



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)

Hassan Ouakhir

Laboratoire « Dynamiques des Paysages, Risques et Patrimoine »
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Lettres et des Sciences
Humaines, Béni Mellal, Maroc

Nadia Ennaji

Laboratoire « Dynamiques des territoires, Histoire et développement durable.
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, faculté poli-disciplinaire/Taza,
Maroc

Mohamed El Ghachi

Mimoune Goumih

Laboratoire « Dynamiques des Paysages, Risques et Patrimoine »
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Lettres et des Sciences
Humaines, Béni Mellal, Maroc

[Doi:10.19044/esipreprint.9.2022.p174](https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2022.p174)

Approved: 17 September 2022

Posted: 19 September 2022

Copyright 2022 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCES

Cite As:

Ouakhir H., Ennaji N., El Ghachi M., & 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)*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2022.p175>

Resume

Au Maroc, l'érosion est l'un des phénomènes qui entrave le développement économique et social en général, et agricole en particulier, des zones de montagnes. L'analyse des problèmes de l'érosion hydrique à l'échelle nationale, montre que 12,5 millions d'hectares de terres de culture et de parcours, sont réellement menacées par l'érosion. Sa localisation entre la Méditerranée au Nord, l'océan Atlantique à l'Ouest, le Sahara au Sud et au

Sud-Est et sa nature orographique particulière, lui confère une diversité climatique et écologique remarquable. Situé dans le Haut-Atlas Central Marocain, le bassin versant de l'Oued El Abid, évolue dans un contexte climatique méditerranéen semi- aride, avec une pluviométrie très variable dans le temps et dans l'espace. Les versants exposés aux perturbations océaniques d'ouest sont bien arrosés, tandis que ceux faisant face à l'est sont plus secs. Les écoulements sont montagnards, avec un caractère torrentiel. L'occupation des sols est représentée essentiellement par la céréaliculture, avec très peu d'arboriculture qui est pratiquée par les populations locales sur les terrasses fluviales de fonds de ce bassin. Les sols sont de plus en plus dégradés, et la mise en place des accumulations sédimentaires issues de l'érosion, conduisent à l'envasement du barrage de Bin El Ouidane. Cet envasement est le résultat de l'érosion des sols, le sapement et l'incision des berges de l'oued El Abid. Durant les périodes de crues, ce barrage s'envase par les courants de densité. La méthodologie adoptée se concentre sur la réalisation de deux modèles numériques de terrain pour deux campagnes (2016 et 2017), avec une résolution liée à la qualité des mesures, dont la marge d'erreur ne dépasse pas quelques centimètres. Cet article vise à comparer les résultats du processus de l'érosion hydrique de deux modèles réalisés (2016 et 2017), suivre leur évolution, et établir les bilans de la dynamique dans la section étudiée. Cette approche utilisée a permis, la caractérisation de l'état des surfaces, la variation temporelle des facteurs influençant l'érosion fluviale dans l'aval de l'Oued El Abid et de comprendre enfin, les processus de l'érosion hydrique et son influence directe sur la retenue de Bin El Ouidane en aval.

Mots clés : Amont Barrage Bin El Ouidane - Dynamique fluviale - MNT (2016-2017) - Suivi – Quantification

The Creation of a Digital Elevation Model to Determine the Water Erosion Dynamic Within a River Section in the Upper Part of the Bin El Ouidane dam (2016 - 2017) – (High Atlas / Morocco)

Hassan Ouakhir

Laboratoire « Dynamiques des Paysages, Risques et Patrimoine »
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Lettres et des Sciences
Humaines, Béni Mellal, Maroc

Nadia Ennaji

Laboratoire « Dynamiques des territoires, Histoire et développement durable.
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, faculté poli-disciplinaire/Taza,
Maroc

Mohamed El Ghachi

Mimoune Goumih

Laboratoire « Dynamiques des Paysages, Risques et Patrimoine »
Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Lettres et des Sciences
Humaines, Béni Mellal, Maroc

Abstract

In Morocco, erosion is one of the phenomena that influence economic and social development generally, and agricultural development particularly in mountainous areas. Analyzing the problems of water erosion at national scale, shows that 12.5 million hectares of land uses and pastures, are really threatened by erosion. Its location between the Mediterranean region in the North, the Atlantic Ocean in the West, the Sahara in the South and South-East and its orographic nature, makes it remarkable ecological diversity and climatic characteristics. El Abid basin is mountainous area, situated in the Moroccan High Atlas, and is extending over semi-arid Mediterranean climate, with rainfall that varies greatly in time and space. The slopes exposed to ocean disturbances from the west are well wetting, while those facing to the east are drier. The flow is mountainous, with a torrential character. Land use is mainly represented by cereal cultivation, with very arboriculture which is practiced by local populations on the river terraces in the middle of El Abid basin. The soils are degraded and contributed to sedimentary accumulations resulting from erosion which lead to the siltation of Bin El Ouidane dam. This siltation is the result of soil erosion, and the incision of the banks of El Abid river. During flush flood events, this dam is silted up by suspended sediment transport. The adopted methodology focuses on the realization a Digital Elevation Model (DEM)”, for two companions (2016 and 2017), with high spatial resolution,

that is to say with resolutions of a few centimeters to a few meters and with restitution qualities in Z (elevation). The main objective of this article is to analyze the river dynamic results of these the two DEM at 2016 and 2017, comparing the dynamic, following their evolution, and establishing erosion balances at the studied section, when a centimeter precision is required. This used approach allowed to characterize the surface state and the temporal variation of the factors influencing fluvial erosion in El Abid basin. finally understanding, the processes of fluvial dynamics and its impact on Bin El Ouidane dam.

Keywords: Upper part of Bin El Ouidane Dam - River dynamic – Fluvial erosion - DEM- Monitoring and Quantification

Introduction

Le processus de l'érosion est un phénomène géologique naturel, qui a façonné la ressource en sol au cours des âges géologiques (White 1986). Le changement des paysages, sous l'effet des changements climatiques et sous l'influence de l'extension des cultures d'exploitation et de la pression démographique ont augmenté l'exposition des terres à la genèse de ruissellement et de l'écoulement, et par conséquent, à la perte et la dégradation des sols par l'érosion (Vezena et Bonn 2006). Multiples sortes d'activités anthropiques, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, tendent à accélérer les processus d'érosion d'une façon considérable (Wachal 2007).

Au Maroc, les sols diffèrent selon leur résistance à l'érosion, en fonction de la texture, de la structure, de la rugosité, de degré d'humidité du sol (Toumi, et al 2013, Yehiaoui 2012). Dans le contexte des changements climatiques, on estime qu'une grande partie des barrages Marocains, ont été envasés durant les 20 dernières années. Selon le rapport publié par le Comité International des Grands Barrages (CIGB), plus de 50.000 grands barrages existant dans le monde avec une capacité très importante de stockage, souffrent des problèmes de l'envasement, et un taux de 0.5 à 1 % de leur capacité de stockage est perdu chaque année à cause du processus de transport des sédiments (El Ghachi et al 2019).

En conséquence, l'envasement des retenues hydrauliques limite drastiquement leur capacité, et donc leur durée d'exploitation (Lahlou, 1988), et une disponibilité réduite pour l'irrigation des zones agricoles. Ce phénomène naturel enregistre des valeurs élevées notamment au milieu arides et semi arides, comme les régions des Maghreb et plus particulièrement au Maroc. De plus, l'envasement des barrages qui diminue la capacité de stockage et influence la qualité des eaux dans les retenues (Remini 2019).

Par conséquent, l'étude géomorphologique de ce tronçon alluvial, confirme que ceux-ci sont de très bons enregistreurs sédimentaires des

fluctuations de la dynamique fluviale à l'Holocène (Bravard 1991), et nous a permis de quantifier le taux de la dynamique fluviale dans le bassin versant de l'oued El Abid.

I. Présentation du domaine d'étude :

Le bassin de l'Oued El Abid se localise entre les méridiens 6°15' et 6°30'w, et les parallèles 32° et 32°5' N. L'ensemble du bassin versant, occupe une superficie de 7975 km². Le cours d'eau de l'Oued El Abid, prend naissance dans le jbel Masker (3277 m) et s'écoule d'E en W. Il s'étend au cœur du Haut Atlas calcaire, délimité à l'E et au S, par une ligne de hautes crêtes supérieures à 3000 m, le point culminant du bassin tout entier, étant le jbel Azourki (3690 m) (Ouakhir et El Ghachi, 2015). Ce bassin s'étend donc, sur une grande zone montagneuse, avec un potentiel important de ressources en eau qui assure l'alimentation du barrage de Bin El Ouidane et la recharge des nappes de la plaine du Tadla en aval.

D'un point de vue administratif, le domaine d'étude se situe dans la Région Béni- Mellal – Khénifra et s'étend sur plusieurs communes rurales (Ouaouizeth, Bin El Ouidane, Ait Mazigh, Tagleft, Rfala, Bezou, Tissgui ...). Géologiquement, le bassin fait partie du Haut- Atlas central calcaire, où le relief est marqué par une série d'anticlinaux et de synclinaux, coupés par des vallées étroites (Ouaouizerth) et profondes (Fougerolles 1982; Missenard 2006). Il se développe successivement dans de vastes cuvettes, correspondant aux terrains marneux du Crétacé et franchit des gorges profondes, creusées dans les séries calcaires du Jurassique et du Lias (Saidi 2011, Leveque 1952). En plus, cette zone est établie sur une diversité lithologique, qui joue un rôle important dans la vitesse de la circulation de l'eau (Lebaut 2000; Legates et Willmott 1990).

Les caractéristiques hydrogéologiques du substratum sont liées à l'épaisseur et à la nature lithologique, qui déterminent la capacité de stockage de l'eau (Souhel 2001).

En aval du site étudié, le barrage de Bin El Ouidane est en effet, établi dans la partie aval d'une gorge creusée par l'Oued El Abid, dans un banc de calcaires jurassiques, appartenant au flanc sud du Djebel Tazerkount, premier chaînon de l'Atlas en lisière de la plaine du Tadla (Souhel, 2001, El Ghachi et al, 2019).

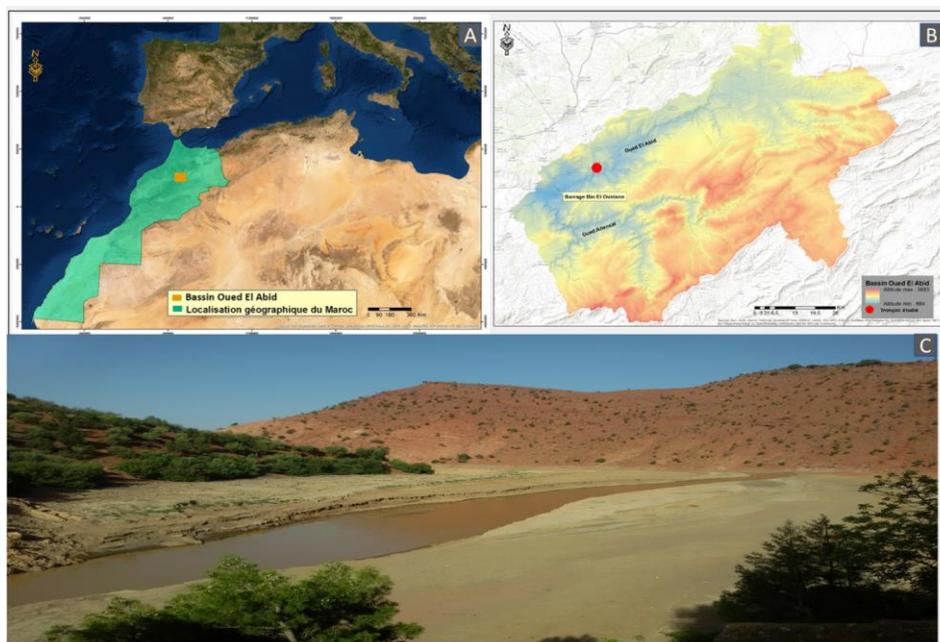


Figure 1 : A) Place du bassin de l'Oum Er Rbia au Maroc B) Présentation du bassin de l'Oued El Abid C) Tronçon d'étude

Du point de vue climatique, le bassin de l'Oued El Abid est soumis à un climat continental semi-aride, caractérisé par des périodes sèches et humides, ainsi que de brusques variations spatio-temporelles des quantités de précipitations (Ouakhir et El Ghachi, 2015). La température est sensiblement influencée par l'altitude élevée du Haut-Atlas Central (Van Den Dries et al 2012). Selon l'indice d'Emberger, au niveau des trois stations météorologiques étudiées (Tilouguit, Sggat, Oulad Sidi Driss : période 1980-2017, figure.2), on constate que le bassin de l'Oued El Abid a une progression climatique à caractères semi-aride, avec une tendance vers le sub-humide (Ouakhir.et El Ghachi.2015, El Ghachi et al 2019). Ces caractéristiques pluviométriques sont dues, à l'importance des effets orographiques et la répartition géographique du relief dans le bassin. Une partie-amont ou les altitudes plus élevées dépassent 2500 m, tandis que la partie- aval se caractérise par la diminution du relief ne dépassant pas 600 m (Morat, 1969). Cette variabilité spatio-temporelle des apports, joue un rôle essentiel dans la diversité observée dans les régimes hydrologiques. Les écoulements passent progressivement du régime pluvial à nivo-pluvial, puis nival au fur et à mesure que l'altitude augmente. Les relevés hydrologiques à long terme de l'oued El Abid à la station Ouaouirnth (1970-2017), montrent des variations annuelles et saisonnières importantes du débit, avec les périodes d'hiver et de printemps, qui représentant généralement 83% de l'écoulement. Les volumes écoulés annuellement sont, dans ce dernier cas, essentiellement concentrés sur la période estivale qui correspond à la fonte du

manteau neigeux (Cherifi et Loudiki 2002). Les écoulements résultant de ce régime torrentiel arrachent les particules du sol, les transportent dans les oueds et les sédimentent derrière les barrages en aval (figure.1 et 2).

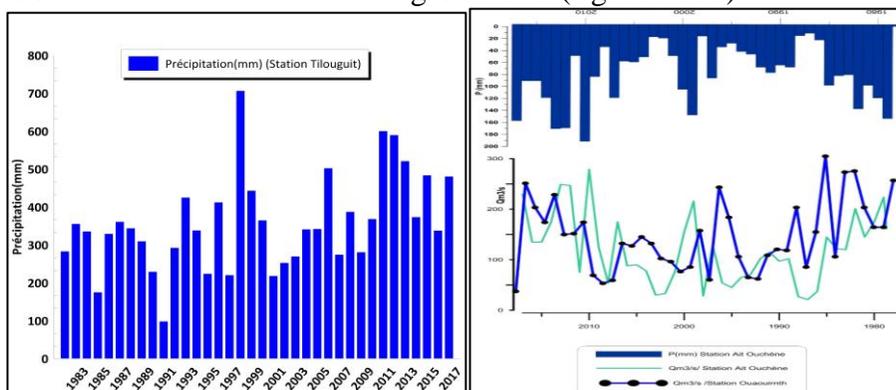


Figure 2: Précipitations et débits annuelles des stations représentatives (Ait Ouchène, Ouaouirnth et Tilouguit).

1.1 Le barrage de Bin El Ouidane : Enjeux et risques :

Le barrage de Bin El Ouidane, est situé à 24 km au Nord de la ville d'Azilal, entre l'Oued El Abid et l'Assif Ahansal (figure3). La réalisation de cet ouvrage a été à but multiple ; irrigation, production de l'énergie électrique et alimentation en eau potable. Sa centrale hydroélectrique produit le quart du courant électrique marocain. Son lac de retenue, d'une superficie de 3800 hectares, est juché à plus de 800 mètres d'altitude, ce qui en fait le barrage le plus haut d'Afrique (Centre Régional d'investissement, 2015).

Actuellement, le barrage de Bin El Ouidane dispose des atouts touristiques très diversifiés, dont certains connus, à l'échelle internationale. Cet ouvrage est aussi en train de devenir un pôle d'attraction des projets touristiques, avec des activités tournant autour de l'eau et du périmètre du lac. Sur cette immense étendue d'eau que cernent les versants rouges de la cuvette de Ouaouizeght, plusieurs sports nautiques sont possibles : jet ski, natation, planche à voile, mais aussi, pêche sportive (Blackbass, Sandre, Brochet...) et chasse, sur les hauteurs boisées environnantes. Aujourd'hui, cette retenue d'eau représente un patrimoine biologique, écologique et environnemental très diversifié dans la région.



Figure 3 : Lac du barrage Bin El Oudane

Il faut reconnaître aussi, que ces barrages ont généré, dans un deuxième temps, de profondes mutations et dégradations environnementales qui sont venues rapidement tempérer, voire annuler les effets positifs recherchés de leurs fonctions initiales. En effet, selon le rapport de 2017 du « ministère chargé de l'Eau et de l'Environnement », les barrages marocains perdent 10% de leur capacité de stockage, soit 1,74 milliard de m³ cumulés jusqu'en 2012 sur les 14 milliards de m³ de la capacité de stockage global. L'envasement des barrages au Maroc retenu annuellement, réduit la capacité de stockage de 75 millions de m³, ce qui représente 0,005% de la mobilisation annuelle de l'eau, avec un déficit total de 1 milliard de dollars par an. Sur une superficie totale de 710 850 km² au Maroc, on estime qu'environ 150 000 km² sont affectés par une grave érosion hydrique et éolienne ((Sabri et al., 2017; Namr et Mrabet, 2004). Situé en aval du tronçon étudié, le barrage de Bin El Ouidane se trouve donc, dans une situation critique à cause de l'envasement. Cet ouvrage a perdu environ de 39% de sa capacité de stockage (Carlo 2007; Dinia et al 1998). Selon des spécialistes du Ministère de l'Eau, le barrage de Bin El Ouidane a perdu de ses capacités de stockage par millions de m³ depuis sa création. L'envasement des barrages constitue donc, les conséquences les plus directes et immédiates sur ces ouvrages hydrauliques dans l'espace et dans le temps.

II. Méthodes, objectifs et Matériels :

II.1. Méthodes :

L'intérêt grandissant des études de l'érosion à l'échelle plurikilométrique et la détermination des problématiques environnementales associées à l'érosion hydrique, ont stimulé l'utilisation des méthodes topographiques très pointues pour la réalisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT), à très haute résolution spatiale pour la représentation en 3D des ravines d'érosion en amont du barrage de Bin El Ouidane. Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis à vis des modalités des écoulements dans le réseau hydrographique de l'Oued El Abid.

Les modèles numériques de terrain (MNT), figurent parmi les outils les plus répandus pour décrire un territoire. Quoiqu'ils soient très pertinents pour étudier l'érosion, ils doivent être utilisés avec précaution. Le modèle numérique de terrain (MNT), est un ensemble de données d'altitudes sous forme numérique. Ces altitudes sont connues en un certain nombre de points d'une grille régulière. La qualité d'un MNT, dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données, à partir desquelles il est généré.

Le calcul du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant de l'oued El Abid, a été effectué en une série d'étapes. – première étape : on a, tout d'abord, procédé à des levés topographiques pour la représentation de la surface étudiée, ses points caractéristiques, tels que les sommets, les ruptures de pentes et autres.... - La deuxième forme est une représentation "vecteur", constituée par un ensemble de polygones qui constituent une planche de courbes de niveau. - La troisième forme, constitue 'une représentation "raster", formée d'un champ, ' d'altitudes connues aux nœuds d'une grille régulière à mailles carrées. - la quatrième étape, repose sur la superposition des données des deux MNT (2016 et 2017), avec l'usage du système d'information géographique (SIG), pour des opérations d'analyse et de modélisation des processus d'érosion. La quantité d'érosion et de sédimentation qui entre dans les polygones inférieurs environnants, est proportionnelle à la longueur de la frontière commune entre le polygone en amont et celui en aval (Eastman, 2006).

Le choix de cette méthode va nous permettre de réaliser un modèle numérique de terrain, qui couvre 180 m en aval du bassin versant de l'Oued El Abid, et environ 3 km du lac de Bin El Ouidane pour deux périodes différentes (2016 et 2017). Ces «MNT» sont réalisées à l'aide des logiciels Surfer et Arcgis10.5. Les différents points d'altitude sont projetés sur Google Earth pro, pour déterminer la variation topographique entre les deux missions et faciliter la comparaison de l'évolution de la dynamique fluviale des périodes de suivis.

2.2 Objectifs :

Le principal objectif de ce présent essai, vise l'élaboration et l'exploitation d'un « modèle numérique de terrain », pour deux missions (2016 et 2017) d'un tronçon à l'amont du barrage de Bin El Ouidane, pour la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du cours d'eau, afin d'apporter des réponses aux questionnaires, en matière d'extrêmes hydrologiques, et des problématiques morphodynamiques, (érosions, atterrissements, incision des lits, etc.).

Finalement, cette étude va répondre à la question : de quelles mesures des cours d'eau à fortes dynamiques et de forts gabarits, répondent à ces règles de fonctionnement, identifiées généralement sur de grands organismes fluviaux pérennes ? La mise en évidence de la dynamique des lits fluviaux, de ce tronçon

amont Barrage Bin El Ouidane, est faite par la réalisation d'un « Modèle Numérique de terrain », durant les années 2016 et 2017.

2.3 Matériels et choix des sites :

Le « modèle numérique de terrain » (MNT) dans le bassin de l'Oued El Abid, a été réalisé par la station topographique (SOKKIA). Cet outil a permis de prendre des levés topographiques fins dans le tronçon étudié. On a procédé à la matérialisation de l'emplacement des sections à lever par des marques au sol, tout au long des deux berges du lit mineur. Puisque le lit mineur peut changer de trace en plan selon les périodes de l'année, on a essayé de garder toujours la perpendicularité de ces sections par rapport à l'axe de la vallée. Par des jalons implantés aux extrémités de la section, et sur les limites du lit majeur, on a repéré les sections au moment du levé des points. Enfin, chaque section portera un numéro et sera réimplanté au terrain par des coordonnées cartésiennes (X, Y et Z) lors des levés ultérieurs. Le sens de numérotation des sections est croissant de l'aval vers l'amont, et le sens de représentation de chaque section est pris de la rive gauche vers la rive droite. Ainsi, nous avons pris des profils transversaux sur le cours d'eau, dans l'objectif de réaliser deux « modèles numériques de terrains », pour suivre l'évolution de la dynamique fluviale actuelle dans le tronçon d'étude entre 2016-2017.

Pour les campagnes, nous avons choisi de réaliser deux campagnes, qui seront réalisées au début de l'été de chaque année : 2016 et 2017.

- La première campagne de levés a été exécutée les 27 et 28 juillet 2016, en ratissant le site en totalité par 17 sections composées d'un semi de 384 points, connus en X, Y et Z et couvrant une superficie de 5km pour une longueur de 427 mètres et dont la largeur varie entre 37 mètres et 258 mètres.

- La deuxième campagne de levés a été exécutée les 12 et 13 mai 2017, en balayant la même zone par 17 sections composées d'un semi de 431 points connus en X, Y et Z.

III. Résultats et explications :

3.1. Résultats et analyses :

En termes de résultats, l'interprétation des MNT réalisés pour les deux missions (2016 et 2017), a permis d'extraire des résultats importants sur la dynamique fluviale dans le bassin versant de l'Oued El Abid. Durant les deux années étudiées, le tronçon d'étude a connu des phases majeures de forte activité caractérisées par un fort transport des matériaux Caillouto-Sableux et une forte érosion latérale, et par l'exhaussement de plusieurs mètres de l'espace de divagation du cours d'eau de l'oued El Abid.

3.2 Réalisation et analyse du « Modèle Numérique de terrain (MNT) » de 2016:

Lors de la réalisation de l'état des levés topographiques, 384 points connus en X, Y et Z ont été localisés et choisis sur l'ensemble du site, avec une altitude moyenne de 813 mètres, avec une topographie relativement plate et une profondeur de 2.30m, la largeur moyenne du chenal est de 20 m, et la longueur est de 250m mètres.

L'utilisation des méthodes d'interpolation pour créer un « MNT », a fait l'objet de beaucoup de recherches, car cette condition a longtemps été une nécessité pour la génération de MNT à partir de données peu denses.

Ce principe peut être appliqué dans la création d'un MNT, lorsqu'il s'agit de déterminer l'information altimétrique manquante. Dans ce cas, la variable d'intérêt est l'altitude, et le MNT est généré en estimant l'altitude des points localisés sur une grille régulière à partir d'un ensemble de points, dont les coordonnées sont connues.

Les résultats obtenus grâce à l'adaptation de ces méthodes, pour la réalisation du « MNT » de 2016, ont révélé une dynamique fluviale actuelle du tronçon étudié, et présente certaines caractéristiques remarquables des variables de réponse (Largeur, profondeur, section mouillée) (figure5).

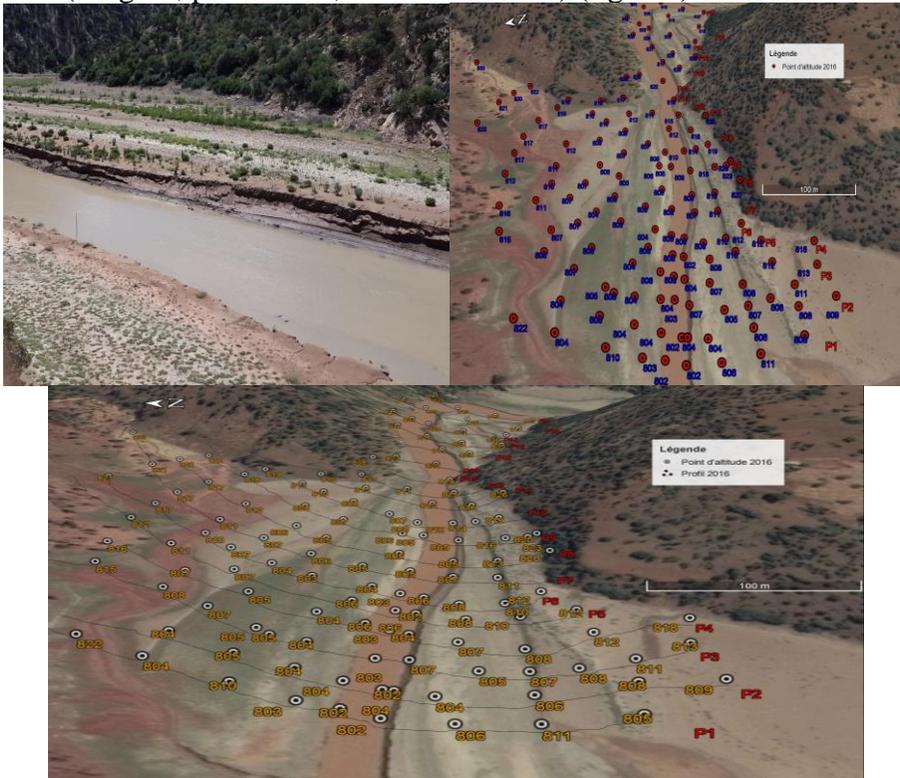


Figure 5 : Choix des points des MNT du tronçon et matérialisation des sections par des jalons de l'oued El Abid 2016

Ces résultats sont donc représentatifs des caractéristiques du lit de la rivière, mises en évidence ultérieurement dans l'analyse des composantes physiques et hydrographiques du site. L'ensemble de ces résultats peut ainsi, servir pour le calcul des paramètres hydrauliques, afin d'établir le lien avec les morphologies fluviales.

3.3 Réalisation et analyse du « Modèle Numérique de terrain (MNT) » de 2017:

Après une campagne de levés topographiques, et en s'appuyant sur la même approche, nous avons exécuté ce M.N.T, les 12 et 13 mai 2017, en balayant la même zone par 17 profils en travers, composées de 431 points connus en X, Y et Z. Dès lors, il est essentiel de générer un MNT exact pour cette nouvelle campagne de mesures.

Les résultats obtenus d'après ce modèle numérique de terrain de 2017, montrent que le tronçon étudié a un fond mobile et dynamique. Les espaces riverains indiquent une évolution des berges, à travers les enrochements par l'érosion latérale. Dans ce sens, et dans certaines parties, le tronçon enregistre des zones de dépôts des matériaux grossiers.

En effet, cet espace peut être considérée comme une zone très sensible aux fluctuations de charge et de débit sur une courte durée. Les résultats déjà produits, devraient contribuer dès maintenant à mieux comprendre la configuration des lits, pour mieux choisir et mettre en œuvre les actions de gestion, de protection ou encore de restauration des hydrosystèmes (figure.6).



Figure 6 : Présentation du MNT du tronçon étudié de la campagne de levé de juillet 2017

3.4 Les « MNT » de 2016 et 2017 : Comparaison et explications :

La modélisation basée sur un élément surfacique rectangulaire, consiste à représenter les deux modèles numériques de terrains (MNT) réalisés en 2016 et 2017, par un ensemble de mailles rectangulaires. Pour des raisons de simplicité, la maille carrée est utilisée en pratique. L'altitude du centre de chaque maille, peut être calculée directement par interpolation, à partir des points mesurés, ou indirectement à partir de triangles obtenus par triangulation (Serra et al., 2008). L'objectif de cette comparaison, est de mettre en évidence les modifications du lit, intervenues dans une échelle temporelle entre 2016 et 2017. Ils permettent d'évaluer certaines caractéristiques géométriques, pentes et sections mouillées et de déterminer ainsi, un calibre du lit du tronçon étudié de l'Oued El Abid. La superposition des deux MNT sur ArcGIS à l'aide de l'outil « Fuzzy Overlay » a permis d'obtenir des résultats importants sur la dynamique fluviale et l'érosion des berges. Les bilans d'érosion, évalués à travers la comparaison entre les deux MNT de 2016 et celui de 2017, deviennent significatifs dans le tronçon étudié et servent à extraire des conclusions intéressantes :

- La dynamique de l'érosion dans les deux MNT étudiées, est présentée dans les figures 7 et 8.
- Le modèle numérique de terrain (MNT) de 2016, montre des contrastes similaires à ceux mis en évidence à partir du MNT de 2017.
- Le MNT de l'année 2017 montre une évolution de la largeur, qui ne peut alors être expliquée que par la sédimentation dans le lit et la végétalisation des berges qui piègent les sédiments. Plus en détail, cette évolution est également inscrite dans la forme des sections mouillées.
- A partir de la superposition des deux MNT de 2016 et 2017, on note que le tronçon a été modifié favorablement, ce qui justifie un temps de réponse très court du cours d'eau de l'Oued El Abid face à la dynamique de l'érosion fluviale.
- La comparaison entre les deux MNT (2016 et 2017), indique comment les formes du lit mineur se sont modifiées en une année.
- À l'exception de certaines zones en amont, les caractéristiques géométriques du tronçon en aval de l'Oued El Abid se sont peu modifiées. Les différences les plus grandes dans la forme des sections mouillées, sont bien plus liées à des actions anthropiques, qui se manifestent dans la remontée des eaux du barrage de Bin El Ouidane, qu'à l'ajustement du cours d'eau.
- Le tronçon étudié est soumis aux phénomènes d'incision, transport et dépôt. Cette évolution du lit est comparable et synchrone avec celle des cours d'eau méditerranéens (Arnaud.F.G1999).
- En termes de dépôts et dans quelques zones du tronçon, on constate une réduction de la charge de fond, qui est, moins due à l'effet des réservoirs

amont de l'Oued El Abid, ainsi qu'à l'impact des digues et des ouvrages de franchissement de cette rivière, dont l'effet a été de bloquer la recharge par érosion latérale.

- Plus en détail, la comparaison de la section mouillée des deux campagnes 2016 et 2017, montre que celle de l'année 2017 est plus importante que celle de l'année 2016.
- La dynamique verticale et le creusement de l'Oued El Abid, sont largement coïncidents avec la naissance des crues inondables

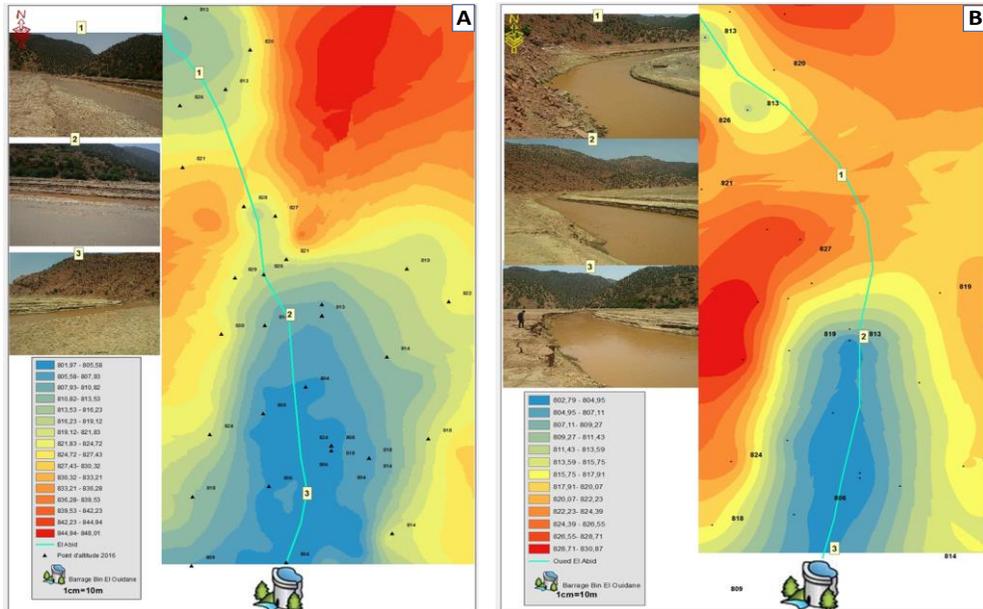


Figure 7 : Les MNT de deux levés topographiques (A) 2016 et B) de 2017

A partir de la comparaison entre les deux MNT 2016 et 2017, il est clair que ce tronçon appartient à des rivières mobiles, qui sont celles des zones dites d'érosion et de transit (Puech et al 2009 ; Schumm1977), où des pics de crue importants confèrent une puissance suffisante pour mettre en mouvement les matériaux de différentes tailles et réaliser un ajustement de la géométrie aux variations des flux liquides et solides. En effet, les paramètres climatiques et hydrodynamiques apparaissent déterminants dans la dynamique fluviale du tronçon étudié (figure7).

VI. Discussion et interprétation :

Le tronçon étudié montre une évolution dynamique multiple. Cette variation se représente essentiellement par les variables de contrôle. Il faut noter que les grandes crues à l'échelle annuelle sont conduites à une modification de ces variables. En effet et à partir de la combinaison des paramètres de contrôle par rapport aux débits de l'Oued El Abid on résulte un

pouvoir d'érosion et de transport qui accélèrent la dynamique et l'évolution de ces variables. On peut distinguer cette évolution à travers la discussion et l'interprétation de différentes variables selon leurs dynamiques entre 2016 et 2017.

Sur la base de la comparaison des deux modèles numériques de Terrains (MNT) 2016 et 2017, les sections mouillées du tronçon de l'Oued El Abid sont caractérisées par de grandes surfaces généralement supérieures à 2 m. De l'amont vers l'aval ; on note une forte variabilité de ces sections mouillées. Les variations les plus faibles se trouvent vers l'amont du tronçon, tandis que les plus fortes sections mouillées se situent à l'aval du tronçon étudié (figure8). Vers l'aval, on note parfois d'importants contrastes sur de courtes distances et les sections les plus grandes dépassent les 5m. On peut également s'interroger, à propos de ces résultats, influencés par la qualité des mesures (plus grande précision des mesures de l'amont), sur les conditions naturelles et les ajustements du lit fluvial à la remontée des eaux du barrage de Bin El Ouidane.

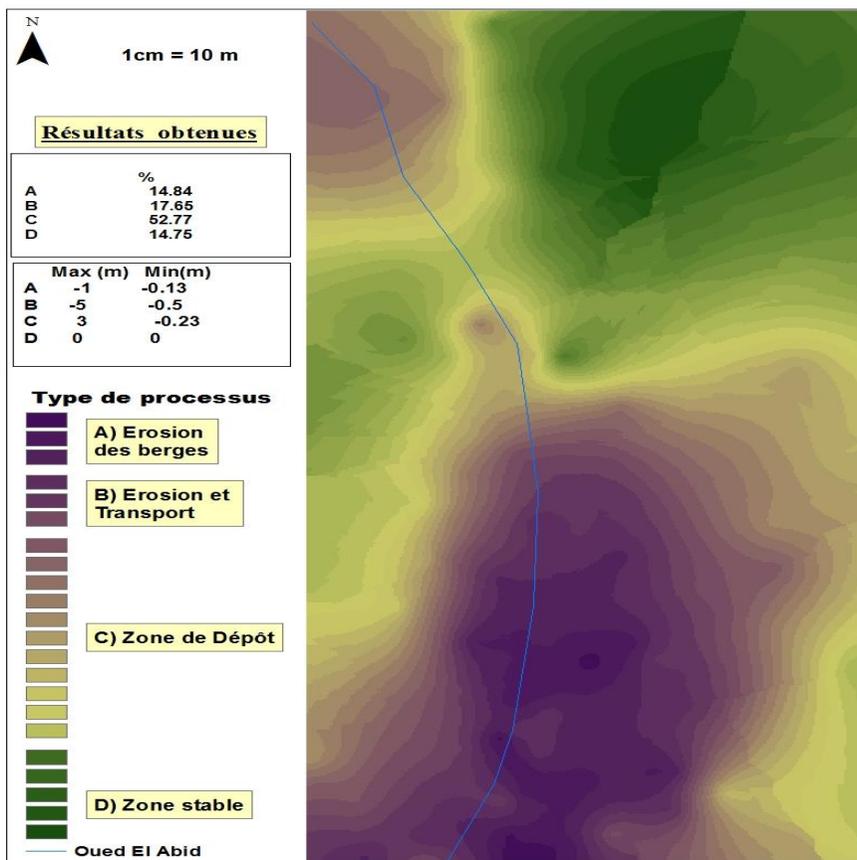


Figure 8: Superposition des MNT et extraction des résultats sur la dynamique sédimentaire 2016 et 2017

Ainsi la variation de la dimension des sections mouillées, constitue-t-elle une donnée peu discriminante des caractéristiques de la dynamique de l'érosion fluviale. Cela confirme la grande influence du remplissage du barrage de Bin El Ouidane. Généralement, les capacités du lit à pleins bords, agissent sur les débordements en lit majeur, en lien avec la hauteur des berges bien marquées, abruptes et continues avant débordement. Cependant, là où les berges sont les plus basses et les sections mouillées les plus grandes, se produisent les débordements les plus fréquents et le remblaiement des fonds des chenaux par le matériel de fin de crues, disposé sous forme de bancs latéraux

On observe une dynamique très forte de déposition qui dépasse 50% (figure 9.B et 8), qui peut être décomposée en deux parties, et dont la moyenne de dépôt varie entre 0.05 cm et 5 m. L'instabilité du paysage fluvial est en partie due à la succession et à l'importance des crues et des crues inondables et aussi des effets du barrage de Bin El Ouidane. Le remplissage du barrage pousse les eaux liquides retenues vers cette zone inondable et contribue rapidement au colmatage par le dépôt de sédiments. D'ailleurs, dans le tronçon étudié, considéré comme une zone inondable, la réduction de la pente superficielle de l'eau et de la vitesse, entraînent l'abandon des fractions les plus dimensionnées de la charge de fond. En effet, les dépôts se font en masse par chute des particules, précédemment maintenues en suspension.

En revanche, l'érosion des berges et le transport sont des processus qui étaient clairement présents dans le tronçon étudié (érosion 15% et 17% transport). Cela rend cette zone, comme un espace à forte dynamique. La différence entre les profondeurs des MNT de l'année 2016 et celui de 2017, indique une variabilité importante des processus dynamiques.

Globalement, de l'amont vers l'aval, on constate une variation de la dynamique, variant entre -0.01cm de l'érosion et 5 m de dépôts dans quelques zones. Cela montre une plus grande fragilité en termes de résistance, face à l'écoulement de l'Oued El Abid. La perte de la charge, tend également vers une constante pour une taille plus fine, ce qui montre que le tronçon étudié est une zone de dépôt, et en même temps, une zone de transfert des sédiments et des matériaux vers le barrage de Bin El Ouidane en aval(figure9AetB).

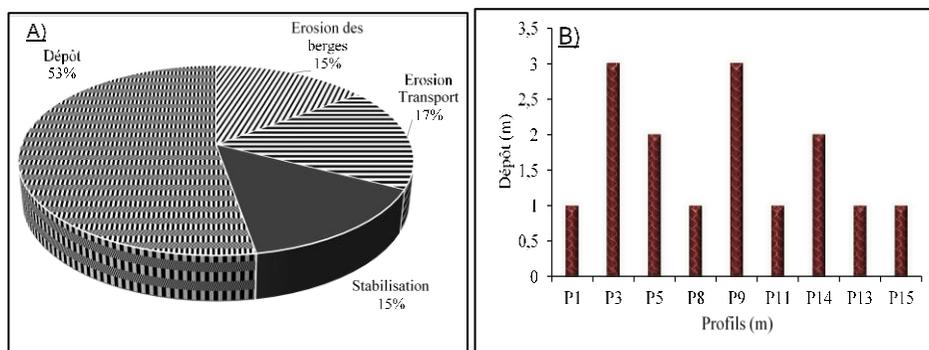


Figure 9 : A) Pourcentage des processus dominants et B) le taux de dépôt dans certains profils 2016/2017

Par conséquent, l'analyse des résultats de l'évolution des processus dynamiques dans le tronçon étudié, pour les deux MNT de 2016 et de 2017, montre que, dans plusieurs profils on peut constater tous ces processus (profils 1,6 ; 7 ; 8,9,10,12,13,16). Plus en détail, les différences sont constatées sur les deux rives de l'oued et vers le lit majeur, l'érosion latérale des berges est une dynamique actuelle et active dans la profondeur, et parfois dans les deux rives. Vers les lits de l'oued, on constate des zones de dépôts, d'érosion et de transport.

Finalement, les deux MNT 2016/2017 montrent que le lit de l'Oued El Abid a une forme irrégulière, en adéquation d'abord avec le tracé de la rivière. Il comprend des bancs d'alluvions fines, souvent végétalisés ou surmontés par une mince tranche d'eau. L'érosion fluviale est variée, selon la vitesse d'écoulement.

Sur la base des théories de la dynamique fluviale, et à travers le tronçon étudié, on peut qualifier le secteur étudié, comme une zone d'érosion, de transit et de dépôt, pour décrire le fonctionnement hydrodynamique de l'oued El Abid.

En se basant sur la trinité de Leeder 1983, on peut distinguer que les écoulements de ce cours d'eau sont de type torrentiel, alimentés par les systèmes fluviaux montagnards en amont où les régimes hydrologiques et hydrauliques sont très dynamiques (Alukha & Regmi, 2013, Garcia & Lorenzo 2009). Les volumes des sédiments transportés sont très abondants, avec une domination de la charge du fond, notamment en amont du cours d'eau, et de type en suspension avec une très grande concentration qui atteint des niveaux extrêmement élevés (jusqu'à 250 g l⁻¹) (Cherifi & Loudiki, 1999), particulièrement dans le tronçon étudié (figure 10,11).



Figure 10: A) Morphologie de l'oued El Abid en Amont et B) en aval (Tronçon étudié) avec très haute concentration de la matière en suspension.

En se basant sur la théorie de Lane , 1955 et de Kondolf, 1994, on note que l'Oued El Abid est influencé par les débits solides et liquides (Gregory&Walling1973), qui entraînent des ajustements de la morphologie, donc, le tronçon étudié peut être considéré comme une zone de dépôt, et en même temps d'érosion, contrôlées par des variables hydrauliques très importantes.

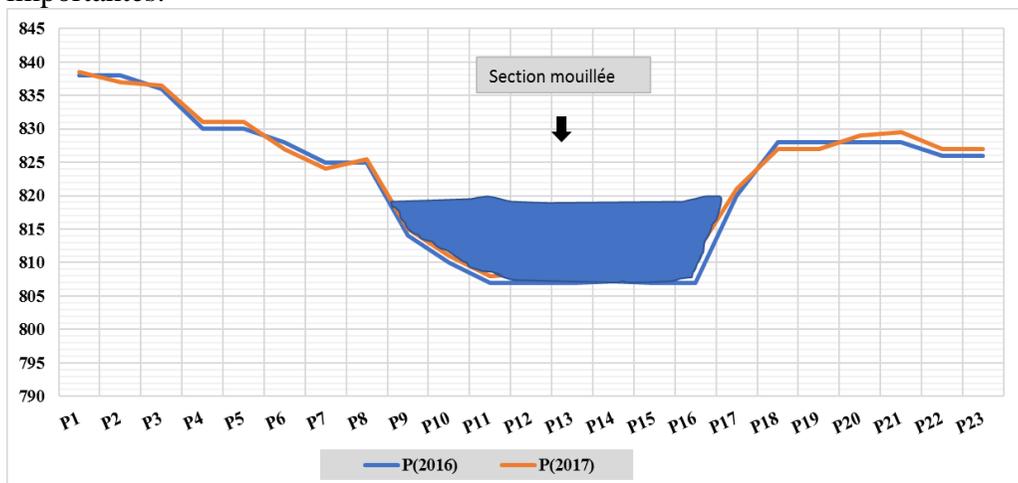


Figure 11: Superposition des altitudes moyennes entre les deux levés topographiques 2016 et 2017

Conclusion

A l'instar des résultats obtenus dans cet article, on retient que la conjugaison des facteurs naturels et anthropiques, favorise les processus d'érosion hydrique dans le tronçon étudié et conduit également, à l'envasement du barrage de Bin El Ouidane. Les deux MNT étudiés montrent l'existence d'une forte dynamique.

La localisation du tronçon étudié dans la portion médiane du bassin de l'Oued El Abid et le pseudo équilibre entre le processus d'érosion sur la rive

gauche et le processus de dépôt sur la rive droite, prouve que la zone d'étude est une zone d'érosion, de dépôt et de transit.

En effet, les phénomènes d'érosion et de dépôts, participent aux réajustements morphologiques de la rivière de l'Oued El Abid. Par conséquent, les sections fluviaux sont des zones ajustables, de manière à améliorer les écoulements et le transport de sédiments en suspension.

En marge de cet article, la question de la lutte antiérosive, ne peut être pas se focaliser seulement sur l'espace étroit du tronçon étudié, mais à l'ensemble du bassin versant, en tenant en compte des méthodes et des techniques culturales, de l'aptitude des sols, de la fertilisation, du type d'aménagement antiérosif adapté au contexte de la zone, de la durabilité des écosystèmes et aussi, des aspects socioéconomiques. Cette nécessaire doit être se doubler en terme de la vision prospective des systèmes fluviaux, qui connue par une dynamique suffisante de l'évolution historique et actuelle des morphologies fluviales.

Remerciements

L'auteur tient à remercier vivement l'agence de bassin hydraulique de l'Oum Err Bia (*ABHOER*) pour fournir les données pluviométriques et hydrométriques. Mes remerciements vont aussi à la population locale de la zone de Ouaouizerth pour leur aide et leur hospitalité durant le travail de terrain.

Conflits d'intérêts

Les auteurs de cet article annoncent qu'aucun conflit d'intérêt concernant la publication de ce manuscrit.

References:

1. Alukha, J & Regmi. A (2013) : Suivi hydrogéomorphologique d'un cours d'eau étouffé par un aménagement d'urgence : cas du cours d'eau Bonhomme- Morency au bas-ST-Laurent, Québec.1-34.
2. Arnaud,F.G. (1999) : Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. *L'information Géographique*, 63(1), 37–38.
3. Bravard.J. P, (1991): La dynamique fluviale a l'épreuve des changements environnementaux. Quels enseignements applicables a l'aménagement des rivières? *Houille Blanche*, 46(7–8), 515–521. <https://doi.org/10.1051/lhb/1991047>
4. Carlo. L, (2007) :Management of reservoirs, Pages 117-123 | Published online: 02 May 2007.
5. Cherifi .O, (2001) : Apports du bassin versant et processus trophodynamiques du lac de Barrage de Bin El Ouidane (Maroc)291p.

6. Cherifi.O, Loudiki, (2002) : Impact of El Abid River Basin Loads on Water Quality of the Bin El.
7. Cherifi.O, Loudiki, M. (1999): Flood transport of dissolved and suspended matter in the El Abid river basin (Morocco). *Hydrobiologia*, 410, 287–294. <https://doi.org/10.1023/A:1003898301704>
8. Dinia.N, Chaoui. A, Bischof. R, (1998): Vidange du fond et evacuateur de crue du barrage a contreforts d'al massira sur l'Oum Er Rbia, Maroc.pp3-16.
9. Eastman J.R, (2006) : Idrisi Andes Manuel: Guide to SIG and Image Processing. Worcester, USA, Clark University, Idrisi Production, 250 p.
10. El ghachi.M, Ouakhir.H, Lamti.H, (2019) : Dynamique fluviale dans l'oued El Abid : Suivi et quantification d'un tronçon fluvial à l'amont du barrage de Bin El Ouidane - 2016 / 2017- (Haut Atlas Central / Maroc), 45–63.Publié en <http://revues.imist.ma/?journal=remageom>.
11. Gregor.K.J,Walling,D.E, (1973): Drainage basin form and process: a geomorphological approach.book.Published by Edward Arnold,London.
12. Lahlou A., (1988) : Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc. *Rev. Sci. Eau*, 6(3), 337-356.
13. Leveque.P, (1952): Geologie Appliquee aux Grands Travaux du Maroc (Zone francaise). Fascicule I. Les aménagements de l'Oued el Abid. Published by XIX Congrès Geologique International Monographies Regionales, 3 Serie, Maroc No. 5, 1952, 165 pages. (1952).
14. Monographie régionale 2014.
15. Morat.P, (1969) : Note sur l'application a Madagascar du quotient pluviothermique d'Emberger pp 16-23.
16. Namr K. I, Mrabet.R, (2004):Influence of agricultural management on chemical quality of a clay soil of semi-arid Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 39:485-489. doi: DOI 10.1016/j.jafrearsci.2004.07.016.
17. Ouakhir.H, El Ghachi.M, (2015) : L'impact des lâchés du barrage de Bin el Ouidane sur l'aval du bassin Oued El Abid : Inondations anthropiques et cartographie (bassin Oum Err Bia – Maroc).PFE 2015.FLSHBM. 262P.
18. Puech, C., Thommeret. N, Kaiser.B, Bailly J.S, Jacome.A, Rey.F, & Mathys.N, (2009): MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests Relief. *Processus, Environnement*, 15(2), 141–152. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7589>
19. Recensement-general-de-la-population-et-de-l-habitat-2004-2014.
20. Remini B.,Hallouche W, (2005) :Prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. *Larhyss J.*, 4, 69-80.

21. Remini.B, (2019) : Envasement des barrages dans les regions arides exemples. January 2016.
22. Saaidi.E, (2011) :La géologie du Maroc, pp1 -45.
23. Sabri.E. M, Boukdir. A, Meslouhi.R, El Mahboul.A, El Romaric.V, & Mbaki. E, (2017): Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in Oued El Abid Watershed , Morocco. Athens Journal of Sciences, 4(3), 225–242. <https://doi.org/10.1177/0047287514541005>
24. Schumm.S.A, (1977): The fluvial system. New York, 338 p.
25. Serraa.P, Ponsab.X, Sauría.D, (2008): Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. Land Use Policy, Volume 57, 2016, pp. 204-214.
26. Souhel.A, El Bchari.F, (2011): Haut Atlas Central, Partie Nord-Ouest, North-western Central High Atlas, éditions du service géologique du Maroc-rabat.p306.
27. Toumi, S., Meddi. M, Mahé. G, & Brou.Y.T, (2013): Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. Hydrological Sciences Journal, 58(7), 1542–1558. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>.
28. Van Den Driessche, J., & Teixell, A. (2012). Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): The role of tectonics. Tectonics, 31(4), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011TC003015>
29. Vezena.K, et Bonn.F, (2006) : Modélisation et analyse de la dynamique spatio-temporelle des relations société–érosion et pollution diffuse en milieu agricole—étude de cas en Vietnam et au Québec. Interaction Nature–Société, analyse et modèles. UMR6554 LETG, LaBaule.
30. Wachal.D.J, Banks.K.E, (2007) : Integrating GIS and erosion modeling—a tool for watershed management, ESRI international user conference, Paper no. UC1038. http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc07/papers/papers/pap_1038.pdf [accédé le 8 juillet 2013].
31. White.W.R., (1986). Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, Projet 5.3 du programme hydrologique international. Paris:UNESCO, Etudes et rapports d'hydrologie no. 35.http://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SR_035_F_1986.pdf [accédé le 8 juillet 2013].
32. Yahiaoui.A, (2012) :Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Thèse de doctorat : École Nationale Polytechnique El Harrach, Alger (Algérie).