

Apport du SIG et de l'MNT-SRTM à l'étude morphométrique et hydrographique d'un bassin versant en zone semi-aride : cas d'oued Souani -Tunisie.

Arbi.Chafai¹, Nadhem.Brahim

¹ Laboratoire Plantes, Sols et Environnement LR21ES01, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 2092 Tunis

Résumé

L'eau est une ressource indispensable pour toutes les formes de vie sur terre. Elle présente le cœur du développement socio-économique, du fonctionnement des écosystèmes et de la survie humaine. Toutefois, cette ressource peut se transformer en une catastrophe naturelle engendrant de multiples risques naturels tels que les ruissellements, l'érosion hydrique, les inondations et les glissements de terrains. Pour faire face à ces risques, la protection de cette richesse nécessite une étude préalable des caractéristiques morphométriques des bassins versants, qui jouent un rôle crucial dans le ruissellement des eaux de surface. L'objectif de cette recherche est d'évaluer les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani en utilisant les techniques SIG et les modèles numériques de terrain (MNT) de type (SRTM) avec une précision de 30 m. Ces outils constituent actuellement les techniques les plus avancées pour élaborer des cartes thématiques et extraire automatiquement les différents paramètres qui caractérisent la zone d'étude (forme, relief, réseau hydrographique, pente) avec une grande précision et en un temps limité. Les résultats obtenus forment une base de données contenant toutes les mesures et les formules mathématiques nécessaires qui permettent d'étudier la géomorphologie du bassin versant étudié, de comprendre leurs caractéristiques hydrologiques et de planifier des stratégies de prévention face aux risques naturels.

Mots clés :: Bassin versant, Oued Souani, SIG, MNT, Caractéristiques morphométriques, Tunisie.

Contribution of GIS and DEM-SRTM to the morphometric and hydrographic study of a watershed in a semi-arid zone: case of Souani River – Tunisia

Abstract

Water is an indispensable resource for all forms of life on earth. It lies at the heart of socio-economic development, ecosystem functioning and human survival. However, this resource can be transformed into a natural disaster, generating multiple natural hazards such as runoff, water erosion, flooding and landslides. To cope with these risks, protection of this resource requires prior study of the morphometric characteristics of watersheds, which play a crucial role in surface water runoff. The objective of this research is to evaluate the morphometric and hydrographic characteristics of the Souani River watershed using GIS techniques and Digital Elevation Model (DEM) of the type (SRTM) with a precision of 30 m. These tools currently constitute the most advanced techniques for developing thematic maps and automatically extracting the different parameters that characterize the study area (shape, relief, hydrographic network, slope) with great precision and in a limited time. The results obtained form a database containing all the necessary measurements and mathematical formulas which make it possible to study the geomorphology of the watershed studied, to understand their hydrological characteristics and to plan prevention strategies in the face of natural risks.

Keywords: Watershed, Souani River, GIS, DEM, Morphometric characteristics, Tunisia.

¹ Corresponding author: geologue.arbi@hotmail.com

I. INTRODUCTION

Un bassin versant est une zone de recueil des eaux de ruissellement et d'infiltration qui alimentent les rivières et les ravines et qui se rassemblent vers un même point, le plus en aval du réseau hydrographique, connu sous le nom d'exutoire. Le bassin versant est délimité par les lignes de partage des eaux, lignes théoriques de plus haute altitude qui font le tour de l'ensemble du bassin et déterminent la direction de l'écoulement des eaux de surface [1, 2, 3]. En outre, les bassins versants sont fondamentaux pour les études hydrologiques [4] et la protection et la conservation des ressources naturelles [5].

L'étude des risques naturels dans un bassin versant nécessite une connaissance approfondie de l'hydrologie, de la géologie, de la géomorphologie, de l'écologie et du climat afin de déterminer les éléments qui influencent sur la naissance des risques naturels (le couvert végétal, la pente, l'occupation du sol et le réseau hydrographique). En effet, les caractéristiques morphométriques sont les plus déterminantes pour les écoulements dans un bassin versant [6, 7]. Selon Narmatha et al. (2013) [8], ces mesures sont les premières prises par les géomorphologues afin de mesurer théoriquement l'impact de la morphologie du bassin sur le comportement hydrologique. Elles désignent les premières mesures réalisées par les géomorphologues pour quantifier théoriquement l'influence de la morphologie du bassin sur le comportement hydrologique [8]. Les premières études morphométriques dans le domaine de l'hydrologie ont été menées par Horton en 1940 et Strahler en 1950 [9]. Ainsi, l'analyse morphométrique est une approche importante pour la hiérarchisation des bassins versants, même sans tenir compte de la carte des sols [10].

Plusieurs paramètres quantitatifs importants peuvent être utilisés pour comprendre la dynamique d'un bassin versant : la surface, le périmètre, la longueur, la largeur, l'indice de compacité de Gravelius, l'indice de pente, la pente moyenne du cours d'eau, l'altitude maximale, l'altitude minimale [11]. L'analyse quantitative de ces paramètres morphométriques est donc largement utilisée dans les études consacrées à l'évolution des bassins versants et facilite la compréhension des processus topographiques et des propriétés physiques des sols. Elle fournit également des informations utiles pour résoudre efficacement divers problèmes naturels, tels que les sécheresses, l'érosion des sols et les inondations, ce qui aide considérablement à planifier des stratégies de prévention des catastrophes dans ces bassins versants et à comprendre leurs caractéristiques hydrologiques [12, 5].

Les méthodes traditionnelles employées pour l'analyse des caractéristiques physiques des bassins versants sont principalement basées sur des techniques manuelles et les résultats sont souvent imprécis. De nos jours, l'avènement de nouveaux outils tels que les SIG et les différents types d'imagerie satellitaire, il est devenu plus facile de déterminer différents paramètres tels que la forme, le relief et la classification des réseaux hydrographiques.

La présente étude avait pour but de faire ressortir les caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani en utilisant les techniques SIG et les modèles numériques de terrain (MNT). Ces outils sont souvent utilisés pour l'analyse morphologique et ont le potentiel de fournir des informations spatiales précises pour la gestion des bassins versants et la prévention des catastrophes naturelles [13, 14, 5].

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Site d'étude

Géographiquement, le petit bassin versant d'oued Souani est situé au Nord-ouest de la Tunisie, dans la zone d'Esmirat de la délégation de Rouhia du gouvernorat de Siliana (fig.1). Ce bassin versant est l'un des six lacs collinaires programmés en 2015 par le Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) du gouvernorat de Siliana. Le projet s'inscrit dans le cadre des stratégies tunisiennes de protection des ressources naturelles et de développement du secteur agricole dans les zones montagneuses. Le climat de la zone d'intérêt est de type semi-aride inférieur avec des hivers frais. Compte tenu de l'absence de station pluviométrique dans le bassin versant d'oued Souani, et après une grille détaillée, nous avons décidé que la station de Majbare Skarna était la plus proche (4 km) de la zone d'étude. Sur la période 1980-2011, les précipitations annuelles moyennes ont atteint un maximum de 553,35 mm en 2003, tandis que l'année la plus sèche a été 1988-1989, avec des

précipitations totales de 153,10 mm. En termes d'hydrologie, les eaux de surface du bassin proviennent du cours d'eau principal représenté par oued Souani.

D'un point de vue géologique, le bassin s'étend sur quatre unités lithologiques, presque toutes formées de matériaux crétacés. Ces séries géologiques sont traversées par une série de failles NW-SE et N-S. Dans la partie aval, où se trouve le bassin, les couches géologiques correspondent à des marnes grisâtres et verdâtres alternant avec des interlits calcaires de la formation du Kef. Dans la partie aval, les couches géologiques correspondent à des marnes grisâtres et verdâtres alternant avec des interlits calcaires de la formation du Kef. Le pendage des couches est faible, 10° en aval, et peut atteindre 20° et 30° en dehors du bassin versant (Fig.3). En fait, la coupe géologique AB (Fig.3) montre que la cuvette du bassin correspond à une fermeture synclinale légèrement inclinée vers la rive gauche. Les pieds des berges sont recouverts par les dépôts alluviaux récents sous forme de terrasses à matrice argileuse.

Il existe trois principaux types de sols dans ce bassin versant : les sols minéraux bruts sont les plus répandus, représentant 44,1 % des sols du bassin, ils sont superficiels et résultent d'une érosion importante ; sols complexes (35,9%) ; et des sols peu développés, profonds et situés dans la partie aval, très proches de l'exutoire. Cette classe de sols couvre 20 % de la superficie totale du bassin versant.

La répartition spatiale des sols dans le bassin d'oued Souani indique différentes zones d'occupation à savoir les terres agricoles (céréalicultures, oliveraies) ont une superficie de 27,1 ha, soit 13,8% du bassin versant. Cette zone est très dégradée et actuellement traversée par plusieurs ravines, du fait de la présence de fortes pentes au niveau du Djebel Skarna, ce qui génère des vitesses élevées au niveau des écoulements. La formation forestière (forêt, garrigue et garrigue claire) domine sur ce bassin, elle occupe un espace très important de 138,9 ha, soit environ 70,8% de la superficie du bassin versant. Cette zone subit aussi une dégradation remarquable. Les forêts sont formées par des chaînes de pins d'Alep (*Pinus halepensis*). Les zones de parcours représentent 12,6% de la superficie totale et se trouvent principalement dans la partie Nord-Est du bassin versant près de l'exutoire. Le reste de la zone du bassin est occupé par des terrains nus.

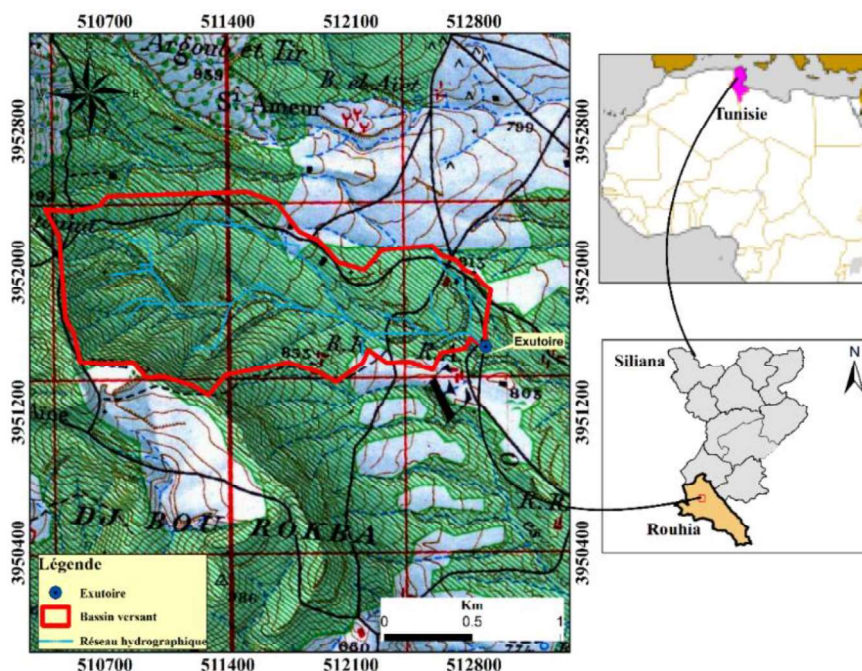


Fig.1- Situation géographique de la zone d'étude

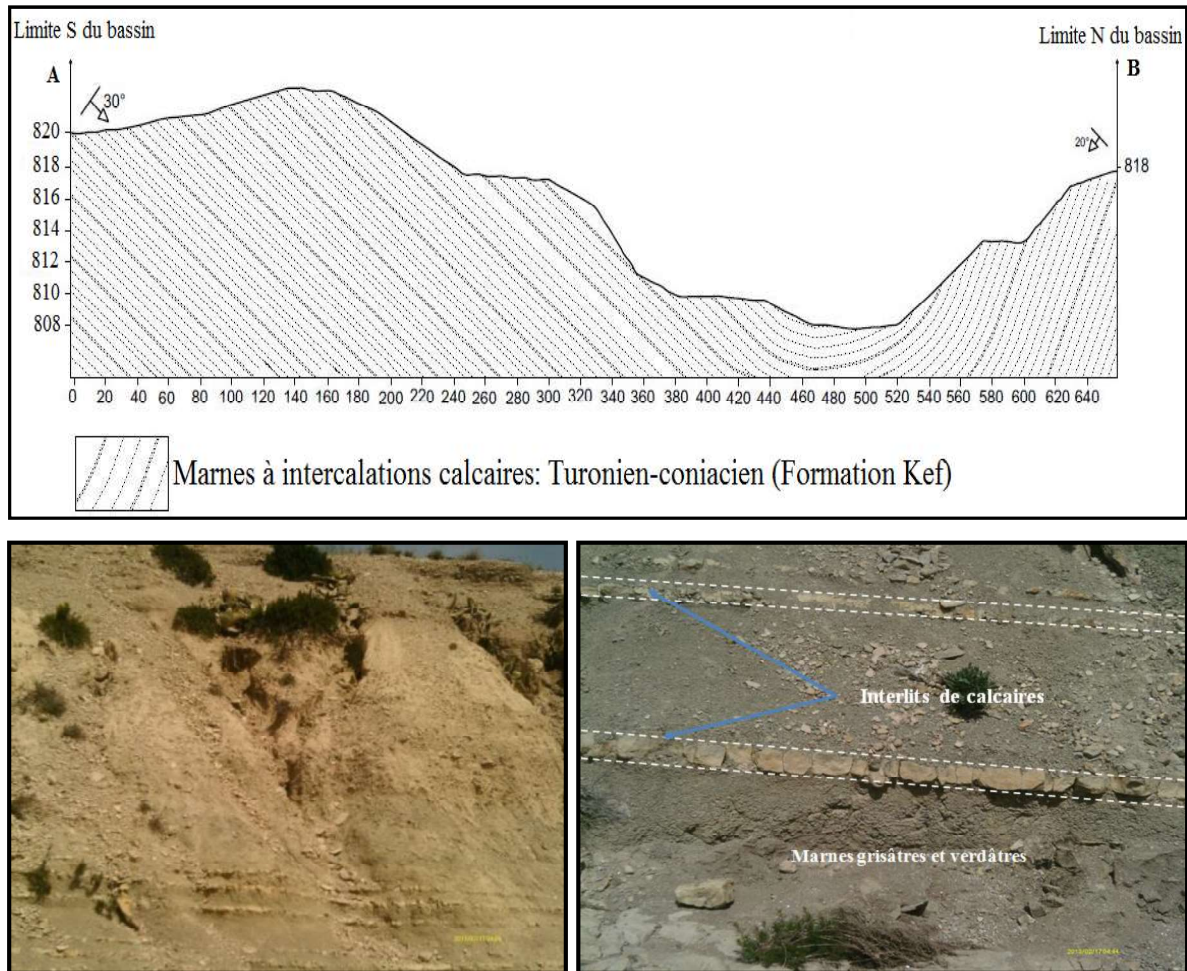


Fig.2- Alternance des marnes grisâtres et verdâtres avec des inters-lits de calcaire (épaisseur d'environ 5 à 10 cm) de la formation Kef

2.2 Base de données

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé une image satellitaire de type SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) d'une résolution de 30 x 30 mètres, téléchargée depuis le site : <http://opentopo.sdsc.edu/datasets>. Le traitement d'images MNT (Modèle numérique de terrain) a permis de délimiter la zone d'étude, d'extraire plusieurs cartes thématiques et d'évaluer différents paramètres morphométriques, topographiques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani. Le logiciel Arc GIS 10.3 a été utilisé pour traiter les données de cette étude. Ainsi, nous avons utilisé la carte topographique et géologique au 1/50 000 de la zone d'étude du Djebel Barbrou, Rouhia. L'organigramme de la méthodologie du travail est représenté par la figure ci-après (Fig. 3)

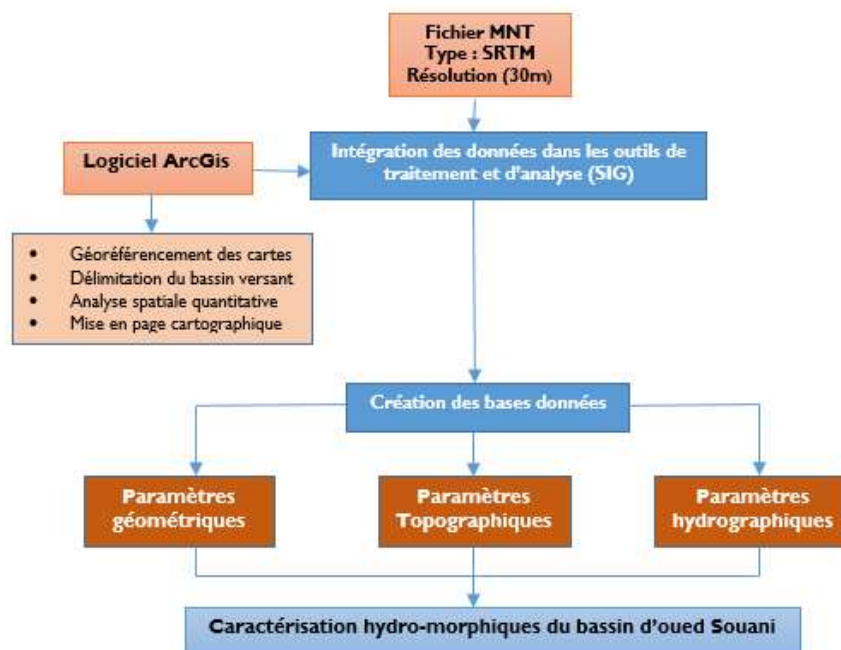


Fig. 3 - Organigramme d'étapes d'élaboration des paramètres hydro-morphiques du bassin étudié

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques géométriques

La forme du bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est-à-dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent sur l'hydrogramme de crue [15]

3.1.1. Surface (S) & Périmètre (P)

La surface est un facteur clé dans la caractérisation morphométrique des bassins versants. Il indique la zone où tombent les précipitations et où les cours d'eau sont alimentés. Le périmètre représente toute irrégularité du contour ou de la limite du bassin versant [10, 15, 16]. C'est un indicateur de la taille du bassin versant [17]. Ces deux paramètres fournissent des informations importantes et précieuses dans l'étude des bassins versants. La superficie et le périmètre du bassin versant d'oued Souani ont été déterminés à l'aide du logiciel Arc GIS. Il couvre une superficie de $A=1,96 \text{ km}^2$ et a un périmètre de $P = 6,78 \text{ Km}$

3.1.2. Indice de compacité de Gravelius K_G

L'indice de compacité de Gravelius K_G (1914) [18] est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant (P) au périmètre d'un cercle de même superficie. Il donne une idée sur la forme du bassin versant qui a une influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme. L'indice de compacité est obtenu par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \times S}} \approx 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{Eq.1}$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

S : superficie du bassin versant (km^2)

P : périmètre du bassin (km)

L'indice de compacité est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Cet indice permet l'évaluation globale du réseau de drainage : plus le bassin est compact, plus sa forme est ramassée, plus l'indice de Gravelius est faible et plus le temps de concentration est court [19].

Pour le bassin versant d'oued Souani, $K_G = 1,36$, le bassin a une forme allongée. Sa direction d'allongement est Sud-Est. Il est parallèle à la direction de l'écoulement de l'eau. Cette forme entraîne une érosion assez importante des sols.

3.1.3. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent correspond à une transformation géométrique du bassin versant. Elle prend alors une forme rectangulaire tout en conservant la même surface, périmètre et indice de compacité, et donc la même distribution hypsométrique [16]. La longueur et la largeur du rectangle équivalent sont calculées à l'aide des deux formules suivantes de Musy et Higy (2004) [20] :

$$L = \frac{K\sqrt{S}}{1.12} \times [1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2}]; \quad l = \frac{K\sqrt{S}}{1.12} \times [1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2}] \quad \text{Eq. 2}$$

Avec : L : Longueur du rectangle équivalent, l : Largeur du rectangle équivalent, A : Surface du bassin versant, K : Indice de compacité de Gravelius.

Pour le bassin concerné, $L = 2,66$ km et $l = 0,74$ km. Ces dimensions du rectangle équivalent signifient que la longueur est 3,59 fois supérieure à la largeur. Ils permettent de tracer le rectangle équivalent du bassin versant d'oued Souani (Fig. 6), à partir des données de la carte et de la courbe hypsométriques (Fig. 4 et 6 et Table. 2). Les caractéristiques physiques déterminées sont résumées dans le tableau n°1.

Table 1- Caractéristiques géométriques du bassin versant d'oued Souani

Surface	Périmètre	Indice de compacité	Longueur du rectangle équivalent	Largeur du rectangle équivalent
1,96 km ²	6,78 Km	1,36	2,66 km	0,74 km

3.2. Caractéristiques topographiques

L'étude des caractéristiques topographiques est un aspect essentiel pour comprendre le comportement hydrologique des bassins versants, car de nombreux phénomènes hydrologiques et climatiques changent en fonction du facteur altitude, comme les précipitations et la température.

3.2.1. Carte hypsométrique

La carte hypsométrique du bassin versant d'oued Souani a été obtenue par traitement des données à l'aide du modèle numérique de terrain de la zone d'étude (Fig.4). En effet, nous avons classé les altitudes du bassin en neuf tranches espacées de 30 m (Table.1). Ces résultats ont permis de tracer la courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Souani, qui offre une vue synthétique de la pente du bassin versant et représente la répartition de la superficie du bassin versant en fonction de son altitude. Ainsi, la forme de cette courbe permet de déterminer le degré d'érosion et de caractériser l'état de maturité du relief des bassins versants (jeune, en équilibre et vieux) [19].

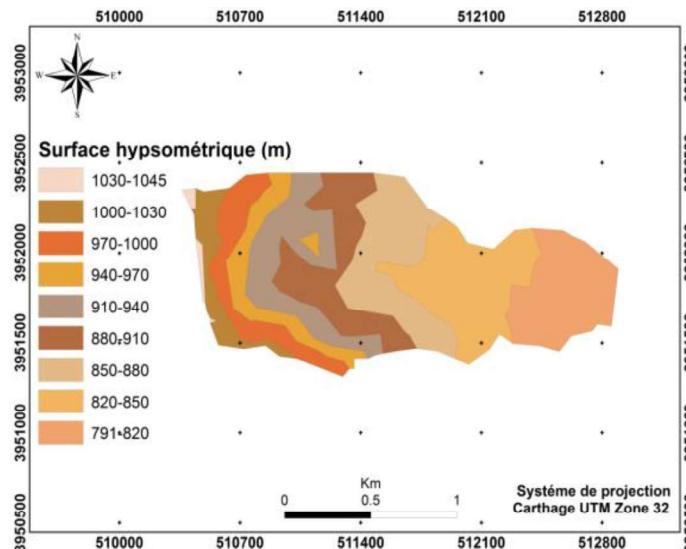


Fig.4-Carte hypsométrique du bassin versant d’oued Souani

La carte hypsométrique montre des tranches d'altitude équidistantes de 30 m. Ces tranches sont généralement orientées E-W. Les zones de haute altitude sont situées dans la partie amont du bassin, tandis que les zones de basse altitude se trouvent à l'ouest et autour du lac à flanc de rivière Souani (Fig.4). Cette différenciation altimétrique favorise l'écoulement des eaux de surface au sein du bassin.

Table 2- Distribution hypsométrique du bassin versant d’oued Souani (chaque 30 m)

Altitudes (m)	Surfaces partielle		Surfaces cumulée		Hi (m)
	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	
1030-1045	0,016	0,82	0,016	0,82	1037,5
1000-1030	0,105	5,36	0,121	6,18	1015
970-1000	0,170	8,67	0,291	14,85	985
940-970	0,147	7,5	0,438	22,35	955
910-940	0,263	13,42	0,701	35,77	925
880-910	0,268	13,67	0,969	49,44	895
850-880	0,328	16,74	1,297	66,18	865
820-850	0,366	18,67	1,663	84,85	835
791-820	0,297	15,15	1,960	100	805,5

Le rectangle équivalent montre que les courbes de niveaux sont assez serrées en amont du bassin versant, indiquant que cette partie du bassin présente une forte pente et un relief assez élevé. Ils deviennent progressivement plus espacés vers l'exutoire du bassin versant, à mesure que la pente diminue et que la zone devient plus plate (Fig. 5).

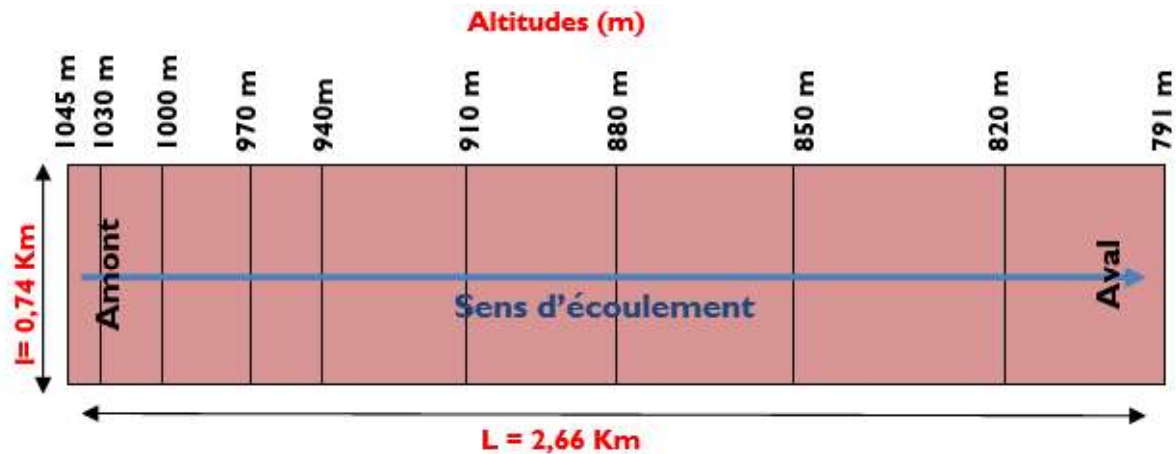


Fig. 5- Rectangle équivalent pour le bassin versant d'oued Souani

La courbe hypsométrique montre l'état d'équilibre du bassin de l'oued Souani. Le potentiel d'érosion est donc moyen. La classe d'altitude dominante se situe entre 791 m et 880 m, elle occupe environ 51% de la superficie totale du bassin versant, ses zones représentent les plaines et les versants. Les zones à très haute altitude (> 940 m) comme : Djebel Bou Rokba couvre une faible surface ne dépassant pas 23 % (Fig.6).

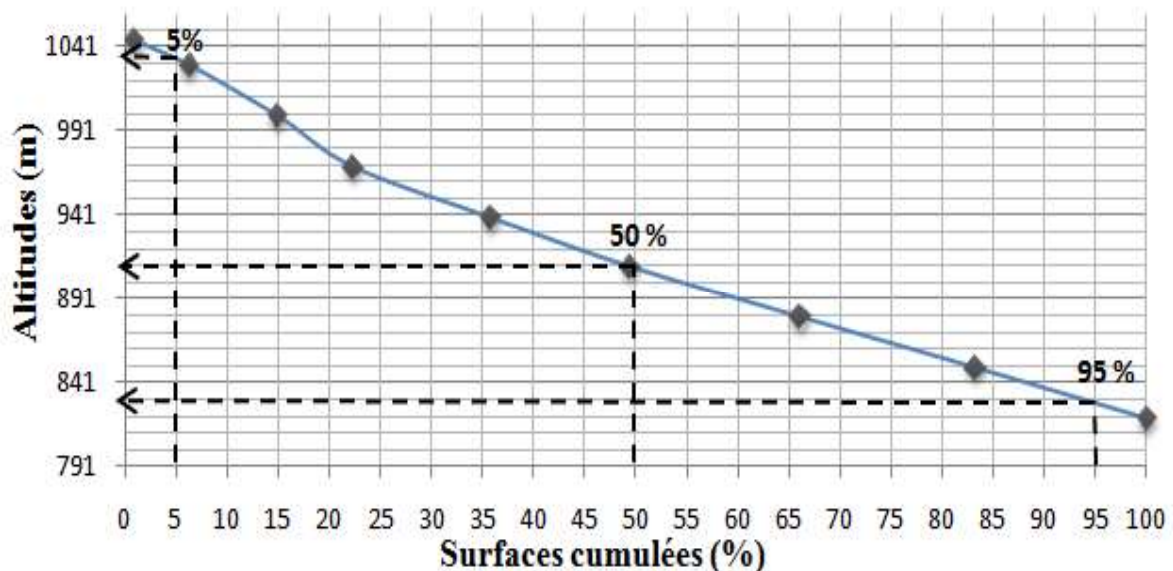


Fig. 6 - Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Souani

3.2.2. Altitudes caractéristiques

Les principales élévations du bassin versant d'oued Souani sont extraites directement du modèle numérique de terrain (MNT) et de la courbe hypsométrique (Fig.4 et 6).

- L'altitude maximale (H_{\max}) : **1045 m**
- L'altitude minimale (H_{\min}) : **791 m**
- L'altitude correspond à 5% de la surface ($H_{5\%}$) = **1031 m**
- L'altitude correspond à 95% de la surface ($H_{95\%}$) = **831 m**

Les altitudes maximale et minimale permettent de caractériser le bassin versant et de déterminer son amplitude altimétrique. Ils sont également nécessaires au calcul de la pente moyenne [17]. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin versant, tandis que l'altitude la plus basse correspond généralement à l'exutoire.

3.2.2.1. Altitude moyenne

L'altitude moyenne peut être déduite de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. Il est défini par la formule suivante.

$$H_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \times H_i}{S} \quad \text{Eq. 3}$$

Avec :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin (m).

S_i : Surface comprise entre deux courbes de niveaux i et $i+1$ (Km^2).

H_i : Altitude entre ces deux courbes de niveaux successives (m).

S : Surface totale du bassin versant en Km^2

L'altitude moyenne du bassin versant d'oued Souani est $H_{moy} = 899 \text{ m}$, calculée manuellement à l'aide de la formule ci-dessus et du tableau 2.

3.2.2.2. Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la superficie totale du bassin, sur la courbe hypsométrique [21]. L'altitude médiane de notre bassin versant au point de 50% de la surface totale est approximativement égale à **911 m**. Cette valeur est proche de celle de la moyenne (**899 m**). L'écart (**12 m**) résulte de la courbe hypsométrique qui a une pente régulière.

Table 3 - Altitudes caractéristiques et dénivelée du bassin versant étudié

B.V d'oued	H_{max} (m)	H_{min} (m)	$H_{5\%}$ (m)	$H_{50\%}$ (m)	$H_{95\%}$ (m)	(D) (m)
Souani	1045	791	1031	911	831	200

3.2.3. L'indice global de pente I_g

L'indice de pente global déterminant le relief d'un bassin versant est défini comme étant le rapport entre la dénivelée (D) qui sépare les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sur la courbe hypsométrique et la longueur du rectangle équivalent [22].

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad \text{Eq. 4}$$

Avec :

D : Dénivelée (m)

L : longueur de rectangle équivalent (km)

Dubreuil (1971) [21] a montré que cette première classification du relief basée sur l'indice global de pente (I_g) donné par l'ORSTROM est applicable à de petits bassins versants d'environ 25 km^2 de superficie. La superficie du bassin versant cible n'excède pas 25 km^2 , il est donc inclus dans ce classement (Table .4). L'indice de pente global est de **0,075 m/m, son relief est donc fort (R6)**.

Table 4 - Classification du relief selon l'ORSTOM (lg) (bassins versants < 25 km²)

Classe	Valeurs d'lg	Classe des reliefs
1	lg < 0.002	Relief très faible
2	0.002 < lg < 0.005	Relief faible
3	0.005 < lg < 0.01	Relief assez faible
4	0.01 < lg < 0.02	Relief modéré
5	0.02 < lg < 0.05	Relief assez fort
6	0.05 < lg < 0.1	Relief fort
7	0.5 < lg	Relief très fort

3.2.4. Le dénivelé spécifique

Le dénivelé spécifique (Ds) est le produit de l'indice de pente global (lg) par la racine carrée de la superficie totale du bassin versant (S) [23].

$$D_s = lg \times \sqrt{S} \quad Eq.5$$

Avec :

lg : indice global de pente (m/m)
 S : superficie du bassin versant (m²)

Cette deuxième classification (Table 5) ne tient pas compte de la superficie du bassin versant, elle est applicable à tout bassin quel que soit sa superficie [21].

Table 5- Classification du relief de l'ORSTOM (Ds)

Classe	Valeurs de Ds	Classe des reliefs
1	Ds < 10 m	Relief très faible
2	10 m < Ds < 25 m	Relief faible
3	25 m < Ds < 50 m	Relief assez faible
4	50 m < Ds < 100 m	Relief modéré
5	100 m < Ds < 250 m	Relief assez fort
6	250 m < Ds < 500 m	Relief fort
7	Ds > 500 m	Relief très fort

La pente spécifique (Ds) du bassin versant d'oued Souani est de l'ordre de **105 m**, (100 m < Ds < 250 m), ce qui permet de le classer dans une catégorie correspondant à un relief **assez fort (R5)** (Table 5). Ces deux derniers indices confirment que ce bassin est caractérisé par un relief accidenté, le rendant très sensible à l'érosion des sols.

3.2.5. Pente

La pente joue un rôle très important contre le phénomène d'érosion. Il est utilisé pour démontrer la capacité d'un ruissellement à arracher et transporter les particules. Plus la pente est élevée, plus l'effet de la dégradation du sol est important. La cartes des altitudes et des pentes de la zone d'étude ont été produites par le modèle numérique du terrain MNT du type SRTM avec une résolution de 30 m × 30 m à l'aide d'un système d'information géographique (Arc-GIS).

3.2.5.1. Pente du bassin versant d'oued Souani

La topographie de la zone d'étude est relativement accidentée, caractérisée par une variation altitudinale importante, allant de **791 m** à l'exutoire à **1047 m** (Fig.7).

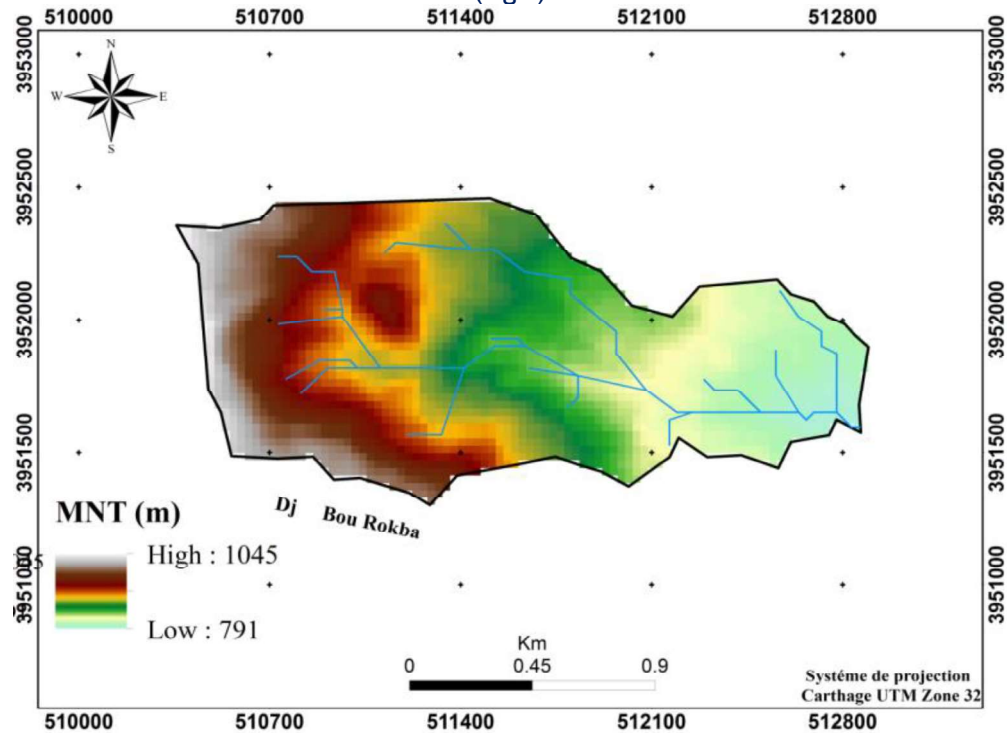


Fig. 7 – Carte des altitudes du bassin versant d'oued Souani

Le bassin versant d'oued Souani prédomine (63% de la superficie du bassin versant) sur des pentes moyennes à très raides définies principalement dans le haut relief du Djebel Bou Rokba. Avec ces classes, le ruissellement est concentré et la vitesse augmente, ce qui explique l'apparition de certaines formes d'érosion (ravines et ravins) (Fig. 9) et inversement les classes de faibles pentes qui favorisent le décapage superficiel des sols. Toutefois, les faibles pentes sont concentrées dans les plaines (Fig. 8). En fait, environ 37 % du bassin versant présente une classe de pente faible à très faible (moins de 10 %) (Table 6).

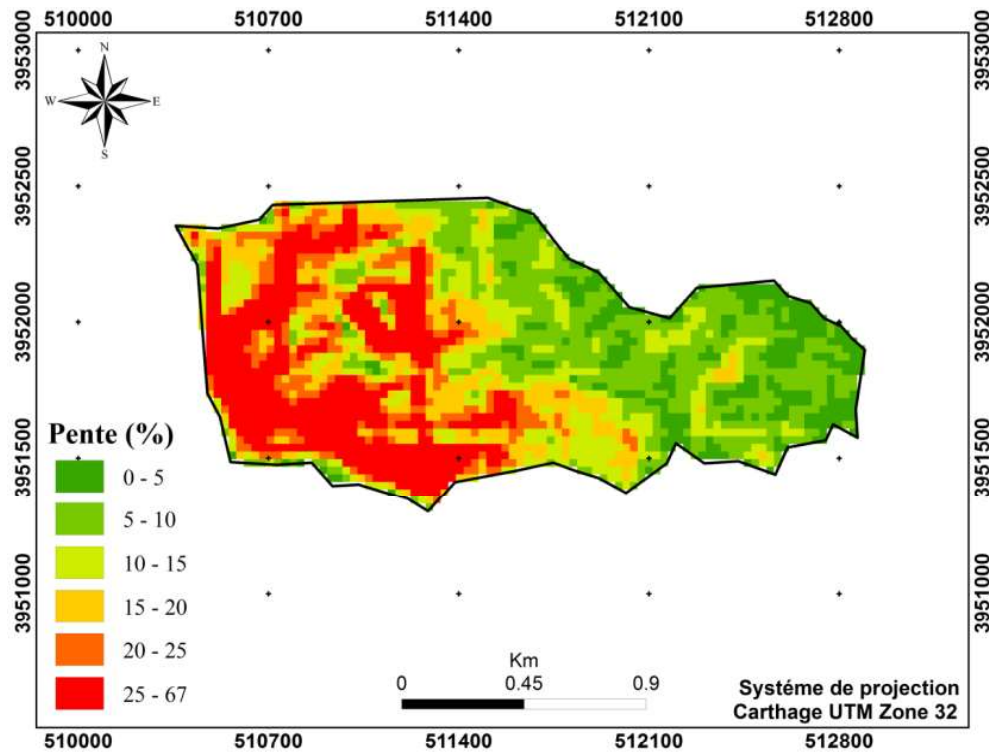


Fig. 8- Carte des pentes de la zone d'étude

Table 6 - Répartition des classes de pente du bassin d'oued Souani en fonction de la surface (%)

N° de classe	Pente	Classe de pente	Surface	Taux (%)
1	0-5	Pente très faible	23,85	12,17
2	5-10	Pente faible	47,90	24,43
3	10-15	Pente moyenne	32,90	16,79
4	15-20	Pente assez forte	27,55	14,05
5	20-25	Pente forte	19,00	9,70
6	25-67	Pente très forte	44,80	22,86

Ces conditions topographiques peuvent entraîner des pertes de terres importantes en raison de la prédominance de sols sensibles à l'érosion (sols superficiels ($z < 20$ cm) pauvres en matière organique et occupant des zones en pente) et de structures lithologiques formées essentiellement de marnes et d'argiles qui deviennent plastiques et imperméables à l'eau. Les premières précipitations, limitant l'infiltration de l'eau dans le sol et favorisant uniquement le ruissellement des eaux superficielles.

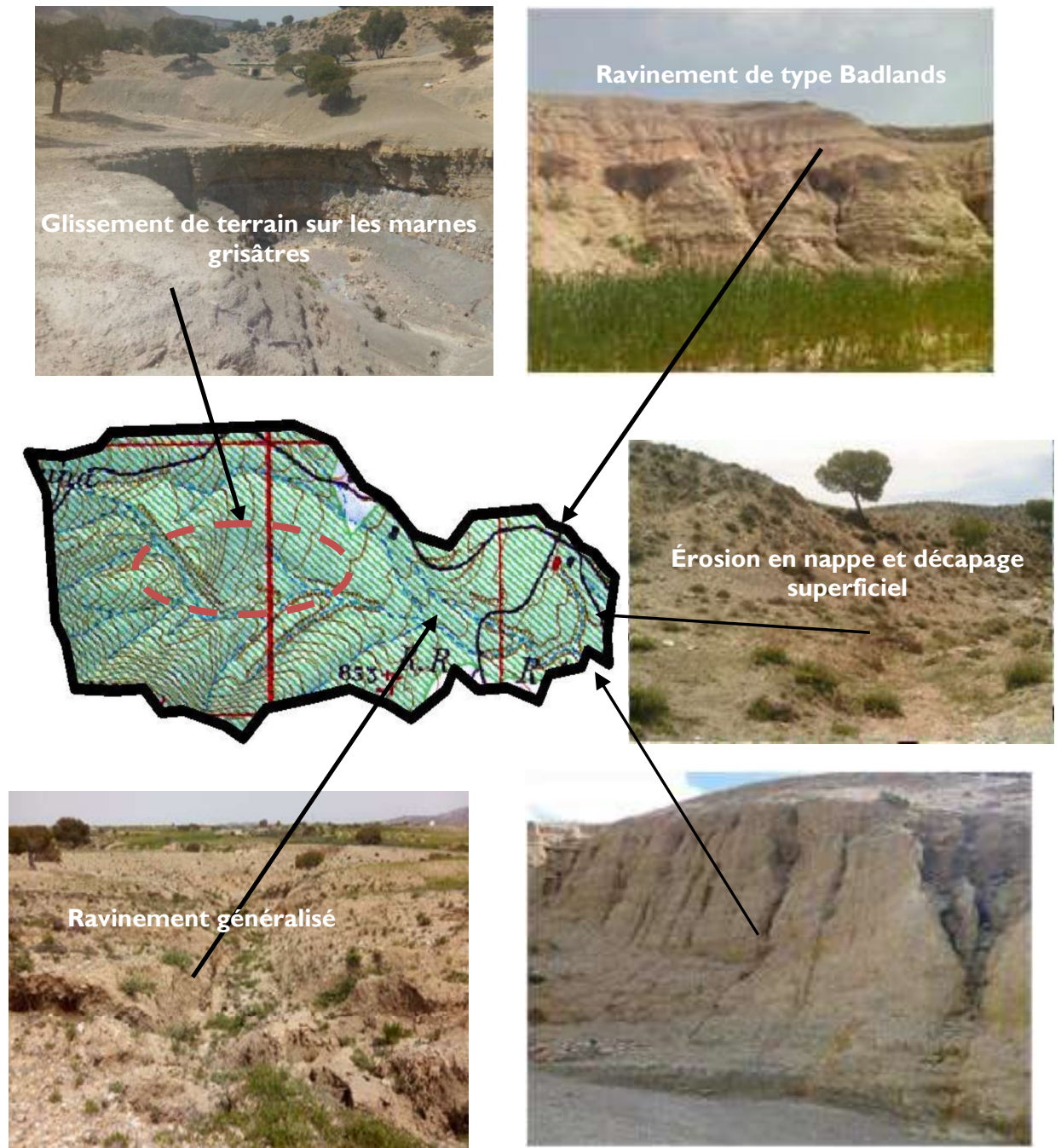


Fig. 9 - Formes d'érosion hydrique observées dans le bassin versant d'oued Souani

3.3. Caractéristiques hydrographiques

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des canaux de drainage naturels ou s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines soit sous forme de source, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau [1].

3.3.1 Ordre des cours d'eau

La mesure des longueurs de thalweg contribue aux différents calculs de paramètres morphométriques tels que la densité de drainage, le temps de concentration et la vitesse d'écoulement. La détermination de ces paramètres

nécessite une classification du réseau de drainage. La méthode de Strahler (1957) [24] peut être utilisée pour y parvenir.

Cette méthode consiste à classer les cours d'eau et d'affecter un ordre à chacun d'entre eux suivant la règle :

- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordres différents prend l'ordre du plus élevé des deux $(n+m) = \text{Max}(n,m)$.
- Tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté d'un $(n+n=n+1)$.

En extrayant la carte du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Souani à Arcgis (Fig. 10), nous avons pu classer les réseaux par ordre selon la méthode de Strahler (1957) [24]. Cette opération donne un ordre de trois (3) pour le bassin versant d'oued Souani (Table 7).

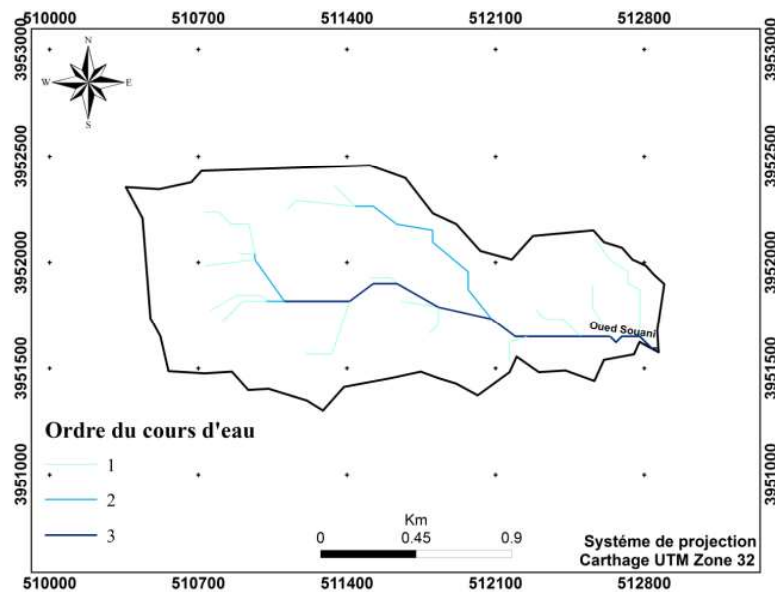


Fig. 10 - Ordre d'écoulement du bassin versant d'oued Souani

Table 7 - Classification du réseau hydrographique du bassin versant d'oued Souani selon la méthode de Strahler (1957)

Ordre du cours d'eau	Bassin versant d'oued Souani	
	Nombre des cours d'eau	Longueur des cours d'eau (km)
1	39	3,74
2	4	1,29
3	15	1,93
Total	58	6,96

Le réseau hydrographique drainant le bassin versant d'oued Souani est assez dense, avec des ravins bien développés en amont. Il est formé par le fleuve principal avec un affluent gauche qui draine la partie orientale du bassin. L'affluent gauche drainant la partie orientale du bassin présente un réseau relativement dense, tandis que les ravins droits drainant la partie supérieure et occidentale du bassin sont plus denses en raison de la pente plus importante.

3.3.2. Densité de drainage Dd

La densité de drainage [25, 26] est définie comme étant la longueur totale de tous les cours d'eau à la surface du bassin versant. Elle est exprimée en Km/Km². Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs tels que la lithologie, la tectonique, l'exposition, le couvert végétal, les pentes et le climat.

$$Dd = \frac{1}{S} * \sum_{i=1}^n Li \quad Eq. 6$$

Avec :

Dd : La densité de drainage (km/km²)

Li : La longueur des cours d'eau (km)

S : La superficie du bassin versant (km²)

I : L'ordre d'écoulement de I à n

Le bassin versant de l'oued Souani a une longueur totale de 6,66 km, ce qui donne une densité de drainage de **3,55 km/km²**, ce qui donne une densité de drainage assez élevée. La valeur de densité dépend principalement des conditions topographiques, géologiques, pédologiques et climatologiques ainsi que des activités humaines.

3.3.3. Temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie amont la plus éloignée du bassin versant pour parvenir à l'exutoire. Ce paramètre est estimé par plusieurs relations empiriques, pour notre cas nous avons préféré la relation de Giandotti [27].

$$Tc = \frac{4\sqrt{Sb} + 1.5 Lt}{0.8 * \sqrt{\frac{H_{max} - H_{min}}{2}}} \quad Eq. 7$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (heures)

H_{max} : Altitude maximale en m

H_{min} : Altitude minimale en m

Sb : Superficie du bassin (Km²)

Lt : Longueur du talweg principal (km)

L'application de la formule ci-dessus au bassin versant étudié aboutit à un temps de concentration du ruissellement de **1,04 heure**. Ce temps de concentration est faible, ce qui signifie que le ruissellement se rassemble et se dilate rapidement et est évacué à grande vitesse, générant une force de décapage élevée sur les particules de sol et donc risquant un plus grand pouvoir érosif.

3.3.4. Vitesse d'écoulement (V)

Ce paramètre caractérise la vitesse moyenne d'écoulement des oueds par gravité suivant les pentes du bassin versant [23]. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$V = \frac{L}{Tc} \quad Eq. 8$$

Avec :

V : Vitesse d'écoulement (km/h)

L : Longueur du talweg principal (km)

Tc : Temps de concentration (h)

Pour le bassin d'oued Souani, la vitesse d'écoulement des eaux superficielles est de l'ordre **2,4 km/h**.

4. Conclusion

Cette étude est basée sur l'évaluation automatique des caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant d'oued Souani en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) et un logiciel SIG. Ces outils permettent d'économiser du temps et des efforts. L'étude de ces paramètres nous a permis de produire un certain nombre de cartes thématiques et d'obtenir les interprétations suivantes :

Le bassin versant étudié a une superficie de 1,96 km² et un périmètre de 6,78 km. Il a une forme allongée (KG= 1,36) dans la direction est-ouest, parallèlement à la direction de l'écoulement de l'eau. Selon l'équation de Roche, les dimensions du rectangle équivalent (longueur L=2,66 km et largeur l= 0,74 km) font que la longueur est 3,5 fois plus grande que la largeur. L'indice global de pente Ig est estimé à 50 m/Km par l'application de l'équation de Musy. Selon la classification de l'ORSTOM, il est classé comme ayant un relief fort. La topographie du bassin est relativement accidentée, caractérisée par des pentes moyennes à fortes et une variation altitudinale assez importante, allant de 791 m à l'exutoire à 1045 m sur le haut relief du Djebel Bou Rokba. D'un point de vue hypsométrique, la classe d'altitude dominante se situe entre 791 et 880 m au-dessus du niveau de la mer. Elle occupe environ 51 % de la surface totale du bassin versant, ces zones représentant des plaines et les versants. Les zones de très haute altitude (plus de 940 m) telles que : Djebel Bou Rokba couvrent une petite superficie ne dépassant pas 23%. Par conséquent, la courbe hypsométrique est très proche de l'équilibre, ce qui indique que le potentiel d'érosion est modéré. L'analyse des paramètres hydrographiques montre que le bassin versant d'oued Souani présente un réseau hydrographique assez dense avec un ravinement parfois très développé (Dd=3,55 km/km²).

Toutes ces caractéristiques morphologiques, topographiques et hydrologiques du bassin versant cible, la lithologie friable (affleurements peu perméables (marnes et marno-calcaires)), l'énorme étendue de terres non végétalisées combinée à une pluviométrie irrégulière et à des pentes moyennes à fortes, ainsi que l'absence d'équipements CES, font de la zone cible un environnement propice aux inondations.

Les résultats finaux démontrent la précision et la performance des systèmes d'information géographique et des modèles numériques de terrain (MNT) dans l'évaluation des paramètres hydro-morphiques influençant le ruissellement des eaux de surface.

Références

- [1] Roche M.1963. Hydrologie de Surface-ORSTOM. Gauthier-Villars édit. Paris (in French).
- [2] FAO .1996. Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, 54, 244p. <http://www.fao.org/docrep/w2570f/w2570f00.htm#Contents>.
- [3] Morell M, Thebe B, L'Hote Y, Drobot R, Carbonnel JP.1999. Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. * H* G* A*.
- [4] Gaikwad R, Bhagat V. 2018. Multi-criteria Prioritization for Sub-watersheds in Medium River Basin using AHP and Influence Approaches. Hydrospatial Analysis, 2(1): 61-82.
- [5] Faye C, Dièye S, Faye G. 2021. Analyse morphométrique et hydrologique du sous bassin versant du Niaoulé (Bassin de la Gambie) à l'aide de technique SIG.
- [6] Bewket W, Sterk G. 2005. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. Hydrological Processes: An International Journal, 19(2), 445-458.
- [7] Benzougagh B, Dridri A, Boudad L, Sdkoui D, Baamar B. 2019. Apport des sig et teledetection 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. Am J Innov Res Appl Sci, 8(4), 120-130.
- [8] Narmatha T, Jeyaseelan A, Mohan, SP, Mahalingam S, Natchimuthu S. 2013. Morphometric analysis of upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu, India using Geographical Information System. Journal of Academia and Industrial Research, 1(11), 726-729.
- [9] Kalaivanan K, Gurugnanam B, Suresh M. 2014. GIS based morphometric analysis of gadilam river basin, Tamil Nadu, India. International Journal of Adv. Research, 7(2), 1015-1022.

- [10] Biswas S, Sudhakar S, Desai VR. 1999. Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. *Journal of the Indian society of remote sensing*, 27, 155-166.
- [11] Veltri M, Veltri P, Maiolo M.1996. On the fractal description of natural channel networks. *Journal of hydrology*, 187(1-2), 137-144.
- [12] Manojkumar PD, Nitin NM, Akshada HK, Ganesh MD. 2019. Morphometric Analysis of Kolavadi Sub-Watershed in Bhor Tahsil Using GIS Techniques. *J.Geographical Studies*, 3(1): 1-10, 87-96.
- [13] Khan MA, Gupta VP, Moharana PC. 2001. Watershed prioritization using remote sensing and geographical information system: a case study from Guhiya, India. *Journal of Arid Environments*, 49(3), 465-475.
- [14] Chopra R, Dhiman RD, Sharma PK.. 2005. Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33, 531-539.
- [15] Llamas J. 1992. *Hydrologie générale: principes et applications*, 2^e édition. Gaëtan Morin éd., BoucheNilie, Canada, 527 p.
- [16] Faye C. 2018. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques: cas du bassin versant de la Gambie.(bassin continental Guineo-Sénégalais).
- [17] Schumm SA. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, 67(5), 597-646.
- [18] Gravelius .1914. *Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde*. Band I: Flufkunde (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German). Goschen, Berlin, 10 p
- [19] Musy A. 2005. *Cours d'hydrologie générale*, Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse. Cours online, URL: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie>.
- [20] Musy A, Higy C. 2004. *Hydrologie: Une science de la nature (Vol. 21)*. PPUR presses polytechniques.
- [21] Dubreuil P, Guiscafre J. 1971. La planification du réseau hydrométrique minimal. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol*, 8, 3-38.
- [22] Dubreuil P. 1966. Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants: leur détermination avec une précision acceptable. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol*, 5, 13-29.
- [23] Bouguerra H. 2018. Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien) (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid).
- [24] Strahler AN.1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- [25] Horton RE. 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361.
- [26] Horton RE. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- [27] DGACTA .1995. *Guide de conservation des eaux et des sols*. Ministère de l'agriculture de la Tunisie, Tunis. 273p