



APPORT DES SIG ET TELEDETECTION POUR L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT D'OUED INAOUENE (NORD-EST MAROC) ET LEURS UTILITES DANS LE DOMAINE DE LA GESTION DES RISQUES NATURELS

CONTRIBUTION OF GIS AND REMOTE SENSING FOR THE EVALUATION OF THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF INAOUENE WATERSHED (NORTHEAST MOROCCO) AND THEIR USES IN THE FIELD OF NATURAL HAZARD MANAGEMENT

| Benzougagh Brahim ^{*1} | Dridri Abdallah ² | Boudad Larbi ¹ | Sdkaoui Driss ³ | and | Baamar Brahim ⁴ |

¹. Université Moulay Ismail | Faculté des Sciences de Meknès | Département de Géologie | Laboratoire de Géoscience | Patrimoine et substances utiles (GPSU) | BP : 11202 Zitoune 50000 | Meknès- Maroc |

². Université Sidi Mohamed Ben Abdellah | Faculté des Sciences de Dhar El Mahraz Fès | Département de Géologie | Laboratoire de Ressources Naturelles | Environnements et Développement Durables (RNE2D) |

³. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah | Faculté des sciences et Technique Fès | Laboratoire de Géo Ressources et Environnement (GRE) |

⁴. Université Moulay Ismail | Faculté des Sciences de Meknès | Département de Géologie | Laboratoire de Métallurgie | matériaux | minéraux industriels et Environnement minier | BP : 11202 Zitoune 50000 | Meknès- Maroc |

| Received | 28 February 2019 |

| Accepted 12 April 2019 |

| Published 18 April 2019 |

| ID Article | Benzougagh-ManuscriptRef.4-ajira280319 |

RESUME

Introduction : Le présent travail expose le potentiel des systèmes d'informations géographiques (SIG) et la télédétection spatiale pour l'évaluation de régime hydrologique d'un bassin versant qui dépend de ses caractéristiques morphométriques, géologiques, climatique et de l'occupation du sol de bassin versant d'Oued Inaouène qui se situe au nord-est du Maroc et qui s'étend sur une superficie d'ordre de 5109 km² et un périmètre de 414 km. **Méthode** : L'extraction de bassin versant en question et ses caractéristiques géomorphologiques et hydrométriques a été faite à partir du modèle numérique du terrain (MNT) issu d'images SRTM avec une résolution de 30 m. **Résultats** : à l'essor des SIG et la qualité des MNT ont conduit à l'extraction du réseau hydrographique et des sous-bassins versants qui structurent l'espace en hydrologie, ceci nous a conduit à calculer les caractéristiques physiques de bassin versant (caractéristiques de forme, de relief, et le réseau hydrographique....). **Conclusion** : ce travail a permis l'identification des zones à risque et l'établissement des carte thématiques relatives au bassin (carte des pentes, carte de sens d'écoulement, carte de drainage).

Mots-clés : SIG, MNT, Caractéristiques physique, bassin versant, Oued Inaouène, réseau hydrographique

ABSTRACT

Background: This paper presents the potential of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing for the assessment of the hydrological regime of a watershed, which depends on its morphometric, geological, climatic characteristics of the land use of the watershed Of Oued Inaouene which is located in the north-east of Morocco and which extends over an area of order of 5109 km² and a perimeter of 414 km. **Method**: The watershed extraction in question and its geomorphological and hydrometric characteristics was made using the digital terrain model (DEM) derived from SRTM images with a resolution of 30 m. **Results**: The development of GIS and the quality of NCDs led to the extraction of the hydrographic network and the sub-watersheds which structure the space in hydrology, this led us to calculate the physical characteristics of watershed (shape characteristics, Relief, and the hydrographic network ...). **Conclusion**: this work allowed the identification of risk zones and the establishment of thematic maps related to the basin (slope map, flow direction map, drainage map).

Keywords: GIS, DEM, physical characteristics, watershed, Inaouen River, Risk.

1. INTRODUCTION

Le bassin versant de l'Oued Inaouène est le siège de plusieurs risques naturels, en premier rang on trouve le risque d'érosion hydrique, soit une dégradation spécifique de 2 142 t/km²/an des matériaux mobilisés par cette érosion et véhiculés par les crues proviennent essentiellement des formations marneuses du Prérif, unité lithologique la plus vulnérable à l'érosion mécanique [1], puis les inondations catastrophique qui menace la région depuis les année 60 [2], mais depuis 1995 leur fréquence augment pour devenir presque annuelle [3]. Selon le climat de la région qui est marqué par de forts contrastes saisonniers et des précipitations très irrégulières, le bassin versant est menacé par le risque de la sécheresse débuté en 1980 et s'étend jusqu'à nos jours [4-5-6]. La région est dominée par des marnes

du Miocène supérieur qui sont fortement ravinées et affectées par de multiples glissements de terrain récents [7]. La région de Taza est caractérisée par une forêt qui fait l'objet des incendies chaque année, soit 60 ha en 2011, 75 ha en 2012.

Pour évaluer les risques naturels on fait appel à L'évolution des systèmes d'informations géographiques (SIG) et le développement de la technologie spatiale (télédétection) ont permis une meilleure connaissance et une exploitation efficace des bassins versants. Les potentialités des outils SIG et télédétection offrent un grand appui qui permet de générer les données descriptives du bassin. L'un des objectifs de la présente étude est de déterminer les caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Inaouène (caractéristiques de forme, de relief, les altitudes, les pentes, la typologie du réseau hydrographique). Le second objectif est l'élaboration des cartes thématiques (cartes des sous-bassins versant, carte de réseau hydrographique, carte de drainage, carte des pentes,...) et déterminer les zones à risques naturels dans ce bassin. L'utilisation de ces nouvelles techniques a permis ainsi de répondre aux exigences la prévention contre les risques naturels [8].

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant d'Oued Inaouène est situé dans la partie nord-est du Maroc entre le Moyen-Atlas et le Pré-Rif avec une superficie d'ordre de 5109 Km² (Figure.01). Par sa situation géographique, le bassin versant est caractérisé par un climat méditerranéen à influence océanique, marqué par de forts contrastes saisonniers et des irrégularités très nettes des précipitations [9]. Cette région est caractérisée par des précipitations très variables d'un mois à un autre avec une pluviométrie moyenne annuelle d'ordre de 600 mm/an. La répartition spatiale des précipitations montre deux tranches pluviométriques : la première au-dessous de 500 m d'altitude avec une pluviométrie d'ordre de 800 mm et la deuxième compris entre 500 et 1000 m avec une pluviométrie annuelle qui varie entre 800 et 1 500 mm [1]. La saison pluvieuse dans la zone d'étude s'étale entre les mois de Novembre et Avril avec des maxima très marquée au mois de décembre et Janvier. Tandis que les mois les plus secs sont juillet et Août.

Le bassin versant de l'Oued Inaouène est caractérisé par un contraste lithologique entre les deux rives. La rive droite est coïncide avec le Pré-rif dont les affleurements sont marneux, et supporte une végétation clair semé. La rive gauche correspond au bordure septentrional de Moyen-atlas, les affleurements sont variées depuis les formations paléozoïque de Tazekka jusqu'au formations triasi-co liasique.

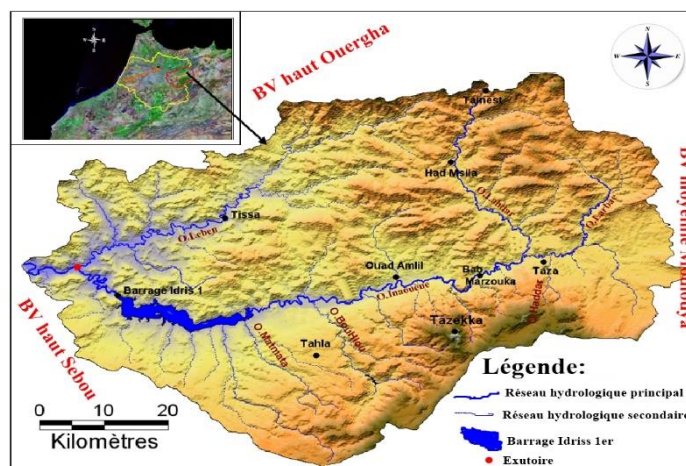


Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude.

3. MÉTHODOLOGIE ET MATÉRIELS UTILISÉS (FIGURE.02)

Pour réaliser ce travail nous avons utilisé une image du satellitaire de type SRTM avec une résolution de 30 m (Shuttle Radar Topography Mission : fait référence à des fichiers matriciels et vectoriels topographiques fournis par deux agences américaines : la NASA et la NGA). Cette image sert de base pour élaborer un modèle numérique du terrain (MNT). Le MNT a été la première donnée nécessaire pour la cartographie des bassins versants avec la méthode qui sera décrite dans ce travail. Il est devenu l'une des couches d'information les plus utilisées dans un SIG pour les sciences de la terre. Les raisons sont les mêmes qu'au paravent, car l'altitude apparaît comme paramètre explicatif pour de très nombreux phénomènes naturels (ruissellements, érosion hydrique, inondations, glissement de terrains, etc.). L'intérêt d'un MNT est de limiter le bassin versant d'étude et l'extraction automatique des caractéristiques physiques de la zone d'étude (caractéristiques morphologiques, paramètres de relief, paramètres morphométriques), [10]. Le logiciel Qgis et google earth ont été utilisés pour la réalisation de la cartographie.

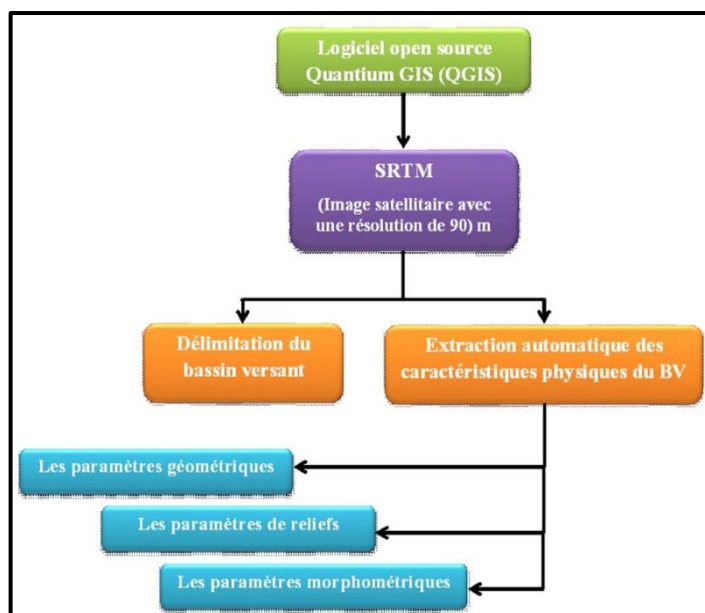


Figure 2 : la figure montre la méthodologie adoptée pour le travail.

Ainsi nous avons utilisé des cartes topographiques et géologiques à 1/50.000 de la zone d'étude (Taza, Tissa, Tahla, Ribat AL Khay, Matmata, Maghrawa, Fès-Est, El Manzal, Berkine, Beni Frassene, Bab El Mrouj, Ain El Bhira, Qalat Sles, Sefrou).

4. RESULTATS

Pour caractériser l'environnement physique du bassin versant de l'Oued Inaouène, nous avons calculé les différents paramètres et des indices morphométriques et leur influence sur l'écoulement des eaux superficiels.

4.1. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent le régime d'écoulement en période de crue ou d'étiage [11]. Ils regroupent : les paramètres géométrique (la superficie, périmètre, la forme, le rectangle équivalent), les paramètres de relief (la courbe hypsométrique, les altitudes max, min, moyenne et médiane, la pente et l'indice de pente) et les caractéristiques du réseau hydrographique (la topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau, La longueur et les pentes caractéristiques du réseau, densité de drainage...).

4.1.1. Paramètres géométriques

L'étude des paramètres géométriques du relief, appelée aussi orométrie, vise à donner une expression quantitative du relief. La morphométrie s'intéresse à l'étude de plusieurs indices (superficie, périmètre, forme,...) plus ou moins pertinents [12].

A. Superficie Périmètre

La surface (A) du bassin versant de l'Oued Inaouène, calculée à l'aide de logiciel QGIS, est de l'ordre de 5109 km². Le périmètre (P) est environ 414 Km. Ces deux indices vont nous aider à calculer les autres paramètres.

B. Forme : Coefficient de compacité de Gravelius KG

Le coefficient de compacité de Gravelius KG (1914) [13] du bassin versant est exprimé par le rapport de son périmètre au périmètre du cercle ayant la même surface, Il est calculé par la formule suivante (1) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Avec :

KG : Coefficient de compacité de Gravelius,

P : Périmètre du bassin versant en Km,

A : Superficie du bassin versant en Km² et π : constant $\sim 3,14$

Si : ce coefficient est proche de 1, le bassin versant est parfaitement circulaire est donc mieux drainé. Si KG est supérieure à 1, le bassin versant à une forme allongée est donc mal drainé.

Dans le bassin versant d'oued Inaouène KG = 1,63 donc il présente une forme allongée, et par conséquent il est mal drainé.

C. Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent a été introduite pour comparer l'influence des caractéristiques géométriques des bassins versants sur l'écoulement. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) c'est-à-dire la même répartition hypsométrique [12].

Soit L et I la longueur et la largeur du rectangle, et P et A le périmètre et l'aire du bassin versant. On a (2&3):

$$\left. \begin{aligned} S &= L \times l \\ P &= 2 \times (L + l) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$L = \frac{k_g \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (3)$$

Donc : L = 180,71 Km et I = 28,20 Km

Les dimensions du rectangle équivalent traduisent que la longueur est grande six fois que la largeur.

4.1.2. Paramètres de relief

L'influence du relief sur l'écoulement est nette, parce que de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief d'un bassin versant se caractérise par une carte et une courbe hypsométrique.

A. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une idée sur la pente du bassin versant. Elle est basée sur le modèle numérique du terrain (MNT) obtenu à partir d'un fichier STRM de la région (Figure.03).

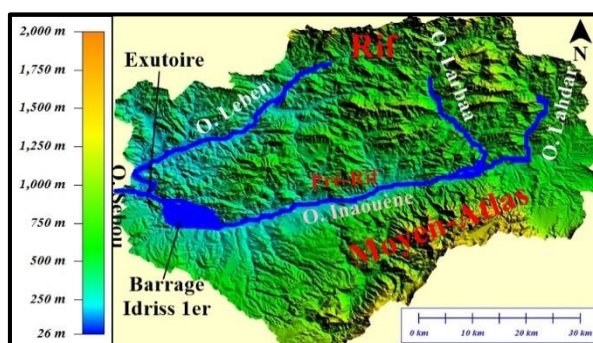


Figure 3: Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant d'Oued Inaouène (SRTM).

Les altitudes hautes qui dépassent 1900 m occupent le sud-est et le nord-est du bassin, et les altitudes faibles (étendues plans) occupent le couloir Fès-Taza c'est-à-dire le trajet du cours d'eau d'oued Inaouène jusqu'à la confluence avec oued Sebou.

On va appliquer une méthode statistique qui permet de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude. Cette méthode consiste à calculer les pourcentages des surfaces en fonction des altitudes, puis le calcul des pourcentages au-dessus de cumulée (Tableau.01 et 02).

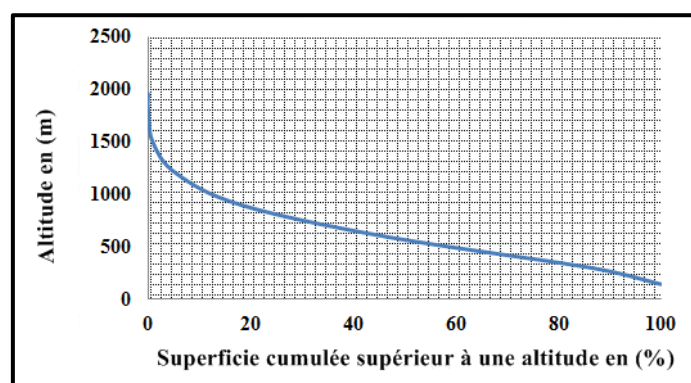
Tableau 1: Le tableau montre la répartition de la surface totale par tranche d'altitude.

Tranche d'altitude (m)	Surface (Km ²)	% de la surface
146 – 300	787,1	13,28
300 – 600	2394,44	40,41
600 – 900	1664,33	28,09
900 – 1200	752,65	12,70
1200 – 1500	273,46	4,61
1500 – 1800	52,03	0,88
1800 – 1961	0,86	0,01
TOTAL	5924,87	99,98 %

Tableau 2: Le tableau montre la superficie cumulée supérieure à une altitude en %.

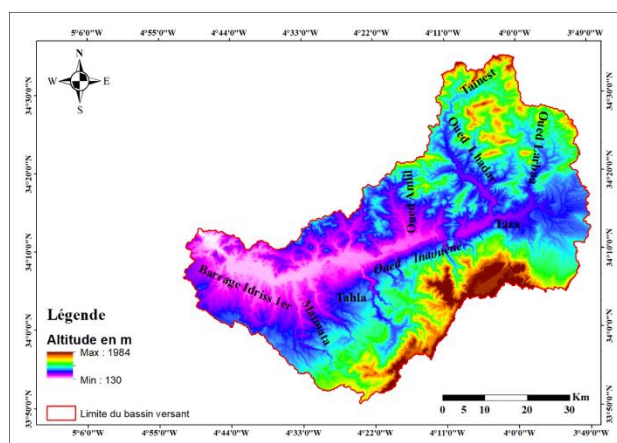
Altitudes (m)	Superficie cumulée supérieure à l'altitude (Km ²)	pourcentage de la superficie cumulée (%)
146	5924,87	100
300	5137,77	86,71
600	2743,33	46,30
900	1079	18,21
1200	326,35	5,51
1500	52,89	0,89
1800	0,86	0,01
1961	0	0

Donc La courbe hypsométrique est une représentation graphique des altitudes en fonction des pourcentages des superficies cumulées (Figure.04).

**Figure 4 :** Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Inaouène

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

Elle permet de juger de l'âge et degré d'érosion des bassins versants [14]. Dans le cas du bassin versant d'Inaouène, la courbe hypsométrique obtenue renferme une pente forte vers les plus hautes altitudes (2000 et 1400 m), choses qui sont prouvée par la faible fréquence de cette tranche d'altitude (Tableau1). La pente est faible au milieu (38.54% de fréquence) ce qui donne l'idée à une pénélplanation (surface topographique représentant la dernière phase du cycle d'érosion, caractérisée par de faibles pentes et des dépôts superficiels) et par la suite il y'a naissance du risque d'inondation [8]. La courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Inaouène (Figure.05) a une forme concave, ca qui indique que le bassin est en état de maturité.

**Figure 5:** La figure montre la carte hypsométrique d'Oued Inaouène.

B. Les altitudes

Altitudes maximales et minimales :

Elles sont obtenues directement à partir des MNT et des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement c'est l'exutoire. L'altitude maximale = 1961 m, et l'altitude minimale = 146 m. on constat que le dénivelé est important dans la zone d'étude, et par conséquent on a des variations considérables dans les facteurs climatiques.

Altitude moyenne :

L'altitude moyenne se déduit à partir de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit (4) :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum A_i \times h_i}{A} \quad (4)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant en (m),

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau en (Km²),

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m),

A : superficie totale du bassin versant en (Km²),

Dans le cas du bassin versant d'Oued Inaouène, nous pouvons calculer l'altitude moyenne à partir du tableau.01 pour toutes les surfaces comprises entre les courbes de niveaux:

Donc H_{moy} = 632,5 m.

Altitude médian :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'ordonnées 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique [15]. L'altitude médiane de notre bassin versant au point de 50% de la surface totale est approximativement égale à 500 m. Cette valeur est voisine de celle de la moyenne (632,5m). L'écart résulte de la courbe hypsométrique qui a une pente régulière.

4.2. Pentes du bassin versant

Les pentes conditionnent fortement le ruissellement au niveau d'un bassin versant. L'étude de ce paramètre topographique est primordiale pour aborder les problèmes d'érosion et de transport solide. Il est nécessaire de commencer d'abord par une classification des pentes (Tableau.03).

Tableau 3: classification des pentes.

Classes	Degré des pentes	Type de pente
01	0 à 10	Nulle à faible
02	10 à 20	Moyennement modérée
03	20 à 30	Modéré
04	30 à 40	Forte
05	> 40	Abrupt

Les abrupts (supérieure à 40%) sont concentrés dans la partie Nord-Est et Sud-Est ; région Tainest, Tazzeka, Had Msila (Figure.06). La pente décroît progressivement en allant vers la partie centrale du bassin où elle devient modérée à moyennement modérée (entre 10 et 30%). Cette pente faible se rencontre dans les régions de Tissa, Taza, Tahla, c'est à ce niveau que les inondations sont fréquentes (zone plane et réceptacle des affluents).

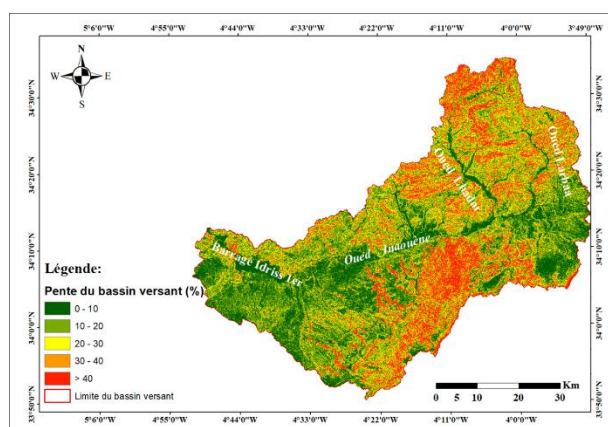


Figure 6: Carte de pentes du bassin versant d'Oued Inaouène.

4.2.1. Pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne d'un bassin versant est un paramètre important pour la détermination du temps de parcours de ruissellement, c'est à dire le temps de concentration. La pente moyenne du bassin versant est égale au quotient de la différence entre les hauteurs extrêmes par la longueur du rectangle équivalent. On estime la pente moyenne à partir de la courbe hypsométrique du bassin.

$$P_{\text{moy}} = \frac{\Delta H}{L} \quad (5)$$

Avec :

P_{moy} : pente moyenne [m/km ou %],

ΔH : l'altitude moyenne en (m).

L : longueur de rectangle équivalent en (Km).

Dans la zone d'étude : $P_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} = \frac{1961 - 146}{180,71} = 10,04 \%$.

On constat que la pente moyenne est faible, le risque d'érosion est rare mais le risque d'inondation est fréquent.

4.2.2. Indices de pente globale

L'indice de pente globale permet de déterminer l'influence du relief sur le bassin, Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent. Il est défini comme étant le rapport entre la dénivellation (D), et la longueur de rectangle équivalent. Il s'exprime par la formule suivante (6) :

$$IG = \frac{D}{L} \quad (6)$$

Avec :

IG : Indice de pente globale.

D : H95% - H5% (Dénivellation)

H95% : l'altitude correspondante à 95% de la superficie totale du bassin versant.

H5% : l'altitude correspondante à 5% de la superficie totale d bassin versant.

L : longueur du rectangle équivalent.

ORSTM (Office Régional Scientifique et Technique d'Outre-Mer : office français) a réalisé une classification du relief selon les valeurs de IG (Tableau.04).

Tableau 4: le tableau montre la classification OSTRM du relief à partir de l'indice de pente globale.

Classe	Nature du relief	Valeur d'IG
R1	Relief très faible	$Ig < 0,002$
R2	Relief faible	$0,002 \leq Ig < 0,005$
R3	Relief assez faible	$0,005 \leq Ig < 0,01$
R4	Relief modéré	$0,01 \leq Ig < 0,02$
R5	Relief assez fort	$0,02 \leq Ig < 0,05$
R6	Relief fort	$0,05 \leq Ig < 0,5$
R7	Relief très fort	$Ig > 0,5$

IG : Pente globale ; **R** : Relief.

Pour le bassin versant d'Inaouène le dénivelé est calculé à partir de la courbe hypsométrique du bassin versant :

D = H95% - H5% = 1250 - 190 = 1060 m,

L = 180,71 Km,

Donc la valeur de la pente globale pour le bassin versant d'oued Inaouène est :

IG = 1060 / 180,71 = 5,86

Cette valeur d'IG très élevée, le relief du bassin versant d'oued Inaouène est très fort.

4.3. Le réseau hydrographique

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux, qui ont affecté la région au cours des temps internes (la géologie : la lithologie et les structures tectoniques) [16], les facteurs externes (le climat, le couvert végétal et l'anthropisation) et les facteurs composites (la topographie, facteurs hydrologique...). Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage, les rapports de confluence et rapports des longueurs. Le bassin versant d'Inaouène est caractérisé par un réseau hydrographique dense et ramifié (Figure.07). Les affluents s'organisent en un réseau de type dendritique homogène.

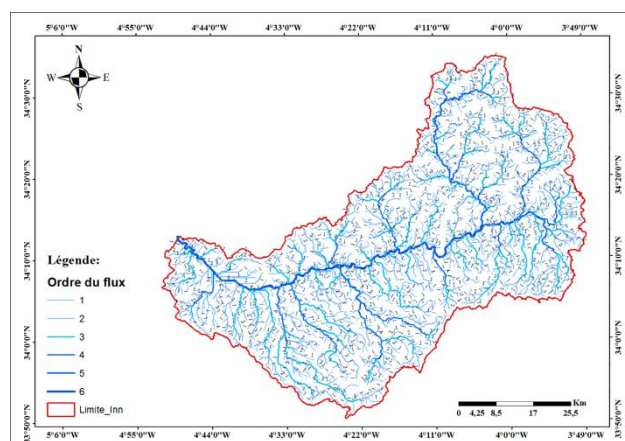


Figure 7: la figure montre la carte du réseau hydrographique du bassin versant Inaouène.

4.3.1. La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau : La topologie du réseau hydrographique se révèle utile dans la description du réseau hydrographique en proposant une classification, ainsi qu'un ordonnancement. Cette classification est utile pour codifier les stations de mesures d'un bassin versant en vue d'un traitement automatisé des données. Le réseau hydrographique de ce bassin versant est généralement dendritique (Figure.07), mais avec des variations locales. Au Nord, dans le Pré-rif, le réseau hydrographique est parallèle. Au Sud-ouest, dans la région des oueds Ammar et Matmata le réseau est aussi parallèle. Au niveau d'Oued Larbaa le réseau hydrographique est penné. Ces variations seraient en relation avec les variations de la topographie.

4.3.2. Longueur et pentes caractéristiques du réseau

Longueur caractéristique :

La longueur du cours d'eau principale (L), est la distance curviligne, depuis la ligne de partages des eaux jusqu'à l'exutoire, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement, et par extension de dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. Pour le cours d'eau principal du bassin versant d'Oued Inaouène (Figure.08), la longueur caractéristique calculée est $L = 180,71.1$ km.

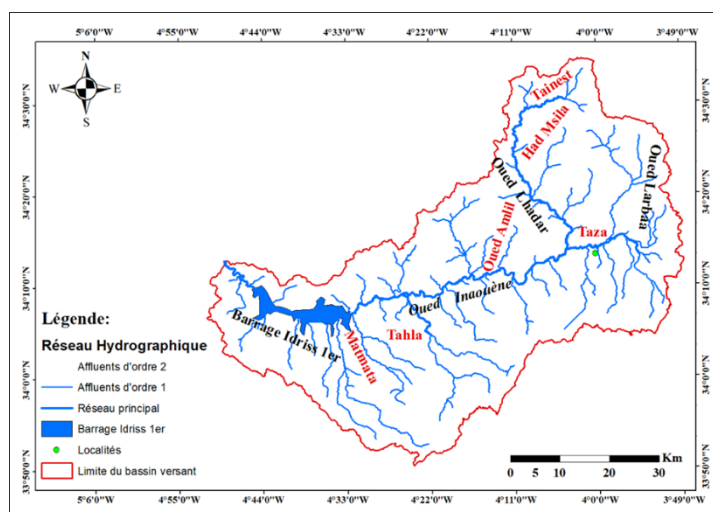


Figure 8: la figure présente le cours d'eau principale (L) et ses affluents du bassin versant de l'Oued Inaouène.

4.4. La densité de drainage du bassin versant

C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant, il correspond au rapport de la longueur total des thalwegs par la surface du bassin. Elle nous renseigne sur l'efficacité de drainage de la région donnée. Elle dépend de la géologie, des caractéristiques topographiques du bassin versant et même de certaines mesures des conditions climatiques [17].

Elle se définit par le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant (7):

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (7)$$

Avec :

Dd : densité de drainage en (km/km²),

Li : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal,

S : superficie du bassin versant,

Dans le cas du bassin versant de l'Oued Inaouène : $L_i = 2383,889$ Km et $s = 5109$ Km²,

Dd = $2383.889 \text{ km} / 5109 \text{ Km}^2$ **Dd** = 0, 47 Km/Km²,

Cette faible densité de drainage du bassin versant, s'expliquerait par la perméabilité du substratum et par le relief qui est accidenté.

4.5. Rapport de confluence

Le rapport de confluence, appelé aussi rapport de bifurcation (8), il traduit le taux de bifurcation du bassin versant. Il s'exprime par le rapport du nombre de cours d'eau d'ordre (n) sur le nombre de cours d'eau d'ordre (n+1), (Tableau.06)

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (8)$$

Avec :

Rc : rapport de confluence des cours d'eau ("bifurcation ratio") ;

Nn : nombre des cours d'eau d'ordre n ;

Nn+1 : nombre des cours d'eau d'ordre suivant ;

Ce taux de bifurcation est lié au temps de concentration des sédiments dans le réseau de drainage, plus ce rapport est faible, moins il y aura de bifurcation au niveau de réseau de drainage et plus les évacuations des sédiments vers l'aval se feront rapidement [13]. D'après Strahler (1957 et 1964), le rapport de confluence (RC) varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence [18, 19].

Dans la zone d'étude, Rc varie entre 0,75 et 2,26 (Tableau.05). On peut conclure que la géologie de la région a une grande influence sur l'écoulement des eaux superficielles.

Tableau 5: Rapport de confluence du bassin versant d'Oued Inaouène.

Nom du bassin versant	Ordre d'écoulement	Nombre	RC
Oued Inaouène	1	947	***
Oued Inaouène	2	423	2,24
Oued Inaouène	3	187	2,26
Oued Inaouène	4	149	1,25
Oued Inaouène	5	199	0,75

RC : rapport de confluence.

4.6. Rapport de longueur

Rapport des longueurs des cours d'eau correspond au rapport de la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre (n+1) sur la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre (n). Il est représenté par la formule suivante (10) :

$$R_L = \frac{L_{n+1}}{L_n} \quad (10)$$

Avec :

RL : rapport de longueur,

Ln+1 : longueur totale des cours d'eau d'ordre n+1 en (Km) ;

Ln : longueur totale des cours d'eau d'ordre n en (Km).

Plus le rapport de longueur est élevé plus les drains d'ordre supérieurs seront importants et les évacuations de sédiments plus faciles. Les rapports de longueurs du bassin versant d'Oued Inaouène varient de 0,33 à 1,4 (Tableau.06).

Tableau 6: Extraction du rapport de longueur du bassin versant d'Oued Inaouène.

Bassin versant	Cours d'eau d'ordre	Nombre des cours d'eau	Longueur totale en Km	Longueur moyenne Km	RL
O.Inaouène	1	947	1185,09	1,25	1,24
O.Inaouène	2	423	654,846	1,55	1,06
O.Inaouène	3	187	308,912	1,65	0,33
O.Inaouène	4	149	82,139	0,55	1,4
O.Inaouène	5	199	152,874	0,77	

RL : Rapport de longueur.

4.7. Fréquence des cours d'eau

La fréquence des cours d'eau (F) représente le rapport du nombre du cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant d'étude.

Dans le bassin versant de l'Oued Inaouène, $F = 0,185$,

Cette faible valeur traduit que le réseau hydrographique présente une hiérarchisation moyenne.

Coefficient de torrentialité (11):

C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence de cours d'eau élémentaires (d'ordre 1). Il s'exprime par la formule suivante :

$$C_t = D_d \times \frac{N_1}{S} \quad (11)$$

Avec :

Ct : coefficient de torrentialité,

Dd : densité de drainage $D_d = 0,47 \text{ km/km}^2$,

N1 : nombre de cours d'eau d'ordre « 1 » $N_1 = 947$,

S : surface du bassin versant $S = 5109 \text{ km}^2$,

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.

Dans notre bassin versant, Le coefficient de torrentialité est 0,087. Cette valeur est très faible, il indique une infiltration des eaux, au niveau des formations géologiques perméables.

5. DISCUSSION

L'étude des caractéristiques physiques de l'Oued Inaouène peut se faire manuellement, mais c'est un travail pénible et moins fiable. C'est pourquoi nous avons choisi les systèmes d'information géographique et la télédétection spatiale pour l'extraction de ces paramètres et les calculs de différents indices. Ce travail est basé sur le traitement d'un modèle numérique de terrain (MNT) SRTM, par les systèmes d'informations géographiques (SIG) open source et Google Earth.

Le MNT a permis l'extraction automatique du réseau hydrographique sur une surface de 5109 Km², la délimitation du bassin versant dont le périmètre est de 414 Km.

Les différents paramètres géométriques (surface, périmètre, forme, pente, hypsométrie, altitude...), morphométriques (densité de drainage, longueur, ordre de drainage....) et de reliefs ont été calculés à l'aide du logiciel libre (Qgis). Les valeurs de ces paramètres nous ont permis l'élaboration des cartes thématiques (carte des pentes, carte du réseau hydrographique, carte du relief,...). Le but de ce travail est de cartographier les zones à risques naturels (érosion, inondation, glissement du terrain...) dans la zone d'étude.

5.1. Les paramètres géométriques

La caractérisation du bassin versant d'Oued Inaouène peut se faire à partir des indices morphométriques. La surface du bassin, la longueur du drain ainsi que les indices de compacité de Gravelius et du rectangle équivalent sont en relation avec le comportement hydrologique du bassin versant. Le fleuve d'Inaouène est d'une longueur de 180,71 km au barrage Idriss Premier draine un bassin versant étiré en direction E-W ($KG > 1$). Cette forme allongée ralentie la réponse hydrologique.

5.2. Les paramètres de reliefs

Les altitudes du relief sont des facteurs climatiques. Ils déterminent les ascendances des masses d'air ou le les positions d'abris aux flux dominants. En conséquence sur un territoire donné ils contrôlent les gradients thermiques et pluviométriques. Pour cela l'étude de l'hypsométrie est nécessaire à l'étude d'un bassin versant.

Les altitudes d'Inaouène sont comprises entre 146m dans le couloir de Fès-Taza (Taza, Tahla, Oued Amlil et Tissa) et 1961m dans le Prérif et le Moyen Atlas (Tainest, Tazzeka, Had Msila) pour une altitude médiane de 500 m (altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique). Globalement les altitudes décroissent du sud et du nord vers le couloir de Fès-Taza. Donc ce sont les extrémités méridionale et septentrionale qui sont plus arrosées et favorables aux précipitations neigeuses.

Les altitudes dominantes du bassin sont comprises entre 300 et 900m représentant 69,5% de la superficie total du bassin versant, elles caractérisent les monts du Prérif, le causse moyen atlasique et le piedmont du Moyen Atlas Plissé. Les altitudes les plus basses, inférieure à 300m, représentent 13,28% et correspondent à la vallée de l'amont d'Oued Inaouène, tandis que les lignes des crêtes des montagnes, supérieures à 1800 m, ne concerne qu'une petite superficie soit 0,89% de la superficie totale du bassin versant (Tableau 01 & Figure 05). L'allure de la courbe hypsométrique montre une allure indiquant que le bassin est mature.

5.3. Les pentes du bassin d'Inaouène

L'analyse de la carte des pentes et le calcul de la pente moyenne montre que celle-ci est faible, de l'ordre de 10,04 %, et de ce fait la vitesse d'écoulement est faible et l'érosion du relief par les eaux de surface est moins importante. L'indice de pente globale ($IG = 5,86$) indique, selon la classification OSTRM, que le relief du bassin versant d'Oued Inaouène est très fort parce que nous sommes à la limite entre deux chaînes de montagnes largement fracturées.

5.4. Le réseau hydrographique

Le bassin versant d'Inaouène est caractérisé par un réseau hydrographique dense et ramifié. Les variations rencontrées dans le Prérif et au niveau de l'Accident Nord moyen atlasique sont dues à de changements de faciès, aux pentes raides et au passage de failles dans ces localités.

Le bassin versant d'Oued Inaouène est caractérisé par une faible densité de drainage (0,47 Km/Km²). Elle s'expliquerait par la perméabilité du substratum et par le relief qui est faiblement accidenté. Cette interprétation est confirmée Le coefficient de torrentialité qui est lui aussi faible (0,087) à cause de la forte perméabilité du Substratum. En fin on constat que le bassin versant de l'Oued Inaouène regroupe les conditions les plus favorables aux risques naturels notamment l'érosion hydrique, inondation et glissement du terrain.

6. CONCLUSION

L'analyse de différentes caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant consiste à évaluer quantitativement sa forme, sa pente, son orientation, son relief, la quantité et la disposition de chevelu de réseau hydrographique. Leur connaissance permettra une meilleure compréhension des facteurs responsables des variations

de régime hydrologique et par conséquent leur apport dans la genèse des risques naturels, et leur variabilité dans le temps et dans l'espace.

Ces paramètres d'ordre purement géométrique ou physique s'estiment aisément à partir des MNT par les SIG. Trois types de paramètres nous aident à expliquer le comportement hydrologique du bassin versant d'Oued Inaouène : les indices de forme, du relief et le réseau hydrographique.

D'après les résultats obtenus par le calcul des indices morphométriques on constate que le bassin versant de l'Oued Inaouène est vulnérable aux risques naturels. Au niveau de l'amont les farceurs des pentes fortes, du faible couvert végétal et l'abondance des marnes accélèrent l'écoulement des eaux de surface et par conséquent le développement du risque d'érosion hydrique. Par contre au niveau de l'aval les pentes sont faibles, le style méandriforme du cours d'eau et l'absence de couvert végétal favorisent la naissance de risque d'inondation par endroit.

Les caractéristiques géométriques du bassin versant constituent un outil de grande importance dans l'aide à la décision, optimisant le suivi et la gestion de cette problématique, en complément à des études et mesures élaborées sur terrain. Cette combinaison des données géospatiales et thématiques permet une cartographie à différentes échelles des zones à risque ainsi que la planification des aménagements futurs destinés à son atténuation.

7. REFERENCES :

- [1]. Sibari H., Haida S., Ait Fora A. Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride: bassin versant de l'Inaouène, Maroc. *Revue Science et changements planétaires / Sécheresse*. 2001 ; 12(3) : 187-93.
- [2]. Taous A., Tribak A. Obda K., Baena R., Lopez-Lara E., Miranda-Bonilla J. Karst et ressource en eau au Moyen Atlas Nord-Oriental. *Revue Geomaghreb*, 2009 ; (5): 41-59.
- [3]. Akdim B., Laaouane M., Taous A., Obda K. Risques hydrologiques dans la région de Taza (Maroc), genèse, conséquence et problèmes d'aménagement. *Revue Geomaghreb*, 2003 ; (1) : 47-60.
- [4]. Afkir L., "Le, Toulouse-le-Mirail bassin versant de l'Oued Inaouène : caractéristiques climatiques et comportement hydrologique", Thèse de 3ème cycle, 1985.285p.
- [5]. Obda K., "Indigences extrêmes des écoulements des Oueds méditerranéens : cas des Oued Nekor au Rif et du Haut sebou au Moyen Atlas", Thèse Doctorat d'Etat Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Fès, 2004, 422P.
- [6]. El Garouani A., Tribak A., "Relation entre hydrologie et climat dans le bassin versant de l'Oued Inaouène (pré-Rif marocain) ", *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts* (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), *IAHS Publ.* 2006, Vol 308, 447-453.
- [7]. Mouhssine M., Touzani A., Zinoune S., Mahtal A. Terrassements sur terrains marneux sensibles aux glissements : cas des terrains et remblais autoroutiers entre Oued Amlil et Taza (Rif, Maroc). *Physio-Géo (Géographie Physique et environnement)*. 2015 ; 09: 61-80
- [8]. Benzougagh B., Dridri M., Boudad Larbi et Sadkaoui D. Utilisation du SIG dans l'analyse morphométrique et la priorisation des sous-bassins versants de l'Oued Inaouène (nord-est du Maroc). *European Scientific Journal*. Février 2016 édition ; 12(4) : 283-306.
- [9]. El Garouani A., Tribak A. Variabilités climatiques et ressources en eau dans le bassin versant d'Oued Inaouène (Nord du Maroc). *Revue scientifique et technique LJEE*. 24 & 25 juin-décembre 2014 ; 76-83
- [10]. Charleaux J., "Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie, application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants", Thèse de Doctorat, Université de Marne – La – Vallée France. 2001.
- [11]. Talatizi I A., "Etude des infiltrations à travers une digue de barrage en terre, cas d'un barrage algérien", Thèse de magistère, Université Mouloud Mammeri, Faculté du génie de la construction, Département de génie civil, spécialité : génie civil, option géotechnique et environnement. 2014, 190p.
- [12]. André M., Christophe H., Hydrologie : une science de la nature, collection gérer l'environnement. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes* Première édition ISBN 2-88074-546-2. Imprimé en Italie, 2003, 314p.
- [13]. Gravelius H., "Grundriß der gesamten Gewässerkunde, Band 1: Flußkunde (compendium of hydrology) ", 1914, vol 1: Rivers in German. Gfischen Berlin Germany.
- [14]. AMIL M., "Bassin versant du Nekour, recherche des zones sources d'envasement de la retenue du barrage M.B.A El Khettabi (Maroc) ", Thèse doctorat, université Cheikh Anta Diop, faculté des sciences et techniques 1992,209p.
- [15]. Dubreuil P., Guiscafere J. " la planification du réseau hydrométrique minimal", *Cahier ORSTOM*. 1971 ; VIII (2). .
- [16]. Dridri A., Fedan B., "Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et d'Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc) ", *Bulletin de l'Institut scientifique Rabat*, section Science de la Terre. 2001 ; 23 : 67-77.
- [17]. Ancil F., Rousselle J., Lauzon N., Hydrologie : cheminement de l'eau, deuxième édition, *Presses internationales polytechniques*, 2012, SBN13978-2-553-01634-9
- [18]. Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am. Geophys. Union*. 1957; (38): 913-920.
- [19]. Strahler A N., "Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks, VT Chow (ed), Handbook of Applied Hydrology", McGraw Hill Book Company, New York, 1964, 4-11.



Cite this article: Benzougagh Brahim, Dridri Abdallah, Boudad Larbi, Sdkaoui Driss, and Baamar Brahim. APPORT DES SIG ET TELEDETECTION POUR L'EVALUATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT D'OUED INAOUENE (NORD-EST MAROC) ET LEURS UTILITES DANS LE DOMAINE DE LA GESTION DES RISQUES NATURELS. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2019; 8(4): 120-130.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>