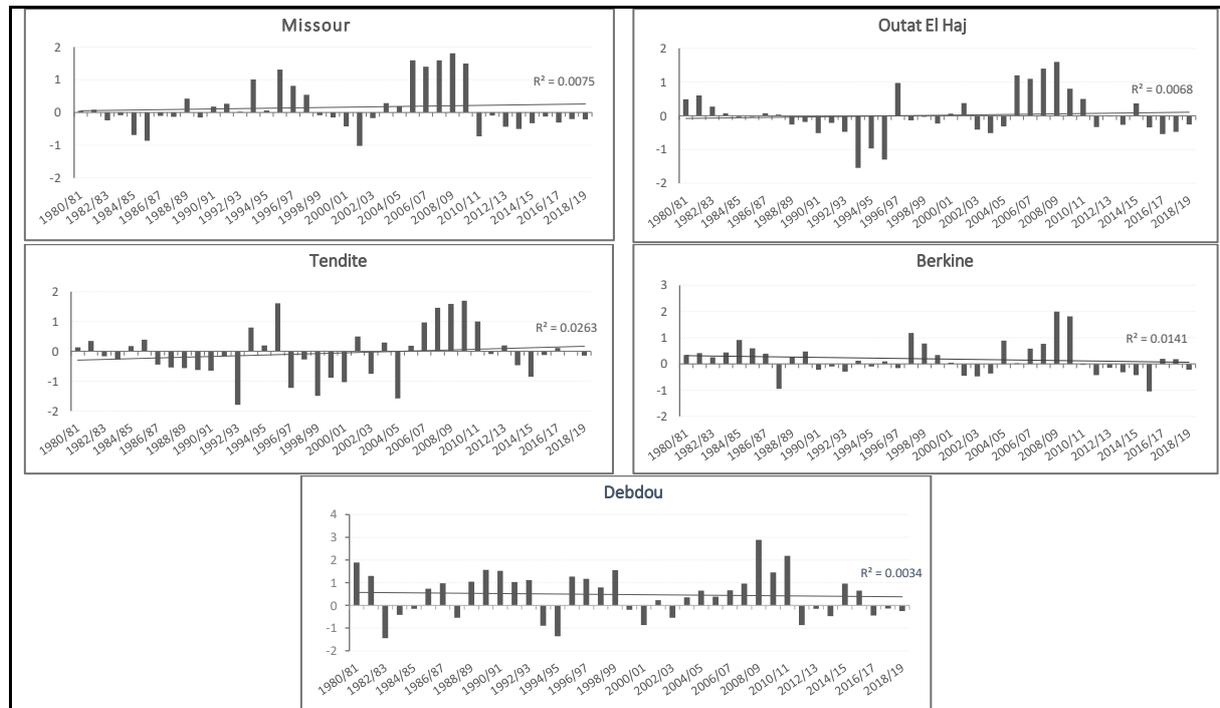


Figure n° 4 : l'indice standardisé de précipitation au niveau des stations étudiées

À cet égard, au niveau de la vallée Moyenne de la Moulouya les valeurs de la sécheresse climatique sont les plus critiques dans toute la Moyenne Moulouya puisque à la station de Missouri, l'année la plus sèche était 2001-02 (-1.01) et l'année la plus arrosée était 2008-09 (1.8). Pour la station de Outat el Haj l'année 1993-94 était la plus sèche (-1.5) et celle de 2008-09 était la plus humide (-1.6), alors que la station de Tendite a enregistré la valeur de sécheresse la plus sévère dans toute la Moyenne Moulouya en 1992-93 (-1.8) et l'année la plus pluvieuse était 2009-10 avec (1.7). Cependant au niveau des stations qui se situent sur des altitudes importantes les valeurs de la sécheresse sont moins intenses comme à Debdou qui est marquée par des années modérément sèches avec une valeur de SPI de -1.4 en 1982-83 et par contre l'indice de l'année la plus humide de 2008-09 avait atteint 2.8, également à la station de Berkine l'année la plus sèche est celle de 2015-16 (-1.04) et la plus arrosée était 2008-09 (1.99).

En générale la fréquence accrue des périodes sèches par rapport aux périodes humides au niveau de la Moyenne Moulouya est due essentiellement à la situation géographique de cette région dans une zone d'abri orographique mais également atmosphérique. Car la jonction entre la dorsale anticyclonique de la cellule atlantique de l'Açores avec l'anticyclone nord-africain une bonne partie de l'année en Hiver et au printemps, établit un fort obstacle contre l'advection vers le sud des dépressions provenant de l'Océan Atlantique. (Figure n° : 5 et 6)

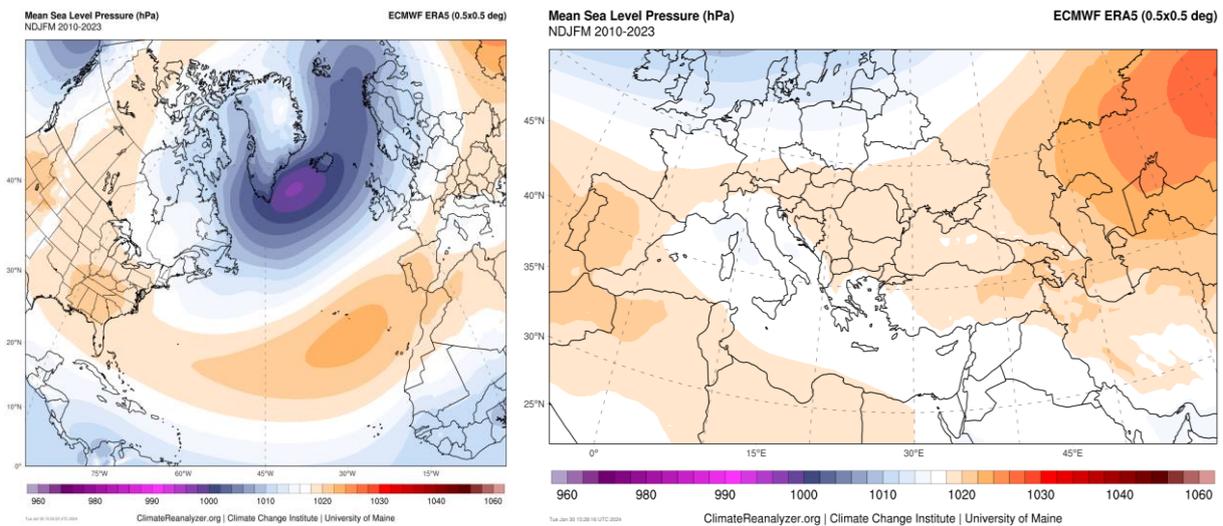


Figure n° : 5 et 6 Carte de la pression atmosphérique au niveau moyen de la mer sur l'atlantique Nord à gauche et sur la Méditerrané à droite de novembre à Mars entre 2010 et 2023.

D'après la carte ci-dessus la carte de sortie du model européen ECMWF ERA5 a montré durant la période 2010/2023 un renforcement des pressions atmosphériques sur l'Afrique du Nord, le voisinage atlantique du Maroc. Ainsi, l'examen de la carte précédente nous amène à tirer le rattachement de la dorsale de l'anticyclone des Açores avec la couverture anticyclonique de la cellule nord-africaine. Ce blocage anticyclonique appartient à une vaste bande ceinturant presque tout l'hémisphère Nord sur des latitudes qui dépassent les 35 degrés Nord. Cette situation contrarie tout déplacement vers le sud de l'air froid descendant sur l'atlantique depuis le cercle polaire.

Conclusion

La variabilité de la pluviométrie annuelle au niveau de la zone d'étude a montré une tendance vers la diminution de précipitations à partir des années 2010. De plus, la distribution des précipitations au niveau de la Moyenne Moulouya au cours de la période 1980-81/2018-19 a connu un changement visible aggravant la sécheresse climatique dans la région. D'après l'étude des séries pluviométriques on a constaté une grande fréquence des épisodes secs avec une tendance vers le prolongement de ces dernières sur plusieurs années, et les précipitations augmentent évidemment d'une manière positive en fonction du facteur altitudinal. Il est à noter aussi qu'il se trouve une association entre la tendance vers le réchauffement actuel de la terre et sa responsabilité au niveau de changement climatique et la variabilité décennale du climat (oscillation climatique ENSO, NAO) et le changement des modes de circulation atmosphérique (Horel J.D. et Wallace J.M., 1981, Rogers J.C., 1984, Driouech f., 2010). Ces changements sont responsables du renforcement anticyclonique sur le continent nord-africain où se trouve Le Maroc, ce qui explique cette tendance actuelle vers la sécheresse.

Bibliographie :

- Combe M. et Simont M. 1971 :** La Moyenne Moulouya, In Ressources en eaux du Maroc. Tome 1 Domaines du Rif et du Maroc oriental, Rabat, Service Géologique du Maroc éd., p. 203-231.
- Driouech F., 2010 :** Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique. Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 163 p.
- Ghenim A., Megnounif A. 2011 :** Caractérisation de la sécheresse par les indices spi et ssfi (nord-ouest de l'algérie). Revue scientifique et technique n°18, pp 59-77.
- Horel J.D. et Wallace J.M., 1981:** Palanetry-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation, Mon. Wea. Rev., 109, p. 813-829.
- Mckee, T.B., Doeskenet N.J., Kleist J. 1993:** the relationship of drought frequency and duration to time scale. in: proceedings of the eighth conference on applied climatology, Anaheim, California, du 17 au 22 janvier 1993. Boston, American meteorological society, 179-184.
- Ngadi M. 1995 :** Précipitations et écoulement dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc). Thèse de doctorat, université Paul Valéry – Montpellier III, arts et lettres, langues et sciences humaines et sociales.
- Organisation Meteorologique mondiale OMM. 2012 :** Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations. Genève, 17p.
- Raynal R. 1961 :** Plaines et piedmonts du bassin de la Moulouya (Maroc oriental). Étude géomorphologique, Thèse Doctorat ès Lettres Université Mohammed V, Rabat, 617 p.
- Rogers J.C., 1984:** The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. Mon. Wea. Rev., 112 p, 1995-2015.
- Sebbar A., Badri W., Fougrach H., Mohamed Hsaine M., Slouai A. ,2011 :** Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2000).
- Soro G.E., Anoumand G.L., Goulabit A., Srohorou B., Savane I. 2014 :** Caractérisation des séquences de sècheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême nord- ouest de la cote d'ivoire. Revue Larhyss journal, 18, 107-124.
- Wu H., Svoboda M.D., Hayes M.J., Wilhite D.A., Fujiang W. 2006:** Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons.

Cartographie de la vulnérabilité climatique au niveau de l'espace rural de la province de Berkane: approche statistique et cartographique par les SIG

Mimoun BOUKHIDOUS et Abdelkader SBAI

Doctorant, à la FLSH / Université Mohamed Ier, Oujda. Maroc. mboukhidous@gmail.com

Professeur à la FLSH / Université Mohamed Ier, Oujda. Maroc. Sbaiabdelkader59@gmail.com

Résumé: Face à des aléas climatiques, un territoire est soumis à la résultante de plusieurs facteurs dont sa capacité d'adaptation, l'impact de l'aléa qui est corolaire à l'exposition au facteur 'risque' et la sensibilité du système mis en jeu. Ainsi, on est amené à admettre que la vulnérabilité est fortement liée aux caractéristiques intrinsèques des territoires qui s'inscrivent dans divers registres: spatial, environnemental et socio-économique.

Notre approche consiste, à travers les statistiques et une cartographie par les systèmes d'informations géographiques, de décortiquer les déséquilibres et les inégalités territoriaux qui sont à l'origine de la fragilisation du système engendrant une accentuation de sa vulnérabilité aux aléas climatiques. Une telle approche est basée sur la combinaison de différents indicateurs, regroupés sur la base d'une typologie reflétant plusieurs aspects ayant trait principalement aux caractéristiques des groupes sociaux, des activités, du bien-être, des infrastructures et de l'environnement. L'objectif de tel travail envisage l'élaboration d'un outil de diagnostic, de suivi et d'évaluation de la résilience des territoires vis-à-vis des risques.

Etant donné leurs importances, les espaces agroforestiers ont été analysés selon le prisme de la vulnérabilité aux aléas climatiques. Les résultats montrent que les espaces du bour défavorable, les steppes et le reboisement sont les plus vulnérables. Les espaces d'agriculture PMH et les forêts présentent une hétérogénéité quant aux extrêmes de la vulnérabilité et partant ces espaces présentent une fragilité vis-à-vis des aléas climatiques. En conséquent, il est nécessaire de porter des réflexions sages pour un aménagement adéquat garantissant leurs préservations et leurs pérennités.

Mots clés: Climat, vulnérabilité, socio économie, agriculture, territoire, province de Berkane.

MAPPING CLIMATE VULNERABILITY IN RURAL AREAS OF THE BERKANE PROVINCE: STATISTICAL AND CARTOGRAPHIC APPROACH USING GIS

Abstract: Faced with climatic hazards, a territory is subject to the result of several factors including its capacity to adapt, the impact of the hazard which is a corollary to exposure to the 'risk' factor and the sensitivity of the system implemented. Thus, we are led to admit that vulnerability is strongly linked to the intrinsic characteristics of territories which fall into various registers: spatial, environmental and socio-economic.

Our approach consists, through statistics and mapping using geographic information systems, of dissecting the territorial imbalances and inequalities which are at the origin of the weakening of the system leading to an accentuation of its vulnerability to climatic hazards. Such an approach is based on the combination of different indicators, grouped on the basis of a typology reflecting several aspects relating mainly to the characteristics of social groups, activities, well-being, infrastructure and the environment. The objective of such work envisages the development of a diagnostic, monitoring and evaluation tool for the resilience of territories to risks.

Given their importance, agroforestry areas were analyzed through the prism of vulnerability to climatic hazards. The results show that unfavorable areas, steppes and reforestation are the most vulnerable. PMH agricultural areas and forests present heterogeneity in terms of the extremes of vulnerability and therefore these areas present fragility with regard to climatic hazards. Consequently, it is necessary to make wise reflections for adequate development guaranteeing their preservation and sustainability.

Keywords: Climate, vulnerability, socio-economy, agriculture, territory, Berkane province.

Introduction

La fragilité des territoires envers les enjeux climatiques, suscite une réflexion qui incite à étudier en premier lieu leurs vulnérabilités aux risques. Cette vulnérabilité que nous tentons de saisir, non pas seulement, en tant que degré d'exposition, mais également en fonction de la

capacité de réponse du système. La vulnérabilité n'est qu'une transcription indirecte de la capacité d'un système à surmonter la crise en interpellant les propriétés de résilience de celui-ci (Sanseverino-Godfrin, 2020), en d'autres termes, ses potentialités à faire face à un risque et de revenir à la situation de départ.

Il s'agit de comprendre davantage la complexité de la vulnérabilité aux impacts du changement climatique et ce en rapport avec la fragilité des territoires étant donné que ce phénomène agit comme un amplificateur des inégalités en touchant les plus défavorisés à toutes les échelles (Guivarch & Taconet, 2020).

Pour pallier cette contrainte, les SIG, par leurs facultés d'analyse spatiale, multicritère et statistique, se présentent comme le moyen adéquat pour approcher spatialement la vulnérabilité. Celle-ci serait affectée par des processus opérant à différentes échelles spatio-temporelles et fonctionnelles qui sont fondées sur la synergie entre les sous-systèmes humain et biophysique (Turner B.L. et al, 2003). La vulnérabilité serait exprimée ainsi, selon un emboîtement d'échelles spatio-temporelles et en reconsidérant les espaces du risque en tant qu'ensemble de lieux et de territoires en interactions complexes (Bonnet et al, 2006).

Compte tenu du caractère multicritère de la vulnérabilité et la multiplicité des dimensions intervenants dans sa composition, les territoires expriment des réponses contrastées vis-à-vis des enjeux liés aux risques climatiques. Les répercussions se manifestent différemment selon les espaces et la population et en fonction des facteurs biophysiques et socioéconomiques dominants.

Ainsi, et pour illustrer ces aspects et appréhender la vulnérabilité, nous avons opté pour la décrypter par une combinaison d'indicateurs s'inscrivant dans des dimensions socioéconomique et spatiale, intégrant les potentialités des territoires et les opportunités du développement local. Cela ne peut être exprimé qu'à travers une hiérarchisation socio-spatiale des éléments précurseurs des disparités entre les différents territoires comme étant les déterminants principaux de la vulnérabilité.

Nous estimons que ces dimensions couvrent un large éventail de combinaison et de recoupement d'indicateurs en mesure d'évaluer la vulnérabilité. Les indicateurs ont été hiérarchisés selon trois affinités : le degré d'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation.

L'objectif assigné à ce travail est de cartographier et classer les territoires selon leurs vulnérabilités vis-à-vis des aléas climatiques en vue de mieux orienter les actions et les interventions en matière d'adaptation.

Méthodologie

Les disparités socioéconomiques et spatiales sont révélatrices d'une vulnérabilité territoriale, d'où l'idée de mesure du contraste entre les différentes entités socio-spatiales pour l'appréhender selon une typologie d'indicateurs. On s'inscrit, dès lors dans une démarche prospective d'évaluation du risque à travers l'analyse des facteurs intrinsèques ou extrinsèques qui sont à l'origine de la vulnérabilité (Leone, 2006). Toutefois, on ne peut pas nier que l'évaluation de la vulnérabilité ne présente pas pour autant un consensus méthodologique, que ce soit sur la collecte de données comme pour leur agrégation dans un index synthétique (Sylvia, 2012).

L'approche méthodologique pour appréhender la vulnérabilité prend en considération le degré de fragilité d'un territoire en le classant par gradient de défavorisation parmi un groupe d'entités socio-spatiales voisines reflétant de la sorte les disparités intrinsèques de ce groupe. En d'autres termes, cette analyse met en exergue le degré d'hétérogénéité du groupe exprimé par les écarts

des résultantes des indicateurs choisis pour cet effet ou au contraire l'homogénéité qui est en faveur d'une capacité d'adaptation.

À propos de notre champ d'études, la méthode de compilation des indicateurs, concernant les différents territoires composant les communes rurales de la province de Berkane, comporte trois étapes consécutives :

- Une collecte des données (variables) relatives aux divers indicateurs choisis ;
- Une compilation de plusieurs indicateurs selon une hiérarchisation de l'information par agrégation croissante des données. Cette synthèse de l'information est opérée par une normalisation des données selon la transformation linéaire de normalisation $f(x) = \frac{x - (x \text{ min})}{(X \text{ max}) - (x \text{ min})}$;
- Pour chaque composante, et moyennant les outils d'analyses spatiales des SIG, on additionne les variables normalisées des différents indicateurs superposées spatialement dans une grille orthogonale de 250m /250m, prise comme entités spatiale élémentaire d'analyse.

Ainsi, et en vue d'établir une cartographie de la vulnérabilité aux changements climatiques (CVCC), on se base sur les travaux du GIEC qui définissent la vulnérabilité en considérant ses liens avec l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation (GIEC, 2007). L'indice de vulnérabilité environnementale (EVI) serait une construction de la moyenne des trois sous-indices : l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation selon le Programme d'Appui Analytique à la Stratégie Changement Climatique du Maroc (Banque mondiale, 2013).

$$\text{EVI} = 1/3(\text{Exposition} + \text{Sensibilité} + (1-\text{Capacité d'adaptation}))$$

Au Maroc, d'autres méthodes sont adoptées pour le calcul de la vulnérabilité aux risques climatiques, notamment celle suggérée par l'Agence Allemande de Coopération Internationale (GIZ et adelphi/EURAC 2017) :

$$\text{Vulnérabilité} = 100 - (1/2) * [(100 - \text{Impact}) + \text{Capacité d'adaptation}]$$

Résultats

La spatialisation de la vulnérabilité moyennant les SIG révèle que les zones Sud et Sud-Ouest sont les plus vulnérables aux aléas climatiques (Fig.1). Il s'agit des communes de Rislane, Chouihia et Sidi Bouhouria en particulier et une partie des territoires des communes de Boughriba (frange longeant oued Moulouya) et Tafoghalt (versant sud du massif des Béni Snassen) (Fig. 2).

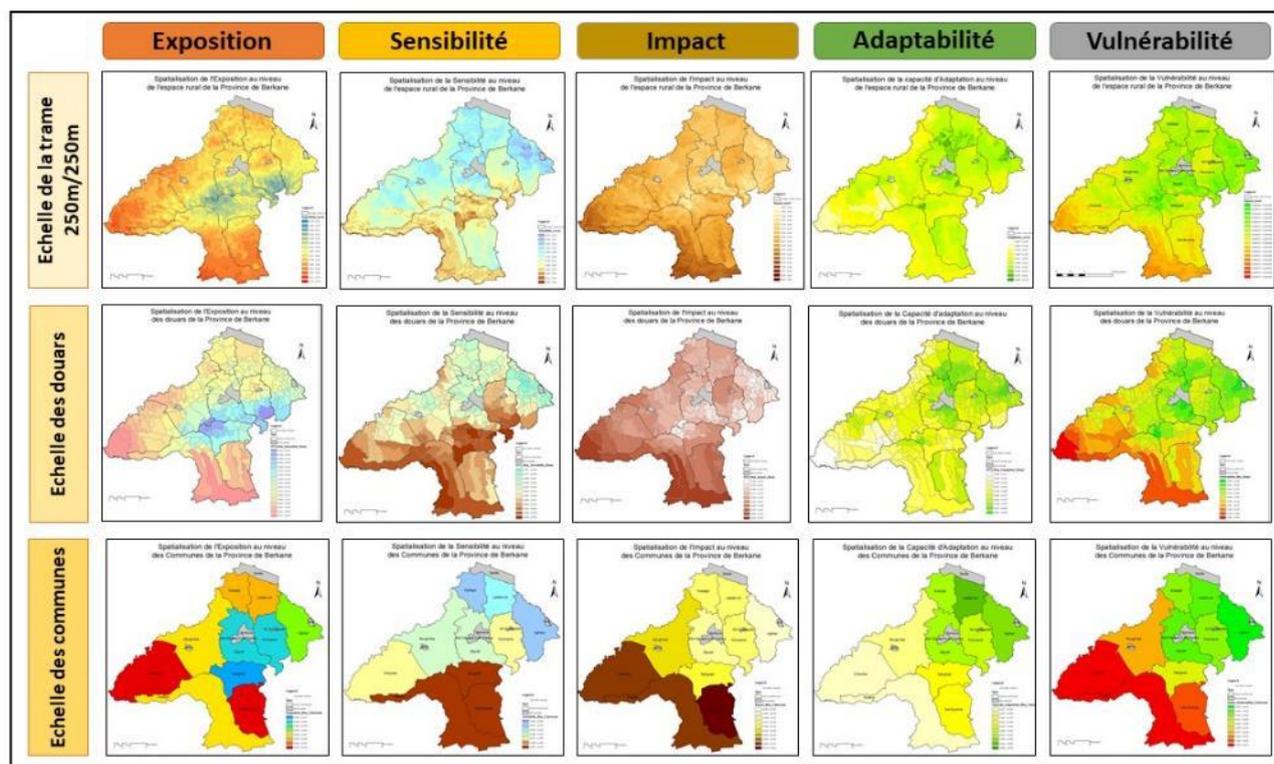


Fig. 1 : Cartes de synthèse de la vulnérabilité et ses composantes selon les échelles spatiales

| Communes | Nbr de clusters | Superficie à EVI > 0,5 (en ha) | % de la superficie communale |
|--------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|
| Rislane | 4195 | 26219 | 85,37 |
| Chouihia | 3731 | 23319 | 79,67 |
| Sidi Bouhria | 1557 | 9731 | 62,53 |
| Boughriba | 1320 | 8250 | 29,97 |
| Tafoghalt | 466 | 2913 | 25,69 |
| Madagh | 163 | 1019 | 11,16 |
| Fezouane | 78 | 488 | 3,54 |
| Zegzel | 33 | 206 | 1,33 |
| Aghbal | 18 | 113 | 0,68 |
| Laatamna | 6 | 38 | 0,36 |

Fig. 2 : Classement des communes selon leurs superficies ayant un EVI > 0,5

Le nuage de point obtenu montre qu'on est en présence d'une forte corrélation ($R^2 = 0.9618$) entre les indices de vulnérabilité calculés selon la méthode adoptée par le Programme d'Appui Analytique à la Stratégie Changement Climatique du Maroc (EVI) ou celle utilisée par l'Agence Allemande de Coopération Internationale (GIZ).

L'analyse de ces clusters montre une corrélation positive entre la vulnérabilité et l'impact ($R^2 = 0.87$). Cette corrélation est due en grande partie à l'exposition du territoire puisque l'impact corrèle apparemment beaucoup mieux avec cette composante ($R^2 = 0.62$) que celle de la sensibilité ($R^2 = 0.42$) du territoire aux aléas climatiques.

La relation entre la vulnérabilité et l'adaptation ne montre une corrélation négative assez marquée pour les 29851 clusters ($R^2 = 0.65$).

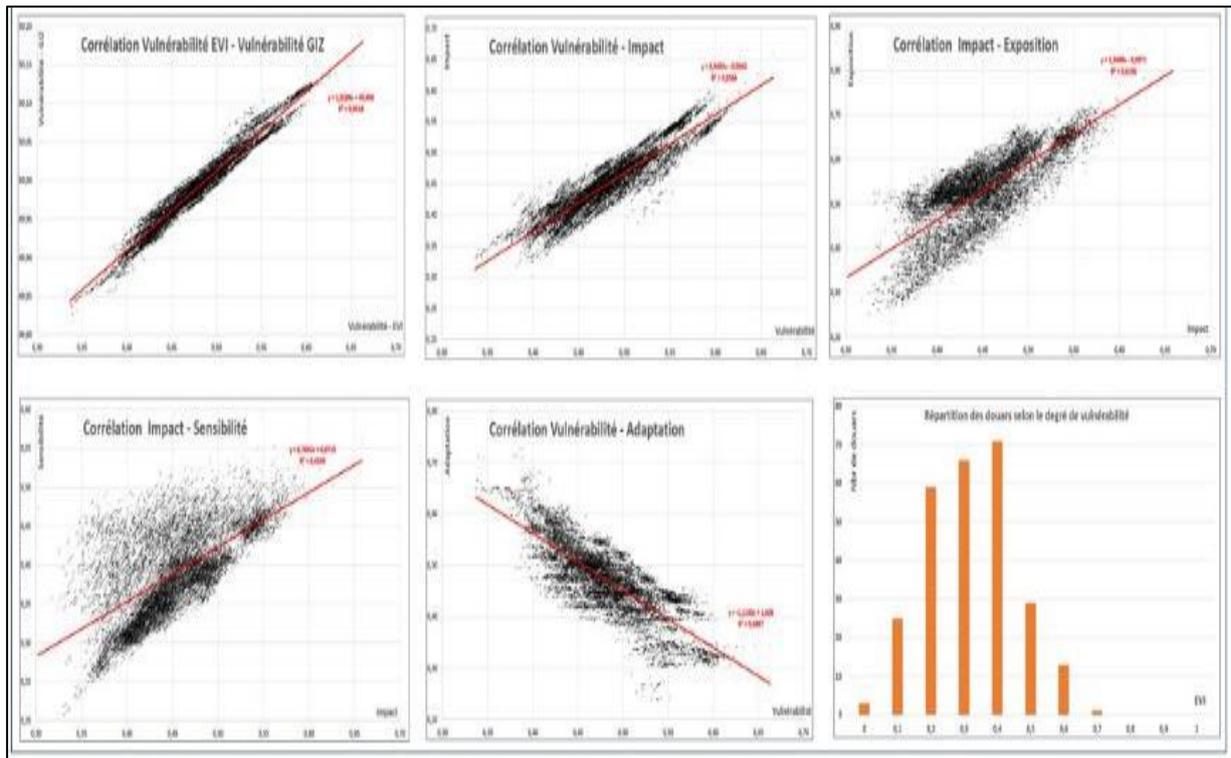


Fig. 3 : Corrélation entre les différentes composantes de la vulnérabilité

La répartition des douars selon leurs la valeur moyenne de l'EVI montre que la plupart ont un EVI inférieur à 0,5 donc une vulnérabilité moyenne.

La vulnérabilité aux aléas climatiques touche en plus des habitants, l'espace agroforestier. Un recoupement entre l'indice de vulnérabilité et les composantes de cet espace moyennant les SIG a permis d'évaluer la vulnérabilité pour chaque type agroforestier (Fig. 4).

Les espaces les plus vulnérables sont les steppes, suivis des reboisements et des terres du bour défavorable localisées essentiellement dans le sud de la province de Berkane.

Les terres irriguées par la grande hydraulique (GH) ou par la Petite et Moyenne Hydrauliques (PMH) et même le bour favorable présente un EVI moyen bas par rapport aux autres espaces.

Par ailleurs, l'amplitude entre les valeurs max et min de l'EVI et les valeurs de l'écart-type dévoilent une hétérogénéité pour les forêts, pour les espaces d'agriculture PMH et au niveau des enclaves existantes à l'intérieur des forêts. Ce constat laisse supposer que ces espaces sont les plus fragiles vis-à-vis des conditions climatiques.

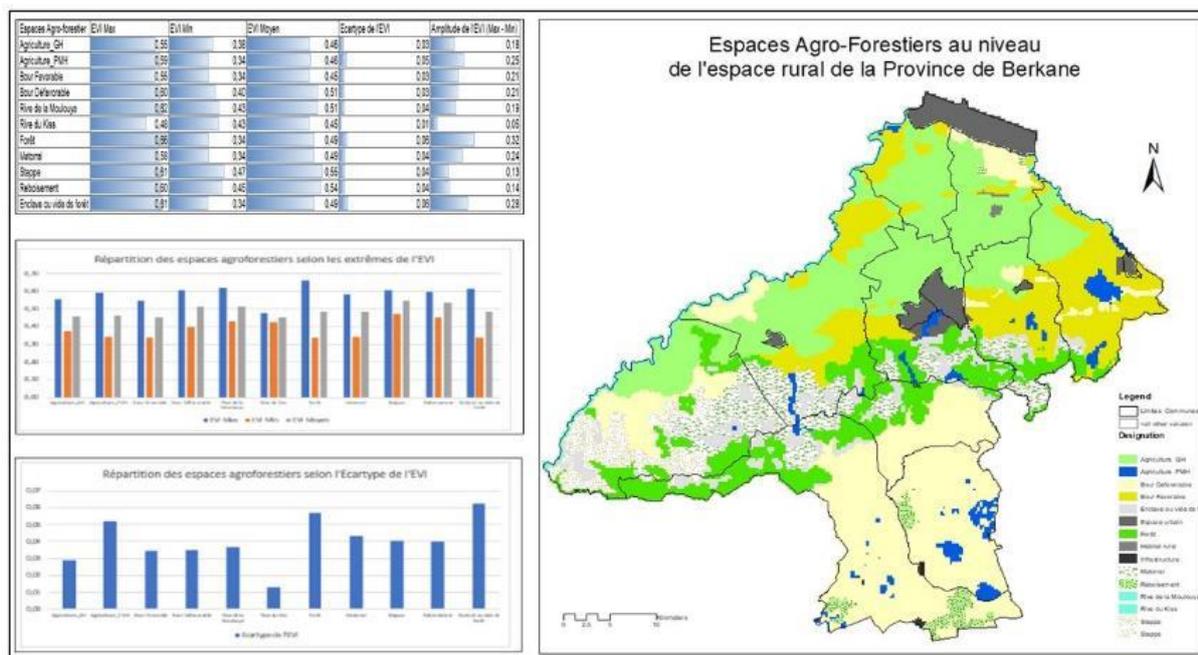


Fig. 4 : Répartition des espaces agroforestiers selon le degré de vulnérabilité

Conclusion

Il ressort de cette étude que les territoires de la province de Berkane sont en général modérément vulnérables aux conditions climatiques. Cette vulnérabilité est plus influencée par l'exposition des territoires qu'à leurs sensibilités aux aléas climatiques.

S'agissant des espaces agricoles, on note que le bour défavorable est le plus touché par les conditions climatiques. Néanmoins, l'agriculture PMH présente une fragilité due à l'hétérogénéité de ces espaces et leurs attitudes différenciées vis-à-vis des composantes de la vulnérabilité.

Pour les espaces forestiers, il en sort que les steppes et les espaces reboisés sont les plus vulnérables. Ces espaces sont d'ailleurs parmi les espaces dégradés de la forêt surtout sur le plan de la qualité du sol et de l'exposition.

Les forêts présentent de leur côté une hétérogénéité quant aux extrêmes de la vulnérabilité et partant ces espaces présentent une fragilité vis-à-vis des aléas climatiques. Par conséquent, il est nécessaire de porter des réflexions sages pour un aménagement adéquat garantissant leurs préservations et leurs pérennités.

Ainsi, les territoires expriment des réponses différentes vis-à-vis des enjeux liés aux aléas climatiques dont les répercussions se manifestent différemment selon les espaces et la population, lesquels manifestent des profils de vulnérabilité différenciés en relation de cause à effet avec les facteurs biophysiques et socioéconomiques des territoires en question.

Bibliographie

Banque mondiale, Royaume du Maroc, Développement d'un concept d'Indice de Vulnérabilité au Changement Climatique et Environnementale au Niveau Régional, Programme d'Appui Analytique à la Stratégie Changement Climatique du Maroc P-ESW 113768 Note de Stratégie n. 2 décembre 2013, <http://documents1.worldbank.org/curated/pt/901531468275972746/pdf/875600WP0P11370erabilite0Climatique.pdf>

- Bonnet Emmanuel, Propeck-Zimmermann Éliane, Saint-Gérard Thierry. SIG et risques industriels : conception et création d'informations spatialisées pour l'aide à la concertation. In: Géographes associés n°30,2006. Savoir, penser et partager l'information géographique : les SIG. Géoforum Lille, 10-11 juin 2005. pp. 105-129; doi : <https://doi.org/10.3406/geoas.2006.2344> https://www.persee.fr/doc/geoas_1266-4618_2006_num_30_1_2344
- GIEC, 2007: Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Giz et adelphi/EURAC 2014. 2017. Guide de référence sur la vulnérabilité Concept et lignes directrices pour la conduite d'analyses de vulnérabilité standardisées (Annexes). https://www.adaptationcommunity.net/download/va/vulnerability-guides-manuals-reports/Guide_de_reference_sur_la_vulnerabilite__Annexe_-_GIZ_2014.pdf
- Guivarch C. Taconet N, 2020, « Inégalités mondiales et changement climatique », CAIRN.info/revue de l'OFCE, 2020/1 165 | pages 35 à 70. <https://www.cairn.info/revue-de-l-ofce-2020-1-page-35.htm>
- Leone F, Vinet F, 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental en cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. Dans Leone F, Vinet F (dir.), La fragilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, 144 p.
- Sanseverino-Godfrin Valérie, Risques naturels, vulnérabilité, résilience et droit dans un contexte de développement durable. Daniel THEVENOT. 20ème JSE - Environnement entre passé et futur : les risques à l'épreuve des savoirs, Fev.2009, Créteil, France. JSE-2009 (3), 2011, JSE. <hal-00595142>
- Sylvia Becerra, « Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain », Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 12 Numéro 1 | mai 2012, mis en ligne le 29 mai 2012, consulté le 03 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/11988> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.11988>
- Turner, B.L., R.E. Kasperson, P.A. Matson, J.J. McCarthy, R.W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J.X. Kasperson ; A. Luers, M.L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher et A. Schiller, 2003, A framework for vulnerability analysis in sustainability science, Proceedings of the National Academy of Sciences, 100, 14, pp. 8074-8079. DOI : 10.1073/pnas.1231335100

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF DROUGHT USING THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX IN THE SEBOU WATERSHED, MOROCCO

Abdelaziz EL-BOUHALI ¹⁾*, Mhamed AMYAY ¹⁾ et Khadija EL OUAZANI ECH-CHAHD ¹⁾

¹⁾ Sidi Mohamed Ben Abdellah University. Research Unit: Natural Environments, Planning, and Socio-Spatial Dynamics, Fez, Morocco. * abdelaziz.elbouhali@usmba.ac.ma

ABSTRACT

Drought is a climatic phenomenon that can pose significant threats to human survival, imposing severe negative impacts on the environment, agriculture, and the economy in various regions of the globe. Data on precipitation, temperature, and flow can provide valuable drought indicators. Detecting the occurrence, extent, intensity, and duration of a drought event from these variables is done by calculating indices widely used by researchers, such as the SPI, SPEI, and PDSI. In this study, the spatio-temporal analysis of drought in the Sebou watershed was based on utilising the SPI at different temporal scales (3, 6, and 24 months). These time scales distinguished drought types into agricultural and hydrological droughts. The SPI results, computed using R software, indicate a significant decrease in precipitation in the Sebou watershed since the 1980s. This rainfall deficit results in an increase in the extent, severity, and duration of droughts. While until 1980, dry years were rare, they have become the standard for almost 40 years, indicating that this state of climatic drought has become structural in Morocco. The frequency of severe to extreme droughts ($SPI > -2$) and their prolonged duration since the 1980s manifest as hydrological drought observed in various locations within the Sebou watershed.

Keywords: Rainfall deficit, Drought, SPI, Sebou watershed.

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE LA SECHERESSE A L'AIDE DE L'INDICE DE PRECIPITATION STANDARDISE DANS LE BASSIN VERSANT DU SEBOU, MAROC

RESUME : La sécheresse est un phénomène climatique qui peut avoir grandes menaces à la survie humaine, imposant de graves impacts négatifs sur l'environnement, l'agriculture et l'économie dans différentes régions du globe. Des données sur les précipitations, la température et le débit peuvent fournir de bons indicateurs sur la sécheresse. La détection de l'occurrence, l'ampleur, l'intensité et la durée d'un événement de sécheresse à partir de ces variables se fait par le calcul des indices largement utilisés par les chercheurs comme le SPI, le SPEI et le PDSI. Dans cette étude la détermination de la sécheresse dans plusieurs stations situées dans le bassin versant de Sebou a été basée sur l'utilisation de l'indice SPI à des échelles de temps variées (3, 6 et 24 mois). Ces échelles de temps a permis de séparer les types de sécheresses en sécheresses agricoles et hydrologiques. Les résultats du SPI calculés par le logiciel R montrent une forte diminution des précipitations dans le bassin de Sebou à partir des années 1980. Statistiquement, ce déficit pluviométrique se traduit par l'augmentation de l'ampleur, de la gravité et de la durée des sécheresses. Jusqu'en 1980, les années sèches étaient rares, elles sont devenues la norme depuis presque 40ans, signifiant que cet état de sécheresse climatique est devenu structurel au Maroc. La fréquence des sécheresses sévères à extrêmes ($SPI > -2$) et de longues durées depuis les années 80 s'est traduite par une sécheresse hydrologique observée dans les différents endroits du bassin versant de Sebou.

Mots clés : Déficit pluviométrique, SPI, Sécheresse, Bassin versant du Sebou.

INTRODUCTION

Drought is a climatic phenomenon that can pose significant threats to human survival, negatively impacting the environment, agriculture, and the economy in various regions of the world. Data on precipitation, temperature, and streamflow can provide valuable drought indicators. The detection of drought from this data is carried out by calculating indices widely used by researchers, such as the Standardized Precipitation Index (SPI), the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), and the Palmer Drought Severity Index (PDSI). These indices represent drought severity numerically (Tefera et al., 2019). Among these indices, the SPI is extensively used to evaluate drought duration, intensity, severity, magnitude, and frequency, relying on precipitation data (Bhunja et al., 2020). Thus, the SPI allows the detection of droughts at different time scales, with these scales (1, 3, 6, 12, 24 months, etc.) distinguishing types of droughts into meteorological, agricultural, and hydrological droughts (Tirivarambo et al., 2018).

In Morocco, the SPI has been used to detect drought in several regions (Amyay et al., 2012; Layati et al., 2021; Elair et al., 2023). The results from these studies indicate that since the 1980s, drought periods have shown a significant increase compared to wet periods. This observation points to a prolonged precipitation deficit compared to the average level. Statistically, this rainfall deficit increases the extent, severity, and duration of droughts. Until 1980, dry years were rare, but they have become the norm for almost 40 years, indicating that this state of climatic drought has become structural in Morocco. The recurrence of drought has caused detrimental effects on natural resources and agriculture, with negative socio-economic repercussions. Currently, the water resources situation at the national level reflects the severity of drought and anthropogenic solid pressure. This situation is manifested in the decline of groundwater tables, the decrease in spring and Wadi streamflow, and the reduction of dam reservoir levels. This study focuses on the spatiotemporal analysis of drought in the Sebou watershed using the SPI at various time scales (3, 6, and 24 months). Characterizing drought in this watershed, considered among the country's strategic sectors, is crucial for water resource management and ensuring the sustainability of irrigation-based agricultural activities.

1. STUDY AREA

The Sebou watershed is located in the north of Morocco (figure 1) and covers an area of 40,000 km², approximately 6% of the national territory (ABHS, 2011). This watershed is subject to chronic droughts and extreme precipitation, especially in the Rharb plain (Hanchane, 2016). The climate is Mediterranean, characterized by spatial and temporal irregularities in precipitation (Haida et al., 1999). The heterogeneity of the topography and lithology from south to north influences the spatial distribution of rainfall and the flow regime. The higher areas (Rif and Middle Atlas) receive significant rainfall quantities exceeding 1000 mm (examples of the Jebel Oudka and Ifrane stations). In the Middle Atlas, the dominance of permeable and faulted lithological formations (limestones and dolomites) promotes the existence of several aquifers, with the most significant being the aquifers of the Middle Atlas plateaus. However, in the Rif, the prevalence of impermeable formations (marls) allows for the trigger of runoff. The diversity of surface and groundwater resources (wadis, springs, dams, lakes, and groundwater) classifies the Sebou watershed as one of the strategic sectors of Morocco, contributing 30% of the national water resources and 40% of the dam storage capacity. Despite the importance of the watershed in the national economy, it is highly subject to the risks of drought, water erosion, and floods.

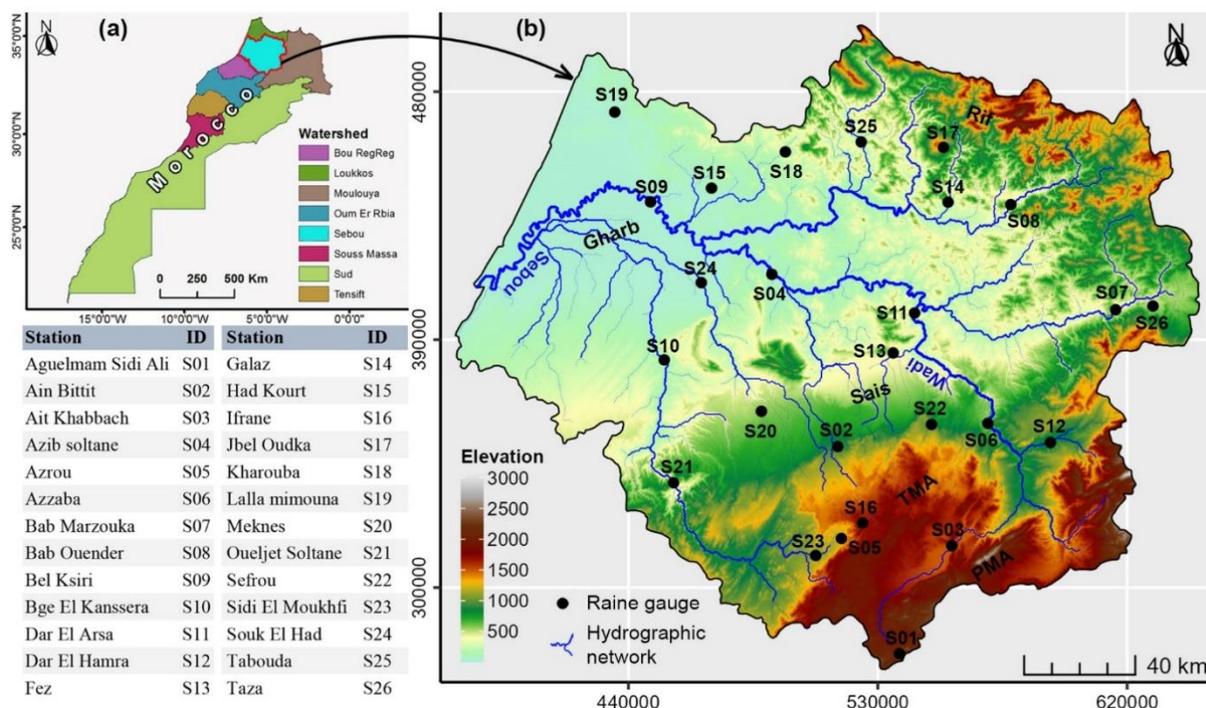


Figure 1. Location of the study area and rain gauge network. a) Position of the Sebou watershed in Morocco, b) The study area. TMA: Tabular Middle Atlas. PMA: Pleated Middle Atlas.

2. METHODOLOGY AND DATA

In this study, we used precipitation data obtained from the Sebou Hydraulic Basin Agency (ABHS). The data were collected from 26 climate stations located in the Sebou watershed (figure 1). These data cover heterogeneous periods ranging from 1956 to 2022. For drought spatialization, we utilized precipitation data from 1975 to 2017, but this period varies for some stations and extends from 1975 to 2014. To emphasize drought severity over a relatively extended period (1956 to 2022), we used data from the Ifrane and Bab Ouender stations.

The processing of precipitation data to detect drought severity in the Sebou watershed is based on the SPI (McKee et al., 1993). This index, recommended by the World Meteorological Organization (WMO), is widely used in more than 70 countries (WMO, 2012) to study drought at different time scales (1, 3, 6, 12, and 24 months). These scales distinguish between meteorological, agricultural, and hydrological droughts. The drought intensity varies based on the SPI values (Table 1). Negative values indicate drought periods, while positive values indicate wet periods. The SPI calculation for all stations (26 stations) was performed using R-statistical software.

Table 1. SPI values

| SPI value | Class | SPI value | Class |
|-------------|----------------|---------------|----------------|
| More than 2 | Extremely wet | -0.99 to 0 | Mildly dry |
| 1.5 to 1.99 | Very wet | -1.0 to -1.49 | Moderately dry |
| 1.0 to 1.49 | Moderately wet | -1.5 to -1.99 | Severely dry |
| 0 to 0.99 | Mildly wet | -2 and less | Extremely dry |

3. RESULTS

To show the temporal variation of drought severity in the Sebou watershed, we calculated the SPI at different time scales (3, 6, and 24 months). Short durations are important for agronomic

studies (agricultural droughts), while longer durations (24 months) are suitable for studying hydrological issues (hydrological droughts). Highlighting the severity of drought in the study area was done by calculating the SPI for 26 climatic stations from 1975 to 2017 and two stations from 1956 to 2022. The SPI calculated for all stations indicates the same variability pattern for each time scale, but they differ in duration and severity of drought. Figure 2 illustrates the SPI variability in the Ifrane and Bab Ouander stations. Short periods (3 to 6 months) exhibit a high-frequency occurrence of drought compared to the 24 months. This period indicates that the drought lasts longer, increasing in magnitude, resulting in a hydrological drought.

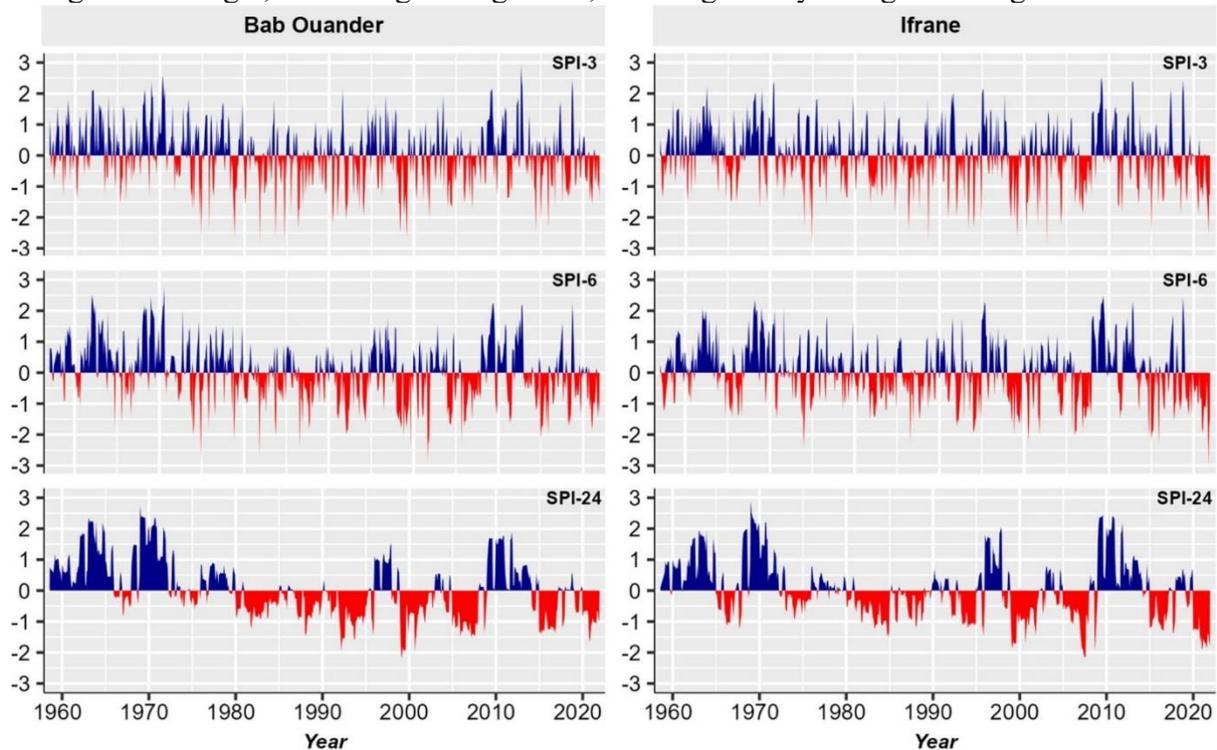


Figure 2. SPI at different timescales for Ifrane and Bab Ouander stations over the period 1956-2022

Over the period from 1956 to 2022, the SPI-24 reveals that drought periods and their intensity were rare before the 1980s. They became the norm after 1980, with severe to extreme droughts (negative anomalies exceeding -2). 2007, a timid shift towards a wet phase was observed (Amyay et al., 2012). This phase has been followed by a new trend of prolonged drought from 2014 to the present. Based on the results obtained, we selected two periods from the SPI calculated for 26 stations at different time scales: a drought period (1980-1985) and a wet period (2008-2013). Figure 3 depicts the results of SPI spatialization in the Sebou watershed during these two periods.

The spatialization of the average SPI over the period 1980-1985 (Figure 3a) shows that the severity of drought varies depending on the time scales. The longer the time scale, the more severe the drought. During this period, the Sebou watershed experienced extremely severe drought, with SPI values exceeding -4, particularly in the south. From south to north, the map (SPI-24) shows a gradual decrease in drought severity. For 2008-2013, the SPI is positive throughout the basin (Figure 3b), with variable values depending on the time scales. The results of the SPI over the period 1956-2022 show a remarkable increase in drought periods in the Sebou basin. The SPI-24 indicates periods of very severe drought affecting the entire basin. This hydrological drought has significantly impacted water resources in different parts of the basin, with very high intensity in the Middle Atlas and the southwest of the study area.

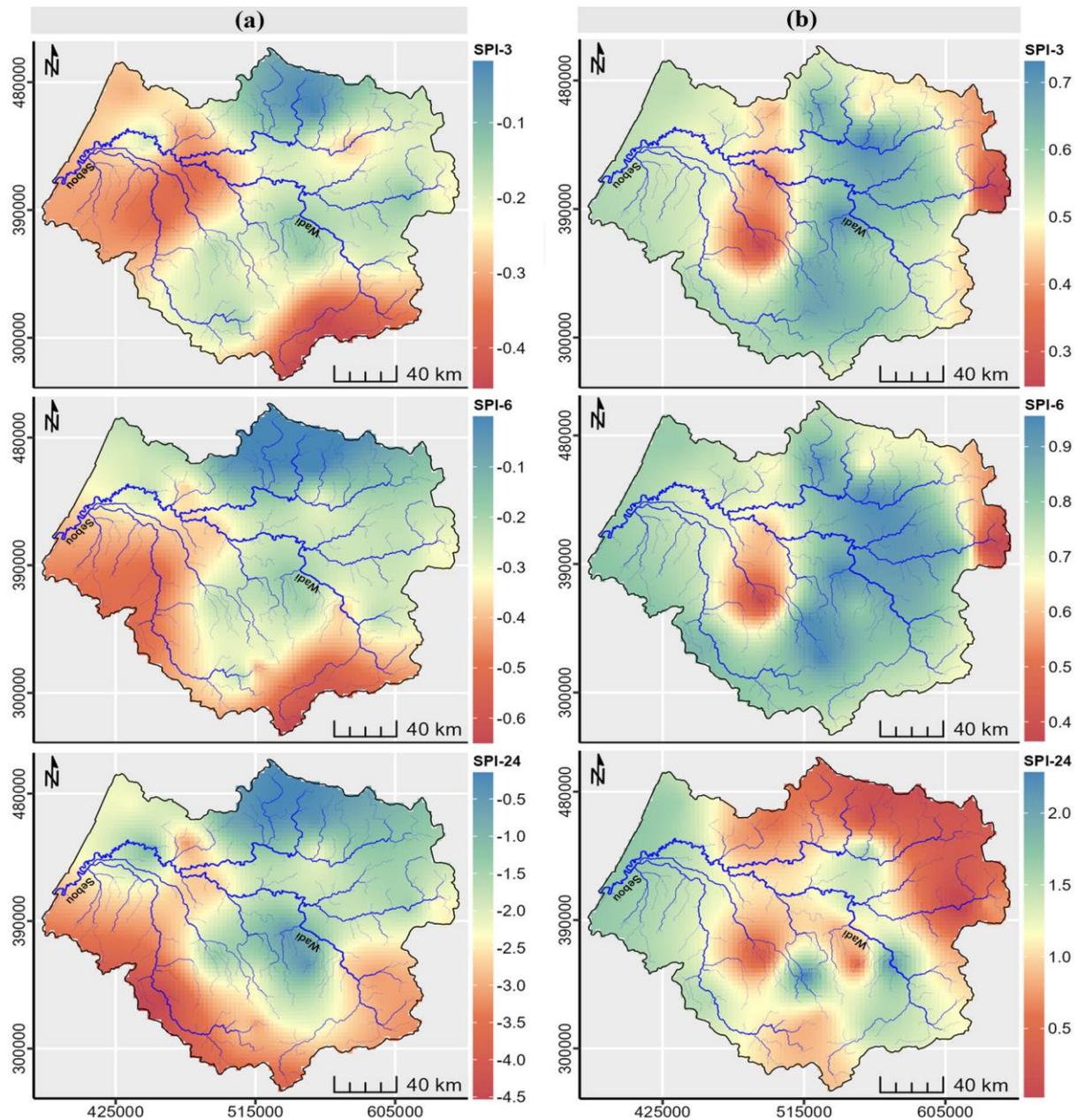


Figure 3. Spatial distribution of SPI values at different time scales over the Sebou watershed.

a) Dry period: 1980-1985,

b) Wet period: 2008-2013.

CONCLUSION

The analysis of rainfall data has shown that the Sebou watershed is strongly affected by drought. Although drought periods were rare before the 1980s, they became prevalent starting from the 1980s. The precipitation deficit has led to drought throughout the study area, but their severity varies by location and over different time scales (3, 6, and 24 months). The spatialization of SPI-24 showed that the Middle Atlas and the southwest part of the Sebou watershed are considered among the areas most affected by extreme hydrological drought during the period spanning from 1980 to 1985. Several phases of drought with varying intensity followed this period. The increase in long-term droughts has strongly influenced surface and groundwater resources, reaching a concerning stage currently. The succession of dry years has also resulted

in adverse impacts on both society and the economy. This situation could worsen in the coming years, especially as future scenarios for the Mediterranean region indicate a decrease in precipitation and an increase in temperature.

REFERENCES

- ABHS. (2011). *Étude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique de Sebou*. Note de synthèse, royaume du Maroc, Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, 103 p.
- AMYAY M., NOUACEUR Z., TRİBAK A., OKBA K., TAOUS A., (2012). « *Caractérisation des évènements pluviométriques extrêmes dans le Moyen Atlas et ses marges* ». 25ème Colloque de l'AIC. Grenoble, 75–80.
- BHUNIA P., DAS P., MAITI R. (2020). “*Meteorological Drought Study Through SPI in Three Drought Prone Districts of West Bengal, India*”. *Earth Syst Environ* 4, 43–55. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00137-6>.
- ELAIR C., RKHA CHAHAM K., HADRI A. (2023). “*Assessment of drought variability in the Marrakech-Safi region (Morocco) at different time scales using GIS and remote sensing*”. *Water Supply* 23 (11): 4592–4624. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.283>.
- HAIDA S., PROBST J.L., SNOUSSI M. (1999). « *Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin versant du Sebou entre 1940 et 1994* ». *Sécheresse* 10 (3). 221-226.
- HANCHANE M. (2016). Variabilité des pluies exceptionnelles dans le bassin versant de Sebou (Maroc) : intensité et période de retour selon l'hypothèse de non-stationnarité temporelle. XXIXème Colloque de l'AIC. Lausanne - Besançon, 279–283.
- LAYATI E., OUIGMANE A., QADEM A., EL GHACHI M. (2021). “*Characterization and Quantification of Meteorological Drought in the Oued El-Abid Watershed, Central High Atlas, Morocco (1980-2019)*”. *Hydrospatial Analysis*, 5(2), 45-55. 2021. <https://doi.org/10.21523/gcj3.2021050201>.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. (1993). “*The relationship of drought frequency and duration of time scales*”. *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, 179-184.
- TEFERA A.S., AYOADE J.O., BELLO N.J. (2019). *Comparative analyses of SPI and SPEI as drought assessment tools in Tigray Region, Northern Ethiopia*. *SN Appl. Sci.* 1, 1265. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1326-2>.
- TIRIVAROMBO S., OSUPILE D., ELIASSON P. (2018). “*Drought monitoring and analysis: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI)*”. *Physics and Chemistry of the Earth* 106, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>.
- WMO (World Meteorological Organization). (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide*, 24 p.

IMPACT DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN ZONES OASIENNES MAROCAINES : CAS DU LAC DE BARRAGE MANSOUR EDDAHBI DANS LE HAUT DRAA

Abderrazzak SADIKI et Mohamed HANCHANE

¹ USMBA-Fès, Laboratoire Territoire, Patrimoine et Histoire. sadiki.abderrazzak_geo@gmail.com ; mohamed.hanchane@usmba.ac.ma

Résumé: L'eau joue un rôle axial pour la pérennité des milieux oasiens arides du Maroc. La disponibilité en eau dans ces milieux dépend des épisodes pluviométriques brefs et d'une forte intensité. L'installation de barrages hydrauliques joue un rôle primordial dans la gestion des ressources en eau dans les milieux arides oasiens. Cependant, la disponibilité de l'eau dans les lacs des barrages est souvent menacée par l'aridité et la forte évaporation. Cette étude a pour objectif d'évaluer et d'analyser l'impact de la variabilité pluviométrique sur l'étendue du lac de barrage Mansour Eddahbi dans le Haut Draa, au sud-est du Maroc. Elle est basée sur les données de Standardized Anomaly Index (SAI), calculées pendant la période septembre-mars (1984-2017), et sur les données de Normalized Difference Water Index (NDWI) pendant la même période. Les résultats montrent que la variabilité pluviométrique, exprimée par l'indice SAI, au niveau des stations situées à l'amont du barrage explique en partie la variabilité de la superficie du lac de barrage. En effet, les résultats révèlent la complexité de cette variabilité car d'autres facteurs, à la fois climatiques et anthropiques, interviennent pour expliquer les fluctuations interannuelles des étendues des lacs des barrages.

Mots clés : Variabilité pluviométrique; Indice SAI; Indice NDWI; Lac de barrage Mansour Eddahbi ; Zones oasiennes marocaines, Haut Draa.

IMPACT OF RAINFALL VARIABILITY ON WATER RESOURCES IN MAROCAN OASIAN ZONES: CASE OF MANSOUR EDDAHBI DAM LAKE IN THE HIGH DRAA

Abstract: Water plays a key role in the sustainability of Morocco's arid oasis environments. Water availability in these environments depends on brief and high intensity rainfall episodes. The installation of hydraulic dams plays a vital role in the management of water resources in arid oasis environments. However, water availability in dam lakes is often threatened by aridity and high evaporation. This study aims to evaluate and analyze the impact of rainfall variability on the extent of the Mansour Eddahbi dam lake in Haut Draa, southeast of Morocco. It is based on Standardized Anomaly Index (SAI) data, calculated during the September-March period (1984-2017), and on Normalized Difference Water Index (NDWI) data during the same period. The results show that the rainfall variability, expressed by the SAI index, at the stations located upstream of the dam partly explains the variability in the surface area of the dam lake. Indeed, the results reveal the complexity of this variability because other factors, both climatic and anthropogenic, intervene to explain the interannual fluctuations in the extent of the dam lakes.

Key words : Rainfall variability; SAI Index; NDWI Index; Mansour Eddahbi dam lake ; Moroccan oasis zones, High Draa.

Introduction

La situation des oasis marocaines aux latitudes subtropicales, sur les versants sud des montagnes du Haut Atlas et de l'Anti Atlas, et leur ouverture sur le désert sont tous des facteurs expliquant les précipitations faibles et leurs ressources en eau limitées. La disponibilité en eau dans ces milieux arides dépend en grande partie de la mise en place de barrages, tels que le barrage Mansour Eddahbi en amont du bassin versant de l'Oued Draa. Cette installation hydraulique contribue à la mobilisation des ressources en eau de surface pour l'usage à l'irrigation par les lâchés, et de protéger les plaines de Draa Moyen des inondations.

Cependant, ce potentiel hydrique reste limité malgré l'importance des pluies (et parfois de la neige) en amont du barrage et bien que celui-ci soit classé parmi les grands barrages du Maroc. On suppose que l'aridité du climat, l'irrégularité des pluies, la forte insolation et

l'élévation de l'évaporation affectent la variabilité interannuelle de l'étendue du lac du barrage. En effet, le contexte climatique de la zone d'étude peut entraîner une baisse significative de l'étendue du lac du barrage (Sadiki, 2023). Donc ce contexte, le but de la présente étude est d'évaluer l'impact de la variabilité pluviométrique, à travers l'indice des anomalies standardisées (SAI) (Katz et Glantz, 1986), sur l'étendue du lac de barrage Mansour Eddahbi. Cette étendue est déterminée grâce à l'indice NDWI (Normalized Difference Water Index) qui est basé sur les images satellitaires Landsat. Il a été proposé par McFeeters en 1996. La même approche a été utilisée pour le lac du barrage Hassan Addakhil (Sadiki et Hanchane, 2022). La méthode utilisée permet de détecter et de surveiller de faibles changements de la teneur en eau des bassins d'eau. En utilisant les avantages du NIR (proche infrarouge) et du GREEN (vert visible), l'indice NDWI permet d'améliorer la détection et le suivi des bassins d'eau à partir des images satellitaires.

Présentation de la zone d'étude : localisation et caractéristiques

Le lac du barrage Mansour Eddahbi (Fig. 1) est le plus important du bassin de Draa. Il a été fondé en 1972 après le barrage Hassan Addakhil dans le cadre de l'activation de la politique des barrages hydrauliques adoptée par le Maroc au cours des années soixante du siècle dernier. Sa capacité totale est d'environ 650 millions m³ et les importations annuelles moyennes sont de 420 millions m³. La hauteur de la barrière du barrage est de 70 mètres au-dessus de la base locale, 63 mètres au-dessus du lit de l'Oued Draa. La largeur de la base est de 15 mètres. La crête du Barrière est de 2,70 mètres Elle s'étend sur 285 mètres. Le seuil du débit est de 212 mètres, et il peut atteindre un débit de 7240 m³/s (Ouhajou, 1996). Cette installation hydraulique a été construite pour la production de l'énergie électrique, la mobilisation des eaux de surface pour l'irrigation et le développement agricole, et la protection des oasis de Draa moyen contre les inondations catastrophiques.

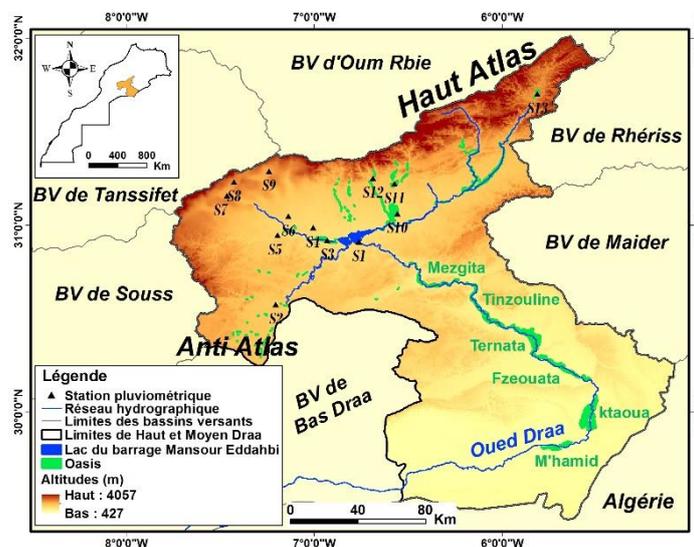


Figure 1. Situation géographique du Barrage Mansour Eddahbi dans le bassin de Haut Draa

Source : Carte du Maroc, 21 cartes topographiques 1/100000 (Zawyat Ahancal, Oukaimeden Toubkal, Telouat, Skoura, Qalat Mgouna, Boumalne, Taliwine, Tazenakht, Ouarzazat, Agdz, Tazzarine, Agadir Melloul, Acdif, Foum Zguit, El Gloa, Zagora, Hassi Bou Haiara, Mdaouer, Zaouia Sidi Abdennebi, Tagounite, Masmouda) et MNT.

Données et méthodologie

Parmi les indicateurs les plus importants qui ont été proposés pour surveiller la variabilité pluviométrique et déterminer le déficit ou le surplus des précipitations, il y a l'indice d'anomalies standardisées SAI (Standardized Anomaly Index), qui a été développé par Katz et al. (1986) afin d'évaluer le déficit de précipitations à différents niveaux d'échelles de temps. Il

est appliqué dans cette étude sur des données pluviométriques homogénéisées (Sadiki, 2023). Il a été choisi pour évaluer le déficit pluviométrique dans la zone d'étude, et son impact sur l'étendue du lac de barrage Mansour Eddahbi sur l'Oued de Draa pour une période de 33 ans (1984-2016) (Tab 1). Les stations sélectionnées sont situées en amont du barrage (Fig. 1). Après avoir extrait les données des précipitations pour la période de 7 mois (septembre-mars), l'indice SAI a été calculé annuellement comme une valeur moyenne pour toutes les stations, selon la formule suivante. Il permet ainsi d'effectuer annuellement la spatialisation des anomalies pluviométriques moyennes des stations situées en amont du barrage.

$$SAI = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[\frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)}{\sigma_i} \right]$$

Ainsi :

- n est le nombre de stations ;
- x_{ij} : précipitations cumulées pour la station i et l'année j ;
- \bar{x}_i : la moyenne spatiale des précipitations cumulées pour la station i ;
- σ_i : l'écart type spatial de la station i.

Afin d'évaluer et de suivre la superficie du lac de barrage Mansour Eddahbi, des images satellitaires Landsat TM, ETM+ et OLI (1 image pendant le mois d'avril de chaque année), ont été téléchargées à partir du site de « United States Geological Survey (USGS) » (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Ces images couvrent la période 1984-2016. Avant l'étape d'extraction de l'information à partir des données satellitaires, nous avons effectué des corrections atmosphériques sur quelques bandes utilisées en utilisant l'outil Landsat Toolbox sur le logiciel ArcGis 10.3. Les images extraites ont une résolution spatiale de 30mx30m. L'extraction de la superficie du plan d'eau du lac du barrage Mansour Eddahbi à partir de l'imagerie satellitaire Landsat a adopté la méthode développée par Verpoorter *et al* (2012), nommée GeoCover, qui est une méthode d'extraction des plans d'eau en combinant les images multi-temporelles Landsat. Elle permet de calculer l'indice "Normalized Difference Water Index" (NDWI) qui utilise la bande proche infrarouge (PIR) et la bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (ShortWave InfraRed, SWIR) (McFEETERS, 1996). Les images extraites correspondent à celles du mois d'avril qui correspond à la période des hautes eaux dans le contexte climatique marocain.

Tableau 1. Description géographique des stations pluviométriques étudiées situées dans le Haut Draa (Source : Agence du Bassin Hydraulique de Draa Oued Noun)

| ID | Stations | Longitude | Latitude | Altitude (m) |
|-----|-------------------------|-----------|----------|--------------|
| S1 | Barrage Mansour Eddahbi | -6°,76'W | 30°,91'N | 1050 |
| S2 | Agouime | -7°,46'W | 31°,16'N | 1649 |
| S3 | Ait Ben Haddou | -7°,14'W | 31°,05'N | 1300 |
| S4 | Amsoul | -6°,69'W | 31°,25'N | 860 |
| S5 | Ighrem | -7°,43'W | 31°,23'N | 1927 |
| S6 | M'semrir | -5°,81'W | 31°,70'N | 2100 |
| S7 | Ouarzazat | -6°,93'W | 30°,92'N | 1187 |
| S8 | Skoura | -6°,56'W | 31°,06'N | 1220 |
| S9 | Telouat | -7°,24'W | 31°,29'N | 1784 |
| S10 | Tamdroust | -7°,19'W | 30°,95'N | 1383 |
| S11 | Taznakhet | -7°,20'W | 30°,58'N | 1400 |
| S12 | Tiflit | -6°,57'W | 31°,22'N | 1450 |
| S13 | Tifoultout | -7°,01'W | 30°,98'N | 1173 |

RESULTATS ET DISCUSSION

3. 1. Evolution annuelle du niveau du lac de barrage a montré plusieurs fluctuations dues à la variabilité pluviométrique

L'indice NDWI de lac du barrage Mansour Eddahbi a été calculé au mois d'avril qui correspond à la période des hautes eaux. Son évolution a été suivie sur une période de 33 ans (1985-86 à 2017-18). Son évolution a montré de nettes fluctuations du niveau de la superficie du lac de barrage. Sa superficie moyenne est de 33.4 km² alors que son étendue de variation est de 42.9 km² (max=48.1 km² en 2015-2016; min=5.2 km² en 1985-1986). Son coefficient de variation de 39.5% reflète une très forte variabilité interannuelle de l'étendue du lac du barrage qui reste tout de même inférieur à celle de la variabilité interannuelle des précipitations (58.7%) des stations situées en amont du barrage. Ceci reflète le lien partiel entre la variabilité des précipitations et la superficie du lac du barrage Mansour Eddahbi. Le taux de réduction moyen (TR en %) du lac est de 30,5%. La baisse maximale de 89,16% a eu lieu en avril 1986, tandis que la baisse la plus faible de moins de 1% a eu lieu en avril 2016 (Fig. 2 et 3). Il ressort de cette analyse que le lac du barrage peut évoluer entre un taux de remplissage maximum de 90 % et une situation d'assèchement presque total. Cette dernière situation a été enregistrée durant 3 années consécutives (1985, 1986 et 1987). En revanche, un taux de remplissage supérieur à 70 % a persisté durant une longue période de 1998 à 1998. Après cette période relativement excédentaire du lac du barrage, celui-ci a enregistré une seconde longue phase déficitaire de 1999 à 2006 qui é été marquée par un taux de réduction supérieur à 40 %. Une seconde phase excédentaire courte (TR % > 80%) a caractérisé la période 2007-2012. A partir de cette période, et à l'exception de l'année 2015 hautement excédentaire, le reste de la série à connu des situations plutôt déficitaires. Les deux années 2014 et 2015, très fortement contrastées en termes de valeurs de TR %, reflètent le caractère aléatoire des disponibilités en eau du lac du barrage qui sont difficiles à maîtriser et à gérer dans ce contexte climatique aride.

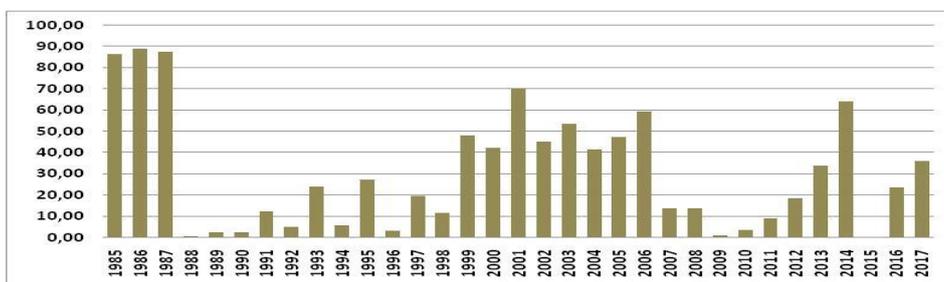


Figure 2 : Evolution du taux de réduction de la superficie du barrage Mansour Eddahbi (1985-2017)

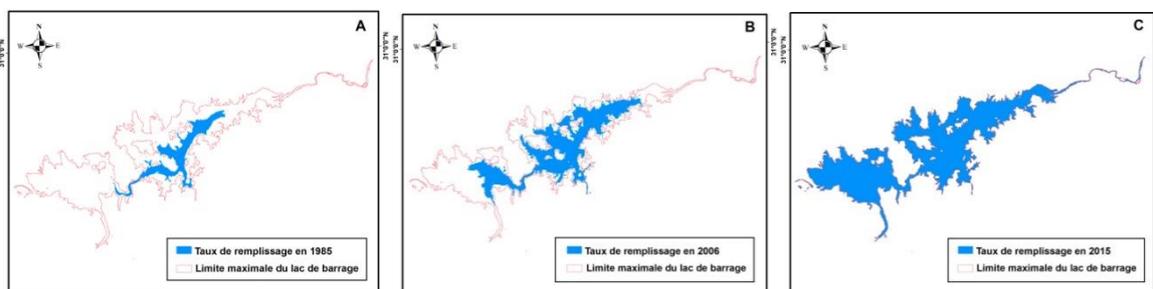


Figure 3. Evolution de l'étendue du lac de barrage pendant la période des hautes eaux (mois d'avril) pendant les trois années typiques : 1985 (sèche), 2006 (normale) et 2015 (pluvieuse).

Source des figures 2 et 3: Extraction de l'indice NDWI à partir des images satellites de Landsat.

En plus de l'extrême variabilité de l'étendue du lac de barrage Mansour Eddahbi, celui-ci est gravement menacé par l'envasement et le taux d'augmentation de la demande en eau pour l'irrigation, notamment pour les cultures non durables, comme la pastèque dont la superficie

est passée d'un peu plus de 100 ha en 2010 à plus de 2400 ha en 2014 (Ait Lamqadem *et al.*, 2018). Sur le volume total des ressources en eau exploitables, 96,66% sont alloués à l'agriculture, 2,70% à l'usage domestique, 0,28% au tourisme et 0,36% aux activités économiques (Karmaoui *et al.*, 2016). Les exploitations pratiquent des méthodes de production traditionnelles, comprenant trois niveaux de gestion de la végétation : palmiers (*Phoenix dactylifera*), arbres fruitiers et cultures. Les principales cultures dans les oasis comprennent l'orge, le blé, les palmiers dattiers, la luzerne, le maïs et le henné (Ait Lamqadem *et al.*, 2018).

Outre la pression anthropique sur l'eau du barrage, celui-ci est soumis à l'extrême variabilité des précipitations enregistrées au niveau des stations situées en son amont.

3.2. Analyse de la réponse du lac d'eau à l'influence de la variabilité des précipitations

Les résultats de l'évaluation de la sécheresse, selon l'indice SAI, au niveau des stations situées en amont du lac du barrage, montrent, en plus de la sécheresse des années 1984-1986 qui ont fortement affecté l'étendue du lac du barrage Mansour Eddahbi, une succession d'années sèches (SAI < 0) durant la décennie 1990 s'est prolongée jusqu'au milieu de la décennie 2000 (Fig. 4). Paradoxalement, cette dernière longue phase de sécheresse n'a pas affecté l'étendue du lac du barrage, surtout durant la décennie 1990. On suppose que les années relativement excédentaires (1987-1989 : SAI > 0.7), suivies d'années faiblement sèches (SAI < -0.5), ont favorisé partiellement le maintien du lac du barrage à une superficie supérieure à 36 km². Une seconde phase sèche (1998-2005), cette fois-ci plus forte (SAI variant entre -0.67 et -1.27), a significativement réduit l'étendue du lac du barrage à des niveaux situés entre 14 et 28 km². On a assisté, durant la période 2006-2012, à une reprise de l'extension de la superficie du lac du barrage grâce à la succession d'année faiblement à extrêmement humide de l'année 2008. Cette dernière a sans doute contribué au maintien de l'étendue du lac du barrage à niveau plus élevée (> 30 km²). Cette période humide a été interrompue par une sécheresse moyenne (SAI = -0.66) de l'année 2013-2014 qui a coïncidé avec une très forte réduction de l'étendue du barrage (17.2 km²). Les 3 dernières années de la série ont connu une reprise de l'étendue du lac du barrage suite à une année extrêmement humide ayant marqué l'année 2014-2015 (SAI = +2.68).

L'analyse de la corrélation entre le SAI de la période septembre-mars et la superficie standardisée du lac du barrage au mois d'avril montre un coefficient $R = 0.61$ qui est significatif au seuil 0.05. Quant à l'analyse de régression linéaire entre les deux variables montre la haute signification de la pente ($p\text{-value} = 0$) et la non-significativité de la constante de la droite de régression.

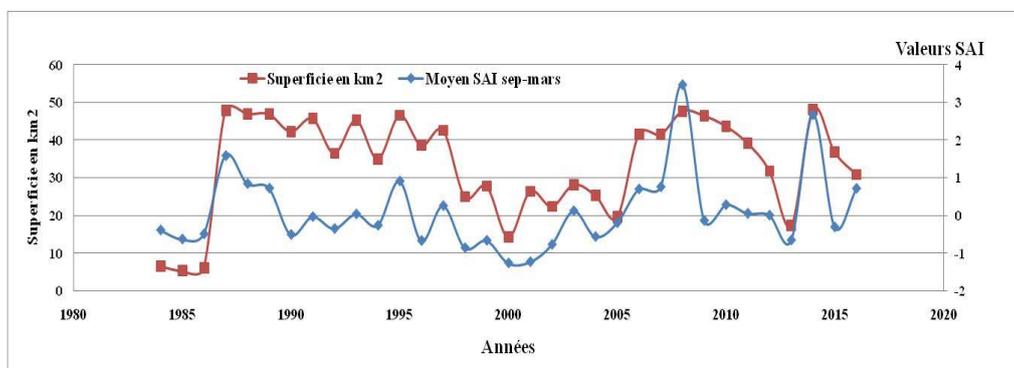


Figure 4. Evolution de l'indice SAI et de la superficie du barrage Mansour Eddahbi (1985-2017)

Source : Données pluviométriques de l'Agence du bassin Darâa Oued Nou les images satellites Landsat.

A partir de cette analyse de régression, on peut conclure qu'il est difficile d'affirmer la relation linéaire entre l'indice SAI et l'étendue du lac du barrage. En effet, cette étendue,

partiellement influencée par les apports pluviométriques ainsi que par la fonte la neige et l'évaporation, est également liée aux prélèvements anthropiques pour des besoins surtout en irrigation et à l'envasement.

CONCLUSION

La télédétection fournit un outil essentiel pour le suivi des étendues des lacs des barrages. L'exemple de cette évolution, à travers l'exemple du barrage Mansour Eddahbi sur le bassin du Darâa, montre une étendue extrêmement variable d'une année à l'autre. Les résultats montrent qu'il est difficile d'établir un lien direct entre cette variabilité de l'étendue du lac du barrage pendant la période des hautes eaux et les conditions pluviométriques antérieures. En effet, plusieurs facteurs, d'ordres anthropiques et climatiques, interviennent simultanément et doivent être pris en compte pour comprendre la variabilité des étendues des lacs des barrages.

Bibliographie

- Ait Lamqadem, A., Saber, H., Pradhan. B. 2018. Quantitative Assessment of Desertification in an Arid Oasis Using Remote Sensing Data and Spectral Index Techniques. *Remote Sens.* 10, 1862; <https://doi:10.3390/rs10121862>
- Bates B. Kundzewicz Z. W. Wu S. Palutikof J. 2008. Climate change and water, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. Available at <https://www.ipcc.ch>
- Bohn V. Y., Piccolo M. C. 2018. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) As A tool to Determine The Hydrological Dynamic of Plain Regions (Argentina), São Paulo, UNESP. *Geociências*, V.37, n. 3, pp. 627-637.
- Karmaoui, A., Ifaadassan, I., Babqiqi, A., Messouli, M., Khebiza, M.Y. 2016. Analysis of the Water Supply-demand Relationship in the Middle Draa Valley, Morocco, under Climate Change and Socio-economic Scenarios. *J. Sci. Res. Rep.* 9, 1–10. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2016/21536>
- Katz R.W., Glantz M.H. 1986. Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review.* Vol. 114. 764-771.
- Kessabi R., Hanchane M., Krakauer N.Y., Aboubi I, El Kassioui J., El Khazzan B. 2022b. Annual, Seasonal, and Monthly Rainfall Trend Analysis through Non-Parametric Tests in Sebou River Basin (SRB), Northern Morocco. *Climate* 2022, 10, 170. <https://doi.org/10.3390/cli10110170>
- McFeeters S. K., 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432.
- Ouhajou L. 1996. *Espace hydraulique et société au Maroc : cas des systèmes d'irrigation dans la vallée du Dra.* Université Ibn Zohr, publication de la faculté des lettres et des sciences humaines – Agadir, Série thèses et mémoires, imprimerie Al Maarif Al Jadida, Rabat, 344 p.
- Sadiki A. 2023. *Les oasis marocaines entre changements climatiques et durabilité des ressources en eau (texte en arabe).* Thèse de Doctorat, USMBA-Fès, 260 p.
- Sadiki A et Hanchane M. 2022. Evaluation de la sécheresse climatique et de son impact sur le plan d'eau du barrage Hassan Addakhil (Maroc). Publication du 35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (Toulouse, France). 6 p.
- Verpoorter C., Kutser T., Tranvik L. 2012. Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data. *Limnology and Oceanography: Methods*, 10, 1037–1050.

ETUDE DE LA VARIABILITE THERMIQUE TEMPORELLE DANS LE BASSIN VERSANT DE MELLOULOU de 1970 à 2019

¹BERTAL Yassine, ²MAKRANE Ibrahim et ²BEN BRAHIM Youssef.

¹ Etudiant chercheur, ² Professeurs. Université Sidi Mohamed Ben Abd Ellah, Faculté des lettres et sciences humaines Saïs-Fès Eq. Rech : Milieux Naturels, Aménagement et Dynamique Socio-Spatiales (Maroc), Yassine.bertal@usmba.ac.ma

Résumé : L'objectif de l'étude est l'analyse de la variabilité thermique dans le bassin versant de Melloulou (le Nord-Est du Moyen Atlas. Maroc) au cours de cinq décennies de 1970 à 2019. Les résultats obtenus par le test de Mann-Kendall et l'analyse de la variabilité de l'anomalie pour les températures moyennes annuelles montrent une tendance vers la hausse. Les années froides représentent 42 % des années étudiées, tandis que les années chaudes représentent 58 %. Ils montrent également, que les températures dans la zone d'étude se caractérisent par des fluctuations importantes. Celles-ci ont contribué à la fragilité de l'écosystème forestier.

Mots clés : Température, Variabilité, tendance, Anomalie, bassin versant de Melloulou, Moyen Atlas.

1. Introduction

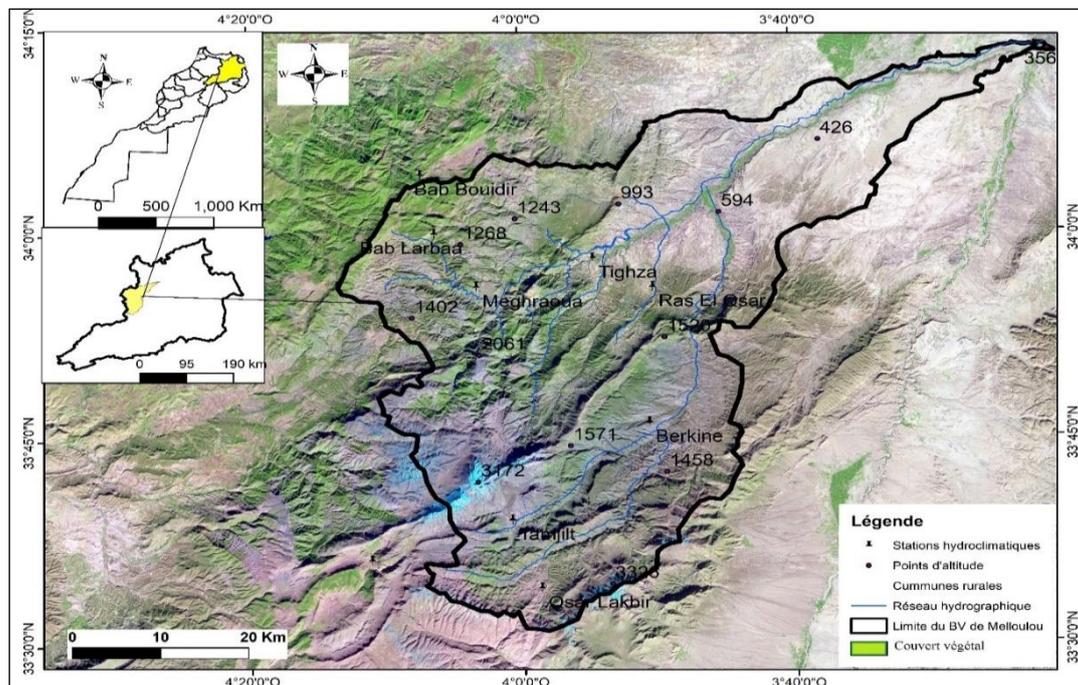
Aujourd'hui, la question du réchauffement climatique de la terre fait l'objet d'une attention considérable de la part de divers chercheurs du monde. Ils projettent l'atténuation des effets des changements erratiques de la température. Le réchauffement global est une réalité concrétisée par l'évolution actuelle des températures. Ces dernières, montrent une tendance à la hausse engendrant des sécheresses à la fois récurrentes et extrêmes dont les dommages écologiques et environnementaux sont considérables. Au Maroc, plusieurs régions ont connu de longues périodes sèches et ceci depuis le début des années 1980 et elles ont eu des conséquences non négligeables sur l'économie du pays (Driouech, 2010).

Un travail d'observation et de suivi thermique est donc mené sur une période de 50 ans (1970-2019) à l'échelle du bassin versant de Melloulou. L'évolution des températures y demeure une question clé dans le changement climatique d'une part et le conditionnement et la distribution des écosystèmes végétaux d'autre part. Elle a des effets directs sur l'ensemble des réactions des espèces végétales. Avec l'augmentation de la température, les espèces forestières peuvent donc se déplacer vers les hautes altitudes où les conditions thermiques sont encore favorables à l'épanouissement du couvert végétal. L'objectif de cette étude est de montrer les fluctuations des températures enregistrées ses dernières décennies à travers une analyse de la variabilité des températures moyennes annuelles, saisonnières et mensuelles dans le bassin versant de Melloulou.

2. Présentation de la zone d'étude

D'une superficie de 2589 km², au Nord-Est du Maroc, le bassin versant de l'oued Melloulou constitue l'un des principaux sous bassins versants formant le bassin versant de la Moulouya. Il est très évasé en amont et trop restreint en aval (Mouhdi, 1993), orienté du SW (33°32'N et 4°15'W) au NE (34°13'N et 3°22'W). Sa topographie est assez variée. Elle est constituée de sommets du Moyen Atlas et la partie méridionale de la plaine de Guercif. Le climat du bassin versant de Melloulou est de type aride à semi-aride. Les précipitations montrent une répartition temporelle avec une succession d'années sèches et humides. Ce type du climat régnant dans cette zone d'étude est caractérisé à l'échelle spatiale par une grande variabilité pluviométrique et thermique. Selon les données climatiques de l'agence du bassin hydraulique de Moulouya, le bassin versant de Melloulou reçoit des précipitations annuelles variant entre 160 mm et 440 mm. Néanmoins, les précipitations ne sont pas réparties d'une

manière équitable sur l'ensemble du bassin à cause de l'hétérogénéité orographique. Dans les zones accidentées, les précipitations enregistrées sont faibles, le cas pour la station pluviométrique de Berkine où le total annuel est 237 mm. Les zones dont l'altitude est faible ne dépassent guère 165 mm. En ce qui concerne les températures, elles ont des amplitudes importantes. Les mois de janvier et décembre sont les plus froids à la station de Berkine et les mois de juillet et août sont les plus chauds. Les vents proviennent, en général, du Sud-Est (Chergui) augmentent l'évapotranspiration et diminuent le bilan hydrique, et qui peut accélérer le phénomène d'érosion éolienne dans les zones dépourvues de couvert végétal. Ce sont les vents du Nord-Ouest (Gharbi), qui deviennent fréquents, ils sont chargés d'un taux d'humidité important. L'étage bioclimatique dominant dans la zone d'étude est aride à semi-aride avec un hiver chaud selon la classification d'Emberger. La présence du couvert nival très irrégulier dans le temps et dans l'espace, demeure pour autant, une richesse naturelle dans l'aire d'étude. Le bassin versant du Melloulou occupe une place importante en matière de ses originalités environnementales. Les massifs de Bou Iblane et de Bou Nasseur constituent des entités géographiques bien distinctes à l'échelle de la chaîne atlasique. Ces massifs aux pentes raides et vallées profondes, boisées pour une bonne part, conservent des valeurs remarquables en matière de beauté des paysages, de la richesse de sa biodiversité. Vers les basses altitudes, on voit un changement radical au niveau des composantes paysagères. (Carte.1)



Carte. 1 : Localisation géographique du bassin versant de Melloulou

3. Données et méthodes

L'analyse de l'évolution des températures exige une base de données composée de longue série de données observées au niveau des différentes stations accréditées dans cette étude. Malheureusement les enregistrements des températures dans les stations terrestres de la zone d'étude font défaut. Nous sommes basés sur les données CRU (Climatic Research Unit) TS 4.04 de quatre stations (Guercif, Belfarah, Berkine et Maghraoua) couvrant les données de la période d'étude 1970 et 2019, via le site suivant <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>. Ces données ont été calibrées à l'aide des données d'élévation par interpolation. Le choix de ces données vient de leur utilisation étendue et ses résultats importants dans la recherche. On peut

citer dans notre zone la thèse de Mokhtari N., 2016 qui traite la dynamique de la désertification dans le bassin versant de Moulouya.

L'analyse statistique des séries chronologiques des températures est une des méthodes d'identification de la variabilité thermique. Nous avons évoqué l'estimation de l'anomalie climatique des températures qui est la déviation par rapport à un état climatique moyen (Merle, 1980), afin d'identifier les années froides et chaudes. On a considéré qu'une année était froide, lorsque l'anomalie prend des valeurs négatives et une année chaude quand elle prend une valeur positive. En outre, nous avons estimé la tendance de la température en appliquant la régression linéaire ($Y=ax+b$). La tendance est obtenue par le calcul de la pente (**a**) qui est un coefficient directeur : -Si $a>0$, la tendance à la hausse ;

-Si $a<0$, la tendance à la baisse.

Nous avons basé aussi sur le test de Mann-Kendall à l'aide du logiciel R.

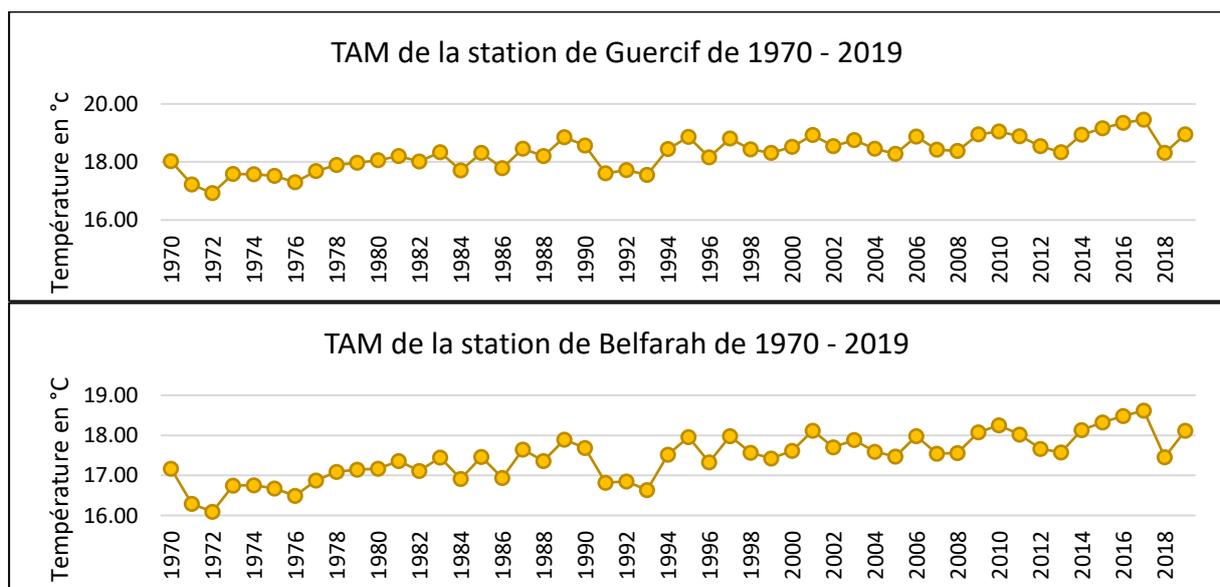
4. Résultats et discussions

4.1 Description et répartitions temporelles des températures

4.1.1 Les températures moyennes annuelles

La répartition temporelle de la température moyenne annuelle de 1970 à 2019, montre qu'elle varie entre 16.9°C minimum de la période enregistrée en 1972 et 19.4°C maximum de la même période enregistrée en 2017 à la station de Guercif. Pour la station de Belfarah, elle varie entre 16 °C en 1972 et 18.6°C en 2017. En allant vers les stations qui se trouvent dans les causses du moyen Atlas oriental, on constate que la température moyenne annuelle varie entre 14.6°C en 1972 et 17.1°C en 2017 à la station de Berkine et entre 13.2°C en 1972 et 15.8°C en 2017 à la station de Maghraoua. L'amplitude thermique est assez importante entre l'hiver et l'été avec 29.2°C comme température moyenne maximale et 4.5°C comme température moyenne minimale. Elle atteint une valeur de 24°C dans la zone d'étude.

D'après la figure n°2, on voit que la température diminue des basses aux hautes altitudes. La variabilité de cette dernière d'une région à l'autre dans ce bassin est due à la grande étendue et la diversité des reliefs très accidentés en allant des plaines du bassin de Guercif vers les hauts sommets du moyen Atlas.



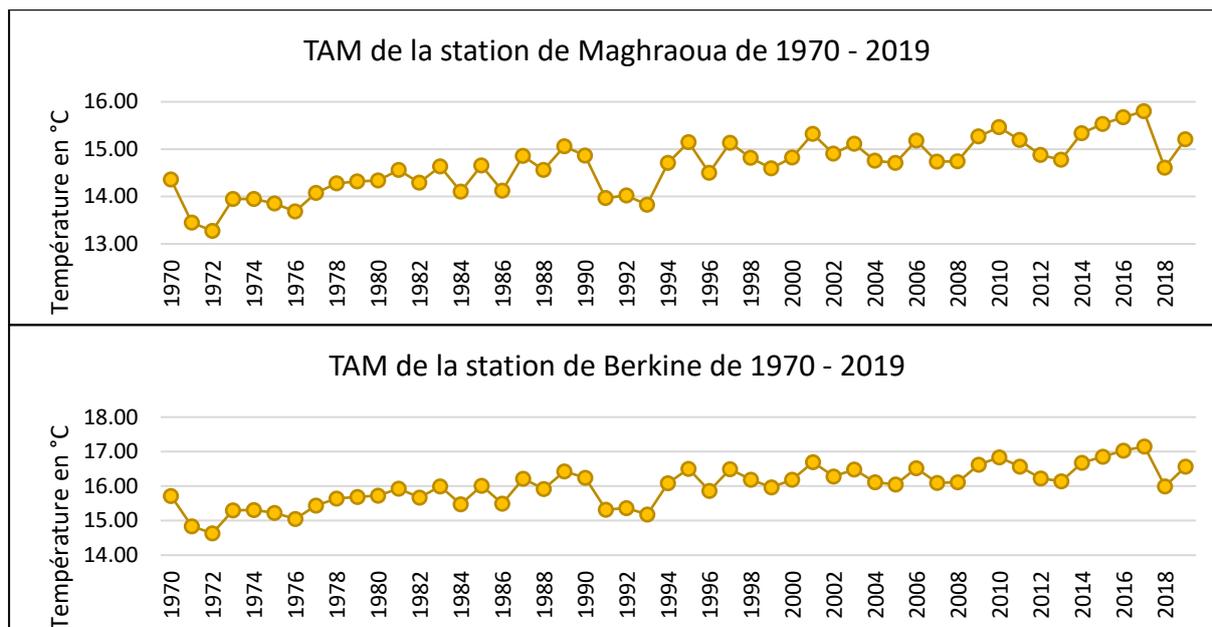


Fig 2 : Evolution de la température moyenne annuelle du BV de Melloulou de 1970 à 2019.

Source : Données CRU, TS 4,04+nos traitements.

4.1.2 Les températures moyennes annuelles maximales et minimales

La figure (3) montre que les moyennes annuelles maximales ont connu une augmentation où elles varient entre 22.7°C en 1977 à la station de Maghraoua et 27.5°C à la même station en 2015. Les maximas annuels moyens (TXx) les plus élevées sont observées au mois de Juillet et Août pour toutes les stations étudiées. Les températures moyennes annuelles minimales (TXn) ont connu une variation assez faible. Par exemple, Elle varie entre 4.5°C en 2005 à la station de Maghraoua et 12.5°C à la même station en 2016.

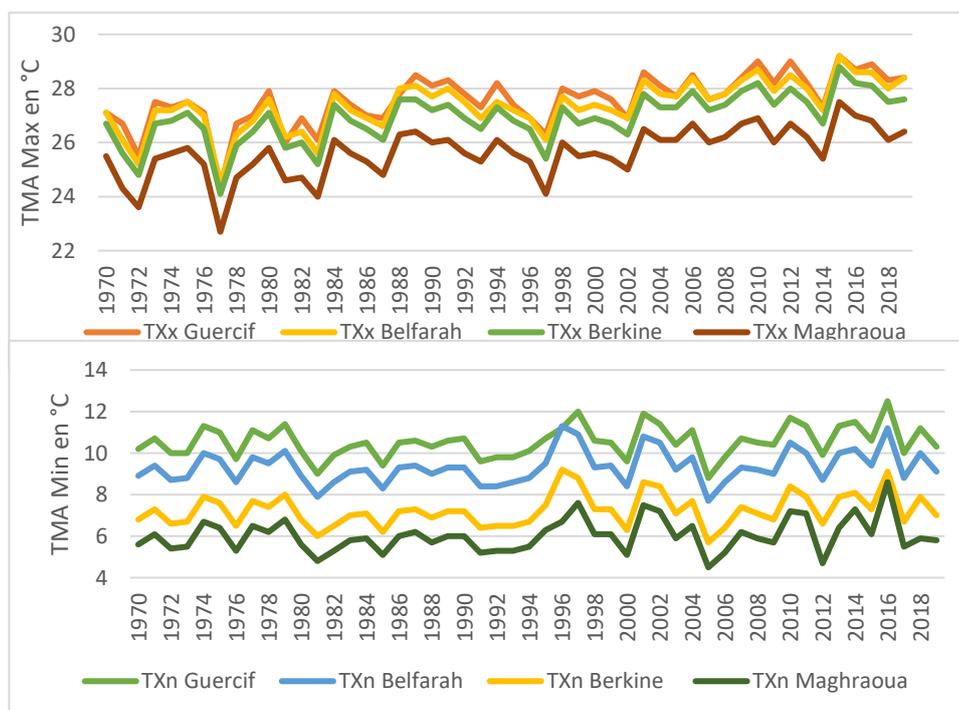


Fig. 3 : Température moyenne annuelle maximale et minimale du BV de Melloulou de 1970-2019.

Source : Données CRU, TS 4,04+nos traitements.

4.1.4 Les températures moyennes mensuelles

Le mois le plus froid est le mois de janvier pour l'ensemble du bassin versant de Melloulou (Fig. 5) avec une température moyenne de l'ordre de 6.3°C à la station de Maghraoua et le mois août est le plus chaud avec une température moyenne d'ordre de 25.5°C à la même station. Pendant, le mois de juillet et août, on constate l'aplatissement du sommet de la courbe de toutes les stations, où la variation de la température ne dépasse pas en général 1°C.

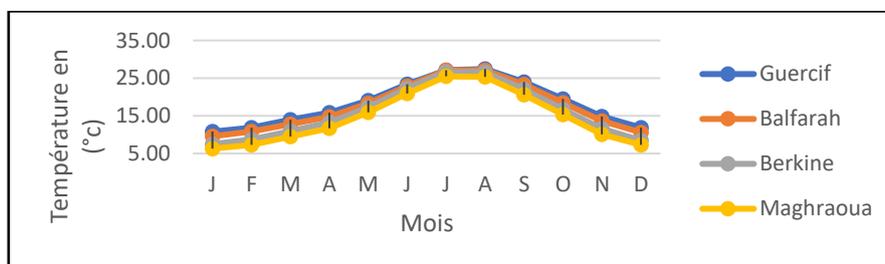


Fig. 5 : Température moyenne mensuelle du BV de Melloulou de 1970-2019.

Source : Données CRU, TS 4,04+nos traitements.

4.2 Analyse des anomalies de la température moyenne annuelle et sa tendance

4.2.1 Analyse des anomalies de la température moyenne annuelle

Les anomalies de la température moyenne annuelle pour les quatre stations considérées ont été déterminées par le calcul de l'écart à la moyenne des températures moyennes de chaque année. Les variations interannuelles des anomalies des moyennes annuelles des températures sont représentées sur la figure (6), ces anomalies présentent des tendances positives et négatives par rapport à la normale. Le diagramme de l'évolution des anomalies des séries des températures annuelles moyennes des quatre stations étudiées durant la période de demi-siècle (1970-2019). D'après la première lecture nous pouvons faire la distinction entre trois types de tendance : une tendance totalement négative des écarts à la moyenne de 1970 jusqu'au début des années 80, une tendance d'alternance de courte durée entre l'année 1983 et 1996 et enfin une tendance exclusivement positive de 1997 à 2019.

On voit que la tendance générale de la température avec une valeur de 0,05°C/an et le coefficient de détermination (R^2) sont presque identiques dans toutes les stations étudiées. L'impact direct de ce dérèglement thermique est l'augmentation des périodes chauds et la diminution des épisodes froids accompagnés à plusieurs phénomènes tels que la sécheresse, le stress hydrique et la propagation des incendies des forêts.

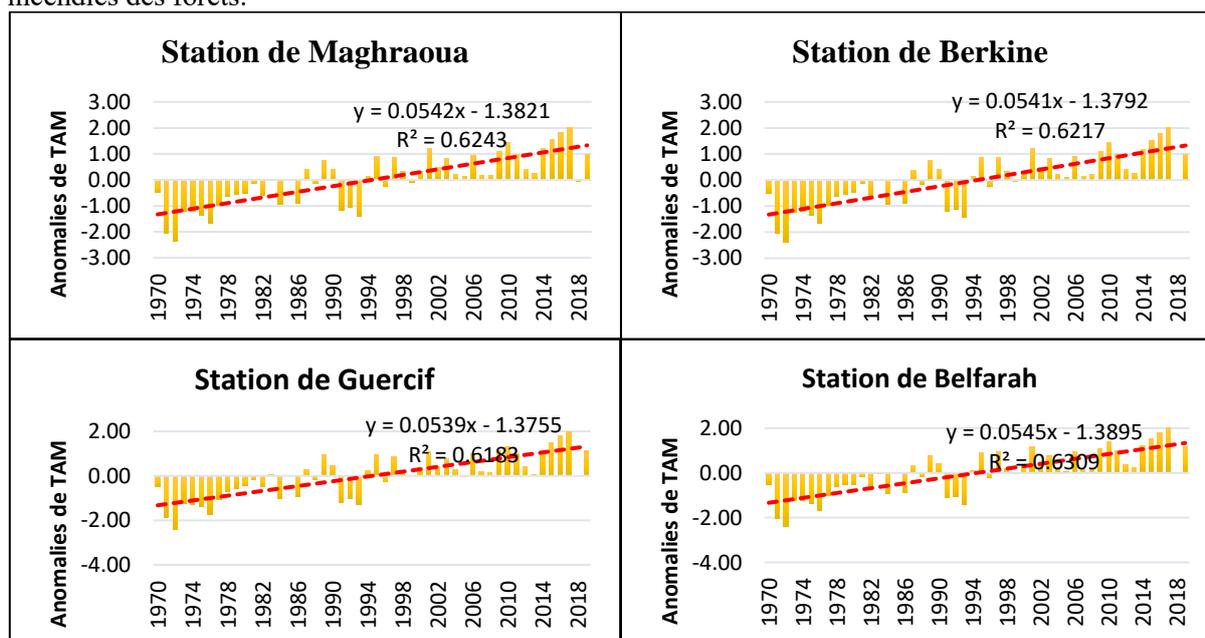


Fig. 6 : Anomalies des températures moyennes annuelles du BV de Melloulou de 1970-2019.

Source : Données CRU, TS 4,04+nos traitements.

4.2.1 La tendance des températures moyennes annuelles

L'analyse des résultats obtenus de la tendance annuelle des températures à l'aide du test de Mann-Kendall et la pente de Sen, montrent une tendance positive à la hausse, significative au seuil de 0.05 dans les séries des stations étudiées du bassin versant de Melloulou durant la période 1970 à 2019. La tendance thermique entre les stations est similaire, même si les résultats indiquent des différences très faibles.

Tab.1 : Résultats des tests de Tendance sur les données thermiques annuelles (1970-2019)

| Station | Début | Fin | Test de MK | P-value | La pente de Sen | Tendance |
|------------------|-------|------|------------|---------|-----------------|----------|
| Guercif | 1970 | 2019 | 6.13 | 0.0003 | 0.032 | Hausse |
| Belfarah | 1970 | 2019 | 6.26 | 0.0001 | 0.031 | Hausse |
| Berkine | 1970 | 2019 | 6.22 | 0.0002 | 0.031 | Hausse |
| Maghraoua | 1970 | 2019 | 6.22 | 0.0002 | 0.031 | Hausse |

Test MK : $\alpha=0,05$

Source : Données CRU, TS 4,04+nos traitements.

5. Conclusion

L'étude de variabilité thermique et sa tendance dans le bassin versant de Melloulou au cours de la période 1970 et 2019, nous a permis de tirer les constatations suivantes:

La description de la température moyenne indique une variabilité des températures moyennes annuelles, saisonnières et mensuelles entre les stations étudiées dans le site d'étude. Les résultats de description ont mis en évidence l'impact des paramètres locaux notamment l'hétérogénéité topographique sur la variabilité et la répartition des températures.

L'étude de l'anomalie thermique et l'application du test de Mann-Kendall ont montré qu'il y a une tendance vers la hausse. Ces fluctuations thermiques ont contribué dans les feux de forêts et dans la fragilisation de l'environnement naturel déjà anthropisé.

Références Bibliographiques

- Bertal Y., 2019. Dégradation des ressources forestières et actions de conservation : cas du bassin versant de l'Oued Melloulou, projet de fin d'étude de Master. FLSH Sais-Fès, Département de Géographie, USMBA, 135 p.
- Driouech F, 2010. Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique. Thèse de Doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse. 163 p.
- Merle, J. (1980). Océan et climat. Les fonctions thermiques de l'océan dans la dynamique du climat. Trav, Doc. OSTROM. La météorologie, VIe série n°22 septembre 1980. 87, 85-95.
- Mouhdi A., (1993) : Contribution à l'étude pluvio-hydrologique du bassin versant de Melloulou (Maroc oriental). Thèse de doctorat en géographie. Université des sciences et technologies de Lille U.F.R de géographie et d'aménagement spatial. P 251.

IMPACT DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX SUR LA BIODIVERSITE VEGETALE DANS LA STATION RAS-EL-MA AU NIVEAU DU PARC NATIONAL DE TAZEKKA

HAZYOUN Zineb¹, ASSEM Najat¹ & EL HAOUARI Mohammed^{1,2}

¹Laboratoire Substances Naturelles, Pharmacologie, Environnement, Modélisation, Santé & Qualité de Vie (SNAMOPEQ), Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah (Fès), Maroc

²Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de la Formation (CRMEF Fès-Meknès), Taza 35000, Maroc
zineb.hazyoun@usmba.ac.ma

RESUME : La station de **Ras-El-Ma** (Ras-El-Oued), qui fait l'objet de notre étude, est située au sud de la ville de Taza, dans la commune de Bab Boudir, porte d'entrée du célèbre parc national de Tazekka. Cette zone est caractérisée par la présence de reliefs montagneux, d'une source d'eau, d'un oued, de cascades, de forêts et de grottes, et présente une richesse floristique importante. Cependant, cette flore très diversifiée est menacée par plusieurs facteurs climatiques et anthropiques. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des changements environnementaux durant les années 2014, 2017, 2018, 2019 et 2021 sur la répartition des espèces végétales dans la station Ras-El-Ma par la détermination de l'indice de végétation normalisé (NDVI). Les résultats obtenus par l'utilisation de logiciel ArcGis ont montré que les changements climatiques et anthropiques influencent de façon significative la distribution des espèces végétales dans cette station.

Mots clés: Biodiversité végétale, changements environnementaux, ArcGis, Ras-El-Ma, parc national de Tazekka.

IMPACT OF ENVIRONMENTAL CHANGES ON THE PLANT BIODIVERSITY IN THE RAS-EL-MA STATION AT THE TAZEKKA NATIONAL PARK

Abstract: The station of Ras-El-Ma (Ras-El-Oued), which is the subject of our study, is located south of the town of Taza, in the commune of Bab Boudir, gateway to the famous park Tazekka National. This area is characterized by the presence of mountainous reliefs, a water source, a wadi, waterfalls, forests and caves, and presents significant floristic wealth. However, this very diverse flora is threatened by several climatic and anthropogenic factors. The objective of this work is to study the influence of environmental changes during the years 2014, 2017, 2018, 2019 and 2021 on the distribution of plant species in the Ras-El-Ma station by determining the index of normalized vegetation (NDVI). The results obtained using ArcGis software showed that climatic and anthropogenic changes significantly influence the distribution of plant species in this station.

Keywords: Plant biodiversity, environmental changes, ArcGis, Ras-El-Ma, Tazekka National Park.

1- INTRODUCTION

Le Maroc est reconnu comme étant le pays le plus riche en matière de biodiversité globale dans la partie occidentale de la région méditerranéenne. En raison de sa position géographique privilégiée, de la variété de son climat et de ses habitats, et à son histoire paléontologique, dispose d'une grande variété d'écosystèmes et d'espèces animales et végétales (HCEFLCD, 2007).

Afin de préserver sa biodiversité exceptionnelle, le Maroc a opté pour une politique des aires protégées en instaurant 10 parcs nationaux dont le parc National de Tazekka (PNTz). En effet, ce dernier qui est situé dans la chaîne montagneuse du Moyen atlas oriental et qui présente une biodiversité végétale très diversifiée est confronté à plusieurs contraintes. Notamment, le changement climatique et les pressions exercées par les activités humaines qui entraînent de graves conséquences sur cette flore.

Dans ce contexte, nous avons étudié les effets des changements environnementaux sur la répartition des espèces végétales dans la station Ras-El-Ma au niveau du (PNTz) au cours des années 2014, 2017, 2018, 2019 et 2021, par utilisation du logiciel ArcGis.

2- METHODOLOGIE DU TRAVAIL

2.1. Contexte géographique de la zone d'étude

La station de **Ras-El-Ma** (Ras-El-Oued) est située au sud de la ville de Taza, dans la commune de Bab Boudir, avec une latitude (N) 34°08' et une longitude (O) 04°01'. C'est la porte d'entrée du célèbre parc de Tazekka (PNTz), créé en 1950 et qui se situe dans la partie la plus septentrionale de la chaîne du Moyen Atlas oriental (figure 1).

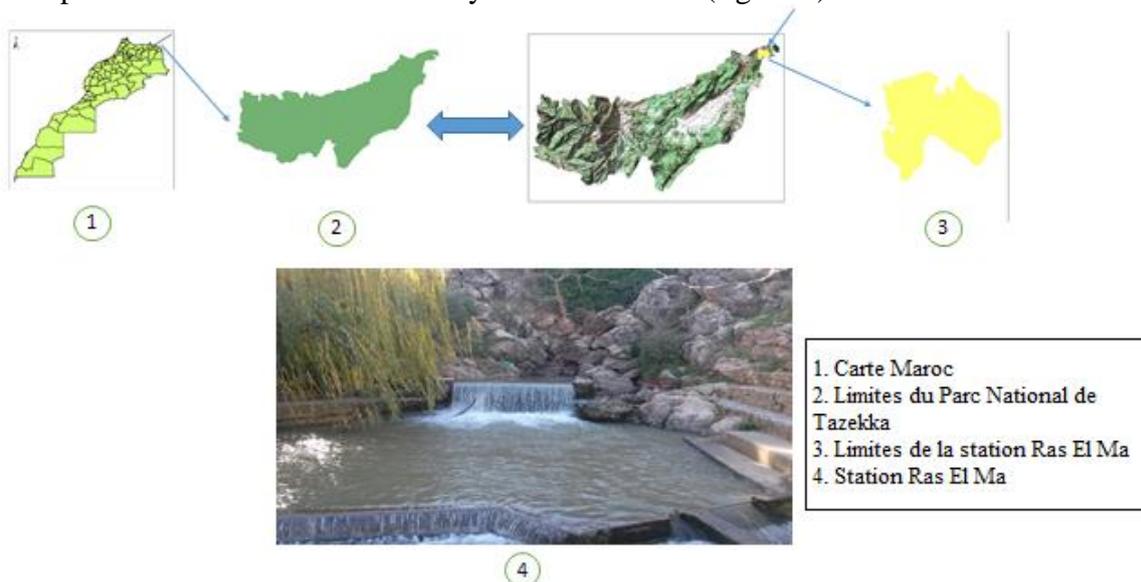


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

2.2. Données édaphiques

Les types de sols rencontrés dans la station **Ras-El-ma** sont des sols calcaires et fersiallitiques.

2.3. Données climatiques

Les conditions climatiques constituent un facteur crucial dans la croissance et le développement des espèces végétales. Les plantes sont étroitement liées à leur environnement, et les variations dans les conditions climatiques peuvent influencer leur installation, leur adaptation et leur croissance de manière significative.

Le graphe des précipitations annuelles (figure 2) révèle une tendance à la hausse au cours des années 2014, 2018 et 2021, suggérant une augmentation significative des pluies dans la zone d'étude. Cependant, au cours de l'année 2017, la température (figure 3) atteint son maximum ($18,5^{\circ}\text{C}$) avec un taux de précipitations très faible (251 mm).

Une corrélation négative entre les températures et les niveaux de précipitations est observée, suggérant un lien entre la hausse des températures et les périodes de sécheresse. Il est clair que cela a un impact important sur la répartition des espèces végétales dans la station Ras el ma.

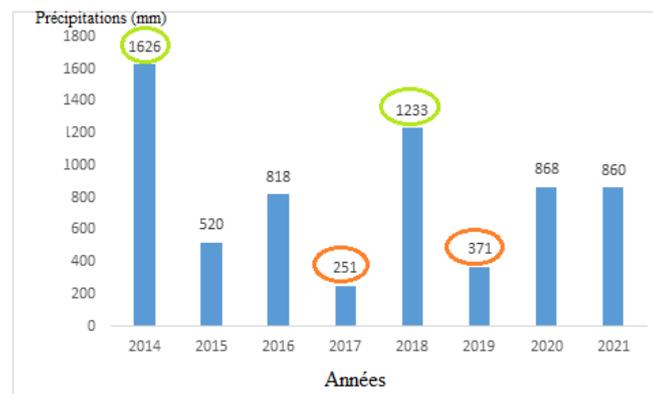


Figure 2: Précipitations moyennes annuelles dans la station Ras el ma

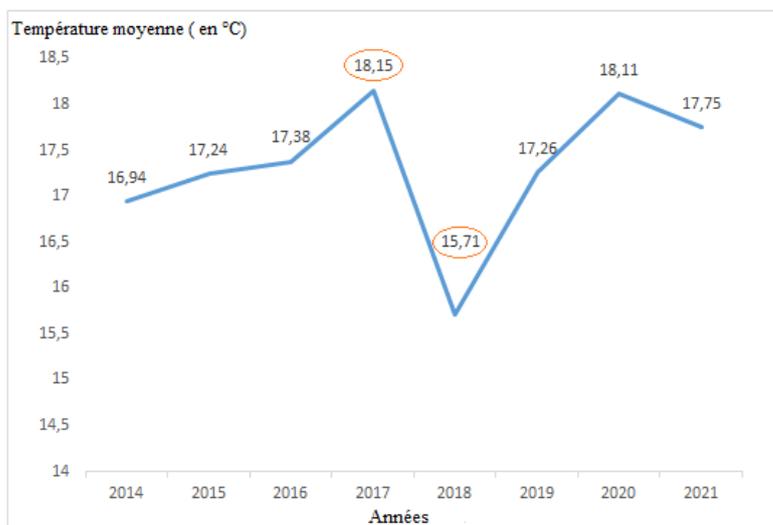


Figure 3 : Evolution de la température moyenne annuelle dans la station Ras El Ma au cours des années 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 et 2021

2.4. Méthodologie

Pour cette étude, nous avons opté pour l'utilisation d'images Landsat avec une résolution de 30 m, issues des capteurs LANDSAT OLI 8 (Operational Land Imager). Afin de suivre l'évolution du couvert végétal naturel dans la station Ras El Ma (figure 4).



Figure 4: Méthodologie de travail

3- RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus par utilisation du logiciel ArcGis et par comparaison entre des données climatiques des années 2014, 2017, 2018, 2019 et 2021, ont montré des conséquences liées aux variations de certains facteurs environnementaux sur les écosystèmes (figure 5). En effet, chaque image illustre l'évolution de la chlorophylle sur une période de 2 ans.

D'après les résultats obtenus (figures 5 et 6), on observe une progression dans le couvert végétal de la zone d'étude de 18,76% (89878 m²) durant la période 2014-2017 et une régression de 10,12% (48564 m²). Aussi on remarque des zones stables dans la partie ouest de la station Ras El Ma (figure 5, **carte A**).

Selon la figure 5 (**carte B**), il y a une régression de 13,5% (64722 m²), et une progression de 12,16% (58316 m²), avec des zones stables de 74,34% (356370 m²) durant la période 2017-2018.

Concernant la période 2019-2021, il y a une progression remarquable de 25,86% (123937 m²), avec une régression de 9,69% (46459 m²), et des zones stables de 64,45% (309012 m²).

Donc, la régression et la progression végétative dans la station Ras El Ma sont dues principalement aux changements climatiques (figure 5, **carte C**) et (figure 6), notamment la température élevée et les faibles précipitations.

Aussi, la principale cause de la disparition d'environ 13 millions d'hectares de forêts chaque année à l'échelle mondiale est liée aux activités anthropiques et aux changements climatiques globaux (Villeneuve, 2009). Les changements climatiques correspondent donc, à des modifications à long terme d'un ou plusieurs éléments du climat, principalement la température et les précipitations (Stucki et al., 1998).

Le climat est le résultat de l'action d'un ensemble de facteurs qui régissent l'atmosphère et le sol d'une région donnée et par suit, qui conditionne le développement des êtres vivants végétaux en particulier (Belhattab, 1989).

La répartition des précipitations au cours de l'année et les variations de la température sont deux éléments essentiels pour la croissance des plantes (Huetz de Lemps, 1973).

En outre, plusieurs études ont prouvé l'efficacité des séries temporelles de NDVI pour estimer la productivité de la végétation. Cet indice est très largement utilisé par la communauté scientifique, en raison de sa reproductibilité et de son efficacité dans la détection de l'activité chlorophyllienne.

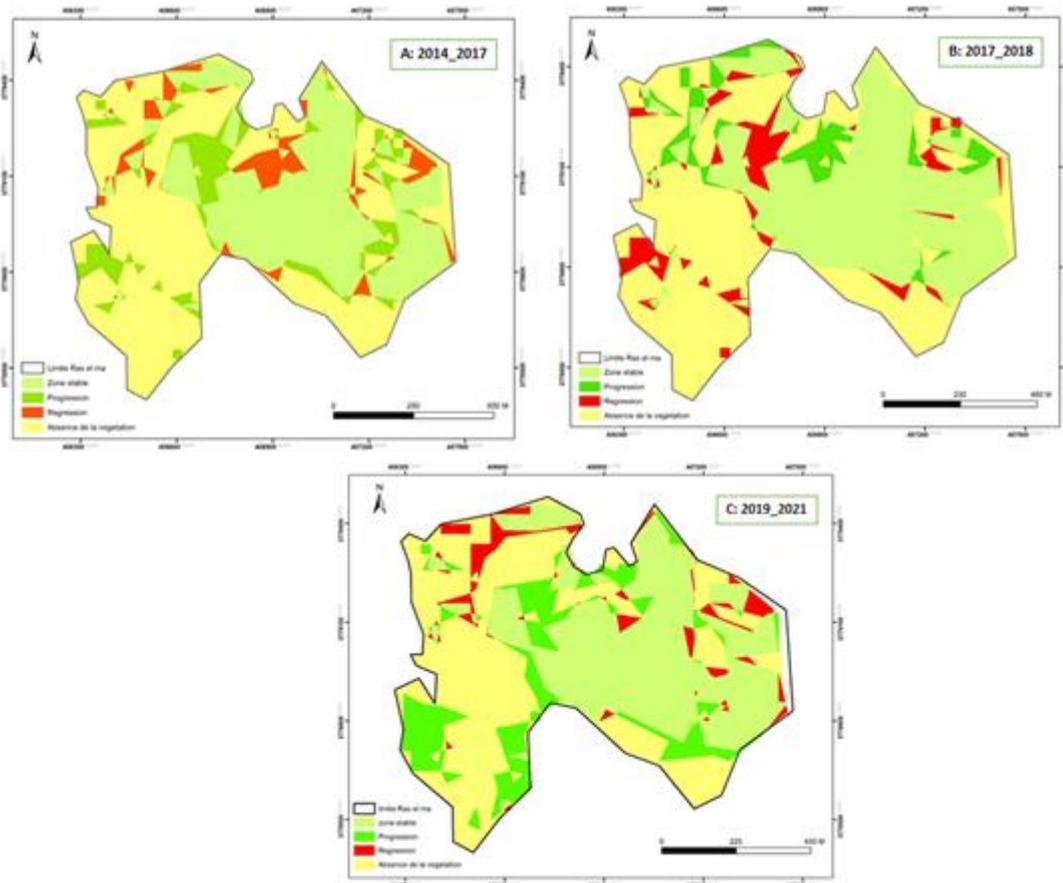


Figure 5: La répartition du couvert végétal au niveau de la station Ras El Ma sous l'influence des changements climatiques entre les années 2014-2017, 2017-2018 et 2019-2021 (ArcGis)

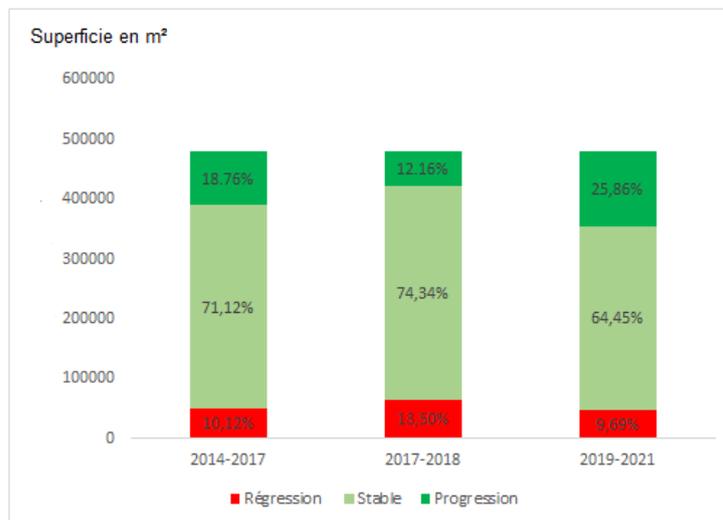


Figure 6: Evolution chlorophyllienne dans la station Ras El Ma en fonction de la superficie durant les années 2014, 2017, 2018, 2019 et 2021.

CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de démontrer comment les changements environnementaux influencent la répartition des espèces végétales au niveau de la station Ras El Ma durant les années 2014, 2017, 2018, 2019 et 2021. En effet, les résultats obtenus par le

logiciel ArcGis ont montré qu'il y a vraiment un changement climatique qui influence la biodiversité végétale dans la zone d'étude. Aussi, le rythme des précipitations, l'accroissement des températures moyennes annuelles, l'allongement de la période de sécheresse estivale et l'action humaine se traduisent sur le terrain par la disparition de plusieurs espèces végétales au niveau de la station Ras el ma. Donc, il est nécessaire de trouver des solutions rapides pour préserver cette flore menacée de disparition.

Références bibliographiques

- Belhattab, A. (1989).** Bilan phytocologique de l'arborétum de Mezloug. M.E.M., Univ Mostaganem., p12-39J.
- Huetz de Lemp, A. (1973).** La végétation de la terre. Paris, Masson, [52](#) ; pp. 185-186.
- Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. (2007).** Actes de l'atelier sur la valorisation de la grande faune sauvage au Maroc, p 15.
- Stucki, E., Rognon, P. (1998).** The Ormonts Valley facing climate change and natural disasters; PNR 31 summary report, 68.
- Villeneuve, C. (2009).** Forêts et humains: Une communauté de destins. Édité avec le soutien financier du ministère des Relations internationales du Québec; ISBN: 978-2-89481-098-9; 101 pages.

Axe 2 : Risques géologiques et géomorphologiques

LES ABORDS DU MASSIF DE BOUKHOUALI: CHANGEMENT DES ETATS DE SURFACE ET LA REDYNAMISATION HYDRO-EOLIENNE (MAROC ORIENTAL)

CHAKER Miloud

Université Med V, Rabat. Courriel : chaker.m@gmail.com

Résumé: Il est question dans papier, de présenter le degré de la dégradation des terres, de la montagne subhumide, aux plaines et plateaux steppiques, en se basant sur l'observation et des mesures directes sur le terrain. Les méthodes utilisées se complètent, à savoir les résultats des mesures, durant 50 ans, au niveau de station hydrologique de Taourirt, la simulation artificielle des pluies, sur des micros parcelles et les mesures sous pluie naturelle, à l'échelle des parcelles de type Wischmeier. Les résultats peuvent aider à identifier les pratiques prometteuses à encourager pour protéger ces milieux.

Mots clés : Montagne, steppe, pluie, simulation, Cs137, érosion.

THE SURROUNDINGS OF THE BOUKHOUALI MASSIF: CHANGE IN SURFACE CONDITIONS AND HYDRO-WIND REDYNAMIZATION (EASTERN MOROCCO)

Abstract: This paper aims to present the degree of land degradation, from subhumid mountains, to steppe plains and plateaus, based on observation and direct measurements in the field. The methods used complement each other, namely the results of measurements, over 50 years, at Taourirt hydrological station, the artificial simulation of rainfall, on micro plots and measurements under natural rain, on the scale of plots of type Wischmeier. The results can help identify promising practices to encourage to protect these environments.

Keywords: Mountain, steppe, rain, simulation, Cs137, erosion.

I-INTRODUCTION

Globalement, les massifs forestiers, de l'Oriental et leurs abords steppiques connaissent actuellement une dégradation sévère de leur couvert végétal, à cause du rythme des sécheresses qui s'accroît, d'une part et le mode d'utilisation des terres, d'autre part.

En fait, il est fort bien connu que la succession d'années sèches, sous un climat semi aride, est à prendre comme donnée de base, cas du Maroc Oriental. Par contre, les ponctions et les prélèvements sur les ressources naturelles ne cessent de s'accroître, sans répit et sans possibilité de renouvellement. Il est donc question, dans ce papier, de chercher à faire une corrélation entre l'évolution des états de surface et la perte du capital sol et eau.

En fait, si l'érosion hydrique reste encore, sur le plan spatial, localisée et ne touchant pas toute la population de la région, l'érosion éolienne étale ses limons et ses sables fins arrachés, sur tout le nord du Maroc, jusqu'au-delà de la Méditerranée. D'ailleurs, La Direction Générale de la Météorologie a redoublé récemment les appels à la vigilance face aux vagues de « chasse-poussières ». Les populations rurales, restent éblouies devant ce phénomène qui a voilé le ciel d'un nuage opaque et rougeâtre, en provoquant une faible visibilité et des difficultés à respirer. La forêt, les cultures et même le sol, de la montagne de Boukhouali, ont été particulièrement vêtus de ces limons rosâtres. Il a fallu attendre un événement pluvieux pour nettoyer l'air, le sol, le couvert végétal, pour revenir à la couleur habituelle du milieu.

Les explications de ce phénomène varient d'une couche sociale à l'autre, les uns lèvent les mains et les yeux vers le « Ciel » et tant d'autres parlent des sables sahariens, on laissant entendre que c'est le désert qui remonte, à grands pas vers le nord. Par contre, les recherches scientifiques montrent les faibles déplacements des dunes sableuses vers le nord (Sbai A. et Mouadili O. 2023 ; Ballais J.L, et *al.* 1979) ;

Pour contribuer à la compréhension de ces phénomènes, nous allons essayer de démontrer qu'il faut en premier lieu regarder d'une façon diachronique, chacun autours de soi, pour évaluer les effets de la dégradation locale des états de surface. Il a été démontré par plusieurs recherches que les sols de ces milieux steppiques, où les conditions climatiques sont sévères, seule une couverture végétale permanente, peut réduire la dynamique hydro éolienne.

II-Etats des lieux : Eau, couvert végétal et sol.

Suite à la succession des années sèches, le couvert végétal se dégrade dans les sommets montagneux et dans les plaines et plateaux steppiques.

1- Dégradation du haut sommet de l'Oriental

Le massif de Boukhouali, à titre d'exemple, cesse d'être considéré comme château d'eau pour ses rebords, pas uniquement suite à la succession des années sèches, mais surtout par la surexploitation de la ressource au cœur même de la montagne. Rien que durant les 10 dernières années, dans la dépression d'Ayat, se situant entre 1200 et 1500 m d'altitude et mesurant presque 200 hectares, abritant moins de 100 foyers, nous avons dénombré plus de 30 puits, dont les plus profonds arrivent jusqu'à 70m de profondeur et dont 8 sont déjà équipés par des panneaux solaires. Ainsi, les petites nappes d'eau, quoique perchées, sont surexploitées, d'où le tarissement des sources locales et la perte de la gratuité et le droit hérité, sur l'eau. Sur les piémonts environnants, comme le bassin de Tanecherfi, les terres autre fois irriguées tombent dans une jachère longue et les arbres fruitiers se dessèchent. Les terrasses autre fois irriguées, sont de plus en plus abandonnées au pâturage, d'où leur dégradation.

Devant la rareté de l'eau et le rétrécissement des espaces irrigués, les paysans se tournent vers deux activités basées sur la gratuité de la ressource exploitable, à savoir le surpâturage et les prélèvements du bois et divers menus produits forestiers, particulièrement ceux à essence pharmaceutique. Ainsi, on dénombre actuellement trois coopératives d'exploitation du romarin, qui se partagent la montagne. Comme la forêt est domaniale, une fois la période de la collecte des essences est ouverte, nous assistons à une ruée de personnes venant de tous les coins (hommes, femmes et enfants) équipés de faucilles et des tentes pour y camper.

Au départ, le romarin était distillé sur place, permettant alors aux forestiers de contrôler les règles du prélèvement, mais devant le manque d'eau, actuellement, seules les feuilles desséchées et mises en sacs, en plein foret, qui sont acceptées par l'entrepreneur qui les transporte vers Casablanca pour la distillation. Après la fin de cueillette, en se déplaçant dans la montagne, on découvre dans les aires de ramassages et battage des branches desséchées, que les normes de la cueillette, dictées par les forestiers, n'ont pas été respectées, par tous. Coïncidant avec la succession des années sèches, sur une parcelle de l'ordre de 1000m², autour de 30% des touffes de romarin sont actuellement sans vie. Les touffes encore vivantes, sont excessivement rabougries par le surpâturage.

Devant la rareté des pluies, réduisant alors l'activité biologique dans les sols et la forte intensité de certains événements pluvieux, identifiés et mesurés sur le terrain, des ruissellements importants se produisent, provoquant des pertes en sols et en eau, ce qui accentue les effets des sécheresses par le dessèchement.

2- Etats des steppes dominées par J.Boukhouali.

On exploitant des photos d'avions de 1950, on constate que les milieux steppiques sont profondément transformés depuis lors. Par tout, les nappes alfatières et le jujubier n'ont pas résisté au défrichement et la mise en culture céréalière pluviale. Les bons rendements du départ, coïncidant avec quelques épisodes humides et des sols encore relativement riches en matière organique, encouragent le défrichement et l'acceptation volontaire de payer l'amande

verbalisée par les forestiers, ce qui leur donne droit à l'appropriation. L'Etat a mis aussi à la disposition des paysans un matériel lourd pour déraciner le jujubier et les croûtes calcaire, pour réaliser le désir de l'Etat qui veut emblaver plus de terres. Pour accompagner les paysans, des Projets de Mise en Valeur des terres Bour (PMVB), ont été lancés pour varier et améliorer les productions des zones pluviales. Des sites démonstratifs ont été identifiés et aménagés dans de divers milieux, mais les résultats promis n'ont pas été atteints. A titre d'exemple, le PMVB de Mestigmer a promis d'améliorer le rendement de l'orge de 6 à 25q/ha et le blé tendre de 7 à 30 q/ha. Actuellement, la plupart de ces terres pluviales sont totalement dénudées et abandonnées. Cependant, à l'inverse de cette stratégie d'améliorer les cultures pluviales, l'Etat a réorienté les projets vers l'amélioration des parcours pastoraux. En fait, il a été constaté que toutes les productions céréalières pluviales sont réinvesties dans le cheptel. Ainsi, une vague de plantation des arbustes fourragers, particulièrement, l'atriplex, se propage dans les steppes. Malheureusement, là encore le début a été encourageant, mais actuellement la situation est fort bien inquiétante.



Photo 1. Atriplex en équilibre, pâturée au départ Photo 2. Dessèchement total des arbustes

En navigant sur les photos satellitaires, on constate aisément l'échec de l'amélioration des parcours par ces arbustes fourragers. En effet, il semble évident d'incriminer la succession des années sèches pour expliquer la mort des arbustes, particulièrement là où les sols sont maigres ne permettant pas l'infiltration et l'emmagasinement de l'eau. Cependant, il ne faut pas écarter le manque d'entretien de ces parcours par les propriétaires. En fait d'après les entretiens effectués, nous apprenons que depuis le départ de l'entrepreneur, la taille des arbustes, et l'entretien des banquettes, n'ont pas été effectués. Ainsi, le surpâturage a accentué le tassement du sol et le rabougrissement des arbustes. Dans les champs labourés, plusieurs paysans ont déraciné ces arbustes car, d'après eux, ils constituent un refuge pour les moineaux qui y nichent et détruisent alors les récoltes. Il semble donc que la fragilité naturelle et l'action anthropiques se complètent pour fragiliser à termes les états de surface et accentuer la redynamisation des processus hydro-éoliens dans ces vulnérables milieux, mais sans pour autant arriver à distinguer entre les facteurs disposants, les facteurs déclenchants et ceux qui aggravent la dégradation des ressources naturelles. Il est donc nécessaire, après les observations faites sur le terrain, de s'approcher de la réalité par des mesures directes sur le terrain.

III- Etats de surface et degré de l'érosion des terres :

Trois types de mesures ont été menés dans ce milieu, à savoir des mesures sur pluie naturelle à l'échelle des parcelles de 100m² ; la simulation des pluies et la technique du Césium137.

1) Rappel de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant de l'Oued Za

On se basant sur les mesures effectuées à l'échelle de la station hydrologique de Taourirt, entre 1958 et 1990, on constate que les débits moyens annuels ont varié entre 1 et 9,9m³/S. Par contre, le débit max instantané a atteint 959m³/S, lors de la forte crue de 1972. Pour la perte en sol, la turbidité moyenne annuelle a atteint 8,6g/litre, et la charge extrême instantanée a atteint 114g de sédiments/litre.

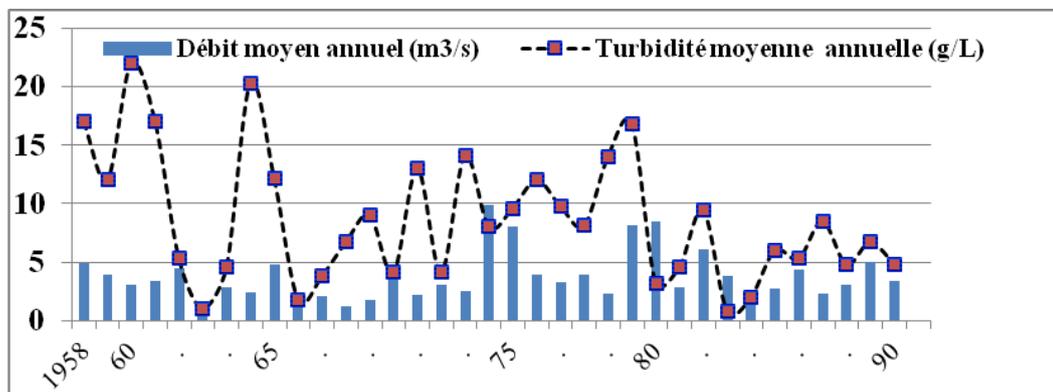


Fig.1 : Rapport et confrontation entre les débits, annuels, liquides et solides.

Il ressort clairement dans la Fig. 1, l'absence totale de bonne corrélation, entre le volume d'eau écoulé et les sédiments qui ont franchi le seuil de la station hydrologique. En fait, tenant compte de la taille du bassin versant et la longueur des cours d'eau, il est fort possible que le volume arraché par un événement pluvieux n'arrive pas forcément, le même jour, à la station de jaugeage. De même, de faibles événements pluvieux, peuvent drainer vers la station l'héritage des anciennes crues.

Par contre, à l'échelle des saisons, l'automne reste la plus productrice de sédiments et des crues. En effet, 28% des crues, entre 1958-1990, ont été produites en septembre, suivi par octobre avec 19% des cas. 41% des turbidités max, ont été observées en mois de novembre, suivi par le mois d'octobre avec 20,8% des cas extrêmes.

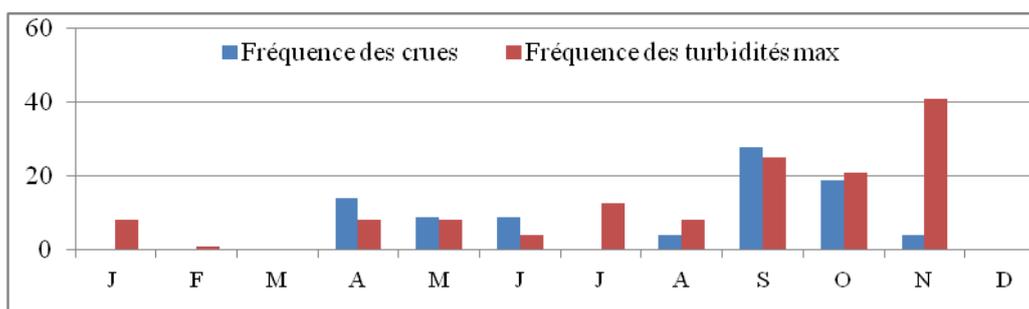


Fig. 2 : Fréquences saisonnières des crues et des turbidités max, à l'échelle du BV de l'Oued Za (1958-1990).

Il semble que ce qu'il faut retenir pour notre problématique, ce sont les résultats enregistrés au niveau du mois de novembre. Pourquoi la forte turbidité (41%), alors que la fréquence des crues importantes n'est que de 4% ? il nous semble que c'est la période du labour des cultures céréalières, dans les terres défrichées et mises en culture. Ainsi, quelque soit le volume

pluviométrique et son intensité, les labours frais ne peuvent résister. Il s'agit donc de l'évolution des états de surface qui peut expliquer la redynamisation hydro-éolienne dans la région.

3- Les apports des mesures sur pluies simulées.

Dans le cadre d'un projet de recherche (Protars P2T2), nous avons mené une série de mesure dans la steppe de Moulouya, en comparant les réponses hydrologiques et les pertes en sol, en relation avec les états de surface. Nous avons mené ce travail avec un mini-simulateur "Cerdea ». L'arrosage est basé sur un gicleur qui détermine l'intensité de chute d'eau à partir d'une hauteur d'un mètre. L'intensité est réglable en fonction de la pression administrée à travers un nanomètre. La simulation de pluie peut être utilisée pour des buts multiples. Notre objectif, c'est de comparer entre les réponses du même sol, sous la même intensité pluviale avec des états de surface différents.

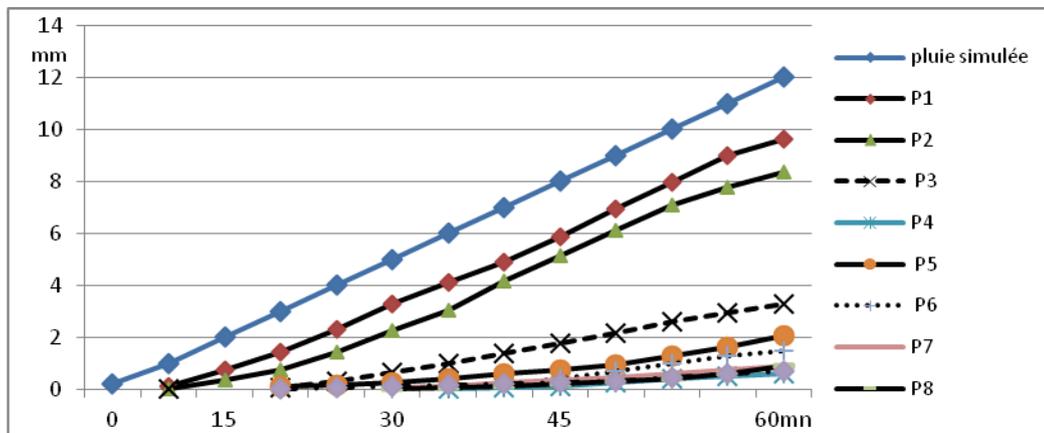


Fig. Réponses hydrologiques, selon les états des micros parcelles de 0,24m².

P1 : parcours dégradé ; P2 : Labour ancien ; P3 : touffe de hamda scoparia ; P4 : sol à cailloux ; P5 : touffe d'armoise ; P6 : sol fissuré ; P7 : touffe d'alfa ; P8 : parcours d'alfa en équilibre ; P9 : sol gypseux ; P10 : sol épais,

En injectant un volume d'eau sur nos parcelles, nous arrivons à déduire le volume ruisselé et les pertes en sol, dans chaque forme d'occupation des terres. Sans pouvoir y présenter en détail ces résultats, il faut juste retenir que les terres labourées et laissées en jachères longues et les parcours dégradés produisent plus de ruissellements. Par contre, les simulations faites sur des touffes végétales et sur des sols équilibrés, le coefficient de ruissellement et la dégradation spécifique des sols, sont les plus faibles. Avec un TDR, nous déterminons la vitesse d'humectation, de saturation d'un profil pédologique et son seuil de déclenchement du ruissellement. Ainsi, les formes d'occupation et d'utilisation, prometteuses des terres, peuvent être alors identifiées et sélectionnées.

4- Les mesures sous pluie naturelle.

Après 5 ans de mesures sur 12 parcelles de 100m², type Wischmeier, (Chaker M., 2010), nous retenons que la méthode est longue mais elle nous permet de connaître les événements pluviométriques agressifs et leur répartition saisonnière. En effet, les mesures par les 2 pluviographes installés, l'un en montagne et l'autre en plaine, nous constatons que seulement 20% des événements pluvieux qui produisent un ruissellement important. Selon les états de surface, les pertes en sol ont varié entre 13 à 330g/m²/an dans la montagne de Boukhouali et de

19 et 203g/m²/an, dans la steppe. Globalement la perte d'un mm de sol ne demande que 6ans dans la montagne et 90 à 256 ans, selon les sites, dans la steppe.

5- L'apport des mesures par Cs¹³⁷.

Comme le Cs¹³⁷ peut durer dans un sol entre 35 à 40 ans, nous avons alors pu estimer les pertes en sol durant les dernières décennies, comme suite. Dans la montagne les pertes ont varié entre 13 à 330 g/m²/an et entre 9 et 325g/m²/an dans le bassin de Tanacherfi ; dans la steppe les valeurs passent de 19 à 203g/m²/an.

En confrontant les pertes en sol mesurées sur les parcelles expérimentales (100m²), durant 5 ans, dans la steppe et les valeurs calculées par la méthode du Cs¹³⁷, nous estimons que 60% des pertes en sol dans la steppe, reviennent à l'érosion éolienne.

Bibliographie :

- Ballais J.L, Mare A. et Rognon P., 1979. Période aride du quaternaire récent et déplacement des sables éoliens dans les Zibans (Algérie). Rev.Géol. Dyn. Géogr.Phys., Vol.21, pp.97-108.
- Chaker M. 1997. Processus de dégradation des terres et désertification dans les pays d'El Aioun- Tanecherfi, Maroc Oriental ; Méditerranée, N° 1-2, pp. 5-14
- Chaker.M. 2010. Dynamique des ressources naturelles et risque de désertification (cas du massif de Boukhouali et ses bordures steppiques). Univ MedV. Série : thèses et mémoires, n°60. (En arabe).
- Sbai A et Mouadili, O. 2023. Apport du GPS dans l'étude de la dynamique des dunes : exemple au Maroc Oriental. Physio-Géo. Vol. 19/2023.

ASPECTS GÉOMORPHOLOGIQUES POUR L'ÉLABORATION D'UNE CARTE DES RISQUES D'INONDATIONS À PETITE ÉCHELLE LE LONG DE L'OUED LARBAÂ, VILLE DE TAZA, MAROC

Badr LAYAN, Mahmoud ZEMZAMI et Brahim BOUGDIRA

Université Sidi Mohamed Ben Abdallah, Laboratoire de Géodynamique et Ressources Naturelles, Fès, layan.floods@gmail.com

RÉSUMÉ : La ville de Taza a connu plusieurs inondations, avec les plus puissantes ayant eu lieu en 1970, 2000 et 2010. L'étude s'est intéressée à la cartographie de la plaine alluviale de l'Oued Larbaâ en utilisant la méthode hydrogéomorphologique. Cette méthode a combiné les informations déduites des photos aériennes, des images satellitaires et des rapports oculaires, afin d'établir une carte des risques d'inondations. Ces données ont été complétées et vérifiées par des investigations sur le terrain, en employant les critères morpho-sédimentaires. Cependant, la méthode a permis de découper la plaine alluviale en trois lits, appelés lit mineur, lit moyen et lit majeur, présentant des surfaces subhorizontales légèrement inclinées de l'amont vers l'aval. Ces lits sont séparés par des talus de différentes pentes et hauteurs et organisés selon une hiérarchie des catégories du risque d'inondations : élevé, modéré et faible. La carte élaborée ne prétend pas représenter spécifiquement une inondation future, mais plutôt décrire les zones qui ont été historiquement inondées. De même, la limite extérieure de la plaine d'inondation a été en conformité avec les observations des crues passées. Les résultats obtenus correspondent énormément aux autres déduits de la méthode géomorphologique intégrée. Les observations sur le terrain ont montré leur efficacité dans la cartographie des risques d'inondations. La précision des résultats suggère l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique dans la délimitation des zones à risque d'inondation.

Mots-clés: Méthode hydrogéomorphologique, carte des risques d'inondations, Oued Larbaâ, Ville de Taza.

GEOMORPHOLOGICAL ASPECTS TO ELABORATE A SMALL-SCALE FLOOD RISK MAP ALONG THE LARBAÂ WADI, TAZA CITY, MOROCCO

ABSTRACT: The city of Taza has experienced multiple flood incidents, with the most impactful ones occurring in the years 1970, 2000, and 2010. This study focused on mapping the floodplain of the Larbaâ River using the hydrogeomorphological method. In order to establish flood risk maps, this method combined insights from aerial photos, satellite images, and eyewitness reports. These available data were supplemented and verified through field investigations based on the morpho-sedimentary criteria. However, the method allowed for dividing the alluvial plain into three beds, called minor beds, middle beds, and major beds. These riverbeds present subhorizontal surfaces that are slightly inclined downstream. Banks of various slopes and heights separate the beds. They are arranged in three risk categories for flood events: high, moderate, and low. However, the elaborated map does not claim to specifically represent a future flood but rather describes areas that have been historically flooded. Similarly, the outer limit of the floodplain was in accordance with the floods' observations. The results match others deduced from the integrated geomorphologic method. The field surveys have demonstrated their effectiveness in mapping flood risks along the studied section of the river. The accuracy of the results suggests the use of the hydrogeomorphological method in delineating flood-risk areas.

Keywords: Hydrogeomorphological method, flood risk map, Larbaâ river, Taza City.

1. INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, le risque d'inondation a augmenté de manière significative de 23 %, principalement en raison du changement climatique et de l'utilisation non contrôlée des terres (CRED, 2021). La ville de Taza a également connu des inondations dévastatrices, causées par le débordement de plusieurs Oueds traversant la zone urbaine. Ces inondations ont entraîné la perte de vies humaines et d'importants dommages économiques (Layan, 2014).

Afin de limiter les effets catastrophiques des inondations, une mesure efficace consiste à utiliser des cartes des risques d'inondation en tant que documents officiels pour les lois et réglementations en matière de planification (Montz et Grunfest, 2002). Ces cartes peuvent être créées en utilisant diverses méthodes. Dans la ville de Taza, le problème d'inondation a déjà été traité par plusieurs méthodes d'étude. Parmi ces méthodes, la méthode hydraulique a été adoptée par l'AUT en 2015 pour déterminer la propagation des crues de différentes fréquences. Une autre dite «méthode géomorphologique intégrée» a été utilisée pour cartographier les zones inondables (Taous et al., 1010). Dans cette étude, nous avons employé l'approche hydrogéomorphologique (Ballais et al., 2005, 2011) afin d'identifier les différentes unités de la plaine alluviale de l'Oued Larbaâ. En utilisant les aspects géomorphologiques, l'étude consiste à élaborer la carte du risque d'inondation à Taza.

1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'Oued Larbaâ s'étend sur une superficie de 780 km² et fait partie de l'amont du bassin versant de l'Oued Sebou (figure 1). Il est inclus dans la division administrative de la province de Taza et comprend d'importants réseaux routiers reliant les centres urbains et ruraux situés près de la ville de Taza. La région a un climat semi-aride, avec des précipitations souvent agressives sous forme d'averses de courte durée.

Le bassin versant s'est développé dans deux contextes géologiques distincts. Au nord, le bassin versant s'étend sur les collines du pré-rif oriental, où la lithologie est caractérisée par la prédominance de formations tendres, principalement des marnes et des marno-calcaires du Crétacé et de la fin du Tertiaire (Carte géologique du Rif, 1980). Ces formations ont donné lieu à un paysage topographique dominé par des collines qui sont définies par l'érosion des terrains non protégés. Ces collines se présentent sous forme d'une succession de Koudias avec des altitudes atteignant environ 600 m (Layan, 2014). En revanche, au sud, le bassin versant s'étend partiellement sur le Moyen Atlas oriental composé de calcaires et de dolomies riches en ammonites. Ces affleurements lithologiques sont durs et perméables, limitant l'érosion hydrique et donnant lieu à la formation d'un terrain encaissé avec une altitude maximale dépassant 1400 m dans la commune de Bab Boudir. Le terrain du bassin versant est principalement dénudé, à l'exception de sa partie sud où prédomine une végétation pérenne couvrant des surfaces limitées.

La zone d'étude couvre la section aval de l'Oued Larbaâ où le cours d'eau traverse le nord de la zone urbaine (figure 1). Tout au long de ce tronçon, la plaine inondable subit diverses interventions perturbant l'écoulement lors des crues. Ces interventions négligent souvent les caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques en amont du bassin versant. Elles sont souvent ignorées dans la planification et la gestion stratégique des risques. Par conséquent, de nombreux facteurs anthropiques influencent d'abord le comportement de l'Oued, puis l'ampleur des risques d'inondation.

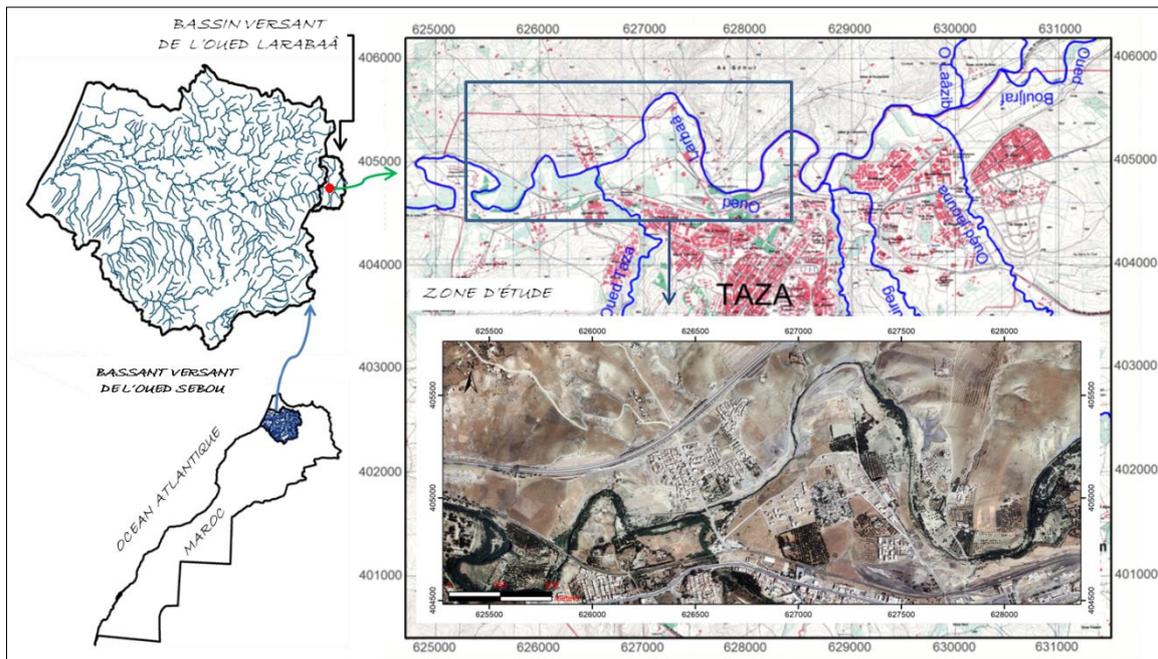


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour l'application de l'approche hydrogéomorphologique, nous avons utilisé quatre étapes complémentaires. En combinant les informations tirées des investigations sur le terrain, des photos aériennes, des images satellites et des rapports oculaires, nous avons pu cartographier les zones sujettes aux inondations. Ainsi, l'étude a débuté par une analyse approfondie des photos aériennes datant de 1982 afin d'identifier les différentes unités morphologiques résultant de la dynamique fluviale.

L'image satellite utilisée a été obtenue à partir de Google Earth et représente l'année 2023. Cette image nous a fourni des informations récentes reflétant l'état actuel du terrain. Grâce à cela, nous avons pu déterminer les différentes unités morphologiques de la plaine d'inondation.

Les données recueillies de l'analyse des images satellites et des photos aériennes, ont permis de dresser une première image du risque d'inondation à Taza. Ces informations ont été utilisées pour élaborer une carte plus détaillée des zones susceptibles d'être affectées par les crues. De plus, en examinant les archives et en recueillant des témoignages oculaires, nous avons pu retracer l'historique des inondations passées et comprendre leur impact sur la région.

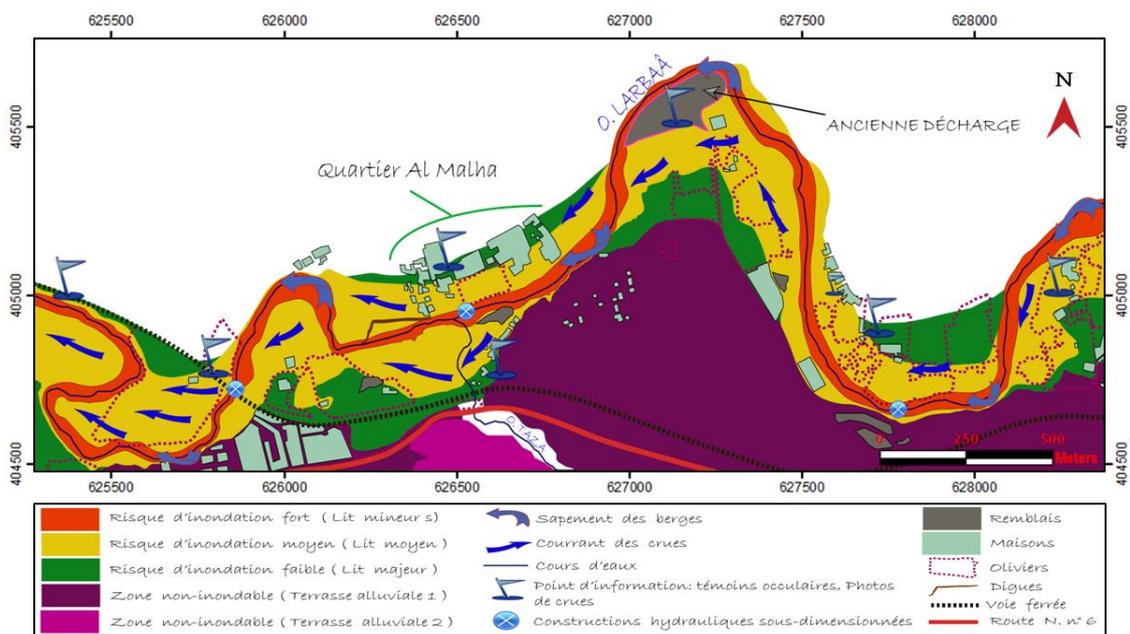
Les investigations sur le terrain ont été réalisées afin de compléter, vérifier et valider les informations recueillies précédemment. L'objectif était d'identifier les caractéristiques granulométriques et morphologiques qui témoignent de la dynamique fluviale. Pour cela, le critère sédimentaire a été utilisé pour distinguer les différents lits de l'Oued en prenant en compte la granulométrie des alluvions. Parallèlement, le critère morphologique a été adopté en implantant des profils transversaux soigneusement sélectionnés le long de l'Oued. Pour cartographier la plaine alluviale, nous avons utilisé le plan d'aménagement urbain de Taza à l'échelle 1/10 000. Ainsi, nous avons commencé par délimiter les limites du chenal principal de l'Oued Larbaâ. Ensuite, nous avons tracé les lignes délimitant les lits de l'Oued, et enfin les bords extérieurs des terrasses fluviales.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les investigations approfondies sur le terrain nous ont permis de diviser la plaine inondable de l'Oued Larbaâ en trois lits distincts (lit mineur, lit moyen et lit majeur). Ces lits ont été hiérarchisés en fonction des catégories de risque d'inondation, à savoir élevé, modéré et faible (figure 2). Ils présentent une orientation subhorizontale avec une légère inclinaison de l'amont vers l'aval. Les lits sont généralement juxtaposés et séparés par des talus, souvent de faible hauteur.

La carte de risque d'inondation que nous avons élaborée représente les limites des crues, allant de la crue non débordante à la crue exceptionnelle. Il est toutefois important de souligner que cette carte ne prétend pas représenter spécifiquement une inondation future, mais plutôt décrire les zones historiquement inondées.

Ces résultats peuvent servir de guide précieux pour les décideurs de la municipalité de la ville de Taza afin de prendre des mesures concrètes visant à protéger les zones à risque d'inondations. Les résultats pourraient être utilisés par le département des travaux publics de la ville pour lutter contre les événements des crues. La qualité et la précision des résultats suggèrent que, malgré le développement d'autres approches d'étude des crues, la méthode hydrogéomorphologique reste un outil puissant pour cartographier les risques d'inondation de manière précise.



COMPARAISON DES CARTES DE DIFFÉRENTES MÉTHODES

Dans notre comparaison, nous avons constaté que la carte déduite du modèle numérique diffère de celle que nous avons créée en termes d'aspects géomorphologiques. Bien qu'il existe des sections où les zones à risque d'inondation soient similaires, il y a également des tronçons de l'Oued Larbaâ où les surfaces sujettes aux débordements sont absolument différentes. Par exemple, un replat qui a été classé comme terrasse fluviale et donc considéré comme non inondable est partiellement inondé selon la simulation hydrologique-hydraulique (figures 2 et 3). Cependant, il est important de noter que cela ne signifie pas que l'outil de modélisation est incapable de cartographier avec précision le risque d'inondation. Au contraire, le modèle hydraulique est essentiel pour prédire la dynamique des inondations. La différence

observée peut être liée à des problèmes de calage ou de drapage du modèle sur l'image satellitaire ou la carte topographique utilisée. Il est en effet encouragé d'utiliser les approches numériques dans les zones où la plaine alluviale naturelle est perturbée par des installations humaines, comme le cas de la rive droite de l'Oued Larbaâ au niveau du quartier Al Malha (figure 2).

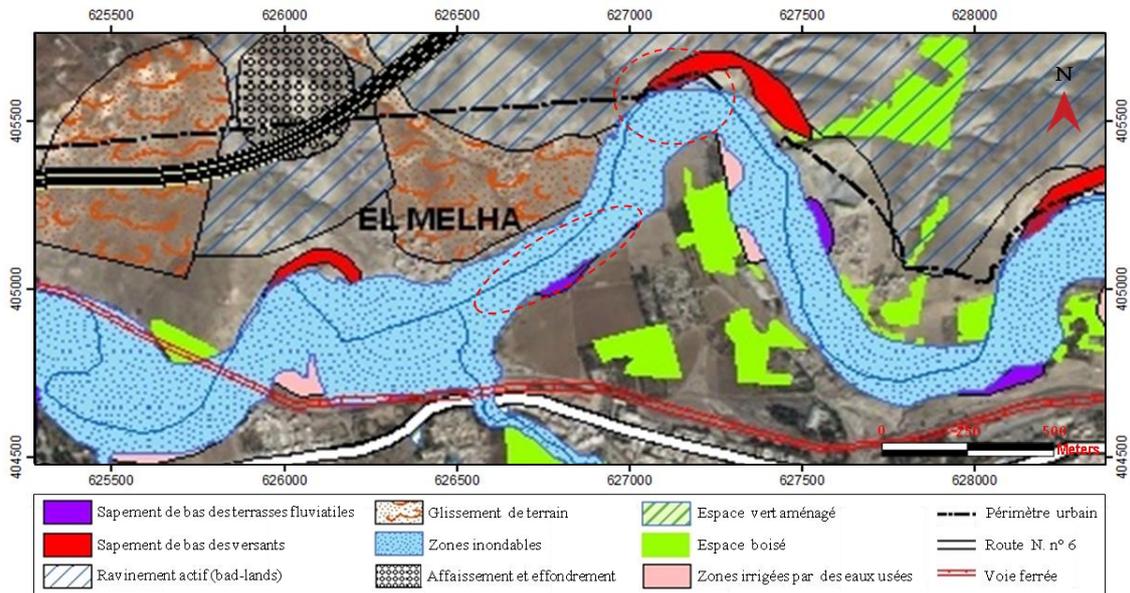


Figure 3. Carte des zones inondables effectuée à l'aide du modèle numérique (AUT, 2015)

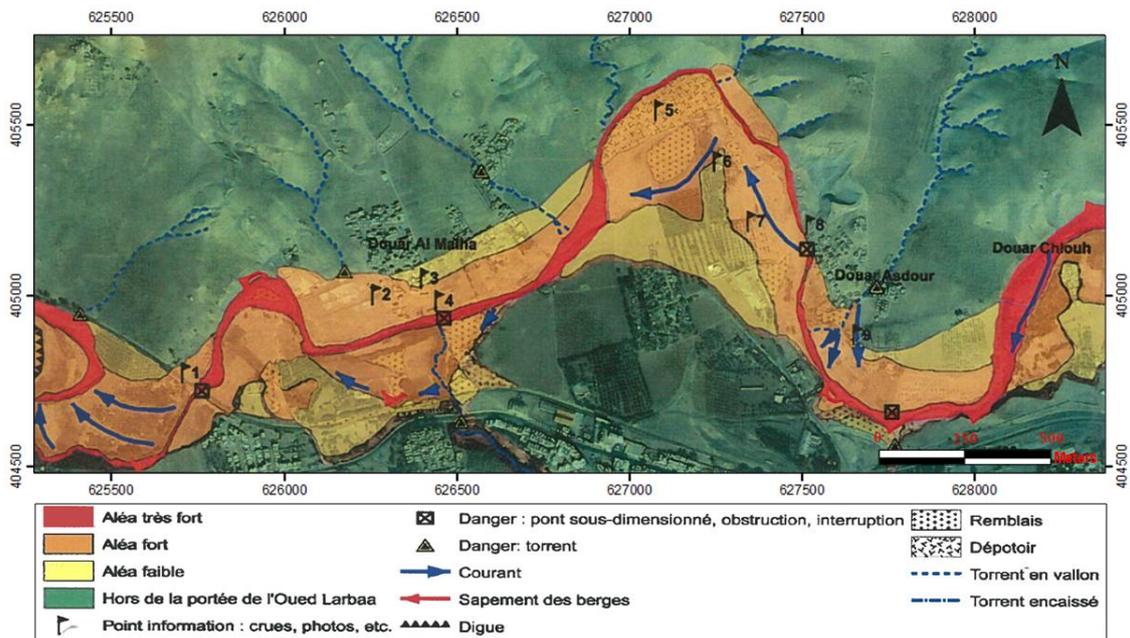


Figure 4. Zonage de l'aléa d'inondation par l'application de la méthode géomorphologique intégrée (Taous et al., 2010)

En revanche, les résultats de la méthode hydrogéomorphologique et de la méthode géomorphologique intégrée montrent des similitudes le long de la plaine alluviale et les terrains inondables sont presque identiques (figures 2 et 4). Les deux méthodes se sont basées sur des paramètres géomorphologiques pour cartographier le risque d'inondation et étaient prévues pour avoir des résultats similaires. Cependant, notre carte apporte des mises à jour par rapport à la carte géomorphologique intégrée, notamment en cartographiant de nouvelles installations

humaines placées en plaine d'inondation et sur des terrasses fluviales. De plus, notre carte met en évidence l'importance des remblais au-dessus de la décharge publique. Suite au déplacement de la décharge vers un autre site, d'énormes quantités de remblais ont été déposées et compactées dans le lit mineur (figure 2). Cette intervention a significativement modifié la morphologie naturelle de la plaine alluviale, perturbant la dynamique fluviale et aggravant ainsi le risque d'inondation, notamment lors des hautes eaux.

CONCLUSION

Bien que la carte élaborée soit de haute qualité, il est important de reconnaître que la méthode hydrogéomorphologique a des limites, notamment dans les zones fortement urbanisées. L'occupation des zones d'expansion des crues a entraîné des modifications le long de l'Oued Larbaâ. Par conséquent, la largeur des sections qui étaient autrefois submersibles peut être modifiée, entraînant des débordements des eaux dans des zones considérées comme non inondables selon les investigations sur le terrain. Il est donc crucial de tenir compte de ces changements anthropiques lors de l'élaboration des cartes de risques d'inondations. En incluant les installations humaines, il devient possible de prendre en compte les éléments perturbateurs de la fonction hydrologique de l'Oued. Cependant, la fusion des unités géomorphologiques et des modèles hydrauliques peut renforcer la précision de la carte du risque d'inondations.

Références bibliographiques

- AUT. (2015). Agence urbaine de Taza. *Schéma directeur d'aménagement de la ville de Taza et sa zone périphérique*. Ministère de l'Urbanisme et de l'aménagement de territoire, pp 170.
- CRED -Center for Research on the Epidemiology of Disaster. (2021).
- BALLAIS J L., CHAVE S., DUPONT N., MASSON É., JOSEE PENVEN M. (2011). *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Physio-Géo, 173 p., 2011, Collection Ouvrages, .4000/physio-geo.3307 . .
- BALLAIS J L., Garry G., and MASSON É. (2005). *Contribution de l'Hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation: le cas du Midi méditerranéen français*, Comptes Rendus Géoscience, 337, 1120–1130.
- MONTZ B E., GRUNTFEST E. (2002). *Flash-flood mitigation: recommendations for research and applications*, Environmental Hazards, 4, 15–22.
- LAYAN B. (2014). *Détermination Des Crues De Projet, Modélisation Hydraulique Et Gestion Du Risque D'inondation Dans Le Bassin Versant De L'oued Larbaâ, Cas De La Ville De Taza (Maroc)*, Thèse De Doctorat. Université Sidi Mohamed Ben Abdallah Fès.
- TAOUS A., OBDA KH., AMYAY M., LAAOUANE M., TRIBAK A., AKDIM B., MARQUES M A., FURDADA G., ET JULIA R. (2010). *Cartographie et zonage de l'aléa d'inondation à Taza, Maroc. Application de la méthode géomorphologique intégrée*. Géomagreb 2010 n 6, pp. 1-19.

DYNAMIQUE DES PAYSAGES GEOMORPHOLOGIQUES DES VERSANTS MARNEUX ET SOUS COUVERT FORESTIER DANS LA BASSE VALLEE DE L'OUED TAMRI (HAUT ATLAS ATLANTIQUE -MOROC)

IRIFI Hicham^{1*} et TRIBAK Abdellatif^{1*}

Laboratoire MNADSS, FLSH-Saïs. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah-Fès.

[*Hicham.irifi@usmba.ac.ma](mailto:Hicham.irifi@usmba.ac.ma) / abdellatif.tribak@usmba.ac.ma

RESUME :

Les paysages des versants marneux de la basse vallée de l'Oued Tamri constituent le fruit de l'interaction de nombreux facteurs et éléments paysagers d'ordre biotiques, abiotiques et anthropiques. Les caractéristiques dynamiques de ces éléments s'entremêlent pour donner naissance à des paysages de versants caractéristiques souvent des zones semi-arides en termes des formes d'érosion dégagées, de leur configuration et de leur anthropisation. La friabilité des formations marneuses hauteriviennes, constitue un facteur important qui explique l'intensité des processus morphogéniques sur les versants, créant de ce fait de spectaculaires ravinements tronquant le substrat. L'étude paysagère de ces versants marneux mouvementés de la basse vallée de l'Oued Tamri, constitue une approche pertinente pour la compréhension de leur fonctionnement et de leur dynamique d'évolution pouvant constituer un moyen de diagnostiquer la morphodynamique des versants et le risque de l'érosion hydrique dans la région. L'approche adoptée se base sur une analyse des topo-séquences par la réalisation de 10 placettes de relevés de paysage sur des versants marneux de différentes expositions. Par ailleurs, pour la modélisation de l'évolution du ravinement sur ces versants, nous avons procédé à l'analyse hydrologique et statistiques ainsi que des MNE multitudes au niveau du sous bassin versant de l'Ighzer Ougadir dans la basse vallée de l'Oued Tamri.

Mots-clés : Paysage de versant, Dynamique paysagère, Risque géomorphologique, Anthropisation, Basse vallée de l'oued Tamri.

GEOMORPHOLOGICAL LANDSCAPE DYNAMICS OF MARLY SLOPES UNDER FOREST COVER IN THE LOWER VALLEY OF WADI TAMRI (HIGH ATLAS - MOROCCO)

ABSTRACT: The marly slopes landscapes of the lower valley of wadi Tamri are the result of the interaction of numerous biotic, abiotic, and anthropogenic factors and landscape elements. The dynamic characteristics of these elements intermingle to give rise to slope landscapes that are often characteristic of semi-arid zones in terms of the forms of erosion exposed, their configuration, and their anthropization. The friability of the Hauterivian marl formations is an essential factor in the intensity of morphogenic processes on the slopes that create a spectacular gullies cutting through the substrate. The landscape study of these marly slopes in the lower valley of wadi Tamri is a relevant approach to understanding their functioning and evolutionary dynamics. It could be a tool for diagnosing the morphodynamics of the slopes and the risk of water erosion in the region. Thus, a toposequence analysis was adopted by carrying out 10 landscape survey plots on marly slopes with different exposures. Then, in order to model the evolution of gullying on these slopes, we carried out hydrological and statistical analyses as well as multivariate DEMs for the Ighzer Ougadir sub-catchment in the lower valley of the Wadi Tamri.

Keywords: Slope landscape, Landscape dynamics, Geomorphological risk, Anthropization, Lower valley of Wadi Tamri.

INTRODUCTION

La basse vallée de l'Oued Tamri se caractérise par un paysage de versants très dynamiques et en perpétuelle évolution. La friabilité de ses formations marneuses hauteriviennes, est le facteur clé qui explique l'intensité du travail morphogénique sur les versants qui s'extériorisent par de spectaculaires formes d'érosion, d'ablation et d'accumulation en mi- ou en bas de versant sous forme de colluvions.

La dynamique érosive actuelle, a mis en évidence la conjonction du travail entre les conditions naturelles et les interventions anthropiques. De ce fait, les processus de la dynamique du paysage des versants mouvementés commencent par des formes élémentaires et basiques, et se développent pour donner des paysages de ravinements généralisés. L'étude paysagère de ces versants marneux mouvementés, est une approche pertinente pour la compréhension de leur fonctionnement et de leur dynamique d'évolution, pouvant constituer un moyen de diagnostiquer le risque de l'érosion hydrique dans la région.

1. Description de la zone d'étude

Le sous bassin versant d'Ighzer Ougadir, de forme semi-circulaire et de direction N-S se situe dans la basse vallée de l'Oued Tamri (fig. 1). Il occupe une superficie de de 9.25 km² taillée essentiellement dans le substratum crétacé et sa couverture moghrébienne. Le cours d'eau actuel, à chenal unique, adopte un tracé peu sinueux et recoupe un important remblaiement alluvial holocène (El Ouahidi, 2015). Le climat est de type méditerranéen, avec des précipitations moyennes de l'ordre de 300 mm/an à Tamri réparties entre les mois de novembre et Mars. Les caractéristiques climatiques et bioclimatiques se répercutent sur la composante végétale du paysage (Arganier et son cortège) qui protège faiblement les versants marneux. Sur le plan topographique, ces versants dessinent une déclivité assez importante qui varient énormément d'une section à l'autre. Ils présentent, généralement, l'allure des plateaux de talus convexo-concaves, concaves et convexes à faible pente.

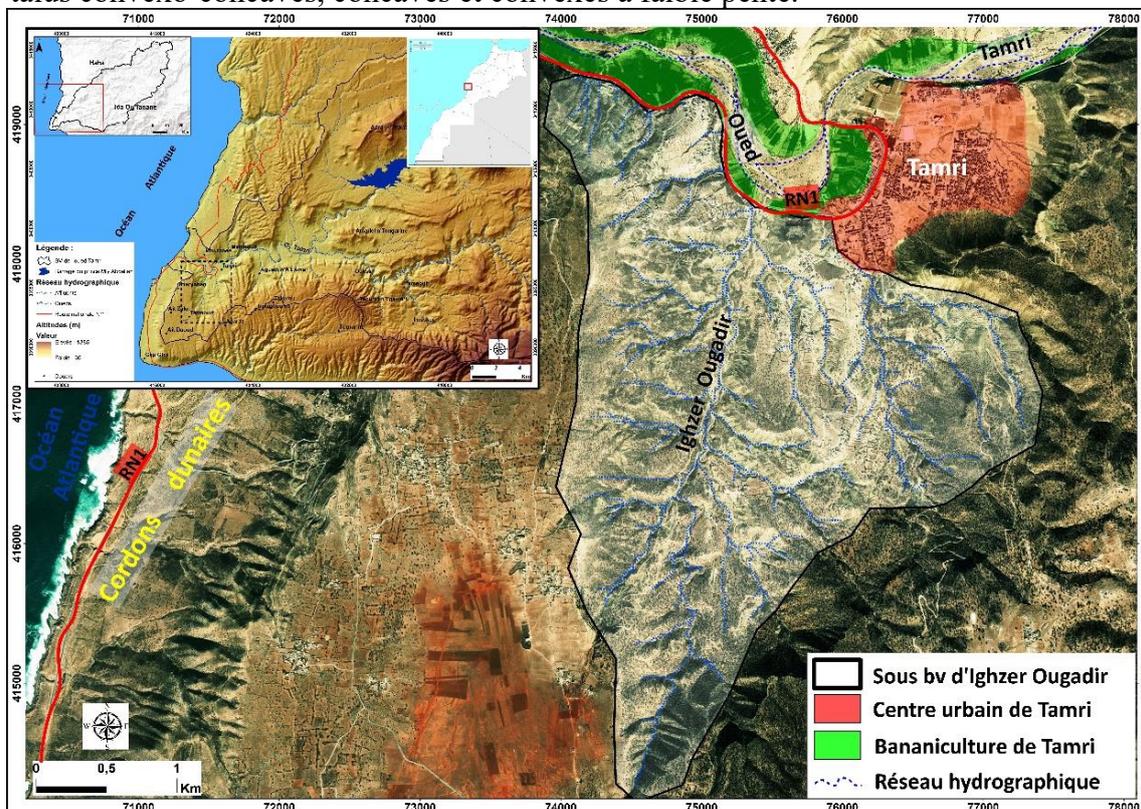


Figure 1. Localisation du sous bassin versant de l'Ighzer Ougadir

Les processus de ravinement favorisent des drains de différentes tailles sur les versants marneux friables. Ils permettent de vider le sous bassin de son matériel sédimentaire et créent par endroit des aires de remblaiement et des zones d'ablation. A l'amont, ce remblaiement est dominé par un système de cônes-terrasses soltaniennes, mais à la confluence de l'Ighzer Ougadir avec l'oued Tamri, le remplissage holocène s'appuie sur des versants marneux, ayant des pentes fortes (El Ouahidi, 2015).

Ces versants ont une fonctionnalité agro-sylvo-pastorale, présentant des structures forestières diversifiées en fonction des conditions topographiques. Sur les basses et les moyennes altitudes (10-100m d'altitude) sur substrat géologique marneux, ces structures se caractérisent souvent par une densité faible du couvert végétal et des aménagements (routes, sentiers et des terrains agricoles). Les paysages restent généralement marqués par une forte dégradation dus principalement à la régression du couvert forestier, ayant pour corolaire une forte activité érosive.

3. MATERIEL ET METHODES

L'étude des paysages naturels de la basse vallée de l'Oued Tamri, en tant que système paysager complexe, doit se baser principalement sur une compréhension de leurs composantes, de leurs structures ainsi que de leur fonctionnement (Irifi, et al. 2020. 2021). La présente étude a pour objectif la caractérisation des paysages de versants mouvementés et l'étude de leur dynamique d'évolution, via un essai d'application de l'approche paysagère. Elle a également pour but d'analyser les différents processus morphogéniques qui nous permettent de créer une typologie de versants en fonction des formes d'érosion. Ainsi, nous avons adopté une analyse des topo-séquences par la réalisation de 10 placettes de relevés de paysages sur des versants marneux de différentes expositions. Dans chaque placette, identifiée avec des coordonnées x et y à l'aide de l'application *MAPinr*, des informations sur les formes d'érosion et leurs processus d'évolution sur les trois sections ont été retenus. Par ailleurs, pour la modélisation de l'évolution du ravinement sur ces versants, nous avons procédé à l'analyse hydrologique et statistiques de deux modèles Numériques d'Élévation (MNE), respectivement de 2007 et 2014 avec une résolution spatiale de 30 m/pixel à l'échelle du sous bassin de l'Ighzer Ougadir.

Le réseau hydrographique est extrait en utilisant les systèmes d'informations géographiques, où les données sont vectorisées, analysées sous ArcGIS (V 10.4) pour chacune des deux dates. Les cours d'eau sont arrangés selon la classification de **Strahler** (1952). Les paramètres recherchés pour l'évaluation de la dynamique du ravinement sont la longueur et le nombre de ravins, la densité du ravinement et le rapport de confluence (Menjli, et al (2006)). Par ailleurs, nous avons pu calculer la densité de drainage, le rapport de longueur et le rapport de torrentialité (fig. 2).

Densité hydrographique : $[D_h (km^{-2}) = \sum N_i / A]$

N_i : Nombre total des drains d'écoulement n_i , A : Surface en km^2 .

Rapport de confluence (bifurcation) : $[Rc = N_n / N_{n+1}]$

N_n : nombre des cours d'eau d'ordre n , N_{n+1} : nombre des cours d'eau d'ordre suivant.

Densité de drainage : $[D_d (km/km^2) = \sum L_i / A]$

L_i : Longueur total des éléments du réseau hydrographique, A : surface en km^2 .

Rapport de longueur : $[R_L = L_{n+1} / L_n]$

L_{n+1} : Longueur total des cours d'eau d'ordre $n+1$ en km, L_n : Longueur total des cours d'eau d'ordre n en km

Rapport de torrentialité (Fréquence) : $[Ct = D_d * N_1 / A]$

D_d : Densité de drainage, N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre « 1 », A : Surface en km^2 .

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse séquentielle des paramètres naturels et anthropiques agissant sur la répartition spatiale des processus érosifs au sein du sous-bassin nous a permis de définir un certain nombre de versants qui se juxtaposent mais, qui se différencient quant à leurs traits physiques et leur évolution morphodynamique. Ainsi, en fonction de la nature des processus érosifs, de leur intensité et de leur répartition spatiale, les modelés de versants restent diversifiés depuis les aires peu couvertes et fortement ravinées jusqu'aux terrains stables assez couverts.

L'analyse des paysages nous a permis de distinguer divers types de configurations sur les versants escarpés ainsi que différentes toposéquences. Sur une superficie totale de plus de 920 ha, les versants stables ou faiblement érodés occupent 35% des terrains, réparties principalement au Sud-Est du sous bassin de l'Ighzer Ougadir. Ils sont suivis par des versants très affectés par le ravinement généralisé, d'une superficie de plus 230 ha (26%), puis des versants intensément ravinés qui présentent 23% de la superficie totale (214 ha). Les versants marneux moyennement affectés par le ravinement représentent seulement 17% de la surface totale, avec une superficie de 152 ha ; ils présentent un paysage forestier d'arganier assez dense. Il est important de noter que le couvert forestier dégradé occupe une superficie de 396 ha (44%) et correspond aux versants fortement affectés par le ravinement. Par ailleurs, le couvert forestier dense représente une superficie faible de 173 ha (19%) occupant surtout des parcelles forestières de la forêt d'Ain Tamaloukt dans la zone Sud du bassin (Figure 2).

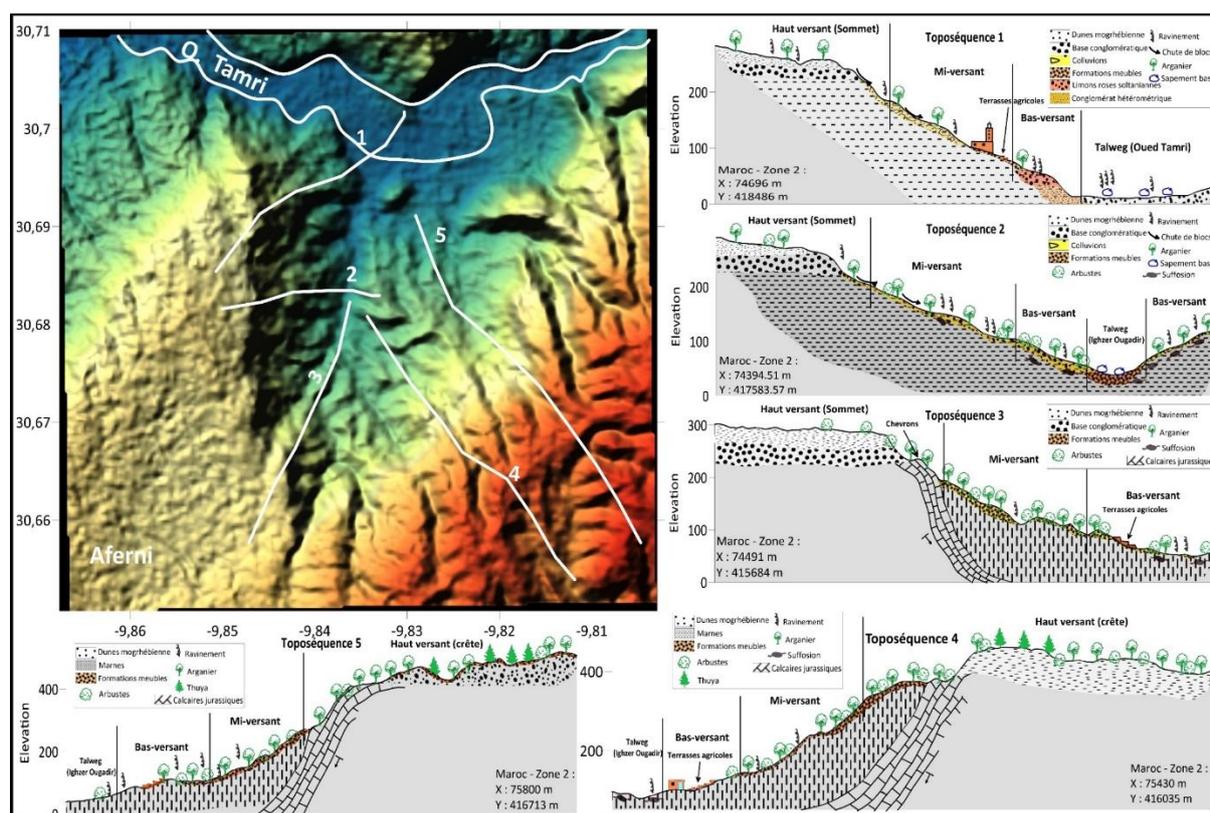


Fig. 2 : Profils paysagers et toposéquences des versants marneux du sous bassin versant de l'Ighzer Ougadir (Irifi, H. 2023).

Sur ces versants marneux dénudés, l'incision des versants se matérialise par de profondes entailles dont les dimensions varient d'un versant à l'autre en fonction de la diversité des conditions biophysiques et anthropiques (Tribak, 1998). Généralement, les modalités d'évolution de ces versants sont assurées par des processus de suffosion et ravinement élémentaire sur des formations superficielles moins épaisses et des pentes assez fortes. Les formes élémentaires du ravinement y caractérisent la plupart des terrains en pente. Leur

occurrence et leur évolution font intervenir de manière interactive la nature des événements pluvieux de la pente et des états de surface des terrains (Tribak, A. 2002). Le faible taux de recouvrement végétal et la mise en culture de ces versants permettent un déplacement rapide des matériaux sous forme de coulées de boue, suivie de l'érosion linéaire. La lecture de quelques profils paysagers ou toposéquences, met en évidence des paysages de versants caractéristiques de cette montagne, qui paraissent généralement, dénudés, décapés et ruiniformes.

La classification des ravins présente 6 ordres dans le sous-bassin d'Ighzer Ougadir. Le MNE de 2007 montre une densité hydrographique d'ensemble de l'ordre de 543 km². C'est une valeur très élevée attestant d'une faible perméabilité des roches et une protection végétale faible dans un contexte de reliefs pentus. La densité hydrographique semble décroissante de l'ordre 1 à l'ordre 6 où l'artère principal, varie entre 304.22 à 6.49 pour les cours d'eau d'ordre 6. Les ravins de l'ordre 1 sont nombreux et comptent de 2814 ravins d'une longueur de 253.80 km, suivis des cours d'eau d'ordre 2 qui enregistrent 1228 ravins de plus de 65.17 km de longueur. La longueur moyenne des ravins de différents ordres varie de 0.09 km à 0.04 km, et marque une évolution croissante des cours d'eau de l'ordre 1 vers les cours d'eau d'ordre 6.

Tab. 1 : Caractéristiques des paramètres hydrographiques du sous-bassin versant de l'Ighzer Ougadir

(Source : MNE <https://search.asf.alaska.edu/> et Earth explorer 2007/2014)

| Ordre/ Paramètre | Nombre 2007 | Nombre 2014 | Longueur 2007 (km) | Longueur 2014 (km) | Long moy 2007 (km) | Long moy 2014 (km) | Rc 2007 | RL 2007 | Rc 2014 | RL 2014 | Ct 2007 | Ct 2014 |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|
| Ordre 1 | 2814 | 3245 | 253,80 | 261,25 | 0,09 | 0,08 | 2,29 | 0,59 | 2,29 | 0,62 | 8347,04 | 9908,11 |
| Ordre 2 | 1228 | 1420 | 65,17 | 71,13 | 0,05 | 0,05 | 2,61 | 0,88 | 2,73 | 0,87 | 935,33 | 1180,45 |
| Ordre 3 | 471 | 521 | 21,91 | 22,59 | 0,05 | 0,04 | 1,52 | 0,82 | 1,48 | 0,91 | 120,61 | 137,56 |
| Ordre 4 | 309 | 351 | 11,81 | 13,84 | 0,04 | 0,04 | 2,26 | 1,06 | 2,09 | 0,98 | 42,65 | 56,77 |
| Ordre 5 | 137 | 168 | 5,54 | 6,48 | 0,04 | 0,039 | 2,28 | 1,00 | 2,43 | 1,08 | 8,87 | 12,72 |
| Ordre 6 | 60 | 69 | 2,42 | 2,87 | 0,04 | 0,042 | | | | | 1,70 | 2,32 |

L'analyse du Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de l'année 2014 révèle une augmentation de 5% dans le développement du ravinement par rapport à l'année 2007. Nous avons recensé 5 537 ravins d'une longueur totale d'environ 368,81 km. En 2014, les ravins de l'ordre 1, totalisent 3 245 ravins avec une longueur totale de 261,25 km, soit une moyenne de 0,08 km (80 m/ravin). Les ravins de l'ordre 2 comptent 1 420 drains pour une longueur totale de 71,13 km, soit une moyenne de 0,05 km/ravin. Les ravins de l'ordre 3 sont au nombre de 521, présentant une longueur totale de 22,59 km, soit 0,043 km/ravin. La longueur moyenne du ravin de l'ordre 6 est d'environ 0,042 km/ravin, avec un total de 69 drains. Nous observons, ainsi, une corrélation évolutive entre les différents ordres du sous-bassin ; la densité hydrographique atteint 598,59 km² en 2014 en fonction de l'augmentation du nombre d'ordres.

La comparaison avec les autres paramètres entre les deux dates, porte de grand intérêt pour mettre en évidence la dynamique du ravinement. La densité de drainage était 38.99 km/km² en 2007 qui reste une valeur élevée, caractéristique des terrains peu perméables sous un couvert végétal faible. De même, en 2014 la densité de drainage a augmenté légèrement à 39.87 km/km², due probablement à une dégradation légère du couvert forestier matorral ou à l'emprise humaine et à l'agressivité des conditions climatiques. L'augmentation de ce paramètre est due essentiellement à l'élévation des longueurs des segments des premiers et deuxièmes ordres. Le coefficient de torrentialité des deux dates s'élève de 9% du fait de l'augmentation de nombre des ravins d'ordre 1, puisqu'en 2007 ce coefficient présente une valeur 8347, tandis que en 2014, il enregistre 9908. Cet indice peut être plus indicatif et plus expressif que la densité de drainage. Plus il est élevé, plus la torrentialité augmente traduisant ainsi une grande agressivité des averses (Benzougagh, B et al. 2019). Les autres rapports présentent également une légère évolution à l'échelle de 7 ans. Le rapport de confluence ou de bifurcation de l'année 2007 a crû très faiblement de 2.19 à 2.20 en 2014. Le MNE de l'année 2014 révèle d'une évolution très nette, et donne des valeurs assez élevées mais aussi brusquement décroissantes entre les segments de l'ordre 3 (1.48) et ceux de l'ordre 4 (2.09).

Ces deux derniers ordres présentent des valeurs inférieures par rapport à l'année 2007, ce qui met en évidence l'influence de la nature lithologique des terrains sur la bifurcation de ces deux ordres par rapport au talweg capital.

Le rapport de longueur quant à lui, varie légèrement entre 2007 et 2014 en fonction de l'augmentation ou de la diminution des longueurs moyennes de chaque ordre en rapport avec la longueur moyenne de l'ordre supérieur. D'après Benzougagh, B et al. 2019 : « *Plus le rapport de longueur est élevé plus les drains d'ordre supérieurs seront importants et les évacuations de sédiments plus faciles* ». Les valeurs du rapport de confluence telles qu'elles sont présentées dans le tableau 1 ci-dessus, révèle une augmentation assez faible en 2014 par rapport à l'année 2007. Cela atteste que les ravins de l'ordre 1, 3 et 5 sont plus ou moins capables d'évacuer les sédiments que les drains d'ordre supérieur.

CONCLUSION

Sur ces versants marneux, le couvert forestier semble dégradé et défriché sur des pentes moyennes à fortes, montrant une incapacité à les stabiliser. La dégradation induite par les ravins apparaît particulièrement rapide, comme en témoigne l'observation directe sur le terrain des versants chaotiques, partiellement recouverts de blocs géants arrachés de la falaise morte moghrébienne. On note également une reprise limitée de la végétation spontanée sur les versants fortement touchés par le ravinement. La strate ligneuse présente un état dégradé, avec des racines éparses et exposées à l'air en raison de l'érosion sur toutes les sections d'un versant. De plus, les strates arbustives et herbacées jouent un rôle médiocre en raison de leur dégradation et de la forte pression pastorale et agricole qu'elles subissent. Certains terrains dégradés ou anthropisés montrent une reconquête végétale progressive par certaines espèces adaptées, telles que l'*Ononis natrix*. L'analyse diachronique de la dynamique du ravinement révèle une intensification significative au niveau des deux structures paysagères. Les paramètres hydrologiques et les rapports calculés dans cet axe mettent en évidence une accélération du processus de ravinement entre 2007 et 2014.

Références bibliographiques

- Benzougagh B., Dridri A., Boudad L., Sdkaoui D., et Baamar B., (2019). Apport des Sig et Télédétection pour l'évaluation des Caractéristiques Physiques du Bassin Versant d'oued Inaouene (Nord-Est Maroc) et leurs utilités dans le Domaine de la Gestion des Risques Naturels. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. ISSN 2429-5396I. pp 120-130.
- El Ouahidi A., Ouammou A., ; Weisrock A., Fontugne M., RIDAOUI M., (2015). La terrasse holocène d'Ighzer Ougadir (affluent gauche de l'oued Tamri sud-ouest marocain) : cadre chronologique et stratigraphique. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (10) (2016) 3699-3710 RQM8_Nador_2015.
- IRIFI H., TRIBAK A., et ACHOUR A., (2020). Paysages naturels dans la basse vallée de l'oued Tamri (Maroc) : proposition de l'approche paysagère pour une valorisation touristique. *Geography Notebooks – 3 (2020) 1. Tourism, Representations and Preservation of Territories*. Pp 15-36. <https://www.ledonline.it/Geography-Notebooks/>
- Irifi H., Tribak A., (2021). Diversité floristique et paysagère du cours d'eau de la basse vallée de l'oued Tamri (Haut Atlas Atlantique, Maroc). *Geomaghreb* 17année 2021. Pp 13-30.
- Irifi, H., (2023). *Dynamique des paysages de montagnes : Paramètres, Impacts et Valorisation. Cas de la basse vallée de l'oued Tamri (Atlas Atlantique-Maroc)*. Thèse de doctorat en Géographie physique et Aménagement. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah-Saïs. 317 p.
- Tribak A., (1998). Fonctionnement actuel d'une ravine d'érosion dans une zone de marnes miocènes (région de Tarmast, Prérif oriental, Maroc). Modèle d'évolution et distribution saisonnière des processus. *In : Revue de géographie alpine*, tome 86, n°3, 1998. pp. 37-48 ; Doi : <https://doi.org/10.3406/rga.1998.2890>
- Tribak A., (2002). Contraintes du milieu et fragilité d'un espace montagnard marocain : l'exemple du Prérif oriental au nord de Taza. *In : Annales de Géographie*. 2002, t. 111, n°625. pp. 227-245.

MODELISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE APPLIQUÉE AU BASSIN VERSANT DE MAZER, PAR LES SIG ET LA MÉTHODE PAP/CAR

KOUCHAR Sara, EL ASSAOUI Naïma, BOUISS Charaf EDDINE et MEZIANE Hanane.

Université Mohammed V, Laboratoire de Géosciences Eaux et Environnement,

4 Avenue Ibn Battouta B.P. 1014 RP, Rabat, Maroc. Sarakouchar92@gmail.com

RESUME : La méthode PAP/CAR est une approche développée pour évaluer l'érosion hydrique dans les régions semi-arides du Maroc. Cette méthode se base sur l'analyse de différents paramètres tels que la topographie, les caractéristiques du sol, les pratiques agricoles, le climat, la végétation et la densité de population. Les directives PAP/CAR sont une méthode d'étude qualitative de l'érosion hydrique et des mouvements de terrain qui se base sur la hiérarchisation de la surface d'un bassin versant en unités distinctes selon la vulnérabilité à l'érosion hydrique et aux mouvements de terrain. Les objectifs de ces directives sont de contribuer à une meilleure gestion des sols et des autres ressources naturelles. L'objectif principal de ce travail consiste à créer une carte de la zone vulnérable à l'érosion hydrique dans le bassin versant de Mazer, en utilisant la méthode PAP/RAC combinée avec le SIG et la télédétection. La méthode PAP/RAC se base sur trois approches distinctes. La première approche prédictive permet de générer une carte synthétique des états érosifs, indiquant qu'environ 22,25% de la surface totale du bassin versant est soumise à un degré d'érosion élevé à très élevé. La deuxième approche descriptive permet de cartographier les différentes formes d'érosion, tandis que la troisième approche fournit une carte intégrée et consolidée de l'érosion qui montre que le niveau d'intensité de l'érosion est proportionnel aux facteurs causaux, en particulier dans les zones présentant une forte pente et une friabilité du sol élevée.

Mots-clés : Erosion hydrique, méthode PAP/CAR, SIG, bassin versant, Mazer, Plateau de Settât-Ben Ahmed.

MODELING WATER EROSION APPLIED TO THE MAZER WATERSHED, USING GIS AND THE PAP/CAR METHOD.

ABSTRACT: The PAP/CAR method is an approach developed to assess water erosion in semi-arid regions of Morocco. This method is based on the analysis of various parameters such as topography, soil characteristics, agricultural practices, climate, vegetation, and population density. The PAP/CAR guidelines are a qualitative method of studying water erosion and landslides that involves ranking a watershed's surface into distinct units based on their vulnerability to water erosion and landslides. The objective of these guidelines is to contribute to better land and natural resource management. The main objective of this project is to create a map of the area vulnerable to water erosion in the Mazer watershed, using the PAP/RAC method combined with GIS and remote sensing. The PAP/RAC method is based on three distinct approaches. The first predictive approach generates a synthetic map of erosion states, indicating that about 22.25% of the total watershed surface is subject to a high to very high degree of erosion. The second descriptive approach allows for mapping of the various forms of erosion, while the third approach provides an integrated and consolidated map of erosion that shows that the level of erosion intensity is proportional to the causal factors, especially in areas with high slope and soil friability, and low vegetation cover and density.

Keywords: Water erosion, PAP/CAR method, GIS, watershed, Mazer, Settât-Ben Ahmed Plateau.

Introduction

L'érosion hydrique, phénomène naturel, résulte du transport de particules de sol par l'eau en mouvement, souvent lorsque celle-ci excède la capacité d'absorption du sol ou lorsque sa vitesse est élevée. Toutefois, l'intervention humaine peut aggraver ce processus, causant des dommages considérables aux terres cultivées, aux infrastructures et à l'environnement. Au Maroc, les régions semi-arides sont particulièrement exposées à ce phénomène en raison de leurs caractéristiques topographiques, lithologiques, morphologiques et climatiques. Ces régions connaissent parfois des précipitations peu abondantes et irrégulières, ce qui signifie que l'eau s'accumule sur une courte période suivie de longues périodes de sécheresse, favorisant ainsi l'érosion. Cela entraîne une perte de fertilité des sols, une diminution de la productivité agricole et forestière, ainsi que des dommages aux infrastructures. Les conséquences socio-économiques sont graves, poussant les populations locales à migrer vers les zones urbaines ou à l'étranger. De plus, l'érosion hydrique dégrade les écosystèmes naturels, réduisant la biodiversité et la productivité forestière. La gestion durable des ressources naturelles est cruciale pour atténuer ces impacts. Des méthodes telles que l'USLE, RUSLE, LEAM, PAP/CAR sont utilisées pour évaluer l'érosion hydrique. Dans le bassin versant de Mazer, l'approche PAP/RAC combinée à des outils SIG et de télédétection est employée pour cartographier les zones vulnérables, soulignant l'importance des stratégies de gestion durable pour la préservation des ressources naturelles.

1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant de Mazer (voir figure 1) est situé dans le plateau de Settat Ben Ahmed, à l'ouest du Maroc, et couvre une superficie de 180 km². Sa principale caractéristique réside dans sa contribution à l'alimentation de la nappe de Berrechid, ce qui le rend particulièrement important pendant les périodes de crues. Il est intégré à l'Agence de bassin hydraulique de Bouregreg et le Chaouia.

Le plateau de Settat-Ben Ahmed est principalement composé de quartzites plissées et faillées datant du Paléozoïque, suivis d'argiles rouges du Trias. Le Crétacé est représenté par des calcaires de l'Infra-Cénomaniens et du Cénomaniens. Pendant le Tertiaire, une série caractérisée par des variations importantes de faciès et d'épaisseur s'est formée, bien qu'elle soit absente dans le plateau de Settat Ben Ahmed. Cependant, dans la plaine, elle est constituée d'une succession de conglomérats, de sables calcaires et de calcaires détritiques renfermant des débris de coquillages. Les formations quaternaires sont généralement couvertes dans la plaine de Berrechid par des limons subactuels à actuels.

En raison de son emplacement dans le plateau de Settat Ben Ahmed, le bassin de Mazer bénéficie d'une topographie variée, caractérisée par des reliefs et des altitudes changeantes. Cette diversité topographique influence le régime des cours d'eau et l'écoulement des eaux de surface dans le bassin, ce qui affecte directement la disponibilité et la répartition des ressources en eau.

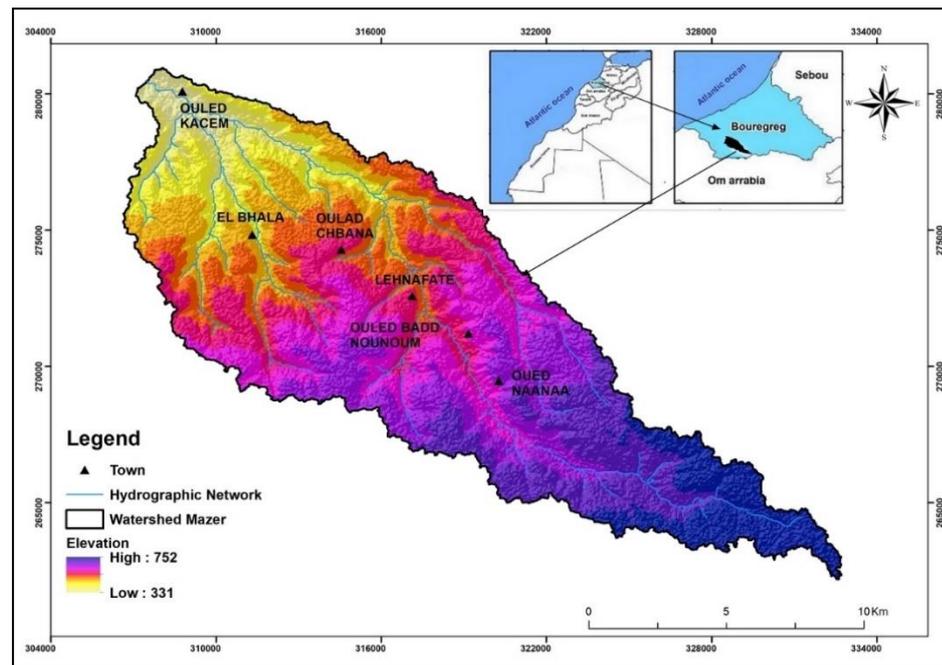


Figure 1 : Situation géographique du Bassin versant de Mazer (S. KOUCHAR et al).

2. Matériel et méthodes

2.1 Matériels utilisés

La cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de Mazer a été réalisée en utilisant un modèle qualitatif basé sur des données topographiques, géologiques et de couverture végétale. Cette étude a utilisé plusieurs sources de données, notamment les images satellitaires Landsat 8 et Google Earth, le modèle numérique de terrain (MNT) généré à partir d'images radar ASTER GDEM, et la carte géologique du plateau du phosphate et la zone synclinale du Tadla au 1/1500000. Les différentes cartes thématiques ont été réalisées en utilisant des logiciels spécialisés en télédétection et en Système d'Information Géographique (SIG), avec géoréférencement au système de coordonnées Maroc.

2.2 Présentation de la méthode PAP/CAR

La méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire/Centre d'Activités Régionales) a été développée pour évaluer l'érosion hydrique dans les régions semi-arides du Maroc en analysant divers paramètres tels que la topographie, les caractéristiques du sol, les pratiques agricoles, le climat, la végétation et la densité de population. Les directives PAP/CAR utilisent une approche qualitative pour étudier l'érosion hydrique et les mouvements de terrain, en hiérarchisant la surface d'un bassin versant en unités distinctes selon leur vulnérabilité à ces phénomènes.

Cette méthode permet de déterminer les zones les plus fragiles et les plus susceptibles de produire des sédiments.

Les objectifs de ces directives sont :

- Améliorer la gestion des sols et des ressources naturelles, et lutter contre l'érosion dans les zones côtières méditerranéennes,
- Présenter la méthodologie de cartographie et de mesure des processus d'érosion,
- Fournir des instructions de base pour son application (PAP/CAR, 1998).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Elaboration de la carte d'érodibilité du Bassin versant de Mazer selon les directives PAP/CAR

La carte d'érodibilité a été obtenue en superposant la carte des pentes et la carte des lithofaciès. Cette carte permet d'identifier les zones du Bassin versant de Mazer qui sont les plus susceptibles à l'érosion en fonction de leur pente et de leur composition géologique.

La carte des pentes permet de distinguer les zones présentant les pentes les plus raides, tandis que la carte des lithofaciès permet de déterminer la résistance des substrats à l'érosion. En superposant ces deux cartes, il est possible de déterminer les zones les plus vulnérables à l'érosion et de mettre en place des mesures de prévention et de protection pour les sols.

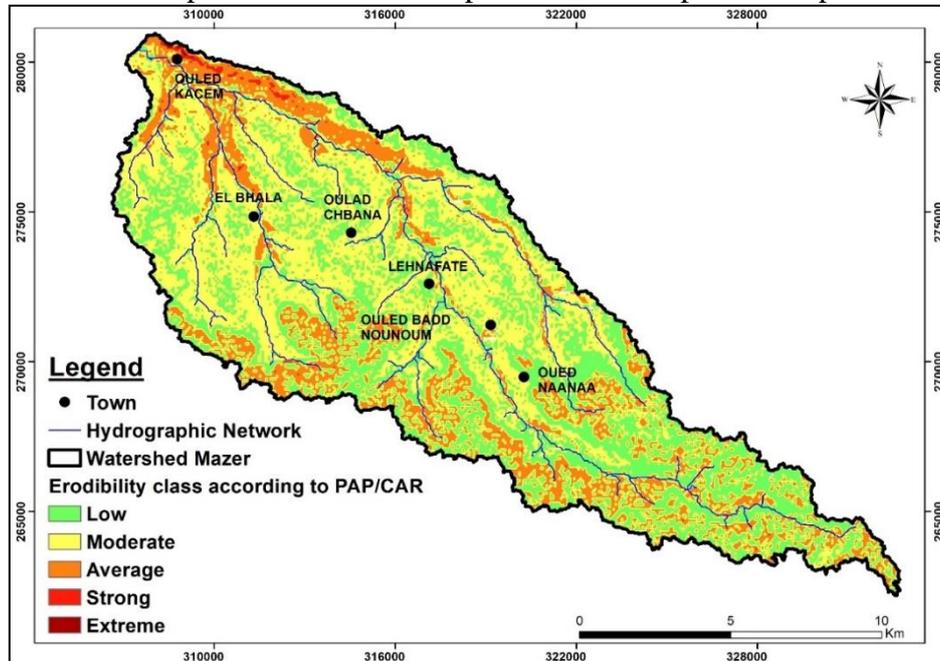


Figure 2 : Carte d'érodibilité du bassin versant de Mazer (S. KOUCHAR et al).

Elaboration de la carte de protection du sol du Bassin versant de Mazer selon les directives PAP/CAR

La carte de protection du sol du bassin versant de Mazer élaborée selon les directives du PAP/CAR est un outil important pour la gestion durable des terres dans cette région. Elle permet d'identifier les zones à risque d'érosion et les pratiques de gestion des terres les plus appropriées pour chaque zone, tout en assurant un suivi et une évaluation efficaces des résultats obtenus.

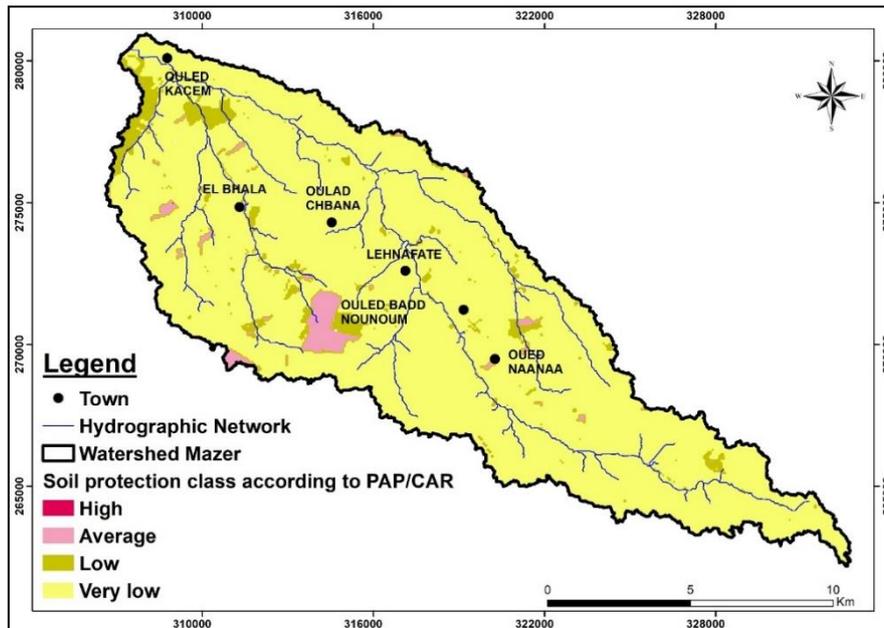


Figure 3 : Carte de protection des sols du bassin versant de Mazer (S. KOUCHAR et al).

Elaboration de la carte des états érosifs du Bassin versant de Mazer selon les directives PAP/CAR

La carte des états érosifs du bassin versant de Mazer élaborée selon les directives du PAP/CAR est un outil important pour la gestion durable des terres dans cette région. Elle permet d'identifier les états érosifs présents dans chaque zone et les pratiques de gestion des terres les plus appropriées pour chaque état érosif, tout en assurant un suivi et une évaluation efficaces des résultats obtenus.

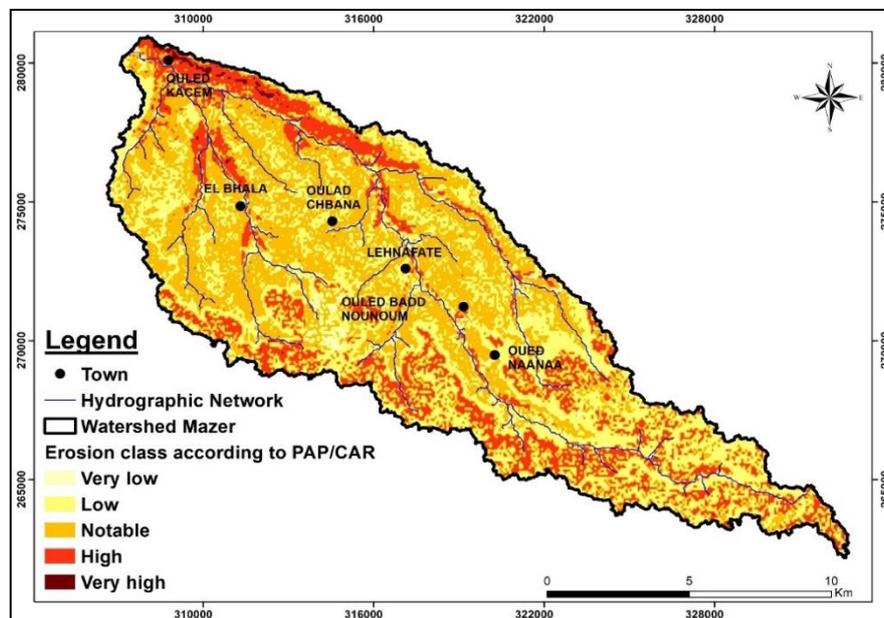


Figure 4 : Carte des états érosifs du bassin versant de Mazer (S. KOUCHAR et al).

Conclusion

En utilisant les SIG, la télédétection et la méthode PAP/CAR, une étude qualitative a été menée pour évaluer le potentiel d'érosion dans la zone d'étude. Cette approche a permis l'analyse et une meilleure compréhension de l'érosion dans cette zone spécifique.

Les résultats de cette étude démontrent que l'érosion hydrique est plus prononcée aux extrémités nord et sud du bassin versant. Elle est généralement associée des formations géologiques plus tendres, telles que des argiles et des alluvions au nord, et des marnes au sud.

L'intégration des techniques d'analyse spatiale, de la télédétection et de la méthodologie PAP/CAR a permis de mieux comprendre les formes d'érosion, leur répartition spatiale et les facteurs géologiques qui y contribuent dans la zone d'étude. En combinant ces approches, il a été possible d'identifier les zones vulnérables et de comprendre les facteurs sous-jacents contribuant à l'érosion.

Dans l'ensemble, la combinaison des SIG, de la télédétection et de la méthode PAP/CAR s'est révélée être une approche puissante pour évaluer l'érosion et améliorer notre compréhension de sa dynamique dans la zone étudiée. Les connaissances acquises grâce à cette étude peuvent orienter les efforts futurs de conservation et contribuer à l'élaboration de stratégies ciblées de prévention de l'érosion.

Références bibliographiques

- El Assaoui Naïma, Bouiss Charaf Eddine, Sadok Abdelaziz, 2023. Assessment of Water Erosion by Integrating RUSLE Model, GIS and Remote Sensing – Case of Tamdrost Watershed (Morocco).
- El Assaoui, N. 2017. Contribution à l'étude méthodologique de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines : cas de la nappe de Berrechid (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Univ. Hassan II, Maroc).
- EL Houssine EL GASMI, Bouabid EL MANSOURI, and Mohammed TAMMAL. Les écoulements superficiels dans le plateau de Settat-Ban Ahmed et la plaine de Berrechid : Hydrographie Endoréique.
- Hili Aïman, El Khalki Yahia, Reddad Hanane, Gartet Jaouad, Abahrour Mohamed, 2020. Comparaison des résultats de l'approche pap/car et le modèle USLE dans la cartographie et l'estimation qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amlil, (prérif - Maroc).

CARTOGRAPHIE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE MASSIF NORD DES KEBDANA (MAROC-NORD - EST). CAS DU BASSIN VERSANT D'OUED AIFER

Abdelouahid SAIDI¹ et Omar MOUADILI²

Laboratoire : Espace, Histoire, Dynamique et Développement Durable, USMBA, Faculté Polydisciplinaire Taza¹.

Laboratoire : Dynamique des Milieux Arides, Aménagement et Développement Durable, Université Mohamed I^{er}, FLSH, Oujda².
abdelouahid.saidi@usmba.ac.ma

RESUME : Le milieu physique du bassin versant d'Oued Aifer dans le massif nord des Kebdana sur la façade méditerranéenne au nord - est du Maroc renferme de nombreux éléments de sa fragilité : la sécheresse du climat ; la topographie accidentée ; la dégradation du couvert végétal ; dégradation des terres. Les ressources naturelles des zones de ce bassin versant font l'objet d'une dynamique érosive excessive au fil de dernières décennies. Elles sont sollicitées malgré leurs conditions environnementales pour différents aménagements : pâturage, agriculture, infrastructure routière, urbanisation, tourisme... Les plans d'aménagements à l'échelle régionale méditerranéenne prévoient rendre ces milieux ruraux axés sur la rocade méditerranéenne des pôles d'attractions des activités touristiques. Face à ces contraintes et ses pressions d'aspects physiques et anthropiques, il ressort nécessaire d'évaluer le potentiel érosif notamment celui attaché à l'érosion des sols et à la dégradation des ressources naturelles dans le bassin étudié. Dans ce contexte nous tenterons à travers ce bulletin de s'appuyer sur une approche cartographique à l'aide des outils de la Géomatique et le SIG pour d'une part quantifier la quantité des sols perdus et d'autre part de mettre en exergue les mécanismes et les facteurs agissant sur le fonctionnement de ce genre du risque. L'objectif tracé pour cet article est de proposer aux décideurs des recommandations contribuant à mieux prévoir et contrôler ce risque.

Mots clé : Cartographie-Bassin versant-Kebdana- Erosion hydrique- Aménagement- SIG.

CARTOGRAPHY OF WATER EROSION IN THE NORTHERN KEBDANA MASSIF (NORTH-EAST MOROCCO). CASE OF THE OUED AIFER WATERSHED

ABSTRACT: The physical environment of the Oued Aifer watershed in the northern Kebdana massif on the Mediterranean coast in the north- east of Morocco contains many elements of its fragility: the dryness of the climate; the rugged topography; degradation of plant cover; land degradation. The natural resources of the areas of this watershed have been subject to excessive erosion over recent decades. Despite their environmental conditions, they are called upon for different developments: grazing, agriculture, road infrastructure, urbanization, tourism, etc. The development plans on a regional Mediterranean scale plan to make these rural environments focused on the Mediterranean ring road poles of attraction for activities tourist. Faced with these constraints and pressures from physical and anthropogenic aspects, it is necessary to assess the erosive potential particularly that linked to soil erosion and the degradation of natural resources in the basin studied. In this context, we will attempt through this bulletin to rely on a cartographic approach using Geomatics and GIS tools to, on the one hand, quantify the quantity of soil lost and, on the other hand, to highlight the mechanisms and factors acting on the functioning of this type of risk. The objective set out for this article is to offer decision-makers recommendations to help them better predict and control this risk.

Key words: Cartography- Watershed- Kebdana - Water erosion-, Management - GIS.

INTRODUCTION

Les études menées dans les différents bassins versants de la chaîne montagneuse du Rif au nord du Maroc confirment que la dynamique érosive d'origine hydrique a intensément perturbé l'équilibre des versants. Ces recherches avancent une moyenne annuelle de perte de sol d'environ 20 millions de tonnes ; ce qui représente 60% de la quantité des sédiments perdue à l'échelle nationale à savoir que la proportion de la superficie du territoire rifain par rapport au territoire nationale représente seulement 6 % (Heusch B., 1970).

Dans ce contexte, les bassins versants du massif nord des Kerdana qui font partie du Rif oriental sur la façade méditerranéenne ont subi une dégradation des sols au fil des temps récents particulièrement par le biais des formes de l'érosion hydrique (en nappe, en rigoles, en ravines et en sapement de berges). Nous avons choisi parmi ces bassins, soumis à ce genre de risque, le bassin versant de l'oued Aifer pour entamer une évaluation quantitative de la perte en sol à partir d'un modèle cartographique intégré dans le système d'information géographique EPEM de GAVRILOVIC (Erosion Potentiel Method, 2006).

1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin-versant qui fait l'objet de cette étude, se situe géographiquement sur le littoral méditerranéen du Maroc entre les parallèles 35°0' et 35°60' N et les méridiens 2°39' et 2°42' W (fig. 1). Il s'étend par sa forme allongée sur une superficie d'environ 30,2 km².

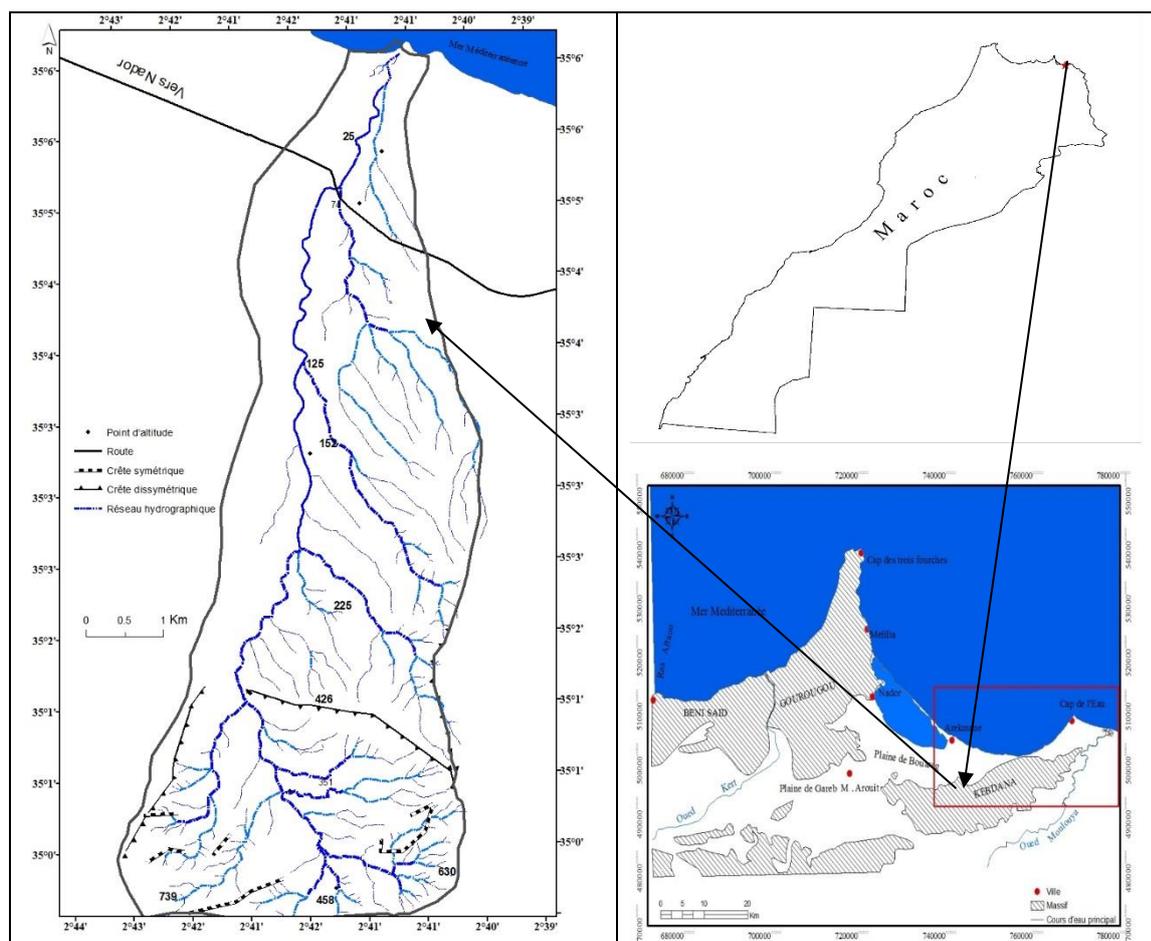


Figure 1. Localisation du bassin versant de l'oued Aifer au Nord-Est du Maroc

Les altitudes allant de 200 m à 600 m représentent 55% de sa surface totale ; la valeur de la dénivelée spécifique (224,4) et l'indice de la pente (0,041) rangent son relief selon la

classification de l'ORSTOM (1954) dans la classe assez forte. La moyenne annuelle pluviométrique (295mm) et thermique (17°, 4 C) avec un taux d'évapotranspiration élevé confèrent à son climat méditerranéen une ambiance semi-aride (Saidi A., 2017).

A partir d'un ensemble des crêtes symétriques et asymétriques aux formes aiguës et allongées dont des altitudes allant de 426 m à 739 m descendent les cours d'eaux vers une dépression de topographie circulaire sur laquelle s'étale le bassin de réception dont le diamètre est d'environ de 4 Km. Sur cette surface semi aplatie se développe une structure synclinale qui fait partie d'un anticlinorium où affleurent des couches moyennement résistantes des schistes et de grès du Lias supérieur (Barathon J.J., 1989) (Fig. 2). Au-delà, au pied de la montagne s'allongent un alignement des collines et de petits replats et de croupes le long des espaces des inter- fleuves formant des glacis inclinés jusqu'à la mer et ses falaises vives.

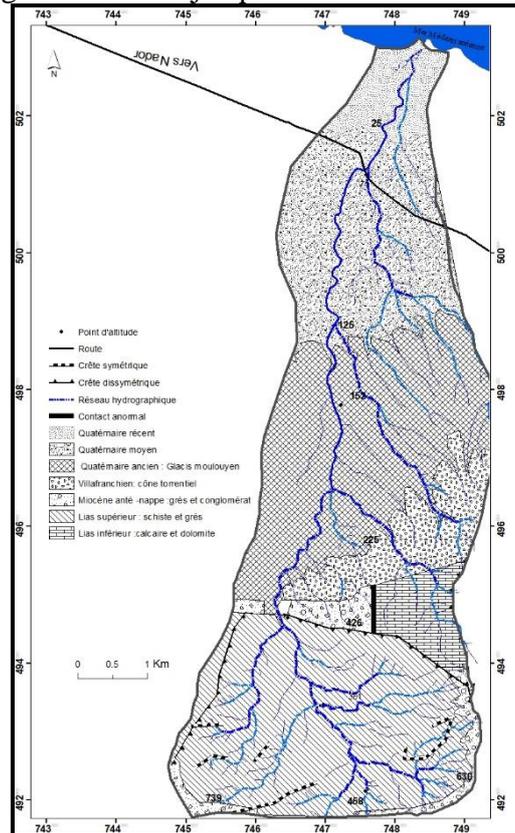


Figure 2. Carte géologique du bassin versant de l'oued Aifer

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La carte synthétique du volume annuel moyen des sédiments érodés suivant le modèle de Gavrilovic (2006) est une couche d'information combinant les valeurs factorielles en format raster a été calculée à partir de différents documents numériques et images satellitaire : carte topographique feuille d'Arekmane 1/25000 ; carte géologique feuille du Rif 1/500000 ; carte pédologique feuille du Bouareg 1/50000 ; Module numérique d'élévation (résolution 30 m), Google Earth 2022. Les images satellitaires de Landsat TM ETM (2000 ; 2021) ont été utilisées pour extraire les valeurs de la température T et la couverture végétale Xa

Cette approche cartographique est basée sur une équation statistique intégrée dans le SIG qui consiste à induire une opération multiplicative et qui se présente comme suit :

W : EPM : Erosion spécifique dans le bassin versant ($m^3/Km^2/an$)

Où EPM (W) = $\pi * T * H * \sqrt{Z^3}$

T = $\sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1$: Coefficient de température avec t_0 : Température moyenne annuelle en (C)

H : Précipitation annuelle en (mm) ; est généralisée par le modèle d'analyse spatiale à partir des données pluviométriques de la station d'Arekmane (1979 -2022)

Z : Coefficient d'érosion potentielle. Avec : $Z = Xa * Y * (\varphi + \sqrt{Ja})$

Xa : Coefficient de protection du sol est réalisé par l'ajustement de l'indice de végétation normalisé (NDVI) $Xa = (Xa.NDVI - 0,61) * (-1,25)$ (Chaaouan et al. 2012)

Y : Coefficient d'érodibilité du sol selon des codes des types des sols proposés par Gravirovic

φ : Coefficient de type et d'étendue de l'érosion en (%) est calculé selon Milevski et al. (2008)

Ja : Pente moyenne de la zone en %

3. RESULTATS ET DISCUSSION

La carte potentielle des états érosifs (Z) associant les quatre variables les plus importantes dans le module EPM montre selon la classification tracée par (Gravirovic et al., 2006) trois niveaux de l'érosion partageant l'espace du bassin étudié (Tab 1), (Fig. 3, A). L'érosion excessive et sévère d'une proportion de 41% s'étend à l'est et sud est (1322,1 ha), l'érosion moyenne occupe une superficie de plus de 26% (848,7 ha), et s'étale particulièrement sur la partie sud. Enfin la classe d'érosion faible et très faible d'environ 32,7% (1055ha) englobe les terrains situés à l'extrême sud et le nord du bassin. La diminution de la valeur de Z dans ces dernières parties de la zone étudiée reflète un état érosif homogène résultant d'un rapprochement remarqué entre les valeurs de trois coefficients ; valeur de protection du sol (Xa) entre 0,2 et 0,4, valeur d'érodibilité du sol (Y) (moins de 0,36) et valeur de type et l'étendue de l'érosion (> 0,2).

Tableau 1. Coefficient d'érosion potentielle dans le bassin versant d'oued Aifer

| La classe d'érosion | Valeur de Z | Superficie en (ha) | Superficie en (%) |
|-----------------------------|-------------|--------------------|-------------------|
| Érosion excessive et sévère | >0.8 | 1322,1 | 41 |
| Érosion moyenne | 0.40 - 0.8 | 848,7 | 26.3 |
| Légère érosion | 0.20 - 0.40 | 856,8 | 26.6 |
| Très légère érosion | 0 - 0.2 | 198,2 | 6.1 |

Source : Gravirovic Z. & al., 2006

Par contre, l'état érosif élevé du coefficient d'érosion potentiel oscillant entre 0,8 et 1,6 dans les parties sud-est du bassin est attaché essentiellement au degré fort de l'état érosif des deux coefficients selon le tableau de Gravirovic : la pente moyenne (27%) et celui de la lithologie (> 0,51) ; (Fig. 3, A). De ce fait, dans la présence d'un couvert végétal arbustif dégradé en hauteur et en densité (Alfa, jujubier, armoise, doum), les particules fines argileuses fertiles se transportent facilement via les glacis par les deux formes de ruissèlement diffus et concentré. Ainsi, le couplage des trois facteurs (T, P, Z) (Fig.3, B) nous a permis d'évaluer la moyenne de perte en sol selon le modèle EPM qui atteint une valeur de 2213 m³/Km² (environ 21 tonnes en hectare). Les deux classes dont l'état de la quantité de la perte en sol modérée à forte en fonction de la classification (Zachard D., 1982), (Tabl.2) couvrent une superficie de 18.9 Km² ; environ 58% de la totalité du bassin versant d'oued Aifer.

Le territoire des deux catégories d'érosion qui dépassant le seuil de la tolérance fait partie des surfaces les plus érodées par les quatre facteurs agissant dans la formule du coefficient potentiel d'érosion Z. Il s'agit d'un paysage ondulé s'étalant exclusivement à l'est et le sud-est du bassin marqué par un relief intensivement raviné et sillonné par un chevelu hydrographique très ramifié d'ordre 1,2, 3 dans un contexte lithologique prédominée par des sédiments argileux limoneux.

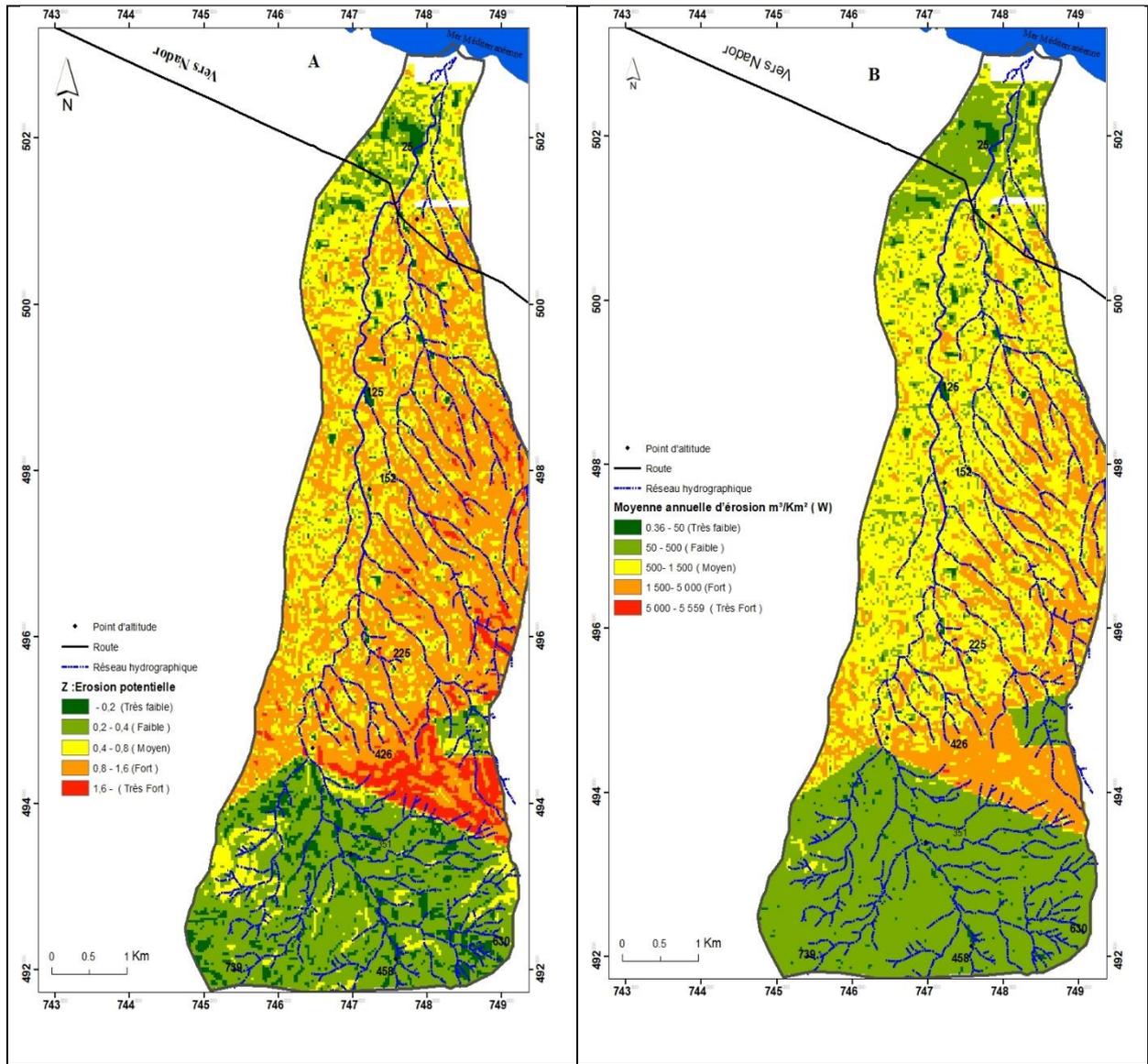


Figure 3. (A) Carte d'érosion potentielle (Z), (B) Carte finale des pertes en sol (m^3/Km^2)

Tableau 2. Répartition des classes des pertes en sol dans le bassin d'oued Aifer

| Code | Classe m^3/Km^2 /an | Etat d'érosion | Superficie en Km^2 | Superficie en % |
|------|-----------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| 1 | >50 | Très faible | 0,53 | 2 |
| 2 | 50-500 | Faible | 12,85 | 40 |
| 3 | 500-1500 | Modérée | 12,28 | 38 |
| 4 | 1500-5000 | Forte | 6,59 | 20 |
| 5 | >5000 | Très forte | 0,01 | 00 |

La matrice corrélacionnelle de Pearson (r), nous a permis de dresser un tableau statistique (Tabl. 3), dans lequel s'échelonnent les résultats dus au fonctionnement des facteurs contrôlant l'érosion hydrique et qui sont par ordre le coefficient du protection du sol (42%), Température (15%), Couvert végétal (14%), l'étendue d'érosion (11%), Pente moyenne (10%), Précipitation (8%).

Tableau 3. Matrice de corrélation combinant les facteurs causant la perte en sol

| | EPM | Z | O | H | Ja | T | Xa | Y |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| EPM | 1 | 0.99 | 0.17 | 0.12 | 0.16 | 0.23 | 0.21 | 0.65 |
| Erosion Potentiel(Z) | 0.99 | 1 | 0.24 | 0.07 | 0.10 | 0.30 | 0.28 | 0.72 |
| Degré d'érosion visible (O) | 0.17 | 0.24 | 1 | -0.61 | -0.60 | 0.83 | 0.90 | 0.53 |
| Précipitation (H) | 0.12 | 0.07 | -0.61 | 1 | 0.78 | -0.72 | 0.64 | -0.46 |
| Pente (Ja) | 0.16 | 0.10 | -0.60 | 0.78 | 1 | -0.61 | -0.59 | -0.43 |
| Température (T) | 0.23 | 0.30 | 0.83 | -0.72 | -0.61 | 1 | 0.81 | 0.55 |
| Régularisation du sol (Xa) | 0.21 | 0.28 | 0.90 | -0.64 | -0.59 | 0.81 | 1 | 0.52 |
| Résistance du sol (Y) | 0.65 | 0.72 | 0.53 | -0.46 | -0.43 | 0.55 | 0.52 | 1 |

CONCLUSION

La modélisation cartographique de l'érosion hydrique à partir du model empirique EPM intégré dans le système informatique géographique a relevé trois unités spatiales encadrant la perte en sol dans le bassin versant étudié. L'application de la formule du Graviovic a permis de produire une carte synthétique illustrant ces disparités spatiales ; elle traduit d'une part la pluralité des facteurs impliquant dans la dégradation des sols et reflète d'autre part la diversité des formes d'érosion hydriques. L'analyse de cette carte, ainsi, les bases des données qu'elle porte constitue une démarche importante pour aider les décideurs à aménager le territoire et concevoir une stratégie anti érosive efficace.

Références bibliographiques

- BARATHON J.J. (1989) - Bassins et littoraux du Rif Oriental : évolution morphoclimatique et tectonique depuis le Néogène supérieur. Thèse. Doct. D'état. Univ. Poitiers. Etudes Méditerranéennes. Fasc.13.531 p. + planches
- CHAAOAN J., Faleh A., SADIKI A., MESRAR H. (2013). Télédétection, SIG et modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Amzaz, Rif central. Revue française de photogramétrie et de télédétection. July 2013.
- GAVRILOVIC Z., STEFANOVIĆ M., MELOJEVIĆ M. and COTRIĆ J. (2006). Erosion Potential Method. An important Support For Integrated Water Resource Management. Balwois Conference 2006.Ohrid.Macedonia 14 p.
- HEUSCH B. 1970 - "L'érosion dans le Prérif: une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les llines marneuses du Prérif occidental". Annales des recherches forestières au Maroc (Rabat) 1970; 12 (NS) 9-172.
- MILEVSI L. (2008). Estimation of soil erosion Risk in the Upper part of Begalnica Watershed Republic of Macedonia, based on Digital elevation Model and Satellite Imagery. In : 5th ICGIS 2008, Istanbul, Turkey, pp. 351-358.
- SAIDI A. 2017 – Le littoral des Kbdana (Nord-est du Maroc) : Modelé et dynamique actuelle Thèse de doctorat, Univ. Mohammed I, FLSH. Oujda, 506 p
- SRTM. (Shuttle Radar Topography Mission) 2000. National Geospatial Intelligence Agency (NGA) and National Aeronautics and Space Administration (NASA). <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>
- STRAHLER A.N. 1952 - Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bull. Geol. Soc. Am., vol. 63, p. 1117-1142
- ZECHAR D. (1982). Soil Erosion. Elsevier, Amsterdam, the Nederland, 547p.

EROSION DES BERGES ET RISQUE DE PERTE DE TERRES AGRICOLES DANS LA VALLEE DE L'OUED BOUREGREG : CAS DES TRONÇONS DE MAAZIZ ET DE LARBAA SEHOUL (PLATEAU CENTRAL, MAROC)

Idriss SAMMAA et Ali TAOUS

Equipe de Recherche MNADSS - FLSH-Saïs, USMBA- Fès

sammaaidriss@gmail.com ; ali.taous@usmba.ac.ma

Résumé: Dans les tronçons élargis de la vallée de l'Oued Bouregreg (Plateau central), le sapement des berges engendre un risque hydro-géomorphologique menaçant les terres agricoles exploitées sur les sols de la plaine alluviale et des basses terrasses quaternaires. La présente étude présente les résultats de l'analyse diachronique de l'érosion des berges de Bouregreg et ses incidences en termes de pertes affectant les terres agricoles exploitées dans deux tronçons de vallée situés respectivement à Maaziz et à Larbaa Sehou. La méthodologie adoptée s'est basée essentiellement sur le travail du terrain, l'investissement des documents cartographiques, des photos aériennes et des images satellitaires de Google Earth. L'analyse diachronique effectuée à l'aide du logiciel ArcGis durant la période 1970-2020, a permis de suivre les mutations morphologiques du lit de l'oued, de spatialiser et classifier les sites menacés par l'érosion des berges et d'évaluer les pertes en terres agricoles. Ces pertes sont estimées à 1,56 ha/an à Maaziz et 1,46 ha/an à Larbaa Sehou.

Mots-clés: Oued Bouregreg -sapement des berges - pertes de terres agricoles - analyse diachronique- SIG.

BANK EROSION AND RISK OF LOSS OF AGRICULTURAL LAND IN THE OUED BOUREGREG VALLEY: CASE OF THE MAAZIZ AND LARBAA SEHOUL SECTIONS (CENTRAL PLATEAU, MOROCCO)

Summary: In the widened sections of the Oued Bouregreg valley (Central Plateau), the undermining of the banks generates a hydro-geomorphological risk threatening agricultural land exploited on the soils of the alluvial plain and low Quaternary terraces. This study presents the results of the diachronic analysis of the erosion of the banks of Bouregreg and its impact in terms of losses affecting agricultural land exploited in the two sections of the valley located respectively in Maaziz and Larbaa Sehou. The methodology adopted was essentially based on field work, the investment of cartographic documents, aerial photos and satellite images from Google Earth. The diachronic analysis carried out using the ArcGis software during the period 1970-2020, made it possible to follow the morphological mutations of the river bed, to spatialize and classify the sites threatened by the erosion of the banks and assess losses in agricultural land. These losses are estimated at 1.56 ha/year in Maaziz and 1.46 ha/year in Larbaa Sehou.

Keywords: Oued Bouregreg - undermining of the banks - loss of agricultural land - diachronic analysis - GIS.

Introduction

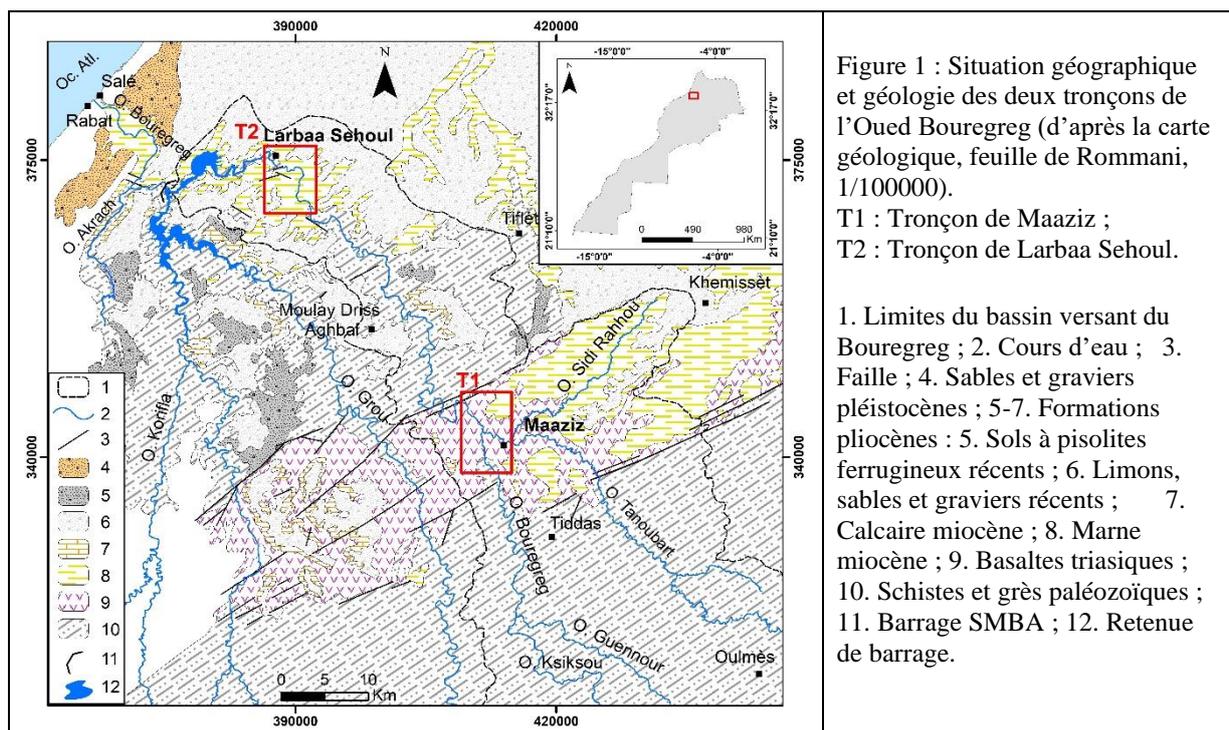
Dans la majorité des vallées marocaines, en plus des inondations, les phénomènes de l'érosion des berges constituent un risque menaçant l'homme et ses activités (A. Taous, 2013). Dans le cas de la vallée de l'Oued Bouregreg (Plateau central, Maroc), en plus de l'importance de la dégradation des sols sur les versants (A. Benmohammadi, 1991 ; A. Laouina et *al.* 2004), l'érosion des berges de l'oued engendre un risque hydro-géomorphologique préoccupant, notamment dans les tronçons où le fond de vallée est élargi, comme par exemple à Maaziz et à Larbaa Sehou (I. Sammaa, 2023). Dans ces deux tronçons, l'oued développe un style morphologique à méandres divagants au sein d'une plaine alluviale relativement étendue. L'érosion des berges de ces méandres se manifeste par des sapements actifs lors des crues. Ce qui engendre des pertes des terres agricoles exploitées sur les sols fertiles de la plaine alluviale et les basses terrasses surplombant le lit fonctionnel de l'oued. Cette étude présente les

principaux résultats de l'analyse diachronique de l'érosion des berges de l'Oued Bouregreg dans les tronçons de Maaziz et Larbaa Sehou, durant les cinq dernières décennies (1970-2020). L'analyse s'intéresse aux mutations morphologiques et paysagères de l'espace fluvial et évalue les pertes en superficies de terres agricoles induites par l'érosion des berges.

1.- Matériel et Méthodes

1.1 - Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude appartient au Plateau central marocain et concerne deux tronçons de fond de vallée de l'Oued Bouregreg situés au Sud-Est de Rabat (fig. 1). Le premier tronçon se situe dans la moyenne vallée du Bouregreg dans le secteur de Maaziz ; il s'étend sur une longueur de 12,8 km, depuis la zone d'Ait Brahim jusqu'aux environs du douar d'Ait Azzouz. Le fond de vallée de ce tronçon montre une largeur variable de 90 à 1400m ; il est creusé dans des terrains secondaires friables formés des argiles et basaltes altérés triasiques, et surmontées par les marnes, grès et calcarénites miocènes. Le tronçon aval de Larbaa Sehou est situé dans la basse vallée du Bouregreg, immédiatement en amont de la retenue du barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah (SMBA), mis en service en 1974. Le fond de vallée de ce tronçon est encaissé dans le palier inférieur de la basse Meseta, où le cours d'eau traverse les marnes miocènes (G. Beudet, 1969). Il s'étend sur environ 10,6 km de long, depuis Oulad Abbou au Sud-Est jusqu'au centre de Larbaa Sehou au Nord-Ouest ; sa largeur est variable de 30 à 1500m. Dans les deux tronçons, le cours d'eau montre un style morphologique de méandres divagants sapement les formations meubles de la plaine alluviale et des basses terrasses quaternaires.



Sur le plan hydro-climatique, les secteurs d'étude sont dotés d'un climat méditerranéen semi-aride caractérisé par des fluctuations saisonnières assez importantes (A. Marghich, 2004). La chronique 1980-2016, montre qu'il s'agit d'un régime pluviométrique méditerranéen irrégulier, caractérisé par de fortes variations interannuelles et saisonnières ; les précipitations maximales atteignent 689,8mm à Maaziz (station Lalla Chafia) et environ 716,2mm à Larbaa Sehou (station Aguibat Ezziar). Les températures mensuelles moyennes oscillent entre 9 °C et 29 °C dans les deux stations. Ces conditions climatiques contrôlent les écoulements irréguliers de l'Oued Bouregreg, caractérisés par des crues de fort

hydrodynamisme et des étiages d'été plus ou moins sévères. Les crues automnales, hivernales et printanières sont souvent violentes et leurs débits de pointe peuvent dépasser $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1296 \text{ m}^3/\text{s}$ le 30 novembre 2010 à la station de Lala Chafia).

1.2.- Méthodologie

La méthodologie adoptée s'est basée essentiellement sur les observations de terrain et l'analyse diachronique des berges :

i)-Les observations de terrain ont visé en premier temps la caractérisation de la morphologie fluviale de l'Oued Bouregreg et de ses berges (morphologie, nature, hauteur) dans les deux tronçons ; par la suite sont spatialisées et classifiées les berges affectées par l'érosion et les impacts éventuels sur les terres agricoles exploitées de part et d'autre du lit fonctionnel de l'oued sur les sols fertiles de la plaine alluviale et des basses terrasses quaternaires.

ii)-L'analyse diachronique a consisté l'étude comparative et interprétative des photos aériennes de l'année 1970 (échelle 1/25000) et les images satellitaires de Google Earth de 2020 (échelle 1/25000). Elle a pour objectif de déterminer les mutations morphologiques du tracé de l'oued, de suivre l'évolution spatio-temporelle des berges affectées par l'érosion et d'estimer les pertes en superficies des terres agricoles. Le traitement des photos aériennes et images satellitaires a été effectué à l'aide du logiciel SIG (ArcMap 10.4).

2.- Résultats et discussions

Notons que l'Oued Bouregreg a façonné une vallée généralement à fond étroit, et encaissé dans les plateaux paléozoïques de la Meseta. Les vallées élargies n'apparaissent en fait que dans les tronçons en raison des conditions morpho-structurales et lithologiques favorables (dépressions synclinales, affleurements des terrains friables de couverture...). C'est dans ces sections larges de la vallée de Bouregreg que le sapement de berges devient actif, car favorisé par la mobilité des méandres divagants instables (cas des tronçons de Maaziz et de Larbaa Sehou). Dans le détail, l'importance du phénomène de sapement des berges varie en fonction de plusieurs facteurs : nature et la hauteur des berges, présence ou absence de la ripisylve, morphologie du chenal et sa pente longitudinale, situation par rapport aux torrents latéraux, présence d'ouvrages d'aménagement anti-érosif... Dans tous les cas, la lithologie et la texture granulométrique du matériel alluvial des berges déterminent leur fragilité et l'efficacité du sapement par le courant. Ce dernier est très actif dans les berges façonnées dans le matériel alluvial meuble, composé de sables, galets et limons sableux ; alors que les berges argilo-limoneuses sont plus résistantes.

2.1.- Les types de sapements

Dans les deux tronçons étudiés, en se basant sur l'importance du sapement, notre analyse a permis de distinguer trois types de berges (Pl. ph. 1) :

i)- **Les berges à sapement fort** sont marquées par un recul rapide aux moments des crues. Il s'agit souvent de berges concaves hautes (1,5 à 2m), taillées dans les alluvions de la plaine alluviale ou des basses terrasses. Elles sont également celles situées sur les rives opposées aux confluences des torrents affluents (pl. ph. 1-A ; fig. 4). Le sapement est très actif et souvent accompagné d'un enfoncement du lit de l'oued. L'absence de ripisylve facilite le recul rapide de ces berges et une modification permanente de la morphologie du chenal et de son emplacement.

La figure 2 montre l'exemple étudié à Larbaa Sehou, à proximité d'Oulad Aicha. Ici, l'oued développe des méandres divagants actifs, entraînant l'érosion active des berges et une forte mobilité du lit. L'analyse diachronique de l'évolution de ces berges entre 1970 et 2020 (50 ans), montre un déplacement par translation d'ensemble de la boucle du méandre vers l'ouest (aval) de plus de 100m (soit un déplacement moyen annuel d'environ 2m), et des déplacements latéraux du chenal variables de 88m à 107m.

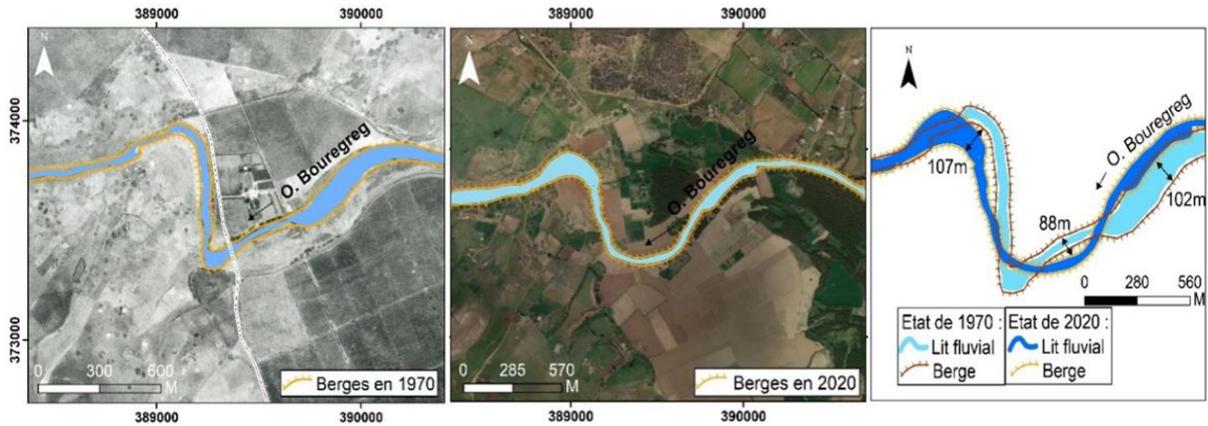


Figure 2 : Sapement des berges d'un méandre divagant à Larbaa Schoul à proximité d'Oulad Aicha entre 1970 et 2020 (comparaison des situations de photos aériennes de 1970 et des images satellitaires de Google Earth, mission 2020)

Dans la figure 3 on présente un exemple de sapement de berge dans le tronçon de Maaziz. Dans ce cas l'activité d'un cône de déjection situé sur la rive gauche, immédiatement en amont du pont de RR407, est à l'origine d'un déplacement du lit fluvial vers l'Est et de l'érosion de la berge de rive droite. Le recul de cette berge a été évalué d'environ 113m durant les 50 années, soit 2,26 m/an en moyenne.

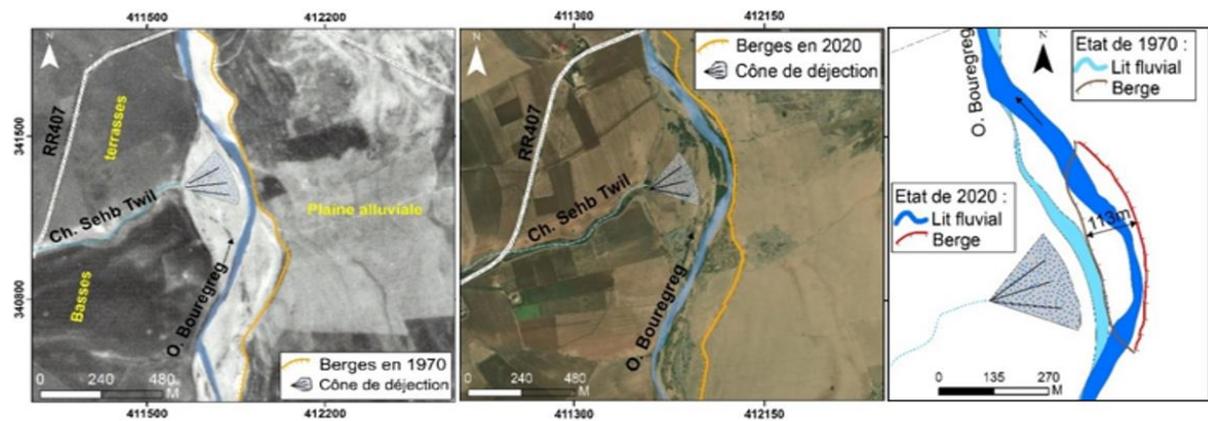


Figure 3 : Sapement des berges de la rive opposée à un cône de déjection latéral dans le tronçon de Maaziz en amont du pont de RR407 entre 1970 et 2020 (comparaison des situations de photos aériennes de 1970 et des images satellitaires de Google Earth, mission 2020)



Planche photos 1 : Exemples des berges sapées de l'Oued Bouregreg (A- Berge fortement sapée en rive gauche à Maaziz (26/08/2017) ; B- Berge moyennement sapée en rive droite à Maaziz (26/08/2017) ; C- Berge végétalisée faiblement sapée en rive droite à Larbaa Schoul (26/05/2021))

ii)- Les berges à sapement modéré ont une hauteur moyenne (1 à 1,5m) et sont façonnées dans les alluvions de la plaine alluviale et qui montrent une ripisylve herbacée et arbustive de

moyenne densité. Ce type est observé fréquemment à Maaziz près d'Ait Aissa (pl.ph. 1-B) et à Larbaa Sehoul à proximité d'Oulad Aicha.

iii)- Les berges à sapement faible présentent une hauteur faible (< 1m) et se caractérisent par une évolution très lente. Ce sont principalement les berges taillées loin du chenal actif, dans les formations limoneuses de la plaine alluviale. La ripisylve protège ces berges par son système racinaire et ralentit la progression de leur sapement lors des crues (pl. ph. 1-C). Ce type concerne également des tronçons protégés par quelques ouvrages anti-érosifs.

2.2.- Les conséquences morphologiques

L'étude diachronique du tracé du Bouregreg nous a permis d'apprécier l'évolution spatio-temporelle des berges du cours d'eau et de ses paramètres morphométriques depuis 1970 jusqu'à 2020 (fig. 4).

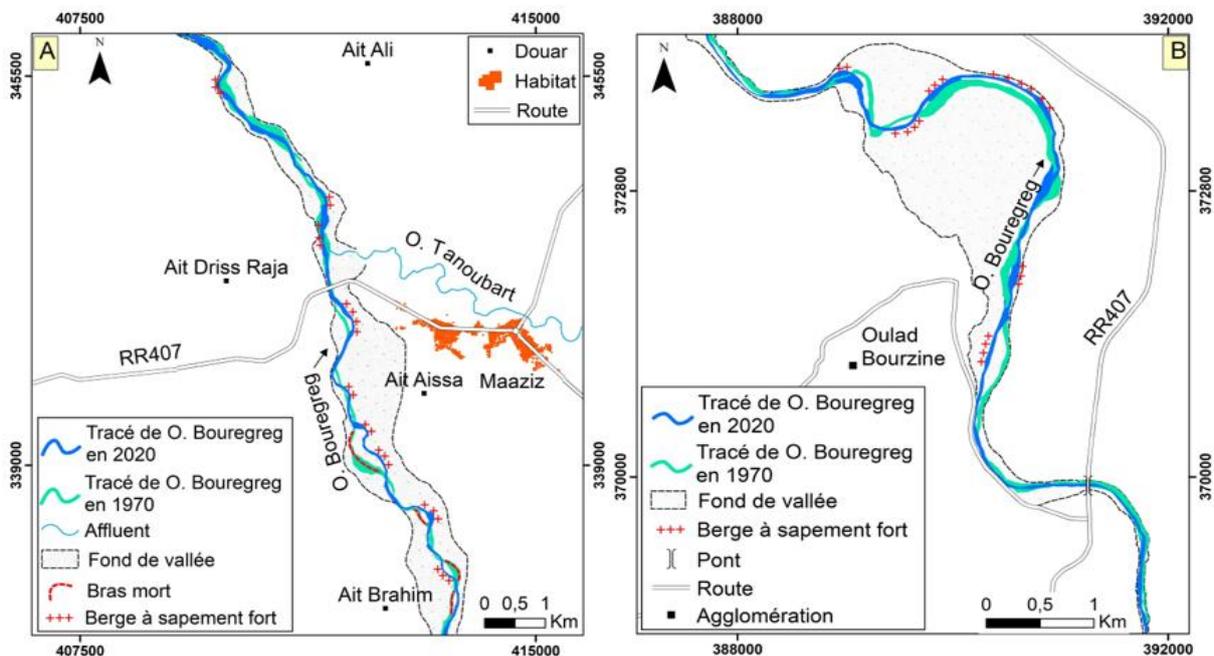


Figure 4 : Evolution du tracé du lit du Bouregreg à Maaziz (A) et à Larbaa Sehoul (B) entre 1970 et 2020

Dans les deux tronçons étudiés, les résultats montrent que le tracé de l'oued n'a pas subi de mutations importantes, conduisant à une véritable métamorphose fluviale, mais seulement des modifications morphologiques de détail sont observées ; elles concernent surtout la sinuosité du chenal et la largeur du lit de l'oued. A l'échelle du tronçon de Maaziz, les changements sont matérialisés par la déconnexion des chenaux et l'apparition des bras morts, avec une régression de la largeur du lit d'environ 19% entre 1970 et 2020 et l'augmentation de sa longueur de l'ordre de 6%. L'indice de sinuosité a enregistré une augmentation d'environ 6,1%. Concernant le tronçon aval de Larbaa Sehoul, la longueur du lit a diminué d'environ 1,8%, et presque 28,2% pour sa largeur. L'indice de sinuosité a enregistré aussi une régression de 2,6%. Cet amenuisement des indices morphométriques dans le tronçon aval de Larbaa Sehoul atteste fort probablement l'impact des oscillations des eaux de la retenue du barrage SMBA, située plus à l'aval (I. Sammaa, 2023).

2.3.- L'incidence sur les terres agricoles

Les superficies de terres agricoles exploitées actuellement sur les sols des basses terrasses et plaines alluviales du fond de vallée de Bouregreg sont évaluées d'environ 6,75 km² (soit 675 ha) dans le tronçon de Maaziz et 5,5 km² (soit 550 ha) dans le tronçon de Larbaa Sehoul. Ces terres sont soumises à l'action d'érosion par sapement des berges de l'oued ; ce qui engendre un risque préoccupant pour la population locale. En fait, les zones les plus vulnérables au processus d'érosion dans les deux tronçons sont celles des berges à sapement fort, situées

dans les concavités des méandres et dans les sites des rives opposées aux confluences et torrents latéraux (fig. 4). Par ailleurs, les interventions d'aménagement anti-érosives réalisées localement par la population, ont seulement une efficacité localisée.

Les résultats de l'étude diachronique de l'érosion des berges durant la période 1970-2020 (tab. 1), ont permis d'estimer les pertes en sols de terres agricoles durant les cinq dernières décennies. Dans le tronçon de Maaziz, elles sont évaluées de 78 hectares (23 ha sur la rive gauche et 55 ha sur la rive droite). Dans le cas de Larbaa Sehoul, elles sont de 73 hectares ; ces pertes concernent surtout les terres de rive gauche à l'Ouest des Jouanebs (44ha). Ainsi, d'après ces résultats, les pertes annuelles moyennes en surfaces des terres agricoles seraient d'environ 1,56 hectares à Maaziz et 1,46 hectares à Larbaa Sehoul.

Tableau 1 : Essai de quantification des superficies des pertes en terres agricoles par sapement de berges dans les tronçons de Maaziz et de Larbaa Sehoul entre 1970 et 2020

| Tronçon | Potentiel actuel en terres agricoles (ha) | Pertes rive gauche en 50 ans (ha) | Pertes rive droite en 50 ans (ha) | Pertes totales en 50 ans (ha) | Pertes annuelles moyennes (ha) |
|---------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Maaziz | 675 | 23 | 55 | 78 | 1,56 |
| Larbaa Sehoul | 550 | 44 | 29 | 73 | 1,46 |

Conclusion

L'érosion des berges de l'Oued Bouregreg constitue, donc, un risque hydro-géomorphologique majeur qui a des incidences notables sur le fonctionnement ordinaire du cours d'eau et les biens socio-économiques de la population locale. Ce processus est accéléré par l'irrégularité du régime hydro-climatique, la lithologie peu résistante des terrains encaissants et la granulométrie fine et hétérogène du faciès constitutif des berges... Les berges les plus dégradées sont celles situées dans les concavités des méandres et celles influencées par les activités des torrents et cônes de déjection. La dynamique des berges de Bouregreg a des conséquences multiples sur le style morphologique et le paysage fluvial. Les incidences socio-économiques sont matérialisées essentiellement par une perte progressive des terres agricoles estimées à 1,56 ha/an à Maaziz et 1,46 ha/an à Larbaa Sehoul. Ces pertes en sols ont certainement des implications significatives dans l'aggravation du risque de l'envasement du barrage SMBA situé à l'aval des tronçons étudiés.

Références bibliographiques

- Beudet G., 1969. Le plateau central marocain et ses bordures : Etude géomorphologique. Inframar. Rabat. 480p.
- Benmohammadi A., 1991. Erosion et sédimentation dans le bassin versant de l'Oued Bouregreg. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Mohamed V, Rabat, 244p.
- Laouina A., Coelho C., Ritsema C., Chaker M., Nafaa R., Fenjiro I., Antari M., Ferreira A. et Van Dijk S., 2004. Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global, analyse agro-hydrologique dans le bassin du Bouregreg (Maroc). Séch.15,1, pp. 66-77.
- Marghich A., 2004. Le bassin versant de Bouregreg (Maroc central) : Etudes hydrologique, hydrogéologique et hydrochimie des eaux. Thèse de Doctorat, Univ. SMBA, FS, DM, Fès.
- Sammaa I., 2023. Fonctionnement hydro-morphodynamique et mutations récentes de l'espace fluvial dans la vallée du Bouregreg en amont du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (plateau central, Maroc). Thèse de Doctorat, Univ. SMBA, FLSH Sais-Fès, 328p.
- Taous A., 2013. Cours d'eau et paysages fluviaux au Maroc : un patrimoine naturel fragile à protéger. Ouvrage collectif : ressources patrimoniales et développement local au Maroc et en Andalousie (Espagne), 276p, pub. FLSH Sais-Fès, 26, pp.125-151.

IMPACTS DE L'ÉROSION DES BERGES SUR LES TERRES AGRICOLES DANS LE BASSIN VERSANT DU MAYO-DORBO (MAYO-KEBBI OUEST, TCHAD)

GUIRKI Anastasie, MBELE ABBO Félix, ETAME SONE DIABE

Université de Ndjamena, Courriel : anastasieguirki5@gmail.com

Université de Maroua, Courriel : mbeleabbofelix2@gmail.com

Université de Maroua, Courriel : etamesonediabe@yahoo.com

Résumé : Le bassin versant du Mayo Dorbo en général et les tronçons d'étude en particulier connaissent ces dernières années une accélération des phénomènes érosifs sur les berges, due à de multiples facteurs d'origine climatique, géomorphologique et anthropique. Ce phénomène est d'un intérêt certain dans la mesure où il déstabilise sérieusement l'équilibre des terres agricoles, tout en occasionnant des crises socio-économiques non négligeables dans les terroirs environnants. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'érosion des terres agricoles sur l'équilibre des berges dans le bassin versant du Mayo Dorbo. Pour mener bien ladite étude, la méthodologie était fondée sur les observations et mesures de terrain, les enquêtes par questionnaire, les entretiens, et l'évaluation des pertes en terres, grâce à la mise en œuvre d'un système d'information géographique sous QGIS. À l'issue de l'étude, les résultats montrent que la pente du bassin du Mayo Dorbo présente une inclinaison faible avec des valeurs inférieures à 0,02%. Une analyse diachronique des méandres révèle un recul moyen des berges de l'ordre de 7,4m notamment entre 2014-2022, ce qui varie néanmoins d'une section à l'autre. Un tel niveau de recul déstabilise progressivement les modes d'occupation des terres agricoles (56%), les rendements des productions (27%), et exacerbe des conflits entre les paysans (17%). Pour lutter contre ce phénomène, plusieurs techniques antiérosives telles que le paillage, les seuils d'épandage, et la construction de rampe d'accès à l'eau pour les animaux ont été mis en œuvre par les populations riveraines, toutefois, ces mesures n'ont donné que des résultats mitigés.

Mots clés : érosion des berges, taux d'érosion, terres agricoles, bassin versant, Mayo Dorbo, Tchad

1. Introduction

Le milieu naturel tel qu'il soit, est une réalité dynamique. En effet, sa stabilité est précaire tant dans le temps que dans l'espace, à cause du fait que ce milieu intègre un ensemble de composantes dont les relations sont fondées sur des actions, interactions, ou réactions, susceptibles d'orienter l'évolution dudit milieu vers un cap plus ou moins différent. Cependant, même si ce postulat s'avère tangible, la perception actuelle la plus dominante tend à donner plus de place à une influence négativiste des hommes sur les milieux naturels, du fait d'une excroissance démographique et à cause d'une diversification poussée des modes de restructuration des espaces à la surface de la Terre (Picouet et *al.*, 2004 ; Mbélé Abbo, 2018).

L'appréhension des phénomènes érosifs à l'échelle d'un bassin versant obéit à ces mêmes principes. En effet, celui-ci concentre en son sein plusieurs composantes de nature et d'étendue différentes qui interagissent avec le cours d'eau. Dans son fonctionnement naturel, un cours d'eau échange avec les autres éléments du milieu, et donne par-là à voir des processus caractéristiques d'une dynamique évolutive dite normale. Mais lorsque l'emprise de l'homme sur le milieu devient importante, les dynamiques en manifestation s'avèrent parfois trop rapides ou trop lentes, selon les cas.

L'érosion hydrique est donc un problème environnemental dans le sens où ce processus construit et déconstruit les reliefs tout en réaménageant des fois les modes d'occupation des espaces agricoles. Au Tchad comme partout ailleurs, la détérioration des terres constitue un problème d'actualité et devient porteur d'important d'enjeux, compte tenu de la pertinence de

ses impacts (Moussa et Redessa, 2011 ; Kana 2017). L'appréhension du phénomène à l'échelle d'un cours d'eau consiste dès lors à évaluer ses impacts tant sur le milieu naturel que sur les sociétés humaines en présence.

La zone d'étude est située au sud du Tchad et notamment dans la région du mayo Kebbi-ouest. Elle est comprise entre les 9°31'12,00" et 9°39'36,00" degré de latitude nord, et 14°50'24,00" et 14°58'48,00" de longitude Est (figure 1).

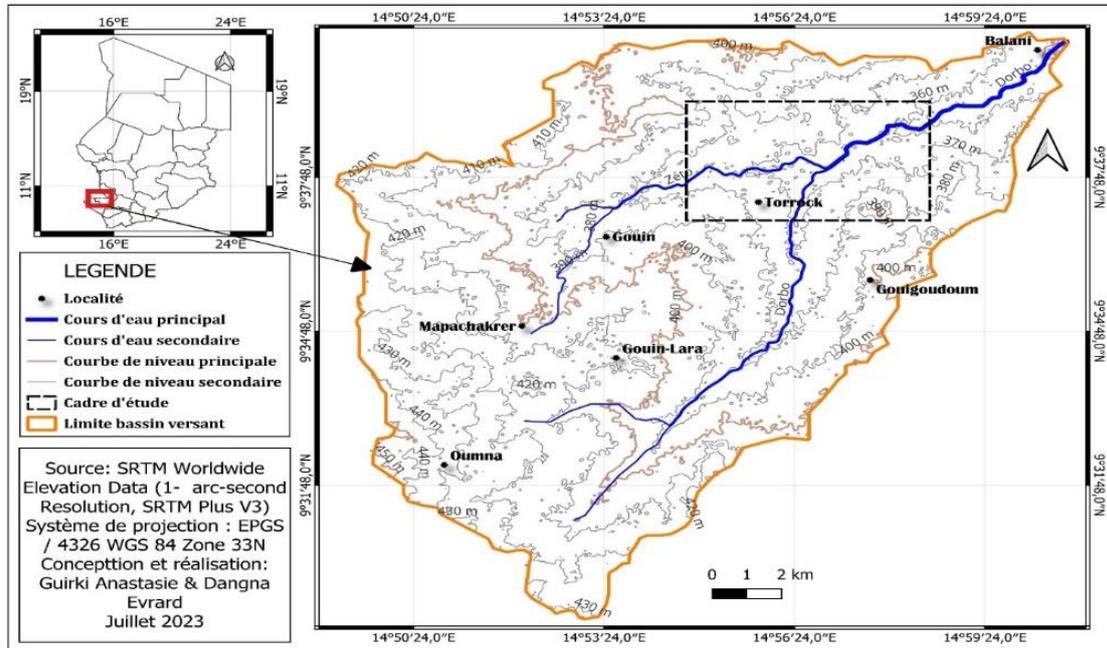


Figure 11. Localisation du bassin versant du mayo Dorbo

Telle que présentée dans la figure ci-dessus, cette zone est un sous bassin du Mayo-Dallah. Elle est limitée au Nord par Tikeme, au Sud par Rong, à l'Ouest et à l'Est par Fama et Bougaroua.

2. Matériels et méthodes

Pour mener bien ladite étude, la méthodologie était fondée sur les observations et mesures de terrain, les enquêtes par questionnaire, les entretiens, et l'évaluation des pertes en terres, grâce à la mise en œuvre d'un système d'information géographique sous QGIS.

2.1. Observations de terrain et mesures de terrain

Les observations de terrain se résument aux descentes exploratoires, de même qu'à l'appréciation du paysage en général et des berges en particulier. Il était question de marcher le long des drains structurant l'espace, et de percevoir les différentes réalités morphodynamiques qui s'y observent. Lors de ces activités, des prises de vue et des mesures ont été faites, et les coordonnées GPS relevées, afin de se faire une idée de l'importance des processus en présence.

2.2. Enquêtes par questionnaire

Pour ce qui est des enquêtes, elles ont été particulièrement orientées vers l'appréhension des méthodes et techniques d'exploitation de l'espace employées, la perception et/ou l'évaluation de la dynamique du cours d'eau, et enfin vers l'appréciation des différents effets subis par les riverains. Pour ce faire, un échantillon représentatif de 90 ménages, répartis dans 4 villages a

été interrogé. Tous les questionnaires ont par la suite été dépouillés, traités et analysés grâce au logiciel SPSS.

2.3. Entretiens

Dans le cadre de cette activité de recherche, une guide d'entretien a été élaborée et administré à chacun des personnalités administratives ou traditionnelles identifiées comme personnes ressources. Il s'agissait entre autres des Chefs des villages, des Responsables locaux d'agriculture, d'élevage, d'environnement, et l'ANADER de Pala. Ces personnes ont chacun apporté d'importants éclaircissements sur l'évolution du milieu, ainsi que sur les impacts liés aux érosions accélérées des terres.

2.4. Montage d'une base de données géoréférencées

Il s'agit d'un procédé incontournable dans ce genre d'étude dans la mesure où il offre des facilités en matière d'analyse diachronique et d'évaluation des effets de l'érosion sur les terres. Pour ce faire, des images SRTM, Google Earth des années 2014 et 2022 ont été téléchargées et découpées selon les dimensions de la zone d'étude. La compilation de ces supports sous Qgis 2.6.1, associée aux données de terrain ont facilité les analyses diachroniques et la quantification des pertes en terre.

3. Résultats

Il se dégage globalement des analyses faites que les pentes sont faibles, les activités érosives s'observent différemment selon les sensibilités pédo-géomorphologiques, tandis que les effets et impacts s'avèrent non négligeables tant sur les berges que sur les activités socio-économiques.

3.1. Un relief globalement plat et à faibles pentes

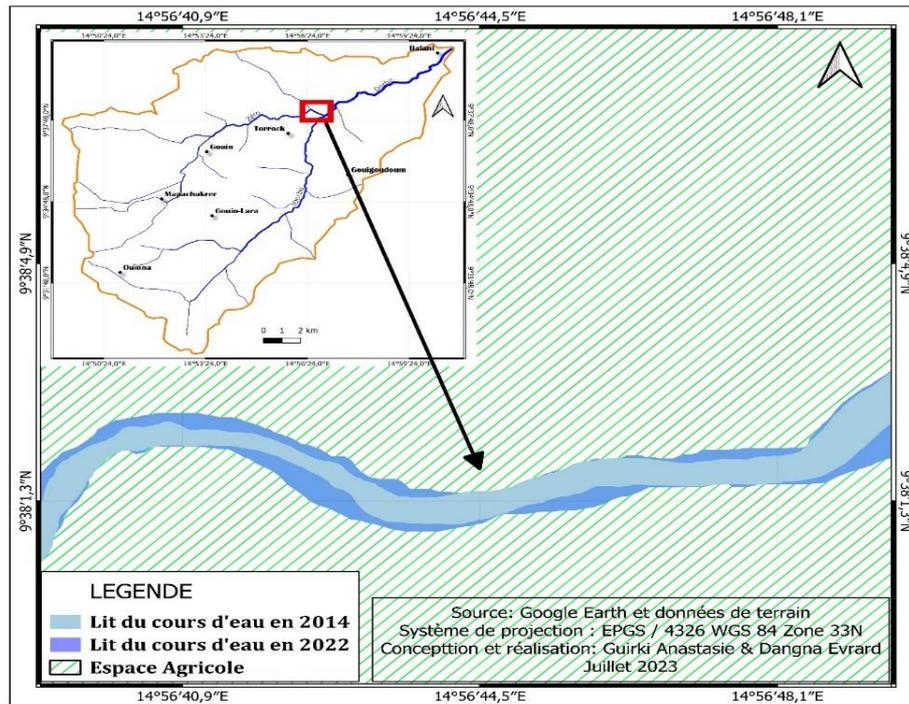
Le bassin du Mayo Dorbo présente globalement des inclinaisons faibles, avec une moyenne inférieure à 0,02 %. Au total, les pentes ne dépassent pas 0,85 % sur plus de 80 % du terrain d'étude. Une telle organisation géomorphologique accentue les infiltrations, contribuant par-là à la généralisation des badlands, du fait des ruissellements sur des sols déjà fragiles.

3.2. Des particularités pédo-géomorphologiques plus ou moins différentes de l'amont à l'aval

Comme développé plus haut, les formes du drainage sont différentes selon que l'on se situe en amont ou en aval du bassin versant. Les particularités pédo-géomorphologiques de l'amont permettent au cours d'eau de présenter des lits légèrement plus étroits, tandis qu'en aval, on retrouve un vaste lit riche en dépôts sédimentaires. L'alternance qui s'établit alors entre ces formes de lit contribue à l'animation des glissements alternatifs de berges.

3.3. Des dynamiques de berge non négligeables dans l'ensemble

L'attaque des berges du Mayo Dorbo par le phénomène d'érosion n'est pas perceptible de la même façon partout. Certaines zones sont plus touchées que d'autres tel que présenté plus haut, d'où la nécessité d'établir une cartographie des zones d'érosion (figure 2). Le constat qui s'en dégage est que les berges concaves et les secteurs riches en obstacles divers subissent normalement plus l'érosion. Cela est plus récurrent pendant la période des hautes eaux qui s'établissent au mois d'août, chaque année. Toutefois, le recul général évalué des berges sur la base des données Google Earth est de 7,4m, soit une moyenne annuelle de 0,92m.



Source : Google Earth et données de terrain 2022

Figure 2. Dynamique des berges du Mayo Dorbo entre 2014 et 2022

Il est en outre important de relever que les dimensions actuelles du Mayo Dorbo ne sont pas les mêmes que celles des années antérieures. Les modifications naturelles sont visibles au fur et à mesure que les années passent. Pour ce faire, les sections identifiées ont fait l'objet de mesures pour évaluer l'impact de l'élargissement des berges sur les terres agricoles (tableau 1).

Tableau 4. Evaluation des disparités morphodynamiques par section du Mayo Dorbo en 2022

| Section | Rive gauche (cm) | Rive droite (cm) | Total (cm) |
|-----------|------------------|------------------|------------|
| Section 1 | 41,66 | 20,55 | 31,10 |
| Section 2 | 118 | 71,11 | 94,55 |
| Section 3 | 107,11 | 32,44 | 69,77 |

Source : Mesures de terrain, 2022

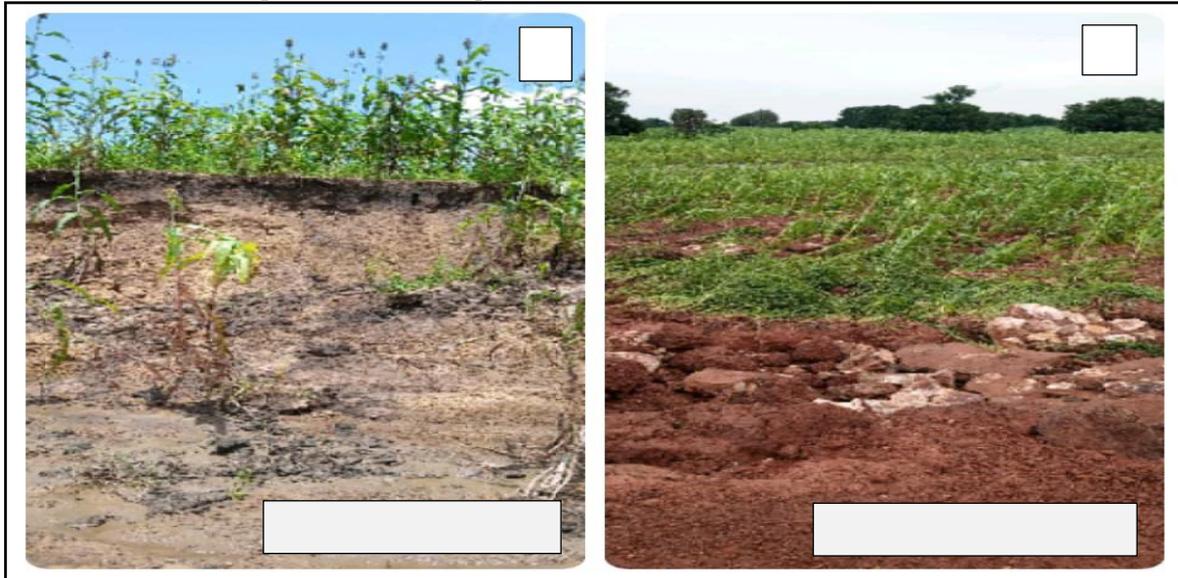
Le tableau 1 présente les différences observables dans le processus d'élargissement du cours d'eau en 2022. Cela s'explique par le fait que l'on est en présence de trois types de sols plus ou moins différents. Le sol du Mayo Zéto (section 1) est sableux, alors que celui de Dorbo (section 2 et 3) est limono-sableux, confortant les disparités érosives dans l'espace.

3.4. Des impacts considérables sur le milieu et les activités socio-économiques

L'action de l'érosion sur la dégradation des berges s'observe plus en saison de pluie. C'est une période pendant laquelle les dégâts sont très visibles puisque les champs situés en bordure et/ou en aval du Mayo sont régulièrement frappés. Les impacts immédiats du dégât se traduisent à plusieurs niveaux (planche 1).

Les plus observables sont entre autres ceux liés au déracinement des plantes cultivées (photo A, planche1), au recouvrement des cultures par des boues, surtout en zone d'accumulation

(photo B, planche 1). La couche arable et la plus fertile est souvent déstructurée et emportée par l'eau affectant la productivité des parcelles.



Prises de vue : Guirki, Août 2022

Planche photographique 1. Impacts de l'érosion des berges sur les champs au bord du mayo Dorbo

Les images ci-dessus présentent les champs de mil subissant l'impact des débordements des eaux qui ont eu lieu au mois d'Août. Ces impacts varient selon la position des parcelles en ce sens qu'en dehors d'être détruits, certaines parcelles peuvent être amendées grâce aux dépôts limoneux riches en fertilisant. Vue sous cet angle, il revient des enquêtes menées sur le terrain que 56% des acteurs estiment que le recul des berges déstabilise les modes d'occupation des terres agricoles, tandis que 27% le voient comme un facteur limitant pour le rendement des spéculations, alors que 17% l'entrevoient comme facteur d'exacerbation des conflits entre les exploitants du terroir.

Compte tenu de ce contexte et partant du fait que la terre constitue ici comme ailleurs un capital important, les populations riveraines ont mis sur pied diverses stratégies afin de juguler le problème. Il s'agit entre autres du paillage des parcelles afin de réduire l'impact des gouttelettes d'eau sur le sol et freiner la vitesse du ruissellement, la mise en place des seuils d'épandage suivis d'une zone de dissipation d'énergie des écoulements, voire la construction des rampes d'accès à l'eau afin de limiter la dégradation des points d'abreuvement et l'effritement des berges lors des descentes et remontées du bétail.

4. Conclusion

Il dérive de tout ce qui précède que l'érosion des berges dans le bassin versant du Mayo Dorbo est un processus continu, dont les effets sur le milieu et les sociétés riveraines s'accroissent avec le temps, selon la variabilité des contextes d'exploitation, ou au gré des mutations environnementales en présence du fait de la variabilité climatique. La forme du modelé, l'organisation des pentes et les particularités pédologiques s'associent à la diversification des modes d'exploitation du terroir pour conforter l'exacerbation d'une érosion accélérée et généralisée. La vulnérabilité des berges ici est en outre due à la mise en œuvre d'un mode d'écoulement plus ou moins concentré, contribuant aussi à une modification latérale et verticale des drainages. Ce phénomène impacte beaucoup sur les terres agricoles de même que sur l'économie des riverains. Il s'agit dès lors d'un problème auquel des solutions ont été apportées, mais qui jusqu'à lors s'avèrent d'actualité.

5. Bibliographie

- AMOR BKHAIRI, « Suffusion et érosion hydrique en milieux semi-arides, le cas des Hautes Steppes tunisiennes (Tunisie centrale) », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 6 | 2012, mis en ligne le 26 février 2012, consulté le 26 Mai 2022. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/2246> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2246> consulté le 16/11/2023
- BRAVARD J.P., 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières, Houille blanche N°7/8, 8 pages, <http://www.shf-lhb.org> or <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1991047>, consulté le 12/02/2023
- DOUVOROU, J-B.FAYDE FATNA, SONTIA SADATE S. A., 2010. Erosion hydrique en milieu urbain : cas de la ville de Maroua, Mémoire de DIPES II Géographie, Université de Maroua, 166 p.
- KAINARAMSOU DJARSOUNA., 2011. Érosion des berges des cours d'eau en milieu urbain sahélien : le cas du mayo Kaliao dans la ville de Maroua, Mémoire Master II recherche de Géographie, Université de Maroua, 176p.
- KANA C. E. 2017. Suivi par imagerie satellite de la dynamique des berges du Logone, entre la retenue de maga et le lac Tchad, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°30, Juin 2017, pp. 297-315, [En ligne]<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, consulté le 24/11/2023
- MBÉLÉ ABBO F. 2018, Analyse morphohydrologique du lit majeur de la Bénoué : de la confluence avec le mayo-Kebi à la frontière Cameroun-Nigéria, Thèse de Doctorat Ph D, Université de Ngaoundéré, 404p
- MOUSSA, A et REDESSA, H., 2011. Les fonctions socio-économiques et spatiales des mayo dans la ville de Maroua, Mémoire DIPES II de Géographie, Université de Maroua, 156p.
- PASSINRING, K. 2016. Effets de l'écoulement des tributaires sur la dynamique des lacs de Léré (Mayo – Kebbi Ouest/Tchad) The flowing out effects of tributary upon Léré's lakes dynamics (Chad/West Mayo–Kebbi), *Geo-Eco-Trop.*, 2016, 40, 3, n.s. 191-200, https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_403_01.pdf, consulté le 23 octobre 2023
- PICOUET, M. MONGI SGHAIER, GENIN D. ALI ABAAB, GUILLAUME, H. ET MOHAMED ELLOUMI (Dir) 2004. Environnement et sociétés rurales en mutation : approches alternatives, Collection Latitudes 23, IRD Éditions, Marseille (France), 392 p [DOI : 10.4000/books.irdeditions.1076](https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.1076) consulté en ligne le 27/01/2024
- SAINT LAURENT D., & GUIMONT P., 1999. Dynamique fluviale et évolution des berges du cours inférieur des rivières Nottaway, Broadback et de Rupert, en Jamésie (Québec) in *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 53, n° 3, 1999, p. 389- 399 URI: <http://id.erudit.org/iderudit/004866ar>/DOI: 10.7202/004866ar, consulté le 08/02/2023

PRIORITISATION DES SOUS-bassins VERSANT VULNERABLES A L'EROSION HYDRIQUE. CAS D'ETUDE : OUED DRADER, PRERIF OCCIDENTAL MAROC

Najia FARTAS¹, Brahim BENZOUAGH^{1*}, Bouchta EL FELLAH¹, Mohamed MASTERE¹, Mohammed EL BRAHIMI¹ et Khaled Mohamed KHEDHER²

1-Département de Géomorphologie et Géomatique (D2G), Institut Scientifique, Université Mohammed-V de Rabat. Avenue Ibn Battouta, P.B 703, 10106 Rabat-Ville, Maroc

brahim.benzougagh@is.um5.ac.ma

2- Département de génie civil, Collège d'ingénierie, Université du roi Khalid, Abha 61421, Arabie saoudite, kkhedher@kku.edu.sa

RESUME: L'érosion hydrique représente un défi environnemental important dans le monde entier, entraînant une détérioration des sols et des répercussions néfastes sur les écosystèmes locaux. Pour que les efforts de conservation et de gestion des ressources en eau soient efficaces, il est primordial de donner la priorité aux sous-bassins versants les plus exposés à l'érosion hydrique. L'approche utilisée dans ce cas d'étude repose sur l'analyse morphométrique, qui consiste à étudier les caractéristiques géométriques et hydrologiques des bassins versants. Des paramètres tels que la longueur du cours d'eau, la pente du terrain, la densité de drainage et d'autres mesures sont utilisés pour évaluer la vulnérabilité des sous-bassins versants à l'érosion hydrique. En utilisant des outils géospatiaux et des techniques d'analyse, pour calculer les paramètres morphométriques et afin d'élaborer une carte de Prioritisation des sous-bassins versants les plus vulnérables. Les résultats de présente étude révèlent que les sous-bassins versants SW-1, SW-3, SW-4 et SW-5 sont les plus exposés à l'érosion hydrique, représentant collectivement 47,58 % de la superficie totale du bassin versant. Les sous-bassins versants SW-6, SW-7 et SW-8, couvrant 39,8 % de la superficie du bassin versant, présentent également une vulnérabilité significative. En revanche, le sous-bassin versant SW-5 est le moins vulnérable, ne représentant que 12,58 % de la superficie totale du bassin versant.

Les résultats de cette analyse morphométrique peuvent servir de guide pour la planification et la mise en œuvre de mesures de conservation adaptées. Par exemple, des actions telles que la construction de terrasses, la plantation d'espèces végétales appropriées ou la mise en place de pratiques de gestion des sols peuvent être mises en œuvre dans les sous-bassins versants prioritaires afin de réduire l'érosion hydrique.

Mots-clés: Prioritisation, Analyse Morphométrique, Erosion hydrique, Bassin versant, Oued Drader

PRIORITIZATION OF SUB-WATERSHEDS VULNERABLE TO WATER EROSION. CASE STUDY: OUED DRADER, WESTERN PRERIF-MOROCCO

ABSTRACT: Water erosion represents a major environmental challenge worldwide, leading to soil deterioration and adverse impacts on local ecosystems. For conservation and water resource management efforts to be effective, it is essential to prioritize the sub-watersheds most at risk from water erosion. The approach used in this case study is based on morphometric analysis, which involves studying the geometric and hydrological characteristics of watersheds. Parameters such as stream length, land slope, drainage density and other measures are used to assess the vulnerability of sub-catchments to water erosion. Using geospatial tools and analysis techniques, morphometric parameters are calculated to develop a prioritization map of the most vulnerable sub-watersheds. The results of this study reveal that sub-watersheds SW-1, SW-3, SW-4 and SW-5 are the most exposed to water erosion, collectively representing 47.58% of the total watershed area. Sub-watersheds SW-6, SW-7 and SW-8, covering 39.8% of the watershed area, also show significant vulnerability. On the other hand, the SW-5 sub-watershed is the least vulnerable, representing only 12.58% of the total watershed area.

The results of this morphometric analysis can serve as a guide for the planning and implementation of appropriate conservation measures. For example, actions such as building terraces, planting appropriate plant species or implementing soil management practices can be implemented in priority sub-watersheds to reduce water erosion.

Keywords: Prioritization, Morphometric Analysis, Water erosion, watershed, Drader River.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène environnemental préoccupant qui entraîne des conséquences néfastes sur les terres agricoles, les écosystèmes et les ressources en eau. Dans de nombreuses régions du monde, y compris le bassin versant de l'Oued Drader dans la région du Pré-Rif au Maroc, la gestion de l'érosion hydrique est un défi majeur. La priorisation des sous-bassins versants les plus vulnérables à l'érosion est essentielle pour une gestion efficace des ressources et la mise en place de stratégies de conservation adaptées.

Dans cette étude, nous proposons une approche basée sur l'analyse morphométrique et les outils géospatiaux pour la priorisation des sous-bassins versants en fonction de leur vulnérabilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Drader. L'analyse morphométrique est une méthode géospatiale qui utilise des paramètres géométriques et hydrologiques tels que la longueur du cours d'eau, la pente du terrain, la densité de drainage et d'autres caractéristiques pour évaluer la susceptibilité d'un bassin versant à l'érosion hydrique.

En utilisant des données géographiques et des techniques d'analyse géospatiale avancées, nous allons générer une carte de priorité qui mettra en évidence les sous-bassins versants les plus vulnérables à l'érosion hydrique. Cette cartographie nous permettra d'identifier les zones à haut risque qui nécessitent des mesures de conservation et de gestion spécifiques pour réduire l'érosion.

Les résultats de cette étude fourniront des informations précieuses pour les décideurs, les planificateurs et les gestionnaires des ressources en eau et sol dans la région du Pré-Rif. En identifiant les sous-bassins versants les plus vulnérables, ces résultats permettront de concentrer les efforts et les ressources sur les zones prioritaires pour une gestion efficace de l'érosion hydrique.

1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Oued Drader fait partie intégrante du vaste bassin versant de l'Oued Ouergha, couvrant une superficie d'environ 60 Km² avec un périmètre de 60 Km. Le bassin versant de l'Ouergha se trouve au sud de la zone d'étude, tandis que le bassin versant de Lamjaara se situe à l'est, le bassin versant de Zoumi au nord, et l'Oued Joumouaa à l'ouest (Fig.1).

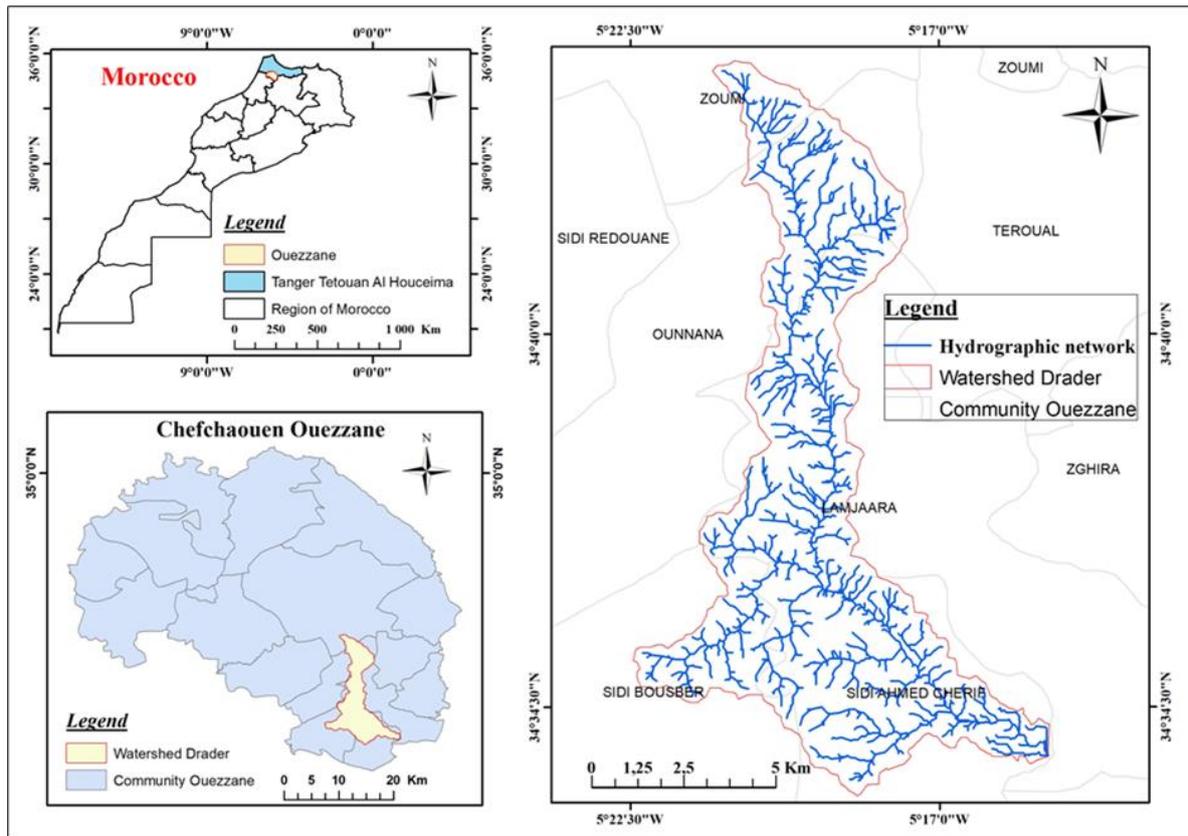


Figure 1. Situation de la zone d'étude.

La zone d'étude présente un relief fortement vallonné, avec un dénivelé notable allant de 83 à 790 mètres, ce qui contribue au risque d'érosion hydrique. En ce qui concerne le climat, la région est caractérisée par un climat méditerranéenne subhumide, avec des hivers tempérés. Les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à environ 870 mm. Deux pics de précipitations sont observés, l'un en décembre et l'autre en février, tandis que les mois de juin à septembre sont relativement secs. Ainsi, les étés sont chauds sans véritable phase de sécheresse, tandis que les hivers sont doux et extrêmement humides. La température annuelle moyenne est de 18°C, avec des étés agréables avec une température maximale mensuelle moyenne de 27°C, et des hivers doux avec une température minimale mensuelle moyenne de 11°C (Fartas et al., 2022).

Sur le plan géologique, le bassin versant de l'Oued Drader est situé dans la zone pré-rifaine, liée à l'histoire géologique du système alpin méditerranéen. Des mouvements tectoniques ont formé de nombreuses écaïlles jurassiques recouvertes de marnes dans la région. Les zones intérieures de la chaîne Rifain ont été principalement affectées par une deuxième série de mouvements tectoniques. La série tertiaire s'est séparée de la zone intra-Rifain par un chevauchement, formant ainsi la nappe d'Ouezzane qui s'est déplacée sur le Prérif. Les principales roches du bassin versant de l'Oued Drader sont les marnes bleues du Crétacé, les marnes jaunâtres de l'Oligocène interstratifiées avec des bancs de calcaire, et les marnes sableuses grises de l'Eocène supérieur, appartenant à la nappe d'Ouezzane.

2. MATERIEL ET METHODES

Un modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de (30 m sur 30 m) a été utilisé pour la délimitation et la caractérisation du bassin versant de l'Oued Drader. Le réseau hydrographique a permis de délimiter 08 sous-bassins. Des informations provenant de la littérature, complétées par des missions de terrain, ont été utilisées pour étayer et vérifier les données primaires de l'analyse. Finalement, le logiciel Qgis a été utilisé pour analyser les

paramètres morphométriques et hiérarchiser le bassin versant. Dans l'analyse morphométrique, à la fois des paramètres linéaires et des paramètres de forme ont été utilisés pour la hiérarchisation des sous-bassins. Les paramètres linéaires utilisés dans cette étude étaient l'ordre des cours d'eau (u), le nombre de cours d'eau (Nu), la longueur du cours d'eau (Lu), la longueur moyenne du cours d'eau (Lsm), la texture du drainage (Dt), la longueur de l'écoulement en surface (Lg), le rapport de bifurcation (Rb), la densité du drainage (Dd) et la fréquence des cours d'eau (Fs). Les paramètres de forme utilisés étaient le facteur de forme (Ff), le rapport de circularité (Rc), le rapport d'allongement (Re) et le coefficient de compacité (Cc). Pour la hiérarchisation des sous-bassins, la valeur la plus élevée des paramètres linéaires était classée en premier rang, la deuxième valeur la plus élevée était classée en deuxième rang, et ainsi de suite, la valeur la plus faible était classée en dernier rang. De même, la valeur la plus basse des paramètres de forme était classée en premier rang, la valeur inférieure suivante était classée en deuxième rang, et ainsi de suite, la valeur la plus élevée était classée en dernier rang. Finalement, le classement des sous-bassins versants a été déterminé en attribuant la priorité la plus élevée en fonction de la valeur la plus élevée pour les paramètres linéaires et de la valeur la plus basse pour les paramètres de forme (Nooka Ratnam et al., 2005, Benzougagh et al., 2022).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans la présente étude, une analyse morphométrique des paramètres, à savoir l'ordre des cours d'eau, la longueur des cours d'eau, le ratio de bifurcation, le ratio de relief, la densité du drainage, la fréquence des cours d'eau, la texture du drainage, le facteur de forme, le ratio de circularité, le ratio d'allongement, la superficie, le périmètre, la longueur et la largeur de tous les sous-bassins versants, a été réalisée en utilisant les formules mathématiques pour chaque paramètre. L'objectif principal est de faire la Prioritisation des sous-bassin versants de l'Oued Drader.

A la base des paramètres linéaires et de formes, Les valeurs des paramètres composés (Cp) de huit sous-bassins versants de l'Oued Drader ont été calculées et le classement de priorité est indiqué dans la figure 2. Les sous-bassins versants SW1, SW3, SW4 et SW5 reçoit la plus haute priorité, suivi par les sous-bassins versants SW6, SW7 et SW8 ayant une priorité moyenne, tandis que SW2 a une priorité faible. La plus haute priorité indique un degré plus élevé d'érosion dans le sous-bassin versant particulier, ce qui en fait une zone potentiellement adaptée à l'application de mesures d'urgence de conservation des sols. La carte de priorité finale de la zone d'étude est présentée dans la figure 3, ce qui permet d'appliquer en premier lieu des mesures de conservation des sols dans la zone des sous-bassins versants SW1, SW3, SW4 et SW5 puis dans les autres sous-bassins versants en fonction de leur priorité.

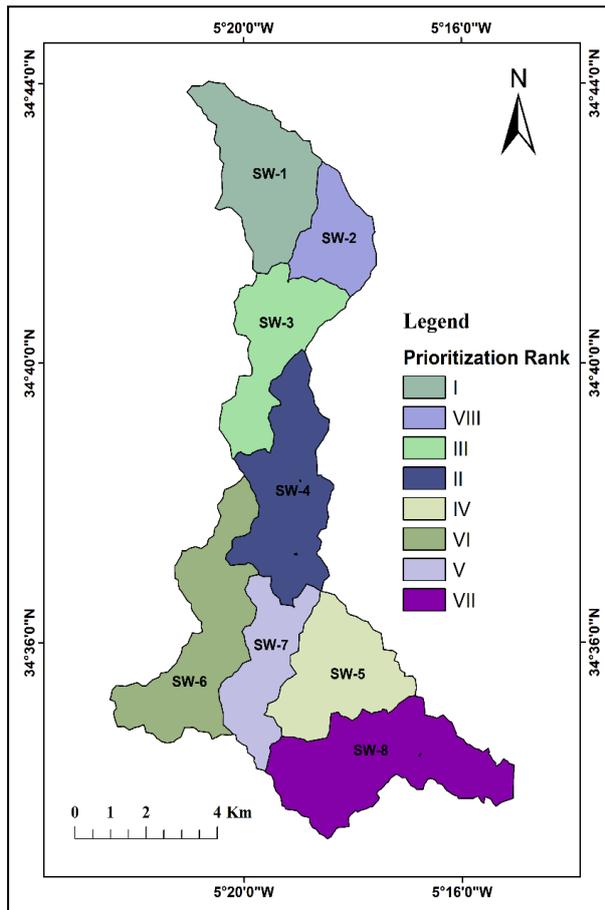


Figure 2: Classement par ordre de priorité

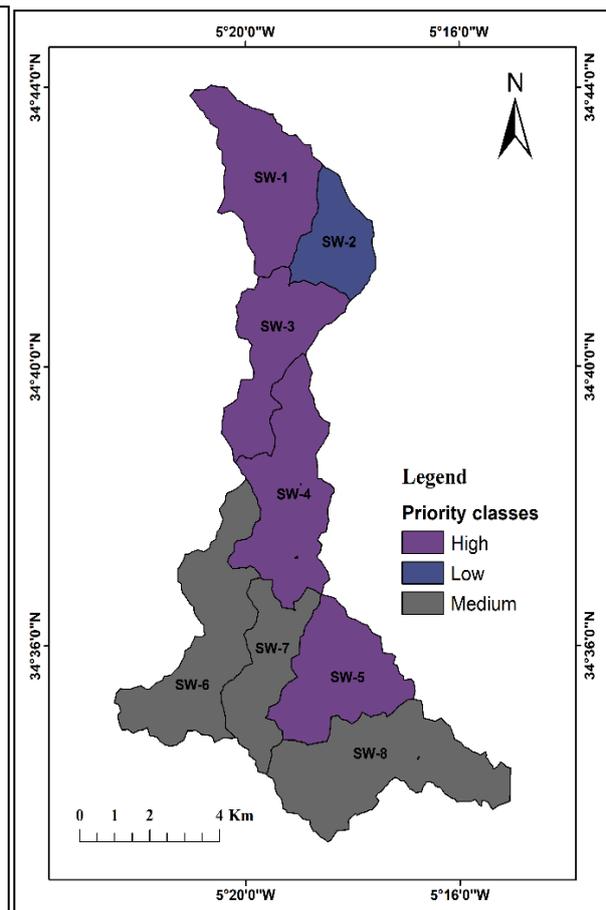


Figure 3 : Les classes de priorité des sous-bassins versants.

CONCLUSION

La hiérarchisation des bassins versants est l'un des aspects les plus importants de la préparation des programmes de développement et de gestion durable des bassin versant. La présente étude démontre l'utilité des techniques de télédétection et de système d'information géographique (SIG) dans la hiérarchisation des sous-bassins versants de l'Oued Drader basée sur l'analyse morphométrique. Tous les sous-bassins versants présentent un réseau hydrographique de type dendritique à sous-dendritique avec une texture de drainage importante. Les propriétés morphométriques des sous-bassins distincts démontrent leur influence respective sur la réponse hydrologique des sous-bassins versants. Les différents paramètres morphométriques de chaque sous-bassin ont été classés en fonction de leur susceptibilité au risque d'érosion des sols. Les méthodes de hiérarchisation basées sur le paramètre composé (Cp) avec l'aide des techniques SIG identifient les sous-bassins versants: SW1, SW3, SW4 et SW5 comme les plus vulnérables aux risques élevés d'érosion. Une attention immédiate envers les mesures de conservation des sols et de l'eau est nécessaire dans ces sous-bassins pour préserver les terres de toute érosion supplémentaire et réduire les risques naturels possibles dus à l'érosion. Les résultats de cette étude sera utile pour les décideurs et les responsables pour les programmes de développement durable des bassins versants.

Références bibliographiques

ABDETA, G. C., TESEMMA, A. B., TURA, A. L., & ATLABACHEW, G. H. (2020). *morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds and management planning and*

- practices in gidabo basin, southern rift valley of ethiopia*. applied water science, 10(7), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01239-7>
- BENZOUGAGH, B., MESHAM, S. G., FELLAH, B. E., MASTERE, M., EL BASRI, M., OUCHEN, I., ... & TURYASINGURA, B. (2023). MAPPING OF LAND DEGRADATION USING SPECTRAL ANGLE MAPPER APPROACH (SAM): THE CASE OF INAOUENE WATERSHED (NORTHEAST MOROCCO). MODELING EARTH SYSTEMS AND ENVIRONMENT, 1-11. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S40808-023-01711-8](https://doi.org/10.1007/S40808-023-01711-8)
- FARTAS, N., EL FELLAH, B., MASTERE, M., BENZOUGAGH, B., & EL BRAHIMI, M. (2022). *potential soil erosion modeled with rusle approach and geospatial techniques (gis tools and remote sensing) in oued joumouaa watershed (western prerif-morocco)*. the iraqi geological journal, 47-61. <https://doi.org/10.46717/igj.55.2b.5ms-2022-08-21?>
- FARTAS, N., BOUCHTA. EL, MOHAMED, M., & BRAHIM, B. MOHAMMED. EL, (2022). *physico-chemical characterization and evaluation of soil structural stability in the oued joumouaa watershed (western prerif)*. the iraqi geological journal, 63-78. <https://doi.org/10.46717/igj.55.2a.5ms-2022-07-21>
- HORTON, R. E. (1945). *erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology*. geological society of america bulletin, 56(3), 275. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>
- STRAHLER, A. N. (1952). *dynamic basis of geomorphology*. geological society of america bulletin, 63(9), 923. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>
- STRAHLER, A. N. (1957). *quantitative analysis of watershed geomorphology*. eos, transactions american geophysical union, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>

USING GPS, REMOTE SENSING, AND GEOAI TECHNIQUES TO MONITOR GEOMORPHOLOGICAL VARIATIONS IN THE MOULOUYA ESTUARY FROM 1956 TO 2023.

HLAL Mohammed ^{1*}, SBAI Abdelkader ¹, BENRBIA Khadija ¹, CWICK Gary J. ², EL HARRADJI Abderrahmane ¹ & SAIDI Abdelouahid ³

¹ Dept. of Geography, Mohammed I University, 60000, Oujda, Morocco.

² Dept. of Physics & Eng. Physics, Southeast Missouri State University, Cape Girardeau, MO 63701, USA.

³ Department of Geography, Polydisciplinary Faculty of Taza, Morocco

*Correspondence: mohammed.hlal@ump.ac.ma

ABSTRACT: The Moulouya Estuary, a unique and critically crucial coastal ecosystem in north-eastern Morocco, has undergone significant morphological transformations over several decades. To analyze these changes comprehensively, we present an approach that merges Global Positioning System (GPS) data, remote sensing analysis, and advanced machine learning techniques. Our study spans 67 years, from 1956 to 2023. We utilize a diverse dataset, including historical aerial photographs, multi-spectral satellite data from Landsat, and field-derived GPS measurements. We employ image processing algorithms for orthorectification and radiometric correction, followed by image differencing and spectral analysis to quantify spatial changes, erosion/sedimentation rates, and variations. Leveraging the power of GEOAI, we implement classification algorithms to map and classify geomorphological features, then apply a regression model to predict the rate and trajectory of future changes. The study has three primary goals as we explore geomorphological variations in the Moulouya estuary. The first identifies spatial and temporal patterns of past and recent geomorphological variations within the estuary. The second is determining critical drivers of change, including climate fluctuations, riverine inputs, the impact of human activities, and coastal processes. The last goal is to analyze trends and make future predictions regarding the estuary's morphological evolution. After spatial analysis, we found that the average shoreline retreat in Moulouya has been 21 m/year over 67 years. The sediment budget at the Moulouya estuary has experienced significant variation. On the West bank, the erosion rate is 16 m/year, totalling 1083 m between 1956 and 2022. This scientific paper contributes to a deeper understanding of the Moulouya Estuary's dynamic geomorphology, providing valuable insights for coastal management, environmental protection, and sustainable ecosystem utilization.

Keywords: Moulouya Estuary, ecosystem, GPS, human activities, remote sensing, GEOAI.

SUIVI DES VARIATIONS GÉOMORPHOLOGIQUES DANS L'ESTUAIRE DE LA MOULOUYA (1956-2023) PAR GPS, TÉLÉDÉTECTION ET GEOAI.

RESUME: L'estuaire de la Moulouya, un écosystème côtier unique et d'une importance capitale dans le nord-est du Maroc, a connu d'importantes transformations morphologiques sur plusieurs décennies. Pour analyser ces changements de manière exhaustive, nous présentons une approche qui combine des données GPS, des analyses de télédétection et des techniques avancées d'apprentissage automatique. Notre étude couvre une période de 67 ans, de 1956 à 2023. Nous utilisons un ensemble de données variées, comprenant des photographies aériennes historiques, des données satellitaires multispectrales de Landsat et des mesures GPS acquises sur le terrain. Nous employons des algorithmes de traitement d'image pour l'ortho-rectification et la correction radiométrique, suivis de la différenciation d'images et de l'analyse spectrale pour quantifier les changements spatiaux, les taux d'érosion/sédimentation et les variations.

Tirant parti de la puissance de la GEOAI (intelligence artificielle géospatiale), nous mettons en œuvre des algorithmes de classification pour cartographier et classifier les caractéristiques géomorphologiques, puis appliquons un modèle de régression pour prédire le rythme et la trajectoire des changements futurs. L'étude a trois objectifs principaux, alors que nous explorons les variations géomorphologiques dans l'estuaire de la Moulouya.

Mots-clés : Estuaire de la Moulouya, écosystème, GPS, activités humaines, télédétection, GEOAI.

Introduction

Moulouya Estuary is a highly dynamic environment undergoing perpetual evolution in its geomorphological features. This evolution is driven by natural and human-induced factors, including waves, winds, storms, sea level variations, and human activities along the shoreline (Hall, 2023; Sbai et al., 2021). These factors can manifest as erosion or sediment accumulation, shaping the estuary's morphology (Paskoff, 1993).

Erosion, a natural process shaping coastlines, leads to a net sediment loss within the budget. The regression of this sediment budget in the Moulouya Estuary is attributed to a combination of factors, including hydrogeological conditions, sea level rise, and human activity along the Saidia and Cap-Of-Water coastline (Hlal, 2023).

Understanding the spatial and temporal variations in the estuary's morphology and their impact on the mouth is crucial for effective management. This scientific work addresses this need by pioneering a novel approach that integrates the strengths of GPS, remote sensing, and GEOAI to reveal the Moulouya Estuary's morphological dynamics over 67 years.

1. Study area

The Moulouya Estuary Site of Biological and Ecological Interest (SBEI) is a critically important heritage site because it is the estuary of the largest river draining into the Mediterranean from the Maghreb and the longest Oued in Morocco. The Mediterranean Sea defines its boundaries to the north, Saidia Beach and the Moulouya oxbow lake to the east, Cap-Of-Water Beach and dunes to the west, and the Saidia coastal plain to the south (Figure 1).

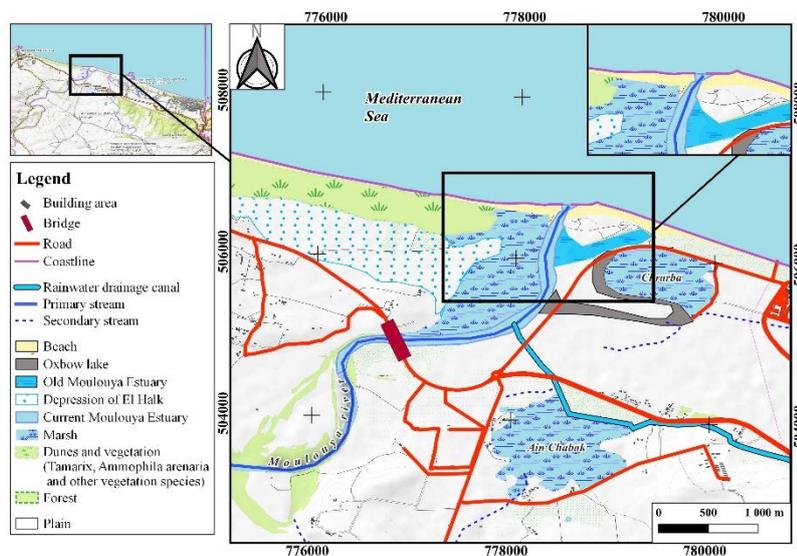


Figure 1. Study area location

The estuary's numerous ecological functions contribute to the absorption of river floods, which is a crucial environment for migrating many fish species that have become rare or endangered in Morocco. It is a resting, nesting, or wintering ground for numerous globally significant bird species, such as the *Audouin's Gull* and *Marbled Teal* (Image 1). This Site of Biological and Ecological Interest (SBEI) also stands as one of the last refuges for many endemics, threatened, or rare species at the national and regional levels (Hall, 2023).



Image 1. Some Moulouya estuary Bird species (Left: The Audouin's Gul, Right: Marbled Teal).

Characterized by a diverse range of habitats, including the broadest salt marsh in North Africa, one of the longest sandy beaches in the Mediterranean, a significant riverbed with a fluvial aspect (broad and permanently inundated) unique on the Mediterranean slope of Morocco, and the most extensive alluvial tamarisk forest in Morocco, the SBEI is rich in fauna and flora. For instance, nearly 2/3 of the total bird species known at the national level have been identified in this area. The flora, *invertebrates*, *herpetofauna*, etc., exhibit a high rate of endemism (Triplet et al., 2010).

2. MATERIALS AND METHODS

This study employs a comprehensive approach to data acquisition, spanning multiple sources and periods. Historical aerial photographs from the late 1980s provide a foundational understanding of the estuary's early morphological state. Subsequent data from 1979 to 2023 is derived from multi-spectral satellite imagery (Landsat) with high spatial and temporal resolution. Additionally, ground-truth data collected through field-derived GPS measurements from 2018 to 2022 ensures the accuracy and precision of the analyses (Table 1).

Table 1. Data collected inventory from 1965 to 2023

| Year | Type | Area | Source | Scale/Resolution |
|------|-------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| 1956 | Topographic Map | Saïdia of Kiss | IGN Rabat | 1/50 000 |
| 1979 | Satellite Imagery | Saïdia | USGS | 1/100 000 |
| 1980 | Aerial photo | Saïdia-Cap de l'Eau | O.R.M.V.A.M, Berkane | 1/20 000 |
| 2000 | Satellite Imagery | Saïdia | USGS | 1/100 000 |
| 2017 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |
| 2018 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |
| 2019 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |
| 2020 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |
| 2021 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |
| 2022 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |
| 2023 | Satellite Imagery | Saïdia | SASPLANET | 0,30 cm |
| 2022 | GPS survey | Saïdia | Land survey | 0,12 cm |

The methodology includes rigorous image processing steps to enhance data quality and accuracy. Pre-processing involves georeferencing for spatial alignment, orthorectification for geometric correction, and radiometric correction for sensor response variations. Image differencing techniques reveal patterns of change, such as erosion, sedimentation, and

modifications in land cover. Spectral analysis of reflectance values across various bands provides insights into land cover changes, water quality variations, and subtle shifts in soil properties (Buscema et al., 2010).

We employ a combination of two normalized indices to extract coastlines from aerial and satellite imagery. The first index is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), calculated by subtracting the red reflectance values from the near-infrared values and dividing the result by their sum (Equation 1). The second index is the Normalized Difference Water Index (NDWI), computed by subtracting the near-infrared values from the green reflectance values and dividing the result by their sum (Equation 2). The mathematical representations for NDVI and NDWI are provided in Equations (1) and (2), respectively (Figure 2).

$$NDVI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (1)$$

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (2)$$

Where:

NDVI= Normalized Difference Vegetation Index

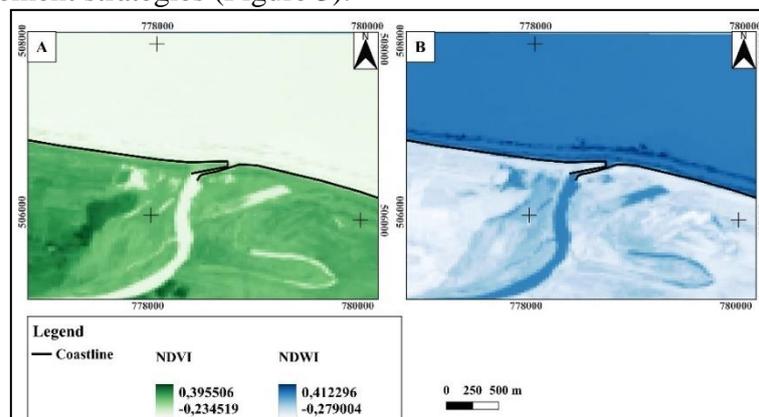
NIR = Near-InfraRed, which ranges between (760-2500 nm), penetrates even more profoundly and is used for material identification and environmental monitoring.

SWIR= Near-InfraRed lies just beyond the visible range, encompassing wavelengths from about 1.4 to 3 microns. It identifies water bodies, vegetation health, mineral composition, and land cover.

Green: Greenlight, with wavelengths ranging from 490 to 580 nanometres, plays a crucial role in remote sensing, particularly for studying vegetation and marine ecosystems.

Figure 2. NDVI (A) and NDWI (B)

The study employs deep learning techniques, including segmentation and regression models. Supervised learning algorithms, trained on meticulously labelled datasets, map and categorize geomorphological features accurately (Mills et al., 2005). Advanced regression models predict the rate and trajectory of future changes in estuarine morphology, informed by past trends and the complex interplay of environmental factors (Moore et al., 2000; Paravolidakis et al., 2018 & Maglione et al., 2014). These models facilitate anticipating potential threats and informing proactive management strategies (Figure 3).



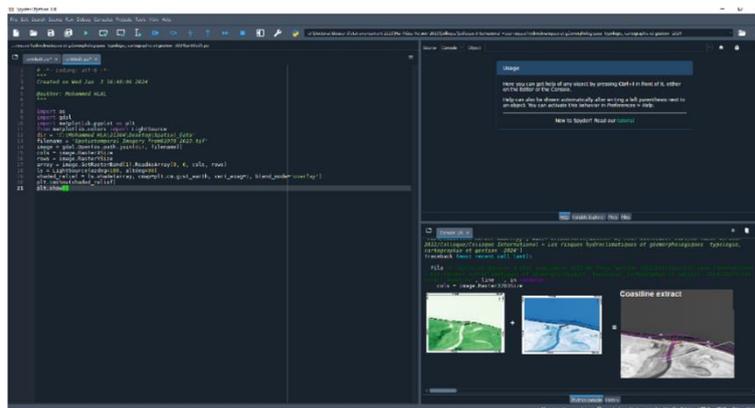


Figure 3. Coastline Extraction from NDVI and NDWI Imagery using GEOAI in Spyder

3. Results and Discussion

The analysis of coastal dynamics at the mouth scale considered the interaction between fluvial and marine effects. Measurements at 1389 points revealed shoreline changes and mouth movement trends. While the coastline moved back by 1782 m (1956-1979) and 1414 m (1956-2023) on the Est bank and 1336 m (1956-1979) and 1083 m (1956-2023) on the west bank, the mouth itself shifted 1414 m towards the Northwest. The sedimentary balance at the mouth showed significant variations. On the west bank, erosion at a rate of 16 m/year (calculated by dividing the 1083 m total erosion between 1956 and 2023 by four years) caused a net loss of sediment (Figure 4).

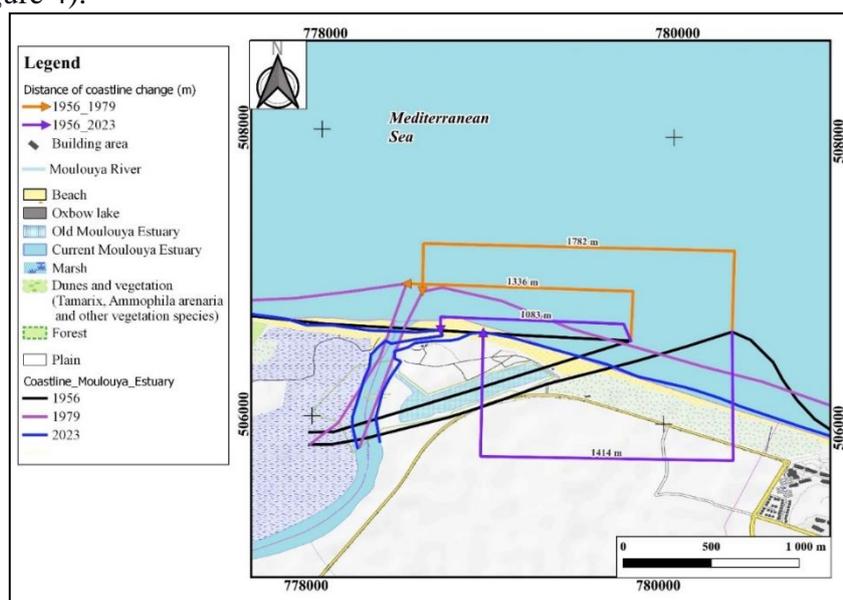


Figure 4: Moulouya Estuary Coastline Change from 1956 to 2023

Since the construction of dams on the Moulouya, Saïdia Beach's retreat has been relatively limited due to the delta's erosion by wave currents (Hlal, 2023). However, the delta retreat seems to have slowed down since 1995. This can probably be linked to its more rectilinear shape. Since 1997, the marina's presence has blocked sediment transit and accumulated sand along its dikes (Benata, 2016). The observed shoreline recession on both banks indicates vulnerability to erosion. The Eastern bank initially experienced a more rapid retreat (1956-1979). Nevertheless, the recession rate has decreased, suggesting potential adaptation or mitigating factors.

The Moulouya mouth's 1083 m north-westward shift raises questions about the underlying mechanisms. Was it driven by erosion on the eastern bank, sediment deposition on

the western bank, or a combination of both? Understanding these processes is crucial for predicting future Moulouya mouth behaviour and its impact on the surrounding coastline.

Conclusion

This study provides valuable insights into the complex interplay of fluvial and marine forces driving coastal dynamics at the mouth scale. By further investigating the underlying processes and potential causes of erosion and mouth movement, we can develop informed management strategies to ensure this coastal ecosystem's long-term stability and health.

Bibliographic References

- BUSCEMA, M., GROSSI, E. (2010). “*J-Net System: A New Paradigm for Artificial Neural Networks Applied to Diagnostic Imaging*”. In *Applications of Mathematics in Models, Artificial Neural Networks and Arts*, Springer Publishing House: Dordrecht, The Netherlands, pp 431–455.
- HLAL, M. (2023). *Les risques côtiers sur le littoral de Saidia-Nador : Vulnérabilité, Adaptation et Modes de gestion*. Thèse de doctorat en géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Mohammed Premier, Oujda. 256 p.
- MAGLIONE, P., PARENTE, C., VALLARIO, A. (2014). “*Coastline extraction using high-resolution WorldView-2 satellite imagery*”. *Eur. J. Remote Sens.*47, pp 685–699.
- MILLS, J.P., BUCKLEY, S.J., MITCHELL, H.L., CLARKE, P.J., EDWARDS, S.J. (2005). “*A geomatics data integration technique for coastal change monitoring*”. *Earth Surf. Processes Landf*, 30, pp 651–664.
- MOORE, L.J. (2000). “*Shoreline mapping techniques*”. *J. Coast. Res.* pp 111–124.
- PARAVOLIDAKIS, V., RAGIA, L., MOIROGIORGOU, K., ZERVAKIS, M. (2018). “*Automatic Coastline Extraction Using Edge Detection and Optimization Procedures*”. *Geosciences*, 8, 407 p.
- PASKOFF, R. (1993). *Côtes en danger*, 250 p. Paris: Masson.
- SBAI, A., MOUADILI, O., HLAL, M., BENRBIA, K., ZAHRA MAZARI, F., BOUABDALLAH, M., & SAIDI, A. (2021). “*Water erosion in the Moulouya watershed and its impact on dams' siltation (Eastern Morocco)*”. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, pp 127-131.

NOUVEAUX RISQUES ET FORMES DE DEGRADATION DANS DES PLAGES DE COTES ANTHROPISEES (CAS EN TUNISIE ET AU MAROC)

Ameur OUESLATI

Université de Tunis ; Faculté des Sciences Humaines et Sociales ;

Laboratoire CGMED oueslatiameur@yahoo.fr

RESUME: Les rivages sableux ont retenu l'attention de façon particulière au cours des dernières décennies, notamment depuis les années 1980. L'attention était concentrée, d'abord, sur la question de leur érosion et leur protection. Aujourd'hui, plusieurs sont figés par différents ouvrages créés dans le cadre d'une défense lourde ou par des espaces plus ou moins étendus gagnés sur la mer par remblayage.

Ayant perdu le soutien que leur procurait leur avant-dune et/ou coupées de leur arrière-pays immédiat, certaines plages ont connu une concentration accrue de l'action des vagues et fini par perdre ce qui leur restait de leur substance sableuse naturelle. Une nouvelle conjoncture s'y est installée ; les vagues travaillent dans le matériel des ouvrages de protection et des remblayages précités. Les premières conséquences annoncent, tant que ces plages n'ont pas fait l'objet d'un travail de rechargement conséquent, un changement important dans la nature et la granulométrie de leur matériel devenu de plus en plus grossier, hétérogène et beaucoup moins attractif que le sable d'antan. Dans le front des remblayages, les coupes exhumées par les vagues révèlent parfois un matériel comportant souvent des substances nocives et pouvant être à l'origine de différentes formes de dégradation ainsi que des risques pour les baigneurs.

Si bien qu'après la concentration sur les problèmes de l'érosion ou parallèlement à elle, on aura à gérer, dans certains rivages anthropisés, de nouveaux problèmes.

Mots-clés : Plages, érosion, risques, environnement, Tunisie, Maroc.

NEW RISKS AND FORMS OF DEGRADATION IN THE BEACHES OF ANTHROPIZED COASTS (CASES IN TUNISIA AND MOROCCO)

ABSTRACT: Sandy shores have received particular attention in recent decades, particularly since the 1980s. Effort was often focused, first, on their erosion and their protection. Today, several are frozen by different structures created as part of a heavy defense or by more or less extensive spaces gained by backfilling works.

Having lost the support provided by their foredunes and/or cut off from their immediate hinterland, many beaches experienced an increased concentration of wave action and ended up losing what remained of their natural sandy substance. A new situation sets in; the waves work in the material of the aforementioned protective structures and backfilling works. The first consequences indicate, as long as the shores have not undergone significant sandy nourishment, a significant change in the nature and grain size. The material stirred by the waves is increasingly coarse, heterogeneous and much less attractive than the original sand. In the front of the embankments, the waves reveal material often containing harmful substances which can cause different forms of degradation as well as risks for swimmers.

So that after focusing on the problems of erosion, or in parallel with it, we will have to manage new problems.

Keywords: Beaches, erosion, risks, environment, Tunisia, Morocco.

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies l'attention était, surtout dans les littoraux sableux anthropisés, largement concentrée sur la description des manifestations de l'érosion des plages et leurs causes ainsi que sur les méthodes de protection. On ne s'était pas, du moins d'après la bibliographie existante et les indicateurs que nous avons pu relever sur le terrain, beaucoup soucieux des transformations qui se préparaient au niveau des caractéristiques du matériel ainsi que la qualité des estrans et les risques associés. Une telle évolution a parfois conduit à des conséquences non moins pénalisantes que l'érosion ; certaines plages ont perdu leur attractivité ou ont totalement rebuté les baigneurs. Elle risque de constituer dorénavant un nouveau point de préoccupation imposant la gestion de problèmes imprévus qui viendra s'ajouter à la gestion du problème de l'érosion.

Le littoral méditerranéen de la Tunisie et du Maroc offre des illustrations parmi les plus expressives de l'évolution précitée. Nous nous limitons dans cette contribution à des exemples dans les rivages de la Tunisie nord-orientale et de la ville de Tanger (fig. 1).



Fig. 1. Localisation

1. Description de la zone d'étude, matériel et méthodes

Les terrains évoqués dans ce travail appartiennent à la côte de Tanger au Maroc et à la côte nord-orientale de la Tunisie. Ils ont donc en commun leur localisation dans la berge sud de la Méditerranée. Ils se caractérisent aussi par l'existence, au contact de la mer, d'une plaine alluviale formée au cours du Quaternaire supérieur. Cette plaine, souvent étroite, s'interpose généralement entre la mer et des reliefs côtiers de la famille des collines ou petits jbel à partir desquels partent de petits organismes hydrographiques. Certains rivages reçoivent aussi les apports de cours d'eau plus importants qui prennent source dans des reliefs plus décalés vers l'intérieur des terres.

La morphologie du trait de côte est celle d'une plage sableuse étroite et rarement accompagnée d'une dune bordière. Celle-ci a très souvent disparu suite aux travaux d'aménagement et à l'érosion marine ou est réduite à un bourrelet plus ou moins continue et de hauteur rarement supérieure à deux mètres. Des accumulations éoliennes, parfois étendues, existent en arrière de cette dune, drapant les versants les plus exposés aux vents dominants ; mais elles ont été envahies par le bâti (Oueslati, 2004 ; 2014).

Il s'agit aussi de rivages qui ont connu une anthropisation importante. Les aménagements de front de mer ainsi que leur objectifs et leur histoire ont cependant varié d'un secteur à l'autre. Si dans certains cas, comme à Tanger ou dans certains secteurs de la côte de Tunis, ils remontent parfois au début du vingtième siècle, dans d'autres cas ils sont beaucoup plus récents et s'inscrivent souvent dans le cadre de la ruée vers les rivages sableux déclenchée et accélérée avec le développement du tourisme et la recherche d'une localisation « pieds dans l'eau ». Mais dans tous les cas, l'érosion marine a constitué la principale préoccupation et a

obligé le recours à des interventions de protection par différents ouvrages ou méthodes. L'objectif de telles interventions était principalement de protéger les aménagements de front de mer ; si bien que, les ouvrages utilisés ont généralement été d'autant plus lourds et coûteux que la côte à protéger est aménagée et densément occupée.

Le terme de cette évolution, tel qu'on a commencé à le voir au cours des dernières années est, même là où on a réussi à figer le trait de côte, l'émergence de différentes formes de dégradation et parfois des risques imprévus. C'est qu'en fait, nous sommes face à des situations auxquelles on n'avait pas toujours songé et dans lesquelles on peut distinguer deux types en fonction de leur cause principale : -des situations dues à un manque de prospective lors de l'exécution des travaux d'aménagement, notamment les travaux de remblayage de certaines côtes avant leur occupation et, -des situations dues à une insuffisance dans l'évaluation de l'impact des ouvrages et travaux utilisés dans le travail de protection. Mais les deux types peuvent coexister dans un même espace.

Quant à l'information utilisée et les méthodes de son acquisition, elles sont variées. Dans les différents terrains, nous avons considéré les travaux de recherche récents ainsi que les résultats de différentes missions de terrain que nous avons pu réaliser dans le cadre du suivi de l'évolution récente, notamment au cours des vingt dernières années. Pour les rivages qui ont connu des interventions anciennes, nous avons exploité, en plus, des écrits remontant à l'époque coloniale et différents supports iconographiques, notamment des cartes réalisées dans le cadre de plans d'aménagement ainsi que des cartes postales et différentes autres photos anciennes.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Une dégradation par l'exhumation de matériaux de remblayage de la côte

Ce type de situation se rencontre dans certains points de la côte des villes de Tanger et de Bizerte. La question de l'érosion a déjà retenu l'attention dans les deux cas (Oueslati A., 2004, 2014 et 2023 ; ACHAB M. *et al.*, 2005 ; SEDRATI M. 2007). Ce qui nous intéresse dans le présent travail est le fait que les vagues ont, après l'érosion du matériel naturel originel, exhumé un matériel d'origine anthropique inadapté à des rivages qui ont longtemps attiré par la qualité de leurs plages sableuses. La conséquence en a été une dégradation importante de la qualité de l'estran où le sable d'antan a été remplacé par un matériel très hétérogène, parfois nocif et comportant des éléments (éclats de verre, gros clous, morceaux de fer oxydés, ...) pouvant être à l'origine d'accidents pour les baigneurs ou les promeneurs pieds nus le long du rivage.

A Tanger, une telle situation a été observée dans le secteur compris entre les embouchures des oueds Souani et Mlaleh. Le matériel exhumé n'est autre que celui utilisé dans les travaux de remblayage, entrepris pour permettre l'extension de la ville dès la première moitié du vingtième siècle avec le plan d'urbanisation de l'architecte H. Prost et des architectes qui ont suivi. De tels travaux ont été menés à une époque au cours de laquelle la côte conservait encore son cachet naturel et la question de l'érosion marine ne se posait pas. Ils visaient à remblayer les terrains et marécages situés autour de l'embouchure des oueds Souani, Mghogha et Mlaleh pour créer de « *nouveaux quartiers sur l'étendue de la plage ; l'assainissement de cette zone, foyer de paludisme à cause de la présence de nombreux oueds* » (VIE URBAINE, 1933 ; NIETO A.B., PERES H. 1952 ; ELLDRISSI A., 2009). Dans un travail antérieur on lit que les terres à gagner seront remblayés avec les produits de dragage du port (GAUTHRONET E., 1913). Le matériel exhumé par les vagues est en effet vaseux, noirâtre et contient une faune marine parfois abondante. Mais l'examen du front des falaises ainsi que des coupes révélées par des tranchées ouvertes en arrière du rivage à l'occasion de travaux récents ou suite à des ravinements causés par des pluies importantes, montrent qu'il s'agit de matériaux d'origines variées et parfois largement constitués de produits de décharges (fig. 2). Le remaniement de tels matériaux par

les vagues a non seulement entraîné une dégradation sensible de la qualité du rivage mais aussi la dissémination, à l'intérieur de matériel de l'estran, d'objets pouvant causer des accidents aux promeneurs et baigneurs non avertis. Certes, les travaux d'aménagement de la promenade côtière entrepris depuis 2015 ont permis d'améliorer la situation. Un travail de rechargement a réussi à faire disparaître le paysage désolation qui prévalait. Mais ce n'était en fait que partie remise ; les vagues ont déjà érodé une partie indéniable du sable artificiel et commencé à faire apparaître de nouveau le matériel de remblayage.



Fig. 2. Le matériel utilisé dans le remblayage de la côte de Tanger : a- dans une coupe mise au jour à l'intérieur de l'espace bâti dans les berges de Oued Mghogha suite à une crue (avril 2013) ; b- détail de la photo a ; c- dans une falaise évoluant aux dépens de constructions (avril 2013) maintenant disparues suite aux récents travaux d'aménagement : c1- matériel d'origine marine, c2- matériel de décharges ; d- grève formée par un matériel issu du remblayage (à marée basse ; déc. 2015) (photos de l'auteur).

Dans le cas de Bizerte, c'est surtout à la hauteur de l'hôtel Ain Mariem qu'on trouve les illustrations les plus expressives. Jusqu'à la fin des années 1990, cet hôtel était devancé par une plage sableuse de plusieurs décamètres de largeur. Sa partie externe correspondait à un terrain plat à la faveur duquel ont été aménagés des villas et des piscines entourées par un beau jardin avec de grandes surfaces gazonnées. Pour l'observateur non averti de l'historique de l'occupation des lieux, le terrain plat ne serait autre que le prolongement naturel de la petite plaine alluviale côtière. Or, après l'érosion de la plage les vagues se sont mis à exhumer un matériel de remblayage. De fait, les petites falaises façonnées par les tempêtes indiquent que l'espace vert ainsi que différents aménagements de la partie externe de l'hôtel occupent un terrain gagné sur la plage et sa dune bordière après l'étalement de son matériel. Elles montrent, sur du sable marin ou éolien, un matériel varié constitué de déchets de chantiers de construction et parfois de décharges domestiques et de différentes activités industrielles (fig. 3). Là aussi, comme dans le cas de Tanger, la plage sableuse a laissé la place à des matériaux nuisibles au paysage et à la qualité de l'estran et pouvant être à l'origine de risques. La réaction était de fixer

le rivage par un enrochement. Mais ceci ne manquera pas de mener à de nouvelles formes de dégradation que vivent les rivages qui ont connu ce type d'intervention et auquel nous consacrons les paragraphes suivants.



Fig. 3. L'évolution de la plage dans une partie de la côte de Bizerte. Après l'érosion de la plage, les vagues révèlent la vraie nature du matériel sur lequel ont été menés les aménagements de front de mer : un remblayage dont les matériaux vont être incorporés au sable de l'estran (photos de l'auteur).

3.2. Suite à une protection par des ouvrages d'une défense lourde

La dégradation de la qualité des estrans, manifestée à travers les modifications de leur granulométrie et la qualité de leur matériel, succède aussi à des interventions récentes. Dans un premier temps, elle a eu lieu suite à la destruction, par les vagues, de constructions en dur après l'érosion des plages qui les devançaient, surtout à l'occasion de certaines tempêtes. La dégradation a été plus forte là où les constructions attaquées reposent sur un matériel de remblaiement hétérogène comme ce fut le cas au niveau de la résidence Marbel dans la plage de Tanger. Mais le processus s'est poursuivi à la faveur des ouvrages de défense implantés pour figer le rivage, notamment les digues d'enrochement collées au rivage et les épis. Car, avec le temps, les eaux marines ont travaillé le matériel de tel ouvrages et ont souvent réussi à fragmenter des blocs rocheux. Les débris se sont accumulés, en fonction de la dérive littorale dominante, dans les plages voisines pour donner lieu à des grèves parfois épaisses et faite d'un matériel très hétérogène par sa granulométrie ainsi que par ses constituants, les courants ayant souvent déplacé les fragments provenant des structures de défense ainsi que le reliquat de fragments des anciens murs abattus par les vagues. La situation s'aggrave au droit d'oueds qui charrient le contenu de décharges et de déchets de chantiers de construction accumulés dans leurs lits. On peut alors se trouver en présence d'un vrai cordon de cailloux de toutes sortes au bord de l'eau. Une telle évolution a été notée dans différents segment de la côte de l'agglomération tunisoise ainsi que celle de Bizerte. Ici, la plage de Raf Raf en fournissait l'une des illustrations les plus expressives avant qu'il ne soit fait recours à un important travail de chargement artificiel de la plage (fig. 4). Dans la côte de Tanger, des exemples localisés existent au contact de l'enrochement implanté au niveau de la partie orientale de la plage Marbel. Mais c'est plus à l'Est, devant les hôtels de la plage Malabata et Ghandouri que les grèves les plus épaisses se sont formées. Leur matériel, très grossier et très hétérogène, forme parfois un cordon épais sur lequel il est impossible de marcher pieds nus et difficile de circuler même avec chaussures (fig. 5).



fig. 4. Transformation d'une plage sableuse en une grève après l'implantation d'une digue d'enrochement (cercle) à Raf Raf.



Fig. 5. Nouvelle granulométrie de la plage dans la partie orientale de la plage de Tanger protégée par des épis et brise-lames.

CONCLUSION

Les nouvelles formes de dégradation qui ont surgi dans certains rivages sableux appuient, encore une fois, l'idée de l'inadaptation ou l'insuffisance, notamment dans les milieux fortement anthropisés, de la défense lourde comme remède à l'érosion dont souffrent les plages. Elles reflètent également des imprudences commises lors de l'aménagement de ces rivages et révèlent en fait, les conséquences des interventions qui ne s'inscrivent pas dans une approche prospective.

Références bibliographiques

- ACHAB M., EL MOUMNI B., EL ARRIM A., GUTIERREZ J.M.(2005). *Répartition des faciès sédimentaires récents en milieu marin côtier : exemple des baies de Tanger (NW-Maroc) et de Cadix (SW-Espagne)*, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n°27.
- GAUTHRONET E. (1913). *Tanger. Son port-ses voies de pénétration*, Paris, 161 p.
- NIETO A.B., ELLDRISSI A., (2009). *Tanger, croissance urbaine d'une ville internationale*, Actes du séminaire de l'opportunité d'un observatoire de la medina, pp. 49-60.
- OUESLATI A. (2004). *Littoral et aménagement en Tunisie*, ORBIS presses, 534p.
- OUESLATI A. (2014). La "Grande dune de Tanger" (littoral du Maroc septentrional) : un exemple de disparition d'une entité naturelle d'intérêt paysager et environnemental, *Physio-Géo*, Volume 8, pp. 251-272.
- OUESLATI A. (2023). *The Risk of Marine Erosion in Tunisian Beaches: A Retrospective Reading for a Prospective Vision*, in *Geohazards and Disaster Risk Reduction Multidisciplinary and Integrated Approaches*, Chapter 12 , pp.233-267.
- PERES H., (1952). Qu'est devenu le plan d'urbanisation ? ; *La Tribune de Tanger ; Hebdomadaire ; Samedi 17 mai 1952.*
- REVUE LA VIE URBAINE (1933). *L'urbanisme aux colonies et dans les pays tropicaux*, N° 18, pp. 382-405.
- SEDRATI M., ANTHONY E.J. (2007). *A brief overview of plan-shape disequilibrium in embayed beaches : Tangier bay (Morocco, Méditerranée)*, 108, pp. 125-130.

LES DUNES DE L'EMBOUCHURE D'OUM ER-RBIA

ABKHAR Fatima* et MOUHIDDINE Mohamed**

ABKHAR Fatima* : Université Chouaib Doukkali : Laboratoire : Recomposition de l'Espace et Développement Durable (REDD), Faculté des Lettres et Sciences Humaines, El-Jadida

MOUHIDDINE Mohamed** : Université Hassan 2 : Laboratoire des Variations Environnementales et Développement Durable, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Ben-Msik Casablanca

Résumé : La surexploitation, des sables des dunes littorales et des plages, occasionne un déséquilibre du littoral déjà fragile et expose ce dernier à l'action agressive de la mer. Le cas de la plage de l'embouchure d'Oum Er-Rbia est édifiant. Cette dernière se trouve dans le littoral d'Azemmour sur la côte atlantique Marocain. Cette embouchure est bordée par un ensemble de dunes actuelles et subactuelles avec des formes variées et une répartition anarchique. Actuellement on assiste à une dégradation systématique des espaces dunaires et des fluctuations morphologiques engendrées au niveau des plages. La présente étude a pour objectif de déterminer les causes naturelles et d'évaluer le degré de la pression anthropique dans la disparition des champs dunaires dans cette zone.

Mots clés : Azemmour ; littoral ; risques côtiers ; dune ; dégradation

Introduction

Nous observons l'évolution morphologique de la côte de l'embouchure d'OER depuis les années quatre-vingt-dix et nous remarquons que cette embouchure connaît de considérables transformations, que ce soit sur sa forme ou sur les quantités des sédiments qui alimentent ses plages avoisinantes. Cette embouchure illustre parfaitement la vulnérabilité des zones côtières, le phénomène est tellement important qu'elle se trouve confrontée à la fermeture complète.

L'objectif de ce travail est de déterminer les vitesses et les tendances d'évolution de l'embouchure d'OER et ses plages et d'identifier les phases de transformation du milieu. La méthode utilisée s'appuie sur le travail du terrain et les techniques de photo-interprétation et du traitement numérique.

I- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'embouchure d'OER est comprise entre les latitudes 33°17'30'' et 33°22'30'' N et les longitudes 8°18'00'' et 8°30'00''W, elle se situe au sein de la baie d'El Haouzia, entre deux pointes rocheuses ; la pointe d'Azemmour au NE et la pointe d'El-Jadida au SW.

1- Contexte géomorphologique et géologique

La zone de l'embouchure d'OER situé sur le littoral d'Azemmour, ce dernier présente un synclinal triasique de direction N-S, sa partie septentrionale disparaît sous l'Océan. Il est colmaté par les formations quaternaires et actuelles, représentées essentiellement par les alluvions qu'OER transporte depuis son bassin versant et dépose dans l'embouchure et les plages avoisinantes. Ce littoral est caractérisé par la plus basse-terrasse (Oulja) de la Meseta côtière dont la largeur excède 2 km, et aussi par un important champ dunaire fixe et vif. Ses altitudes dépassent rarement les 30 mètres et diminuent progressivement vers la mer.

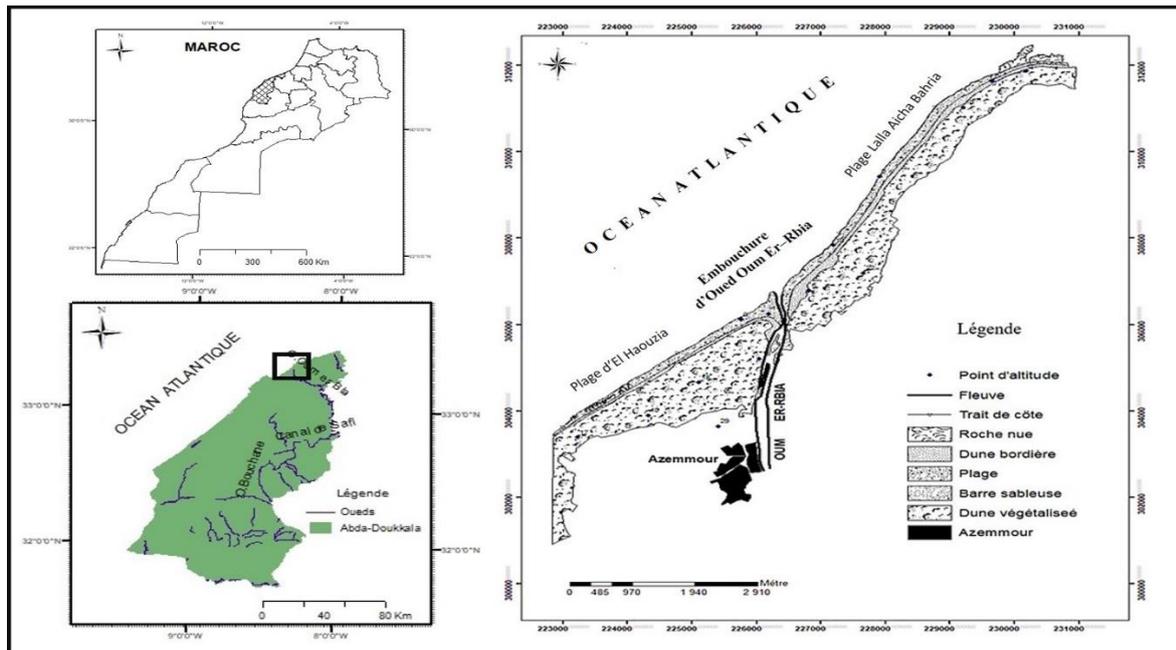


Fig.1 : Situation géographique et unités morphologiques de l'embouchure d'OER (ABKHAR 2020)

2- Cadre climatique et hydrodynamique

Le climat de la zone d'étude est méditerranéen de type semi-aride ; la pluviométrie moyenne annuelle est de 320 mm/an, et la température moyenne annuelle est de 17 °C. La sécheresse relative du climat est partiellement compensée par une hygrométrie non négligeable de l'ordre de 70 à 80%. Les vents, à dominance Nord-Ouest sont fréquents vers la fin de l'après-midi. Les houles les plus actives sont de directions Nord-Ouest et Nord-Est, leur interférence engendre une dérive littorale dominante avec un sens WNW-ESE.

II- ETAT DES DUNES DE L'EMBOUCHURE ET LES PLAGES AVOISINATES

L'arrière-pays proche du littoral d'Azemmour est composé d'alignements dunaires consolidés dont l'orientation générale est la même (NE-SW), mais dont les sommets sont à côtes différentes. La longueur de ces dunes est très variable, elles peuvent atteindre plus d'une vingtaine de kilomètres avec des altitudes augmentant vers l'intérieur entre 80 et 100m. Au niveau de l'embouchure, les dunes s'allongent sur toute la longueur des plages avoisinantes parallèlement au rivage. Elles se maintiennent en général à des niveaux très élevés entre 10 et 20 m, cette hauteur peut descendre jusqu'à 6 m dans les environs de l'embouchure d'OER. Les investigations sur le terrain, l'examen de la carte topographique et les photos aériennes nous ont permis d'individualiser les formes suivantes : les dunes embryonnaires, les dunes longitudinales et la dune bordière

1- LES DIFFÉRENTS TYPES DE DUNES LITTORALES

L'embouchure d'OER, se trouve situé au sein d'un système dunaire fonctionnel et un autre système dunaire fossile. Ces systèmes dunaires sont des structures dynamiques sensibles à l'érosion éolienne et marine. Les investigations sur terrain, l'examen de la carte topographique 1/25000^e et les photos aériennes nous ont permis d'individualiser les formes suivantes :

a)- La dune embryonnaire

Les dunes embryonnaires désignent des petites dunes nouvellement formées non rattachées à un cordon dunaire, ces dunes sont mobile sous l'effet du vent et partiellement sous l'action des eaux. Elles occupent une grande surface au fur et à mesure qu'on s'approche de l'embouchure, c'est une zone de remaniement assez étendue en profondeur mais instable, elle

subit des processus d'accrétion et d'érosion, elle est caractérisée par le dépôt des laisses de mer et du fleuve, ce qui permet la présence de la matière organique en décomposition et favorise la poussée de plantes. Ces facteurs permettent la colonisation des sables et la naissance des dunes embryonnaires. Les banquettes de sable, premiers remparts de la dune embryonnaire, sont souvent colonisées par *Euphorbia paralias* *Eryngium maritimum* alors que les crêtes sont occupées principalement par *Ammophila arenaria*.



Photo1 : Mini crête sableuse occupé par Euphorbe et *Ammophila arenaria* Photo 2 : Butte sableuse en cours de formation occupée Par *Ammophila arenaria*

b)- La dune bordière

Le moteur essentiel de la construction de cette morphologie dunaire est expliqué à la fois par l'importance de l'alimentation en sable et par la direction et l'efficacité des vents. Le long de la côte d'Azemmour la dune bordière se prolonge d'une façon parallèle au rivage, sa continuité n'est rompue que par l'embouchure d'OER (Fig.1). Sa hauteur est estimée entre 5 et 6 mètres avec une granulométrie fine, les sables sont noirs et composés de grains de quartz et d'une quantité non négligeable de minéraux lourds, essentiellement d'ilménite, de la magnétite et du pyroxène. Ces matériaux sont retenus par des plantes de différentes natures et des arbres par endroit (Fig.1).



Photo3 : dune bordière rive droite

Photo 4 : dune bordière rive gauche

c)-Les dunes longitudinales et transversales

Les dunes longitudinales se concentrent au milieu du champ dunaire derrière le cordon littoral, elles ont une orientation parallèle à la côte NE-SW, en quelques endroits elles sont protégées par la végétation. En revanche les dunes transversales sont plus abondantes avec des dimensions variées. Elles se trouvent surtout sur la rive gauche d'OER avec une direction perpendiculaire à la côte NW-SE. Ce bourrelet dunaire s'est probablement mises en place durant le retrait de la mer Mellahienne par l'alizé, soufflant entre les secteurs N et NNW à Azemmour.

d)-Les dunes atypiques

Nous désignons par dunes atypiques les accumulations plus ou moins importantes n'ayant aucune caractéristique morphologique particulière. Elles sont très fréquentes dans le secteur d'étude (phtos.1), elles sont basses et circulaires. Comme pour les autres formes de dunes, le versant au vent des dunes est rectiligne tandis que le versant sous le vent est convexe.

L'ensemble de ces dunes constitue un obstacle entre la mer et la plaine côtière qui s'étale parallèlement à la côte.

2- DYNAMIQUE DE L'EMBOUCHURE D'OER

L'embouchure d'OER offre un exemple typique de dissymétrie avec un poulcier sur la rive gauche, ce qui traduit un dépôt sur cette rive et un musoir sur la rive droite, ce qui signifie une érosion (Abkhar 1995). L'analyse diachronique des photos aériennes (Fig.3) a révélé d'importantes transformations géomorphologiques et hydrodynamiques, qui seraient régies par une diminution constante de l'influence fluviale, en faveur d'une influence marine dominante. D'après la figure 3, la direction du chenal d'OER en 1949 était orientée vers le Nord et se prolongeait sous la mer, en 2019 la direction a changé en suivant la déviation de l'embouchure vers le WSW. Cependant, en 2024, on constate une tendance à l'ensablement du chenal et à la fermeture de l'embouchure par un amas de sable. Ces transformations sont liées à la montée du niveau de l'océan, qui produit l'érosion des plages et à l'influence anthropique bien apparente sur les apports d'OER par la construction des barrages, le développement de l'agriculture et l'expansion des agglomérations. Ces facteurs ont diminué les apports d'OER vers le large et impliquent une remontée des eaux salées à une quinzaine de kilomètres en amont de l'embouchure. Actuellement oued OER n'exporte pratiquement pas de matériaux particuliers à l'océan, sauf lors de vidanges des retenues.

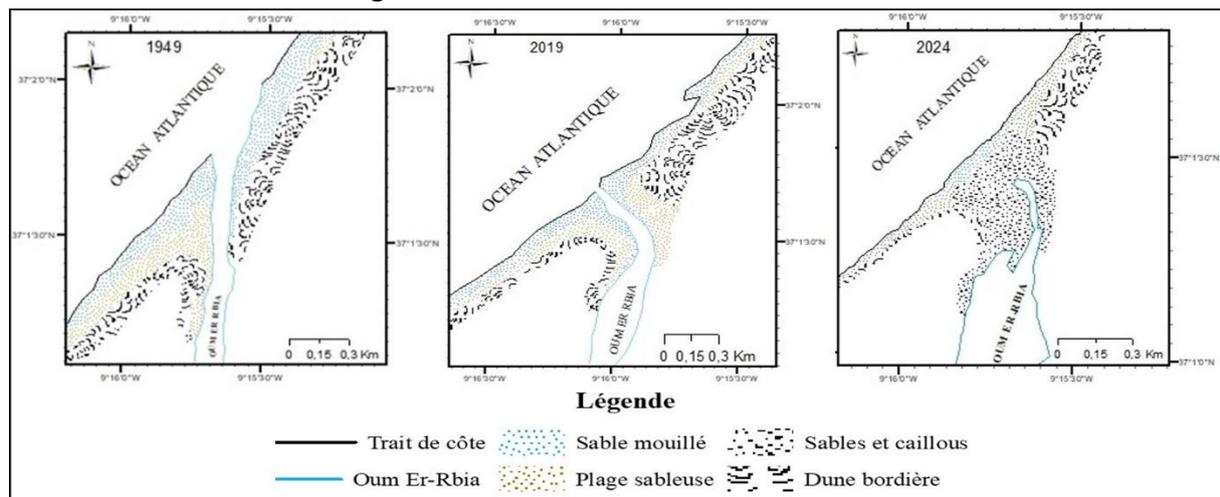


Fig. 3 : Étapes de transformations de l'embouchure d'Oum Er-Rbia

3- CONSEQUENCE DE L'ACTIVITE HUMAINE SUR LES DUNES

Pour répondre aux besoins du secteur de la construction et des travaux publics, des sites d'extraction de matériaux se sont multipliés dans le littoral d'Azemmour, ce qui a entraîné la disparition de plusieurs champs dunaires et la désertification de ces milieux naturels.



Photos 5 : changement des plates formes de dragage de DRAPOR 1et 2 sur le chenal 3 et 4 dans l'embouchure.

Il existe trois types d'exploitation des carrières : le premier type dans le domaine public ; la société DRAPOR drague le lit mineur d'OER pour résoudre le problème de son envasement (photos 5). La conséquence directe de ce dragage est la disparition d'un marais de schorre sur la rive droite d'OER à proximité de l'embouchure (ABKHAR F., 1995 et 2020). Le deuxième type dans le domaine public forestier ; la société SAGRAV extrait le sable de la dune végétalisée (photo3), l'effet direct de cette extraction est la déstabilisation des dunes par dégradation du couvert végétal et le dérangement des oiseaux pendant la nidification. Le troisième type est l'exploitation clandestine ; il existe de nombreuses carrières illicites, sur des superficies supérieures à 1 hectare et dont le volume exploité dépasse largement les quantités autorisées.

En outre ces exploitations génèrent d'autres impacts environnementaux, que l'on peut identifier comme suit : L'ensablement des terres agricoles de l'Oulja par la parution des brèches dans le cordon dunaire, le prélèvement du sable agit aussi sur le recul du trait de côte, le trafic routier outrancier des grands camions de transport, annihile toute possibilité de genèse ou de maintien des formes embryonnaires et contribue aussi dans la destruction des dunes sableuses.

Conclusion

Notre intérêt s'est porté sur l'étude de l'évolution morphologique du littoral d'Azemmour depuis les années quatre-vingt-dix. Nous avons constaté que cette embouchure constitue un exemple type de la fragilité des milieux côtiers, qui s'accroît avec le temps, il connaît d'importantes transformations, aussi bien sur le plan de sa forme que sur les quantités des sédiments qui alimentent ses deux rives. L'absence de gestion de ce site confrontée, à une fréquentation croissante, une grande exploration de ces ressources naturelles et une forte exploitation de son bassin a entraîné une grave dégradation environnementale de ce milieu.

Bibliographie

- ABKHAR F., 2020: Évolution géomorphologique des zones humides du littoral des Doukkala et interventions anthropiques (lagune de Oualidia et estuaire d'Oum Er-Rbia). Thèse de Doctorat d'État, Université Mohamed Premier Oujda 318 pp.
- ABKHAR, F. (1995) : Étude géomorphologique de la basse vallée de l'Oum-Er-Rbia Thèse de doctorat en géomorphologie, université Paris XII, Val de Marne, 231p.
- MOUHIDDINE, M., 2007 : Morphogenèse et dynamique environnementale dans les Doukkala-Abda. Thèse d'Etat.450 P. Rabat.

LA DEGRADATION ET LA REDUCTION DE LA CAPACITE PRODUCTIVE DES SOLS DES « PALMERAIES TRADITIONNELLES ET DES NOUVELLES EXTENSIONS » DANS L'OASIS DE FIGUIG

BABA Jawad, EL HARRADJI Abderrahmane et SBAI Abdelkader
Université Mohamed 1^{er}, 60000, Oujda, Maroc jawad.baba@ump.ac.ma

Résumé: L'oasis de Figuig incarne un écosystème spécifique au sein d'un milieu d'une aridité prononcée, qui est le résultat délicat de l'interaction millénaire entre la nature et ses ressources limitées d'une part, et la communauté humaines d'autre part, basée sur les principes suivants : « la préservation et la durabilité »

Aujourd'hui cet, écosystème oasien fragile est confronté à un défi majeur qui menace l'équilibre environnemental et la durabilité des pratiques agricoles et donc l'identité géographique de l'oasis. Il est question de la dégradation et de la réduction de la capacité productive des sols, clairement imputable aux actions anthropiques, que ce soit d'une manière directe ou en exacerbant d'autres facteurs naturels.

Cette contribution explore a pour objet d'explorer les dynamiques qui concourent à cette dégradation alarmante, en élucidant les interactions délicates entre les actions anthropiques et la fragilité de l'écosystème local.

Mots-clés : dégradation des sols, action anthropique, capacité productive, écosystème, facteurs naturels, l'oasis de Figuig.

DEGRADATION AND REDUCTION OF THE PRODUCTIVE CAPACITY OF SOILS “TRADITIONAL PALM GROVES AND NEW EXTENSIONS” IN FIGUIG OASIS

Abstract:

Figuig oasis embodies a distinctive ecosystem in a dryland environment. It is a living result of a delicate interaction between nature and its limited resources from one side, and human communities on the other side have, based on the principles of “preservation and sustainability”.

Today, this specific fragile ecosystem faces a major unprecedented threat that jeopardizes balance and sustainability of agriculture practices, and therefore the geographical identity of the oasis. This challenge is the degradation and reduction of the productive capacity of soil, primarily attributable to anthropogenic activities either directly or by exacerbating other natural factors.

This study thoroughly explores the dynamics contributing to this unsettling degradation, shedding light on the delicate interactions between human activities and the vulnerability of the local ecosystem.

Keywords: soil degradation, human activities, productive capacity, ecosystem, physical factors, Figuig oasis.

INTRODUCTION

La terre dans l'espace oasien de Figuig, est considérée en tant que partie indissociable de l'identité culturelle, historique, voire socio-économique des individus, car elle constitue un des éléments essentiels du triangle de l'écosystème local (eau – palmier – sol) qui garantit la durabilité de cette entité géographique et assure la pérennité de la présence de la population.

L'importance du sol se justifie pour l'économie familiale oasienne, basée historiquement sur l'agriculture en tant que source de subsistance et garant de l'autosuffisance. C'est dû à la relation créée entre l'homme oasien et sa terre par son exploitation quotidienne tout au long de sa vie, par des liens sentimentaux et spirituels (BABA. 2023).

La dégradation, et la réduction de la capacité productive des sols dans l'oasis sont liées, d'une part à certains facteurs naturels, mais également et surtout aux actions anthropiques qui exacerbent la situation de dégradation d'autre part. C'est le résultat de l'utilisation perpétuelle des terres dans un contexte d'aridité qui aggrave la salinité des eaux et des terres par le biais de l'irrigation sous un fort potentiel d'évaporation et d'évapotranspiration. L'abandon des terroirs est également un autre facteur qui intervient dans la dégradation des terres, due au sort difficile et indéterminé des parcelles héritées par les absentéistes émigrés.

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

L'oasis de Figuig est située à l'extrême sud-est de la région orientale du Maroc, à 370 km d'Oujda chef-lieu de la région, et à 100 km de Bouarfa la capitale provinciale, à proximité de la frontière algéro-marocaine.

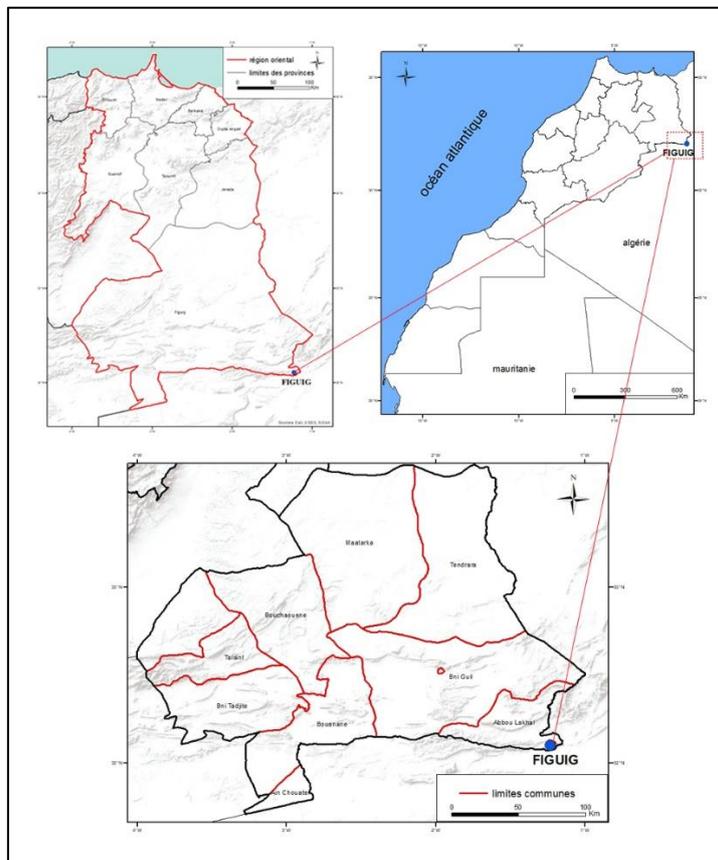


Figure 1 : Situation de Figuig au sein du territoire national, régional et provincial

L'oasis de Figuig s'étend entre 850 et 930 mètres d'altitude et occupe une dépression ayant l'allure d'une plaine subdivisée en deux paliers séparés par un talus de travertins (EL HARRADJI. 2007). Elle est entourée par des crêtes montagneuses qui font partie structurellement de la chaîne montagneuse du Haut Atlas Oriental.

Le climat de l'oasis selon de nombreuses classifications (Emberger 1995 et Thornthwaite), appartient à un climat aride mésothermique sec à influence saharienne (JILALI 2014) caractérisé par une température maximale qui atteint 45° C en juillet et août et minimale de -2 à 1°C en décembre, janvier et février, et une moyenne annuelle de précipitations de 120 mm.

METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Le travail du terrain est un pilier essentiel dans toute recherche scientifique, car c'est le plus efficace moyen pour mieux appréhender les phénomènes et vérifier les résultats obtenus, mais à condition de choisir des méthodes appropriées qui permettent une collecte de données précises et pertinentes.

Cette recherche s'est donc basée directement sur le travail de terrain en utilisant des techniques telles que :

- L'observation directe des parcelles dégradées dans l'ancienne palmeraie.
- Les entretiens et les enquêtes auprès de certains propriétaires des parcelles dégradées.
- L'inspection de l'impact d'ensablement sur la dégradation des sols au niveau des nouvelles extensions « Laarja et Tikourar »

En plus de cela, la recherche s'appuie également sur le travail technique en utilisant certains logiciels :

- ArcMap 10,8 pour réaliser le travail cartographique
- ERDAS Imagine pour suivre la répartition d'ensablement qui est considéré l'un des facteurs de dégradations des sols agricole dans les nouvelles extensions « Laarja et Tikourar ».

RESULTATS ET DISCUSSION

1- Le sur-pompage et la salinité des eaux et des sols

Ce facteur incarne une combinaison des éléments naturels et des actions anthropiques qui exacerbent, la réduction de la capacité productive et la dégradation des sols.

Le problème de la salinité concerne principalement les nouvelles extensions, dans certains endroits, le développement du pompage a provoqué la salinité des sols et de l'eau « Berkoukès » (EL HARRADJI 2001) et « Baghdad ».

Les eaux des sources « Ain » sont limitées et elles suffisent seulement au périmètre traditionnel, donc l'exploitation des nouvelles zones agricoles font face à cette insuffisance par le sur pompage dans la nappe. Il a été également impératif de recourir parfois au creusement de plusieurs puits, à cause de la salinité ou de la salinisation due à la surexploitation (EL HARRADJI 2006).

Dès lors, la salinité des sols dans ces extensions est généralement attribuée à l'irrigation fréquente avec des eaux salées. Ainsi, l'évaporation et l'évapotranspiration d'eau d'irrigation

entraîne une concentration croissante des sels, ce qui fait perdre aux sols leur capacité productive d'une manière progressive.

Dans l'ancienne palmeraie, on trouve également des parcelles dégradées en raison de la salinité c'est ce qu'on appelle localement « *tamourt tmalaht* », il s'agit ici des parcelles anciennement abandonnées et qui sont plus irriguées. La salinité du sol peut provenir de l'interruption d'irrigation (JANTY 2014), donc l'abandon et le manque d'entretien régulier, favorisent la sursalure des sols par l'interruption d'irrigation fréquente (EL HARRADJI 2007).



Figure 3 : salinité du sol par manque d'irrigation indispensable pour le lessivage des sels

2- L'héritage et le partage de la propriété

L'héritage est l'un des principaux facteurs anthropiques qui conduisent d'une manière indirecte à la dégradation des sols dans les anciens terroirs périphériques de Figuig.

La succession des générations héritières transmet la propriété d'une personne à plusieurs héritiers, en parallèle avec les mutations socio-culturelles que connaît l'oasis depuis les années cinquante et soixante du XX^e siècle sous l'effet de l'augmentation des flux migratoires représentées particulièrement par l'affaiblissement des liens sociaux. C'est le déclin de la famille étendue qui regroupait 3 générations ou plus sous le même toit. En revanche, l'apparence des petites entités nommées « familles nucléaires » (le père, la mère et les enfants) qui préfèrent d'obtenir leur part de l'exploitation au lieu de l'exploiter collectivement entrave toutes les initiatives individuelles visant la maintenance de l'exploitation, surtout les propriétés en litige entre les héritiers, donc le résultat c'est l'abandon, qui favorise la dégradation des parcelles.

Le partage de la propriété entre les héritiers et la diminution subséquente des parts individuelles en eau et en terre poussent certaines personnes de l'oasis à l'émigration, rendant toute préservation difficile. Même certains parmi ces émigrés qui sont revenus définitivement préfèrent investir dans le secteur agricole dans les périmètres des nouvelles extensions. En contrepartie, ils négligent leurs parcelles dans l'ancienne palmeraie ce qui les expose à la dégradation.

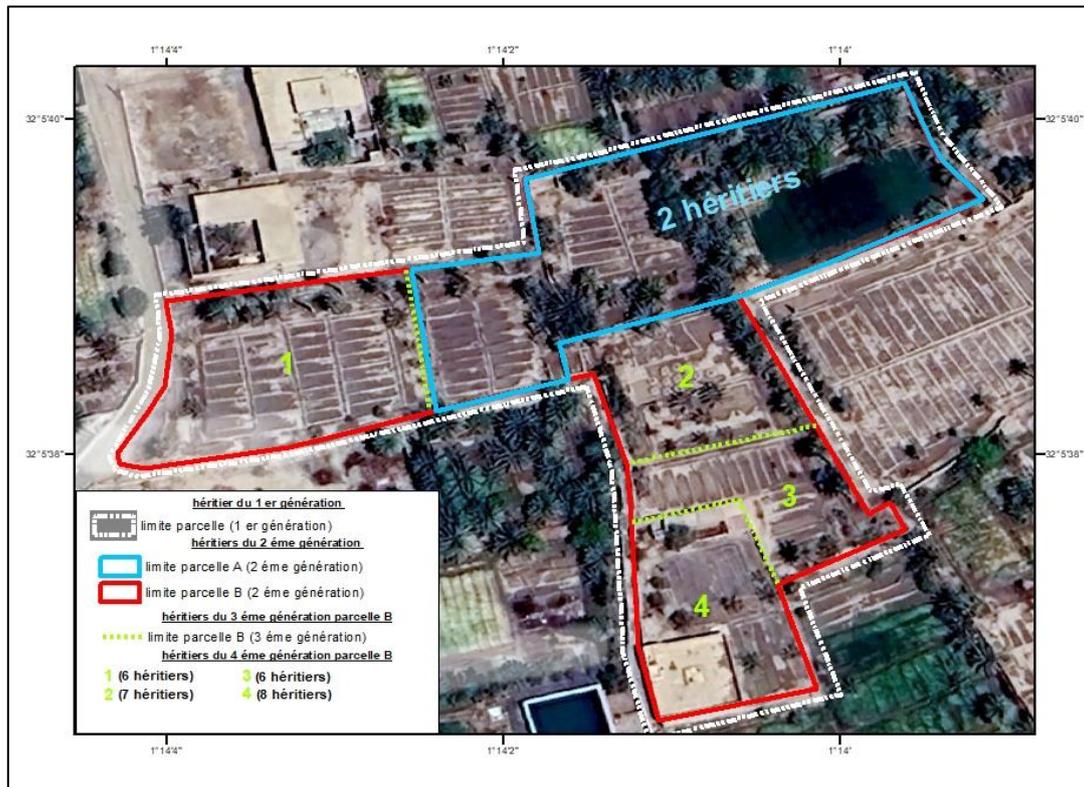


Figure 2 : parcelle dégradée à cause de l'héritage et ses impacts

(La succession des générations et la diminution des parts d'eaux et des sols a poussé les héritiers à abandonner leurs parcelles, ce qui a conduit à la dégradation)

3- L'ensablement

L'oasis de Figuig reçoit du nord une quantité importante de sable transporté principalement des vallées de Laarja et El Hallouf (BABA 2023), il se faufile à travers les cols des reliefs vers la périphérie nord de l'oasis où se trouvent les parcelles agricoles de la nouvelle extension « Laarja », puis vers la région l'est où se trouve une autre nouvelle zone agricole « Tikourar ou Sidi Abdelkader » et « Baghdad ».

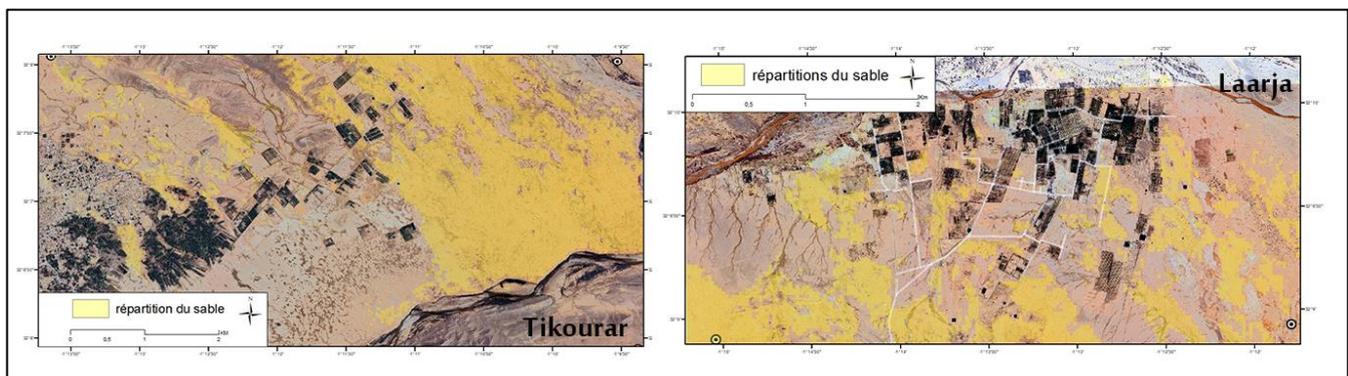


Figure 3 : L'ensablement dans les parcelles des nouvelles extensions agricoles "Tikourar et laarja", 18 novembre 2023

(Le suivi de la répartition du sable ont utilisant la classification supervisée et l'indicateur "maximum Likelihood")

Le travail du terrain indique que l'ensablement dans ces zones envahit de nombreuses parcelles agricoles. Ce phénomène n'est pas uniquement dû au facteur naturel, mais aussi aux actions anthropiques telles que :

- Le surpâturage et le défrichage en amont de l'oasis, origine des sables transportés
- L'exploitation agricole de ces zones ensablées où les plantes interceptent le sable transporté par le vent.
- Les clôtures des parcelles avec des fils barbelés permettent le passage des sables.
- La faiblesse et l'insuffisance des stratégies de prévention et de protection contre l'ensablement.

CONCLUSION

La fixation et la pérennité de la présence de la population de Figuig liée à trois piliers fondamentaux de l'écosystème oasien « eau - palmier - sol », dès lors la gestion conservatoire des sols est importante, non seulement pour la préservation des ressources, mais surtout pour la durabilité de l'oasis en tant qu'entité ancestrale à haute valeur patrimoniale.

Les actions anthropiques sont considérées comme une cause majeure de la dégradation et de la réduction de la capacité productive des sols dans l'oasis de Figuig, soit d'une façon directe par le biais de l'héritage et ses répercussions telle que l'abandon et la négligence, soit indirectement en exacerbant les facteurs naturels, à savoir la salinité des sols due à l'irrigation intensive en utilisant l'eau salée ou du fait de l'insuffisance de l'irrigation. L'ensablement contribue également à la dégradation en raison de la faiblesse des stratégies de prévention, de restauration et de protection.

Références bibliographiques

- BABA J.** (2023). Le développement face aux contraintes géotechniques et environnementales dans l'espace oasienne de Figuig, mémoire de master. Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Mohammed Premier, Oujda, 183 p.
- EL HARRADJI A.** (2001) Les risques liés au climat, le changement dans l'utilisation des sols et leurs impacts sur les ressources en eau du Maroc aride et semi-aride : cas de l'est et du sud-est, résumé d'une présentation dans le cadre d'un workshop du projet RICAMARE, l'Institut des Régions Arides de Médenine, Tunisie.
- EL HARRADJI A.** (2006) Les ressources et le développement durable de l'oasis de Figuig entre la gestion des crises et la crise de la gestion, In SALIH, A. et RAMOU, H. (éd.) « L'environnement oasien face aux mutations économiques et sociales : le cas de Figuig », pp.139-153
- EL HARRADJI A.** (2007) La gestion des eaux et des sols dans l'oasis de Figuig, état des lieux et problématique de développement. In LAOUINA Abdellah (éd.), « Gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc », Rabat, Université Mohamed V, pp. 131-149.
- Janty, G.** (2014) Les enjeux de la préservation et du développement d'un paysage culturel. Le cas de la palmeraie de l'oasis de Figuig (Maroc). Thèse de Doctorat. Université PARIS DIDEROT, 332 p.
- JILALI A.** (2014) Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de la nappe souterraine de l'oasis de Figuig (Haut Atlas Oriental). Thèse de doctorat, Université Mohammed Premier, Oujda, 161 p.

IMPACTS DES CRUES ET DES ÉTIAGES SUR LES RISQUES HYDROCLIMATIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES : CAS DU BASSIN VERSANT DU HAUT INAOUENE

BEN LAGHLAGH Oumaima et NAOURA Jamal

oumaima.benlaghlagh@usmba.ac.ma

jamal.naoura@usmba.ac.ma

Laboratoire des Ressources Naturelles et Environnement. Faculté Polydisciplinaire de Taza. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Route d'Oujda B.P.1223, Taza.

RESUME : Le bassin versant du Haut Inaouéne, d'une superficie de 1616 km², est une source importante d'eau potable et d'irrigation pour la région de Taza. Cette étude vise à évaluer les impacts des crues et des étiages sur les risques hydroclimatiques et géomorphologiques dans ce bassin versant. L'étude s'appuie sur l'analyse de données de précipitations, de débits, de températures et d'évapotranspiration collectées sur une période de 30 ans (1982-2012) dans cinq stations météorologiques et hydrométriques.

Les résultats montrent que les précipitations annuelles moyennes varient entre 400 et 800 mm, avec une forte variabilité interannuelle. Les débits mensuels présentent un régime pluvial avec des crues importantes en hiver et des étiages sévères en été. Les zones les plus exposées aux risques d'inondation sont les plaines alluviales situées en aval du bassin versant. Cette étude a permis de mieux comprendre les impacts des crues et des étiages sur les risques hydroclimatiques et géomorphologiques dans le bassin versant du Haut Inaouéne. Les résultats de l'étude peuvent être utilisés pour la mise en place de mesures de gestion durable des ressources en eau et des risques naturels.

Mots-clés : risques hydroclimatiques - risques géomorphologiques – précipitations - régime pluvial- évapotranspiration - débits.

ABSTRACT: The upper Inaouene watershed, with an area of 1616 km², is an important source of drinking water and irrigation for the Taza region. This study aims to assess the impacts of floods and droughts on hydroclimatic and geomorphological risks in this watershed. The study is based on the analysis of precipitation, discharge, temperature and evapotranspiration data collected over a 30-year period (1982-2012) in five weather and hydrometric stations.

The results show that mean annual precipitation varies between 400 and 800 mm, with strong interannual variability. Monthly flows show a pluvial regime with significant floods in winter and severe low flows in summer. The areas most exposed to flood risk are the alluvial plains located downstream of the watershed. This study has allowed a better understanding of the impacts of floods and droughts on hydroclimatic and geomorphological risks in the Haut Inaouene watershed. The results of the study can be used to set up measures for sustainable management of water resources and natural risks

Keywords: hydroclimatic risks - geomorphological risks – precipitation - pluvial regime - evapotranspiration - flows.

INTRODUCTION

Les crues et les étiages sont des phénomènes hydrologiques qui peuvent provoquer des risques hydroclimatiques et géomorphologiques. Les crues, représentent des pics soudains du débit des cours d'eau, souvent causés par des précipitations intenses, ou de la fonte des neiges. Elles peuvent, par la suite, engendrer des inondations graves endommageant les habitations, les infrastructures, les terres agricoles et même mettre en danger des vies humaines. Les crues peuvent aussi modifier le tracé des rivières, élargir leur lit, provoquer des changements dans les

écosystèmes riverains et peuvent causer aussi une altération des sols.

L'objectif de cette étude est d'étudier les situations hydrologiques extrêmes (crues et étiages) et leur contribution dans les risques hydroclimatiques et géomorphologiques. L'érosion hydrique est parmi les risques géomorphologiques les plus discutés. Elle s'accélère à cause des étiages et perturbe les systèmes aquatiques en réduisant les habitats naturels, ainsi que la forme et la structure des paysages fluviaux.

1. Description de la zone d'étude

Le bassin versant du haut Inaouène (figure 1), couvre une superficie de 1616 km² et un périmètre de 223 km, soit 31,17 % du bassin d'Inaouène. Ce dernier occupe une superficie de 5184 km² et un périmètre de 374,2 km, soit 12,92 % de la superficie du bassin versant du Sebou. Situé entre les parallèles 33.84N – 34.58N et les méridiens 3.78W - 4.91W, le bassin versant de l'Inaouène est limité à l'Est par le bassin versant de la Moyenne Moulouya, au Nord Ouest par le haut Ouergha et au Sud Ouest parle haut Sebou.

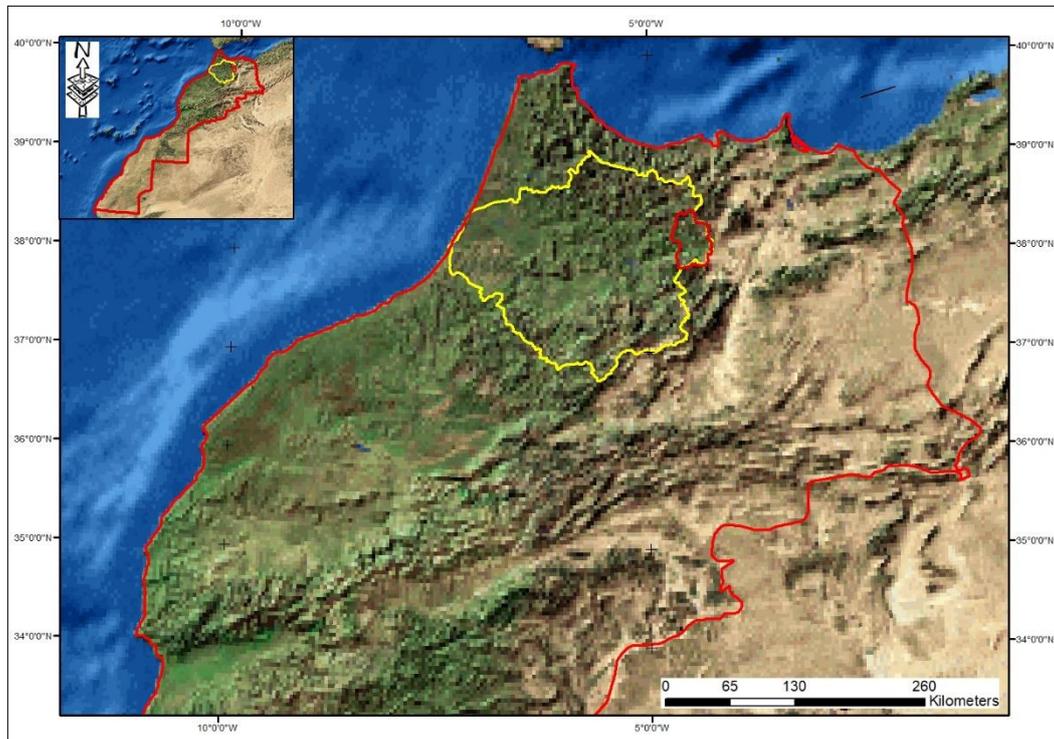


Figure 1. Localisation du bassin versant du haut Inaouène.

La zone d'étude se positionne dans le bassin versant de l'oued Sebou, entre deux domaines géologiques différents : le moyen atlasique et le secteur pré-rifain. Cette zone offre le caractère d'une région contrastée de montagne avec une présence de plateaux, de collines et de plaines. Ainsi, le bassin s'étend sur deux domaines structuraux différents du Maroc, à savoir le domaine meseto-atlasique et celui du Rif. Ces deux domaines sont séparés par le couloir Fès-Taza. Ce dernier est un fossé de marnes miocène de forme triangulaire compris entre deux unités montagneuses : Le Rif au nord et le Moyen Atlas au sud. Ce fossé se rétrécit progressivement d'Ouest en Est jusqu'à disparaître un peu à l'ouest de Taza au niveau du col de Touahar.

La région se caractérise, par des altitudes assez élevées (1500 à 2000m dans la région de la boutonnière de Tazekka), ceci permet une pluviométrie hivernale (plus de 1000 mm/an en moyenne)

La morphologie du bassin versant, définie par sa forme et sa surface, joue un rôle crucial dans l'écoulement des débits.

Dans le cas du bassin versant du haut Inaouéne, la longueur du plus long talweg est de 85 Km, la distance entre l'exutoire et le centre de gravité est de 22,15 Km. La plus grande longueur et largeur perpendiculaire sont respectivement de 58 Km et 38 Km.

2. MATERIEL ET METHODES

L'analyse hydrologique de l'oued Inaouéne est basée sur les données d'une station hydroclimatique située au milieu du bassin. L'analyse des débits extrêmes (crues et étiages) et la caractérisation du régime du fleuve, est essentielle dans les études en hydrologie.

Dans le présent travail, la méthodologie adoptée est basée sur deux approches :

Une approche empirique qui prend en considération d'une part les débits et d'autre part les paramètres caractérisant le bassin.

Parmi les paramètres caractéristiques du bassin, on a pris en considération la méthode des écarts (E_c) des débits moyens annuels (Q_{ma}) au débit moyen interannuel (Q_{mi}), le coefficient d'hydraulicité (C.H), le coefficient d'immodération (R) et le coefficient de variation (C.V).

En se basant sur les débits mensuels et les précipitations mensuelles, on a pu analyser les variations mensuelles. Afin de mettre en évidence les débits journaliers, des représentations sous forme de courbe ont été réalisées, dont le but d'avoir une vision générale sur le régime d'écoulement.

Une approche probabiliste se base essentiellement sur une étude statistique des débits extrêmes (crues et étiages). Le but ultime de cette approche est de déterminer la répartition fréquentielle des débits extrêmes. Les valeurs étudiées des débits sont mesurées au niveau de la station de Bab Marzouka, station permanente du cours d'eau principal de l'Inaouéne. En ce qui concerne les précipitations et les températures, les cinq stations de Bab Marzouka, Taza, Bab Boudir, Tainest et Had Msila sont prises en considération.

Le choix des stations est basée sur la disponibilité des données pour la période étendue de 1982 au 2007. Ces données ont été soumises à une analyse sous le logiciel HYFRAN (Bobée et al., 1999) qui est dédié spécialement au traitement des données hydrologiques extrêmes.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les précipitations relevées dans les cinq stations sur la période 1982-2022 varient d'une station à l'autre. La moyenne annuelle est de 740,87 mm et la moyenne mensuelle de 59,89 mm.

Concernant les températures, la moyenne maximale est de 29,53°C en août et la moyenne minimale de 10,04°C en janvier. La température moyenne annuelle est de 20,24°C. L'analyse des données climatiques montre que le bassin versant du Haut Inaouéne est soumis à un climat semi-aride.

L'évapotranspiration réelle calculée est de 303,91 mm. Cela signifie qu'il existe un surplus d'eau qui alimente les nappes souterraines et les écoulements superficiels.

L'approche empirique a permis de mettre en évidence les variations spatiales et temporelles des écoulements superficiels. L'évolution des débits moyens annuels à la station de Bab Marzouka (Tableau 1) montre des irrégularités spatio-temporelles, avec une alternance de périodes humides et sèches.

Tableau 1 : Caractéristiques d'écoulements à Bab Marzouka

| | Superficie en Km ² | Débit liquide moyen annuel en m ³ /s | Débit moyen spécifique en l/s/km ² | Volume moyen annuel en mm ³ | Lame d'eau moyenne écoulee en mm |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Bab Marzouka | 1497 | 1,93 | 1,28 | 61,19 | 40,65 |

Afin de mettre en évidence les variations hydroclimatiques au niveau du bassin versant de l'Inaouène, la méthodologie des écarts (Ec) des débits moyens annuels (Q_{ma}) au débit moyen interannuel (Q_{mi}) est fiable, puisqu'elle est utilisée par plusieurs auteurs tels que Probst et Tardy (1987) sur les fleuves mondiaux; Etchanchu (1988) sur la Garonne; Haida (2000) sur le Sebou; Sibari (2002) sur l'Inaouène, etc. L'application de la méthode des écarts (Ec) à notre bassin versant a montrée qu'il y a une alternance de périodes excédentaires et déficitaires dans la station de Bab Marzouka, avec la dominance des périodes déficitaires (Tab 2).

Tableau 2 : Déficit et excédent hydrologique relatifs à la station de Bab Marzouka

| Stations | Périodes déficitaires | Périodes excédentaires |
|--------------|-----------------------|------------------------|
| Bab Marzouka | 15 | 12 |

Parmi les autres irrégularités interannuelles calculées on trouve : le coefficient d'hydraulicité (C.H) qui a montré que plus de 50% des années sont déclarées déficitaires au niveau de la station de Bab Marzouka.

D'après l'analyse des irrégularités saisonnières des débits, on a pu déterminer le type du régime hydrologique, avec la présence d'une alimentation pluviale qui est liée avec la nature du climat semi-aride. Le fleuve Inaouène présente un régime hydrologique de type pluvial, avec un coefficient moyen mensuel élevé durant les mois de décembre à avril (Fig.2).

Le régime hydrologique du fleuve Inaouène est marqué par une forte influence des précipitations, avec des débits importants durant la saison pluviale (décembre à avril).Le fleuve Inaouène se distingue par un régime pluvial caractérisé par un pic de débits en hiver et un étiage en été.

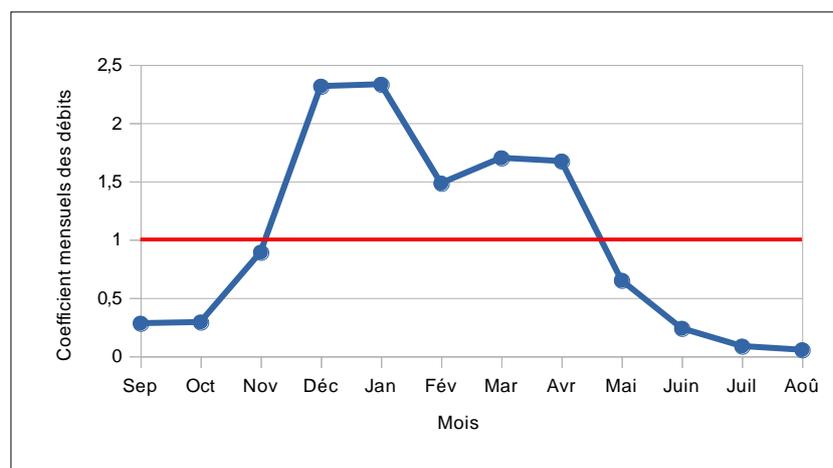


Figure 2 : Fluctuations du coefficient mensuel des débits au niveau de la station Bab Marzouka

L'étude de la relation entre les précipitations et les lames d'eau écoulées permet de déduire globalement un rapport entre les deux phénomènes (Fig.3). Par conséquent, on constate un décalage qui est lié aux conditions climatiques ainsi qu'aux caractéristiques morphologiques et litho-structurales du bassin versant.

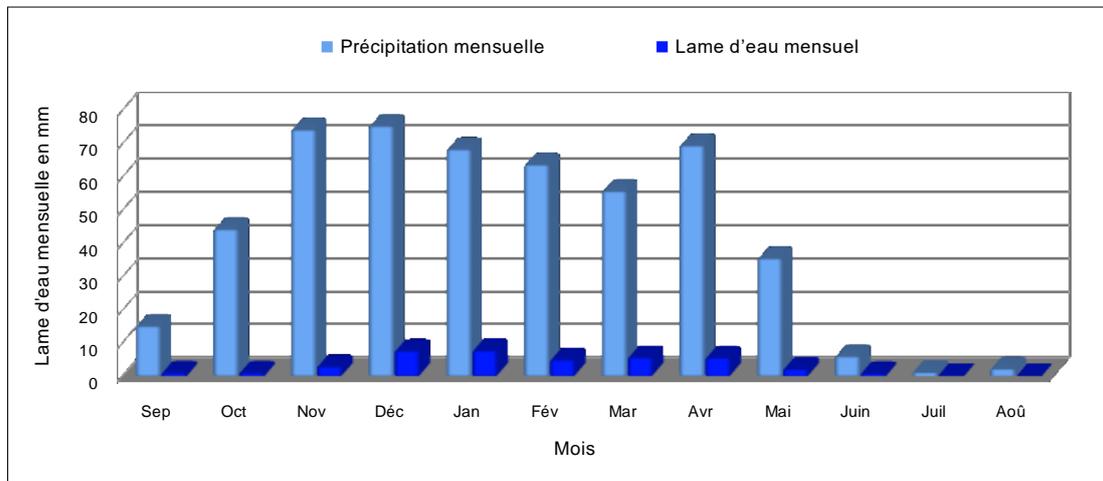


Figure 3 : Lames d'eau précipitées et écoulées au niveau de la station de Bab Marzouka

Un bilan du bassin versant du haut Inaouène est calculé en se basant sur la moyenne de bilans des stations principales (Fig. 4). L'évolution des précipitation durant l'année, est résumée par le bilan hydrique. Il permet de présenter la nature de chaque période de l'année selon les entrées et les sorties.

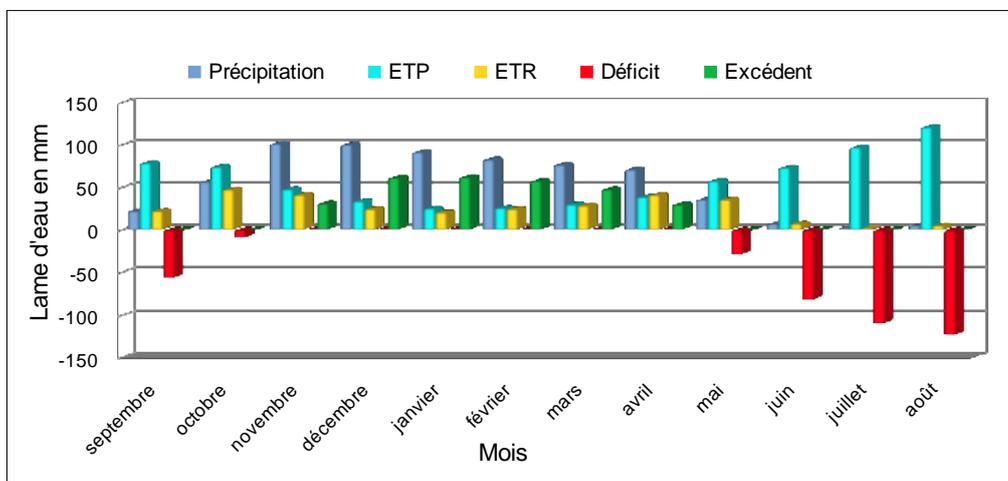


Figure 4 :Bilan hydrique, du bassin versant du haut Inaouène montrant les périodes excédentaires et déficitaires

CONCLUSION

Selon l'évolution des débits moyens annuels, on constate des irrégularités spatio-temporelles au niveau de la station du bassin versant du Haut Inaouène. L'analyse des variations saisonnières des débits a permis de déterminer le régime hydrologique de l'Oued Inaouène, qui se caractérise par un coefficient moyen mensuel élevé pendant la période pluviale pendant les mois de décembre, janvier, février mars et avril, qui lui permet d'être classé parmi les oueds à régime pluvial.

Le bilan hydrique du bassin versant du Haut Inaouène permet de distinguer quatre périodes: Période déficitaire (D) de mai à octobre, caractérisée par une faible pluviométrie et une forte évapotranspiration, ce qui entraîne une diminution des réserves en eau, **période de reconstitution des réserves (R)** en novembre et décembre, les précipitations augmentent et l'évapotranspiration diminue, ce qui permet de reconstituer les réserves en eau, **période de surplus (S)** de janvier à avril, les précipitations sont abondantes et l'évapotranspiration est faible, ce qui génère un surplus d'eau qui s'écoule vers les rivières et alimente les nappes phréatiques et **période d'évapotranspiration (E)** en mai, l'évapotranspiration est à son maximum et les précipitations sont faibles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. A. El-Haddad et al., 2023 Impacts des crues et des étiages sur les risques hydroclimatiques et géomorphologiques dans le bassin versant du Haut Inaouène.
Centre national de recherche forestière, 2020 Cartographie des risques hydroclimatiques et géomorphologiques dans le bassin versant du Haut Inaouène.
- H. El-Haddad et al., 2019 Modélisation hydrologique et hydrodynamique des crues dans le bassin versant du Haut Inaouène.
- L. Bouaicha et al., 2020.Évaluation des risques d'inondation et de glissement de terrain dans le bassin versant du Haut Inaouène.
- M. Benabdallah et al., 2022.Analyse des risques hydroclimatiques et géomorphologiques dans le bassin versant du Haut Inaouène.
- Naoura, J. 2012 Caractérisation hydrologique et qualitative des eaux de surface du bassin versant du Haut Inaouène. Thèse doc. Fac. Sc. Tech. Fès, p 281.
- Sibari, H. 2002 Etude hydrologique et hydrochimique des crues du bassin versant de l'Inaouène (Maroc) ; rôle des crues dans les processus d'érosion et de transport des matières solides et dissoutes. Thèse doc. Fac. Sc. Kénitra, p 164 .

LA DYNAMIQUE DES CRUES INONDABLES EN AVAL DU BASSIN DE L'OUED DERNA (ATLAS BENI MELLAL/MAROC) : EXTRACTION ET ANALYSE

Islah EL YAGOUBI¹, Mohamed EL GHACHI¹ et Hasan OUAKHIR¹

Faculté des lettres et sciences humaines, Université Sultan Moulay Slimane, (Béni Mellal/ Maroc),
Laboratoire Dynamic des paysages, Risques et Patrimoines, Maroc. *islahelya@gmail.com*

RESUME : Le bassin versant est une unité territoriale cruciale pour la gestion des ressources en eau et la compréhension des aléas hydrologiques. Sa configuration hydrographique joue un rôle intégrateur essentiel dans les processus et les probabilités d'occurrence. L'objectif de ce travail est de caractériser l'hydrodynamique du bassin versant de l'Oued Derna, situé dans l'Atlas de Béni Mellal, en utilisant la cartographie de la typologie des crues dans quelques tronçons représentatifs. La méthodologie adoptée repose sur l'idée de mutualisation structurée de l'amont à l'aval. La mise en œuvre de cette perspective nécessite l'identification de variables interdisciplinaires et de niveaux de gouvernance pertinents. Cela permet d'explicitier les enjeux et d'établir les règles nécessaires à la mise en œuvre de la mutualisation. En ce qui concerne les résultats, l'hydrosystème fluvial de l'Oued Derna se caractérise par une diversité géomorphologique, notamment dans la partie du cours d'eau à méandres, où l'érosion des berges et la migration latérale du chenal vif sont des moteurs essentiels. Dans de nombreux cours d'eau, cette migration latérale s'effectue selon un axe amont-aval, où le chenal vif se déplace en érodant sa rive concave et en déposant des sédiments en transit sur sa rive convexe. En considération de ces éléments, cette étude nous permettra de comprendre le fonctionnement hydrodynamique du bassin versant de l'Oued Derna et les crues dans cette région.

Mots-clés : Crue inondable; dynamique fluviale ; Extraction et analyse ; Atlas de Béni Mellal, Bassin versant de Derna,

FLUSH FLOOD DYNAMICS IN A DOWNSTREAM PART OF THE OUED DERNA BASIN (BENI MELLAL ATLAS/MOROCCO): EXTRACTION AND ANALYSIS

ABSTRACT: The watershed is a crucial territorial unit for the management of water resources and the understanding of hydrological hazards. Its hydrographic configuration plays an essential integrative role in the processes and probabilities of occurrence. The objective of this work is to characterize the hydrodynamics of the watershed of the Oued Derna, located in the Atlas of Béni Mellal, using the mapping of flood typology in some representative sections. The adopted methodology is based on the idea of structured mutualization from upstream to downstream. The implementation of this perspective requires the identification of interdisciplinary variables and relevant levels of governance. This allows the elucidation of issues and the establishment of rules necessary for the implementation of mutualization.

As for the results, the river hydrosystem of the Oued Derna is characterized by geomorphological diversity, especially in the meandering section of the watercourse, where bank erosion and lateral migration of the main channel are essential drivers. In many watercourses, this lateral migration occurs in an upstream-downstream direction, where the main channel moves by eroding its concave bank and depositing sediments in transit on its convex bank. Taking these factors into consideration, this study will enable us to understand the hydrodynamic functioning of the Oued Derna watershed and floods in this region.

Keywords: Floods; Fluvial dynamics; Extraction and analysis; Atlas of Beni Mellal, Derna basin,

INTRODUCTION

L'étude des phénomènes hydrologiques découle principalement de la mécanique des fluides, dont les lois sont formulées pour être appliquées à des milieux homogènes, supposés fortement linéaires (Barakat et al. 2016). Ainsi, l'analyse du fonctionnement hydro-géomorphologique d'un bassin-versant dans son ensemble est extrêmement complexe et nécessite sa décomposition en plusieurs sous-unités hydrologiques homogènes (Ouakhir et al, 2023). La complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant est liée au relais spatio-temporel des processus générant le ruissellement et les crues, aux effets d'échelle et aux effets de seuil. Les rivières du bassin-versant ont subi d'importants changements, un processus rapide et marqué par la simplification et la stabilisation sur le cours d'eau principal. Ces changements se manifestent par des modifications de la morphologie fluviale, le développement de la végétation sur les lits, le rétrécissement de l'espace naturel fluvial et l'incision des lits fluviaux (Ouakhir et al. 2022). Les facteurs de ce processus comprennent le changement global dans le bassin, la construction de réservoirs d'eau, ainsi que de nombreuses pressions humaines directes, notamment l'extraction de graviers et la canalisation. L'objectif de cet article est de caractériser le fonctionnement dynamique du bassin versant de l'oued Derna à travers un tronçon représentatif en aval. De plus, l'extraction des crues inondables vise à bien comprendre cette dynamique.

1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'Oued Derna est situé entre les méridiens $5^{\circ}49'W$ et $6^{\circ}13'W$, ainsi que les parallèles $32^{\circ}20'N$ et $32^{\circ}33'N$, au Nord-Est de la ville de Béni Mellal, sur la bordure Nord-Ouest de l'Atlas de Béni Mellal. Il est cartographié sur les cartes topographiques à l'échelle 1/100 000 de Béni Mellal, Imilchil, Khenifra et Kasbat Tadla.

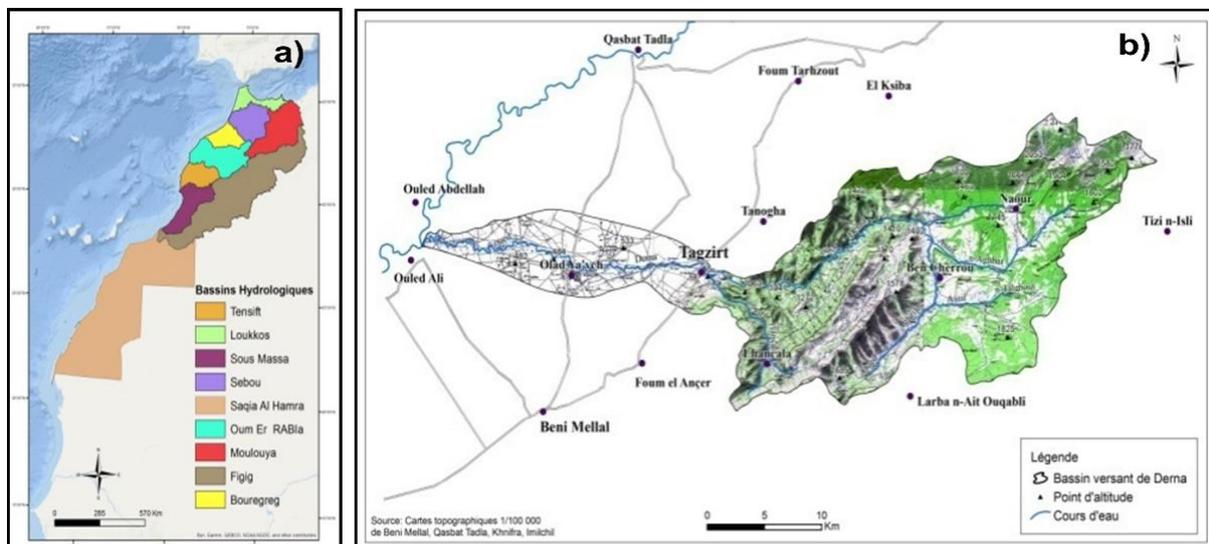


Figure 1: a) Les grands bassins hydrologiques du Maroc et b) situation du bassin de l'oued Derna au grand bassin de l'oued Oum ErrBia

Les projections de la Direction de la Météorologie nationale indiquent une augmentation des températures moyennes estivales de $2^{\circ}C$ à $6^{\circ}C$ et une diminution moyenne des précipitations de 20% d'ici la fin du siècle. Cela influence l'état local du bassin versant. Le climat est de nature méditerranéenne, caractérisé par des hivers doux et modérés, ainsi que des étés chauds et secs. Il se divise en deux saisons distinctes : une saison sèche et chaude s'étendant de mai à septembre, et une saison plus froide et humide d'octobre à avril.

À l'échelle régionale, la région de Béni Mellal-Khénifera présente un climat semi-aride dans la plaine et un climat sub-humide à semi-aride continental dans les montagnes d'Azilal (Boudhar et al. 2020). La température moyenne est de 18°C, avec des minimums atteignant -3,5°C dans certaines zones de la région Béni Mellal Khénifera et des maximums pouvant dépasser les 40°C. Les précipitations se concentrent principalement pendant les premiers mois de la campagne agricole, s'étendant jusqu'au mois de mai, avec une moyenne de 100 mm dans les zones arides et 600 mm dans les zones humides (Ouakhir et al. 2022).

2. MATERIEL ET METHODES

Différentes variabilités du cours d'eau dans le bassin versant de l'oued Derna ont été étudiées. Le cours d'eau de la zone d'étude a été divisé en trois parties, car il existe des différences significatives entre ses différentes sections, tant en amont qu'en aval.

2.1 Critères de découpage

- **Les gradients de pente** favorisent le ruissellement. En effet, sur un terrain plat, la pente est faible, ce qui entraîne une stagnation des eaux avec une infiltration sous l'influence de la gravité. En revanche, sur des terrains pentus, la gravité incite les gouttes d'eau à dévaler la pente vers les points bas. Plus la pente est prononcée, plus les vitesses d'écoulement sont élevées. L'écart entre la vitesse d'écoulement et la vitesse d'infiltration devient significatif, augmentant ainsi le ruissellement. Ainsi, l'observation des gradients de pente sur une carte topographique permet de repérer des zones à risque en ce qui concerne le ruissellement. Dans le cas de notre zone d'étude, l'amont se caractérise par des pentes fortes à moyennes, variant entre 20 et plus de 40%, avec des altitudes comprises entre 1050 m et 2250 m. La partie médiane de la vallée présente une pente élevée, avec des altitudes variant de 650 m à 1250 m. En aval, la pente est faible, inférieure à 10%, et les altitudes vont de 450 m à 650 m.

- **La forme** d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, des débits de crue plus faibles, en raison des temps d'acheminement de l'eau vers l'exutoire plus longs. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration T_c . Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu et de comparer les bassins versants entre eux. À titre d'exemple, citons l'indice de compacité de Gravelius (1914) KG , défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface.

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

L'indice de compacité de Gravelius (KG) est défini par la formule suivante : $KG = P / \sqrt{A}$ où :

- P est le périmètre du bassin versant en kilomètres,
- A est la surface du bassin versant en kilomètres carrés.

Cet indice est calculé à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre et la surface du bassin versant. Un indice proche de 1 indique un bassin versant de forme quasiment circulaire, tandis qu'un indice supérieur à 1 suggère un bassin de forme allongée.

Dans notre cas, $KG > 1$, ce qui signifie que le bassin versant a une forme allongée.

- **La température** joue un rôle crucial dans la détermination de la répartition entre la pluie et la neige, ainsi que dans l'étendue spatio-temporelle du manteau neigeux. Elle régit la dynamique de fonte de la neige ; des températures plus basses retardent la formation des sols et conduisent à des capacités de stockage d'eau plus faibles dans les sols. Cette relation complexe entre l'altitude, la température et les différents apports hydriques

contribue de manière significative à la variabilité du débit du cours d'eau entre l'amont et l'aval.

- **Les précipitations** sont plus fréquentes et abondantes en altitude par rapport aux zones de plaine. En moyenne montagne, elles peuvent se manifester sous forme d'orages. Cette distribution altitudinale des précipitations contribue significativement à l'augmentation du débit dans la partie amont du cours d'eau. Dans la partie avale, où l'altitude varie entre 450 et 650 mètres, les précipitations sont moins abondantes. L'infiltration est moins importante, et une forte évaporation caractérise la région, ce qui conduit à un débit plus faible, notamment pendant les périodes estivales.

- **Avec l'augmentation de l'altitude**, la profondeur du sol diminue, entraînant une réponse hydrologique plus rapide. Cette caractéristique influence la capacité du sol à stocker l'eau et à réguler le débit du cours d'eau.

- En raison de la courte période de croissance en altitude, **la végétation** présente une évapotranspiration réduite, une interception minimale des précipitations et une protection moindre contre l'érosion. Ces facteurs contribuent à l'impact de la végétation sur la dynamique hydrologique de la zone.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Caractérisation hydrodynamique du tronçon étudié :

La partie amont correspond à la zone montagneuse caractérisée par l'importance des affluents et une diversité végétale notable. La nature du substratum ce sont les formations tendres qui couvrent environ 60 à 70% et ce sont celles qui favorisent un écoulement intense des précipitations pendant la période hivernale.

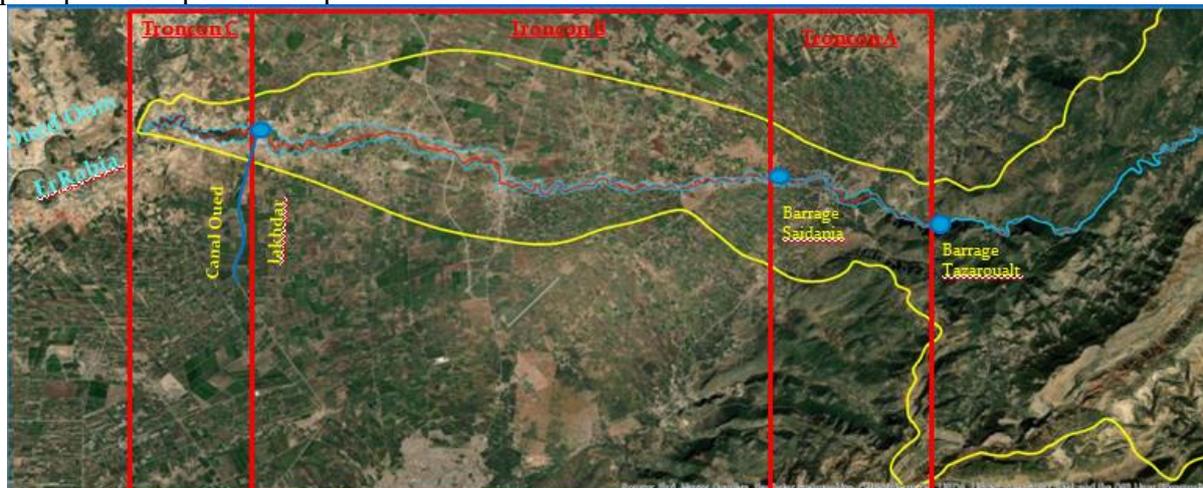


Figure 2: Découpage du cours d'eau principal de la partie avale de la zone d'étude (Image satellitaire).



Figure 3: Tronçon A (Image satellitaire)

Les caractéristiques du lit mineur entraînent des débordements, en particulier dans la zone de confluence entre l'oued Bounoual et l'oued Bencherrou, où le lit majeur est occupé par de petites

exploitations agricoles avec des arbres fruitiers tels que des pommiers et des noyers. Les matériaux transportés et la violence des crues ont également causé des dommages matériels, affectant notamment les ouvrages de franchissement et les champs agricoles.

3.2 La typologie des crues dans les tronçons étudiés

► Tronçon A

Les crues sont à double tranchant, agissant à la fois comme un élément favorable et comme un risque, qu'il soit d'origine naturelle ou anthropique, ce dernier engendrant différents impacts. Les conséquences sur les débits liquides sont influencées par les prélèvements d'eau. La modification la plus fréquente concerne la fréquence, l'amplitude et la durée des débits extrêmes. Les pics de crue sont souvent réduits, tandis que les débits d'étiage peuvent être augmentés (Azioune, Tatar, and Nouaceur 2018; Lahsaini and Tabyaoui 2018; Verlynde 2019). Dans la région du bassin versant de l'Oued Derna, les crues font partie intégrante du cycle naturel des saisons.

► Présentation du tronçon B

Le tronçon s'étend du barrage de Saidania jusqu'au Canal "D". Un barrage de dérivation, le barrage Saidania, a été aménagé pour dévier l'eau à travers deux canaux d'irrigation en direction d'Ouled Yaich et Zouair. La figure ci-dessous illustre la localisation du prélèvement d'eau ainsi que les communes riveraines dans le bassin versant de l'Oued Derna.



Figure 4: Tronçon B (Image satellitaire).

L'hydrosystème connaît des processus essentiels lors des crues de débordement, tels que la régénération du substrat, la redistribution des accumulations de matière organique, et la dilution des particules fines minérales et organiques sur toute la plaine d'inondation. Le débit d'eau élevé est l'élément central de cette étude. Dans la zone d'étude, des crues de forte ampleur sont nécessaires pour augmenter le niveau des eaux et atteindre le tronçon B. Ces inondations sont bénéfiques dans le processus d'irrigation des terres agricoles.

► Présentation du tronçon C:



Figure 5: Tronçon C (Image satellitaire).

Le tronçon (C) s'étend du barrage Canal "D" jusqu'à Oum Er-Rabia. Le régime de l'Oued Derna est influencé à la fois par les prélèvements et par l'apport en eau du canal.

CONCLUSION

En conclusion, cette étude approfondie sur la dynamique des crues inondables en aval du bassin de l'Oued Derna dans l'Atlas de Béni Mellal, au Maroc, met en lumière l'importance cruciale du bassin versant en tant qu'unité territoriale pour la gestion des ressources en eau et la compréhension des aléas hydrologiques. L'utilisation de la cartographie de la typologie des crues dans des tronçons représentatifs a permis de caractériser l'hydrodynamique complexe de cette région. Les résultats ont révélé une diversité géomorphologique marquée dans le cours d'eau, notamment dans la partie à méandres, avec l'érosion des berges et la migration latérale du chenal vif comme moteurs essentiels. La caractérisation hydrodynamique des différents tronçons a permis de comprendre les variations dans le comportement des crues, mettant en évidence l'impact significatif des facteurs tels que la pente, la forme du bassin versant, l'altitude, la température, et les précipitations. Les crues ont été étudiées dans trois tronçons distincts, soulignant leur double rôle en tant qu'éléments favorables et risques, en particulier pour l'irrigation des terres agricoles.

Références bibliographiques

- AZIOUNE, ROKIA, HAFIZA TATAR, AND ZEINEDDINE NOUACEUR (2018) : Pluies Extrêmes Et Risque D'Inondation Dans La Ville De Biskra (Algerie).” *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre* (48): 93–106. <http://revue.umc.edu.dz//index.php/d/article/view/2995>.
- BARAKAT, AHMED ET AL (2016): Assessment of Spatial and Seasonal Water Quality Variation of Oum Er Rbia River (Morocco) Using Multivariate Statistical Techniques.” *International Soil and Water Conservation Research* 4(4): 284–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.11.002>.
- BOUDHAR, ABDELGHANI ET AL. (2020): Advances in Science, Technology and Innovation Hydrological Response to Snow Cover Changes Using Remote Sensing over the Oum Er Rbia Upstream Basin, Morocco. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-21166-0_9.
- LAHSAINI, MERIAM, AND HASSAN TABYAOUI. (2018) : Modélisation Hydraulique Mono Dimensionnel Par HEC RAS, Application Sur L'oued Aggay (Ville De Sefrou).” *European Scientific Journal, ESJ* 14(18): 110.
- OUAKHIR, H, ENNAJI, N, EL GHACHI, M, AND GOUMIH, M. (2022) : La Réalisation d'un Modèle Numérique Du Terrain Pour La Détermination de L'évolution de L'érosion Hydrique d'une Section Fluviale En Amont Du Barrage de Bin El Ouidane (2016 - 2017) – (Haut Atlas /Maroc).” *European Scientific Journal ESJ* 9(September): 175–95.
- OUAKHIR, H, SPALEVIC, V, ENNAJI, GOUMIH, M, GHDBANE, O, CHAKIR, M. (2023): changes in river bank morphology in a small meander of El Abid river , Atlas Mountains .” *69(3): 199–209. doi:10.17707/AgricultForest.69.3.14*.
- VERLYNDE, N. (2019) : De La Perception Du Risque d ' Inondation Aux Propositions d ' Adaptation En Territoire de Côtes Basses Densément Peuplées: Le Cas de La Communauté Urbaine de Dunkerque To Cite This Version : *HAL Id : Tel-02085107 De La Perception Du Risque d ' Inondation*.

Risques hydrologiques sur le réseau routier dans la région de Debdou (Maroc oriental)

AMGHAR Ahmed, SBAI Abdelkader, BENRABIA Khadija & MOUADILI Omar
Université Mohamed I^{er}, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines. Labo Dynamiques
des Milieux Arides, Aménagement et Développement Régional, Oujda, Maroc.

hamadaguni@gmail.com

Résumé: L'étude des risques hydrologiques sur le réseau routier est devenue une préoccupation de la géographie physique, en raison de ses effets économiques et sociaux représentés par la destruction de véhicules et d'infrastructures, la perturbation du réseau de circulation, le transport de marchandises et l'accès aux écoles et autres institutions publiques.

Les risques hydrologiques dans la région de Debdou se caractérisent par des chutes de neige et des inondations de la route nationale n° 19. Des cas de ces risques ont été étudiés en réalisant des coupes géologiques des points menacés, et en essayant d'expliquer leur dynamique par les caractéristiques naturelles qui les distinguent, afin de connaître les mécanismes les plus importants qui conduisent à ce type de risque sur les routes revêtues.

Il est clair que la structure géologique, les caractéristiques géomorphologiques et le type de couverture végétale, en plus de l'intervention humaine représentée dans le pavage de la route de manière inappropriée et dans un milieu fragile, favorisent l'inondation des routes par les eaux de crue, car les caractéristiques morphométriques d'Oued Debdou n'ont pas été prises en compte lors de la réalisation des équipements liés à cette route.

Mots-clés : Risques hydrologiques, réseau routier, inondations, Maroc oriental.

Hydrological risks on the road network in the Debdou region (eastern Morocco)

Abstract: The study of hydrological risks on the road network has become a concern of physical geography, due to its economic and social effects represented by the destruction of vehicles and infrastructures, the disruption of the traffic network, the transport of goods and access and access to schools and other public institutions.

The hydrological risks in the Debdou region are divided into landslides, snowfalls and flooding of national road No. 19. Cases of these risks have been studied by carrying out geological sections of the threatened points, and by trying to explain their dynamics by the natural characteristics that distinguish it, in order to know the most important mechanisms that lead to this natural risk on paved roads.

It is clear that the geological structure, the geomorphological characteristics and the type of vegetation cover, in addition to the human intervention represented in the paving of the road in an inappropriate way and in a fragile environment, favor landslides on the slopes of this region, as well as the inundation of roads by flood waters, because the morphometric characteristics of Oued Debdou were not taken into account during the realization of the equipment related to this road.

Keywords: Hydrological risks, road network, floods, eastern Morocco.

1. Introduction

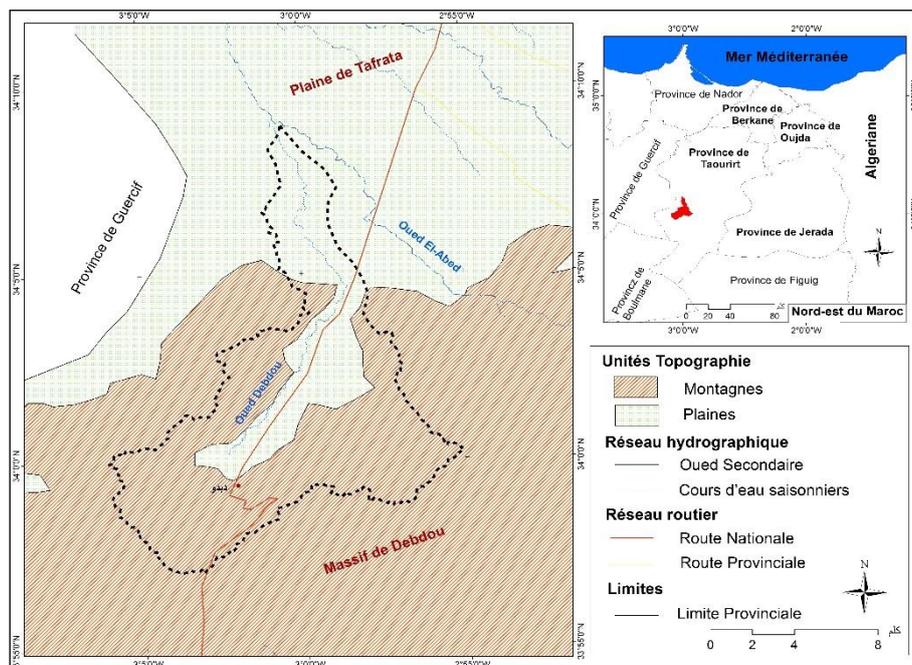
Plusieurs sciences se chevauchent dans l'étude des menaces liées aux risques hydrologiques des routes revêtues, telles que l'hydrologie, la géomorphologie, la géologie, la climatologie... qui sont importantes pour identifier les différents facteurs responsables de la création de l'aléa. Sur la base de ces sciences, des cas de risques hydrologiques ont été étudiés dans la région de Debdou.

Il y a eu de nombreuses études sur la région de Debdou qui se sont concentrées sur la dégradation de l'écosystème, représentée par la couverture végétale, l'érosion des sols et la désertification... La plus importante étant la thèse d'ElHaradji, 2019 ; Mejdoubi et al., 2017 ; 2021). Cependant, la plupart de ces études n'ont pas abordé les aléas naturels qui menacent le réseau routier, à l'exception de quelques études techniques qui sont intervenues après l'aggravation de l'aléa dans la région et sa récurrence périodique (DPETT, 2013).

2. Matériel et méthodes

2.1. Cadre géographique

La zone d'étude est située au nord-est du Maroc. Elle est bordée au nord et à l'ouest par la plaine de Tafрата, à l'est par la chaîne de Jerada, et au sud par les Hauts plateaux (Fig. 1)



Source : Découpage administratif de 2015

Figure 1 : Situation de la zone d'étude

La zone de Debdou est située à l'extrême nord-est du Maroc. Elle se caractérise par une étroite dépression à l'origine de la ville de Debdou, qui est percée par un cours d'eau majeur qui est Oued Debdou. La vallée est entourée, de chaque côté, d'importants reliefs, formant ainsi le massif de Debdou.

2.2. Méthode d'étude du risque hydrologique

La méthode de travail comprend une étude des cas menacés par les risques hydrologiques de la zone de Debdou, et leur analyse basée sur le travail de terrain, pour montrer les mécanismes fondamentaux à l'origine de la survenance de ces risques, afin de déterminer

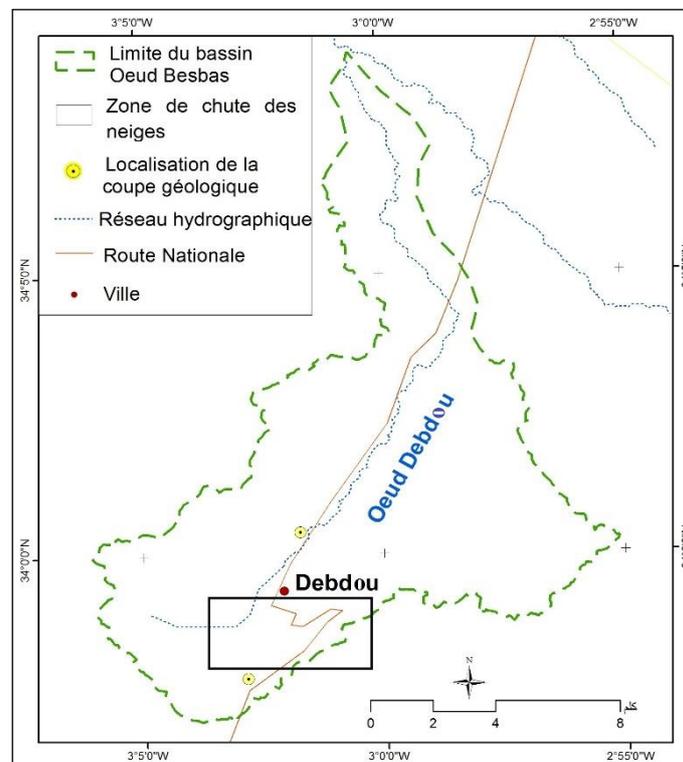
les outils de gestion et d'aménagement appropriés pour les réduire. Parmi les outils utilisés pour faciliter le processus de recherche figurent :

- L'étude de la structure géologique des points étudiés à partir de la carte géologique d'Oujda à 1/500000 ;
- La détermination des caractéristiques topographiques à partir des cartes topographiques à 1/50000, ou d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une résolution de 12,5 mètres ;
- L'analyse des caractéristiques climatiques à partir de données obtenues auprès des services administratifs ;
- La valorisation de ce travail en utilisant les Systèmes d'Information Géographique (SIG), qui sont l'outil principal de l'analyse géographique moderne, afin de suivre et de mesurer certains phénomènes.

3. Résultats

Dans cette étude des cas de risques hydrologiques sur les routes revêtues, la recherche s'est concentrée sur la classification de chaque risque séparément afin de vérifier certains des facteurs fondamentaux qui contrôlent la création des aléas naturels. Cette classification comprend un cas associé à un aléa hydrologique, un cas menacé par un aléa climatique.

L'oued Debdou est considéré comme un cours d'eau majeur dans la région, et constitue une menace permanente pour la route nationale n°19, qui est coupée périodiquement à chaque événement naturel représenté par le débordement de la vallée. La forme du bassin longitudinal, d'une superficie d'environ 132 km² (Fig. 2), et son amont à altitude élevée, avec des précipitations dépassant 500 mm par an, contribuent de manière significative à la fréquence et à l'intensité de l'aléa.



Une coupe géologique a été réalisée sur la route nationale n° 19, à son point de rencontre avec Oued Debdou. C'est d'ailleurs la seule route qui traverse la ville de Debdou. Elle est périodiquement coupée par l'oued en raison des inondations, en plus d'autres risques naturels tels que les glissements de terrain en amont de la ville en raison des fortes pentes (Fig. 3).

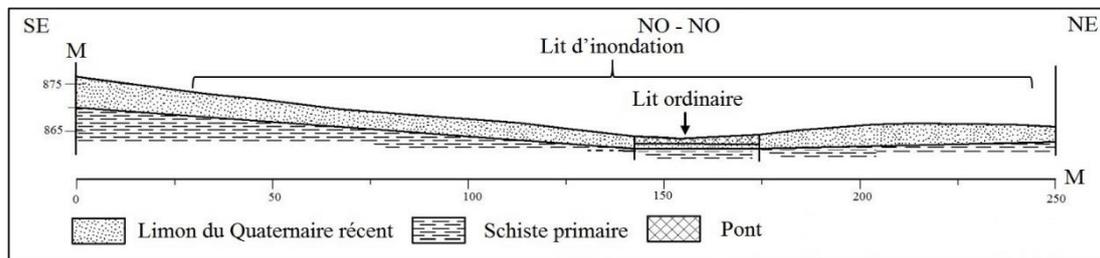


Figure 3 : Coupe géologique d'Oued Debdou à son intersection avec la Route Nationale n°19

Oued Debdou se caractérise par un large cours d'eau, ce qui rend la création d'un pont de grande dimension sur la route nationale n°19 à sa confluence avec Oued Debdou un processus difficile et coûteux. D'autant plus que la route n'est pas rectiligne au fond de la vallée, mais prend plutôt une forme courbe près de la vallée notamment, ce qui rend l'opération plus difficile (Photo 1).



Photo 1 : Tronçon étudié de la Route Nationale n°19 sur Oued Debdou (21/11/2020)

Il est à noter que la route est construite sur un pont qui peut être submergé, avec des canaux de drainage qui ne sont pas en mesure d'absorber le volume et la force du débit d'eau créé par la vallée (photo 1).

Les formations du Quaternaire récent qui se sont déposées dans la vallée, en plus du substratum rocheux fragile représenté par les schistes, rendent plus difficiles les opérations d'aménagement de la vallée et de réduction de la coupure de la route due aux inondations.

4. Discussion

Proposer des solutions pour des points menacés par des aléas hydrologiques est un processus complexe. La question nécessite une enquête sur le terrain des faits avec une pleine perspicacité de la part des personnes concernées et en utilisant des fondements et des méthodes scientifiques appropriés à la nature des milieux. Ce qui permettrait de diagnostiquer avec précision la menace et de définir les responsabilités, afin de pouvoir développer des programmes appropriés pour sa remise en état et assurer une croissance régulière et durable de la population dans la zone de Debdou.

La menace hydrologique sur la route n°19 due à l'oued Debdou est considérée comme l'un des types d'inondations les plus difficiles à aménager, car il nécessite une vision globale de

l'emplacement de la route, de la morphologie de la vallée à son intersection avec la route, et le type de formations de sol...

Il faut aussi, lors de l'aménagement de ce point, prendre en compte le coût financier du projet d'aménagement. Ainsi il sera proposé de détourner partiellement la route au lieu de se contenter de surélever le pont du fond de la vallée. Se contenter de cette seule solution coûtera très cher, car le pont sera très large (Fig. 4).

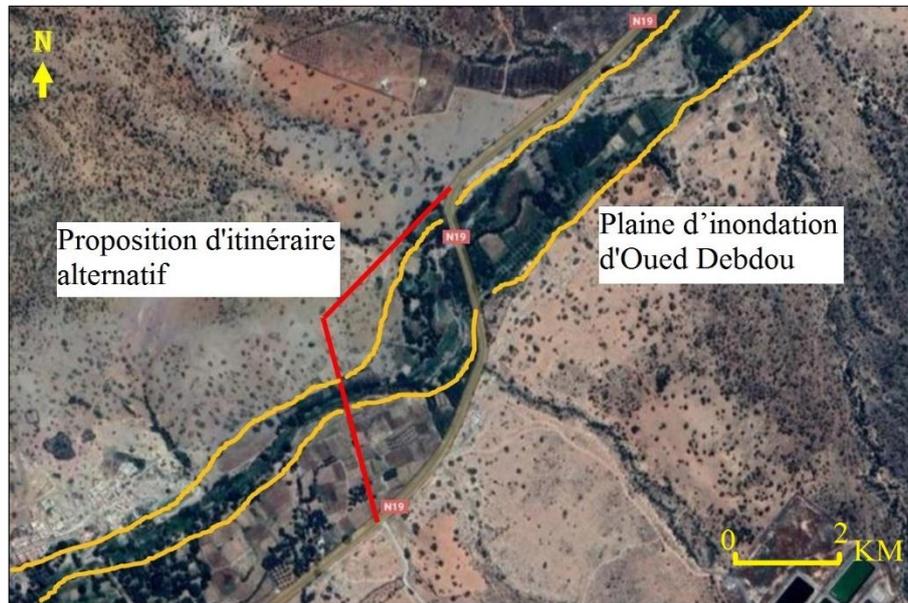


Figure 4 : Une illustration du tracé alternatif proposé pour réduire la menace d'inondation d'Oued Debdou

On note que la route nationale n°19 traverse Oued Debdou à l'endroit du lit majeur de crue (Fig. 4), et que sa topographie générale est faible, ce qui la rend toujours vulnérable aux inondations, d'autant plus que la région connaît des précipitations importantes qui dépassent 500 mm par an en moyenne. Par conséquent, il a été proposé de détourner la route relativement, vers une zone topographique un peu plus élevée, en plus du fait que la plaine inondable dans cette zone est étroite par rapport au point précédent, ce qui facilite bien le processus d'aménagement en élevant le pont et en réduisant aussi son coût matériel.

Conclusion

La multiplicité des risques hydrogéomorphologiques qui menacent le réseau routier dans la région de Debdou nécessite des mesures volontaristes pour les réduire. Ces risques naturels sont généralement une source d'événements soudains résultant de facteurs purement naturels, comme la fragilité géomorphologique, qui est à la base de la création de l'aléa naturel, représenté par la taille des cours d'eau, et ses compositions morphométriques, et la structure des versants d'une manière qui contribue à augmenter la sévérité de l'aléa naturel, ou des facteurs naturels influencés par l'homme avec ses interventions inappropriées à travers le pavage de routes dans des milieux vulnérables, ou bien la réalisation d'équipements qui ne tiennent pas compte des conditions de la dynamique naturelle du site menacé par l'aléa naturel...

Comme la plupart des communes dans la zone d'étude n'ont pas de revenus économiques significatifs, la gestion des cas étudiés ou du reste des cas menacés par les risques hydrogéomorphologiques nécessite des efforts concertés aux niveaux local et provincial ainsi que régional. Dans certains cas, cela peut même nécessiter une intervention au niveau national, en raison de grands événements qui nécessitent des budgets énormes.

Bibliographie

- DIRECTION PROVINCIALE DE L'EQUIPEMENT, DU TRANSPORT ET DE LA LOGISTIQUE DE TAOURIRT, « Fiche d'évaluation de la compagnie de déneigement 2015/2016 ».
- DIRECTION PRPVINCIALE DE L'EQUIPEMENT ET DU TRANSPORT DE TAOURIRT (2013). « Etude de remise en état suite aux dégâts de crue importants causés à l'ouvrage existant sur oued Bourdime situé au Pk 24+000 de la RP 6005 ». Rapport de présentation. 61 p.
- El Harradji A (1993). « Morphodynamique, actions anthropiques et environnement dans le massif de Debdou, Makkam et ses bordures (Maroc oriental) ». Actes du 2ème congrès des géographes africains. Colloque de Rabat et Agadir. Pp 103-112.
- Mejdoubi E, Sbai A & Elharradji A (2017) - Les activités agropastorales et l'érosion du sol des steppes de l'Est Marocain. Actes du Colloque national sur « Les risques hydroclimatiques et géomorphologiques au NE Marocain: aléas, vulnérabilités et aménagements ». Oujda le mardi 26 décembre 2017. P.124-128. <http://www.ump.ma/fr/ouvrages/colloque-oujda-les-risques-hydroclimatiques-et-geomorphologiques-au-ne-marocain-2017>.
- Mejdoubi E, Sbai A & Elharradji A (2021) - Les activités agropastorales et l'érosion du sol des steppes de l'Est marocain. Revue Espace Géographique et Société Marocaine n°53. Octobre 2021. P.19-27. <https://revues.imist.ma/index.php/EGSM/article/view/28418/14782>.
- Mejdoubi E, Sbai A et Elharradji A (2021) - Redéploiement agropastoral et dynamique environnementale dans les steppes de l'est marocain. Actes du Colloque international: la dynamique de l'environnement et les risques naturels en milieux méditerranéens. Oujda les 4 et 5 juin 2021. P.189-195. <http://www.ump.ma/fr/ouvrages/colloque-international-la-dynamique-de-lenvironnement-et-les-risques-naturels-en-milieux-mediterraneens-2021>.
- عبد السلام علي أحمد (2000). "بعض الأخطار الطبيعية على الطرق البرية في شمال سلطنة عمان، دراسة في الجيومورفولوجيا التطبيقية". رسائل جغرافية، قسم الجغرافيا، جامعة الكويت، الجمعية الجغرافية الكويتية. 138 ص.

DÉTERMINATION DES ZONES PRIORITAIRES A L'AMÉNAGEMENT DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED TAMDA (RIF CENTRAL MAROC) PAR L'APPLICATION DE LA MÉTHODE PAP/CAR

EL OUAZANI ECH-CHAHDI Khadija^{1)*}, EL-BOUHALI Abdelaziz¹⁾ et AMYAY Mhamed¹⁾

¹⁾ Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Unité de recherche : Milieux Naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-Spatiales. *khadija.elouazaniechachahdi@usmba.ac.ma

RÉSUMÉ : Cette contribution a pour objectif la cartographie et la spatialisation de l'érosion potentielle dans le bassin versant de l'oued Tamda par l'application de l'approche PAP/CAR (Programme d'Action prioritaire du Centre d'Activités régionales). Elle intègre les facteurs explicatifs de l'érosion hydrique, notamment la pente, la lithologie, l'occupation du sol et le couvert végétal. La superposition de ces paramètres est facilitée par l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), ce qui permet la réalisation de la carte des états érosifs et, par conséquent, la détermination des zones prioritaires à l'intervention. Les résultats obtenus mettent en évidence la forte sensibilité de la zone d'étude à l'érosion hydrique. En effet, les zones instables représentent environ 84 % de la superficie du bassin, dont plus de 48% des terres se caractérisent par une sensibilité très élevée à l'érosion. La fragilité de ce bassin peut contribuer à la production de quantités substantielles de sédiments, exerçant ainsi une influence sur la qualité des sols, la productivité des terres agricoles et les retenues des barrages. Cette situation nécessite une intervention rapide à travers des programmes d'aménagement antiérosifs.

Mots-clés : Érosion hydrique, PAP/CAR, Vulnérabilité, Bassin versant de Tamda.

DETERMINATION OF PRIORITY AREAS FOR DEVELOPMENT IN TAMDA WATERSHED (CENTRAL RIF, MOROCCO) THROUGH THE APPLICATION OF THE PAP/CAR APPROACH.

ABSTRACT: This contribution aims to map and spatialize potential erosion in Tamda watershed through the application of the PAP/CAR approach (Priority Activity Program/Regional Activity Center). This approach integrates explanatory factors of water erosion, including slope, lithology, land use, and vegetation cover. The overlay of these parameters is facilitated by the use of Geographic Information Systems (GIS), enabling the creation of a map depicting erosive states and, consequently, determining priority areas for intervention. The obtained results highlight the high sensitivity of the study area to water erosion. Indeed, unstable areas represent approximately 84% of the basin's surface, with over 48% of the land characterized by a very high sensitivity to erosion. The fragility of this watershed can contribute to the substantial production of sediments, exerting an influence on soil quality, agricultural land productivity, and the reservoirs of dams. This situation requires swift intervention through anti-erosion development programs.

Keywords: Water erosion, PAP/CAR, Vulnerability, Tamda watershed.

INTRODUCTION

La dégradation des sols par l'érosion hydrique constitue l'une des contraintes sérieuses au développement agricole (Kimaro et al, 2008) dans le monde. Au Maroc, les problèmes d'érosion sont connus depuis plusieurs décennies (Sabir et al., 2002) et affectent environ 40% des terres (El Jazouli et al., 2019). Heusch (1970) a montré que 60 % des pertes en sol au Maroc proviennent principalement du Rif, où les taux d'érosion atteignent parfois 30 à 60 t/ha/an (Belasri et Lakhouili, 2016). Dans cette région du Maroc, l'érosion hydrique est une cause majeure de la dégradation des terres et des barrages. Selon le ministère de l'Aménagement du territoire, les barrages perdent chaque année environ 125 millions de m³ de leur capacité initiale de stockage sous l'effet de l'envasement (Ayt Ougougdal et al., 2020), dans un contexte de changements climatiques et de stress hydrique qui affectent le pays et qui tendent à s'aggraver dans les prochaines années (Ait Yacine et al., 2019). Donc l'intervention par des programmes de gestion des bassins versants est devenue aujourd'hui nécessaire. Cette opération doit être précédée par la détermination des zones prioritaires à l'intervention selon leur degré de sensibilité à l'érosion hydrique, et c'est l'objectif principal que l'approche PAP/CAR vise à atteindre. Cette approche a été largement appliquée au niveau des bassins marocains, notamment les bassins situés dans le Rif et le pré-Rif.

ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'Oued Tamda fait partie du Rif central (Figure 1). Il s'étend sur une superficie d'environ 60 km² et occupe la partie sud-est du bassin versant de l'Oued Ouergha, qui fait partie du bassin de Sebou. Administrativement, le bassin appartient à la province de Taounate et s'étend sur les collectivités territoriales de Bni Oulid et Fennassa Bab El Hit.

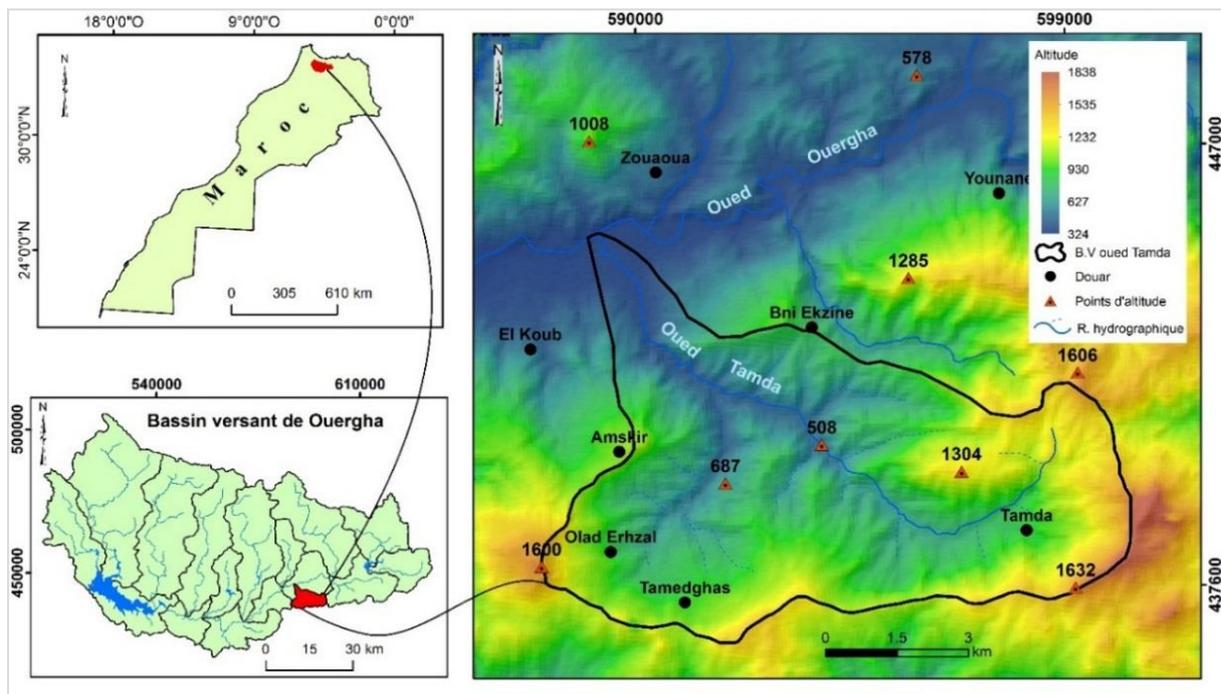


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Oued Tamda présente un environnement fragile et vulnérable à la dégradation. Il se distingue par des versants très abrupts et des formations lithologiques fragiles telles que les marnes, les argiles et les flyschs, qui sont facilement sujets à l'érosion. Le couvert végétal naturel est fortement dégradé en raison du défrichage et du pâturage, même sur les pentes raides. En outre, la zone d'étude est caractérisée par des précipitations orageuses concentrées dans le temps et l'espace, avec une tendance à la sécheresse au cours des dernières

années. La sédentarisation humaine dans cette zone remonte à une période ancienne, exerçant ainsi une pression considérable sur les ressources naturelles.

MÉTHODOLOGIE

La démarche méthodologique repose sur l'application de l'approche PAP/CAR, réservée à l'évaluation qualitative de l'érosion hydrique. Cette approche intègre les facteurs déterminants dans la dégradation des sols, tels que la pente, la lithologie, l'occupation du sol, et le taux de recouvrement. Ces facteurs sont superposés afin d'élaborer la carte d'état érosif, permettant ainsi de hiérarchiser le bassin versant en unités selon leur degré de sensibilité à l'érosion. PAP/CAR se base sur trois phases détaillées dans la directive (PAP/CAR, 1998) : la phase prédictive, la phase descriptive, et la phase d'intégration (figure 2). Dans cette étude, l'accent a été mis sur la phase prédictive de l'approche, dans le but de réaliser la carte de la sensibilité à l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Tamda et de déterminer les zones prioritaires à l'aménagement.

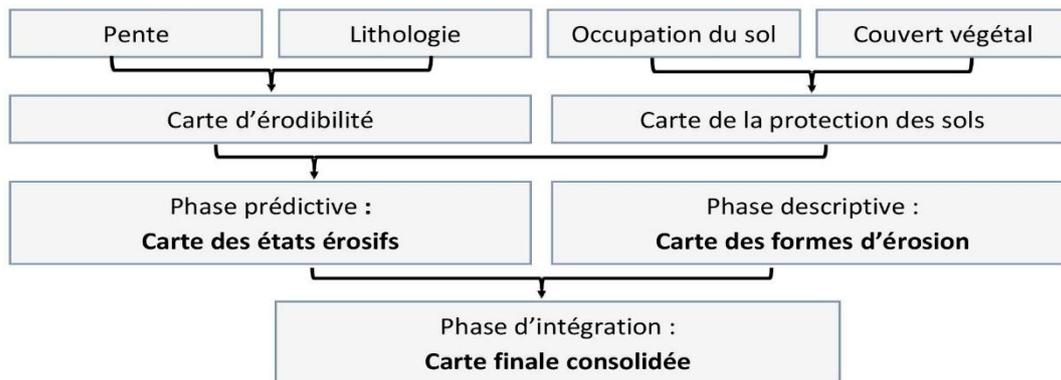


Figure 2. Schéma méthodologique de la méthode PAP/CAR

L'application de l'approche PAP/CAR est fondée sur une base de données intégrant une diversité d'informations provenant de sources variées. Nous avons utilisé des images satellites (Landsat 9) pour élaborer la carte d'occupation du sol et la carte de recouvrement (NDVI). De plus, nous avons exploité la carte géologique de Thar Souk à l'échelle 1/50000 (1983) afin de réaliser la carte des lithofaciès. La carte des pentes est créée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) Aster GDM avec une résolution spatiale de 30 mètres. Des visites sur le terrain ont également été effectuées pour valider les résultats obtenus.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Analyse des facteurs d'érosion dans la zone d'étude

L'analyse des facteurs proposés dans le cadre de l'approche PAP/CAR indique que le bassin versant d'Oued Tamda est un milieu vulnérable à l'érosion. En effet, le bassin versant se caractérise par la prédominance de la classe des pentes très abruptes (entre 20% et 35%), représentant environ 41% de la superficie totale du bassin. Les pentes abruptes couvrent près de 33%, tandis que les pentes faibles et modérées occupent des surfaces limitées (18% de la superficie totale du bassin) et sont réparties sur l'ensemble du bassin. Ainsi, la zone d'étude se caractérise par la prédominance des formations lithologiques de faible résistance, occupant environ 37,67% de la superficie. Il s'agit de formations facilement érodables, telles que les argiles, marnes et sols meubles, localisés principalement dans la partie médiane et aval du bassin. Les formations résistantes, comme le calcaire en banc et le conglomérat fortement cimenté, représentent environ 28% de la superficie totale ; elles présentent une sensibilité très faible à l'érosion.

Dans la zone d'étude, l'analyse de l'occupation des sols met en évidence une prédominance significative des terrains d'arbustes clairsemés et de pâturages, couvrant près de 30,6% de la superficie totale. Ils sont suivis par les cultures en ligne (olivier, amandier, figuier...),

représentant environ 27,7% du bassin. La zone d'étude présente une extension limitée des massifs forestiers (14,7%), des zones d'arbustes denses (20,5%) et des zones de cultures sèches (6,2%). Cette configuration suggère un niveau de protection végétale relativement faible dans le bassin. En ce qui concerne le taux de recouvrement, les résultats indiquent la prédominance de la classe de recouvrement moyenne (25%-50%), couvrant 37% de la superficie du bassin, principalement constituée de terrains d'arboriculture moyennement denses. La classe de recouvrement faible (inférieure à 25%) représente 31,2% de la superficie, occupant les terrains de culture sèche saisonnière et les terrains nus. Les classes de recouvrement élevé et très élevé occupent environ 31,6%, englobant notamment les forêts et les zones d'arboriculture denses.

Erodibilité et protection des sols

La superposition de ces deux facteurs (pentes et lithofaciès) permet l'élaboration de la carte d'érodibilité. Les résultats obtenus (figure 3a) indiquent que le bassin versant d'Oued Tamda est marqué par la prédominance des classes d'érodibilités extrêmes (35,8%) et fortes (25,1%), occupant les terrains caractérisés par des pentes très abruptes et des formations lithologiques friables (marne, flysch, matériaux détritiques...). Cependant, les sols d'érodibilité faible à modérée ne couvrent que 18,5% de la superficie totale, notamment dans les parties de la zone d'étude caractérisées par des pentes faibles (exutoire du bassin) ou dans les zones marquées par des formations lithologiques très résistantes.

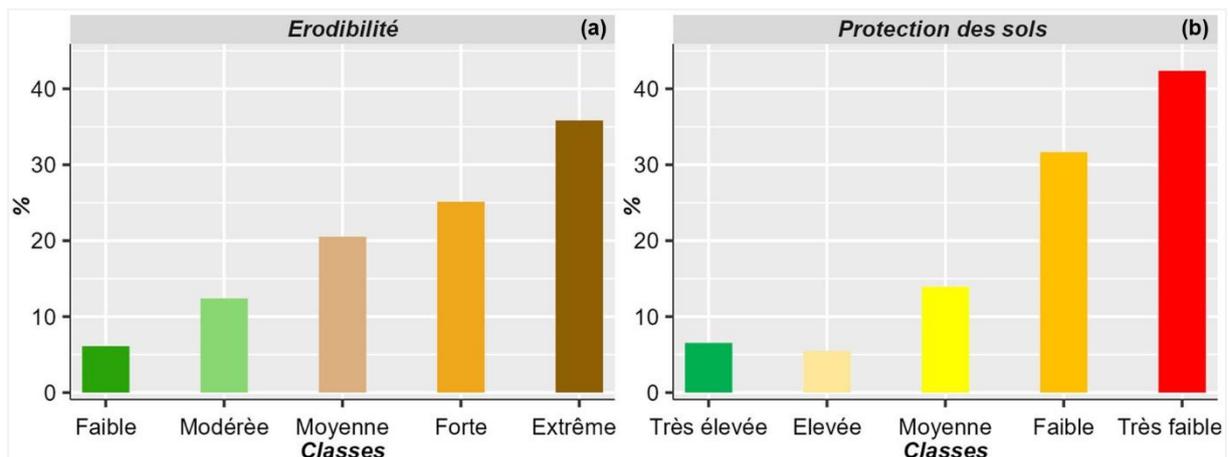


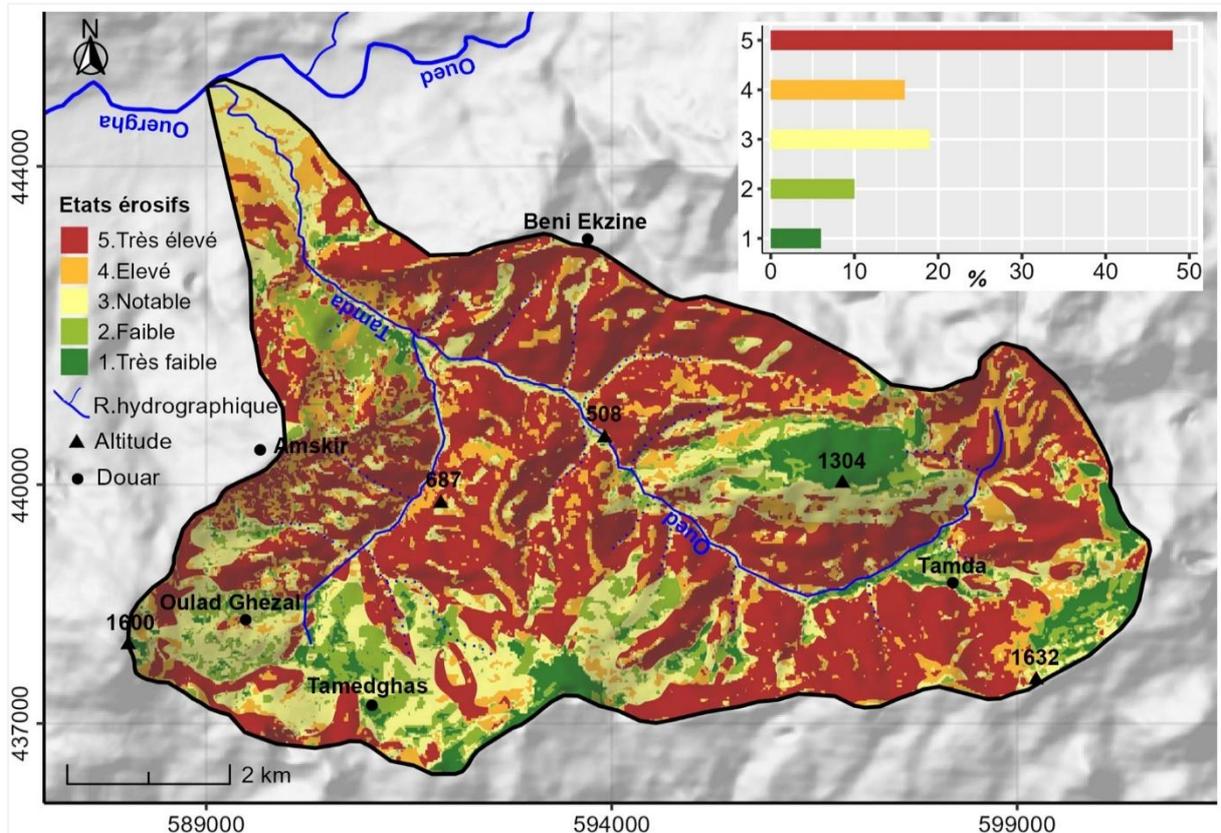
Figure 3. Répartition des classes d'érodibilité et de la protection des sols

La superposition de l'occupation du sol et du taux de recouvrement permet la création de la carte de protection des sols. Les résultats obtenus de cette carte (figure 3b) indiquent que la zone d'étude est mal protégée contre l'érosion. En effet, les classes de faible à très faible protection occupent 74,1% du bassin, correspondant aux terrains caractérisés par un faible recouvrement du sol, une arboriculture clairsemée et des zones nues. Les classes indiquant une protection du sol considérée comme élevée à très élevée ne couvrent que 12% de la superficie totale de la zone d'étude, comprenant notamment les forêts de chêne vert (la forêt Tamda) et les zones d'arboriculture dense (oliviers, amandiers).

La carte d'état érosif

La carte d'érosion potentielle (figure 4) constitue le produit final de la phase prédictive, synthétisant la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte de protection des sols. Les résultats mettent en évidence que le bassin versant de l'oued Tamda est caractérisé par la prédominance des classes d'érosion potentielle très élevée, couvrant environ 48% de la superficie du bassin. Ces classes correspondent à des versants très raides et dénudés, présentant des formations argileuses et marneuses de très faible résistance, associées à des pratiques anthropiques inadéquates. Ces zones critiques présentent une forte sensibilité à l'érosion et sont

considérées comme prioritaires pour des mesures d'aménagement. Une intervention rapide à travers des programmes de sauvegarde et de lutte antiérosive est nécessaire pour garantir la stabilité des versants, le maintien de la fertilité des sols, et réduire le taux d'envasement du barrage El Wahda situé en aval (El Ouazani Ech-Chahdi et al., 2021).



Les zones soumises à une érosion notable à élevée occupent une part significative du territoire, soit environ 35 %. Ces zones se caractérisent par des milieux fragiles présentant des versants pentus exploités pour l'agriculture, une lithologie imperméable (argiles, marnes, flyschs) et des sols peu protégés par le couvert végétal. En revanche, les secteurs caractérisés par une érosion faible à très faible couvrent une superficie très limitée, soit environ 16 % de la zone d'étude (figure 4). Ces milieux bénéficient d'une protection élevée des sols grâce à un couvert végétal dense, comprenant notamment une forêt de chêne vert, des matorrals denses et des terrains d'arboriculture dense. Ils se caractérisent également par des formations lithologiques très résistantes, principalement aux sommets de la partie amont du bassin, ainsi que par la prédominance de pentes faibles (0 à 3 %). Ces milieux sont considérés comme des terrains stables, présentant une sensibilité relativement faible à l'érosion.

CONCLUSION

L'évaluation qualitative de l'érosion hydrique, réalisée grâce à l'application de l'approche PAP/CAR dans le bassin versant de l'oued Tamda, révèle que cette partie du Rif Central est exposée à l'érosion hydrique. En effet, 65 % du bassin présente une sensibilité forte à très forte à l'érosion, faisant de ces terrains les plus touchés et des zones prioritaires à l'intervention. En revanche, les zones considérées comme stables ne représentent qu'une superficie limitée du bassin (16 %). Ces zones sont caractérisées par une protection assurée par la végétation et/ou par la prédominance de formations lithologiques résistantes. Bien que l'approche PAP/CAR offre une directive pratique pour la détermination des zones sensibles à l'érosion, elle présente

des limites d'application et a fait l'objet de plusieurs critiques. Cependant, elle demeure une méthode complémentaire permettant de spatialiser le risque d'érosion hydrique et de comprendre les processus de ce phénomène. Les cartes générées par cette méthode peuvent constituer un outil décisionnel en identifiant les zones critiques nécessitant une intervention prioritaire et rapide par le biais de programmes de restauration et de sauvegarde.

Références

- AIT YACINE E., OUDIJA F., NASSIRI L., ESSAHLAOUI A. (2019). Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR. Cas du Bassin Versant de Beht, Maroc. *European Scientific Journal* 15. 259- 285.
- AYT OUGOUGDAL H., KHEBIZA M-Y., MESSOULI M., BOUNOUA L., KARMAOUI A. (2020). Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. *Scientific African* 10. E 00646.
- BELASRI A., LAKHOUILI A. (2016). Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8. 98-107.
- EL JAZOULI A., BARAKAT A., KHELLOUK R., RAIS J., EL BAGHDADI M. (2019). Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 13. 361–37.
- EL OUAZANI ECH-CHAHDI KH., EL-BOUHALI A., AMYAY M. (2021). Evaluation et zonage de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Haut Ouergha (Rif Central -Maroc) par l'application des méthodes PAP/CAR et EPM. Pub, FLS Ibn Zohr, Agadir. 42 - 51.
- HEUSCH B (1970). L'érosion du Pre-Rif une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré.rif Occidental. Extrait du rapport 1970 - Tome 12 de la Station de Recherche. Forestière de Rabat.
- KIMARO D-N., POESEN J., MSANYA B.M., DECKERS J-A. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: interrill and rill erosion. *Catena* 75. 38-44.
- PAP/CAR. (1998). Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO. xii - 72.

L'ETUDE DES GLISSEMENTS ROTATIONNELS PAR L'UTILISATION DE TRIPLE-APPROCHE. CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED LAHDAR (PRERIF ORIENTAL – MAROC)

HAMDACH Mustapha¹, GARTET Jaouad² et BENAÏSSA Mohamed¹

Etudiant-chercheur. LR. EH3D- FPT–USMBA. mustapha.hamdach@usmba.ac.ma

Enseignant-chercheur. LR. EH3D-FLSH Fès–USMBA. jaouad.gartet@usmba.ac.ma

Résumé : Notre contribution concernera et visera l'étude des glissements rotationnels dans le Prérif Oriental en prenant le bassin versant de l'Oued Lahdar comme cas représentatif. Pour ce faire nous avons utilisé trois approches bien distinctes, afin de nuancer nos résultats et de permettre la compréhension de ces phénomènes sous différents angles : la première c'est une approche purement géomorphologique valorisant l'étude géographique, la deuxième c'est une approche intégrée de Flageollet, et finalement la troisième c'est une approche de modélisation par pondération des facteurs pour évaluer le degré du risque de ces phénomènes. Les résultats obtenus permettent d'analyser et de mieux comprendre les facteurs de genèse de ces glissements rotationnels, ce qui assure le choix des outils adéquats pour contrarier les mécanismes de ces glissements rotationnels pour toutes éventuelles études d'aménagement de ce bassin versant.

Mots-clés : les glissements rotationnels, l'approche géomorphologique, Flageollet, l'approche modélisation, le bassin versant de l'Oued Lahdar, le Prérif Oriental.

Introduction : les terrains Prérifains présentent des conditions favorables à générer une multitude des mouvements de terrain de préférence les glissements rotationnels, ils trouvent dans ces secteurs un lieu de prédilection et qui laissent malheureusement de vastes étendues improductives. Ce travail s'intéresse à la cartographie des glissements rotationnels au sein du bassin versant de l'Oued Lahdar, de déterminer leurs facteurs de genèses, et d'évaluer le degré de ces risques.

1. Matériel et méthodes d'étude :

Le bassin versant de l'Oued Lahdar englobe la partie droite du bassin versant de l'Oued Inaouène qui se compte parmi les affluents principaux du bassin versant de l'Oued Sebou. Il couvre une superficie de 612,6 km² et un périmètre de 154 Km. Le bassin versant de l'Oued Lahdar est limité à l'Est et au Sud par les affluents de l'Oued Larbaâ, à l'Ouest par l'Oued Leben, et au Nord par le haut de l'Oued Ouergha. (Fig. 1).

1.1. L'approche géomorphologique :

L'approche géomorphologique valorise le fondamental de l'étude géographique en cherchant les modelés du relief et ce dans le but d'étudier les glissements rotationnels, en se basant sur deux composantes essentielles qui sont la forme et la formation. Pour ce fait nous aurons besoin de la carte topographique (1/50 000 de Bab El Mrouj 1954), la coupe topographique pour reconnaître le type et l'élément du relief et le type des versants, la carte géologique (1/50 000 de Bab El Mrouj 1954) pour reconnaître la formation, et des schémas théoriques représentant le glissement en question.

1.2. L'approche de Flageollet :

C'est une approche intégrée appuyée par Flageollet en 1989, elle prend en compte plusieurs critères de classification (facteurs de terrain, type de processus, vitesse et agent de déplacement, cause du déclenchement), par conséquent cette approche apporte et offre davantage de précisions.

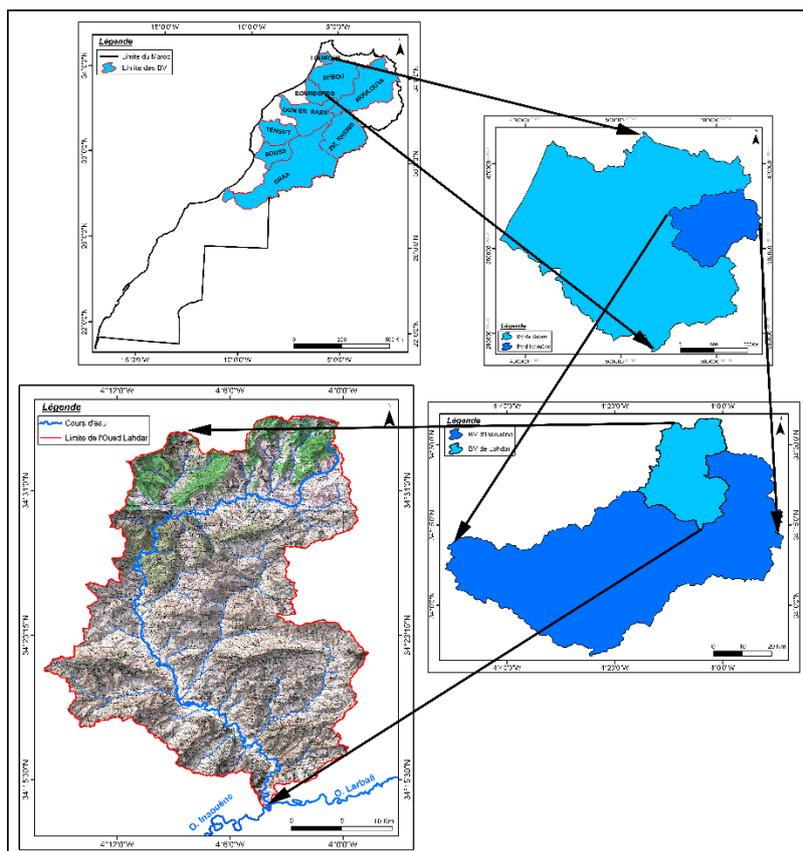


Fig. 1 - Localisation géographique du bassin versant de l'Oued Lahdar

1.3. L'approche modélisation par pondération de facteurs :

L'approche modélisation par pondération de facteurs sert, à caractériser l'intensité des glissements rotationnels, à partir de plusieurs facteurs qu'on juge déterminants, et pour être objective au maximum, ces facteurs ont été démontré suite au travail de terrain et aux particularités de la zone d'étude, c'est la raison pour laquelle nous avons placé cette approche au dernier. L'évaluation de la susceptibilité aux glissements rotationnels sera réalisée selon les étapes suivantes : caractérisation d'intensité susceptibles de se produire pour chaque formation lithostratigraphique, évaluation des pentes sensibles aux glissements de terrain, détermination des nappes de charriage dans le terrain, superposition des trois cartes afin d'évaluer la susceptibilité des glissements rotationnels au sein du bassin versant de l'Oued Lahdar.

Tab. 1 – Récapitulation du modèle de la susceptibilité liée aux glissements rotationnels

| Intensité | Lithologie | Intensité | Pente |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| 1 | Roche dure. | 1 | 0° - 5° |
| | | 2 | 5° - 10° |
| 3 | Roche moyennement dure. | 3 | 10° - 15° |
| | | 4 | 15° - 25° |
| 5 | Roche fragile (tendre). | 5 | > 25° |
| Intensité | Nappe de charriage | | |
| 1 | Si la pente structurale basale est opposée à la pente topographique superficielle. | | |
| 6 | Si la pente structurale basale est conforme à la pente topographique superficielle + la roche de la surface de glissement est imperméable. | | |
| Intensité | Degré de la susceptibilité | | |

| | |
|-----------|-------------|
| 0 – 40 | Faible |
| 40 -80 | Moyenne |
| 80 – 120 | Elevée |
| 120 – 150 | Très Elevée |

2. Résultats :

La diversité des approches choisies donne obligatoirement des résultats plus ou moins différents, c'est la raison pour laquelle nous les présenterons et les discuterons séparément.

2.1. L'apport de l'approche géomorphologique à l'étude des glissements rotationnels :

Comme déjà indiqué cette approche se base sur l'établissement des coupes topographiques sur le versant tout entier, afin de soupçonner l'existence des glissements rotationnels, et par la suite nous présenterons un schéma théorique qui montrent le mouvement en question. Nous avons choisi un échantillon au NE de Jebel Bou Zekri qui a des caractéristiques propices à la genèse des glissements rotationnels.

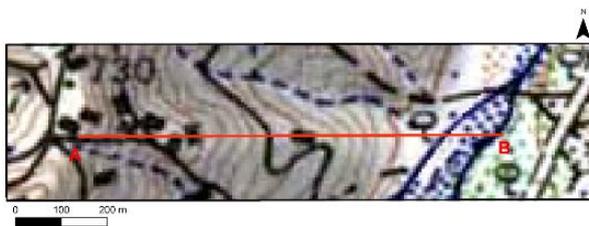


Fig. 2 – Emplacement du profil topographique au NE de Jebel Bou Zekri

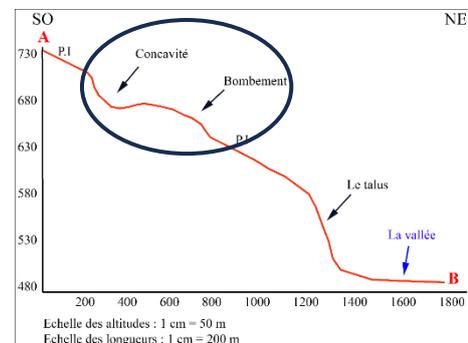


Fig. 3 – La coupe topographique au NE de Jebel Bou Zekri



Photo 1 – Aspect de loin du glissement rotationnel au NE de Jebel Bou Zekri 22/08/2021

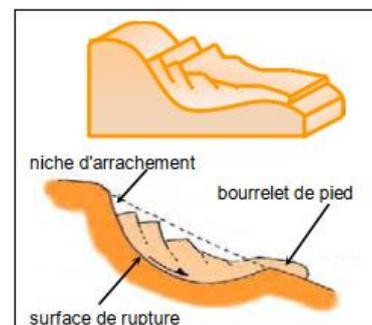


Fig. 4 – Schéma théorique du glissement rotationnel

Ce site se situe au NE de Jebel Bou Zekri et les altitudes varient entre 480 m à 730 m sur une longueur de 1800 m, les éléments du relief que nous avons sont le versant, le talus et la vallée. D'après la carte topographique nous remarquons que les courbes de niveau sont serrées et régulières vers l'amont et cela se traduit par la régularité de la pente qu'est nette et claire au niveau du sommet. Ensuite les courbes de niveau se déforment et se redressent pour former un creux concave avec une pente au début conforme à la pente topographique, mais à l'aval de ce creux la pente devient inverse par rapport à la

pente topographique. Puis les courbes de niveau se redressent à nouveau pour former un bombement, après cette partie nous aurons la régularité de la pente qui apparaît de nouveau c-à-d nous retrouvons la continuité de la pente initiale. Vers l'aval, nous avons la formation d'un talus abrupt qui prendra sa fin en rencontrant la vallée.

D'après cette analyse purement géographique, nous soupçonnons facilement que notre versant dans sa partie amont présente des caractéristiques typiques d'un glissement rotationnel (concavité = surface de glissement, bombement = surface d'accumulation ou d'étalement). Le travail de terrain par la suite a confirmé nos soupçons et valide l'hypothèse d'un glissement rotationnel qui est en cours de développement et d'accélération, (Photo 1).

2.2. L'utilité de l'approche intégrée de Flageolet :

Pour appliquer cette approche nous discuterons les glissements rotationnels d'une manière détaillée, en prenant le mouvement en entité après la conjonction de plusieurs critères en même temps. Notre choix est tombé sur le glissement rotationnel au NE de Jebel Ali el Fehal (Photo 2), ce glissement a un contact avec le fonds du talweg puisque sa partie aval est émergée par l'eau. Il touche une superficie de près de 9640 m² et s'étale sur plus de 110 m de long et 112 m de large. La surface de glissement, elle est concave et intervient sur des pentes assez fortes arrivant jusqu'au 25°, elle laisse apparaître une grande cicatrice d'arrachement principale d'environ 91 m de large et 2 m de hauteur reflétant l'ampleur de la masse arrachée. Ce mouvement dans sa partie aval est altéré et estompé par une dynamique postérieure de l'érosion mécanique, l'hydrodynamisme de l'Oued Lahdar lié aux variations saisonnières des débits engendre le sapement des berges et le recul des falaises, par conséquent le front de glissement est généralement absent.

Sur le plan géologique, nous avons d'un côté la structure qui présente les nappes de charriage, ces nappes jouent le rôle des plans de glissement d'origine majeure et facilitent le glissement rotationnel. D'un autre côté la nature de formation joue un rôle déterminant dans l'apparition de ce glissement rotationnel, nous avons les marnes blanches qui sont trop sensibles du fait de l'existence des argiles, et lorsqu'ils absorbent une quantité suffisante en eau, l'eau va modifier les caractéristiques intrinsèques des matériaux en augmentant la pression interstitielle dans les pores, par conséquent nous aurons l'augmentation du volume et poids de la masse, et il y aura la rupture (ou mobilisation) lorsque la contrainte de cisaillement devient supérieure à la résistance au cisaillement.



Photo 2 – Aspect de loin du glissement rotationnel au NE de Jebel Ali el Fehal 23/08/2022

2.3. Modèle de simulation du risque lié aux glissements de terrain :

Le modèle conçu pour l'étude des glissements rotationnels au niveau du BV de l'Oued Lahdar montre que plus de la moitié du bassin versant (62%) est potentiellement concernée par l'apparition des glissements d'intensité moyenne et élevée occupant ainsi presque la totalité du bassin versant (dont 45%

La susceptibilité très élevée théorique coïncide avec les glissements réels qui présentent des roches fragiles comme les marnes, des pentes fortes dépassant 15°, et des versants tourmentés par les nappes de charriages.

D'un point de vue de gestion de ces risques afin de revaloriser ce secteur du pays et accélérer son développement. Il faut que les prochains projets d'aménagement et de développement visent les zones qui présentent un degré de risque faible, car malheureusement le risque nul n'existe pas, et ce en collaboration entre les différents acteurs (agriculture, sylviculture, aménagement du territoire, travaux publics, aménagements des cours d'eau, tourisme...), parce que le risque pourrait être faible en termes des glissements de terrain, mais en revanche le risque serait très fort en matière d'inondation à titre d'exemple, donc tout est lié et nécessitera de coupler nos efforts et d'une coordination entre les différents acteurs et ce dans la perspective de la bonne gouvernance territoriale et du développement durable.

Conclusion : les approches employées tout au long de ce travail ont montré leurs utilités et leurs fiabilités, puisque nous sommes arrivées à faire un bilan sur la connaissance des glissements rotationnels, de les comprendre, de déterminer leurs facteurs de genèse et d'évaluer leurs degrés de risque. Les trois approches sont incomparables puisque chacune de ces approches a ses propres outils, mais ce sont complémentaires et elles permettent d'analyser et de caractériser au mieux les glissements rotationnels au sein du bassin versant de l'Oued Lahdar.

Références bibliographiques :

- LABRIKI A et al**, (2016), Approche Méthodologique D'évaluation De Susceptibilité Des Versants Aux Glissements De Terrain Par Un Modèle Volumique De L'aléa ; Application Au Secteur De Boujibar Al Hoceima (Rif, Maroc), 15 p.
- BOLLO N**, (2014), Les mouvements de terrain du vignoble champenois : approche géomorphologique et hydrologique. Thèse de doctorat de l'Université Reims Champagne-Ardenne, 343 p.
- BRGM/RP-56409-FR**, (2009), Cartographie de susceptibilité aux mouvements de terrain de la région Languedoc-Roussillon, 204 p.
- FARES A, ROLLET M, BROQUET P**, 1994, Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Revue Française de Géotechnique n° 69, p. 63-72.
- FLAGEOLLET J**, (1989), Les mouvements de terrain et leur prévention. Collection géographie. Edition Masson, 224 p.
- GARTET A**, (2010), Mouvements de terrain et risques environnementaux dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays : aménagement, gestion, et prévention. Ouvrage, 230 p.
- KHALIS H**, (2022), Etude et modélisation de l'érosion hydrique et des instabilités de terrain, dans le bassin versant de l'Oued Lahdar, Rif Oriental, Maroc. Thèse de doctorat, Faculté des sciences Dhar El Mahraz Fès, 258 p.
- HAMDACH M**, (2022), Etude des risques de mouvements de terrain dans le bassin versant de l'Oued Lahdar. Projet du master, 143p.
- PIGEON P**, (2023), Intérêt de l'approche géographique dans l'étude des risques liés aux glissements de terrain : le cas de la vallée des Dranses (Haute-Savoie, France), 12 p.
- TRIBAK A**, 2005, Genèse et évolution de glissements complexes dans les séries marneuses Prérfaines : Cas du bassin de l'Oued Tarmast (Maroc), 7 p.
- TRIBAK A**, (1997), Quelques exemples de mouvements de terrain dans le Prérf oriental (Maroc). Méditerranée, 1 – 2 : 61-66.
- YANNICK T et al**, (2008), Modélisation spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, 13 p.

Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrains : cas du quartier Boujibar (ville d'Al Hoceima)

Taoufik BYOU^a, Abdelhamid ALLAOUI^b, Khalid OBDA^c et Ali TAOUS^c

^a*Université Mohamed I^{er}, Laboratoire de Géomatique, Patrimoine et Développement, 60000, Oujda, Maroc.*

^b*Université Moulay Ismail ; Département de géologie faculté des sciences Meknès, Maroc.*

^c*Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Equipe de Recherche MNADSS - FLSH-Saïs, USMBA- Fès, Maroc.*

RESUME : Durant les dernières années, plusieurs glissements récents ont été déclenchés et réactivés dans le quartier Boujibar situé au sud de la ville d'Al Hoceima, à cause des facteurs humains et naturels. Ces glissements ont provoqué des dégâts menaçant les habitats et les infrastructures. Cette communication a pour objectif de l'étude de deux sites de glissements de terrain affectant les terrains marneux éo-oligocène de pente forte supérieur à 20°. La méthode d'investigation géophysique par tomographie électrique a été appliquée sur ces glissements de terrain afin de caractériser leurs structures internes. La comparaison des profils de résistivités avec des sondages réalisés in situ sur ces deux glissements ont permis de différencier la masse en mouvement du substratum sous-jacent, ainsi, l'état hydrique de ces mouvements et l'estimation de leurs profondeurs de rupture. Le résultat montre que les masses glissées se composent d'accumulations altérées et profondes de matériaux marneux, et plus ou moins saturées en eau. Ces glissements prennent de l'ampleur de plus en plus avec l'abondance des précipitations et l'infiltration des eaux usées. Ce contexte rend ce site représentatif des mouvements gravitaires lents à comportement visqueux dans le quartier Boujibar.

Mots clés : Glissements de terrains - tomographie électrique – résistivité - Al Hoceima.

ABSTRACT : In recent years, several landslides have been triggered and reactivated in the Boujibar district to the south of the city of Al Hoceima, due to human and natural factors. These slides caused damage threatening habitats and infrastructure. This paper aims to study two landslide sites affecting eo-Oligocene marl soils with steep slopes of over 20°. The geophysical investigation method using electrical tomography was applied to these landslides to characterize their internal structures. Comparison of the resistivity profiles with borings carried out in situ on these two landslides enabled the moving mass of the underlying bedrock to be differentiated, as well as the hydric state of these movements and an estimate of their rupture depths. The results show that the landslides are composed of deep, altered accumulations of marl materials, more or less saturated with water. These landslides are increasing in size with the abundance of rainfall and the infiltration of wastewater. This context makes this site representative of slow gravity movements with viscous behavior in the Boujibar district.

Keywords: Landslides - electrical tomography – resistivity - Al Hoceima.

INTRODUCTION

La ville d'Al Hoceima, fait partie du Rif central, a connu depuis les années 80, une explosion démographique importante motivée principalement par la croissance démographique et l'exode rural. Cela pousse les populations à construire des bâtis dans des zones périphériques qui ont donné naissance à des quartiers non réglementaires et sous équipés instables menacés souvent par le risque des glissements de terrains. Cet article est consacré à l'étude de deux cas de glissements de terrains dans le secteur Boujibar situé au sud de la ville d'Al Hoceima. Ces glissements engendrent des dégâts importants sur les infrastructures et les habitats de ce quartier. L'étude entreprise est basée sur l'investigation géophysique par la tomographie électrique. Cette approche consiste à traiter des données disponibles de résistivité électrique en exploitant ces données sous forme d'images électriques du sol. Cette approche a pour but de caractériser la structure interne, l'état hydrique de la masse en mouvement, et la profondeur de la rupture associée à ce glissement de terrain (Hebbache, 2017 ; Ponton, 2008).

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La ville d'Al Hoceima se localise, au nord du Maroc, entre les altitudes $35,125^{\circ}$ et $35,158^{\circ}$ N et la longitudes $3,841^{\circ}$ et $3,882^{\circ}$ W. les glissements de terrain étudiés se situent dans quartier Boujibar au sud de la ville.

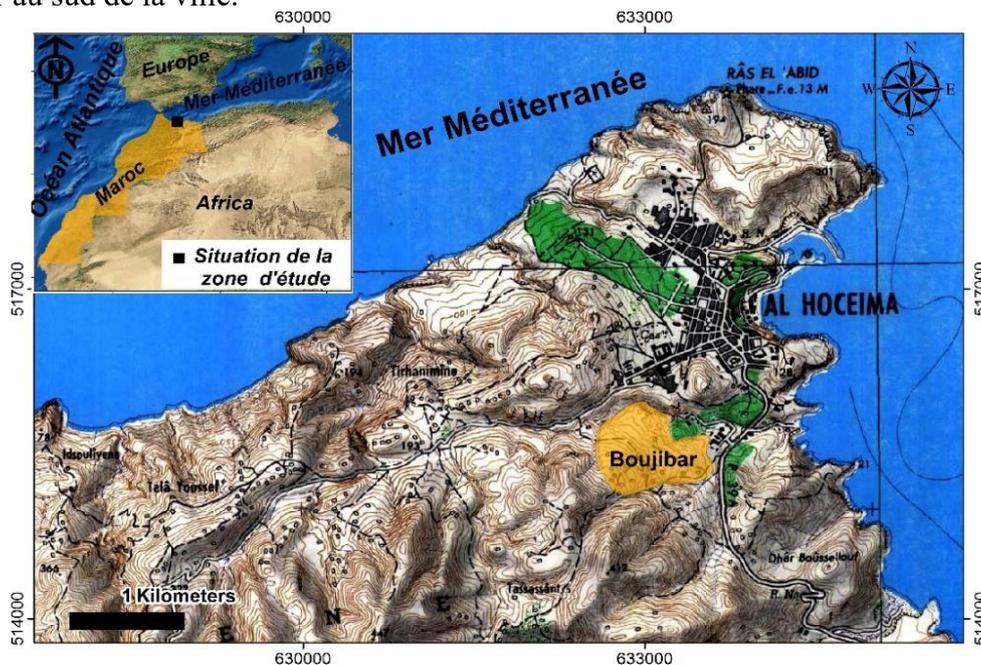


Figure 1 : Situation de la zone d'étude

Ce quartier de Boujibar appartient géologiquement à la semelle tertiaire de bokkoya, elle est constituée d'une série marno-gréseuse, à dominance marneuse, d'âge éo-oligocène. Cette formation a été affectée par une grande solifluction ancienne (Maurer, 1968). Elle est recouverte en amont par des croues calcaires témoignant d'une pédogenèse ancienne. Elles sont attribuées au quaternaire moyen et plus précisément au Tansiftien-Amirien (Mégard, 1963).

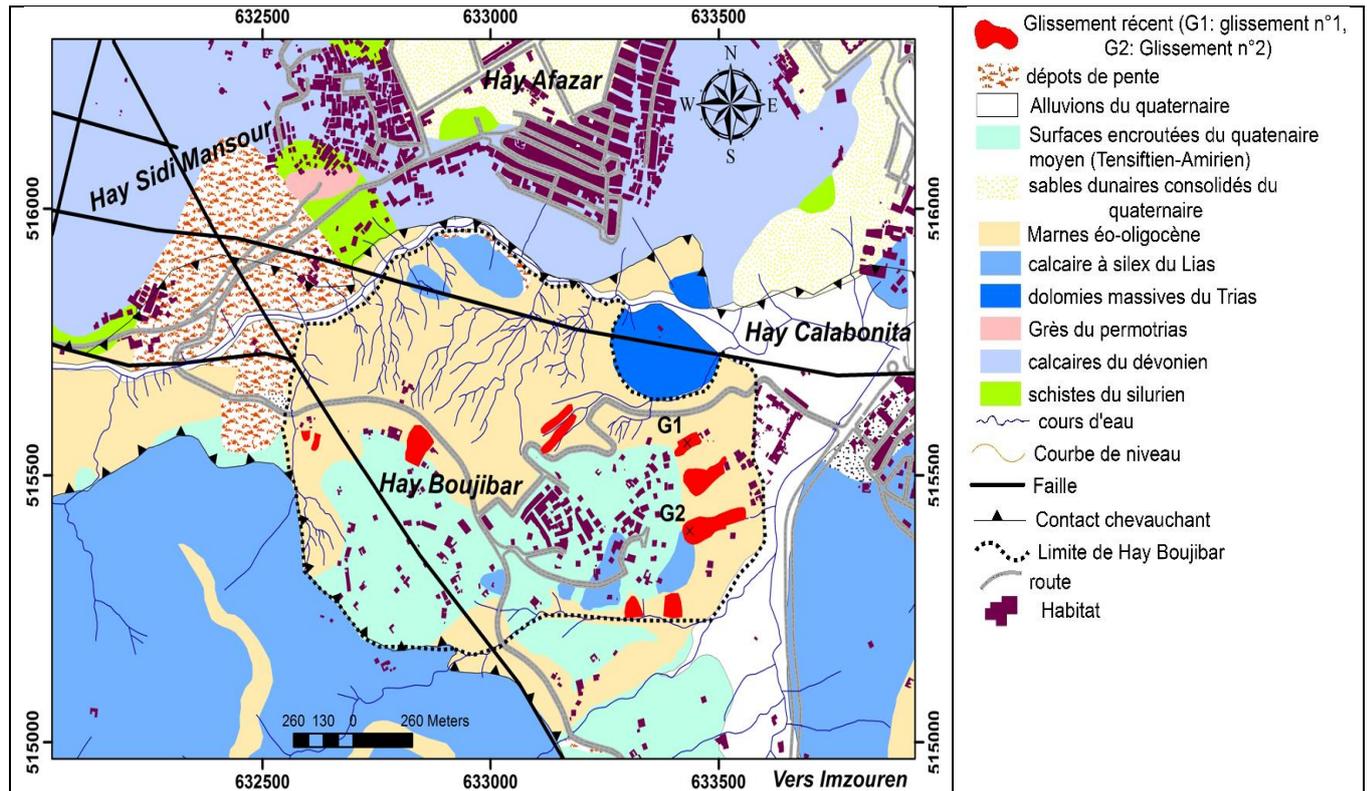


Figure 2 : carte géologique de la zone d'étude

La ville d'Al Hoceima se caractérise par un climat méditerranéen semi-aride, marqué par des hivers tempérés humides et des étés chauds et secs. Les précipitations moyennes mesurées durant 34ans (entre 1982 et 2015) sont de 305mm avec une valeur extrême atteignant 797 mm au cours de l'année 2008-2009.

2. MATERIEL ET METHODES

Pour étudier les glissements de terrain dans le quartier Boujibar, nous avons adopté une démarche méthodologique pluridisciplinaire :

1. L'inventaire des glissements de terrain a été procédé par des visites sur le terrain et par l'utilisation du GPS mobile, pour localiser l'emplacement de ces phénomènes et déterminer leurs dimensions
2. L'analyse de l'activité de deux cas représentatifs de glissements de terrain récents et actives, en s'appuyant sur les démarches suivantes :
 - Définition des processus et des formes liées aux glissements de terrains étudiés.

- Application de la tomographie électrique : Les données de résistivité ont été acquises par le dispositif wenner-schlumberger en employant un instrument de marque TIGRE RESISTIVITY METER avec un système de mesure composé de 32 électrodes. Ces données ont été comparées avec les résultats des sondages carottés des travaux de la reconnaissance géotechnique réalisée par le bureau d'étude GEOTECHMED (suite à la demande de l'agence urbain d'Al Hoceima).

3. ANALYSE ET RESULTATS

3.1 Inventaire des glissements de terrain

L'inventaire des glissements de terrain permet de repérer les glissements actives en cours d'évolution ou bien des glissements récents caractérisés par la fraîcheur de leurs formes et leurs

zones de détachements. Ils se déclenchent à la limite de la croûte calcaire ou à la suite la suite de la construction des routes. La plupart sont de type rotationnel affectant principalement les marnes de tertiaires (Margaa et al., 1998). Ce travail se focalise sur deux cas représentatifs de glissements de terrain pour lesquels une description géomorphologique a été effectuée :

- **Glissement n°1** : Il se caractérise par une la niche d'arrachement principale localisée au-dessous de 3 m d'une maison et elle est fraîche et active à cause des rejets des eaux usées provenant des tuyaux qui ne sont pas accordés aux réseaux d'assainissement. Bien que l'activité latérale se soit manifestée à 15m d'escarpement principal par un second escarpement et un affaissement d'environ 0.5 à 1m. Dans le secteur inférieur, la masse glissée se prolonge vers l'aval par des accumulations de blocs de la croûte carbonatée fragmentée et emballée dans une matrice marneuse. L'extrémité aval de ces matériaux a affecté une maison qui est complètement détruite.

- **Glissement n°2** : Vers le haut (altitude de 95 à 75m), nous observons de nombreuses fissures de traction et un escarpement principal avec un affaissement d'ordre de 2 à 3 m, suivi par des escarpements secondaires. Ce mouvement s'élargit latéralement au flanc gauche du glissement. Dans la partie intermédiaire, un replat avec une contre-pente et un petit marécage où l'eau affleure, marqué par la végétation hydromorphe. La partie inférieure forme d'une zone d'accumulation des matériaux marneux altérés et remaniés, ayant une morphologie d'une coulée (Flageollet, 1989). Cette zone est terminée par un bourrelet frontal sillonné affectant une route située en aval du glissement.

3.2 Résultat de l'investigation par tomographie électrique

Le profil de la tomographie électrique réalisé sur le glissement n°1 est d'une longueur de 45 m. la section de résistivité inversée, montre que la plage de résistivité sur ce profil varie entre entre à 0.84 et 254 ohm.m.

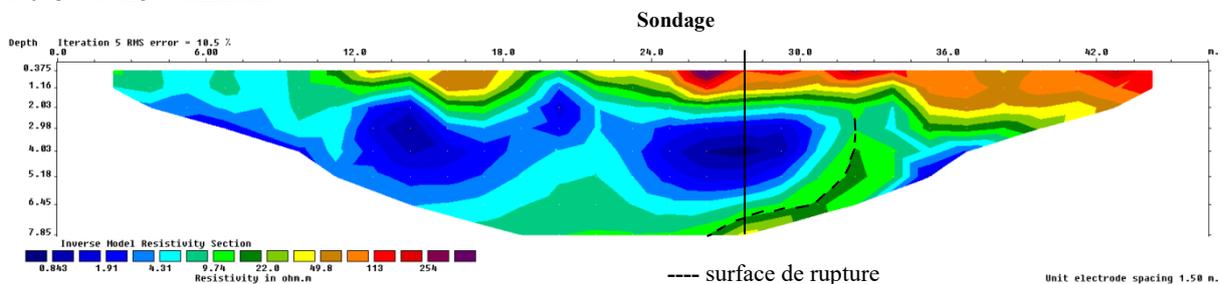


Figure 3 : La section du profil de tomographie électrique sur le glissement n°1

Le deuxième profil a été réalisé sur le glissement n°2 sur une longueur de 90m. Les valeurs de résistivité électrique, sur ce profil, varient dans un large intervalle entre 0.05 et 2051 ohm.m. Ce profil se caractérise par une alternance de zone résistante et de zone conductrice.

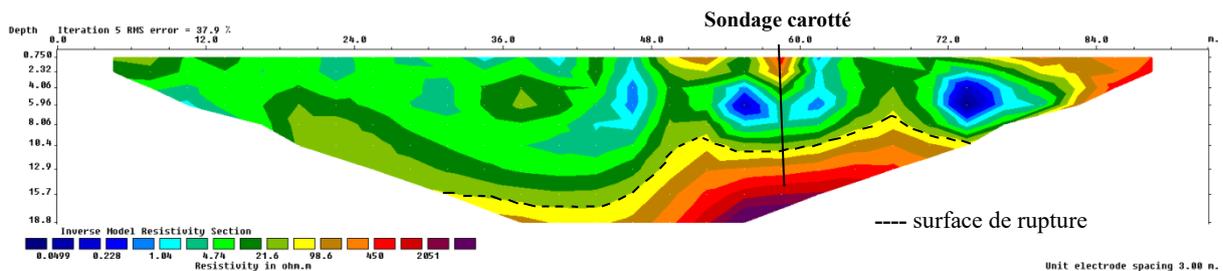


Figure 4 : : La section du profil de tomographie électrique sur le glissement n°2

4. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats de la tomographie électrique, couplés aux données de la campagne de reconnaissances géotechnique réalisée par le bureau d'étude GEOTECHMED ont permis d'obtenir des informations sur la dynamique des deux glissements de terrain étudiés et leur structure interne.

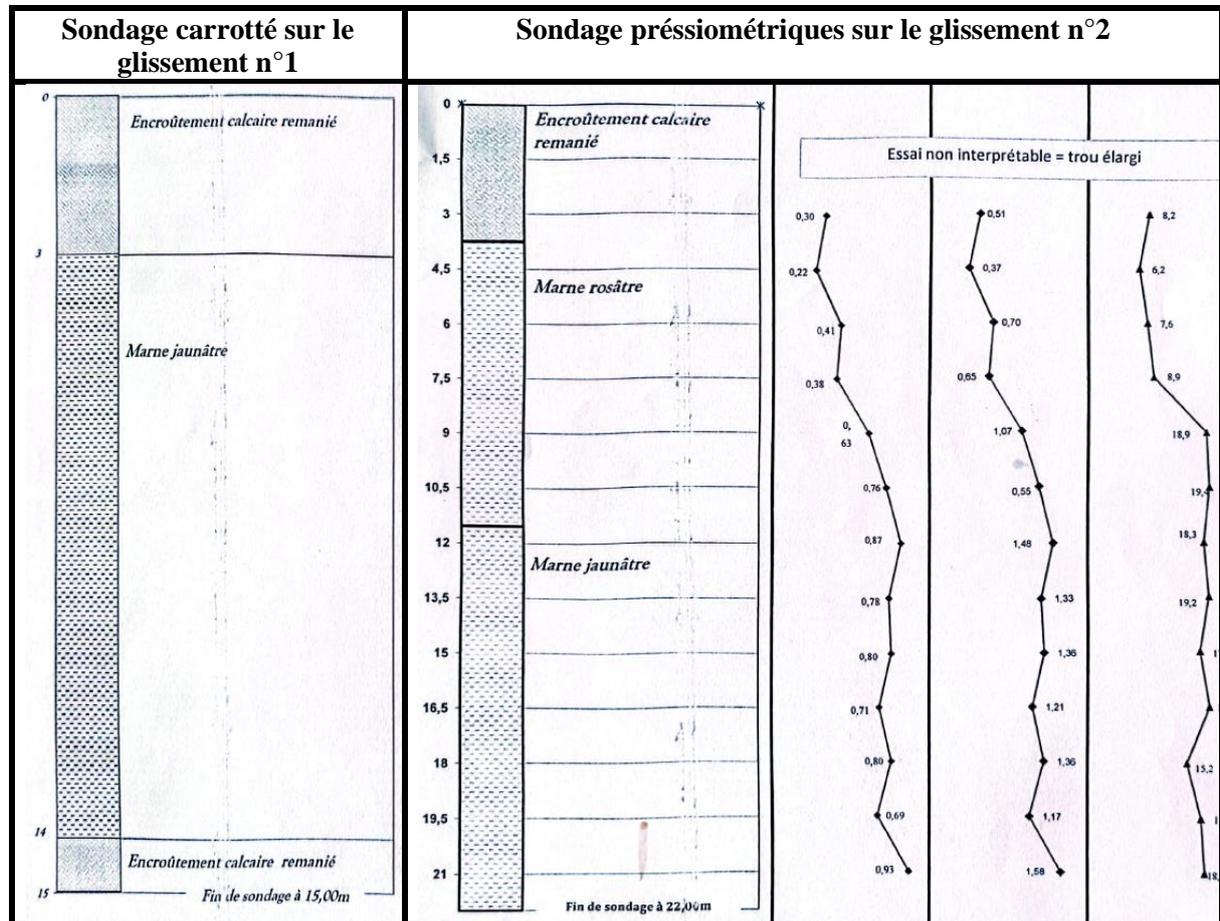


Figure 5 : Résultats des travaux de sondage réalisée par le bureau d'étude GEOTECHMED (suite à la demande de l'agence urbain d'Al Hoceima).

Glissement n°1 : Le profil du glissement n°1 montre l'existence de trois unités électriques. La première unité électrique correspond à la couverture composée des matériaux fracturés d'encroûtement calcaire emballés dans une matrice marneuse, dont les résistivités varient entre 50 et 254 ohm.m; La deuxième unité possède des résistivités inférieures à 22ohm.m, elle correspond à des matériaux marneux remaniés de la masse glissée. Les faibles résistivités montrent une teneur plus élevée de l'eau salée et la Troisième unité varie entre 22 et 50 ohm.m correspondent aux marnes substratum en place. La surface de rupture obtenue sur le profil n°1 est concordée avec celle observé sur le sondage pressiométrique effectué par la campagne géotechnique en 2021, elle est localisée sur une profondeur de 6 à 8m et le substratum a été détecté à une profondeur de 8m.

Glissement n°2 : Le profil du glissement n°2 est caractérisé par l'existence d'une zone conductrice alternance avec faibles résistivités (inférieures à 20 ohm.m) correspondant à la couleur verte. Après les avoir comparées au sondage qui a été réalisé dans ce site, on a découvert que la faible résistivité indique qu'il est formé des marnes altérées humides ou saturés. Les bases résistivités peuvent aussi indiquer la saturation en eau du glissement. La zone conductrice semble bien corrélér avec les désordres observés en surface qui se caractérisent par la

manifestation d'une zone de marécage la végétation hydromorphe. Une zone résistante avec fortes résistivités (100 et 2051 ohm.m) est mise en évidence juste au-dessous de la zone conductrice. Cette zone résistante est attribuée à l'encroutement calcaire plus compacts. Le contact entre ces zones pourrait correspondre à une surface de rupture sur une profondeur de 17m.

CONCLUSION

Cette étude a prouvé l'utilité de la tomographie de résistivité électrique dans la caractérisation de la structure interne et l'état hydrique des cas représentatifs des glissements de terrain étudiés dans le quartier Boujibar. En effet, les profils obtenus, ont permis d'avoir des informations sur la structure des couches de matériaux déplacés superposés au substratum marneux, permettant ainsi la mise en évidence le volume des masses glissés et les surfaces de ruptures. Les masses glissées se compose d'accumulations altérées profondes de matériaux marneux, et plus ou moins saturés en eau. Ce contexte rend ce site représentatif des mouvements gravitaires lents à comportement visqueux dans le quartier Boujibar. Les résultats ont permis de montrer que la tomographie électrique apparaît comme une méthode très efficace pour l'étude structurale des glissements de terrain et à la compréhension de leurs mécanismes internes de déformation et de rupture. Il serait intéressant de réaliser régulièrement de nouvelles campagnes de prospection géophysique des glissements après chaque saison pluvieuse afin de suivre le mouvement et son évolution.

Références bibliographiques

- FLAGEOLLET, J.-C. (1989). Les mouvements de terrain et leur prévention (Vol. 41), Collection. Géographie, Paris, Masson, 224 p.
- HEBBACHE, K. (2017). Contribution à la reconnaissance du sol par tomographie électrique. Université Mohamed Khider-Biskra, thèse de doctorat en génie civil, Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie, 155p.
- MARGAA, K., & Abdelgader, A. (1998). Une méthodologie de cartographie des zones potentiellement instables Application à la région d'Al Hoceima (Maroc). *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 460-470.
- MAURER, G. (1968) Les montagnes du Rif central : Étude géomorphologique. Doctorat d'Etat Thesis, Paris, 499p.
- MEGARD, F. (1963). La partie orientale du massif des Bokoya : études géologiques. Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, 111p.
- PONTON, J. (2008). Caractérisation hydro-géophysique par tomographie électrique d'un glissement de terrain argileux de type "coulée" à l'échelle de la parcelle et du versant. Rapport de stage, 80p.

**Axe 3 : Risques
anthropiques:
pollution, feux de
forêts et risques
industriels,
dégradation**

Application de la méthode de la Toposéquence pour l'étude de la dégradation du sol dans le bassin versant de l'oued Lebène (Prérif central – Maroc).

Ahmed ROUIJEL ¹, Abdelghani HOUARI ¹, Abdelhamid JANATI IDRISSE ¹, Mohamed DAYDAY ¹, Mohamed BOUHARROU ², Maryame EL YAZIDI ³.

¹ Equipes de recherche Milieux naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-spatiales. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (USMBA), FLSH Fès-Saïs, Maroc.

² Laboratoire : Espace, Histoire, Dynamique et Développement Durable. USMBA, FPT, Taza, Maroc.

³ Laboratoire : Écologie Fonctionnelle Et Génie De L'Environnement (EFGE). USMBA, FST Fès, Maroc.

Résumé : Le sol est une ressource naturelle comporte une très grande importance dans la vie de l'être humain. Il est généralement menacé par la dégradation qualitative et quantitative, pourtant la conscience des chercheurs, des aménageurs et parfois des décideurs par ce sujet d'actualité au niveau global. De ce fait, les montagnes du Maroc, plus particulièrement, les montagnes du Prérif central accèdent une place très avancée au niveau de la sensibilité du sol à la dégradation par l'érosion, notamment les versants de l'oued Lebène. Ce type de dégradation est intimement lié avec les facteurs physico-climatiques et/ou l'intervention humaine dévastatrice (déforestation, surpâturage). Ce papier a pour objectif d'ouvrir une nouvelle spatialisation de la dynamique érosive au Prérif central, prenant en compte les facteurs primordiaux responsables sur les processus de l'érosion et de la dégradation, voire de la désertification de cet espace. La méthode de la Toposéquence est utilisée pour spatialiser la dégradation des sols et la dynamique érosive d'une manière plus précise, afin de construire des hypothèses d'aide à l'aménagement pour lutter contre ce type de dégradation dans la zone concernée. Les résultats éprouvent que, la dégradation du sol dans les montagnes du Prérif central est plus inquiétante d'une année à l'autre à cause justement de l'érosion et la perte plus exagérée en sédiment vers les barrages en aval.

Mots clés : Dégradation – Prérif central – Oued Lebène – Toposéquence – Dynamique érosive.

Abstract: Soil is a natural resource of great importance to human life. It is generally threatened by qualitative and quantitative degradation, yet the awareness of researchers, planners and sometimes decision-makers by this topical subject at global level. As a result, the mountains of Morocco, and more specifically the mountains of the Central pre-rif, are at a very advanced stage in terms of soil sensitivity to degradation by erosion, particularly the slopes of the Leben basin. This type of degradation is closely linked to physico-climatic factors and/or devastating human intervention (deforestation, overgrazing). The aim of this paper is to open up a new spatialization of erosive dynamics in the Central pre-rif, taking into account the primary factors responsible for the processes of erosion and degradation, and even desertification, in this area. The Toposequence method is used to spatialize soil degradation and erosion dynamics in a more precise way, in order to build up hypotheses for planning aid to combat this type of degradation in the area concerned. The results show that soil degradation in the central pre-rif mountains is more worrying from one year to the next, precisely because of erosion and the more exaggerated loss of sediment to downstream dams.

Keywords: Degradation – Watershed – Leben – Topsoil – Erosive dynamics.

Introduction

La dégradation des terres a très fortement augmenté depuis 60 ans environ à la suite de la croissance démographique et de l'expansion industrielle (Brabant, 2008). Ce type de dégradation menace plus de 25% des terres agricoles partout dans le monde (Xiao et al, 2020), environ 52,3% en Europe (Van der Knijff et al, 2000). Au Maroc, la dégradation et la désertification affectent plus de 90% du territoire national (Ghanam, 2003), l'érosion à ce sens, affecte essentiellement la majorité des reliefs montagneux marocains (Jaouda, 2020) du fait des caractéristiques physico-climatiques et anthropiques (Mounir et al, 2023). Le Rif dans ce sens, ne couvre que 6% du territoire national, mais il fournit seulement près de 60% des pertes en sédiments chaque année (Khali Issa et al, 2016) et également 5000 T/km² de la dégradation spécifique des terres (Aït Fora, 1995 ; Lahlou, 1997).

Pour le bassin de l'oued Lebène, la dégradation résulte à des facteurs naturels et anthropiques, engendre une dynamique érosive et la forte dégradation des formations végétales. L'érosion des sols est essentiellement l'un des processus responsables de cette dégradation, à cause des paramètres physico-climatiques (lithologie, topographie, pluviométrie, formations végétales...), mais aussi le facteur anthropique (culture intense, déforestation, surpâturage...) ayant une influence directe ou indirecte sur le risque d'érosion. Dans ce contexte, les conséquences d'érosion et la dégradation de la végétation sont nombreuses, elles se manifestent principalement, soit en amont ou en aval, par la dégradation de la qualité des ressources en eaux, la destruction des terres agricoles et la fertilité des sols, puis l'envasement des retenues des barrages.

Matériel et Méthodes

1.1. Site d'étude

La Toposéquence présélectionnée se place géographiquement dans le Prérif central externe au bassin versant de l'oued Lebène, précisément sur le versant aval juste avant le contact de l'oued Lebène avec ce de l'oued Inaouène entre latitude 34°16' et 34°17' au Nord et longitude -4°39' et -4°40' à l'Ouest (Fig. 1). En ce sens, elle se situe au Sud-Est du centre urbain de Tissa, constamment au Sud de la province du Taounate et à côté de la route provinciale numéro 5329 qui reliant la province du Taounate et celle de Taza. Pour ce, cette Toposéquence se trouve en zone de la transition entre les collines du Prérif central et oriental, à caractère bioclimatique semi-aride avoir un régime pluviométrique se caractérise par une irrégularité spatiale et temporelle (Gartet, 1994).

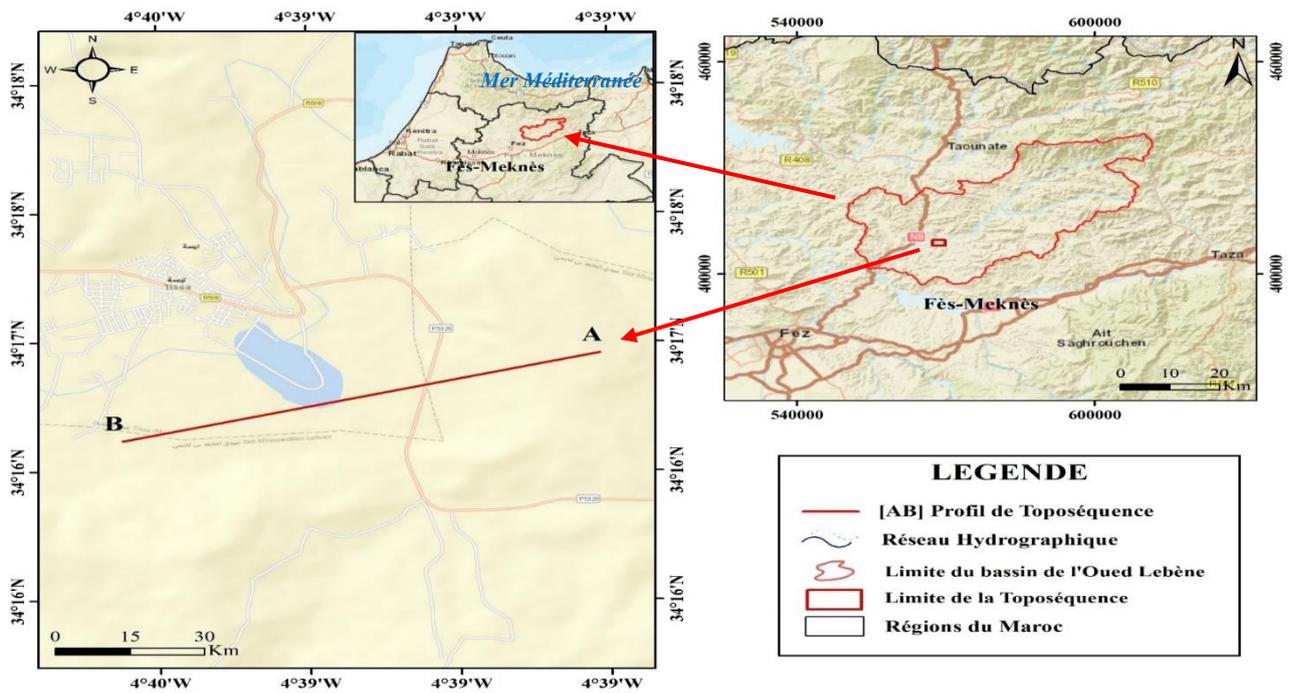


Figure 12 : Localisation de la Toposéquence étudiée dans le bassin de l'oued Lebène (Prérif central externe).

1.2.Méthodologie

À partir des années 1990, les Nations Unies tentent de rénover leur approche de l'étude d'érosion du sol et de remplacer la méthode d'évaluation de la dégradation des terres, par la recherche des indicateurs responsables à cette dégradation (Brabant, 1992 ; Glémarec, 2001). D'ailleurs, la notion de l'indicateur sera développée au fil du temps jusqu'à présent (CHEGGOUR, 2008). Le risque de dégradation par dynamique érosive, qui due à cause des effets du risque catastrophique des formes érosives sur le sol et sur l'environnement et l'économie (Boukrim et al, 2016). Pour cela, l'étude de la dégradation du sol par le l'érosion dans ce bassin s'est basée sur la méthode de la Toposéquence à l'échelle de versant, pour détailler l'ensemble des indicateurs de dégradation du sol à cause de leurs différentes formes d'érosion. Cette démarche méthodologique consiste principalement à étudier les sols d'une Toposéquence, et d'effectuer le suivi des changements morphométriques, morphologiques et analytiques (Morsli et al, 2004 ; Morsli et al, 2013), sans oublier d'achever le comportement hydrodynamique du sol.

Résultats

1.3. Le transect de Tissa (Prérif central externe) :

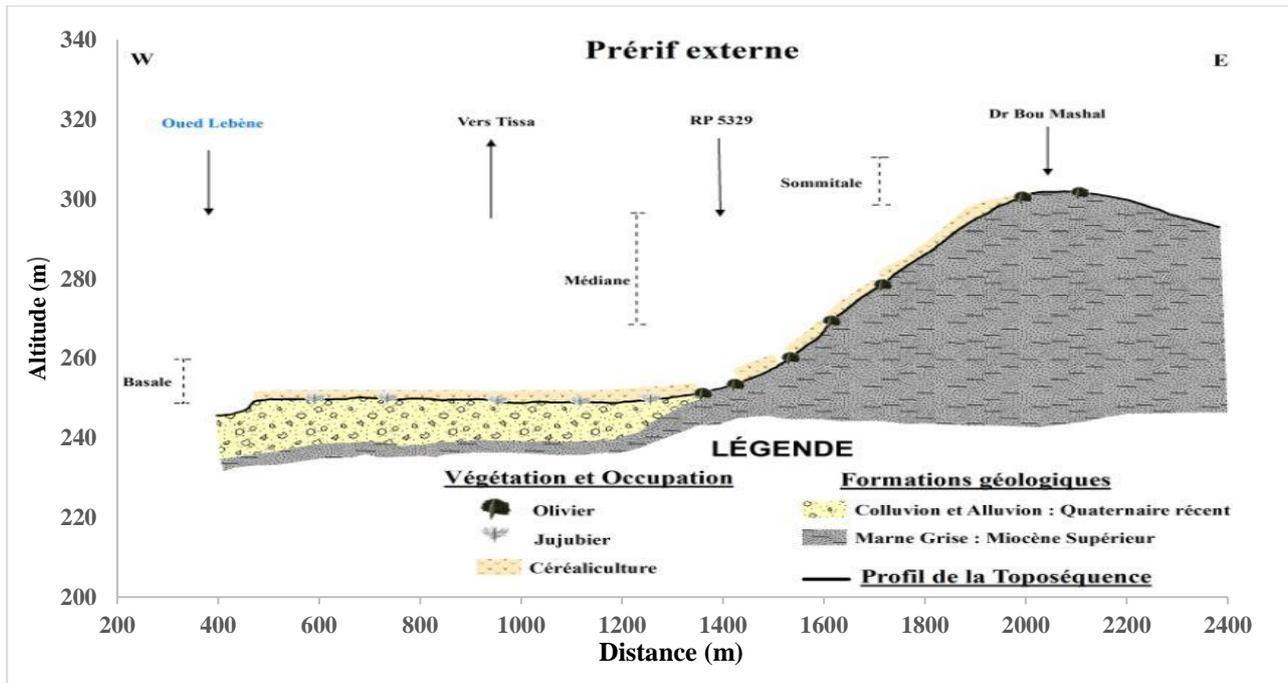


Figure 2: Schéma descriptive de la Toposéquence de Tissa au Prérif externe au bassin du Lebène

La Toposéquence de l’oued Lebène à l’échelle de versant qui est montré ci-dessus a arboré trois sites et sections sont démontrées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Description géomorphodynamique des sites du transect du Prérif externe au niveau du bassin du Lebène.

| Sites | Formation géologique | Pente % | Forme | Formation Végétale | Occupation & Sol | Érosion |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Site I | Marne Grise Miocène Supérieur | Pente moyenne | Concave | Arboriculture Olivier | Céréaliculture + Arboriculture Olivier Vertisols | Ravins + Érosion en nappe |
| Site II | Marne Grise Miocène Supérieur | Pente moyenne | Rectiligne | Arboriculture Olivier | Céréaliculture + Arboriculture Olivier | Ravins + Érosion en nappe |
| Site III | Formation superficielle (Colluvion + Alluvion) Quaternaire récent. | Pente Faible | Plane + meuble | Arboriculture Olivier + Épineux Jujubier | Céréaliculture + Aménagement + Habitats Vertisols | Érosion en nappe + Érosion fluviatile |

a. Partie sommitale (Site I): cette section comporte communément un site géomorphologique très particulier, rassemble entre les éléments naturels et anthropiques. Ainsi, les formations géologiques fragiles de marnes grises favorisent, en quelque sorte, le creusement des ravins développé au ruissellement diffus exacerbé par la céréaliculture dense et, l’averse d’automne sur des sols nus déjà décapés par l’érosion en nappe, marqués par l’absence quasi-totale des formations végétales naturelles. Le décapage des horizons superficiels des sols vers le domaine médian et aval.

b. Partie médiane (Site II) : dans ce site également les formations végétales naturelles sont absentes, occupée par des végétations très dégradées à cause de la déforestation tout au long de l'histoire. Les paramètres physico-climatiques facilitent impitoyablement le déclenchement d'érosion en nappe et, l'érosion sous formes des ravins, malgré la pente moyenne (6 %) et la forme rectiligne de versant.

c. Partie basale (Site III) : est la partie la plus différente aux deux précédentes au niveau d'altitude (240 m), de la pente et de sa forme plane. Dans cette partie les éléments coulés depuis le domaine sommital et médian sont déposés à cette partie de faible pente inférieure à 1%. De cette façon, les activités anthropiques dans ce site entraînent évidemment une dynamique érosive (érosion fluviale) plus intense sur les vertisols mais sans être dégradée.

Discussion

Les études qui ont été soutenues sur cette zone, et qui ont appliqué d'autres méthodes, constatent que la dynamique érosive est le résultat de la dégradation de l'écosystème forestier. (ECH-CHAHDY, 2023 ; ECH-CHAHDY et al, 2021, Gartet, 1994). La même source confirme que le recul des espaces forestiers a été estimé à environ 166 hectares entre 1985 et 2018 soit 56,51% des massifs forestiers, ce qui ouvre un espace pour l'activité de la dynamique érosive sur les sols nus, menaçant la productivité des sols.

La partie stable du versant : est la partie où les formes d'érosion ne sont pas développées, elle convient le domaine de versant caractérisé par la mise en valeur des terres, par l'absence de fortes pentes mais aussi par l'exploitation rationnelle du sol. Le ruissellement atténué à travers la mise en place de culture intense des céréales pendant la saison automnale et hivernale. Pourtant, la dynamique érosive active dans cette section est dans les berges de l'oued Lebène.

La partie moyennement stable du versant : au sommet de la Toposéquence, qui rassemble essentiellement entre les éléments naturels et anthropiques. La végétation est de densité moyenne, les pentes sont faibles. L'intervention de l'homme n'est pas toujours catastrophique sur les sols. Pour cette section, les activités de l'homme ont réussi considérablement à maintenir certains équilibres, protégeant le sol de l'érosion.

La partie instable de versant : comme déjà dit ; les formes d'érosion déclenchent dans la zone où les formations végétales sont déjà dégradées. À ce sens, la partie médiane de versant enregistre une végétation très faible, dégradée et remplacée tout au long de l'histoire par l'intervention anthropique. De ce fait, les processus de l'érosion s'accroissent notamment les ravins, car le ruissellement de la section de sommet devient plus intense et creuse les sols.

Conclusion

Ce qui est certain, c'est que la dynamique particulière de la zone concernée dû juste à raison des facteurs liés directement par la pente de versant, les formations fragiles des marnes et l'utilisation extensive du sol. Pourtant, la partie de la pente moyenne de 12 à 20 % est occupée par les céréales d'automne en rotation avec les légumineuses alimentaires et parfois les jachères. De ce fait, l'averse durant les pluies orageuses déclenche le ruissellement diffus qui aboutit à l'érosion en nappe sur cette partie. D'ici, ce ruissellement devient très rapide, plus agressif et exceptionnel, surtout avec les orages exceptionnels sur les sols nus. Les sédiments qui proviennent à la partie amont sont responsables de l'exportation de grandes quantités de terres vers l'aval, ce qui produit de crue catastrophique pendant la saison hivernale, aboutissant à la précarité de l'érosion sur la dégradation des terres, l'envasement des barrages, la destruction des infrastructures et l'inondation des habitats, entraînant des dégâts matériels très importants.

Références bibliographiques

- AIT FORA (A.) – 1995 :** Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin-versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 231 p, 1995.
- BOUKRIM (S.), LAHRACH (A.), MIDAOUI (A.), BENJELOUN (F.), BEN ABDELHADI (M.), LAHRACH (H.) & CHAOUNI (A.) – 2016 :** Cartographie de l'érosion qualitative des sols du bassin-versant de l'Aoudour (Rif-Maroc). European Scientific Journal, avril 2016, édition vol.12, No.11 ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. doi: 10.19044/esj.2016.v12n11p295 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n11p295](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n11p295).
- BOUTLLAKA (M.), EL MAZI (M.), BENBRAHIM (Y.) & HOUARI (A.) – 2023:** Mapping the sensitivity of land degradation in the Ouergha catchment (Morocco) using the MEDALUS approach. Eurasian Journal of Soil Science. Journal homepage: <http://ejss.fesss.org>.
- BRABANT (P.) – 1992.** La dégradation des terres en Afrique. Afrique contemporaine, 161. Paris : Documentation française, p.90-103.
- BRABANT (P.) – 2008.** Activités humaines et dégradation des terres Indicateurs et indices. Ouvrage Institut de Recherche pour le Développement. Planète terre, 369p.
- CHEGGOUR (A.) – 2008.** Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse de doctorat de l'Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculté des sciences Dhar el Mehraz, Fès, 231p.
- ECH-CHADI (O-KH.), BOUHALI (A.), AMYAY (M.) – 2021 :** ETUDE DIACHRONIQUE ET QUANTIFICATION DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT OUERGHA (RIF CENTRAL- MAROC). Acte du Colloque International : La Dynamique de l'Environnement et les Risques Naturels en Milieux Méditerranéens. Oujda les 4 et 5 juin 2021 – p, 232.
- GARTET (A.) – 1994 :** MORPHOGÉNÈSE ET HYDROLOGIE DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED LEBENE (Rif méridional, Prérif Central et Oriental, Maroc). THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE D'AIX MARSEILLE I. Institut du Géographie. Unité des formations et des recherches Sciences Géographie et Aménagement.
- GHANAM (M.) – 2003 :** La désertification au Maroc – Quelle stratégie de lutte ? 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco : 1-13.
- GLEMAREC (Y.) – 2001.** Définition d'indicateurs d'environnement pour le développement durable des hautes terres tropicales. Etude de cas de la province de Thai Nguyen au Viet Nam. Thèse de doctorat de l'Université Denis Diderot, Paris 7, 164p.
- JAUDA (I.), AKHASSAS (A.), OUADIF (L.), BAHY (L.), EL KASRI (J.), SOUIDI (H.) & SOUSSI (H.) – 2020:** Study of soil erosion risks using remote sensing in Ouergha River watershed (Morocco). Mohammadia Engineering School, Mohammed V University in Rabat, Morocco. E3S Web of Conferences **150**, 03012 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015003012>.
- JAUDA (I.), AKHASSAS (A.), OUADIF (L.), BAHY (L.) & LAHMIL (I.) – 2018 :** Stabilité des talus et impact sur le réseau routier : cas du bassin versant d'Ouergha (Maroc). Mohammadia Engineering School, 3GIE Laboratory, Mohammed V University in Rabat, Morocco. MATEC Web of Conferences **149**, 02052 (2018) CMSS-2017. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902052>.
- KHALI ISSA (L.), BEN HAMMAN LECH-HAB (K.), RAISSOUNI (A.) & EL ARRIM (A.) – 2016 :** Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par Approche SIG/USLE au niveau du bassin-versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). J. Mater. Environ. Sci. **7** (8) (2016) 2778-2795 ISSN : 2028-2508 CODEN: JMESC.
- LAHLOU (A.) – 1997 :** Dégradation spécifique des bassins versants au Maroc. Rapport n°1000. Ministère de l'équipement et de la promotion nationale, Direction de l'hydraulique, Division exploitation, service de gestion des eaux, Rabat, Maroc.
- MOUNIR (K.), LA JEUNESSE (I.), SELLAMI (H.) & ELKHANCHOUI (A.) – 2023 :** Spatiotemporal analysis of drought occurrence in the Ouergha catchment, Morocco. AIMS

- Environmental Science, 10 (3): 398–423. DOI : 10.3934/environsci.2023023. <http://www.aimspress.com/journal/environmental>.
- MORSLI (B.), HABI (M.) & MEDDI (M.) – 2013** : Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne : facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE). Revue des sciences de l'eau, Journal of Water Science, 26 (2), pp : 89–105. <https://doi.org/10.7202/1016061ar>.
- MORSLI (B.), MAZOUR (M.), MEEDJEL (N.), HAMOUDI (A.) & ROOSE (E.) – 2004** : Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du Nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse* 15, 2 : 96-104.
- ROOSE (É.) – 1994** : Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Service des sols - ressources, aménagement et conservation Division de la mise en valeur des terres et des eaux, FAO. Bulletin Pédologie de la FAO, 70.
- VAN DER KNIJFF (J.-M.), JONES (R.-J.) & MONTANARELLA (L.) – 2000**: Soil erosion risk assessment in Europe. European Commission Soil Bureau. <https://www.researchgate.net/publication/237727657>.
- XIAO (Y.), XIAO (Q.), XIONG (Q.), & YANG (Z.) – 2020**: Effects of ecological restoration measures on soil erosion Risk in the Three Gorges Reservoir Area Since the 1980s. *GeoHealth*, 4, e2020GH000274. <https://doi.org/10.1029/2020GH000274>.

IMPACT OF URBAN DYNAMICS AND CLIMATE CHANGE ON FOREST AREAS THE MAAMORA FOREST IN THE CITY OF KENITRA - AS A CASE STUDY

LEMKIMEL Zahra ¹, ALLIL abdelaziz ¹, DAIBOUN Thami¹

Faculty of Humanities and Social Sciences, Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco. Laboratory of Territory, Environment and Development. Department of Geography.

Zahralemkimel456@gmail.com

Abstract: Studies have focused on the issue of drought on one hand and urban dynamics on the other, as prominent topics in physical geography for the former, which specializes in climate change, and human geography for the latter, which concerns field sciences. This research is part of a series of studies on a wetland area in the western plain, Maamora Forest, in Kenitra. This research addresses three principal axes. The first axis relates to human factors contributing to the reduction and deterioration of Maamora Forest over the past three decades, and it analyzes their impact on the forest. This is done by determining the development and dynamics of cork oak through remote sensing data, manifested in the analysis of aerial images from three different periods (1975, 1995, and 2022), complemented by field research between 2022 and 2023. The second axis focuses on studying the area's climatic data, extending from 1987 to 2019. It highlights the manifestations of climate change, such as a decrease in annual precipitation and an increase in temperatures, and their impacts on the overall forest, specifically on cork oak trees. This is done using the LANG equation. The results indicate that the region has experienced four dry periods, accounting for 87.5% of the total 28 years, which range from 1987/1988 to 1995/1994, 1997/1998 to 2010/2011, 2012/2013 to 2014/2015, and 2016/2017 to 2018/2019. In contrast, the percentage of semi-humid and arid years only accounted for 6.25% each, with an average duration of two years. The third axis relates to monitoring the effects of climate change on the forestry sector, specifically the Maamora Forest, through modern techniques such as remote sensing and spectral plant and water indicators. It aims to understand the role of these technologies in spatial monitoring of factors and phenomena that negatively impact forest areas in general and the Maamora Forest in particular.

Keywords: Urban dynamics, Climate change, Spectral indicators, Maamora Forest

Résumé : Les études se sont concentrées sur la question de la sécheresse d'une part et sur la dynamique urbaine d'autre part, comme thèmes majeurs de la géographie physique pour la première, spécialisée dans le changement climatique, et de la géographie humaine pour la seconde, qui relève des sciences de terrain. Cette recherche fait partie d'une série d'études portant sur une zone humide de la plaine de l'ouest, la forêt de Maamora, à Kénitra. Cette recherche aborde trois axes principaux. Le premier axe concerne les facteurs humains contribuant à la réduction et à la détérioration de la forêt de Maamora au cours des trois dernières décennies et analyse leur impact sur la forêt. Cela se fait en déterminant le développement et la dynamique du chêne-liège grâce à des données de télédétection, qui se manifestent par l'analyse d'images aériennes de trois périodes différentes (1975, 1995 et 2022), complétées par des recherches sur le terrain entre 2022 et 2023. Le deuxième axe se concentre sur l'étude des données climatiques de la zone, s'étendant de 1987 à 2019. Elle met en évidence les manifestations du changement climatique, comme la diminution des précipitations annuelles et l'augmentation des températures, et leurs impacts sur l'ensemble de la forêt, en particulier sur les chênes-lièges. Cela se fait en utilisant l'équation de LANG. Les résultats indiquent que la région a connu quatre périodes sèches, représentant 87,5% du total de 28 années, allant de 1987/1988 à 1995/1994, 1997/1998 à 2010/2011, 2012/2013 à 2014/2015 et 2016/2017 à 2018/2019. En revanche, le pourcentage des années semi-humides et arides ne représente que 6,25% chacune, avec une durée moyenne de deux ans. Le troisième axe concerne le suivi des effets du changement climatique sur le secteur forestier, notamment la forêt de Maamora, à travers des techniques modernes telles que la télédétection et les indicateurs spectraux des plantes et de l'eau. Il vise à comprendre le rôle de ces technologies dans le suivi spatial des facteurs et phénomènes qui impactent négativement les zones forestières en général et la forêt de Maamora en particulier.

Mots clés : Dynamique urbaine, Changement climatique, Indicateurs spectraux, Forêt de Maamora

1. Introduction

In the environmental field, the forest protects the soil from erosion and desertification and absorbs carbon dioxide (Karsenty & Pirard, 2007). It also contributes to preserving biodiversity (Slim *et al.*, 2015).

Morocco's forests cover several geographical areas, particularly the Mediterranean, Great Atlas, Rif, and some coastal areas. They also vary in terms of dominant plant species, and the Maamora Forest is one of the most abundant forest areas in Morocco.

This forest, which is considered the largest cork oak forest in the world, covering 15% of the total area occupied by this tree globally (Alahoul *et al.*, 2022), has experienced significant deterioration under the threat of various factors that undermine its potential, leading to a decrease in its area and the desertification of the cork oak environment.

2. Materials and Methods

Study area

Maamora belongs to the Rabat-Sale-Kenitra region, which extends from the Atlantic Ocean to the west, separated by sand dunes, to Wadi Bihat in the east and from Wadi Abi Raqraq in the south to the western plain in the north. It is one of the most important forests in Morocco, covering an estimated area of 131,020 hectares. (Qaid Al-Abdali, 2022).

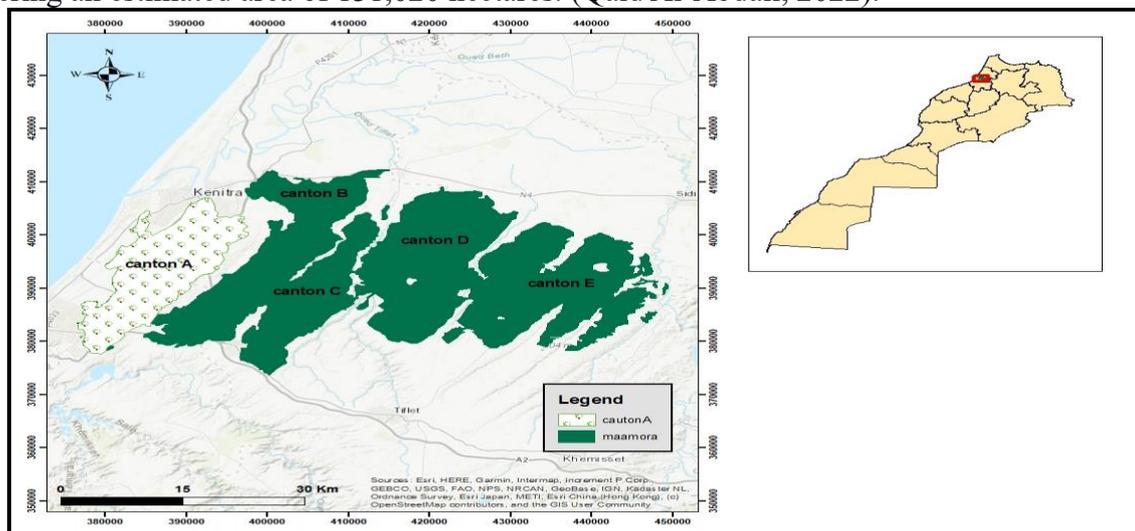


Figure.1. Geographic location of sector A within the Maamora Forest.

3. Results

3.1. The forest cover area in the Maamora Forest decreased between 1975 and 1990 and 2022.

Through the processing and analysis of satellite imagery from Landsat for the years 1975, 1990, and 2022 using the Geographic Information System (ArcGIS 10.3), based on unsupervised classification, it was found that the forest cover in the Maamora Forest decreased by approximately 56.08% between the year 1975 and 2022 (figure 2).

The number of pixels representing the forest cover was about 278,810 cells in 1975, decreased to about 145,199 cells in 1990, and reached about 122,443 cells in 2022 (Figure 3). This is attributed to several factors, including human and natural factors.

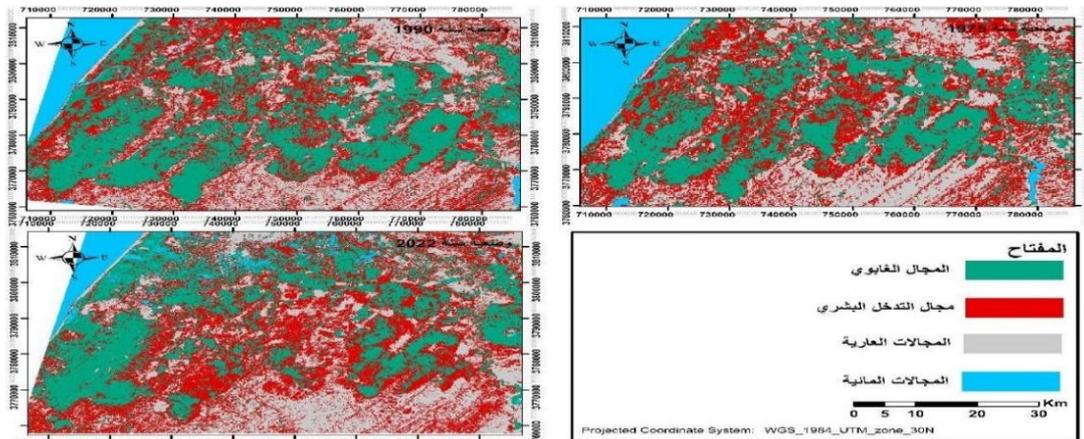


Figure 2: Map of the forest cover decline for Maamora Forest between the years 1975, 1990, and 2022.

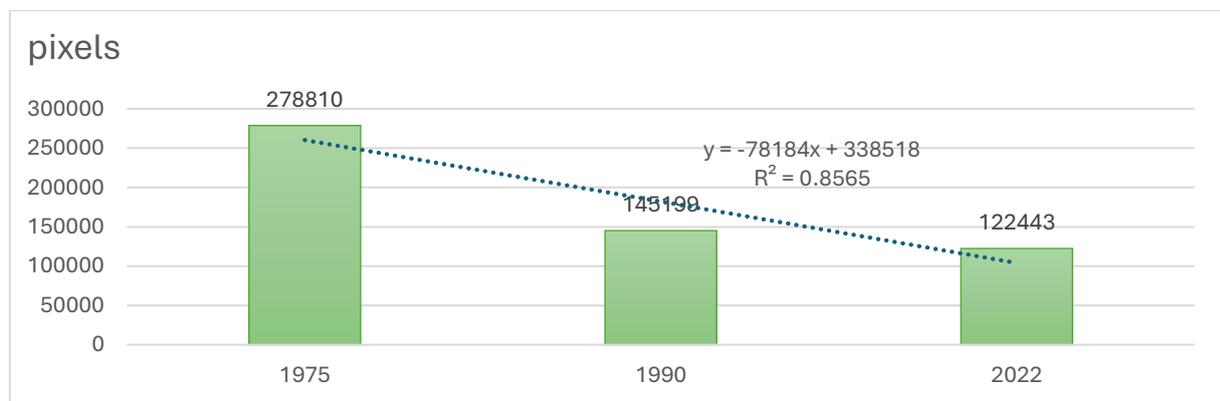


Figure.3. The number of cells representing the forest cover of the Maamora Forest declined during the years 1975, 1990, and 2022.

3.2. The manifestations of climate change experienced by the studied region. The change in values of rainfall coefficients (drought frequency)

As shown in Figure 4, the study area has experienced dry years, representing 87.5% of the total years, with a count of 28 years, which exceeds the percentage of semi-humid years, which only recorded 6.25% over two years. Additionally, severe drought years accounted for 6.25% over two years as well.

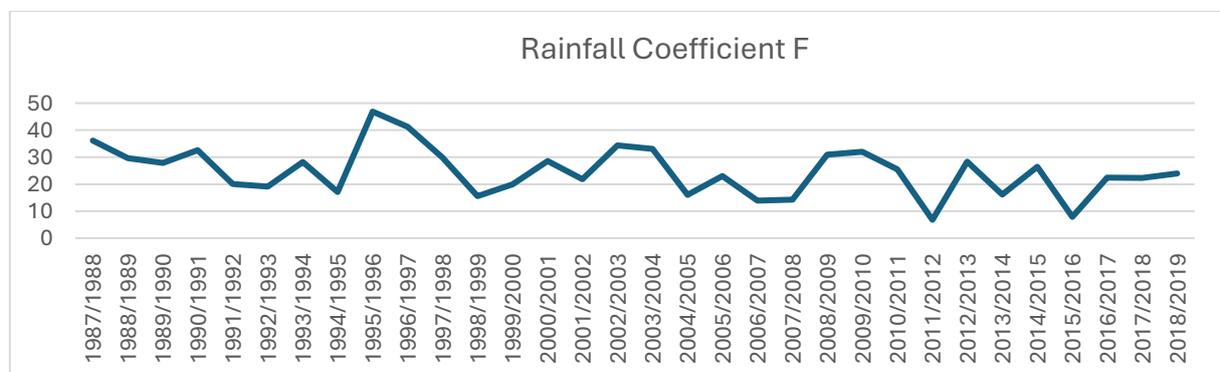


Figure.4. Represents the curve of changes in the values of the annual rainfall coefficient.

4. Discussion

The modern evolution of forest cover formations in the region (A) of the Maamora forest between 1990, 2000, and 2022.

Spatial analysis and representation of the studied spectral indicators:

- NDVI Indicator
- For the year 1990

During the year 1990, it is evident that the NDVI ranges between 0.03 and 0.33. Overall, it highlights that good vegetation cover is concentrated in the southeast of sector (A) of the Maamora forest, where its value ranges between 0.17 and 0.33, with a range of 0.16. On the other hand, poor vegetation cover is concentrated in the northwest of sector (A) of the Maamora forest, with values ranging between 0.03 and 0.14, with a range of 0.11 (figure 5).

- For the year 2000

In the year 2000, it is evident that NDVI ranges between 0.02 and 0.34. Overall, it shows that the distribution of good vegetation cover has decreased compared to 1990. It is concentrated in the far southeast of sector A (from Maamora Forest), where its values range between 0.13 and 0.34 with a range equivalent to 0.21. It is also evident that the average quality vegetation cover, ranging between 0.11 and 0.13, compensates for a portion of the excellent vegetation cover observed in 2000, where the latter range was 0.02 and is mainly concentrated in the north sector A (of the forest). On the other hand, the poor vegetation cover ranges between 0.02 and 0.11 and is concentrated in the northwest of sector A with a range equivalent to 0.09.

- For the year 2020

In 2020, it is evident that NDVI ranges between 0.02 and 0.47, where good vegetation cover still experiences a noticeable decline. It is highly concentrated in the southeast of sector A, with values ranging from 0.20 to 0.47, within a range equivalent to 0.27. This decline favours medium-quality vegetation covers with values of 0.17 and 0.20, within a range equivalent to 0.03. The non-good vegetation sector is concentrated in the far north and northeast of sector A, specifically in the Maamora forest, with values ranging from 0.02 to 0.17 within a range equivalent to 0.17.

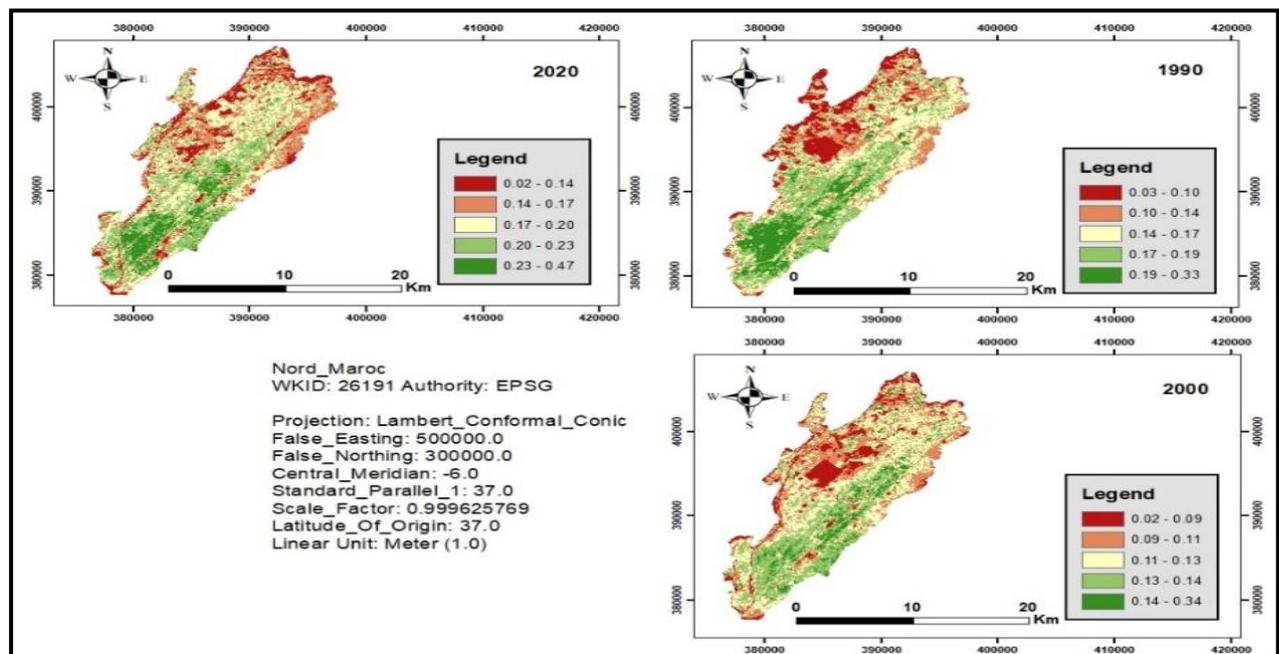


Figure.5. Distribution of the NDVI index in the years 1990-2000-2020.

Conclusion

This study shows that the Maamora forest has experienced a declining dynamic in its area between 1975 and 2022, reaching a percentage of 56.08%. This decline is due to factors shared by humans, such as excessive logging, urban expansion, and climate change through consecutive years of drought, which have had severe environmental impacts on cork oak trees.

One of the main impacts is the continuous ageing of the trees, along with the weak reforestation efforts by relevant authorities to revive the deteriorating natural habitats within the cork oak field. The spread of forest diseases and parasites (*Lymantria dispar*) can also worsen and cause more damage under climate change. Therefore, preserving this natural heritage at the local, regional, and national levels is necessary.

Références

- Alahoual, H., Alkarkouri, J., Sabir, M. (2022). "The role of the cork oak, as an original system, in maintaining the natural balance in Maamoura forest". *Revue Territoires, Environnement et développement* Vol (1), N° 1. pp.27-40.
- Karsenty, A., Pirard, R. (2007). "Forêts tropicales : la question du bien public mondial et la quête d'instruments économiques multilatéraux pour un régime international". *Revue Forestière Française*, vol. 59, n° 5, pp 535-547.
- Qaid Al Abdali, A.G. (2022). "L'impact du changement climatique sur la forêt de mamoura : Kenitra comme étude de cas". *Humanitarian & Natural Sciences Journal*. Issue 3. Volume 3. pp.388-411.
- Slim, M., Alwashali, E., Zouaki, N., Elghali, L., & Fadli, M. (2015). "The systematic structure, composition, and mode of action of the Cork oak enemy insect (*Quercus Suber* L.), case of Mamora forest", Kenitra, Morocco. *The International Journal of Multi-disciplinary Sciences*, 1(1). pp.1-29.

LE RÔLE PROTECTEUR DES FORMATIONS forestières CONTRE LES RISQUES D'ÉROSION (FORET KORIFLA, PLATEAU CENTRAL MAROCAIN)

BENAMARA Fatima Zohra ¹, TAHIRI Hasna ², MACHOURI Nadia ¹ et DALLAHI Youssef ²

1.Laboratoire d'études et de recherches; Sociétés, Territoires, Histoire et Patrimoine, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Mohamed V Rabat.

2.Laboratoire de Biotechnologie et Physiologie Végétales, Centre de Biotechnologie Végétale et Microbienne Biodiversité et Environnement, Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat.

E-mail : fatima.zohra.benamara@gmail.com

RESUME: L'objectif de cet article est de présenter l'importance du rôle protecteur des formations forestières contre les risques hydro-climatiques. Nous avons utilisé une approche géographique, basée sur le travail du terrain et une analyse cartographique. Les résultats ont montré que la forêt étudiée est composée de 57% de végétation dense (avec une densité de plus de 250 arbres/ha) et de 80% de plantes sempervirentes et résineuses. Le Thuya (*Tetraclinis articulata*) est l'une des espèces qui protège les versants contre l'érosion hydrique et les inondations. L'administration des Eaux et Forêts a mis en œuvre une série de stratégies de réhabilitation environnementale pour assurer la durabilité de la forêt.

Les mots clés : Risques – Erosion - Thuya - Forêt Korifla – Bouregreg - Maroc

ABSTRACT: The aim of this article is to present the importance of the protective role of forest formations against hydro-climatic hazards. We used a geographical approach, based on fieldwork and cartographic analysis. The results showed that the forest studied is 57% dense vegetation (with a density of more than 250 trees/ha) and 80% evergreen and resinous plants. Thuya (*Tetraclinis articulata*) is one of the species that protects the slopes against water erosion and flooding. The Water and Forestry Administration has implemented a series of environmental rehabilitation strategies to ensure the sustainability of the forest.

Key words: Risks - Erosion - Thuya - Korifla forest - Bouregreg – Morocco

INTRODUCTION

Les forêts, qui couvrent environ 31 % de la superficie terrestre mondiale, sont des formations végétales indispensables à la vie sur Terre (FAO, 2020). Les forêts et la végétation jouent un rôle essentiel dans le contrôle de l'érosion et la préservation de la stabilité des écosystèmes (Kastridis et al., 2022). Ils agissent comme des barrières naturelles, empêchant l'érosion des sols en réduisant l'impact des précipitations et du vent sur les surfaces nues. En interceptant les gouttelettes des pluies, la couverture végétale réduit l'intensité de l'érosion par éclaboussures, qui se produit lorsque l'impact des gouttes de pluie déloge et transporte les particules de sol. (Yu et al., 2019).

De plus, le réseau racinaire améliore également la capacité du sol à absorber l'eau, réduisant ainsi le ruissellement de surface et contrôlant la vitesse de l'écoulement de l'eau, ce qui minimise l'érosion. De plus, la litière de feuilles et la matière organique de la végétation protègent le sol des impacts directs, retiennent l'humidité et fournissent des nutriments essentiels au sol et à d'autres organismes de l'écosystème (Chen et al., 2019). Donc, la végétation assure la stabilité et la résilience des écosystèmes et contrôle l'érosion.

La forêt a été l'objet de nombreux travaux de recherche afin de comprendre son influence sur le bilan hydrique et les risques hydroclimatiques. Bien que les ordres de grandeur de l'interception soient désormais connus, les données sur la variabilité de ce phénomène en fonction de l'âge, de la structure et de la strate de la végétation demeurent limitées. L'objectif de cette étude est de montrer le rôle de la forêt, qu'il s'agisse des feuillues climaciques (*Quercus suber*), des résineux climaciques (*Tetraclinis articulata*), d'arbres, d'arbustes ou d'herbes...

dans la protection contre l'érosion et l'envasement du barrage de Sidi Mohammed Ben Abdellah.

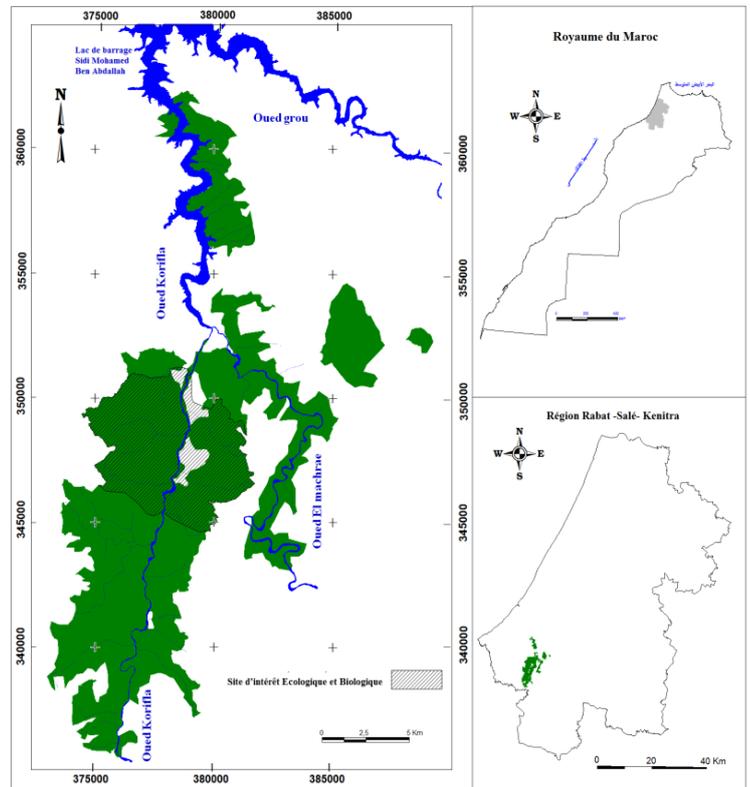
MATERIEL ET METHODES :

1. Présentation de la zone d'étude

La forêt de Korifla s'étend sur une superficie de 15140 ha dont 10436 ha de thuya de Berbérie. Elle occupe une place privilégiée en raison des rôles qu'elle joue sur les plans environnemental, économique et social. Son territoire fait partie de la région de Rabat Salé Kenitra, comprenant les communes de Brachoua, Sidi yahya zeer, Om azza, Marchouch. Cette forêt contient un Site d'intérêt Biologique et Ecologique (SIBE) de superficie de 2000 ha. (Fig.1)

La forêt relève de l'étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré qui est caractérisé par des irrégularités des précipitations intra et inters annuels, une saison sèche très longue (6 mois), et des amplitudes thermiques assez importantes ; l'amplitude thermique extrême égales à 37°C.

Figure1 : carte de la localisation de la zone d'étude



2. Méthodologie

Pour traiter cette problématique, nous avons adopté une approche géographique forestière, basée sur la recherche bibliographique et les mesures de terrain (mesure de densité arborée et arbustive, mesure du recouvrement arboré, arbustif et herbacé). Il s'agit de la réalisation des relevés de végétation et des mesures de l'état de la surface, ainsi que des analyses physiques et chimiques du sol (Matière organique, pH, Phosphore, Potassium, Azote, CaCO₃, CEC, Granulométrie). En parallèle, on a pu réaliser des questionnaires et des entretiens qui ont été menés avec diverses parties prenantes en relation avec la gestion et la conservation du domaine forestier.

RESULTATS :

1. Types de formations végétales:

La forêt de Korifla est composée essentiellement de thuya qui occupe une superficie de 10633 ha soit 70,2% de la superficie totale de la forêt. Les peuplements de chêne lièges couvrent 185,6 ha, alors que les peuplements reboisés occupent près de 2961 ha, soit 19,54% de la superficie totale de la forêt. Ces reboisements sont composés de pin d'Alep, l'essence la plus répandue en termes de couverture artificielle avec 1794,9 ha, et du pin brutia avec une couverture de 213 ha, la régénération artificielle de thuya, occupe 213,7 ha, et la régénération artificielle de chêne liège est de 4,2 ha. Le reste de la zone d'étude couvre 1140,4 ha et constitué de matorral, peuplier, vides et habitat (Fig.2).

2. Types d'érosion :

L'activité d'érosion est liée à la force de la pente, à l'exposition des versants, à l'intensification de la pression humaine sur les pentes et, dans une mesure plus importante, à

l'ouverture du couvert végétal qui, dans certaines zones constitue toujours une protection pour les pistes. Nous sommes donc confrontés à des domaines différents en termes de gravité de leur détérioration.

Le territoire forestier de Korifla présente différents types des formes d'érosion (**Fig.3**) : L'érosion en nappe de 11 %, des Rigoles et Ravinements de 22 %, des Badlands de 4%, des mouvements de masse de 0,14%.

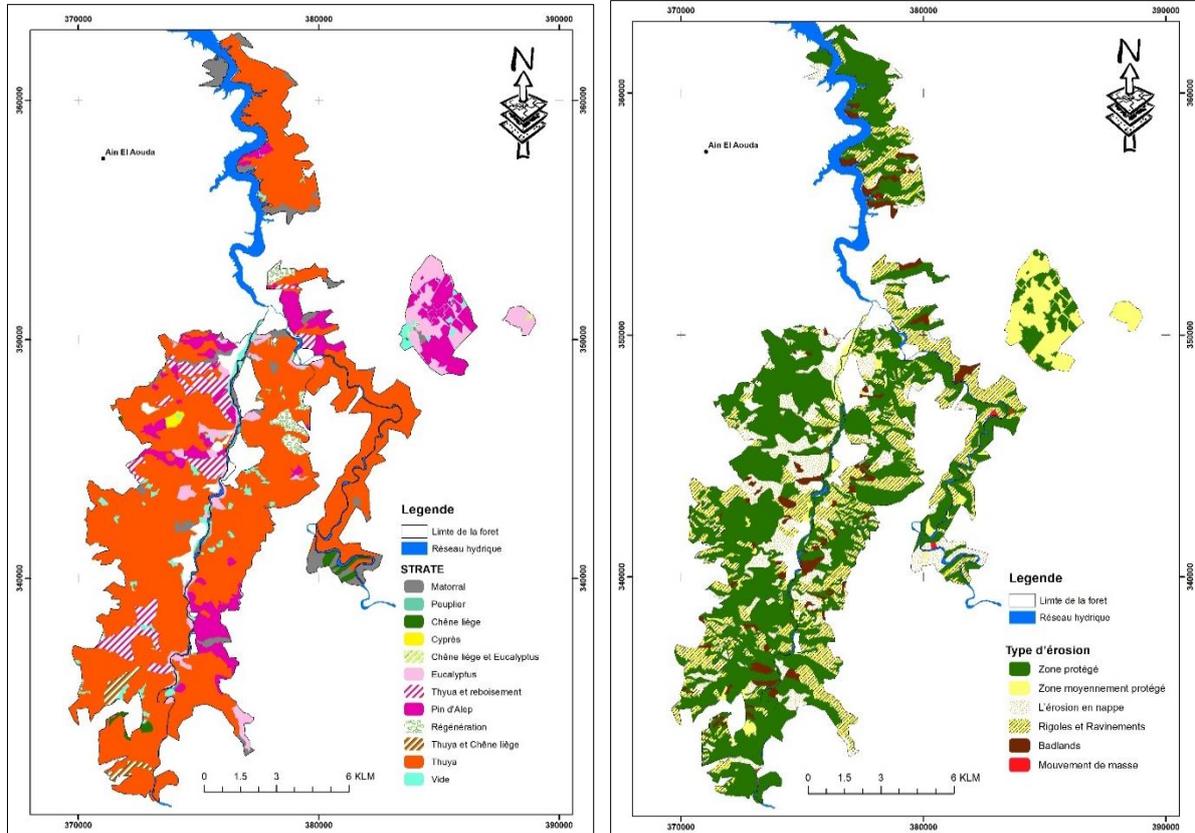


Figure2 : Carte de type de végétation **Figure3** : Carte de type d'érosion



L'érosion en nappe (11%)



Rigoles et Ravinements (22%)



Badlands (4%)



Zone moyennement protégé (6.86%)



Zone protégée (56%)



Mouvement de masse (0.14%)

Figure 4 : quelques photos des types d'érosion.

Alors on constate que le pourcentage de 6.86% est constitué de zones moyennement protégé ou semi-stables trouvées aux hauts des plateaux, ou sur les zones de faible pente, où la profondeur du sol est relativement importante, par rapport aux pentes.

Les 56 % restants sont des zones protégées par un recouvrement végétal dense ou moyennement dense, qui ne présente aucune forme d'érosion.

La Figure 4 présente quelques photos de types d'érosion.

3. Rôle de la végétation contre les risques d'érosion hydrique :

Le rôle du couvert végétal consiste à prévenir l'érosion en intervenant dans le processus d'interception. Ce processus se caractérise par l'influence du couvert végétal sur l'intensité et la quantité des précipitations atteignant le sol, modérant ainsi leur force et leur vitesse d'impact sur la surface. De plus, le couvert végétal agit comme une barrière qui atténue l'impact négatif des pluies violentes en surface, prévenant ainsi la dispersion de la structure du sol et le colmatage de ses pores. En ce qui concerne les facteurs régissant ce processus, on peut mentionner :

- **La densité de végétation :** Le facteur de la densité est considéré comme l'un des facteurs les plus importants contrôlant la protection des versant de la forêt de Korifla, et un indicateur très important pour réduire l'aggravation des risques hydro-climatiques. L'étude cartographique a montré que les zones, où le thuya est dense, sont des zones exceptionnellement protégées et les signes d'érosion sont absents. Alors que dans les zones où le thuya s'étend avec une densité faible à moyenne, diverses formes d'érosion sont actives, comme le montre la figure ci-dessous (Fig.5).

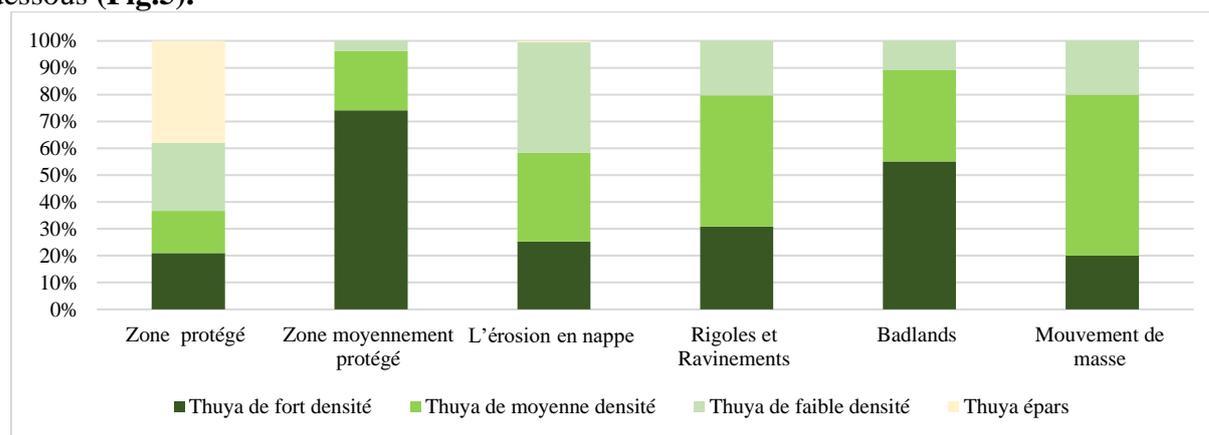


Figure 5 : Densité de thuya selon les types d'érosion

- **La densité et la taille des branches et des tiges :** Comme le reconnaît l'étude de (Aussenac et Boulangeat,1980), il a été constaté que les arbres de densité moyenne de 500 tiges/ha, interceptent environ 45 %, tandis que les arbres très denses de 2229 tiges/ha, interceptent environ 60%. Ainsi, plus les tiges sont denses et plus les branches sont grosses, plus la protection est importante.

Dans la forêt de Korifla, l'étude de terrain montre que la densité moyenne des arbres est de 329 arbres/ha, mais avec de grandes variations spatiales. Environ 21 % ont une densité d'arbres supérieure à 350 arbres/ha, tandis que 36 % ont une densité moyenne entre 350 et 250 arbres/ha, ainsi que 27% ont une densité faible entre 249 et 200 arbres/ha, les 14% ont une densité très faible inférieure à 200 arbres/ha, et les 3% restants pour les enclaves. Donc la forêt de Korifla joue un rôle très important de protection du sol contre l'érosion.

- **La morphologie des végétaux :** Selon l'étude effectuée par Aussenac et Boulangeat en 1980, les feuillues interceptent entre 15 et 30%, tandis que les résineux interceptent entre 25 et 45%. C'est-à-dire que les résineux sont ceux qui interceptent la plus grande quantité d'eau en

raison de la densité de leurs feuilles, contrairement aux feuillues, qui l'interceptent moins efficacement. Les résineux sont répandus dans la forêt de Korifla (80%), parmi lesquels appartiennent le thuya, le cyprès et le pin, tandis que le pourcentage de feuillues ne dépasse pas (6%), auquel appartiennent le chêne liège, l'eucalyptus et le Peuplier. Les résineux sont plus importants, le facteur morphologique a un impact positif en ce qui concerne la protection de la surface de la forêt.

- **Le type de feuilles :** Nous parlons du comportement des feuilles et de leur croissance annuelle. Le premier type est persistant toute l'année, et le second est caduque et ses feuilles tombent à l'automne. Dans la forêt de Korifla, les deux types se trouvent ensemble. La strate arborée de la forêt de Korifla est considérée comme 100% sempervirente, tandis que ce pourcentage varie dans la strate arbustive, où d'une part on trouve des espèces à feuilles persistantes, comme lentisque et l'oléastre, qui vivent ensemble et protègent la surface tout au long de l'année, et d'autre part, les espèces à feuilles caduques comme Tizga (*Rhus pentaphylla*) qui perd ses feuilles pendant l'automne et ne les regagnent que dans les mois de janvier et février. Cela signifie que les précipitations automnales s'étendent du mois d'octobre au mois de décembre, elles sont plus importantes et plus lourdes, et elles tombent sur la végétation nue et les surfaces semi-nues et stimulent le risque hydro-climatique.

- **Le type des herbacées :** Nous avons deux types d'herbes dans la forêt de Korifla : Les herbacées annuelles, qui constituent 22%, et sont principalement liés à la saison printanière, leur protection de la surface dépend de cette saison. Tandis que leur absence est en automne, qui coïncide avec de fortes pluies, constitue un facteur contributif et un catalyseur de détérioration de la surface. Si les herbacées pérennes, qui constituent 11 %, sont présents toute l'année, comme *Asphodelus aestivus*, *Urginea maritima* et *Scolymus hispanicus*, ils sont également au stade sec et leur protection de la surface est très relative.

4. Quelques stratégies pour réduire les risques hydro climatiques :

Afin de remédier la situation, une série de stratégies de réhabilitation environnementale a été mise en place pour assurer la durabilité de la forêt ; dont les plus importantes sont le reboisement, la régénération assistée, la mise en défens et les techniques de réhabilitation des ravins (67 ravins ont été réhabilités), ainsi que le renforcement des infrastructures et l'encouragement de l'écotourisme et les produits de terroir.

DISCUSSION :

Les résultats obtenus montrent que la forêt de Korifla joue un rôle très important au niveau de conservation des sols contre l'érosion et l'envasement de barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah, surtout que les autres études concernant le bassin versant de Korifla affirment que la zone connaît un taux d'érosion de 0.01 à 0.2 t/ha/an (Elbahi, 2006). Hara et al. (2021) l'ont estimé de 0,94 t/ha/an à 1,07 t/ha/an.

On a trouvé que 56% de la forêt est protégée par un recouvrement plus ou moins dense, ce qui indique que la forêt assure la protection contre l'érosion du sol.

L'interception des précipitations par les arbres peut être influencée par la forme du couvert végétal, la surface des feuilles et le type d'écorce des arbres (Mendes et al., 2021). On constate que les résineux représentent 80% dans la forêt de Korifla.

Concernant les quelques études sur l'interception des graminées, il convient de mentionner que ce phénomène a été étudié en considérant différentes intensités de précipitations, que l'évaporation et l'interception dans les forêts sont avérées plus importantes que dans les prairies (Calder et al., 1990), et que l'interception des graminées retarde également les processus de ruissellement de surface et d'érosion (Zhang et al, 2018). On a trouvé que 22% de recouvrement du tapis herbacé est annuel, et sa protection est moyennement faible.

CONCLUSION

La forêt de Korifla joue un rôle très important dans la conservation et la protection des sols contre l'érosion et l'envasement de barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah, 56% de la forêt est protégée par un recouvrement plus ou moins dense. Le Thuya est l'une des espèces pérennes qui protège les versants contre l'érosion et les inondations grâce à la forme de ses feuilles résineuses et ses racines profondes. C'est une espèce thermophile qui résiste à des climats semi-arides caractérisées par des irrégularités des précipitations intra et inter-annuelle, une saison sèche très longue, et des amplitudes thermiques assez importantes, aussi d'une pression anthropique surtout le surpâturage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aussenac, G. et Boulangeat, C. (1980). Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 1980, 37 (2), pp.91-107.
- Calder, A. (1990). Evaporation in the Uplands; John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, 148p.
- Chen J., Xiao H., Li Z., Liu C., Wang D., Wang L., Tang C. (2019). Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China. Ecological Engineering. Volume 132, July 2019, Pages 109-114.
- El Bahi, S. (2006). Quantification et modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de KORIFLA Plateau des ZAER-Maroc Central. Thèse de Doctorat.FS. Université Med-V-Rabat. 258 Pages.
- FAO (2020). La situation des forêts du monde 2020 : Forêts, biodiversité et activité humaine.
- Hara F., Achab M., Emran A., Saidi A. et Mahé G. (2021). Quantification de l'érosion hydrique par les méthodes USLE et RUSLE : Application aux sous-bassins versants du Bouregreg, Maroc. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, 2021, n° 43, 69–87 e-ISSN : 2458-7184.
- Kastridis, A.; Margiorou, S.; Sapountzis, M. (2022). Check-Dams and Silt Fences, Cost-Effective Methods to Monitor Soil Erosion under Various Disturbances in Forest Ecosystems. Land 2022, 11, 2129. <https://doi.org/10.3390/land11122129>.
- Mendes, T.A.; Alves, R.D.; Gitirana, G.d.F.N., Jr.; Pereira, S.A.d.S.; Rebolledo, J.F.R.; da Luz, M.P. (2021). Evaluation of Rainfall Interception by Vegetation Using a Rainfall Simulator. Sustainability, 13, 5082. <https://doi.org/10.3390/su13095082>
- Yu Y., Wei W., Chen C., Feng T., Daryanto S. (2019). Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. Science of The Total Environment Volume 652, 20 February 2019, Pages 755-764.
- Zhang, X.; Li, P.; Li, Z.B.; Yu, G.Q.; Li, C. (2018). Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope. Catena, 162, 130–140.

EVALUATION DE LA DESERTIFICATION DANS LE BASSIN DE LA MOYENNE MOULOUYA BASEE SUR L'ESPACE CARACTERISTIQUE NDVI-ALBEDO

Mohamed LAMAAMRI¹, Nezha LGHABI¹, Abdelkhalek GHAZI¹, Abdelkader SBAI², Abdelhak LIMAME³, Halima El MAMRI¹

¹Faculté des Science Humaine et Sociales, Kénitra – Maroc ; ²Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Oujda - Maroc ; ³Faculté des lettres et sciences humaines Dahr Elmahraz, Fès - Maroc.

Email : lamaamri.mohamed@gmail.com ; nouzalgh@gmail.com ; Aghhazi@hotmail.com ; sbaiabdelkader59@gmail.com ; limameabdelhak@gmail.com, halimaelmamri@gmail.com.

Résumé : La désertification préoccupe de plus en plus, en particulier dans les pays arides tels que le Maroc, notamment dans le bassin de la Moyenne Moulouya, objet de cette étude. L'objectif est d'évaluer les zones sensibles à la désertification en utilisant la télédétection spatiale avec des images satellitaires Sentinel-2. Les indices, tels que le NDVI et l'albédo de surface, ont été calculés, montrant une corrélation significative en utilisant une régression linéaire ($r^2 = -0,75$). Un modèle d'indice de désertification basé sur l'espace de caractéristiques NDVI-albédo a été développé et appliqué pour cartographier le degré de désertification dans le bassin qui a révélé une forte intensité et gravité de la désertification, touchant 88% du bassin, démontrant ainsi l'efficacité du modèle pour évaluer ce phénomène.

Mots clés : Désertification, NDVI, Albédo, Moyenne Moulouya, Maroc.

Abstract: Desertification is a growing concern, especially in arid countries such as Morocco, particularly in the Middle Moulouya basin, the object of this study. The objective is to evaluate areas sensitive to desertification using spatial remote sensing with Sentinel-2 satellite images. The indices, such as the NDVI and the surface albedo, were calculated, showing a significant correlation using a linear regression ($r^2 = -0.75$). A desertification index model based on the NDVI-albedo feature space has been developed and applied to map the degree of desertification in the basin which revealed a high intensity and severity of desertification, affecting 88% of the basin, thus demonstrating the effectiveness of the model to evaluate this phenomenon.

Keywords: Desertification, NDVI, Albedo, Middle Moulouya, Morocco.

Introduction

La désertification constitue une menace environnementale importante qui touche de nombreux pays dans le monde, en particulier les terres fragiles, principalement définies dans les régions arides. En effet, ce phénomène affecte les conditions de vie de millions de personnes à travers le monde (Adger et al., 2001 ; Reynolds et al., 2007). La désertification se produit principalement dans les régions arides, semi-arides et subhumides sèches en raison de diverses pressions climatiques et anthropiques (UNEP 1994 ; UNCCD 2004).

En raison des climats arides, semi arides qui sévissent au niveau de plusieurs régions du Maroc, la désertification est l'un des phénomènes de dégradation des terres les plus répandus au niveau du Royaume. Le bassin de Moulouya souffre également du phénomène en raison de la combinaison de facteurs physiques et humains (Tag.,2003 ; Mokhtari.,2016 ; Seghir et al.,2019). La Moyenne Moulouya, quant à elle, se caractérise par des degrés de sévérité élevés de la désertification (Lamaamri et al.,2019 ; Lamaamri et al.,2023).

Récemment, la technologie de télédétection a été largement utilisée pour surveiller et évaluer les écosystèmes et les risques naturels, tels que la désertification. Grâce à la disponibilité des images satellitaires haute résolution, plusieurs auteurs à travers le monde ont pu effectuer un suivi efficace de la désertification pour des zones touchées par le phénomène.

Pour surveiller la désertification, les chercheurs s'appuient principalement sur les indicateurs biophysiques relatives à l'évolution de la végétation, car ce phénomène est principalement un processus de dégradation du couvert végétal (Zhao et al., 2014). Plusieurs indices et méthodes

ont été développés pour évaluer la désertification. En effet, les indices de végétation basés sur l'image satellite, tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de végétation modifié ajusté au sol (MASVI) ou l'Enhanced Vegetation Index (EVI) (Li et al., 2010 ; Wu et al., 2007), sont les plus couramment utilisés pour surveiller les conditions de végétation dans l'évaluation de la désertification (Xu et al., 2009 ; Yu et al., 2013).

Notre étude s'appuie sur les paramètres biophysiques fondamentaux de la surface terrestre, tels que le NDVI et l'albédo. Dans cette étude, nous avons examiné la corrélation entre la sévérité de la désertification, le NDVI et l'albédo. L'objectif de cette étude est de dresser une cartographie des degrés de désertification dans le bassin en 2018 en utilisant les images Sentinel-2. Elle vise également à évaluer la sévérité de la désertification au niveau du bassin.

1. Matériels et méthodes

1.1. Zone d'étude

Notre zone d'étude concerne le bassin de la Moyenne Moulouya, situé au nord-est du Maroc (Fig 1) entre les latitudes 32°50' et 33°50' Nord et à la longitude 3° et 4° Ouest. Cette zone est limitée par les Hauts Plateaux à l'est, le Moyen Atlas plissé à l'ouest, le Haut Atlas au sud, et le seuil de Bouyacoubat au nord.

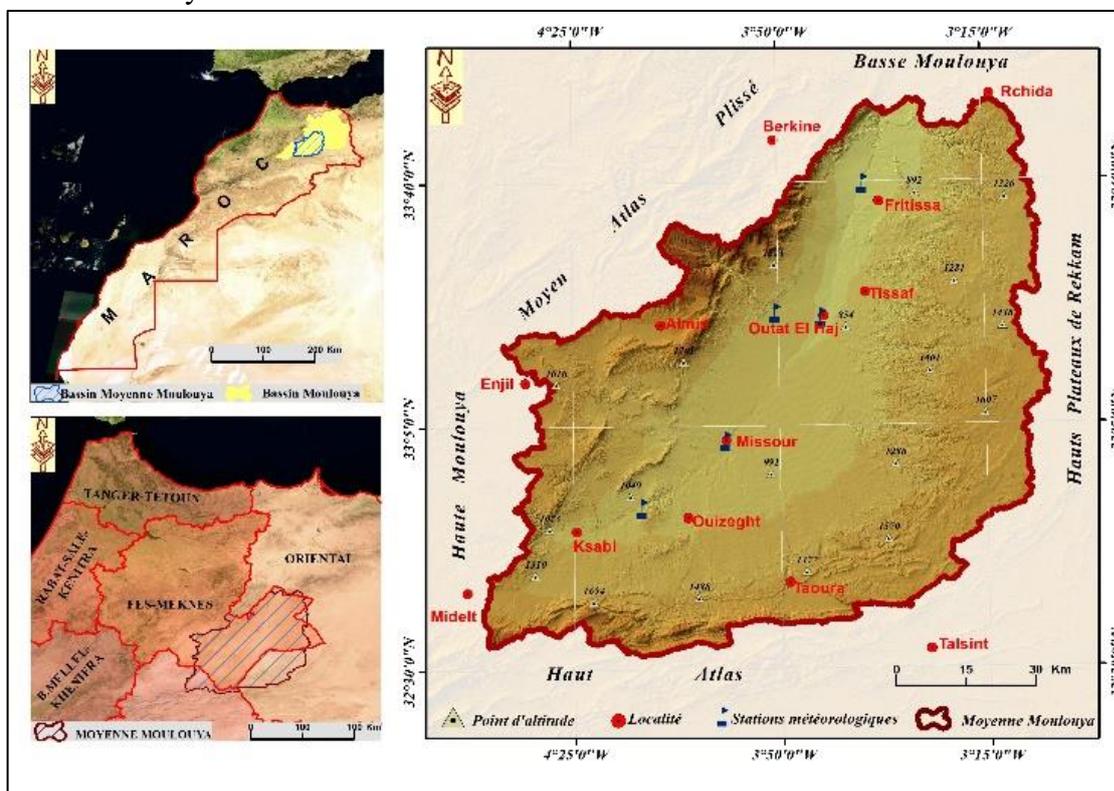


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Moyenne Moulouya

Par sa position géographique par rapport aux deux chaînes montagneuses encadrantes, le bassin de la Moyenne Moulouya est caractérisé par un climat aride à semi-aride. Le régime pluviométrique est marqué par son irrégularité annuelle et mensuelle, comme il est marqué par la faiblesse des précipitations qui ne dépassent guère les 200 mm/an au niveau du centre du bassin. Les températures sont élevées avec une amplitude thermique annuelle supérieure à 20°C. Le bassin est également caractérisé par une évapotranspiration potentielle très forte.

Administrativement, la zone d'étude est rattachée à trois régions, à savoir la région de Fès Meknès, la région de l'Oriental et la région de Daraa Tafilalt. La population du bassin est passée de 233 856 habitants en 2004 à 247 837 habitants en 2014. Cette augmentation démographique conjuguée à des conditions socioéconomiques défavorables a entraîné une surexploitation irrationnelle des terres, contribuant à l'aggravation de la dégradation des terres.

1.2. Données utilisées et méthodologie de travail

1.2.1. Source des données

L'évaluation des degrés de désertification dans le bassin versant de la Moyenne Moulouya a été effectuée à l'aide de six images couvrant l'ensemble du bassin, acquises par le satellite Sentinel-2, choisi pour sa haute résolution spatiale de 10 mètres. Ces images multispectrales ont été obtenues à partir du site : <https://scihub.copernicus.eu>.

Ces images ont été soumises à un traitement radiométrique et géométrique pour les adapter à l'objectif de cette étude. Les six scènes satellitaires ont été sélectionnées en tenant compte de leur similarité temporelle (prises pendant le mois de juin) pour garantir une meilleure homogénéité en termes de conditions atmosphériques (Coppin et al., 2004 ; Dengsheng Lu et Weng, 2007).

1.2.2. Méthodologie adoptée

L'organigramme ci-après récapitule la méthodologie adoptée pour mener à bien ce travail. Il résume les principales étapes de l'acquisition des images satellitaires et de calcul des indices choisis.

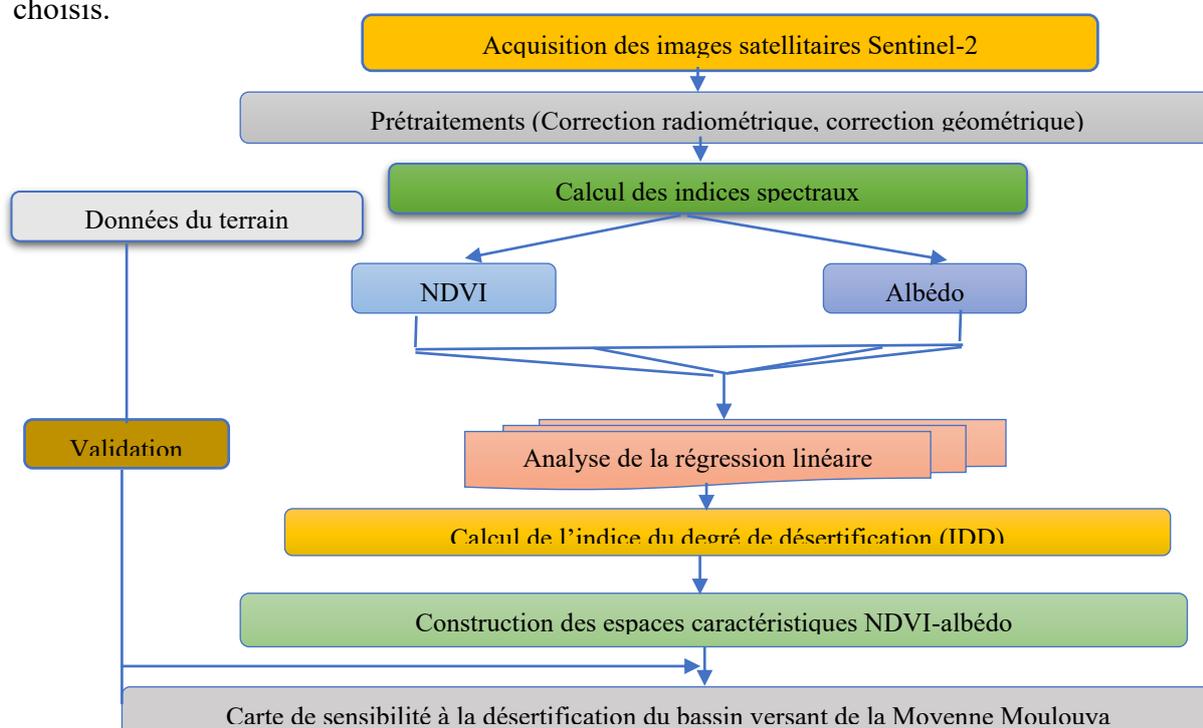


Figure 2 : Organigramme méthodologique

1.3. Sélection des différents indices pour l'évaluation de la désertification au niveau du bassin de la Moyenne Moulouya

Dans cet article, le risque de désertification est évalué à l'aide des images Sentinel-2 prétraitées. En effet, nous avons calculé le NDVI et l'albédo en utilisant les données de réflectance des bandes infrarouge, rouge, proche infrarouge, bleue et verte à ondes courtes.

Ci-dessous, vous trouverez les formules de ces indices. La formule du NDVI est la suivante (Carlson et al., 1997) :

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Où NIR est la bande proche infrarouge et RED est la bande rouge.

- La formule de l'albédo est la suivante (Liang, S., 2003) :

$$\text{Albédo} = (0.356 * \text{Blue}) + (0.130 * \text{RED}) + (0.373 * \text{NIR}) + (0.085 * \text{SWIR1}) + (0.072 * \text{SWIR2}) - 0.018 / 1.016$$

Où SWIR1 et SWIR2 sont les bandes infrarouges à ondes courtes.

Les valeurs de l'NDVI et l'albédo ont fait l'objet de normalisation par l'identification de ses minimums et maximums selon les formules suivantes :

$$\text{NDVI} = [(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})] \times 100$$

$$\text{Albédo} = [(Albédo - Albédo_{min}) / (Albédo_{max} - Albédo_{min})] \times 100$$

2. Résultats et discussions

L'extraction des différents degrés de désertification repose sur l'analyse de la corrélation linéaire entre les deux indices spectraux. Cette analyse a révélé une corrélation négative significative entre l'albédo et le NDVI ($r^2 = -0,76$). Ces combinaisons ont été utilisées pour calculer l'Indice de Degré de Désertification (IDD) et, par conséquent, identifier les zones sensibles à la désertification.

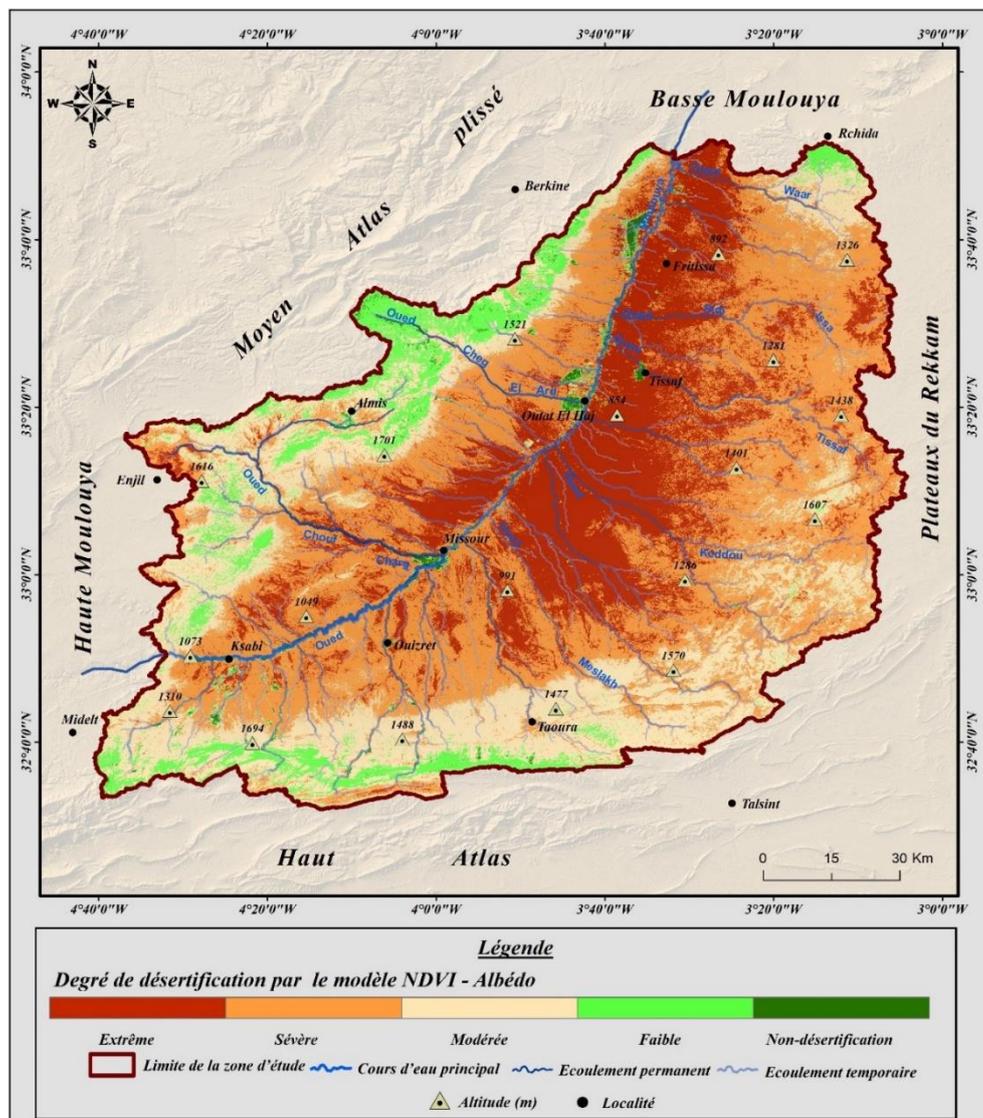


Figure 3 : Degré de la désertification dans le bassin de la Moyenne Moulouya

Après l'extraction des degrés de désertification à l'aide de l'IDD et de la classification de Jenks, une cartographie de la distribution de l'IDD a été réalisée pour le modèle albédo-NDVI, comme le montre la figure 3.

Selon les résultats obtenus par le modèle NDVI-albédo, 88% du bassin de la Moyenne Moulouya est touché par la désertification, dont 21% du bassin est caractérisé par une désertification extrême, principalement au centre du bassin et sur le plateau du Rekkam. On observe également 42% de désertification sévère, 25% de désertification modérée, et ces zones se situent principalement le long des bordures des Moyen Atlas plissé et du Haut Atlas. On constate également 11% de désertification faible, localisée principalement dans les Moyen Atlas plissé et le Haut Atlas. La zone non affectée par la désertification ne constitue que 1% et se trouve le long de l'Oued Moulouya et plus précisément au niveau du périmètre irrigué (Lamaamri et al., 2022).

L'expansion de la désertification engendre diverses conséquences préjudiciables aux écosystèmes et au développement socioéconomique de la région. Ce phénomène découle d'une interconnexion complexe entre des facteurs naturels, incluant les conditions climatiques extrêmes, la salinité des sols, l'érosion hydrique et éolienne, l'exposition des versants, ainsi que des facteurs d'origine humaine tels que le surpâturage, la déforestation, l'extension des zones agricoles, et la surexploitation des ressources naturelles.

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé un modèle pertinent pour la caractérisation de la désertification dans le bassin de la Moyenne Moulouya. Ce modèle repose sur l'extraction d'informations sur la désertification à partir de la construction de l'espace des caractéristiques NDVI-albédo. Selon ce modèle, le bassin de la Moyenne Moulouya est confronté à une désertification modérée à extrême. Face à cette situation préoccupante, il est impératif d'intervenir rapidement en mettant en œuvre un plan d'action destiné à contrer ce phénomène.

En raison de son efficacité dans la surveillance de la désertification dans la zone d'étude, le modèle NDVI-albédo peut servir de référence aux décideurs œuvrant dans le domaine de la préservation du patrimoine naturel, tant au niveau national que régional. Ce modèle peut également être appliqué à d'autres zones présentant des caractéristiques de surface similaires.

5. Références

Adger, W. N., Benjaminsen, T. A., Brown, K., & Svarstad, H. (2001). Advancing a political ecology of global environmental discourses. *Development and change*, 32(4), 681-715.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252.

Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004). Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International journal of remote sensing*, 25(9), 1565-1596.

Lamaamri, M., Lghabi, N., Ghazi, A. and El Harchaoui, N. (2019). SIG et télédétection : outils d'aide à la décision pour l'évaluation de la sensibilité à la désertification dans les régions semi arides : cas du bassin versant de la Moyenne Moulouya', *Houdayfa – Oujda 1*, 52–60.

Lamaamri, M., Lghabi, N., Ghazi, A., El Harchaoui, N., Adnan, M. S. G., & Shakiul Islam, M. (2023). Evaluation of desertification in the middle Moulouya basin (north-east morocco) using sentinel-2 images and spectral index techniques. *Earth Systems and Environment*, 7(2), 473-492.

Li, Z., Li, X., Wei, D., Xu, X., & Wang, H. (2010). An assessment of correlation on MODIS-NDVI and EVI with natural vegetation coverage in Northern Hebei Province, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 964-969.

Liang, S., Shuey, C. J., Russ, A. L., Fang, H., Chen, M., Walthall, C. L., ... & Hunt Jr, R. (2003). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote Sensing of Environment*, 84(1), 25-41.

Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International journal of Remote sensing*, 28(5), 823-870.

Mokhtari, N. (2016). Etude de la dynamique de la désertification dans le bassin versant de la Moulouya en intégrant les données issues de la télédétection et les données socio-économiques. Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech.

Reynolds, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., ... & Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *science*, 316(5826), 847-851.

Seghir, A., Mazoz, L., & Idrissi, A. J. (2019). Cartographie de sol dans la zone méridional de la plaine de Tafrata au Maroc Centro-Oriental et évaluation de leur sensibilité à la désertification. *Revue Marocaine Des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 7(2).

Tag, B. (2003). Espace et société agro-pastorale en mutation dans le Maroc oriental steppique. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

UNCCD, 2004. Preserving our common ground. UNCCD 10 years on. United Nations Convention to Combat Desertification, Bonn, Germany.

UNEP, 1994. Development of guidelines for assessment and mapping of desertification and degradation in Asia/Pacific. Proceedings of Draft Report of the Expert Panel Meeting United Nations Environment Programme.

Wu, J., Wang, D., & Bauer, M. E. (2007). Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. *Field crops research*, 102(1), 33-42.

Wu, J., Wang, D., & Bauer, M. E. (2007). Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. *Field crops research*, 102(1), 33-42.

Xu, D., Kang, X., Qiu, D., Zhuang, D., & Pan, J. (2009). Quantitative assessment of desertification using Landsat data on a regional scale—a case study in the Ordos Plateau, China. *Sensors*, 9(3), 1738-1753.

Zhao, H. L., Li, J., Liu, R. T., Zhou, R. L., Qu, H., & Pan, C. C. (2014). Effects of desertification on temporal and spatial distribution of soil macro-arthropods in Horqin sandy grassland, Inner Mongolia. *Geoderma*, 223, 62-67.

Evaluation de la pollution générée par les sous-produits de l'activité oléicole et son impact sur les ressources hydriques dans la province d'Al Haouz (Maroc).

Sihame HAFIDI¹, El Mostafa MILI², Abderrahim LACHGUER³, Laila MANDI⁴, Abdessamad HEJJAJ⁴, MohammedETTAKI¹.

1. Laboratoire Géosciences Semlalia, Département de Géologie, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad. BP: 2390 Av Prince Moulay Abdellah, Marrakech 40000, Maroc. S.hafidi@uca.ac.ma, mohammed.ettaki@uca.ac.ma
2. Laboratoire de Géo-Ingénierie et Environnement, Département de Géologie, Faculté des Sciences Meknes, Université Moulay Ismail BP11201, Zitoune, Meknès 50000, Maroc mili_elmostafa@yahoo.fr
3. Agence du Bassin Hydraulique Tensift ABHT, Bp : 2388, Av. Jnane El Harti, 40000 Marrakech, Maroc lachguer@eau-tensift.net
4. Centre Nationale d'Etude et de Recherche sur l'Eau et l'Energie CNEREE, Univeristé Cadi Ayyad, B. P 511, Av. Abdelkrim Elkhatabi, Marrakech 40000, Maroc. mandi@uca.ac.ma dashaouz@yahoo.fr

Résumé: L'étude réalisée du 07 mars 2022 au 30 juillet 2022 se concentre sur l'analyse des différentes formes de pollution générées par les huileries de la province d'Al Haouz, ainsi que sur l'évaluation de leur impact sur l'environnement. Les eaux résiduelles de l'industrie oléicole, connues sous le nom de margines, sont réputées pour leur acidité et leurs effets néfastes sur les écosystèmes. Les résultats de l'étude révèlent que 65,62 % des unités de trituration d'olive étudiées présentent un profil polluant. Les effluents produits par ces unités sont fortement polluants, dépassant les normes de rejet des moulins à huile au Maroc en termes de matières en suspension (MES), de demande chimique en oxygène (DCO), de polyphénols, d'azote total et de phosphore total. Les sous-produits des huileries traditionnelles et semi-modernes engendrent chaque année une quantité significative de pollution, estimée à 248 390 kg/an de MES, 1 628 221 kg/an de DCO, 76155 kg/an de polyphénols, 1 107,287 kg/an d'azote total et 1 990,786 kg/an de phosphore total. Les margines sont par la suite évacuées dans la nature sans aucun traitement, ou collectées dans des grands bassins d'évaporation. Ces derniers représentent localement une source de pollution potentielle des eaux de surface et souterraines. Les résultats des analyses des eaux indiquent une conductivité élevée de l'ordre de 0,89 mS/cm à Tamazozt et 0,34 mS/cm à Ourika. La DCO et les polyphénols ont traduit l'existence d'une pollution organique plus ou moins abondante. Ils sont respectivement de l'ordre de 224,116 mg. O₂/l et 327,85 mg/l à Tamazozt, et 601,986 mg. O₂/l et 327,85 à Ourika.

Mots clés : Margine, Pollution, Environnement, Ressources hydriques, analyses physico-chimiques.

Evaluation of pollution generated by olive oil industry byproducts and its impact on water resources in the Al Haouz province (Morocco)

The study conducted from March 7, 2022 to July 30, 2022 focuses on the analysis of the different forms of pollution generated by olive oil mills in the Al Haouz province, as well as on the evaluation of their impact on the environment. Olive oil industry wastewater, margines, are known for their acidity and their harmful effects on ecosystems. The results of the study reveal that 65.62% of the olive pressing units studied have a polluting profile. The effluents produced by these units are highly polluting, exceeding the Moroccan oil mill discharge standards in terms of suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), polyphenols, total nitrogen, and total phosphorus. The products of traditional and semi-modern olive mills are distinguished by their high load of organic matter, polyphenols, and SS. This significant concentration generates a significant amount of pollution each year, estimated at 248,390 kg/year of SS, 1,628,221 kg/year of COD, 76,155 kg/year of polyphenols, 1,107,287 kg/year of total nitrogen, and 1,990,786 kg/year of total phosphorus. The margines are then discharged into nature without any treatment, or collected in large evaporation ponds. The latter represent a local source of potential pollution of surface and groundwater. The results of the water analyses indicate a high conductivity of the order of 0.89 mS/cm in Tamazozt and 0.34 mS/cm in Ourika. COD and polyphenols have indicated the existence of more or less abundant organic pollution. They are respectively of the order of 224.116 mg. O₂/l and 327.85 mg/l in Tamazozt, and 601.986 mg. O₂/l and 327.85 in Ourika.

Key words : Olive mill wastewater, Pollution, Environment, Water resources, Physico-chemical analysis.

Introduction

Le Maroc est souvent cité parmi les principaux pays producteurs d'huile d'olive du bassin méditerranéen. La moitié de la superficie arboricole nationale, soit 440,000 ha, est destinée à l'oléiculture et sa production annuelle moyenne est de 35,000 tonnes. La région de Marrakech Tensift Haouz constitue le troisième pôle de la concentration des unités industrielles (MOUHTADI et al., 2014). L'industrie oléicole engendre deux résidus l'un solide, les grignons, et l'autre liquide, les margines. Ces dernières sont des eaux acide riche en matière organique et en sel minéraux, elles constituent un problème majeur pour l'environnement et les ressources hydriques surtout dans les zones où cette ressource est limitée (Boukhoubza et al., 2012).

La problématique fait l'objet de plusieurs études, notamment les études de (Boukhoubza et al., 2012 ; Ochando-Pulido et al., 2015 ; Zghari et al., 2018 ; Achak & Ouazzani, 2021; Aissam, 2003). Cette étude a été réalisée, afin d'élucider les différentes formes de la pollution causée par les huileries relevant de la province d'Al Haouz, d'identifier celles qui présentent plus d'impact sur l'environnement, d'évaluer la qualité des affluents des unités de la trituration d'olives « Margines », de déterminer leur degré de la pollution, et leurs impacts sur les ressources en eaux dans la zone d'étude.

1. Description de la zone d'étude

La province d'Al Haouz, se situe au sud de la région de Marrakech-Safi et au Sud-Est du bassin hydraulique de Tensift sur le versant nord du Haut Atlas occidental.

S'étendu sur une superficie de 6212 km², la province comporte : sept cercles (Amizmiz, Asni, Tahnaout, Ait ourir, Touama, Ouazougua et kadmiouia), et 40 communes dont 3 Urbaines et 37 Rurales.

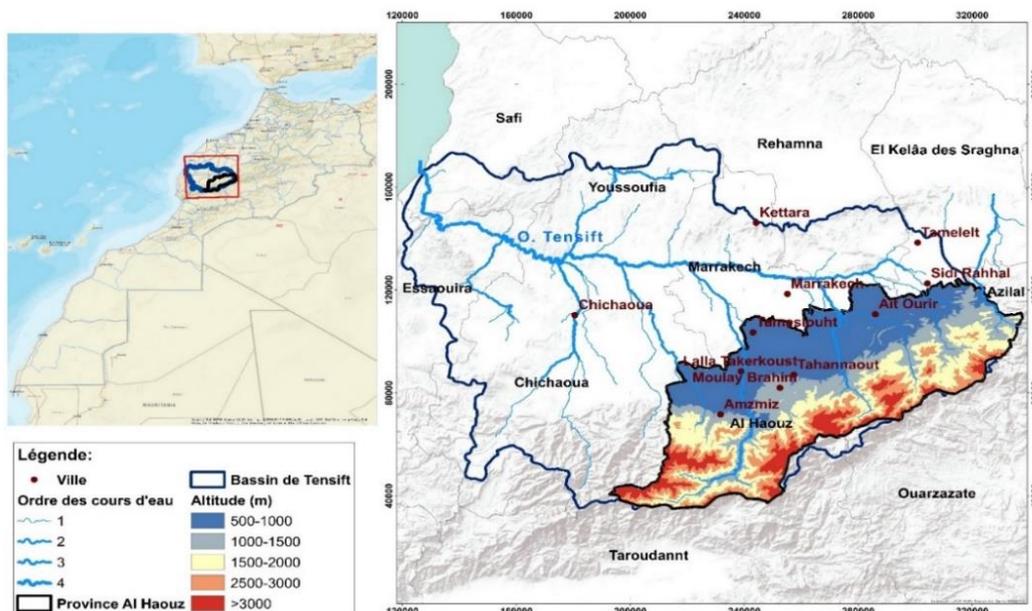


Figure 13: Situation géographique de la zone d'étude

La population de la province d'Al Haouz est de l'ordre de 573128 (recensement de 2014), l'activité humaine basée essentiellement sur l'artisanat, le commerce, le tourisme, l'élevage et l'agriculture irriguée par des saguias, khetaras et pompes. Toutefois, l'activité oléicole représente l'activité la plus dominante dans la province.

Le climat régional est de type semi-aride caractérisé par des épisodes de sécheresse, la pluviométrie faible et marquée par une forte hétérogénéité spatio-temporelle. La moyenne annuelle de demande évaporatoire enregistrée dans la plaine du Haouz est 1600 mm.an-1.

Le réseau hydrographique s'organise dans le système Tensift, les principaux affluents du Tensift sont : N'Fis, Ourika, Rheraya, Zat et R'dat.

Le principal aquifère de la province d'Al Haouz est formé par les dépôts alluvionnaires plioquaternaires. La recharge de la nappe se fait principalement par infiltration des eaux d'irrigation et des eaux de crues le long des oueds atlasiques traversant la plaine.

2. Matériel et méthodes

L'approche méthodologique utilisée pour l'évaluation de la pollution générée par les sous-produits de l'activité oléicole et son impact sur les ressources hydrique dans la province d'Al Haouz (Maroc) se présenter comme suite.

1. Enquête :

- Sélection de 45 unités de production oléicole dans la province d'Al Haouz, et élaboration d'un questionnaire d'enquête pour caractériser la gestion des sous-produits.
- Réalisation de visites sur 32 unités, avec utilisation du système d'information géographique ArcGIS 10.03 pour représenter l'emplacement des huileries.

2. Questionnaire d'enquête :

- Test du questionnaire sur deux unités avec différents systèmes d'extraction.
- Le questionnaire comprend 24 questions visant à obtenir des informations générales sur les unités de production.

3. Évaluation de la pollution en huileries :

- Utilisation d'indicateurs tels que les bassins d'évaporation, les milieux de rejets finals, le stockage des grignons, et les atteintes des réseaux hydrographiques.
- Classification des niveaux d'atteinte à l'environnement en trois catégories : non polluant (NP), légèrement polluant (LP), et polluant (P).

4. Analyses physicochimiques des margines :

- Prélèvement d'échantillons de margines dans trois types d'unités de production.
- Méthodes d'analyses pour déterminer l'acidité, la conductivité électrique, les matières en suspension, la demande chimique en oxygène, les polyphénols, l'azote total et le phosphore total.

5. Estimation de la charge polluante d'une huilerie :

- Calcul de la charge polluante en fonction du volume de rejets et de la concentration des différents paramètres.

6. Analyses physicochimiques de l'eau :

- Prélèvement d'échantillons d'eau des puits à l'intérieur des huileries.
- Analyses des paramètres tels que l'acidité, la conductivité, la demande chimique en oxygène, et les composés phénoliques.

3. Résultats et discussion

3.1 Caractérisation de la pollution

D'après l'enquête, les huileries traditionnelles sont moins aménagées que les huileries modernes.



Photo 1: Fosse de stockage des margines au sien d'une Maasra **Photo 2: Bassin de stockage secondaire**

La gestion des margines, dépend du type de procédé de trituration utilisé. Les huileries traditionnelles utilisent un système de presse, les semi-modernes utilisent une centrifugation à trois phases. Les margines produites sont déversées directement dans les cours d'eau, dans des fosses, dans le sol ou stockées dans des bassins d'évaporation. Les huileries modernes sont généralement bien équipées. Elles utilisent des procédés de trituration plus efficaces qui produisent moins de margines. Les margines qui sont produites sont généralement traitées avant d'être rejetées dans l'environnement.

Les résultats montrent que 65,62% des huileries sont polluantes, 9,37% sont légèrement polluantes et 18,75% ne sont pas polluantes.

Tableau 5: Situation des communes vis-à-vis de la pollution en activité oléicole

| Cercle | NP | LP | P |
|-------------|--------|-------|--------|
| Ait Ourir | 2 | 2 | 7 |
| Amzmiz | | | 7 |
| Ouaouzguita | | | 4 |
| Tahannaout | 2 | 1 | 3 |
| Touama | 2 | | 2 |
| Pourcentage | 18,75% | 9,37% | 65,62% |

Les analyses physico-chimiques des margines ont montré que celles-ci sont très polluantes. Elles présentent des concentrations élevées en matières en suspension (MES), en demande chimique en oxygène (DCO), en polyphénols, en azote total et en phosphore total, dépassant les normes de rejets des moulins à huile exigés par la législation environnementale au Maroc. Cependant ces concentrations sont similaires à celles trouver par (Mekki et al., 2008 ;Zaier et al., 2017 ; Al Khattab ; H. Aborumman, 2011)

Tableau 6 : Composition physico-chimique moyenne des margines selon le procédé d'extraction

| Paramètre | Système d'extraction | | | Moyenne | Valeurs limites spécifiques de rejet |
|------------------------------------------|----------------------|--------------|-------------|---------|--------------------------------------|
| | Presse | Trois phases | Deux phases | | |
| pH | 4,59 | 4,6 | 4,67 | 4,62 | 6-9 |
| Conductivité (mS.cm ⁻¹) | 13 | 13 | 14 | 13,33 | |
| MES (g.l ⁻¹) | 32 | 27 | 20 | 26,33 | 0,005 |
| DCO (g.O ₂ .l ⁻¹) | 206,134 | 180,85 | 120,18 | 169,05 | 0,5 |
| Polyphénol (g.l ⁻¹) | 10,99 | 8,97 | 6,18 | 8,71 | 0,03 |
| Phosphore total (mg.l ⁻¹) | 207,92 | 210,56 | 213,2 | 210,56 | 10 |
| Azote total (mg.l ⁻¹) | 109,5 | 118,01 | 120,2 | 115,90 | 30 |

La charge polluante des margines de la province d'Al Haouz est estimée à 248 390 kg/an de MES, 1628 221 kg/an de DCO, 76 155 kg/an de polyphénols, 1107,287 kg/an d'azote total et 1990,786 kg/an de phosphore total. Les huileries semi-modernes sont responsables de 70% de cette charge polluante.

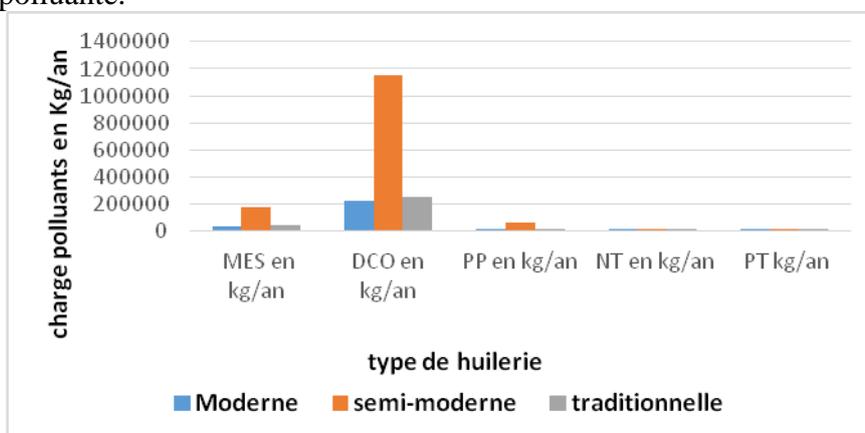


Figure 14: Charge polluante de la province d'AL Haouz selon le type d'huilerie

Les margines polluent les ressources en eaux de la province d'Al Haouz. Elles entraînent la pollution des oueds, des barrages, des cours d'eau et de la nappe phréatique.

3.2 Impacts des margines sur les ressources en eaux

La pollution des margines entraîne des impacts négatifs sur les ressources en eaux de la province d'Al Haouz. Ces impacts sont à la fois qualitatifs et quantitatifs.

3.2.1 Impacts qualitatifs

Les margines présentent des concentrations élevées en matières en suspension, en demande chimique en oxygène, en polyphénols, en azote total et en phosphore total. Ces polluants La pollution des margines peut entraîner une diminution de la qualité de l'eau, ce qui peut nuire à la vie aquatique. Elle peut également entraîner une eutrophisation, qui peut avoir un impact négatif sur la biodiversité. Les résultats des analyses physicochimiques des eaux montrent des différences significatives entre les deux sites, notamment en termes de pH, conductivité électrique, DCO (Demande Chimique en Oxygène) et taux de polyphénols. La conductivité électrique dépasse les normes marocaines, suggérant des infiltrations de margines. La pollution organique, mesurée par la DCO et les polyphénols, est plus élevée à Tamazozt qu'à Ourika la pollution organique, indiquent probablement des infiltrations des margines.

Tableau 7: Caractérisation physico-chimique des eaux

| Paramètre | pH | CE (mS.cm ⁻¹) | DCO mg.O2.l ⁻¹ | PP (mg.l ⁻¹) |
|-----------|------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Ourika | 8,03 | 0,34 | 601,986 | 251,07 |
| Tamazozt | 6,60 | 0,89 | 224,116 | 327,85 |

3.2.2 Impacts quantitatifs

Les margines sont un important consommateur d'eau. Les huileries utilisent de l'eau pour le nettoyage des locaux, des machines et des scortins, le lavage et le malaxage des olives, l'eau des employés et les installations sanitaires.

Les huileries semi-modernes sont les plus consommatrices d'eau. Elles utilisent en moyenne 2,5 fois plus d'eau que les huileries traditionnelles et 1,8 fois plus d'eau que les huileries modernes. La consommation d'eau par les huileries contribue à la pression sur les ressources en eau de la province d'Al Haouz.

Conclusion

Les margines peuvent provoquer la pollution des oueds, des barrages, des différents cours d'eau, et de la nappe phréatique. Elles peuvent également avoir un impact négatif sur la santé publique. Pour réduire les impacts des margines sur les ressources en eaux, il est nécessaire de prendre des mesures de traitement des margines avant leur rejet dans la nature. Ces mesures peuvent être de nature physique, chimique ou biologique. En outre, il est nécessaire de sensibiliser les propriétaires des huileries à l'importance de la gestion durable des margines.

Références bibliographiques

- Achak, M., & Ouazzani, N. (2021). *Journal of Water Science Traitement des margines d ' une huilerie moderne par infiltration-percolation sur un filtre à sable Treatment of modern olive mill effluent by infiltration-percolation on a sand filter TRAIEMENT DES MARGINES D ' UNE HUILERIE MODE.*
- Aissam, H. (2003). Etude de la biodégradation des effluents des huileries (margines) et leur valorisation par production de l'enzyme tannase. *Thèse de Doctorat National FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MEHRAZ FES, Maroc*, 156.
- Boukhoubza, F., Ait Boughrous, A., Yacoubi-Khebiza, M., Jail, A., Hassani, L., Loukili Idrissi, L., & Nejmeddine, A. (2012). Impact of olive oil wastewater on the physicochemical and biological quality of groundwater in the Haouz plain, south of Marrakesh (Morocco). *Environmental Technology*, 29(9), 959–974. <https://doi.org/10.1080/09593330802131669>
- Mekki, H., Anderson, M., Benzina, M., & Ammar, E. (2008). Valorization of olive mill wastewater by its incorporation in building bricks. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3), 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.104>
- MOUHTADI, I. El, AGOUZZAL, M., & GUY, F. (2014). La filière Oléacgineuse en Afrique. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 21(2), 21–23.
- Ochando-Pulido, J. M., Victor-Ortega, M. D., & Martínez-Ferez, A. (2015). On the cleaning procedure of a hydrophilic reverse osmosis membrane fouled by secondary-treated olive mill wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 260, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.094>
- Suleiman Al Khattab ; As'ad H. Aborumman. (2011). 247-254.Pdf. In *Internaational Businesss Management* (Vol. 5, Issue 5, pp. 247–254).
- Zaier, H., Rajhi, H., Zaier, H., Chmingui, W., Rajhi, H., Bouzidi, D., Roussos, S., & Rhouma, A. (2017). Physico-chemical and microbiological characterization of olive mill wastewater (OMW) of different regions of Tunisia (North , Sahel , South). *Journal of New Sciences* , 48(2), 2888–2897. www.jnsciences.org
- Zghari, B., Benyoucef, F., & Boukir, A. (2018). Impact Environnemental Des Margines Sur Les Eaux D ' Oued Oussefrou : Caracterisation Physico-Chimique Et Evaluation Par Chromatographie Gazeuse Couplee a La Spectrometrie De masse (CPG-SM). *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 7(4), 276–291.

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION, QUALITY ASSESSMENT, AND VULNERABILITY MAPPING OF THE TAMOUDA AQUIFER, UPSTREAM OF THE MARTIL-ALILA PLAIN (INTERNAL RIF, MOROCCO).

Morad CHAHID¹, Jamal Eddine STITOU EI MESSARI¹, Ouafae KAIBI², Abdelhadi ELOUALI², Mohammed Reda AOULAD MANSOUR³, Ali ESSAHLAOUT², and Anton VAN ROMPAYE⁴

¹Laboratory of Applied and Marine Geosciences, Geotechnics and Geohazards (LR3G). Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Abdelmalek Essaadi University, Tetouan 416, Morocco.

morad.chahid@etu.uac.ac.ma

²Water Sciences and Environment Engineering Team, Department of Geology, Faculty of Sciences, Moulay Ismail University, BP11201, Zitoune, Meknes 50000, Morocco.

³Loukkos Hydraulic Basin Agency (ABHL), Al Massira Avenue BP 616, Tetouan, Morocco.

⁴Department Earth and Environmental Science, KU Leuven, Celestijnenlaan 200E, 3001 Heverlee, Belgium

Abstract: The Tamouda aquifer's hydrogeochemistry study involved collecting samples from ten sites. The results revealed high bicarbonates, calcium, and magnesium concentrations in the aquifer, likely sourced from the local limestone ridge. A geochemical speciation analysis showed a notable oversaturation of carbonated minerals in Tamouda's water. The groundwater quality was evaluated using indices like WQI and PI, with most wells exhibiting excellent to good water quality, indicating low pollution levels in the aquifer during the study period. The vulnerability assessment using the SINTACS method highlighted a marginally higher vulnerability in the western part of the aquifer compared to the eastern part, correlating with increased nitrate concentrations found in the western area. Future projections using the SINTACS method suggest an escalating vulnerability in the aquifer, especially in the western region, due to the shallowness of the groundwater there.

Keywords: Hydrogeochemistry - Groundwater quality - Tamouda aquifer - SINTACS method and Nitrate

Introduction

In semi-arid and arid regions, significant environmental issues are arising, primarily due to the degradation of groundwater quality, especially in coastal areas, as highlighted by (Bahir et al., 2020; Krimissa et al., 2004; Nkotagu, 1996). This situation is exacerbated by the overexploitation of aquifers and the intensification of their mineralization (Alabjah et al., 2018), thereby affecting aquatic ecosystems (Mirzavand et al., 2020). Various factors contribute to the deterioration of groundwater quality and the increase in its salinity, including intensive agricultural practices (Abdelkarim et al., 2022; Seif-Ennasr et al., 2016), tourism development (Abdelkarim et al., 2022), high population density (Calabrese & Tuthill, 1981), climate changes (Bahir et al., 2020; Carol et al., 2023; Mongbo et al., 2016), and the presence of Paleozoic seawater (Hansen et al., 2020).

In Morocco, water resources face growing pressures due to demographics, economic development, and a decrease in precipitation caused by climate change (Ez-zaouy et al., 2022). The hydrogeochemical study of the Tamouda aquifer aims at several specific objectives, which include the hydrogeochemical characterization of this water to prevent contaminations that could compromise the hydraulic potential of the aquifer and ensure a continuous supply of drinking water. The study of hydrogeochemical speciation can provide information about the origin of the waters, their path, interactions between water and rock, and the impacts of human activity. The evaluation of groundwater quality in this aquifer is conducted using quality assessment indices. Vulnerability maps subjectively represent the sub-surface's ability to safeguard groundwater resources. Studying groundwater vulnerability to pollution involves compiling data from various disciplines, such as terrain topography, geology, hydrology, hydrogeology, and climatology (Hmaidi et al., 2016).

1. Study area

The Tamouda Plain is located in the northwestern part of Morocco, within the Tanger-Tetouan-al Hoceima region. It stretches upstream from the Martil-Alila plain and is traversed by the watercourses of the Martil and Mhajrate wadis, which play an essential role in its water supply. This geographical area covers a total area of 16.40 km² (**Figure:1**).

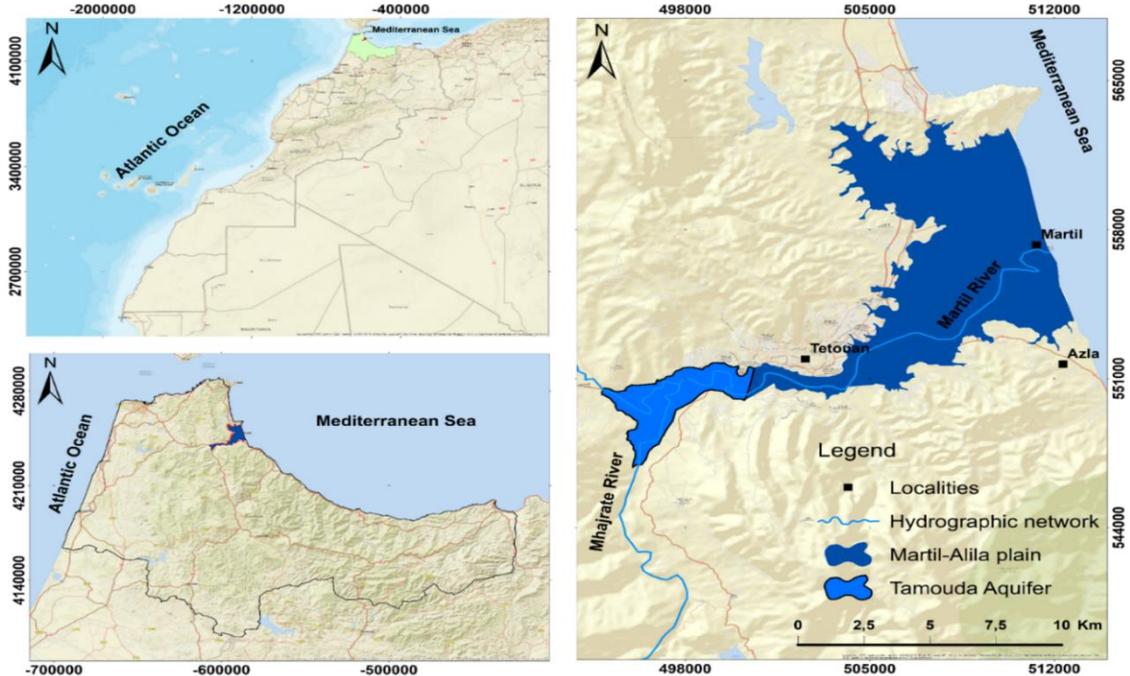


Figure 1. Geographic location of the Tamouda aquifer

2. Materiel et Methods

All samples were taken from different localities on the Martil and Mhajrate rivers. On the 22nd and 23rd of February 2023, our team embarked on a meticulous sampling mission, meticulously recording vital physical parameters. We gathered water samples using a methodically cleansed plastic bucket and pre-rinsed them with the water under investigation, ensuring the purity of the samples. These were then carefully decanted into one-litre plastic bottles, previously sterilized with acetic acid and distilled water, and securely sealed after labelling with detailed collection data. For microbiological analysis, we utilized sterilized glass bottles, maintaining the samples at a constant four °C in a cooler to preserve their integrity during transportation. Bacteriological examinations must be completed within eight hours of collection to ensure accuracy. Our approach for Trace Metal Elements (TME) analysis mirrored the procedure for physicochemical testing. SINTACS is an approach developed in which the seven selected factors are subdivided into intervals, which are, in turn, classified using a weighting system (ranging from 1 to 10), indicating the relative impact of the parameter on protecting groundwater quality. The acronym SINTACS comes from the Italian names of the factors used by this method.

A vulnerability index is then calculated using the following equation.

$$\text{The SINTACS index} = \sum_{i=1}^7 (Wf \cdot Sf)$$

With W: Weight of the factor (f) and S: Score of the factor (f)

The standard method is for the current impact, while the high method is for the future.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Based on the analysis of this diagram, a Piper diagram was used. As illustrated on the Piper diagram, the chemical composition of the waters of Tamouda reveals a predominance of calcic and magnesian bicarbonate facies. This suggests that the groundwater originates from the infiltration of rainwater into the limestone rocks of the limestone ridge region.

3.1 Calculation of the Water Quality Index (WQI)

The majority of the obtained results were favourable. Indeed, 40% of the samples exhibited excellent quality according to the Water Quality Index (WQI), while 60% displayed good quality (Figure 2b). This suggests that the waters of Tamouda are generally of good quality, with a significant proportion meeting the criteria for excellence.

3.2 Calculation of the Pollution Index (PI)

We observed highly encouraging results from the Pollution Index calculations. Indeed, all sampled wells exhibited a pollution index lower than 1, signifying excellent water quality (Figure 2a).

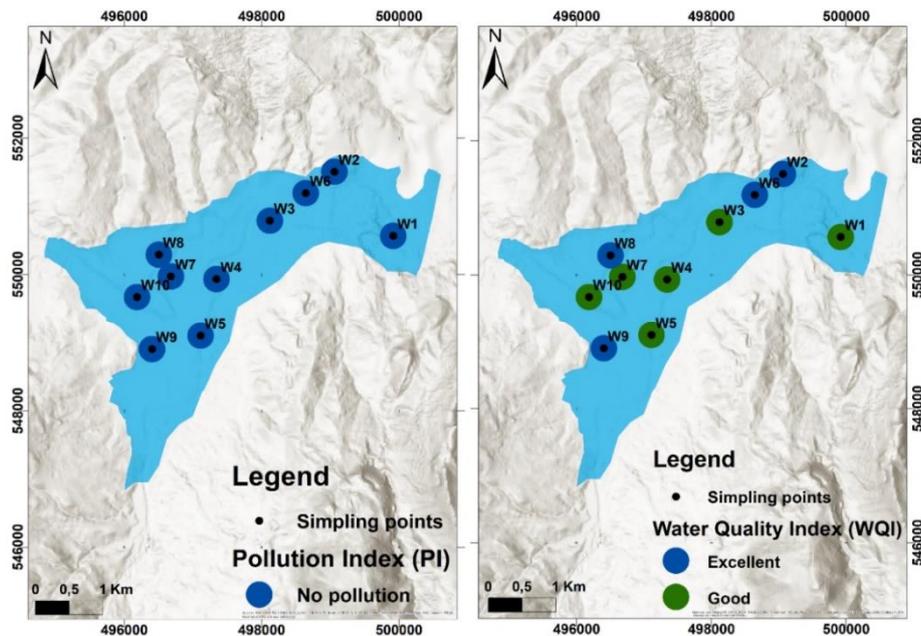


Figure 2. Maps of the spatial distribution of the PI and WQI

In the DRASTIC (Fig. 3a) and SINTACS (Fig. 3b) analyses, it was observed that vulnerability is moderate to moderately high in the western part, with an impact considered normal. A concordance is evident when comparing these conclusions with the results of the groundwater quality study (Fig. 3d). These results confirm that the area is not prone to pollution, as vulnerability is low to moderate. Conversely, vulnerability is moderately high in the western part (Fig. 3c), especially near the Mhajrate River, where the water level is closer to the surface. This area is strongly linked to agricultural activities. When comparing the results from the vulnerability modelling, it was noted that this area does indeed have high nitrate concentrations. This zone is anticipated to be even more exposed to future risks, which is supported by the high nitrate concentrations recorded in this area.

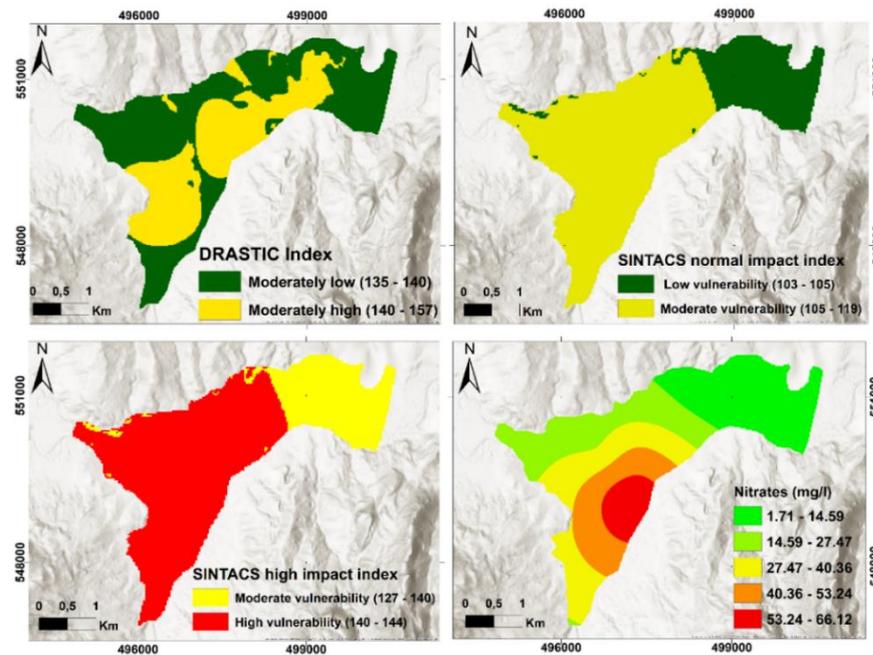


Figure 3. Comparative Map of DRASTIC, SINTACS, and Nitrate Methods

Conclusion

The hydrogeochemical characterization needed the collection of samples covering the study area, in situ measurements, and laboratory analyses. This analysis revealed that the aquifer is rich in bicarbonates, calcium, and magnesium. The quality assessment indicates excellent sound quality. The SINTACS module was used to assess the current and future situation. The results indicate that the current vulnerability is low in the eastern part and moderate in the western part. Similar results were obtained using DRASTIC and the nitrate spatial map. The SINTACS for the future scenario suggests that Tamouda, especially its western part, could experience high vulnerability due to the shallow water depth in this area.

Reference

- Abdelkarim, B., Telahigue, F., & Agoubi, B. (2022). Assessing and delineating groundwater recharge areas in coastal arid areas in southern Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development*, 18(March), 100760. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100760>
- Alabjah, B., Amraoui, F., Chibout, M., & Slimani, M. (2018). Assessment of saltwater contamination extent in the coastal aquifers of Chaouia (Morocco) using electric recognition. *Journal of Hydrology*, 566(September), 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.003>
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Ouazar, D., & El Moçayd, N. (2020). Climate change affects groundwater characteristics within semi-arid zones in western Morocco. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(March), 100380. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100380>
- Calabrese, E. J., & Tuthill, R. W. (1981). The influence of elevated sodium levels in drinking water on Massachusetts's elementary and high school students. *Science of the Total Environment*, 18(C), 117–133. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(81\)80054-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(81)80054-X)
- Carol, E., Galliari, M. J., Santucci, L., Nuñez, F., & Faleschini, M. (2023). Assessment of groundwater-driven dissolved nutrient inputs to coastal wetlands associated with marsh-coastal lagoons systems of the littoral of the outer Río de la Plata estuary. *Science of the Total Environment*, 885(April). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163942>
- Ez-zaouy, Y., Bouchaou, L., Saad, A., Hssaisoune, M., Brouziyne, Y., Dhiba, D., & Chehbouni, A. (2022). Morocco's coastal aquifers: Recent observations, evolution and perspectives towards sustainability. *Environmental Pollution*, 293(November 2021), 118498. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118498>
- Hansen, J. E., Stegger, M., Pedersen, K., Sieber, R. N., Larsen, J., Larsen, G., Lilje, B., Chriél, M., Andersen, P. S., & Larsen, A. R. (2020). Spread of LA-MRSA CC398 in Danish mink (Neovison vison) and mink farm workers. *Veterinary Microbiology*, 245(October 2019), 108705. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2020.108705>

Evaluation spatio-temporelle du risque des incendies de forêts dans la province de Taza (Maroc) de 1999 à 2020

HAMDACH Youssef

Laboratoire de Recomposition de l'Espace et Développement Durable, Université Chouaib Doukkali, Faculté des Lettres et des Sciences humaines, El Jadida, Maroc

hamdach.y@ucd.ac.ma

Résumé: L'objectif de cette étude est d'évaluer et de cartographier le risque d'incendies de forêt dans la province de Taza. Ce travail est basé sur la collecte des données des incendies durant la période 1999-2020. L'analyse statistique descriptive permet d'évaluer la variabilité temporelle de l'aléa feux de forêt. Quant à la cartographie du risque, elle utilise deux types d'indice : indice de risque fréquentiel (IRF) et indice de risque moyen annuel ou degré de gravité (RMA). Les résultats de cette recherche ont montré que des écarts sont importants entre les années aussi bien en termes de superficies touchées que du nombre d'incendies. Les forêts de la province de Taza sont exposées au risque des feux de forêt toute l'année, mais leur ampleur augmente durant la saison sèche. Sur le plan spatial, cette étude a permis l'établissement de la carte du risque d'incendie de forêt à l'échelle des communes de la province. L'emploi des indices IFR et RMA à l'échelle des communes, mesurant respectivement la fréquence et la superficie des incendies montrent des nuances spatiales. On note surtout un niveau de fréquence extrêmement élevé dans les communes du sud (Maghrawa, Bouchfaâ, Smiaâ, Bab Marzouka).

Mots clés : risque, incendies de forêt, indice de risque fréquentiel, indice de risque moyen annuel, Taza, Maroc

Abstract: Spatio-temporal assessment of forest fire risk in the province of Taza, Morocco (1999 to 2020)

The objective of this study is to evaluate and mapping the risk of forest fires in the province of Taza. This work is based on the collection of fire data during the period 1999-2020. Descriptive statistical analysis makes it possible to evaluate the temporal variability of the forest fires hazard. As for risk mapping, it uses two types of indexes: the risk frequential (IRF) and the medium risk annual or degree of severity (RMA). The results of this research showed that there are significant differences between years both in terms of areas affected and the number of fires. The forests of Taza province are exposed to the risk of forest fires all year round, but their magnitude increases during the dry season. spatially, this study has helped map the forest fire risk to the scale of the communes in the province. The use of the IRF and RMA indices at the commune's scale, respectively measuring the frequency and area of fires, shows spatial nuances. We especially note an extremely high frequency level in the southern municipalities (Maghrawa, Bouchfaâ, Smiaâ, Bab Marzouka).

Key words: Risk, forest fire, risk frequential, medium risk annual, Taza, Morocco

Introduction

Comme l'a évoqué Lampin-Maillet (2009), l'incendie de forêt est considéré traditionnellement comme un risque et une catastrophe naturelle. Son impact sur le territoire est majeur. Bien que considéré habituellement comme un risque naturel, il est au contraire largement conditionné par des facteurs anthropiques.

Au cours des dernières décennies, les incendies de forêt ont considérablement augmenté sur différentes régions du monde (Pitman et al., 2007). Ils affectent de vastes surfaces de paysages naturels et artificiels à l'échelle locale, régionale et mondiale ; car, ils brûlent le couvert forestier (Prosperi et al., 2020), perturbent l'intégrité des structures écologiques forestières et leurs équilibres (Chuvienco et al., 2020).

Le phénomène des incendies de forêts concerne l'ensemble des pays méditerranéens comme l'ont montré divers travaux (Métailie, 1981 ; Velez, 1999 ; Martinez et al., 2004 ; Lampin-Maillet, 2009 ; Hamdach, 2015 ; Lakhouaja, 2016). Ils montrent que chaque année des milliers d'hectares d'espaces forestiers sont détruits par le feu volontairement ou accidentellement. La superficie parcourue par les incendies varie selon les pays et les années, suivant divers facteurs, plus particulièrement en fonction des conditions météorologiques et des facteurs anthropiques.

Au Maroc le phénomène des incendies de forêts est devenu un fléau grandissant où l'on enregistre 16213 incendies avec une moyenne de 280 incendies par an, durant la période 1960-2017, parcourant près 174220 ha, avec une moyenne de 3004 ha par an (Hamdach et Hanchane., 2019). A l'instar des autres provinces du Maroc, la province de Taza sont plus vulnérables aux feux. Ceci est dû au fait qu'elles sont caractérisées par une forte densité du couvert végétal, par la présence d'un tapis herbacé développé et par une présence humaine importante.

La province de Taza est localisée au Nord-est du Maroc (Fig. 1). Elle compte le nombre de communes le plus élevé du Maroc (soit 35). C'est une des régions les plus boisées (30 % de taux de boisement) (Fig. 2). Cette superficie chevauche sur trois grands ensembles géomorphologiques : le Prérif au Nord, les plateaux de Guercif à l'est et le Moyen Atlas au sud. Le territoire de la Province est entièrement soumis à des bioclimats diversifiés, subhumide à hiver tempéré autour de Taza et Bab Azhar, humide à hiver frais à Tazekka et à hiver froid à Bab Boudir, et semi-aride à Maghraoua.

Cette étude est une contribution à l'étude du phénomène d'incendies de forêts dans la province de Taza. Elle vise à élaborer des cartes de risque pour mettre en évidence des « secteurs sensibles », peut s'avérer d'un apport appréciable en matière d'aide à la décision pour les gestionnaires des forêts.

1. Données et méthodes

La collecte des données représente la phase initiale de tout travail sur le risque des incendies de forêt. A cet effet, les données statistiques utilisées dans ce travail sont les données d'identification du feu (date d'incendie et superficie incendiée selon les communes de la province de Taza durant la période 1999-2020). Ces données proviennent essentiellement de D.E.F.L.C.D de Taza.

La méthode suivie se base sur l'analyse statistique descriptive de l'histoire des incendies au niveau de la province de Taza sur 22 ans (1999 – 2020). Cette méthode permet de décrire la variabilité temporelle de l'aléa des feux de forêt. Quant à la cartographie du risque, la méthode utilisée est basée sur deux types d'indice : indice de risque fréquentiel (IRF) et indice de risque moyen annuel ou degré de gravité (RMA).

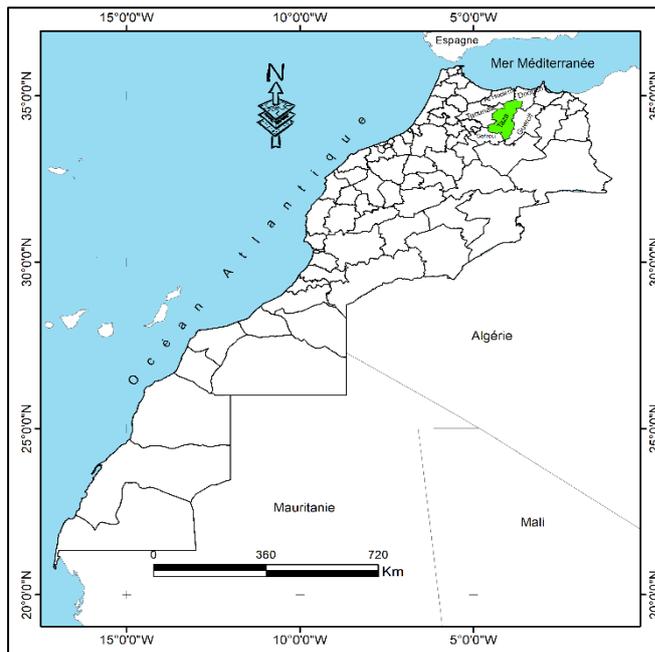


Figure 1. Carte de situation géographique de la province de Taza au Maroc

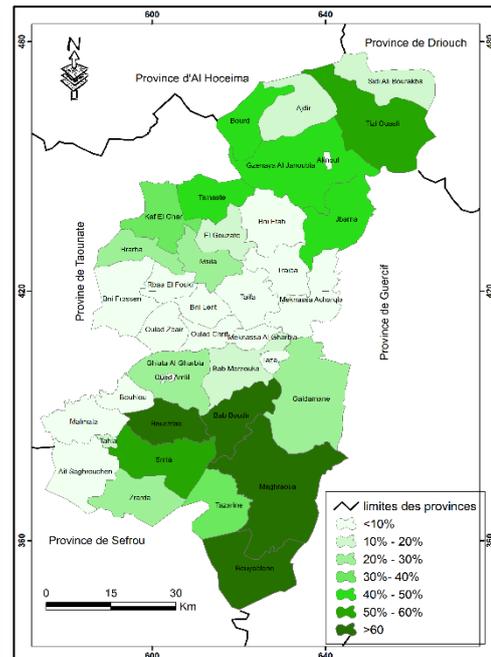


Figure 2. Taux de boisement des communes de la Province de Taza

1.1. Indice de risque fréquentiel (IRF)

La fréquence des incendies pour un lieu donné sera calculée à partir du nombre d'incendies produit chaque année, période habituellement employée en statistique. Elle est déterminée en fonction du nombre d'incendies répertoriés durant une période d'observation donnée (Velez, 1999). L'indice de risque fréquentiel d'incendie sera donc :

$$F_i = \frac{1}{a} \sum_1^a n_i$$

F_i = fréquence des incendies ; *n_i* = nombre d'incendies par an ; *a* = nombre d'années

Pour évaluer le degré de risque d'incendie, on utilise certaines classes de fréquence annuelle des incendies de forêts (Meddour-Sahar. et Derridj, 2010) : *très faible* = TRF <1 ; *faible* = 1 > IRF < 2 ; *moyen* = 2 > IRF < 4 ; *élevé* = 5 > IRF < 10 ; *très élevé* = 11 > IRF < 20 ; *Extrêmement élevé* = IRF > 20

1.1. Risque moyen annuel ou degré de gravité (RMA)

Pour mesurer le degré de gravité des incendies en région méditerranéenne, il est d'usage d'utiliser le risque moyen annuel (RMA), (Peyre S. , 2001). Il est exprimé en pourcentage de la surface boisée brûlée en moyenne chaque année par rapport à la superficie forestière totale du massif considéré. Cet indice est donc défini comme étant la probabilité pour qu'une parcelle boisée soit incendiée au cours de l'année considérée, exprimée en pour cent par la formule suivante (Meddour-Sahar O et Derridj A., 2010) :

$$RMA = \frac{SMA}{SCM} \times 100$$

SMA = la surface moyenne incendiée par an (ha) ; *SCM* = la surface totale du massif forestier (ha).

Extrêmement faible= $RMA < 0,25$; **très faible** = $0,25 > RMA < 0,5$; **faible**= $0,5 > RMA < 1$; **moyen**= $1 > RMA < 2$; **élevé**= $2 > RMA < 4$; **très élevé**= $4 > RMA < 8$; **Extrêmement élevé** = $RMA > 8$

2. Evaluation temporelle des incendies de forêts dans la province de Taza (1999 - 2020)

L'étude historique des incendies dans la Province de Taza entre 1999 et 2020 montre que les incendies sont faibles qualitativement et quantitativement en comparaison avec d'autres régions du pourtour méditerranéen (Gouiran, 1999 ; Martinez et al, 2004). En effet, n'ont touché que 1657 ha, avec une moyenne de 27 ha par an. Le maximum a été enregistré durant l'année 2004 (253 ha) et le minimum en 2018 (5,8 ha). Quant au nombre des incendies durant cette période, il est de 422 avec une moyenne de 19,18 incendies par an, un maximum durant l'année 2004 (31 incendies) et un minimum en 2002, soit 8 incendies (Fig. 3).

Il est à noter que des écarts sont importants entre les années aussi bien en termes de superficies touchées que de nombre d'incendies : l'écart type atteint 7,29 pour le nombre des incendies et 73,20ha pour les superficies incendiées. Cette variabilité dépend de plusieurs facteurs qui restent pour le moment très peu maîtrisés (Hamdach et al. 2011 ; Ezzine et al., 2005; Zitan, 1987).

Le risque des incendies dans les forêts de la province de Taza est potentiellement présent durant toute l'année mais il est plus fort pendant la saison sèche (juin, juillet, août, septembre). On effet, on a enregistré 218 incendies soit 67 %, sur une superficie de 940 ha qui représente 81% de la superficie totale (Fig. 4).

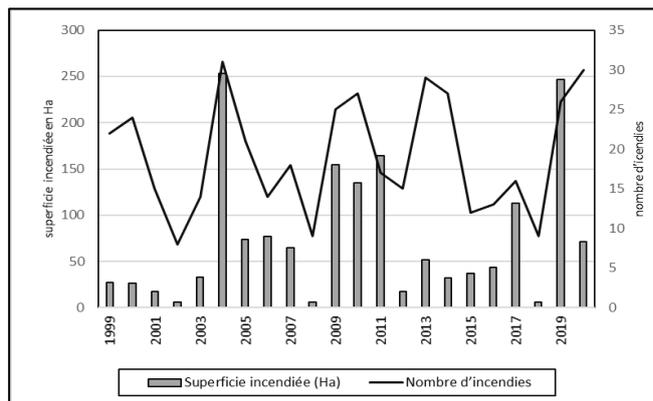


Figure 3 : Evolution annuelle des incendies de forêts dans la Province de Taza pour la période 1999 -2020.

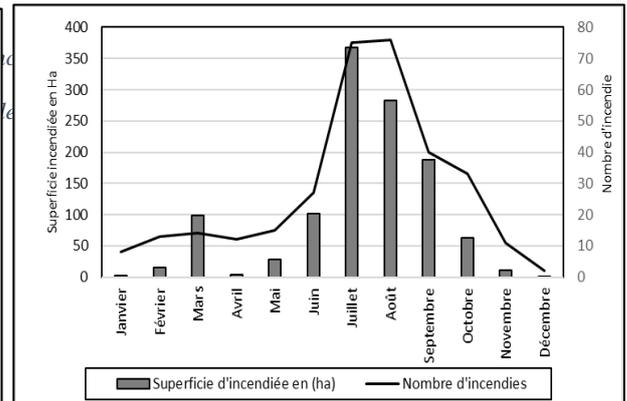


Figure 4 : Evolution mensuelle des incendies de forêts dans la Province de Taza pour la période 1999 -2020.

3. Evaluation cartographique du risque d'incendie à l'échelle des communes (1999-2020)

3.1. Indice de risque fréquentiel (IRF)

Il ressort de la carte (Fig. 5) que 30 communes présentent un risque d'incendie Très faible (<1 feu en moyenne par an) (soit 86% des Communes de la Province) ; 3 autres communes, un risque faible (1-2 feu par an), et deux communes présentent un risque d'incendie Moyen, correspondant à 2 -4 feux en moyenne annuelle.

Paradoxalement, certaines communes pourtant faiblement boisées, telles que Matmata (662 ha), connaissent un nombre important de départs de feux, que Zrarda (5216 ha de la surface boisé), ne connaît qu'un seul incendie durant la période d'étude et Gueldamane (7604 ha) connaît 5 incendies. Enfin, aucune Commune ne présente les degrés de risque élevé, ou très élevé, ou même extrêmement élevé.

3.2. Risque moyen annuel ou degré de gravité (RMA)

À la lecture du carte (Fig. 6), il ressort que les risques faible, très faible ou extrêmement faible concernent un ensemble de 29 communes (soit 83% des Communes du Province), et une seule commune présente un risque d'incendie Moyen, correspondant à 1 -2. Les 5 autres communes présentent des risques élevé et très élevé, ce sont les communes de Smia et Matmata qui sont classées avec un degré de gravité « élevé » ($2 > RMA < 4$ %) et les communes de Bab Marzouka, de Oulad zbair et de Tahla et qui est classée avec un degré de risque très élevé ($4 > RMA < 8$ %).

Il convient de rappeler que, pour la période étudiée (1999-2020), le degré de gravité du feu pour l'ensemble de la Province est d'environ 0,91 % « risque faible ».

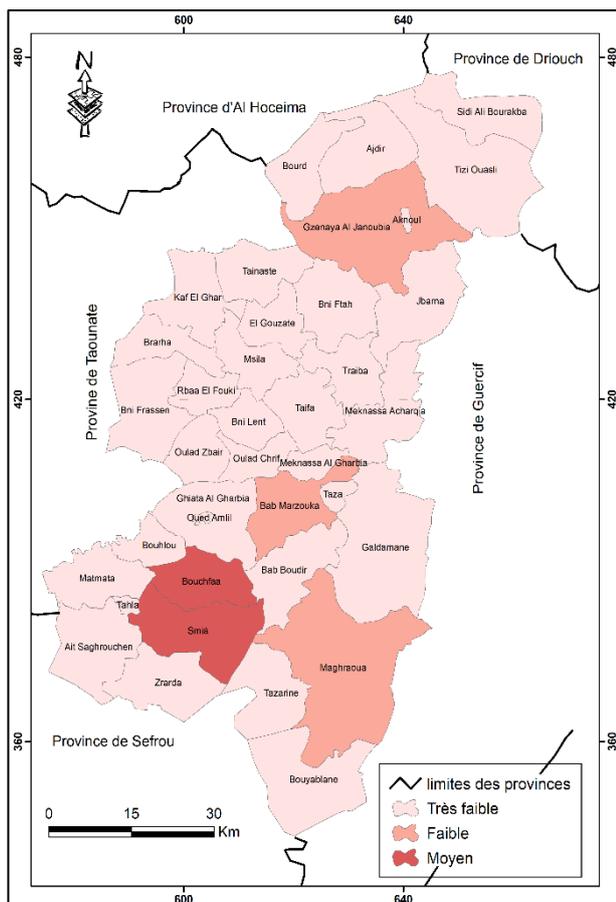


Figure 5 : Indice de risque fréquentiel à travers les communes de la province de Taza (1999-2020)

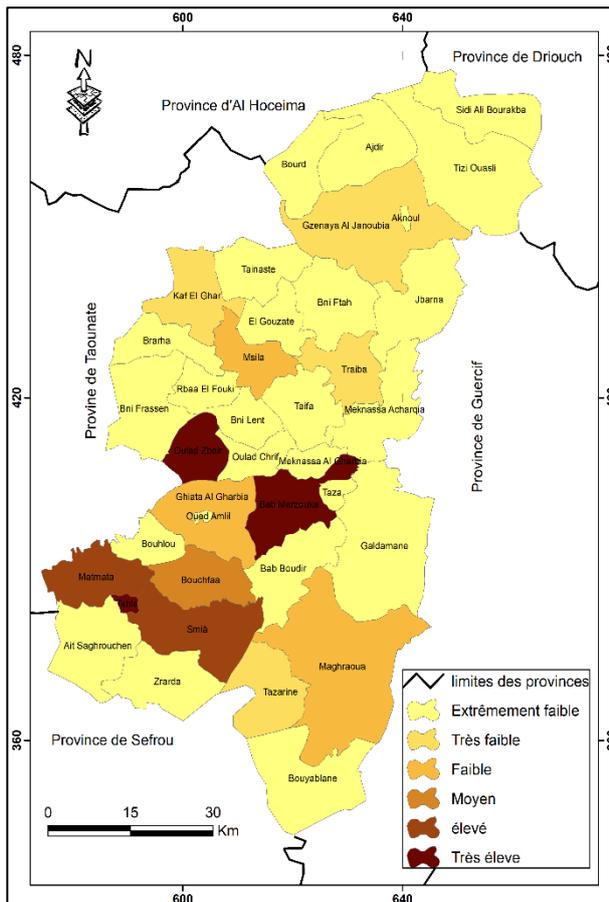


Figure 6 : Indice de risque moyen annuel à travers les communes de la province de Taza (1999-2020)

Conclusion

L'évolution des incendies de forêt dans la province de Taza enregistrés au cours de la période 1999 – 2020, montre une augmentation significative de leur fréquence même si leur intensité reste faible. L'emploi des indices IFR et RMA à l'échelle provinciale, mesurant respectivement la fréquence et la superficie des incendies montrent des nuances spatiales. On note surtout un niveau de RMA très élevé dans les communes de la partie méridionale, comparées à celles du nord.

Deux éléments fondamentaux semblent intervenir en l'occurrence. D'une part, l'accroissement de la population entraînant une pression accrue sur les terres forestières, due à la demande de terres de culture et de pâturage dans certaines régions et d'espaces de loisirs dans

d'autres. D'autre part, les fluctuations climatiques donnent lieu à de longues périodes de sécheresse, qui accroissent et étendent dans le temps et dans l'espace le danger d'incendie,

Bibliographie

- Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M., Oliva, P., 2020.** Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management. *Curr. For. Rep.* 6, 81–96.
- Ezzine H. ; Saidi M. ; Casanova J. L. ; Montes A. ; Ghribe A., 2005.** Conception et mise en place d'un système à base de données NOAA-AVHRR, pour la prévention et le suivi des incendies de forêts au Maroc. *Geo Observateur* N° 14, pp. 35-48
- Gouiran M., 1999.** Bilan des dégâts causés par les incendies de forêts dans les pays riverains de la méditerranée (1981-1997) : pour la création d'un système d'information sur les incendies de forêts. Atelier "Les bases de données sur les feux de forêts en région méditerranéenne, utilisations et enseignements", 27 avril – 1er mai 1999, Tétouan, Maroc, pp 157 – 176
- Hamdach Y. ; Laouane M. et Amyay M., 2011.** Les incendies de forêt : genèse et impacts sur la végétation dans la forêt de Bab Azhar, série d'oued Rmila, Moyen Atlas septentrional. *Geomagrib* n° 7, 2011, pp 57-72.
- Hamdach Y. et Hanchane M., 2019.** Risque d'incendies de forêt au Maroc : Evaluation cartographique et stratégies de prévention. Livre collectif, Actes du Colloque International : Mutation socio-spatiales dans les montagnes rifaines (Maroc) et leurs impacts sur le patrimoine forestier, faculté des LSH Dhar el Mahraz Fès, pp 27-54.
- Hamdach Y., 2015.** Les incendies de forêts : genèse et impacts environnementaux et socio-économiques dans le moyen atlas septentrional, Maroc : cas des forêts de Bab Azhar et de Chikker. Thèse présentée pour l'obtention de doctorat en Géographie et Aménagement. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Faculté des Lettres et sciences Humaines Sais Fès. 190 pages.
- Lakhouaja H., 2016.** SIG, Télédétection et modélisation du risque d'incendie de forêts dans la province de Chefchaouen. Thèse présentée pour l'obtention de doctorat en Géographie. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Faculté des Lettres et sciences Humaines Sais Fès.
- Lampin-Maillet C., 2009.** Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie : Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France. Thèse de doctorat, Université de Provence – Aix-Marseille I, U.F.R. des sciences géographiques et de l'aménagement, 395 pages.
- Martinez J. et Pilar Martin P., 2004.** Los incendios forestales en en España. Analisis de incidencias y causalidad. Nuevas tecnologías para la estimacion del riesgo de incendios forestales. Coleccion de estudios ambientales y socioeconomicos. Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, PP. 11- 22
- Meddour-Sahar O. et Derriji A. 2010.** Le risque d'incendie de forêt : évaluation et cartographie. Le Cas de la Wilaya de Tizi Ouzzou, Algérie (période 1986-2005). *Rev. Sécheresse*, Vol. 21, N° 3, pp. 187 – 195
- Peyre S. 2001.** L'incendie désastre ou opportunité ? l'exemple des Pyrénées Orientales. *Forêt Méditerranéen* ; 20 : 194-9
- Pitman, A.J., Narisma, G.T., McAneney, J., 2007.** The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia. *Clim. Change* 84, 383–401
- Prosperi, P., Bloise, M., Tubiello, F.N., Conchedda, G., Rossi, S., Boschetti, L., Salvatore, M., Bernoux, M., 2020.** New estimates of greenhouse gas emissions from biomass burning and peat fires using MODIS Collection 6 burned areas. *Clim. Change* 161, 415–432.
- Velez R., 1999.** Protection contre les incendies de forêt : principes et méthodes d'action. Options Méditerranéennes, Série B : études et Recherches, n ° 26. Zaragoza : IAMZ, 118 pages.
- Zitan A., 1987.** Les feux de forêt au Maroc » *Revue de géographie du Maroc*, Vol.II, Nouvelle série, N°1.

Axe 4 : Gestion et stratégies de réhabilitation et de prévention

Land degradation by salinity in semi-arid areas - case of the irrigated perimeter of Tadla, sector of Beni Amir

Najat AKHAL

Laboratory: Territory, Environment, and Development, Ibn Tofail University/ Kenitra, Morocco

najatakhal2020@gmail.com

Abstract : Land degradation is a phenomenon that affects the majority of the countries in the world, and in particular the countries in the arid and semi-arid zones. In general, this problem stems from several causes, including the extensive use of fertilizers. In Morocco, since the equipment and commissioning of irrigated perimeters, the area of agricultural land affected by salinity continues to increase, about 16% of irrigated land was affected by salinization. (Badraoui,2003) The irrigated perimeter of Tadla is one of the most affected perimeters of Morocco by soil salinization, thus the monitoring of soil salinity in the perimeter is necessary to guarantee the sustainability of production systems. This article is devoted to identify and define the causes of the spatiotemporal variability of soil salinity at the scale of the irrigated perimeter of Tadla and to assess the risks of its salinization, because the soil is considered as an interface in the environment and a resource for development in general, particularly, the soil is considered as a vital resource that is difficult and slowly to be renewed, given the fact of human activities and the current poor relations between soils and human societies, soils are subject to various forms of degradation and contamination that are most often irreversible.

Key words: land deterioration, salinity, semi-arid zones, irrigated perimeter of Tadla .

Résumé :La détérioration des terres est un phénomène qui touche la majorité des pays du monde surtout ceux qui se trouvent dans les zones arides et semi arides , en général, ce problème est dû à plusieurs causes parmi lesquelles on peut citer la désertification qui désigne :la dégradation ou la perte des capacités productives des terres dans les milieux arides, semi-arides et subhumides secs suite à une combinaison de plusieurs facteurs parmi lesquels les variations (changements) climatiques et les activités humaines.

Les manifestations de ce fléau se traduisent globalement et d'une façon concrète dans la salinité des sols, le rabattement des nappes et le recul de la biodiversité, ce qui impacte le rendement des cultures dans les périmètres irrigués, des zones à fort potentiel agricole.

L'objectif de cette communication¹¹ intitulée '*La détérioration des terres dans les zones semi arides, cas du périmètre irrigué de Tadla*'- est d'exposer les différentes formes de cette dégradation, ses causes et ses incidences dans le périmètre irrigué de Tadla.

Pour répondre à cette problématique nous avons décidé d'appliquer une méthodologie qui se base sur l'étude territoriale (questionnaire), l'analyse des sols au sein de laboratoires spécialisés dans le domaine de l'agriculture pour monter les résidus des pesticides au niveau du sol ainsi que l'usage de l'ARGIS afin de représenter les cartes de la salinité et des matières organiques dans le sol.

Mots clés : détérioration des terres, désertification, zones arides, zones semi arides, périmètre irrigué de Tadla.

¹¹Cette communication s'inscrit dans le cadre de l'axe n°4 : "Détérioration des terres et désertifications dans les zones arides et semi arides".

Introduction

Soil salinity is present in most of the world's major irrigation systems due to the combined effect of poor quality irrigation water, aridity and inadequate drainage of the soil and aquifers. Salinisation appears to be the consequence of various complex salt redistribution processes linked to the hydrological functioning of the environment under the influence of irrigation and drainage. Generally, salinization is considered a form of soil degradation and a process that leads to an excessive increase in soluble salts in the soil. Accumulated salts include sodium, potassium, magnesium, and calcium, as well as chloride, sulfate, carbonate, and bicarbonate, it poses a serious threat to the sustainability of land use systems. The overall extent of soils affected by primary salinization worldwide is approximately 955 million hectares, while secondary salinization affects nearly 77 million hectares, with 58% in irrigated areas, approximately 20% of all irrigated land is affected by salts (BADRAOUI, 2006, p 1), and this proportion tends to increase despite considerable efforts devoted to land rehabilitation.

1- STUDY AREA

The Tadla area is a vast plain located 200 km south-east of Casablanca, covering 320,000 ha. The relief is generally regular, with an average altitude of 400 m and a slope varying from 1 to 3 per thousand (AGHZAR et al, 2002, p 463). The plain is 125 km long and 40 km wide, forming a vast depression:

- To the north by the phosphate plateau (edge of the Oued Zem Cretaceous plateau).
- To the south by the Middle Atlas range, between two provinces (Béni Mellal and Azilal).
- To the east, it narrows between the Oued Zem plateau and the Atlas mountains.
- To the west, the Oued El Abid forms the regional boundary with Bahira (Province of Kalaa Srahna).

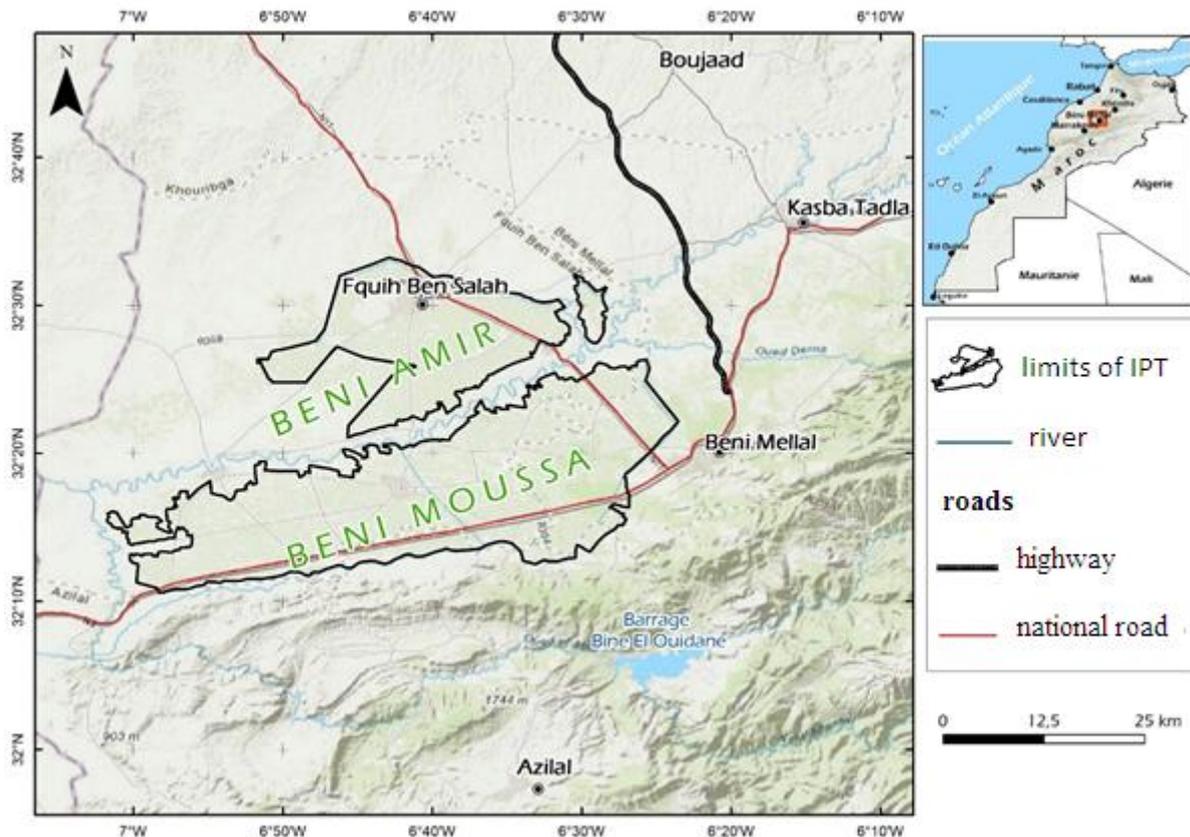


Figure 1: map of irrigated perimeter of TADLA

2- ISSUES, OBJECTIVES AND METHODOLOGY

2-1 Issues

The purpose of this paper, entitled 'Land Deterioration by salinity in Semi-Arid Zones', Case of the Irrigated Perimeter of Tadla' is to describe the various forms of land degradation, their causes, and their impact on the irrigated perimeter of Tadla.

2-2 Objectives

We have decided to tackle this subject to raise awareness of the need to protect soil from pollution and degradation - among individuals and communities - in order to preserve them to meet current and future needs. In order to address this issue, we propose to divide it into three main points:

- Evolution of average of soil salinity in the sector of BA
- Causes of the scarcity of soil salinity in the sector of BA
- Consequences of salinity
- Tips for rationalising the use of groundwater with the challenge of climate change in the Tadla irrigated perimeter.

2-3 Methodology

To deal with and analyze this problem, we will apply a scientific methodology based on territorial study (surveys), relying on sampling (simple probabilistic method). So, we will complete 660 surveys among farmers in the irrigated perimeter of Tadla. To process and represent the collected data in graphs using software such as SPSS and Excel.

3- RESULTS AND DISCUSSION

3.1- Evolution of average of soil salinity in the BA sector

From the figures above we have revealed that the average of salinity within the BA sector increases at a precipitous rate from year to year as shown in figure 3, as it reaches 6.5 dS/m in the year 2017 averaging only 2.5 between 2016 and 2017, this leads to an environmental disaster in this sector as the environment becomes threatened rather than agriculture.

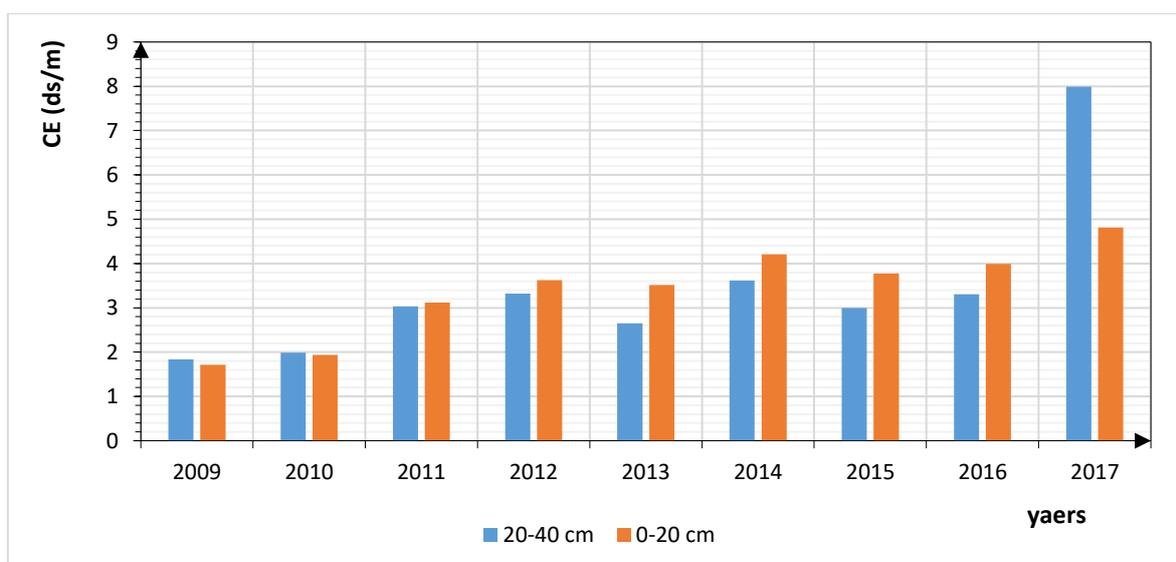


Figure 2: evolution of average of soil salinity in the sector of BA

Source: ORMVAT (adapted and corrected)

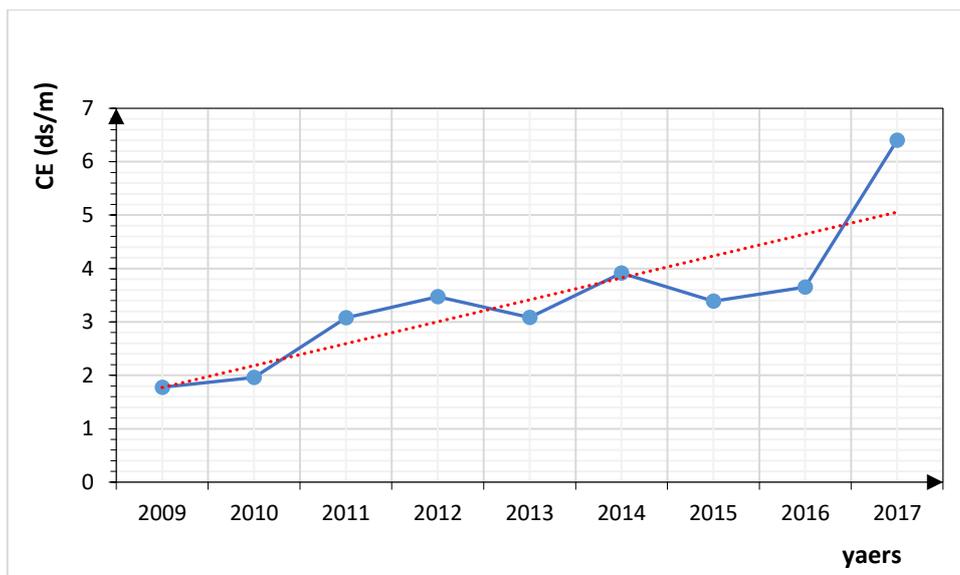


Figure 3 : Evolution of soil salinity in the of BA from 2009 to 2017

Source: ORMVAT (adapted and corrected)

Occasionally, analyses carried out by ORMVAT illustrate that certain removal points, either at the first level (0-20 cm) or the second level (20-40 cm), record threatening levels, sometimes exceeding 25 dS/m (point 50703 in 2017) and sometimes reaching approximately 50 dS/m (point 50702 in 2017); the excessive use of fertilisers, and the use of the waters of Oued Oum Er Rbia as a source of irrigation, the latter being characterised by its intense salinity.

The sector of Beni Amir recorded the highest level of salinity, primarily due to the use of overly saline water from the Oued Oum Er Rbia, since this causes soil salinity, but the thing that makes this phenomenon worse is the use of different types of fertiliser at random, so that the majority of farmers in this perimeter do not carry out soil analyses, this major proportion amounting to 77% as shown in figure 4, but a very small proportion of them do carry out analyses (23%).

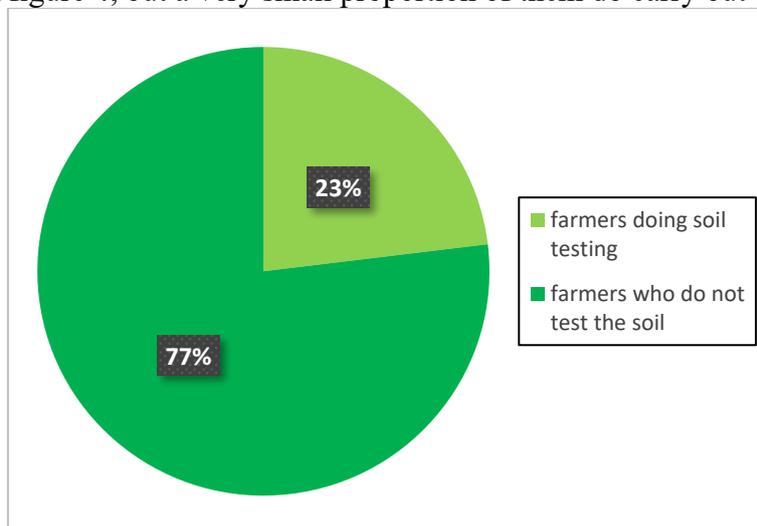


Figure 4: Carrying out soil analyses according to farmers in the sector of Beni Amir

Source : Fieldwork 2018

The increase in salinity is generally due to the use of highly saline water for irrigation, either groundwater or surface water from the Oum Er Rbia, and also the use of fertilisers. This was assured and confirmed by the analyses we carried out on different crops (alfalfa, beetroot, wheat, vegetables, silage maize, etc.) and also crops irrigated by gravity and others with localised irrigation (drop by drop) and also Bour crops (wheat) to detect the main causes of soil salinity.

Based on many analyses, we found that salinity differs according to the type of crop, the source of irrigation water and the use of fertilisers. On Bour (wheat) farms, salinity remains very low compared with other farms growing irrigated crops, because the farmers use neither fertilisers nor saline water, so the sources of soil salinity are fertilisers and saline irrigation water (either underground or surface), It has also been found that soil salinity differs in irrigated farms, depending on the type of crop sown and the method of irrigation. In farms using localised irrigation, soil salinity is much higher than in gravity irrigation, because water-soluble salts and salts in fertilisers accumulate in the upper part of the soil.

Table 1: danger of salinity according to the samples taken

| N° of sample | nature of the culture | Irrigation method | the type of texture | Degree of salinity |
|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| S1 | Beetroot | Drop by drop | Silty-clay-sandy | High |
| S2 | Cereal | Gravity | sandy-clay | Adequate |
| S3 | Lucernes | Gravity | sandy-clay | Low |
| S4 | Beetroot | Gravity | Limono-argilo | Adequate |
| S5 | olive tree | Gravity | Limono-argilo | Low |
| S6 | Cereal | Bour | Clay | Low |
| S7 | Silage maize | Gravity | Clay | Adequate |

Source : analyses performed in the lab MAG

From this table -which summarizes the results of the samples we made- we found that the use of fertilizers and the way of irrigation play a very interesting role in the salinity of the soils, As long as the farmer uses fertilizers and irrigation located simultaneously, soil salinity increases, soil type and water also contribute to this phenomenon but in a limited way.

3.2. Causes of the scarcity of soil salinity in the sector of BA

In general, the irrigated area of BA is among the most sensitive to salinization, because there are so many factors that stimulate the increase of soil salinity at this perimeter one can mention the most important:

- Rainfall and evapotranspiration in the area: Like many countries in the Mediterranean region, Morocco suffers from the aridity of its climate. This last influence on the phenomenon of soil salinization, at this perimeter, the climate is characterized by aridity, the latter manifests itself in the scarcity and irregularity of precipitation in time and space, and the increase in temperature during most months of the year, this causes the rate of evaporation (2000 and 3000 ml/ year) and evatranspiration (1500 mm/ year) which leads to a salinization of the soil by the accumulation of salts at ground level.

- slope: the perimeter of Tadla is located in a plain, which is synonymous with very low topography. While the lower the slope of the land, the lower the natural drainage of the water and therefore the risk of soil salinization increases.

- soil (soil texture): The soil texture has a considerable impact on soil salinization, the finer texture, it the more promotes the accumulation of salts in the soil. So the evaluation of the influence of texture in the risk of salinization soils in the perimeter is very important . In fact, the salinity level of the soil in the Béni Amir area is higher, So we can conclude that the difference in soil salinity is not only explained by the presence of texture at risk of high soil salinization but also it can be partly due to other factors such as cultivation techniques, land cover, irrigation methods.... but the soil texture plays a very interesting role in the accumulation of salts in the soil, the finer soil, is the more promotes the accumulation of salts.

- Geological nature: the nature of geology is one of the factors that can influence the salinity of soils in a given area, within the irrigated sector of BA, we concluded that geology does not have a strong influence on the salt content of soils in the irrigated area of Tadla, Nevertheless, geology has an indirect influence on soil salinization. Indeed, the high salt load of the water of

Oued Oum Er Rbia is caused by the geological nature in the mountainous area upstream of the perimeter.

- Fertilizer use: from upstream to downstream hydraulic, we noticed that the hydraulic downstream of Béni Amir had a high level of salinity and gave as an explanation the use of groundwater and the recycling of drainage water, because farmers use fertilizers on a random basis, and they do not know the needs of each type of plant. (Figure below)

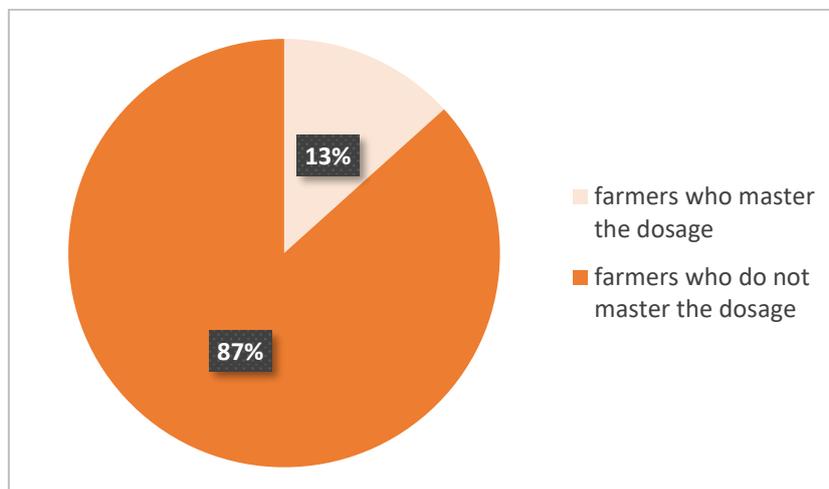


Figure 5 : farmers' knowledge of fertiliser requirements for each type of plant the sector of BA

Source: Fieldwork 2018

3.3. Consequences of salinity

- Effect on soil structure
- Effect on plants

Salinisation is a serious environmental problem, reducing agricultural production and making land unsuitable for cultivation. It is one of the most widespread soil degradation processes on Earth. Salinisation induces desertification effects, such as loss of soil fertility, destruction of soil structure, soil compaction, which causes the impermeability of deep soil layers and the formation of a soil crust. The addition of salts to the soil profile can lead to changes in the composition of the exchange complex: an increase in the proportion of exchangeable sodium on the adsorbent complex, as sodium salts are the most soluble salts in nature. Soils affected by salinity often exist in arid and semi-arid climates, but they can also be found in regions where the climate and the mobility of salts lead to salinity in water and soil over short periods of time. (BENMAZHAR, 2012, p 28)

Plants in a soil containing a significant content of soluble salts, can accumulate in their tissues considerable amounts of mineral salts up to 50% of the dry matter. But when the accumulation of these salts becomes strong, it causes physiological threats to ecosystems, salt disrupts plant development by limiting nutrient uptake and reducing water quality available to plants. However, the consequences of salts on vegetation correspond to a decrease in size and density, in relation to the increase in salinity of soils and aquifers.

The excess of salts in the soil generally results in adverse effects on crops by hindering the normal development of the plant. The presence of salts has the following effects:

Thirst effect: salinity decreases the availability of water for the plant by increasing the osmotic pressure of the soil solution, thus opposing the absorption of water (water stress).

-Hunger effect: in a saline soil, there are disturbances in the nutritional regime of the plant, following a reduction in the solubility of certain ions that control the concentrations of nutrients in the soil (nutrient stress).

-Toxicity: the excess in a given chemical species (sodium, chlorides etc.) is manifested by an unbalanced absorption of ions that could lead to poisoning of the plant.

Conclusion

At IP of Tadla, excessive use of salt-rich water for irrigation coupled with uncontrolled drainage leads to salinization and sodification of soils. Indeed, in the irrigated area of Tadla, the phenomena of salinity and sodicity have increased and constitute a risk of deterioration of soil quality and profoundly affect agricultural yields. In general, the salinity of Tadla soils varies in a very wide range from 0.1 dS/m to 24.6 dS/m, with generally high salinity for the upper horizons.

Generally the most common causes are: the use of salt-rich irrigation water, Insufficient drainage and an unbalanced irrigation system, Misuse of fertilizers, the low slope, Fine and very fine clay soil texture, low rainfall, Heatwave temperature during most months of the year, this stimulates evaporation and evapotranspiration...

We concluded that so many soil salinity stimulants are found at the irrigated perimeter of Tadla and thanks to which salts accumulate on the surface of soils.

BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

- BADRAOUI M., AGBANI M. & SOUDI B,(2000), Evolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat , Maroc
- BADRAOUI M. (2006). Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc.
- BENDRA B ; (2005), Etude de l'impact de la pollution agricole diffuse sur la qualité du sol de la plaine des Triffa, Thèse de 3ème cycle, Université Mohammed I Fac. Sc. Dpt. Bio.UFR-DESA
- BENMAZHAR.H, 2012, Etude de l'effet du fumier de bovin sur les propriétés physico-chimiques, la fertilité et dans la réduction de la salinité des sols sableux irrigués avec des eaux salines, Mémoire de Stage de Fin d'Etudes, Master Sciences et Techniques Eau et Environnement, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences et Techniques Marrakech

Risques, vulnérabilité, résilience et durabilité urbaine : le cas du littoral de Dar Bouazza au Sud de Casablanca (Maroc)

A. AMRANI¹, M. MOUHIDDINE¹, B. ENNASSIRI E¹ :

1. Faculté des lettres et des Sciences Humaines –Ben M’Sik, Laboratoire de Variations Environnementales et Aménagement du Territoire, Université Hassan II - Casablanca;
Correspondant : amrani.auc@gmail.com ; mouhiddine@yahoo.fr; b.ennassiri@uiz.ac.ma

RESUME: Le choix de l'étude de la bande littorale de la commune de Dar Bouazza (DB), située au Sud de Casablanca - Maroc, s'impose par ses intérêts territoriaux écologiques, touristiques et urbanistiques. Cet espace littoral à fort potentiel touristique et environnemental est devenu au fil du temps, l'un des milieux côtiers les plus attractifs dans l'espace métropolitain du Grand Casablanca. Actuellement, son état est marqué par une urbanisation ou littoralisation très accélérée et tendancielle, notamment au niveau de son front de mer.

Cette étude a pour objectif de mettre le point sur: i/ la dynamique spatiotemporelle du linéaire côtier de DB générant une progradation d'emprise variable, rétrogradation (en moyen de 1,5 m par an au niveau de la plage de Tamaris 2) ou le cas échéant une aggradation au Sud du port de M'Rissa, ii/ l'emprise à risque selon l'ampleur maximale de la houle (trois scénarii projetés correspondant trois intervalles d'ampleurs de la houles : 2 – 5 m, 5 – 10 m et 10 – 20 m), iii/ la spatialisation des risques côtiers auxquels s'expose l'aire d'étude et les emprises submergées en cas de raz-de-marée, iv/ les degrés de vulnérabilité côtière des séquences littorales, v/ les principes fondamentaux de l'aménagement intégré de l'espace littoral, vi/ l'approche urbaine résiliente et durable à engager dans le territoire de DB et vii/ la nouvelle organisation spatiofonctionnelle de l'aire d'étude.

L'approche méthodologique proposée dans cette étude permettra de produire des résultats selon des objectifs prédéfinis. Elle se décompose en trois méthodes cohérentes et complémentaires, dont la dimension spatiale et/ou territoriale est leur point d'intersection. Il s'agit d'une approche de trois GÉO (Géographique, Géomorphologique et Géomatique). Les contrôles sur le terrain et les enquêtes, menées auprès des personnes ressources, appuient le processus d'analyse des données et leur interprétation.

Mots clés : Géographie et géomatique, Espace Urbain Littoral de Dar Bouazza, bande littorale, trait côtier, urbanisation, littoralisation, risques côtiers, vulnérabilité, submersion marine, analyse spatiale, résilience et durabilité urbaine, gouvernance des risques côtiers, urbanisme durable.

I. INTRODUCTION

Bien que le littoral soit lui-même sujet à risques, il représente également une source significative de dangers tant pour les installations urbaines, que pour les habitants et investisseurs locaux. La montée des eaux marines et surtout les tsunamis constituent des menaces perpétuelles pour ces installations. Partout dans le monde, de nombreuses zones côtières urbanisées en bord de mer sont fréquemment submergées par la montée des eaux marines et se trouvent exposées aux risques de tsunami. Ces incidents entraînent des dommages tant sur les infrastructures urbaines que sur les populations locales et leurs biens.

Anticiper une catastrophe d'origine météomarine ou sismotectonique, en mettant en place des mesures appropriées pour éviter ou atténuer les dommages, est plus judicieux à la gestion réactive du sinistre. L'atténuation des risques côtiers, peut contribuer à une maîtrise accrue des enjeux liés à la littoralisation de la bande côtière, aux perturbations des activités socio-économiques, aux dommages causés aux infrastructures publiques, aux équipements collectifs, etc. C'est pourquoi, il est essentiel d'anticiper ces catastrophes en identifiant les

zones les plus vulnérables, actuellement sujettes à une urbanisation démesurée et provoquant un dégraissement continu des cordons dunaires.

Ce travail de recherche se propose aussi d'analyser et de comprendre les multiples risques côtiers, tels que les risques de submersion marine et d'érosion côtière et leur impact sur la bande littorale, ainsi que sur les zones urbaines et naturelles adjacentes. Ce processus impliquera une évaluation des diverses pressions exercées sur lesdites zones littorales, ainsi qu'une analyse des cadres juridiques et institutionnels, mis en place par les acteurs publics, pour respecter leurs engagements et faire face aux diverses formes de dégradation et d'agression subies par la bande littorale. Une évaluation de la résilience du littoral dans sa dimension naturelle et urbaine sera, également, réalisée, en mettant en lumière leur adaptabilité aux risques auxquels ils sont confrontés.

❖ **Éléments de la problématique**

S'étalant sur un linéaire de 15 km, la bande littorale de Dar Bouazza est constituée d'une palette géomorphologique très riche et très diversifiée. Ce paysage naturel littoral de grand potentiel environnemental et écologique paraît très convoité par des affectations infrastructurelles portuaires (industrielles, halieutiques et touristiques) à grand apport à l'économie locale. Ladite bande littorale est aussi très convoitée par des affectations résidentielles et touristiques assez souvent d'un standing élevé (villas, immeubles, résidences touristiques, ...).

Les différentes affectations du littoral, y compris l'urbanisation de la bande littorale, en font à la fois une source de risques et une zone vulnérable. Elle est source de risques lorsque la montée des eaux d'origine marine submerge la bande d'urbanisation en front de mer, provoquant ainsi des submersions par des tempêtes ou des raz-de-marée, fragilisant leurs structures, détériorant les aménagements extérieurs et mettant en danger la vie des occupants. Cette situation crée un risque accru de dommages matériels et humains pendant des périodes marquées par des événements météorologiques extrêmes.

D'autre part, la bande littorale devient une zone vulnérable en raison de l'urbanisation excessive et de l'occupation anthropique peu maîtrisée. Une telle urbanisation démesurée peut déséquilibrer l'écosystème littoral et le mettre en péril. Les conséquences de cette urbanisation non maîtrisée incluent la dégradation des paysages naturels, la surexploitation des ressources, la pollution des eaux marines, l'érosion côtière et d'autres menaces qui peuvent compromettre la biodiversité et la stabilité des écosystèmes côtiers.

❖ **Démarches et outils méthodologiques**

La construction de la problématique, la formulation des questions principales et de l'hypothèse de travail jouent un rôle crucial dans l'organisation de l'observation des faits et le choix des outils d'investigation pour la collecte des données. La problématique définit le cadre conceptuel de la recherche, la question principale oriente la recherche vers des objectifs spécifiques et l'hypothèse de travail propose une réponse à la question, qui sera appréciée à travers la collecte et l'analyse des données. Cela permet de cibler efficacement les efforts d'observation et de collecte de données, en veillant à ce qu'ils soient alignés sur les objectifs de ce travail de recherche.

La méthodologie basée sur le concept des 3GEO (Géographique, Géomorphologique et Géomatique) se veut une approche géographique complète, en tenant compte des caractéristiques physiques, spatiales et des outils de géomatique pour l'analyse des données.

Cette approche multicritère et complémentaire vise à appréhender la complexité des interactions entre les facteurs influençant la dynamique territoriale, tout en évaluant les inégalités environnementales présentes dans la bande littorale.

Donc, la démarche méthodologique adoptée dans le présent travail se décompose en 3 méthodes complémentaires, ceci en référence au 3GEO (Géographique, Géomorphologique et Géomatique).

❖ Aire de l'étude :

Sur le plan administratif, l'aire d'étude fait partie du territoire de Dar Bouazza. Elle constitue le prolongement sud de l'arrondissement d'Anfa et s'étend vers le Sud jusqu'à Sidi Rahal.

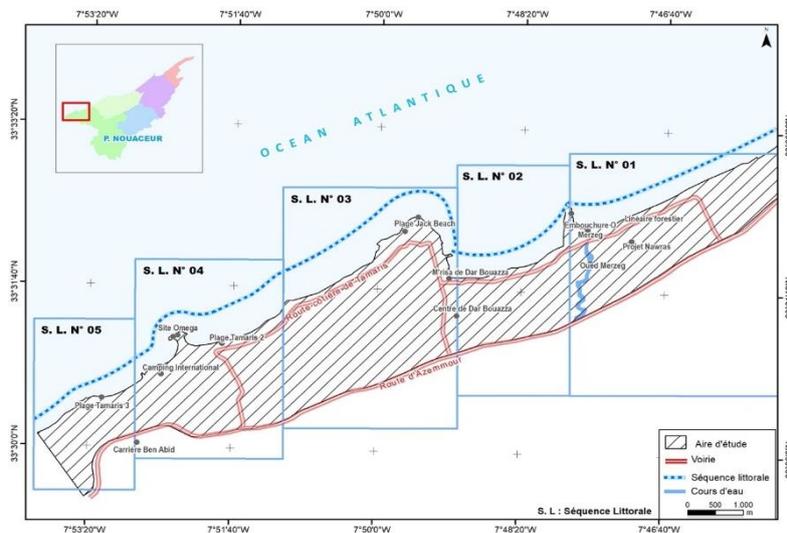


Fig. 02 : Situation géographique de l'espace urbain littoral de Dar Bouazza au Sud de Casablanca Source : Amrani et al, 2021.

I. Résultats de l'étude

1 Analyse diachronique globale de l'évolution du trait de côte

La mise en application de l'analyse diachronique de l'évolution des traits côtiers nous a permis de tracer deux séries des traits datant successivement les lignes de 2005 et 2020. Ces deux lignes côtières géoréférencées pouvant, selon les séquences, se confondre, se croiser ou se séparer en fonction des degrés de leur évolution et de l'impact de la dynamique urbaine sur la bande littorale, surtout celle proche du trait côtier. L'analyse spatiotemporelle, étalée sur plus 15 ans a permis de détecter les changements d'ordre morphopaysager qu'a subi chaque point de la séquence littorale (Fig. 07).

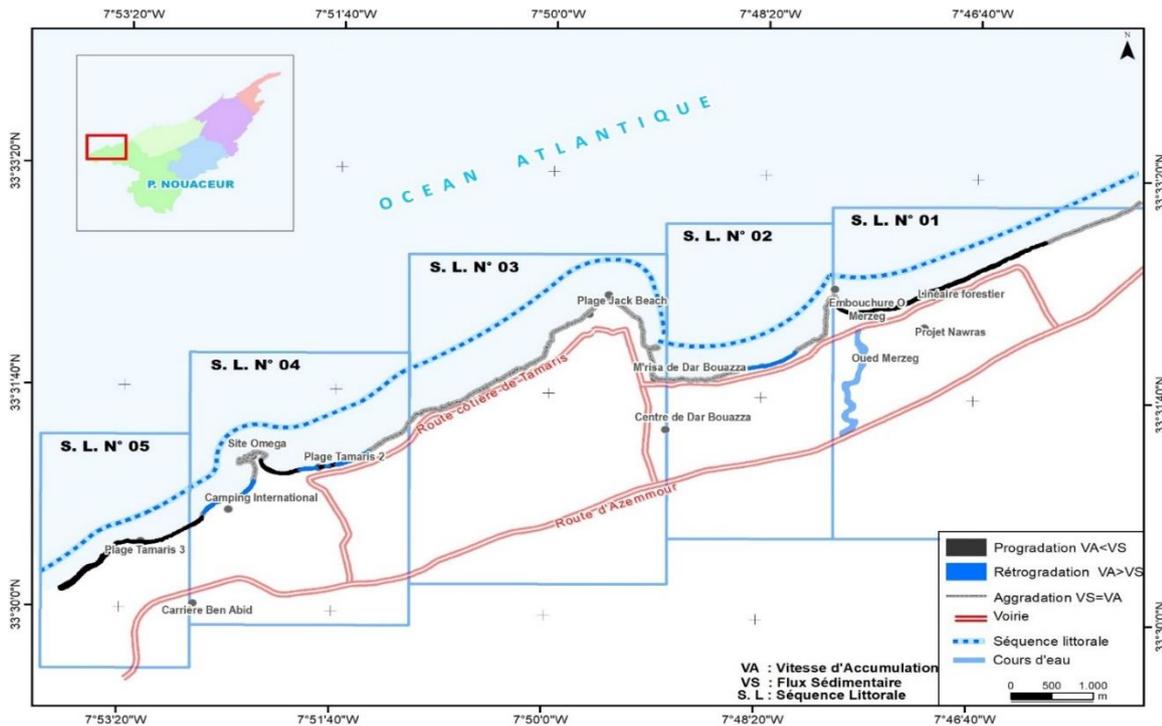


Fig. 07 : Représentation spatiale des emprises de progradation, de rétrogradation et d'aggradation, identifiées entre 2005 et 2020, en se référant aux tracés des lignes supérieures d'humectations mesurées sur image satellitaire (scène de septembre 2005 et 2020). (Source : Auteur, 2021).

2. Simulation spatiale de la submersion marine au niveau de la zone d'étude : Méthode de SWAN adaptée à l'aire d'étude

En l'absence des données historiquement fiables et des données marégraphiques, le recours aux simulations, sur la base des cas vécus dans les autres territoires du monde (Indonésie et Japon) et sur la base de la présentation des cas extrêmes reste nécessaire, pour modéliser par la suite l'organisation spatiofonctionnelle de l'espace urbain littoral de Dar Bouazza, notamment les parties urbanisables et celles qui doivent demeurer inconstructibles et aménageables, sous formes de bandes naturelles. De ce qui précède, trois scénarios ont été arrêtés et matérialisés spatialement, il s'agit de :

Scénario 1 : la première emprise recouverte par les eaux marines, dont l'amplitude de la houle varie entre 2m et 5 m, est en majeure partie respectée et reste conforme aux dispositions urbanistiques en vigueur, imposés par le plan d'aménagement de la commune de Dar Bouazza et par la loi 81-12 relative au littoral.

Le deuxième scénario prévoit des amplitudes de houles qui varient entre 5m et 10m. Dans ce cas de figure, toutes les séquences littorales seront submergées, et ce, sur des profondeurs variables du côté terre, mais la porte basse de M'Rissa se retrouvera totalement submergée. Au niveau de ce point bas, les eaux marines pourraient atteindre une profondeur de plus de 500 m du côté terre couvrant ainsi, une partie importante de la zone actuellement urbanisée, qui constitue le centre de Dar Bouazza.

Scénario 3 : ledit scénario prévoit des amplitudes de houles qui varient entre 10m et 20 m. Dans ce cas de figure, les séquences littorales 1 et 2, en tant que portes basses, seront quasi-totalement submergées à travers la porte basse située au nord de l'aire d'étude (Cf.

Fig. 14 et 15). En se référant aux études historiques, relatives au mouvement transocéanique de 1755, le troisième scénario prévoit une amplitude moyenne de la houle qui dépasse les 20 m.

3. Analyse morphospatiale de la dynamique urbaine

Sur le plan morphospatial, l'espace urbain littoral de Dar Bouazza se développe d'une manière discontinue, sous forme de taches d'huile, donnant naissance à un espace urbain périphérique, constitué d'un ensemble de noyaux urbains souvent non reliés entre eux. Le chapitre suivant présente les résultats de cette analyse territoriale, fondée sur une analyse multiscalair de la dynamique d'occupation des sols. Il s'agit d'une analyse morphospatiale de l'espace urbain littoral de Dar Bouazza à différente échelle.

En comparant les résultats quantitatifs des surfaces urbanisées par rapport à la superficie totale de l'aire d'étude, le développement urbain de trois secteurs est relativement conséquent (33 % en 2020 contre 22 % en 2005). Le secteur central est le plus urbanisé. Cependant la superficie des terrains naturels (vide) et encore vacant occupe actuellement environ les deux tiers de la superficie totale de la zone d'étude au titre de l'année de 2020.

Il ressort de cette recherche que l'espace littoral de Dar Bouazza subit actuellement une certaine pression urbaine, notamment dans la partie proche du trait côtier, d'où la nécessité de repenser ce modèle d'étalement urbain, qui doit se densifier en s'éloignant des zones littorales fragiles et vulnérables (Cf. schéma d'organisation spatiale de l'espace urbain littoral et sa bande littorale de Dar Bouazza).

I. GOUVERNANCE DES RISQUES COTIERS

1. Le réglementaire et la planification urbaine : deux approches combinées pour une meilleure gouvernance des risques côtiers

Dans la réalité, l'espace urbain littoral est vu comme une zone touristique et source de recettes fiscales. Pourtant le concept « bande littorale » en tant que « projet du territoire » peut être intégré efficacement dans le processus de la durabilité. Dans la réalité la délimitation de l'emprise de 100m comme zone de protection du littoral ne suffit pas et le plan d'aménagement, à travers les résultats des études et des recherches scientifiques, doit définir en détail les mesures à prendre au niveau de chaque séquence littorale, en se basant sur une analyse morphodynamique et des propositions d'aménagement, précisant ainsi leurs degrés de vulnérabilité et de durabilité.

2. Approche adaptative pour une meilleure gestion l'existant: introduir les principes de la résilience urbaine

Sur le plan morphologique, l'approche anticipative et préventive stipule, que le processus d'urbanisation du front de mer doit être orienté à la perpendiculaire de la ligne de la côte, selon la capacité de l'espace à urbaniser, permettant ainsi de développer de véritables centralités urbaines en limite de la voie d'Azemmour.

Les zones urbanisables, figurant dans le scénario 02, doivent observer un recul par rapport à la ligne du rivage, en respectant les emprises des coupures naturelles vertes 1 et 2. Des couloirs verts orientés perpendiculairement à la ligne de la côte sont nécessaires pour éviter toute sorte d'urbanisation continue de l'espace littoral de Dar Bouazza, permettant ainsi d'introduire une véritable renaturation de l'espace urbain. Ceci doit se traduire par la mise

en place des noyaux urbains ou centralités urbaines suffisamment éloignés entre eux et respectent l'emprise fonctionnelle de la coupure naturelle (Fig. 60). L'objectif est de maîtriser au mieux l'étalement urbain, réduire la consommation inutile de l'espace naturel par des projets de faible densité, renforcer la perméabilité des sols donnant directement sur le front de mer ou entre lesdits noyaux urbains, réduire les coûts d'intervention et de sauvetage en cas de catastrophes marines...

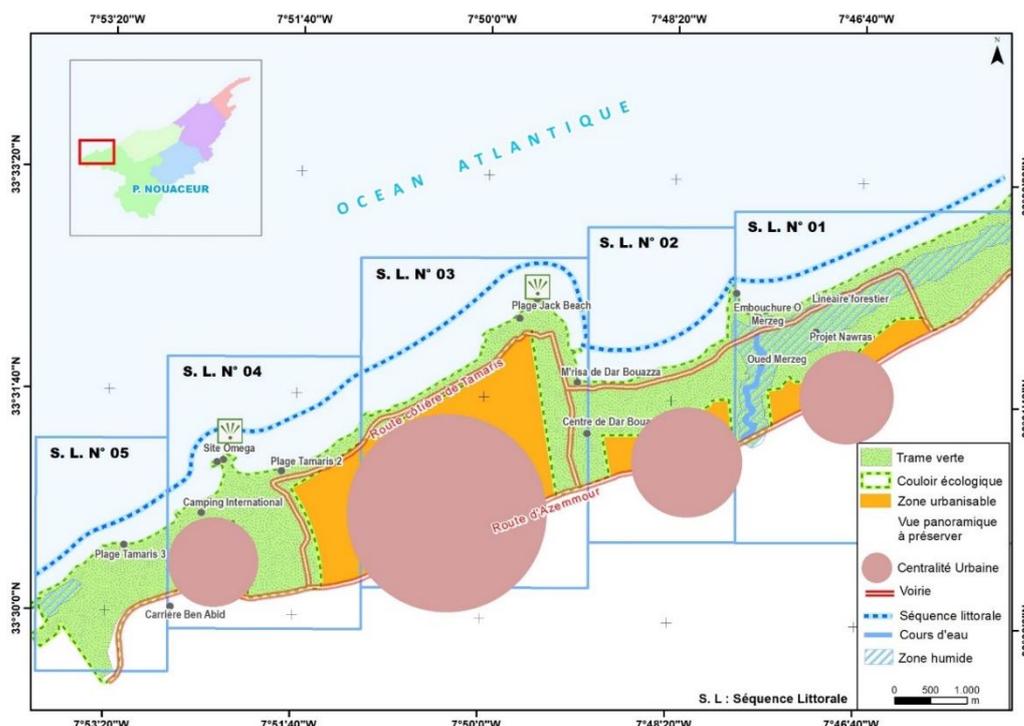


Fig. 60 : Schéma de la nouvelle organisation spatiale et fonctionnelle adaptée à l'Espace Urbain Littoral de Dar Bouazza ; (Source, Auteur, 2022).

CONCLUSION

Sur le plan méthodologique : la base de données à référence spatiale (BDRS) réalisée par le SIG ARCGIS a permis de produire une panoplie d'informations quantitatives et qualitatives, portant sur l'analyse des risques côtiers et d'analyse spatiale. C'est une base de données géolocalisées, intégrées et quantifiables en termes des surfaces d'urbanisation, des mètres linéaires urbanisés, de l'évolution par progradation, rétrogradation et aggradation du tracé du trait de côte, des emprises submergées, occupations des sols, etc. Cette approche géospatiale mérite d'être approfondie par des modélisations spatiales et volumétriques. La cartographie, à l'échelle de la séquence littorale, tout comme les autres analyses thématiques, constitue une des bases de données les plus importantes, pour la quantification et qualification de la vulnérabilité directe et la modélisation de l'organisation spatiale et fonctionnelle de l'espace urbain littoral de Dar Bouazza.

Sur le plan thématique : le territoire de Dar Bouazza représente un espace urbain littoral à risque. Les résultats obtenus dans le présent travail de recherche ont montré, que l'implantation des projets urbains dans les emprises littorales se développe d'une manière tendancielle et presque générale, notamment le long de la voie côtière de Tamaris, donnant directement sur la côte et

sur la voie d'Azemmour. L'analyse des résultats obtenus a révélée aussi, deux types d'implantation urbaine : i) la première originelle développée aux alentours du petit port de M'Rissa constituant le centre historique de Dar Bouazza, ii) la deuxième, par contre, est une implantation résultante d'un étalement urbain le long des deux voies précitées et sur presque la totalité du linéaire des quatre premières séquences littorales.

Prévoir un littoral résilient et durable pour demain est une question problématique à laquelle tous les territoires côtiers se trouvent confrontés. Pouvoir atteindre cet objectif, des propositions ont été formulées, aux termes de cette recherche visant le court, moyen et long terme, pour se projeter dans le temps long, d'une manière structurelle et anticipée, et ce, afin de concevoir un espace urbain capable de préserver ses caractéristiques littorales et répondre aux enjeux de l'aménagement durable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amrani A., Mouhiddine M, EL Wartiti M, Zahraoui M, Rkiouak L. (2015) : La politique d'aménagement des côtes de Dar Bouazza au sud de Casablanca en vertu de la nouvelle loi du littoral et des documents d'urbanisme. Forum 21 des Géomorphologues marocains – les milieux naturels Atlantiques : géomorphologie et développement durable. Le 16 et 17 Décembre 2015-Casablanca.
- Battiau-Queney Y., Billet J.F., Chaverot S., Lanoy-Ratel P. (2003) Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France. *Marine Geology*, vol. 194, n°1-2, p. 31 - 45.
- Guilcher A., Hallégouët B., Meur C., Talec P., Yoni C. (1992) Exceptional formation of present-day dunes in the Baie d'Audierne, southwestern Brittany, France. in *Coastal Dunes*, actes du troisième congrès européen de l'European Union for Coastal Conservation, Balkema, Rotterdam, p.15-23.
- Meur-Ferec C (2006) De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe, Document présenté en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches ; Volume 1 - ESSAI INÉDIT- 248 pages.
- Paskoff R. (2005) Les plages vont-elles disparaître ? Les petites pommes du savoir, éditions Le Pommier, 58 p.
- Amrani A. Mouhiddine M. EL Wartiti M (2021) : Analyse de la dynamique du trait côtier de la bande littorale de Dar Bouazza au Sud de Casablanca (Maroc). *Revue Marocaine de Géomorphologie*. N°5. (2021). PP . 109- 123. <http://revues.imist.ma/?journal=remageom> 109.
- Amrani A. Mouhiddine M. EL Wartiti M (2021) : Résilience et durabilité côtière : comment peut-on articuler les deux approches pour concevoir l'aménagement intégré d'un espace urbain littoral : cas de Dar Bouazza au sud de Casablanca. Actes du colloque international sur « la Dynamique de l'Environnement et les Risques Naturels en Milieux Méditerranéens ». Publications de la Faculté des Lettres et Sciences humaines – Oujda, 2021. <http://lettres.ump.ma/>.
- Dahir n°1.92.31 du 15 Hijja 1412 (17 Juin 1992), portant promulgation de la loi n°12-90, relative à l'Urbanisme tel qu'il a été modifié et complété.
- Dahir n° 1-15-87 du 29 Ramadan 1436 (16 juillet 2015) portant promulgation de la loi n° 81-12 relative au littoral.

Aménagements hydrauliques et gestion du risque d'inondation dans l'agglomération de Fès : cas de l'oued El Himmer

Noura RASSAM¹, Mostafa HMAMOUCI², Abdelghani HOUARI³

Nourassam2@gmail.com , mstafahmamouchi@gmail.com, gartet.abdelghani@gmail.com

(1) Doctorante-chercheur en Géographie, FLSH Sais -USMBA

(2) Professeur-chercheur en Géographie, FPT - USMBA

(3) Professeur-chercheur en Géographie – Aménagement, FLSH Sais -USMBA

(1, 3) Equipe de Recherche « Milieux Naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-spatiales », (2) LR- EH3D,

Résumé : Au Maroc, le risque d'inondation est l'un des risques liés à l'eau qui provoque des dommages importants sur l'homme et ses biens. A l'instar des agglomérations marocaines, la ville de Fès est menacée par des inondations violentes, à noter celles du 1950, 1989 et 2008. Ces inondations ont laissé une marque durable dans la mémoire collective. Les autorités locales ont entrepris des études diagnostiques et des aménagements visant à réduire l'impact de ce risque, en particulier le long de l'oued El Himmer, responsable de dégâts économiques et humains importants. Malgré les travaux entrepris, les aménagements actuels se révèlent insuffisants et inadéquats, constituant une nouvelle source de risque. Cette étude examine l'aléa et la vulnérabilité au risque d'inondation, évalue les aménagements réalisés le long de l'oued El Himmer, et propose des mesures de protection et des politiques d'aménagement hydraulique pour prévenir ce risque.

Introduction

Les crues urbaines constituent l'un des principaux risques auxquels la ville de Fès est confrontée. Ces crues représentent une menace réelle et prévisible pour l'agglomération et son arrière-pays (A. Gartet, 2007 et 2010). Durant les dernières décennies les recherches ont abordé certains phénomènes liés à ce risque, et les collectivités publiques ont guidé plusieurs projets d'aménagements au but de gérer le risque d'inondation et lutter contre les dangers causés par ce risque.

La finalité de cette étude est d'évaluer les inondations de l'oued El Himmer en relation avec l'occupation de l'espace fortement anthropisé par le traitement de quelques cas d'inondation qui ont marqué l'histoire de la ville ; de même mettre la lumière sur le rôle des aménagements hydrauliques existants le long du cours d'eau étudié et leur degré de maîtrise des inondations dans l'agglomération de Fès.

I. Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude :

L'Oued El Himmer est un affluent de l'oued Fès. Il prend naissance à environ 30 km au sud de la ville de Fès, dans les montagnes du Moyen Atlas, à des altitudes allant à 1500 m. Le cours d'eau longe la route nationale 8 allant vers Imouzzer Kander, passe sous l'aéroport Fès Saïs, réapparaît à l'aval immédiat de l'aéroport, retransverse la RN8 au niveau de la station-service CMH, et se dirige vers le nord en traversant une zone d'exploitations agricoles. Le relief du bassin versant de l'Oued El Himmer est montagneux en amont (Moyen Atlas) et devient progressivement plat vers l'aval, (plaine de Sais). Ce cours d'eau est alimenté par plusieurs affluents et chaâbas.

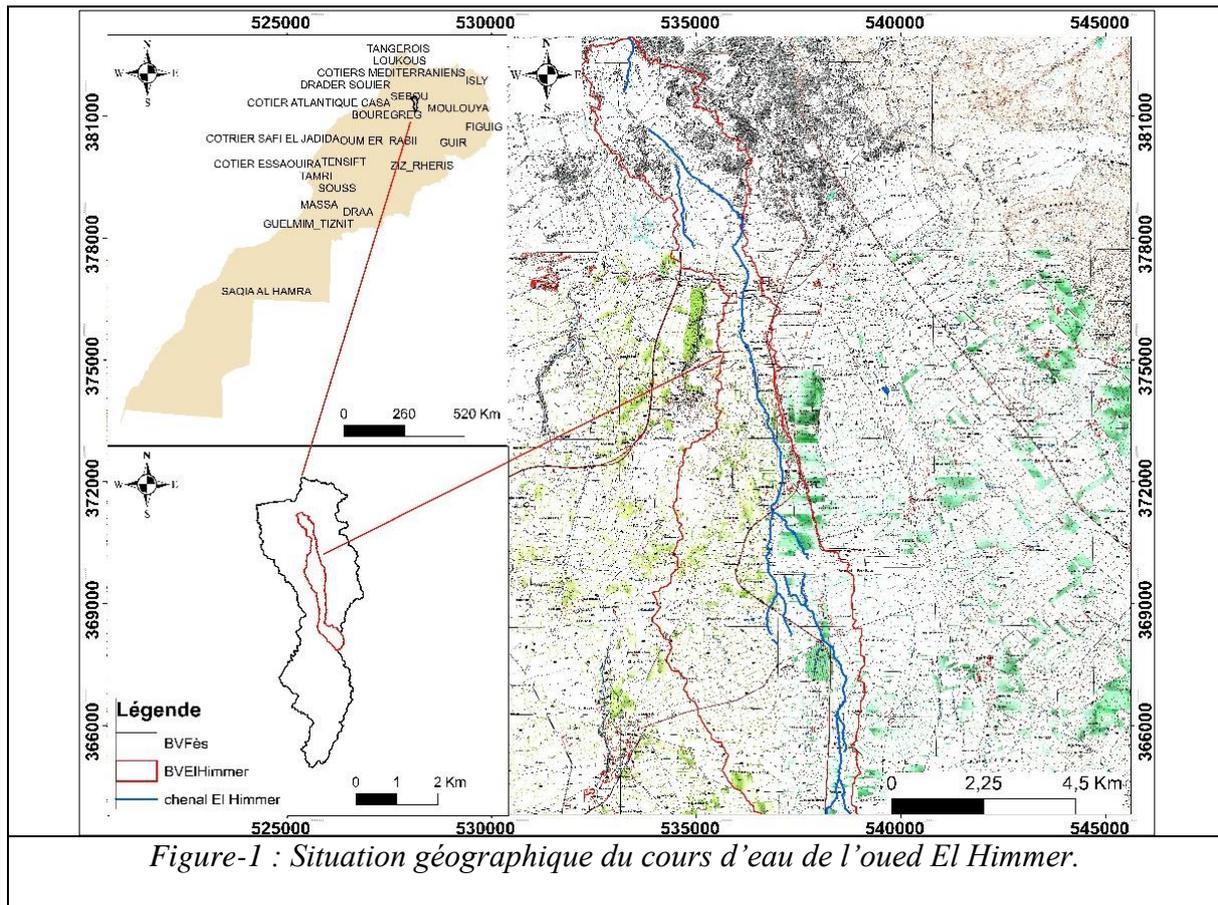


Figure-1 : Situation géographique du cours d'eau de l'oued El Himmer.

Oued El Himmer, est caractérisé par un lit peu marqué et invisible dans certaines parties. Les crues se dispersent et s'étalent dans la plaine de Saïss donnant lieu à des débits amortis. El Himmer contribue à la formation des débits de pointe des oueds les plus importants à l'entrée de la ville (tableau 1).

Tableau 1 : Estimation des crues de projet de l'oued El Himmer (ABHS, 2010).

| Oued | Point de calcul | Estimation des débits de pointe de crue (m ³ /s) | | | |
|-----------|--------------------|-------------------------------------------------------------|---------|---------|----------|
| | | T=10ans | T=20ans | T=50ans | T=100ans |
| El Himmer | Sortie des reliefs | 25 | 39 | 62 | 72 |

2. Les facteurs de la genèse des crues :

Durant les trois dernières décennies, la ville de Fès connaissait une grande explosion démographique - résultant des masses d'émigration – qui se manifestait par une progression du tissu urbain sur les abords des vallées pour atteindre les lits fluviaux.

L'extension anarchique apparait dès les années 1970 notamment à Hay Aouinat Hajjaj sur la rive gauche de l'oued Bouffekrane, à Montfleuri et Sidi Brahim sur les rivages de l'oued El Mehraz, à Zouagha de part et d'autre de l'oued Himmer et oued Aïn Smen, et d'autres douars sur l'oued Fès. Cette extension sur les rives des oueds et les versants abords résulte des changements dans l'occupation des sols aux niveaux des vallées naturelles, en raison de l'empiètement sur les espaces fluviaux (Houari et al, 2019).

La ville de Fès se caractérise par deux niveaux urbains différents dont la sécurité hydraulique est strictement intégrée : la ville nouvelle en amont et la Médina en aval. La ville de Fès a connu dans le passé deux crues excessivement violentes (septembre 1950 et octobre 1989) qui ont causé de très importants dégâts (inondation et destruction des maisons, destruction des ponceaux, érosion et effondrement des berges, érosion des chaussées, coupures de route, etc ...). Cependant, la Médina n'a pas été touchée de façon significative par ces événements grâce aux débordements en amont de la ville nouvelle (zone d'expansion et d'épandage des crues) (Lasri, 2015 ; Gartet, 2007).

En 2007, 2008, 2009, 2010 et 2020, plusieurs crues ont également été enregistrées et ont atteint la ville de Fès créant ainsi des dommages d'importance variable dans les quartiers situés sur la trajectoire du cours d'eau.



Photo-1 : Voie menant à Zouagha pendant la crue de 2007. (ABHS, 2020)



Photo-2 : Crue du Février 2009 au niveau de Merja (Confluence El Himmer / Oued Fès). (ABHS, 2020)

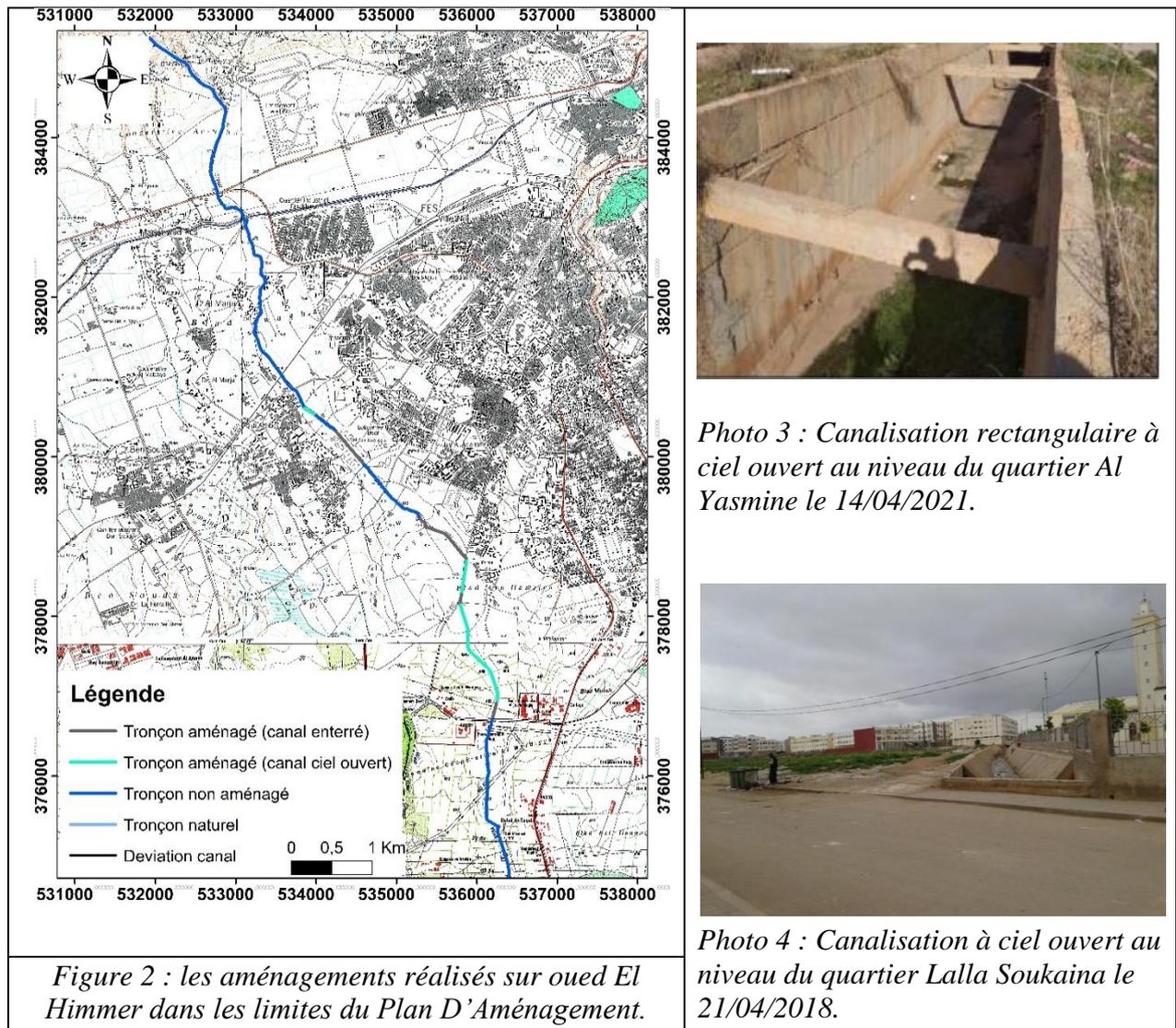
3. Les aménagements réalisés sur O. El Himmer

Le bilan des dégâts des différentes crues analysées a été très lourd surtout avec l'inondation des quartiers potentiellement surpeuplés, ou le volume d'eau a dépassé la capacité des lits, particulièrement lors des crues du 25 Septembre 1950 et du 13 Octobre 1989. La fréquence de ces événements et la demande croissante de sécurité vis à vis du risque d'inondation de la communauté urbaine de la ville de Fès, liée aussi au développement rapide de la ville, doit être satisfaite.

Dans ce sens des efforts ont été déployés et les autorités ont lancé de nouveaux travaux d'installation des ouvrages de franchissement et de canalisation de la vallée de L'O. El Himmer sur différents secteurs, au but de prévoir, gérer et lutter contre le risque des inondations.

Parmi les aménagements réalisés sur l'oued EL Himmer dans le périmètre urbain de la ville de Fès :

- Canalisation rectangulaire de 3km qui se termine par un dalot triple,
- Canalisation trapézoïdale en terre ou bétonnée avec partie couverte de 570m. La partie couverte est composée d'un dalot d'une seule ouverture au niveau du quartier Lalla Soukaina.



II. Résultats et discussion

1. Diagnostic du degré de réussite de ces aménagements dans la maîtrise du risque d'inondation

A partir des dernières manifestations de crues sur la ville de Fès (2009 et 2020) et des études de diagnostic menées sur la situation actuelle de l'O. El Himmer (ABHS, 2010, 2020), il est évident d'en déduire que ce cours d'eau présente une capacité de transit réduite, ne pouvant évacuer, sauf quelque exception, que des événements d'une occurrence décennale sans mise en charge des ouvrages (en général sous dimensionnés) et débordements vers les zones limitrophes, en plus de l'urbanisation non contrôlée, les aménagements non adaptés et le non-respect du domaine public hydraulique constituent les principaux facteurs anthropiques dans le déclenchement des crues rapides.

Dans ce contexte, le risque d'inondation est amplifié par :

- L'absence de cohérence amont-aval (débitance et dimensionnement des ponts),
- La présence de tronçons couverts sous dimensionnés,
- Le manque d'entretien du lit des cours des oueds et des ouvrages de traversées,

- Le développement urbain extrêmement rapide et parfois non contrôlé (constructions en bordure des lits mineurs),
- La présence de remblais dans le lit majeur

2. Aspect juridique et maîtrise des inondations

En revenant sur l'aspect juridique et son rôle dans la maîtrise des inondations, on dégage les principales orientations suivantes :

- Le préambule de la loi n° 10-95 relative à l'eau repose sur l'inclusion des lits des cours d'eau permanents et temporaires, ainsi que des lits des torrents où le passage de l'eau laisse une marque visible. De plus, cela englobe les rives jusqu'aux niveaux atteints lors des crues et les parements extérieurs à partir des limites des berges.
- La loi n° 36-15 relative à l'eau, axée sur la gestion des risques liés à l'eau, proscrit la construction de toute infrastructure dans les zones sujettes à l'inondation qui pourrait entraver le libre écoulement des eaux, sauf dans le but de protéger les résidents et les biens privés. En vertu de cette même loi, chaque agence du bassin hydraulique est tenue de créer un atlas des zones inondables, délimitant ces zones en fonction de trois niveaux de risque d'inondation : faible, moyen et élevé. De plus, elle est chargée de mettre en place des systèmes intégrés de prévision et d'alerte des crues le long des cours d'eau générateurs d'inondation.
- La loi n° 12-90 sur l'urbanisme spécifie les procédures pour élaborer les plans de zonage et les plans d'aménagement, incluant la délimitation des zones où toute construction est prohibée, ainsi que les règles régissant l'utilisation des sols.
- L'article 8 de la loi n° 25-90 concernant les lotissements, les groupes d'habitations et les morcellements souligne l'impératif selon lequel tout lotissement réalisé doit être en conformité avec les réglementations en vigueur, en particulier les dispositions des plans de zonage et des plans d'aménagement.
- La loi n° 11-03, relative à la protection et la valorisation de l'environnement, a pour objectif la protection de l'environnement et l'amélioration des conditions de vie de la population. Cependant, elle aborde le risque uniquement dans l'article 49, qui traite la mise en œuvre des aménagements, des ouvrages ou des projets susceptibles, en raison de leur envergure ou de leur impact sur le milieu naturel, de causer des risques.

Conclusion

L'analyse de la situation actuelle de O. El Himmer, face au risque d'inondation, a montré qu'avec la combinaison de plusieurs facteurs et processus tel que l'évolution anarchique et continue du tissu urbain, et l'envahissement des espaces vallées sans prendre en compte les lois liés à l'urbanisme et à l'aménagement (lois 12-90 et 25-90), la vallée reste fortement exposée au risque d'inondation malgré les aménagements et les ouvrages hydrauliques réalisés, surtout lors des années humides.

Il est donc important de signaler qu'il faut repenser les risques hydrologiques dans la planification urbaine des agglomérations marocaines, intégrer la notion du risque hydrologique dans le Code de l'Urbanisme et la Charte de l'Environnement, établir des PER (Plan d'Exposition aux Risques) avant toute élaboration des PD, PA et SDAU. Enfin, les aménagements réalisés devront être bien pensés, bien dimensionnés, bien adaptés au milieu tout en respectant le domaine public de l'eau.

Bibliographie

- Agence du bassin hydraulique de Fès A.B.H.S. (2020).** Projet de protection de la ville de Fès contre les inondations, étude d'impact environnementale et sociale, 13, 14 p.
- Agence du bassin hydraulique de Fès A.B.H.S. (2010).** Etude de schéma directeur de protection de la ville de Fès contre les inondations.
- Gartet, A. (2007).** Risques naturels, anthropiques et technologiques dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays : aménagement, gestion et prévention. Thèse Doct. D'État, 454 p., FLSH Saïs, Fès.
- Gartet, A. & Gartet, F. (2006).** Gestion des risques naturels et aménagement urbain dans la zone Nord-Est de l'agglomération de Fès : secteurs de Jnanates aux abords de l'Oued Fès-aval. In « La ville marocaine entre la planification et l'anarchie ». Publications FLSH. Saïs, pp : 141-156, Fès.
- Houari, A. Rassam N. et El Alami. Y. (2019).** Le devenir des vallées urbaines face aux défaillances de gestion des crues : analyses appliquées dans quelques agglomérations urbaines au Maroc Colloque National « Gouvernance Territoriale et Outils de Gestion de l'Espace, Oujda 23 Novembre 2019.
- Lasri, M. (2015).** Les inondations menaçant l'agglomération de Fès : De l'étude hydrologique et du risque à la cartographie des dangers d'inondation. Thèse Doct, FLSH Saïs-Fès, 265 p.
- Lasri, M. Obda, Kh. Taous, A. Amyay, M. & Reynard, E. (2011).** L'agglomération de Fès et sa périphérie face au risque d'inondation. Actes du Colloque « aménagement périurbain : processus, enjeux, risques et perspectives », pp : 189-206, Faculté des Lettres et des Sciences Humaine Fès-Saïs.
- Rassam, N. Amyay, M. & Houari, A. (2021).** La perception des risques naturels par la population : cas de certains quartiers de la ville de Fès. Actes du Colloque « Bassin du Sebou : Espace, Société et Patrimoine, pp : 69-79, Faculté Polydisciplinaire de Taza.
- Qadem, Z. Qadem, A. Obda, Kh. Lasri, M. (2018).** Variabilité climatique et ressources en eau dans le bassin versant de l'Oued Mâasser (Moyen Atlas, Maroc). Climat, Eau et Société, Beni Mellal. Numéro 1- 2015, pp. 97-113.3

La lagune de Marchica entre la dynamique d'Aménagement et les risques naturels

BAHKAN Mimoun et SBAI Abdelkader

Département de Géographie, Université Mohamed Ier, Oujda

mimoungorif@gmail.com

Résumé: La province de Nador connaît des mutations socio-économiques importantes, ce qui induit des développements spectaculaires des centres urbains (Nador, Beni N'sar, Arekmane...). La lagune de Marchica est entourée par des villes et centres urbains qui sont exposés aux risques naturels puisqu'ils développent leurs tissus urbains le long des cônes de déjection et dans les zones de piémonts (Gorougou, Kebdana) où concourent les principales artères hydrographiques en provenance de ces massifs. Dans ces villes et centres urbains, le phénomène d'inondation n'est pas récent puisque plusieurs événements pluvieux exceptionnels et des débits critiques ont été enregistrés auparavant.

Les processus d'accroissement urbain sont parfois mal maîtrisés et des quartiers se développent sur des espaces vulnérables. Des risques environnementaux démesurés, en rapport avec les aléas climatiques, s'en suivent, notamment dans les quartiers périphériques proches des zones en relief où les précipitations atteignent parfois des seuils critiques.

Il ressort de ceci que la problématique de recherche se base sur plusieurs données qui apparaissent à plusieurs niveaux et qui nécessitent de lier et d'intégrer les paramètres sociaux, économiques et environnementaux.

En effet, la vulnérabilité de la zone d'étude consiste à détecter les perspectives du développement et les principes de l'aménagement de l'espace littoral de la lagune de Marchica en vue d'éviter notamment les risques d'inondation et les effets néfastes dus à l'élévation du niveau marin engendré par les variations climatiques et la montée de la nappe phréatique.

Actuellement, un grand programme est lancé pour assainir et aménager la lagune de Nador depuis 2009.

Mots-clés: Risques naturels, la vulnérabilité, gestion intégrée, aménagement, perspectives de développement, lagune de Nador.

The Marchica lagoon between the dynamics of development and natural risks

Abstract: The province of Nador is experiencing significant socio-economic changes, which is leading to spectacular developments in urban centers (Nador, Beni N'sar, Arekmane, etc.). The Marchica lagoon is surrounded by towns and urban centers which are exposed to natural risks since they develop their urban fabrics along the alluvial cones and in the foothill areas (Gorougou, Kebdana) where the main hydrographic arteries from of these massifs. In these cities and urban centers, the flooding phenomenon is not recent since several exceptional rainy events and critical flow rates have been recorded previously. The processes of urban growth are sometimes poorly controlled and neighborhoods develop in vulnerable spaces. Disproportionate environmental risks, linked to climatic hazards, ensue, particularly in peripheral districts close to areas of relief where precipitation sometimes reaches critical thresholds. It emerges from this that the research problem is based on several data which appear at several levels and which require linking and integrating social, economic and environmental parameters. Indeed, the vulnerability of the study area consists of detecting the development prospects and the principles of planning the coastal space of the Marchica lagoon with a view to avoiding in particular the risks of flooding and the harmful effects due to the rise in sea level caused by climatic variations and the rise in the water table.

Currently, a major program has been launched to clean up and develop the Nador lagoon since 2009.

Keywords: Natural risks, vulnerability, integrated management, planning, development prospects, Nador lagoon

1. Introduction

La lagune de Nador est l'une des plus importantes lagunes de la Méditerranée, un biotope particulier puisqu'il s'agit de la deuxième plus grande lagune du rivage méditerranéen. Ce milieu paralique présente une grande diversité biologique, écologique et paysagère (Site RAMSAR et SIBE). Elle est entourée par des agglomérations urbaines exposées aux risques naturels.

Il ressort de ceci que la problématique de recherche se base sur plusieurs données qui apparaissent à des niveaux différents. L'objectif est d'arriver à un développement durable qui nécessite de relier et d'intégrer trois éléments: l'élément social, l'élément économique et l'élément environnemental.

En effet, la vulnérabilité de la zone d'étude consiste à détecter les perspectives du développement et les principes de l'aménagement de l'espace littoral de la lagune en vue d'éviter notamment les risques des inondations et les effets néfastes dus à l'élévation du niveau de la mer engendré par le changement climatique et la montée de la nappe phréatique.

2. Méthode

2.1. Présentation de la zone d'étude

La lagune de Marchica est située à l'extrême nord-est du Maroc dans la province de Nador. Elle englobe deux parties: la partie aquatique est représentée par la lagune de Nador qui couvre à elle seule une superficie de 11500 Ha, tandis que la partie continentale est constituée par les communes urbaines de Nador et Bni Ansar, et les centres d'Arekmane, Ihaddadene, Bouareg et Bni Chiker.

C'est l'une des plus importantes lagunes de la Méditerranée. C'est un biotope particulier puisqu'il s'agit de la deuxième plus grande lagune du rivage méditerranéen. Ce milieu paralique présente une grande diversité biologique, écologique et paysagère (Site RAMSAR et SIBE). L'hydrologie de lagune dépend de trois types de ressources hydriques aux caractéristiques hydrodynamique et physico-chimiques très différentes: eaux marines, eaux usées urbaines, eaux de la nappe de Bou Areg.

Les reliefs montagneux occupent 35% de l'espace des alentours du site de la lagune (Gourougou, Kebdana). De même les plaines ne dépassent pas 34% de la superficie de cet espace. Les sols sont répartis entre les sols bruns et les sols hydromorphes.

La moyenne annuelle des précipitations varie entre 252 mm et 420 mm. La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (août) est de 29°C. Le mois le plus froid (janvier) présente des valeurs minimales moyennes de 7°C.

Selon le Recensement Général de la Population et de l'habitat (RGPH) de 2004, les densités de la population sont plus importantes notamment dans les agglomérations urbaines. La population compte environ 248 418 habitants (86 % d'urbains et 14 % de ruraux). La population ayant un âge compris entre 15 et 59 ans constitue 62%. Celle ayant un âge inférieur ou égal à 14 ans représente 29,5%. Le groupe d'âge dépassant 60 ans n'est que de 8,5%.

Le taux d'analphabétisme moyen des six communes est de 44%. Le taux le plus élevé atteint la valeur de 63,0% à Arekman. Le plus bas est enregistré à Nador (31 %). Le taux d'activité maximum est enregistré au niveau de la commune de Nador (37, %) et le minimum au niveau de la commune d'Ihaddaden: 33%.

2.2. Méthode d'étude

L'objectif est d'évaluer les risques de dégradation de la Marchica par les activités économiques et son exposition aux risques naturels et d'analyser l'ensemble des informations pour permettre d'orienter et de définir les éventuelles mesures de gestions au regard des risques

identifiés. La méthode d'évaluation consiste à superposer, sous SIG et à l'échelle de la lagune de Marchica, plusieurs niveaux d'informations et à analyser ces superpositions. Une étude diachronique des photos aériennes a été faite pour montrer la dynamique de l'espace au cours des 62 dernières années. Cette dynamique s'est faite au détriment des terres agricoles, des marécages et des zones à forte pente.

Sur la base du diagnostic de la situation actuelle et des résultats de l'étude hydraulique, des propositions d'aménagement ont été faites

3. Résultats et discussion

L'espace urbain de la lagune de Marchica entre 1958 et 2020 a connu des mutations importantes. L'année 2020 présente une image qui montre la répartition spatiale morcelée avec des quartiers périphériques qui se trouvent limités presque entièrement par des thalwegs et des oueds. Les aires urbanisées continuent d'évoluer avec un rythme accéléré (Fig.1).

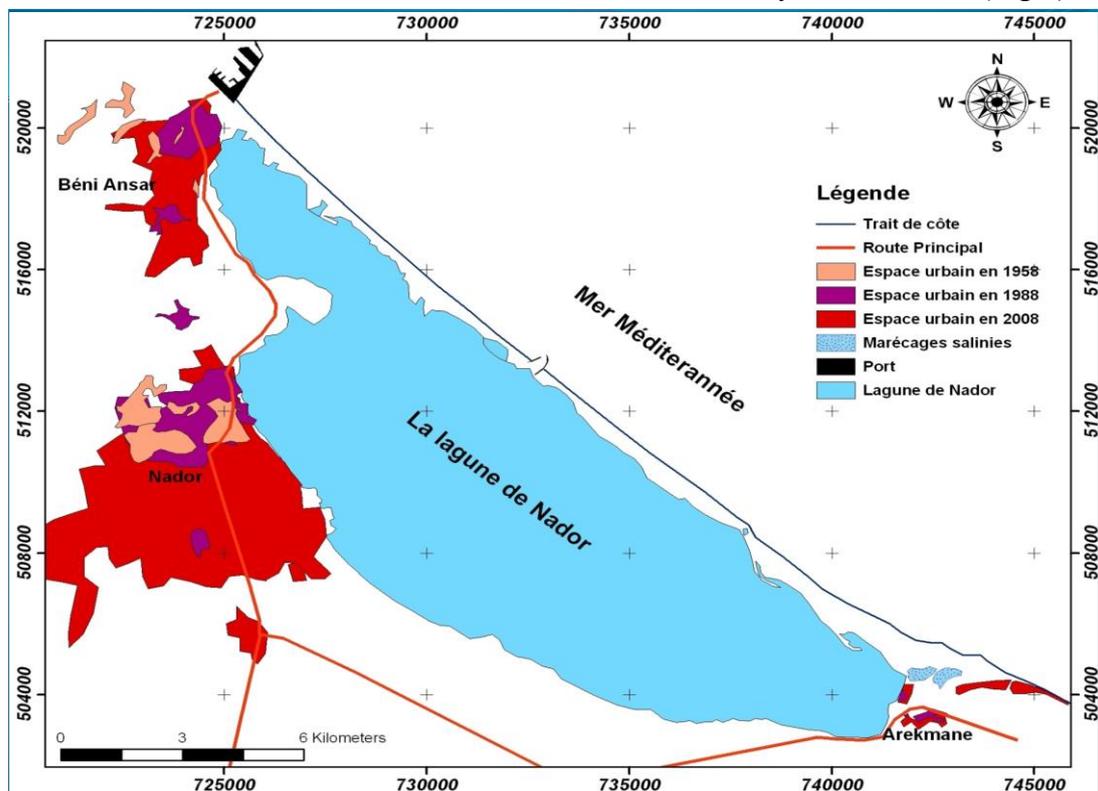


Fig.1: Variations des espaces urbains dans la lagune de Marchica entre 1958 et 2020

Le rythme d'accroissement de l'urbanisation peut être expliqué par plusieurs facteurs:

- la création de nouvelles activités économiques ;
- l'accroissement démographique ;
- l'exode rural vers les alentours de la lagune ;
- l'incorporation des douars limitrophes ruraux dans le périmètre urbain, à cause de l'extension urbaine.

La dynamique d'urbanisation se manifeste par divers mécanismes et se traduit par différentes caractéristiques d'aménagement : aménagement bivalent ; aménagement spontané ; aménagement sélectif ; aménagement orienté ; aménagement non hétérogène. Ceci exprime une dynamique du changement de l'espace étudié qui va d'un aménagement touristique estival temporaire à un aménagement qui prend en considération le changement de l'habitat

Les cartes d'occupation du sol ont été dressées pour les années 1958 et 2020, soit une période de 62 ans (Fig.2). L'enseignement majeur tiré de ces cartes est que la croissance urbaine s'est faite en particulier autour des mares et marécages et les cours d'eau, occupant ainsi, d'année en année, un espace réputé non aédificandi

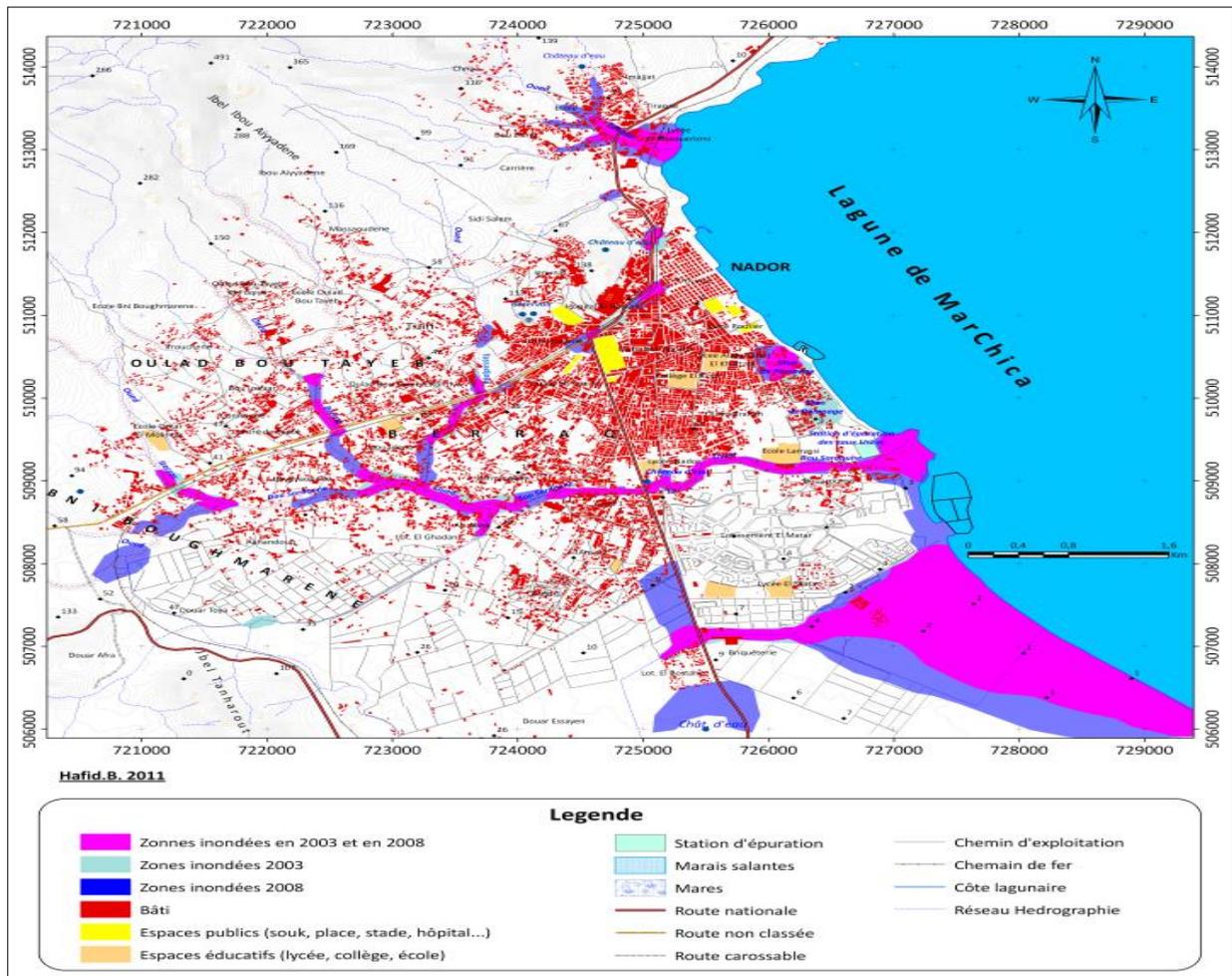


Fig2: Analyse de la vulnérabilité à l'inondation

L'opération de l'élaboration des documents urbains notamment le plan d'aménagement (Fig.3), n'est pas seulement un outil effectué sur la table d'architecte mais c'est un projet d'avenir d'une ville dont l'objectif est de réaliser un développement socio-économique durable. Ainsi le processus d'élaboration de ce genre de document nécessite de bien connaître l'espace concerné par le Plan d'aménagement ainsi que ces potentialités socio-économiques et le type des intervenants.

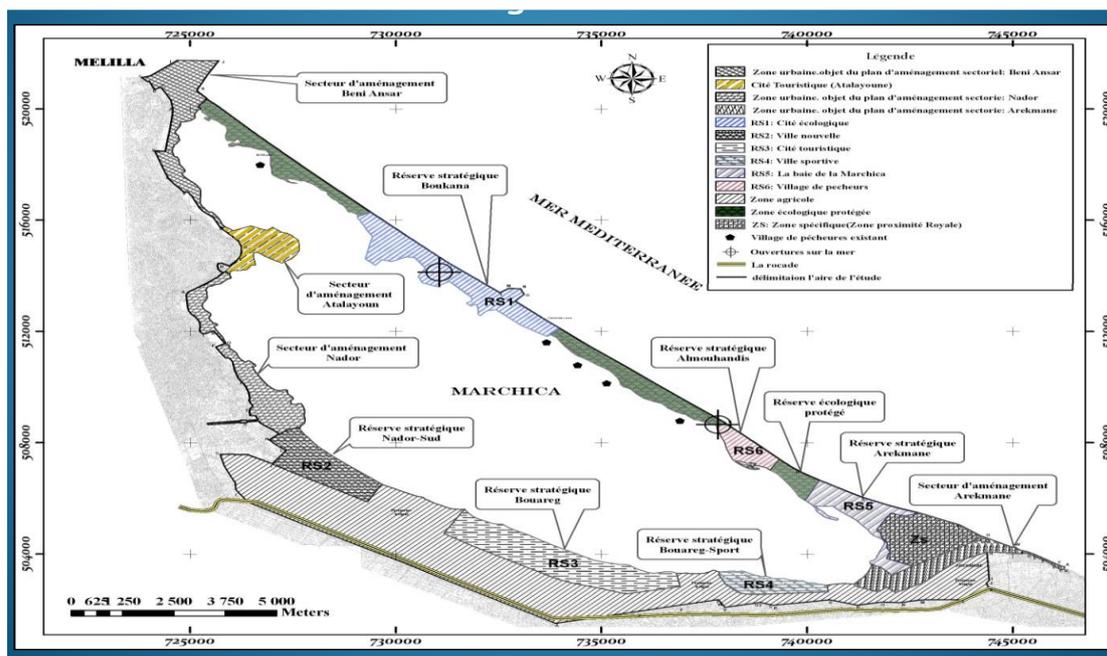


Fig3 : Plan d'aménagement de sauvegarde et de la mise en valeur des alentours de la lagune de Nador

A partir de ces principes préliminaires, l'évaluation du document du Plan d'aménagement, de sauvegarde et de la mise en valeur des alentours de la lagune de Nador pose point d'exclamation sur la nature et le genre des critères adoptés pour l'élaboration de ce type de document. Effectivement, les données fournies par ce document et le processus de son élaboration expriment l'ignorance et la non révélation de l'espace et le manque de connaissance de ces potentiels économiques, humains et environnementaux. Sinon comment interpréter l'émiettement de l'espace en réserve stratégique et réserve écologique protégée ?

D'autre part, il s'avère primordial de mettre une liaison entre plan d'aménagement et plan des risques en tant qu'un succès d'un projet d'aménagement qui nécessite de bien connaître les risques naturels qui menacent l'espace concerné ainsi que l'aménagement et l'assimilation des mécanismes et des techniques de gestion des risques naturels par les décideurs.

L'investigation des possibilités de protection et de prévision les plus convenables définit les directives de la recherche et rend réel le plan d'aménagement à travers l'analyse des enjeux socio-économiques existants. Elle permet également de détecter les espaces convenables afin de programmer les installations et l'infrastructure essentielle selon des critères adoptés dans la planification des équipements communaux.

L'aménagement correcte de l'aire étudiée doit se baser sur un bon niveau de connaissance des procédés physiques (topographie, réseau hydrographique, hydrodynamique côtière...). Ces données qu'on peut collecter actuellement sous forme de couches dans des logiciels SIG visent à organiser la mémoire du risque d'un espace concerné. Elles fournissent également la bonne compréhension des phénomènes liés à des événements pluvieux extrêmes (inondations et crues), ou la prévision des impacts de l'élévation du niveau de la mer sur les activités socio-économiques, qui est une des conséquences du changement climatique. Ceci permet de définir les moyens de prise de décision et de proposer des solutions plus efficaces et rationnelles et chercher les possibilités de protection et de prévision les plus convenables.

L'utilisation de la cartographie et des SIG a permis de montrer que la zone d'étude présente globalement une vulnérabilité élevée à très élevée à la remontée du niveau de la mer.

- 22% de la longueur totale du littoral de la lagune ont un degré de vulnérabilité très élevée ;
- 42% sont à risque élevé.

A moyen terme, un plan GIZC doit être adopté pour inclure la régularisation des bâtiments, la planification urbaine croissante, le développement des capacités institutionnelles et l'augmentation de la conscience publique. Ce plan devrait concerner activement les communautés locales et les décideurs. Le plan GIZC devrait traiter également des impacts des changements climatiques et non-climatiques, en assurant que le développement côtier n'augmentera pas la vulnérabilité de la région. Une vulnérabilité qui s'accroît avec l'ampleur des projets programmés est prévue à proximité de la lagune.

4. Conclusion

La protection de la lagune de Marchica nécessite une attention particulière pour les raisons suivantes. Il s'agit d'un site très rare à l'échelle du bassin méditerranéen et unique à l'échelle du Maroc. Ce site est le siège d'une biodiversité très importante et sert également de refuges à de nombreuses espèces migratrices. Il présente une qualité paysagère exceptionnelle pour le bassin méditerranéen, mais il présente actuellement des signes d'altération à prendre en considération dans les projets d'aménagement de la région. Il faudra donc maintenir l'intégrité de l'environnement pour assurer la santé et la sécurité des communautés humaines et préserver les écosystèmes qui entretiennent la vie. Assurer l'équité sociale permettra le plein épanouissement de toutes les femmes et de tous les hommes, l'essor des communautés et le respect de la diversité.

Enfin, viser l'efficacité économique créera une économie innovante et prospère, écologiquement et socialement responsable.

Revue des facteurs de pollution et de dégradation du SIBE de la Moulouya et perspectives d'avenir

BENATA Mohamed

Président de l'Espace de Solidarité et de Coopération de l'Oriental, Coordinateur principal de l'Ecolo Plateforme du Maroc du Nord. mohamed.benata@gmail.com; Tel : 0666580541

Résumé: Le Site d'Intérêt Biologique et Ecologique de la Moulouya (SIBE) est soumis à plusieurs facteurs de dégradation notamment la pollution plastique et chimique. En plus de la pollution, son débit écologique qui assure le maintien de ses écosystèmes aquatiques et terrestres est convoité pour l'irrigation dans le domaine agricole ou pour l'eau potable. En outre les terres agricoles au voisinage du SIBE ont connu des problèmes de salinité à la suite de la construction des barrages et plusieurs stations de pompage qui ont provoqué une baisse du débit de la Moulouya.

La présente communication tentera de dresser un aperçu sur ces aspects de pollution et les catastrophes écologiques que le SIBE de la Moulouya a connues et traitera le risque de priver le SIBE de la Moulouya de son débit écologique.

Mots-clés: Pollution, dégradation, SIBE de la Moulouya, Maroc oriental.

Review of pollution and degradation factors of the Moulouya SIBE and future prospects

Abstract: The Moulouya Site of Biological and Ecological Interest (SIBE) is subject to several degradation factors, notably plastic and chemical pollution. In addition to pollution, its ecological flow which ensures the maintenance of its aquatic and terrestrial ecosystems is coveted for irrigation in the agricultural sector or for drinking water. In addition, agricultural lands in the vicinity of the SIBE have experienced salinity problems following the construction of dams and several pumping stations which caused a drop in the flow of the Moulouya.

This communication will attempt to provide an overview of these aspects of pollution and the ecological disasters that the Moulouya SIBE has experienced and will address the risk of depriving the Moulouya SIBE of its ecological flow.

Keywords: Pollution, degradation, Moulouya SIBE, Eastern Morocco.

Introduction

Le Site d'Intérêt Biologique et Ecologique de l'embouchure de la Moulouya (SIBE) a été classé par la convention Ramsar le 15 Janvier 2005. Ce site porte le N°: 1478 dans le répertoire des sites RAMSAR. Sa superficie est estimée à plus de 4500 ha. Il a bénéficié dans le cadre du Programme Med Wet Coast Maroc pour la Conservation des espaces littoraux dans le bassin méditerranéen de la priorité d'intervention sur le plan d'aménagement et de gestion. Le projet avait pour finalité d'appuyer une gestion participative et durable du SIBE de la Moulouya.

Cette zone humide a fait l'objet de nombreux diagnostics qui ont examiné les déséquilibres et les facteurs conduisant à la dégradation et à la biodiversité de la zone, dont le diagnostic Med Wet et le diagnostic de la Mission Consultative Ramsar. Ces études ont analysé les facteurs de dégradation du site et sa diversité biologique et ont élaboré plusieurs recommandations et mesures de compensation pour faire face à la situation.

D'autres études ont été réalisées par le bureau d'études de l'expert Salah Arrach (2015) et par le bureau d'études « Biotope » (2016).

Les diagnostics ont été réalisés sous forme d'expertises par des spécialistes dans différentes disciplines et ont abouti à l'élaboration d'un certain nombre de rapports résumant :

l'état de la biodiversité, les menaces, les impacts et les mesures à prendre pour pouvoir conserver cette biodiversité. Ces diagnostics ont mis en exergue un certain nombre de pressions et de facteurs intenses de dégradation de la biodiversité et les dysfonctionnements auxquels est soumis le SIBE: Perte et transformation d'habitats, perte de valeurs esthétiques, perte en biodiversité, modifications du fonctionnement hydrologique et de la qualité de l'eau.

Suite à ces diagnostics, d'autres menaces plus sérieuses sont apparues, mettant en jeu l'avenir de ces zones humides et leur biodiversité.

1. Diagnostics de nouvelles menaces

Plusieurs menaces plus sérieuses et plus graves sont apparues à la suite de l'installation de la station balnéaire de Saïdia juste au voisinage du SIBE et de plusieurs stations de pompage qui mettent en jeu tout son devenir. Ces menaces peuvent être annoncées comme suit :

1.1. Forte pression anthropique pendant l'été

La station balnéaire a occupé toute la plage qui restait depuis la ville de Saïdia à la limite du SIBE de la Moulouya, plus de 6 Km de long, ce qui entrave l'installation des visiteurs nationaux sur cette partie de la plage et les oblige à s'orienter vers le rivage du SIBE. De nombreuses pistes d'accès à l'embouchure de la Moulouya ou du côté de l'ancien bras mort de la Moulouya ont été ré-ouvertes et sur lesquelles circulent 4x4, véhicules avec remorques de jet-ski, en piétinant la végétation et les dunes de sables. De nombreux véhicules viennent au SIBE dont la capacité des parkings est largement dépassée pendant la période estivale. Cette pression anthropique constitue une grande source de dégradation du SIBE.

1.2. Impacts de la voie de contournement et du canal de protection des inondations

La voie de contournement ou d'évitement et le canal d'évacuation des crues ont eu des conséquences incalculables sur le devenir du SIBE: Fractionnement de l'habitat, dessèchement des zones humides, dessèchement du marécage des Charba. La nouvelle route d'évitement a scindé le SIBE en deux parties et aura des conséquences très néfastes sur le devenir du SIBE, du fait que le SIBE et ses habitats écologiques ont été fragmentés une fois de plus.

En outre, le canal d'évacuation des crues a privé la zone humide d'une masse d'eau pluviale pour réalimenter la nappe phréatique et adoucir sa salinité, ce qui a induit le dessèchement de la partie nord du SIBE et l'augmentation de sa salinité.

1.3. Impacts du port de plaisance et de son extension sur le rivage du SIBE

D'après les observations que nous avons effectuées sur le terrain, la grande digue construite pour supprimer l'ensablement du port a profondément perturbé les courants marins avec, pour conséquence, la disparition de la plage près de l'embouchure et entre le bras mort et le complexe touristique. Dans ces deux zones, la mer a complètement éliminé la plage et est en train d'attaquer les dunes. Il est donc à prévoir, à moyen terme une invasion par la mer des sansouires du SIBE et, par là même de la station balnéaire.

Par ailleurs, et du fait de l'existence d'une autre dérive littorale de direction Est-Ouest pendant la période estivale, il est à craindre que ce courant marin entraîne les sédiments en face de la nouvelle entrée du port et avec le temps, le port connaîtra, peut-être, avec moins d'acuité, le même problème d'ensablement et verra son entrée obstruée nécessitant des opérations coûteuses de dragage.

Donc, à notre avis et à l'encontre de ce que pensent plusieurs auteurs, le fait de changer d'orientation de l'entrée du Port ne résoudra pas définitivement le problème d'ensablement

auquel il a été confronté depuis sa construction. En plus des autres problèmes relatifs à la distribution des sédiments sur la plage et des problèmes d'érosion et du recul du trait de côte, il faudrait prévoir un dragage en continu de l'entrée du port malgré sa nouvelle digue.

La nouvelle digue constitue un obstacle au transit sédimentaire vers la plage plus à l'Est devant la ville de Saïdia et donc a accéléré le recul du trait de la côte à ce niveau. Ainsi la tendance à l'accrétion du côté Est de la Marina observé par Bouabdallah (2009) semble se stabiliser entre 2009 et 2012 à la suite de l'arrêt du transit sédimentaire avec une tendance à l'érosion. En revanche, la dérive littorale de direction Ouest-Est qui est bloquée par la nouvelle digue entraîne l'engraissement de la digue dans sa partie gauche. En plus, elle provoque un courant cyclique qui érode de plus en plus la plage du côté du SIBE et de la partie adjacente de la station balnéaire. A ce niveau, la mer a complètement éliminé les dunes bordières et le trait de côte a reculé de plus de 20 m entre 2010 et 2014.

1.4. Perturbation du fonctionnement hydraulique de la zone humide de la Moulouya et risque de son dessèchement

Les principaux apports continentaux alimentant le SIBE sont les eaux pluviales locales qui se font à travers les impluviums des marais de Cherarba et de Aïn Chebbak (12 km²). La faible étendue de ces impluviums et les faibles précipitations locales font que les eaux pluviales restent peu prépondérantes dans le bilan hydrologique de ces marécages.

Auparavant, le marais de Cherarba bénéficiait d'une partie des eaux de pluie ruisselant sur les massifs d'Ouled Mansour sur un impluvium de 30 km². Avec la construction du canal de protection contre les inondations de la ville de Saïdia au pied du flanc de la montagne, la totalité des eaux est drainée vers la Moulouya en privant ainsi la zone humide de ces apports.

L'écoulement des eaux de Aïn Zebda et Aïn Chabak afin d'alimenter la zone humide et le bras mort de la Moulouya sont acheminées par un drain vers le marais de Cherrarba. Or depuis la construction de la rocade méditerranéenne qui franchit le drain au moyen de buses et le canal de protection de la ville de Saïdia, la connexion hydraulique entre les deux unités est interrompue et provoque souvent le dessèchement du bras mort (Photos 1 et 2).



Photos 1 et 2 : Dessèchement du bras mort

Le dysfonctionnement de ce drain a privé le marais de Cherarba et du bras mort de la Moulouya des apports d'eau, dont les eaux stockées durant l'hiver, se sont rapidement évaporées sous l'effet du vent et de l'ensoleillement. Ce tarissement provoque la régression du milieu écologique et environnemental de ce marais. Aussi, le tracé de la route côtière qui traverse cette zone en remblai (en élévation par rapport au TN) joue un rôle de barrière contre la remontée des eaux marines.

Par ailleurs, le canal de protection des inondations est devenu une nouvelle source de pollution de la Moulouya du fait que l'exutoire de la STEP de Saïdia déverse directement dans ce canal. Nous avons constaté à plusieurs reprises la mortalité des oiseaux à ce niveau.

1.5. La problématique de l'impact négatif du plan eau 2020-2027 sur la zone humide de l'embouchure de la Moulouya

Après la construction des barrages sur l'oued Moulouya (barrage Mohamed V, barrage Machraa Hammadi, barrage Hassan II, barrage Laghras...) et la construction de stations de pompage d'eau sur la Moulouya à des fins agricoles (station Moulay Ali, station Ouled Setoute, station balnéaire...), la nature biologique de l'embouchure de la Moulouya est menacée de sécheresse, surtout si l'on prend en compte le plan eau 2020-2027, qui a programmé plusieurs nouveaux barrages (barrage Saf Saf, barrage Targa Ou Madi, barrage Béni Azimane à Driouch, et l'élévation du barrage Mohammed V).

Les barrages contrôlent l'eau provenant des montagnes de l'Atlas et du bassin hydrographique de la Moulouya. Le débit de la vallée dans le bassin après le barrage de Machraa Hammadi est alimenté uniquement par les sources d'eau entre le barrage de Machraa Hammadi et Machraa Saf Saf. Plusieurs facteurs menacent d'épuiser ce flux écologique et de priver la Basse Moulouya de ses fonctions écologiques et de ses paysages. Parmi ces facteurs figurent plusieurs stations de pompage telles que la station Moulay Ali, la station de la station balnéaire, la station Ouled Setoute et d'autres stations privées d'irrigation dans l'agriculture ou les espaces verts. Selon les déclarations de Mr le Ministre de l'Agriculture quatre autres stations de pompes seront réalisées sur la basse Moulouya.

- Station de pompage de Moulay Ali :

Ses dimensions sont spécifiées pour un débit maximum de 3,9 m³/s et permettent un volume annuel de 20 à 40 millions de m³, qui varie en fonction du débit disponible dans la Moulouya et en fonction du temps de fonctionnement de la station.

La station de Moulay Ali est située sur Oued Moulouya, après le barrage de Machraa Hammadi. La station a démarré depuis 1995 pour fournir un appui à partir de sources coulant entre le barrage et le terminal. L'énorme quantité d'eau pompée par la station d'Oued Moulouya vers le canal d'irrigation est estimée à 3,9 m³/s, sachant que le débit d'Oued Moulouya en aval du barrage de Machraa Hammadi est estimé par les sources officielles à 7 m³/s, ce qui signifie que cette station pompe 60% du débit écologique d'Oued Moulouya.

- Station de pompage pour la station balnéaire

L'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya a donné son autorisation pour réaliser une station de pompage à côté de l'ancien pont qui mène à Cap de l'Eau et d'une conduite pour refouler les eaux du débit environnemental de la Moulouya pour l'irrigation des terrains de Golf de la station balnéaire de Saïdia.

- Station de pompage Ouled Setoute

Après avoir évoqué ce problème, il est apparu clairement que la nouvelle station de la Commune Ouled Setoute sur la rive gauche, qui a été récemment inaugurée par le Ministre de l'Agriculture en juillet 2020 et mise en marche le 21 Mars 2021 et qui a été mise en place sans études d'impact sur l'environnement (loi 12-03), pompe 1,5 m³/s et représentera 20% du débit écologique de l'Oued Moulouya. Soit, au total, 80% des eaux du débit écologique seront transférées par les deux stations à des fins agricoles au lieu de l'écosystème et de la biodiversité de l'Oued Moulouya.

En définitif, les stations de pompage de Moulay Ali Chrif et de Ouled Setout réalisées pour apporter un volume d'appoint à l'irrigation en agriculture et à l'eau potable ont influé sur le débit écologique de la Moulouya et prélèvent plus de 5.4 m³/s, soit 77% du débit de la Moulouya. Cette situation est aggravée par d'autres stations, soit pour des prélèvements individuels pour les agriculteurs riverains de la Moulouya ou la station de prélèvement d'eau pour l'irrigation des espaces verts de la station balnéaire de Saïdia. Mais malheureusement les prélèvements d'eau du débit écologique de la Moulouya suscitent d'autres envies pour étendre la superficie irriguée du périmètre agricole ou l'alimentation en eau potable des villes des deux rives de la Moulouya. Ainsi ces stations de pompes prélèvent plus de 80% du débit écologique moyen de la Moulouya en aval de Machraa Hamadi.

- Plan d'eau 2020-2027

Quant au plan d'eau de la région, qui vise l'extension du barrage Mohammed V et à construire de nouveaux barrages, notamment le barrage à Machraa Saf Saf, il vise à drainer le débit de la Moulouya et à transférer son flux écologique à 100%.

Le programme actuel arrêté par les autorités marocaines au terme de 2027 prévoit la surélévation du barrage Mohamed V et la construction d'autres barrages sur la Moulouya ou ses confluent. Celui prévu à l'aval de Machraa Hammadi au niveau de Machraa Saf Saf aura des conséquences néfastes sur le débit écologique qui sera détourné pour augmenter la production agricole à haute valeur ajoutée destinée à l'exportation des produits agricoles mais qui aura pour conséquence le dessèchement du cours de la Moulouya et sa zone humide et la dégradation de sa biodiversité marine et terrestre et sa richesse en avifaune.

Conclusion

Les infrastructures et les aménagements touristiques qui sont effectués dans le SIBE de la Moulouya ou dans son voisinage immédiat sont réalisés sans tenir compte du statut particulier de ce site et sans tenir compte de sa valeur écologique et son importance pour la biodiversité. Aucune étude d'impact sur l'environnement, prévue par la loi marocaine 12-03, n'a été effectuée pour prévenir les préjudices et les dommages du SIBE. Une grande partie du projet de la Station Balnéaire de Saïdia a occupé d'ailleurs une partie de la zone humide de ce SIBE dans la rive droite de la Moulouya.

Les travaux effectués par les services de l'Etat notamment par l'ONEP pour la réalisation de la STEP ou par le Ministère des Travaux Publics pour la réalisation de la voie de contournement ou par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya pour la réalisation du canal d'évacuation des crues, ou par la Direction des Ports et du Domaine Maritime pour la construction de la Marina de plaisance et de sa nouvelle digue, ont causé des dommages irréversibles et des dégâts néfastes à la nature et à la biodiversité du SIBE de la Moulouya. Ces infrastructures ont fragmenté les habitats et perturbé le fonctionnement hydraulique des différentes zones humides du SIBE, ce qui a entraîné leur dessèchement et leur eutrophisation. Désormais, le SIBE de la Moulouya a été fortement dégradée à la suite des infrastructures, des aménagements et la construction de la station balnéaire qui ont été réalisés dans le cadre de la nouvelle stratégie du Plan AZUR de la politique menée par le gouvernement marocain pour développer et encourager le tourisme de masse.

Ainsi le Plan National d'Eau d'approvisionnement en eau potable et l'irrigation 2020/2027 retenu pour la région de l'Oriental notamment la réalisation d'un projet de construction d'un barrage en aval du barrage de Machraa Hammadi au niveau de Saf Saf n'est pas cohérent à la politique générale et à la volonté politique déclarée du gouvernement marocain et à ses obligations et ses engagements internationales qui visent à préserver la nature et les zones humides et leur biodiversité. Il n'a pas non plus pris en compte la loi-

cadre en tant que Charte Nationale de l'Environnement et du Développement Durable et le reste des textes juridiques mentionnés ci-dessus pour protéger et prendre en considération le milieu naturel.

Pour ces raisons, il est impératif de reconsidérer ce schéma qui menace le devenir du SIBE de l'Embouchure de la Moulouya de sécheresse, en éliminant sa diversité biologique et en drainant sa zone humide en aval, sous réserve de plusieurs accords internationaux, notamment la Convention de Ramsar et la Convention internationale sur la Biodiversité et la Nature.

Références bibliographiques

- Arrach S (2014): Etude hydrologique de l'embouchure de la Moulouya et proposition de schéma d'aménagement et de gestion (2014).
- BENATA M. (2010). *Impacts écologiques du projet touristique Méditerranéa-Saïdia sur le SIBE Ramsar de la Moulouya*. Rapport de 20 p.
- BENATA M. (2017). *Impacts des actions anthropiques et des aménagements touristiques sur le littoral de Saïdia-Cap de l'Eau*. Thèse pour l'obtention du doctorat "Géomatique et aménagement des littoraux". Université Mohamed 1^{er}, FLSH d'Oujda, 150 p.
- BOUABDALLAH M., LAARUE J-P. (2009). *Évolution du littoral de la baie de Saïdia : dynamique naturelle et impacts des aménagements (Maroc oriental)*. Physio-Géo, Vol. 3, pp 113-130. <http://dx.doi.org/10.4000/physio-geo.878>
- BOUMEAZA T. (2008). *Le littoral du Maroc nord-oriental (Maroc) : Environnement, impact des barrages et synthèse d'évolution de 1949 à 2005*. Actes du colloque "Des littoraux et des Hommes", en hommage à R. Paskoff, Oujda, pp 13-27.
- DAKKI M. (2003). *Diagnostic pour l'aménagement des zones humides du Nord-Est du Maroc*. Vol. 1-5. Secr. Etat Env. / Dptt Eaux & Forêts / MedWet, Projet MedWetCoastMaroc. Etude Biotope Rapport final (2016) <http://gizc.environnement.gov.ma/wp-content/uploads/2016/02/Rapport-Hydrologique-VD.pdf> http://gizc.environnement.gov.ma/wp-content/uploads/2017/05/Rapport_Final_Suivi_Ecologique_Moulouya_01122016.pdf <https://wcd.coe.int/wcd/com.instranet.InstraServlet?command=com.instranet.CmdBlobGet&InstranetImage=1678798&SecMode=1&DocId=1638316&Usage=2> https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/ram71_fr_maroc_aug11_0.pdf https://www.uicnmed.org/web2007/cdflow/conten/2/pdf/2_4_Maroc_MedEC.pdf
- PASKOFF R. (1994). *Les littoraux*. Impacts des aménagements sur les littoraux. Masson, 256 p. Rapport N°71 Mission consultative de Ramsar (2010)
- SALMON M., SBAÏ A., BOUMEAZA T.; BENATA M., OZER A. (2010). *L'érosion des côtes meubles de l'extrême Nord-Est du Maroc*. Bulletin de la société Géographique de Liège, Vol. 54, pp 97-106
- SBAÏ A. (2008). *L'érosion des côtes meubles du Maroc nord-est*. 15^{ème} Rencontre des Géomorphologues marocains. "Le Maroc méditerranéen : Dynamique actuelle et mutations spatiales". Université Abdelmalek Essaâdi. Tetouan, 29-30 mai 2008.
- SBAÏ A., BOUAZZA A. (2002). *Evolution géomorphologique et dynamique récente de la plaine littorale de Saïdia (Maroc NORD-EST)*. In Le littoral méditerranéen oriental : Diagnostic et choix de développement et d'aménagement. Colloque national, 13-14 février 2002, Oujda. P3-30.
- SNOUSSI M (2004): Revue de quelques éléments de base pour l'évaluation des débits environnementaux en Basse Moulouya. Estimation et disposition des débits environnementaux dans les cours d'eau méditerranéens. Concepts, méthodologies et pratique émergente. IUCN? 14p.
- SNOUSSI M., IMASSI M. (2003). *Impact des fluctuations hydro climatiques et des barrages sur l'évolution du trait de côte: delta de la Moulouya*. Université Mohamed V, Faculté des Sciences. Département des Sciences de la terre, Rabat, Maroc.

ÉVALUATION DE L'ANALYSE MORPHOMETRIQUE ET HYSOMETRIQUE DU BASSIN DE L'OUED AMTER (NORD-UEST MAROC) A L'AIDE DE TECHNIQUES DE TELEDETECTION ET DE SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Mohammed EL BRAHIMI¹, Mohamed MASTERE¹, Brahim BENZOUAGH¹, Bouchta EL FELLAH¹ et Najia FARTAS¹

1- Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels (LGRN), Département de Géomorphologie et Géomatique (D2G), Institut scientifique, Université Mohammed V de Rabat, Avenue Ibn Batouta, Agdal, PO Box 703, 10106, Rabat-City, Maroc. *Elbrahimi.mohammed@gmail.com*

RESUME : Cet article vise à évaluer l'applicabilité des paramètres morphométriques (linéaires et surfaciques) pour l'évolution et la gestion des bassins versants. Dans la présente étude, le bassin versant d'Oued Amter (longueur du cours principal de 34,88 km, bassin de 300 km²), a été choisi comme zone d'étude. L'identification des zones à risque d'érosion et la priorisation des 20 sous-bassins versants ont été effectuées en utilisant les paramètres linéaires, topographiques et surfaciques. La recherche a été menée en utilisant les données spatiales du système d'information géographique (SIG). Pour atteindre les objectifs de base, plusieurs paramètres morphométriques ont été calculés, notamment la longueur du flux (Lu) et sa longueur moyenne (Lsm), le rapport de longueur du flux (RL), le ratio de bifurcation (Rb), le rapport de bifurcation moyen (RBM), la densité de drainage (Dd), la texture du drainage (T), la fréquence du flux (Fs), le taux d'allongement (Re), le rapport de circularité (Rc), le facteur de forme (Ff), le relief et le ratio de relief...

L'ensemble des valeurs composées (Cp) calculées nous permet d'établir les rangs de priorité et de classer les sous-bassins versants en trois catégories de priorisation : la catégorie élevée (SBV01, SBV02, SBV03, SBV04, SBV05, SBV06, SBV07, SBV08, SBV15, SBV19 et SBV20), est sujette à une érosion maximale du sol, ce qui nécessite une intervention immédiate pour éviter les risques naturels possibles, La catégorie moyenne (SBV10, SBV11, SBV14, SBV17 et SBV18) et la catégorie faible (SBV09, SBV12, SBV13, SBV16).

Ces analyses morphométriques peuvent donc être utilisées comme un estimateur de l'état d'érosion des bassins versants afin de hiérarchiser les initiatives de conservation des terres et de l'eau ainsi que la gestion des ressources naturelles.

Mots-clés : Morphométrie - Hiérarchisation - Erosion des sols, Oued Amter.

EVALUATION OF THE MORPHOMETRIC AND HYSOMETRIC ANALYSIS OF THE OUED AMTER (NORTH-WEST MOROCCO) BASIN USING REMOTE SENSING TECHNIQUES AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

ABSTRACT: This article aims to assess the applicability of morphometric parameters (linear and surface) for the evolution and management of watersheds. In the present study, the Oued Amter watershed (with a main course length of 34.8871km and a basin area of 300km²) was chosen as the study area, The identification of erosion risk areas and the prioritization of 20 sub-watersheds were carried out using linear, relief and surface area parameters. The research was conducted using spatial data from the Geographic Information System. To achieve the basic objectives, several morphometric parameters were calculated: stream length (Lu) and mean stream length (Lsm), stream length ratio (RL), bifurcation ratio (Rb), average bifurcation ratio (RBM), drainage density (Dd), drainage texture (T), flow frequency (Fs), elongation rate (Re), circularity ratio (Rc), form factor (Ff), relief and relief ratio. .

All the composite values (Cp) calculated enable us to establish priority rankings and classify sub-watersheds into three prioritization categories: the high category (SBV01, SBV02, SBV03, SBV04, SBV05, SBV06, SBV07, SBV08, SBV15, SBV19 and SBV20), subject to maximum soil erosion, requiring immediate intervention to avoid possible natural hazards, the medium

category (SBV10, SBV11, SBV14, SBV17 and SBV18) and the low category (SBV09, SBV12, SBV13, SBV16).

These morphometric analyses can therefore be used as an estimator of watershed erosion status to prioritize land and water conservation initiatives and natural resource management.

Keywords: Morphometry - Prioritization - - Soil erosion – Oued Amter, Morocco.

INTRODUCTION

L'étude des risques naturels dans un bassin versant exige une bonne compréhension hydrologique, géologique, géomorphologique, écologique et climatique afin de déterminer les facteurs qui influent sur l'émergence des risques naturels (le couvert végétal, la pente, l'occupation du sol et le réseau hydrographique). Ces indices sont indispensables pour prioriser les bassins versants et élaborer des programmes visant à lutter contre les risques naturels.

La gestion efficace d'un bassin versant, ainsi que l'étude de la hiérarchisation des sous bassins versants, nécessite l'utilisation des techniques des systèmes d'informations géographiques (SIG) et des modèles numériques de terrain (MNT) de type SRTM, afin d'obtenir une évaluation approfondie de la zone d'étude en termes de pente, de système de drainage, de topographie, de géomorphologie et de lithologie à partir des cartes géologiques. Ces données ont été utilisées dans l'analyse des paramètres morphométriques du bassin versant et des sous-bassins permettant ainsi de prioriser les bassins versants en vue de les protéger contre les risques d'érosion hydrique, d'inondations et de glissements de terrain...

1. Description de la zone d'étude

1.1 localisation géographique

Le bassin versant d'Oued Amter s'étend sur une superficie de 300 Km² et un périmètre de presque 100Km. Il est situé dans la province de Chefchaouen dans la partie nord-occidentale du Maroc, au Sud-Est de la ville de Tétouan (entre Oued Laou et Jebha) dans la région de Tanger-Tétouan-Al Houceima (Figure 1). Le bassin est bordé au nord par la mer Méditerranée au niveau d'un exutoire aux coordonnées X=555115.06 m Y=516611,278 m, et au sud par une chaîne montagneuse (Bab Berred). Il présente un relief montagneux avec des altitudes variant entre 0 m et 2100m (Jebel Tizirane). On observe une diversité de reliefs, comprenant des formes structurales, des dépressions, des ravins...etc. (El Brahimi et al., 2022)..

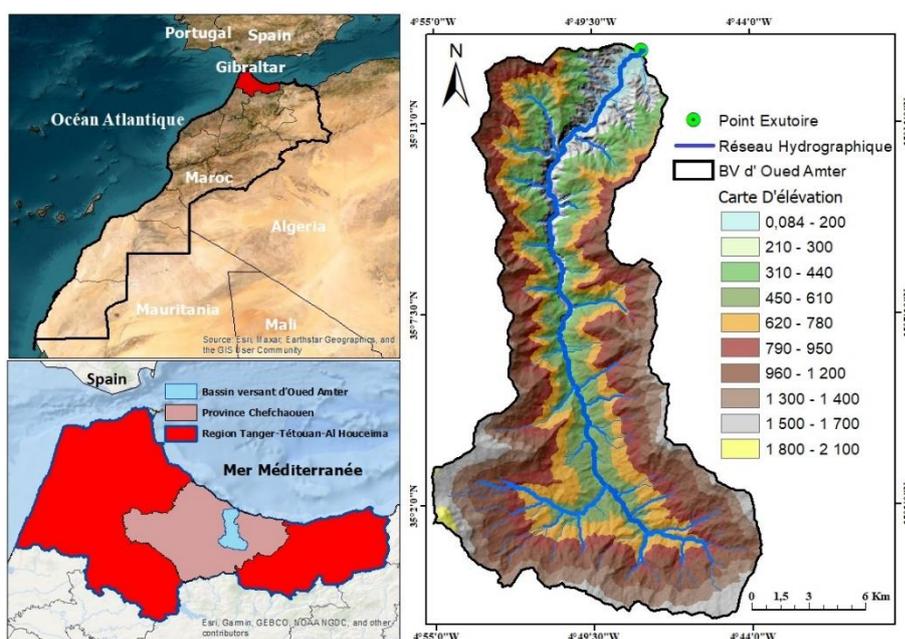


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude

1.2 Cadre géologique

Le bassin versant d'Oued Amter s'étend le long du domaine rifain interne. La géologie de ce bassin joue un rôle capital dans la circulation des eaux de surface. Lorsqu'un bassin versant présente des formations très perméables et est couvert d'une végétation dense, la densité de drainage est faible en raison d'une infiltration importante. En revanche, si les formations géologiques du bassin versant sont imperméables et que la végétation est moins dense, cela favorise la circulation des eaux en surface entraînant une augmentation de l'érosion et donc de la densité de drainage. Ainsi, le ruissellement en surface est devenu plus important que l'infiltration.

Le bassin versant est généralement formé par 3 domaines morpho-structuraux. De l'aval à l'amont on distingue : le domaine interne, Les nappes de flysch et la zone intra rifaine.

L'analyse de la répartition des altitudes montre que l'altitude moyenne de ce bassin versant est de 700m. c'est qui témoigne de la présence d'un relief marqué.

1.3 Cadre Climatique

La zone d'étude présente un climat méditerranéen tempéré par l'influence de la mer avec des hivers plus froids en altitude. Elle présente également une saison humide qui embrasse les mois allant d'octobre à mai, et une saison extrêmement sèche s'étalant du mois de juin à septembre. Les conditions climatiques et la disposition du relief offrent à la zone des potentialités en matière de ressources en eau. La plupart des cours d'eau sont intermittents et ne fonctionnent qu'à la suite de pluies abondantes et continues. Les longueurs de ce réseau hydrographique varient de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres, sans atteindre les 100 km (PAC, 2010).

1.4 Réseau hydrographique

Le bassin versant d'Oued Amter est caractérisé par un réseau hydrographique dense et ramifié. Son évolution au cours du temps est contrôlée par des facteurs internes (la lithologie et les structures tectoniques), des facteurs externes (le climat, le couvert végétal et l'anthropisation) et enfin des facteurs composites (la topographie, facteurs hydrologiques...) des terrains drainés (Mastere, M. 2011). Les affluents s'organisent en un réseau de type dendritique homogène.

2. MATERIEL ET METHODES

L'approche Après la caractérisation des conditions géologiques, topographiques et Bioclimatique du bassin versant d'Oued Amter, l'étude s'est basée sur l'analyse morphométrique du système de drainage de ce dernier, elle a nécessité la délimitation des éléments hydrographiques qui a été faite à l'aide des logiciels SIG à partir des cartes topographiques à l'échelle 1/25000 et le modèle numérique de terrain (MNT). MS Office Excel a été utilisé pour les calculs nécessaires. Après avoir numérisé tous les affluents d'extension et de modèles différents.

Les paramètres morphométriques ont été calculés en utilisant les formules mathématiques conformes, selon les méthodes classiques proposées par Horton (1932, 1945), Strahler (1952, 1957, 1964) et Schumm (1956). Parmi ces paramètres nous avons retenu les valeurs moyennes de tous les paramètres morphométriques (L'ordre de flux (Nu), le rapport de bifurcation (Rb), la densité de drainage (Dd), la fréquence du cours d'eau (Fs), le constante d'entretien du canal (C), le coefficient de compacité (Cc), l'intensité de drainage (Din), le rapport de longueur du cours d'eau (RL), la longueur moyenne du cours d'eau ($L\mu$), le facteur de forme d'allongement (Ff), le rapport d'allongement (Re), le rapport circulatoire (Rc), la longueur de l'écoulement de surface (Lo), le relief du bassin (Rr), le nombre d'infiltration (In), la texture du drainage (T), etc...) ont été calculées afin d'attribuer un classement pour la hiérarchisation des vingt (20) sous-bassins versants.

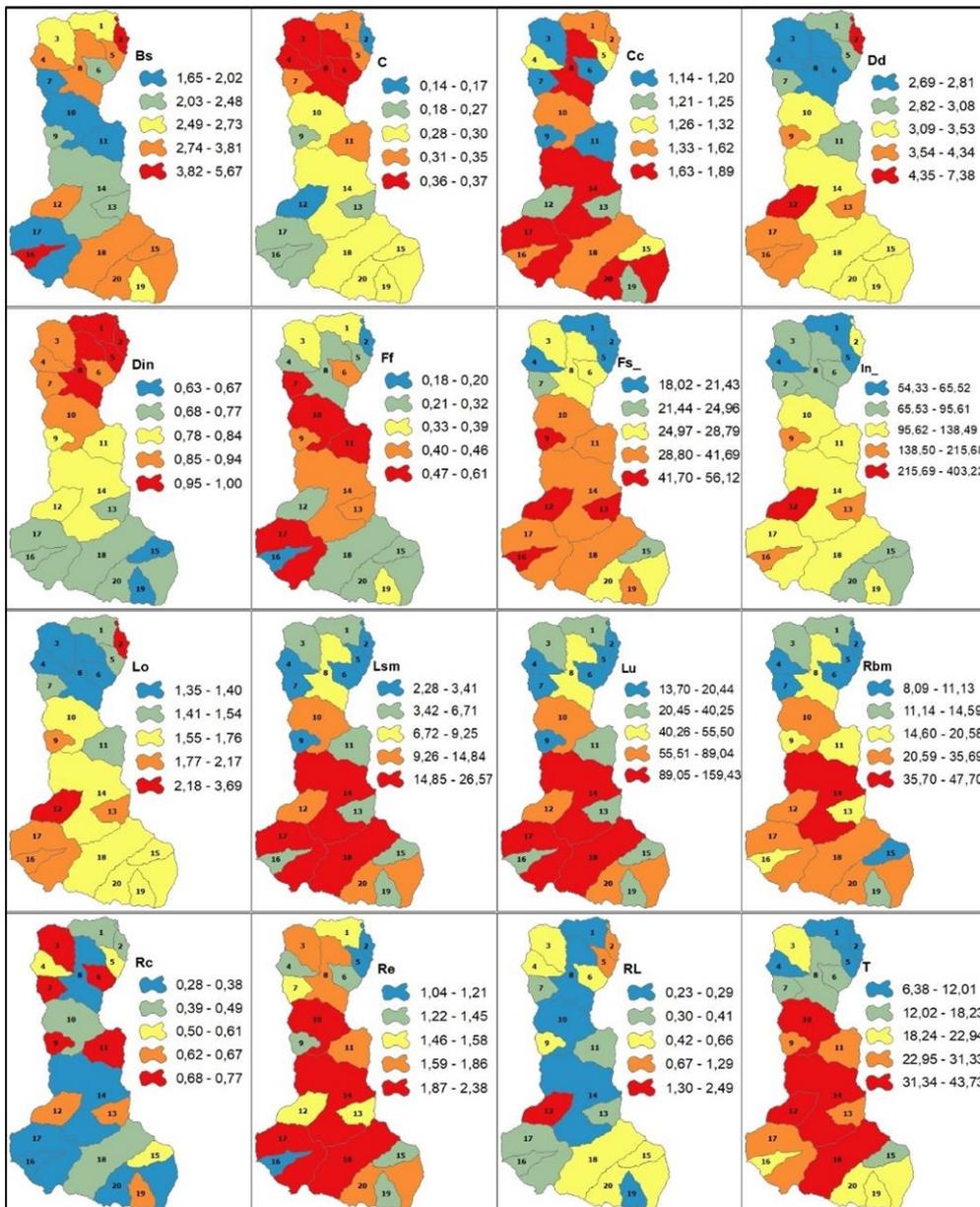


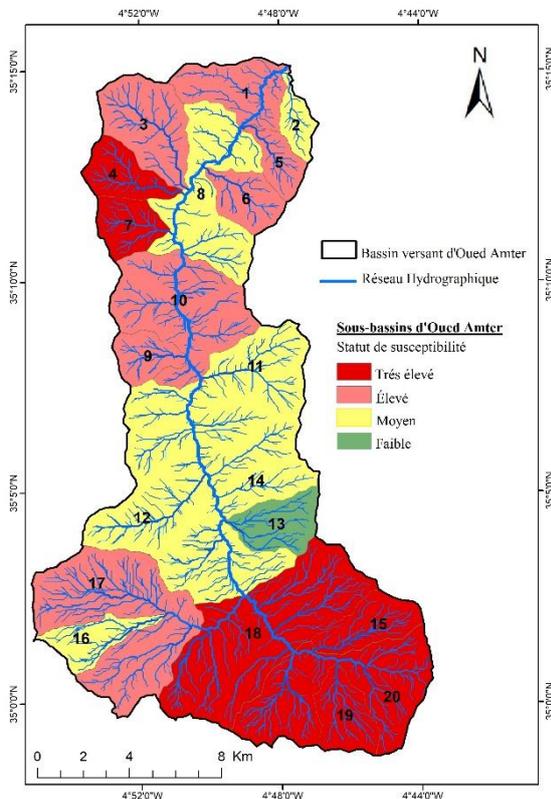
Figure 2. Cartes de paramètres morphométriques dans le bassin versant de l'Oued Amter

3. RESULTATS ET DISCUSSION

La priorisation est le processus de classement hiérarchique ou de liste des sous-bassins versants en fonction de leurs besoins de traitement (Suresh et al. 2004), c'est-à-dire que le bassin versant qui a besoin d'un entretien et d'une gestion plus importants est le plus prioritaire et vice versa. Comme le classement des priorités est attribué dans le but d'améliorer les bassins versants existants, il est toujours préférable de commencer par les bassins versants les plus prioritaires car ils nécessitent plus d'attention (Suresh et al. 2004 ; Gajbhiye et al. 2013a, 2013b).

Dans la présente étude, la priorisation a été effectuée pour le bassin versant d'Oued Amter. Comme il n'est pas possible de prendre l'ensemble du bassin en une seule fois ni de procéder à une évaluation des priorités à l'échelle régionale, l'ensemble du bassin Amter a été divisé en vingt sous-bassins versants. Plusieurs chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes pour classer les sous-bassins versants par ordre de priorité, en se basant sur les éléments suivants les paramètres morphométriques et l'indice de rendement sédimentaire (SYI) (Biswas et al. 1999 ;

Bali et Karale 1977 ; Singh et al. 2014) ; sur la base de l'utilisation et de la couverture des sols (Iqbal et Sajjad 2014) ; sur la base de la géomorphologie et des paramètres morphométriques (Kumar et al. 2011 ; Chandniha et Kansal 2014 ; Meshram et Sharma 2017 ; Yadav et al. 2014). Dans la présente étude, la hiérarchisation (Fig.3) a été réalisée sur la base des paramètres morphométriques (paramètres linéaires et surfaciques) car la couverture surfacique des paramètres morphométriques est étroitement liée à l'érosion du sol et à l'état des eaux de surface et de subsurface (Suresh et al. 2004).



Sur la base des valeurs des paramètres composés, les 20 sous-bassins versants ont été classés en quatre classes de priorité, à savoir faible (rang de priorité final 4, valeur de paramètre composé est 13,18), modérée (rang de priorité final 3, valeurs des paramètres composés comprises entre 11,18 et 11,94), élevée (rang de priorité final 2, valeurs des paramètres composés comprises entre 10 et 10,88) et la classe de priorité très élevée (rang de priorité final 1, valeurs des paramètres composés comprises entre 8,41 et 9,88). Le sous-bassin versant 13 est classé dans la catégorie de priorité faible ; les sous-bassins versants 2,8,11,12,14 et 16 sont classés dans la catégorie des priorités modérées, les sous-bassins versants 1,3,5,6,9,10 et 17 sont classés dans la catégorie des priorités élevées et les autres sous-bassins versants sont classés dans la catégorie des priorités très élevées.

Figure 3. Carte de vulnérabilité à l'érosion des sols du bassin versant de l'Oued Amter

CONCLUSION

La présente étude démontre l'utilité des paramètres morphométriques dans la hiérarchisation des sous-bassins versants d'Oued Amter et dans la formulation de mesures de conservation et de gestion basées sur les conditions de terrain existantes. Les résultats montrent que les sous-bassins versants 4, 7, 15, 18, 19 et 20 nécessitent la plus grande attention en raison de la plus grande susceptibilité à l'érosion du sol, les sous-bassins versants 1, 3, 5, 6, 9 et 17 nécessitent une attention importante en termes de gestion et d'entretien en raison de la vulnérabilité minimale à l'érosion du sol, et les sous-bassins versants restants nécessitent une attention modérée en vue de la protection contre l'érosion, le sous-bassin versant numéro 13 requiert une attention faible. Alors les sous-bassins versants hautement prioritaires sont plus exposés à l'érosion des sols que les sous-bassins versants modérément et faiblement prioritaires.

Il est impératif d'agir immédiatement sur les sous-bassins très sensibles à l'érosion (Très élevé), puis une deuxième fois sur les sous-bassins sensibles (élevé), et ainsi de suite, jusqu'à ce que suffisamment de temps et de ressources soient disponibles pour atteindre les sous-bassins restants.

La zone d'étude est mal mesurée et les données sont rares. Les enquêtes sur le terrain ne sont pas disponibles ou sont inaccessibles. Par conséquent, les résultats de cette méthode

peuvent être utilisés comme alternative pour le contrôle de l'érosion des sols et la sélection artificielle des points de recharge.

En conclusion, on peut dire que les pratiques de culture et les structures de recharges artificielles telles que les barrages et les fossés de contour sont des exemples de mesures de conservation qui peuvent être mises en œuvre dans notre zone d'étude. Ces mesures encouragent le ruissellement de surface tout en augmentant la capacité d'infiltration et en améliorant la capacité de pénétration

Bibliographiques

- MASTERE, M. (2011). L'ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN (RIF CENTRAL, MAROC): ANALYSE SPATIALE, ET MODELISATION PROBABILISTE MULTI-ECHELLE (DOCTORAL DISSERTATION, BREST). [HTTPS://WWW.THESES.FR/2011BRES2070](https://www.theses.fr/2011BRES2070)
- BENZOUGAGH, B., BOUDAD LARBI, P., DRIDRI ABDALLAH, P., & DRISS, S. (2016). UTILISATION DU SIG DANS L'ANALYSE MORPHOMETRIQUE ET LA PRIORITISATION DES SOUS-BASSINS VERSANTS DE OUED INAOUENE (NORD-EST DU MAROC). EUROPEAN SCIENTIFIC JOURNAL, 12(6). [HTTPS://DOI.ORG/10.19044/ESJ.2016.V12N6P266](https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266)
- MOHAMED, M., BRAHIM, B., & NAJIA, F. (2022). QUANTIFICATION OF SOIL SENSITIVITY TO WATER EROSION BY THE RUSLE MODEL IN THE OUED AMTER WATERSHED, NORTHWESTERN MOROCCO. THE IRAQI GEOLOGICAL JOURNAL, 41-56. [HTTPS://DOI.ORG/10.46717/IGJ.55.2C.4MS-2022-08-17](https://doi.org/10.46717/IGJ.55.2C.4MS-2022-08-17)
- SUTRADHAR, H. (2020). ASSESSMENT OF DRAINAGE MORPHOMETRY AND WATERSHEDS PRIORITIZATION OF SIDDHESWARI RIVER BASIN, EASTERN INDIA. JOURNAL OF THE INDIAN SOCIETY OF REMOTE SENSING, 48(4), 627-644. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S12524-020-01108-5](https://doi.org/10.1007/s12524-020-01108-5)
- FARTAS, N., EL FELLAH, B., MASTERE, M., BENZOUGAGH, B., & EL BRAHIMI, M. (2022). POTENTIAL SOIL EROSION MODELED WITH RUSLE APPROACH AND GEOSPATIAL TECHNIQUES (GIS TOOLS AND REMOTE SENSING) IN OUED JOUMOUAA WATERSHED (WESTERN PRERIF-MOROCCO). THE IRAQI GEOLOGICAL JOURNAL, 47-61. [HTTPS://DOI.ORG/10.46717/IGJ.55.2B.5MS-2022-08-21](https://doi.org/10.46717/IGJ.55.2B.5MS-2022-08-21)
- BENZOUGAGH, B., MESHAM, S. G., DRIDRI, A., BOUDAD, L., BAAMAR, B., SADKAOUI, D., & KHEDHER, K. M. (2022). IDENTIFICATION OF CRITICAL WATERSHED AT RISK OF SOIL EROSION USING MORPHOMETRIC AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM ANALYSIS. APPLIED WATER SCIENCE, 12, 1-20. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S13201-023-01963-W](https://doi.org/10.1007/s13201-023-01963-w)
- FANIRAN, A. (1968). THE INDEX OF DRAINAGE INTENSITY—A PROVISIONAL NEW DRAINAGE FACTOR. AUSTRALIAN JOURNAL OF SCIENCE, 31, 328–330. GAJBHIYE, S., MISHRA, S. K., & PANDEY, A. (2013A). PRIORITIZING EROSION PRONE AREA THROUGH MORPHOMETRIC ANALYSIS: AN RS AND GIS PERSPECTIVE. APPLIED WATER SCIENCE, 4(1), 51–61. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S13201-013-0129-7](https://doi.org/10.1007/s13201-013-0129-7).
- GAJBHIYE, S., MISHRA, S. K., & PANDEY, A. (2013B). PRIORITIZATION OF SHAKKAR RIVER CATCHMENT THROUGH MORPHOMETRIC ANALYSIS USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES. JOURNAL OF EMERGING TECHNOLOGY IN MECHANICAL SCIENCE AND ENGINEERING, 4(2), 129–142.