

Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphometrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc)

Benzougagh Brahim, Dr.

Boudad Larbi, Ph

Faculté des Sciences, Département de Géologie,
Laboratoire de Géoscience, Patrimoine et
substances utiles, Université Moulay Ismail, Zitoune, Meknès- Maroc

Dridri Abdallah, Ph

Faculté des Sciences Département de Géologie, Fès, USMBA, Maroc

Sdkaoui Driss, Dr

Faculté des sciences et Technique
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès

doi: 10.19044/esj.2016.v12n6p266 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266)

Abstract

The present work focuses on the prioritization of the wadi Inaouène watershed based on morphometric analysis. The river system was extracted and thirteen sub-catchment basins have been delineated from a DTM using open source software. The following morphometric parameters were calculated for each sub-basin stream length (Lu) and the average length (Lsm), flow length ratio (RL), bifurcation ratio (Rb), medium bifurcation ratio (RBM), drainage density (Dd), drainage texture (T), the flow rate (Fs), elongation rate (Re), circularity ratio (Rc), form factor (Ff), topography and terrain ratio. By combining the values of these parameters we have classified the sub-watersheds in three prioritization categories: high grade (SBV01, SBV04, SBV05, SBV06, SBV11 and SBV12), is subject to a maximum soil erosion, which requires immediate action to prevent possible natural hazards, the Average category (SBV02, SBV03, SBV07, SBV08, SBV09 and SBV10) and low grade (SBV13).

Keywords: Inaouen River, DEM, watershed morphometric parameters, prioritization, erosion

Résumé

Le présent travail met l'accent sur la priorisation du bassin versant de Oued Inaouène sur la base de l'analyse morphométrique. Le réseau hydrographique a été extrait et treize sous-bassins versants ont été délimités à partir d'un MNT en utilisant un logiciel Open Source. Les paramètres morphométriques suivants ont été calculés pour chaque sous-bassin : la longueur du flux (Lu) et sa longueur moyenne (Lsm), le rapport de longueur du flux (RL), le ratio de bifurcation (Rb), le rapport de bifurcation moyen (RBM), la densité de drainage (Dd), la texture du drainage (T), fréquence du flux (Fs), le taux d'allongement (Re), le rapport de circularité (Rc), le facteur de forme (Ff), le relief et le ratio de relief. En combinant les valeurs de ces paramètres nous avons classé les sous-bassins versants en trois catégories de priorisation : la catégorie élevée (SBV01, SBV04, SBV05, SBV06, SBV11 et SBV12), est sujette à une érosion maximale du sol, ce qui nécessite une intervention immédiate pour éviter les risques naturels possibles, La catégorie moyenne (SBV02, SBV03, SBV07, SBV08, SBV09 et SBV10) et la catégorie faible (SBV13).

Mots-Clés : Oued Inaouène, MNT, bassin versant, paramètres morphométriques, priorisation, érosion

Introduction

L'étude des risques naturels dans un bassin versant exige une bonne compréhension hydrologique, géologique, géomorphologique, écologique et climatique pour déterminer les facteurs qui agissent sur la naissance des risques naturels (le couvert végétal, la pente, l'occupation du sol et le réseau hydrographique). Ces indices sont nécessaires pour déterminer la priorisation des bassins versants et ainsi planifier un programme pour la lutte contre les risques naturels.

La bonne gestion d'un bassin versant, ainsi que l'étude de la hiérarchisation des sous bassins versants, nécessite l'utilisation des techniques des systèmes d'informations géographiques (SIG) et les modèles numériques du terrain (MNT) de type SRTM, pour une meilleure évaluation de la zone d'étude en termes de pente, système de drainage, topographie, géomorphologie et la lithologie à partir des cartes géologiques. Ces données ont été utilisées dans l'analyse des paramètres morphométriques du bassin versant et les sous bassins ce qui a permis une priorisation des bassins versants dans le but d'une éventuelle protection contre les risques d'inondation et glissement des terrains...

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Oued Inaouène (fig.01) est compris entre les latitudes : 33°30' & 35°N et longitudes : 3°30' & 5°W. Il se situe à l'Est du bassin versant du Sebou entre les derniers contreforts moyen-atlasiques et le secteur pré-rifain. Il couvre une superficie de 5153 km², avec un périmètre de 320 Km. Il est limité à l'Est par le bassin versant de la moyenne Moulouya, au nord-ouest par ceux du haut Ouergha et au sud-ouest par celui du haut Sebou (Naoura et Benaabidate, 2014).

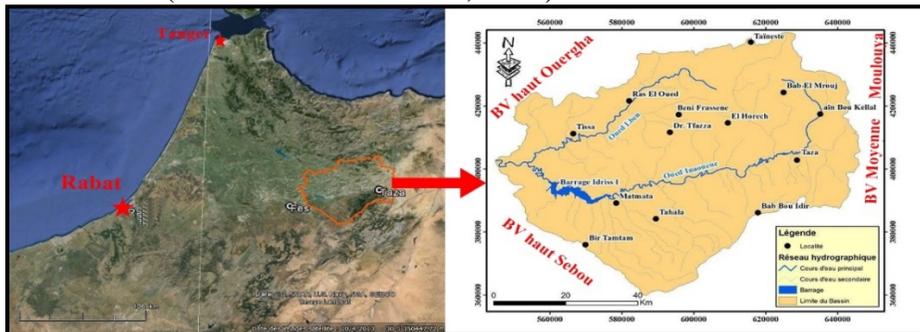


Figure.01 : Carte de situation de la zone d'étude.

Cadres Géomorphologique et Géologique

Sur le plan géomorphologique le bassin versant présente une topographie avec un dénivelé important entre 200 et 2500 m. Il est encadré par deux bordures montagneuses : au nord le Rif, dont le front sud s'étend une région de collines marneuse et argileuse. Au sud le Moyen-Atlas se présente en plateaux étagés, les causses, dominés par des chaînes plissées. (Martin, 1981). Le bassin versant d'Oued l'Inaouène est caractérisé par un substratum marneux imperméable plus ou moins armé de bancs calcaires et gréseux, couvrant 60 % de la surface totale du bassin (fig.02). Ces formations lithologiques tendres sont soumises à une forte érosion, contrairement aux formations carbonatées des plateaux de Tahla et Tazekka (Sibari et al, 2013).

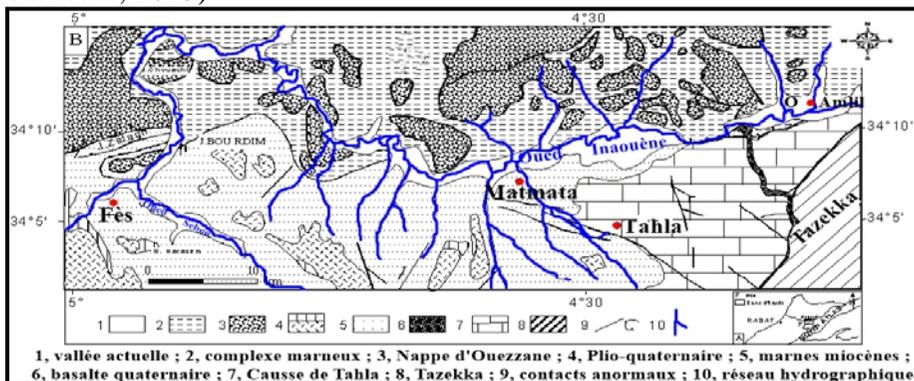


Figure 02: Carte géologique simplifiée de la zone d'étude (d'après Suter, 1964).

Cadre Climatique

La région s’inscrit dans un domaine climatique méditerranéen semi-aride caractérisé par un hiver humide et un été chaud et sec (Taoussi, 2009).

Les données climatiques de quatre stations (Fès : $x = 536916$ $y = 385074$ $z = 410$, Azzaba : $x = 569700$ $y = 359600$ $z = 505$, Marzouka : $x = 615840$ $y = 400840$ $z = 365$ et Taza : $x = 630000$ $y = 404900$ $z = 440$) réparties le long du couloir (fig.03) montrent que la saison humide s’étale sur huit mois allant de novembre à mai avec une moyenne de 470 mm de précipitations annuelles. Les températures moyennes annuelles montrent les mois de juillet et d’août sont les plus chauds tandis que les mois de décembre, janvier et février sont les plus froids. La température moyenne annuelle est de 17.6°C , mais peut atteindre des valeurs extrêmes de 5°C en hiver et 35°C en été (El Haji et al, 2012).

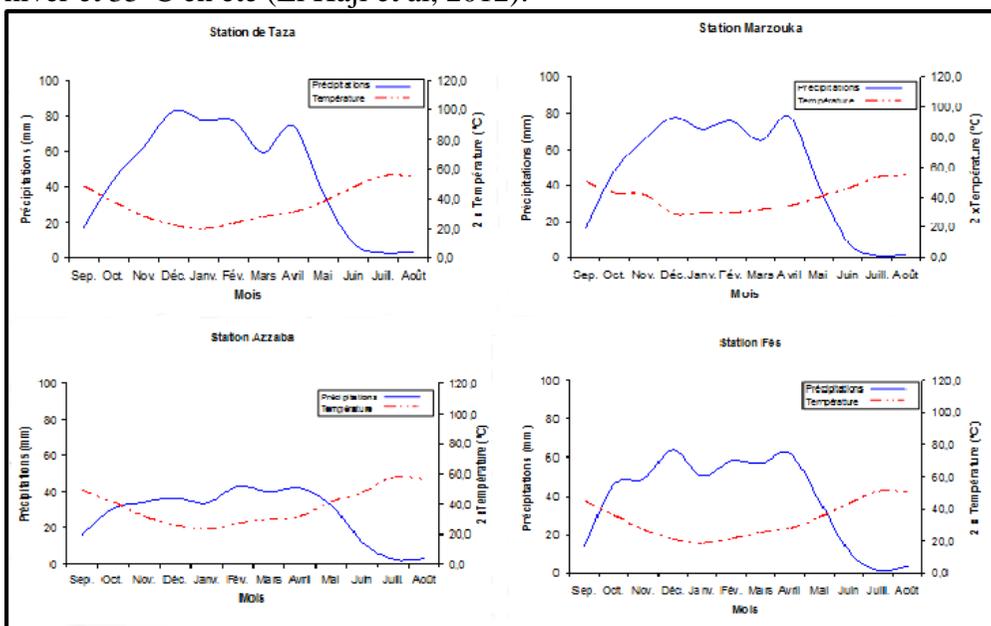


Figure 03 : Diagrammes ombrothermiques des stations du couloir Fès-Taza (période 1973-2006).

Réseau hydrographique

Le bassin versant d’Inaouène est caractérisé par un réseau hydrographique dense et ramifié (fig.04). Son évolution au cours du temps est contrôlée par des facteurs internes (la lithologie et les structures tectoniques), des facteurs externes (le climat, le couvert végétal et l’anthropisation) et enfin des facteurs composites (la topographie, facteurs hydrologique...) des terrains drainés (Dridri et Fedan, 2001). Les affluents s’organisent en un réseau de type dendritique homogène.

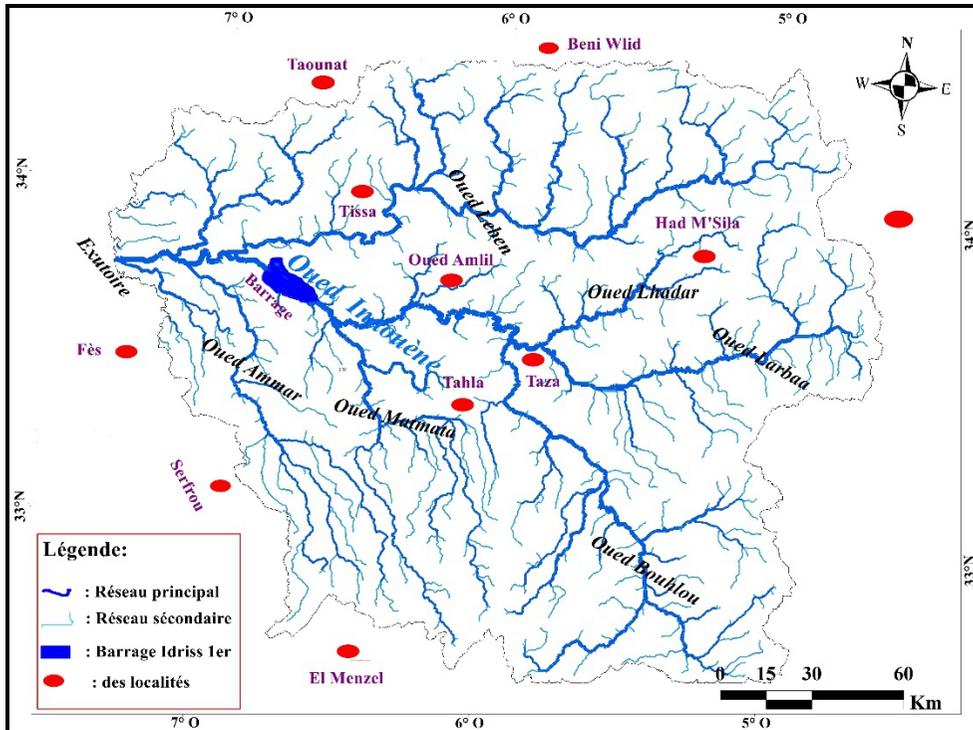


Figure 04: Carte du réseau hydrographique du bassin versant Inaouène.

L’Oued Inaouène coule suivant une direction est-ouest, il est alimenté sur sa rive droite par plusieurs affluents, parmi lesquels on peut citer les Oueds : Larbaa, Lahdar et Amlil... Ces affluents recueillent le ruissellement des collines pré-rieffines. Sur la rive gauche Oued Inaouène est alimenté en partie par le massif primaire de Tazekka et par les calcaires du Moyen-Atlas souvent karstiques. Les principaux affluents de la rive gauche sont : Bou Hellou, Zireg, Matmata et Ahmar (El Mizani , 2006).

Méthode d’étude

La méthodologie adoptée dans ce travail est l’utilisation des cartes topographiques de la zone d’étude à l’échelle de 1/50000, pour valider le réseau hydrographique extrait à partir d’un modèle numérique du terrain (MNT), de type SRTM avec une résolution de 90 m (Shuttle Radar Topography Mission : fait référence à des fichiers matriciels et vectoriels topographiques fournis par deux agences américaines : la NASA et la NGA).

Le nombre et la longueur des cours d'eau de chaque ordre, le périmètre, la longueur et la largeur du bassin, ont été calculées à partir d’un MNT de type SRTM en utilisant le logiciel Open Source Quantum GIS (QGIS). Ces paramètres sont utilisés pour calculer la densité de drainage, la

fréquence de drainage, la forme, le facteur de forme, le rapport circulatoire, et le ratio d'allongement (fig.05).

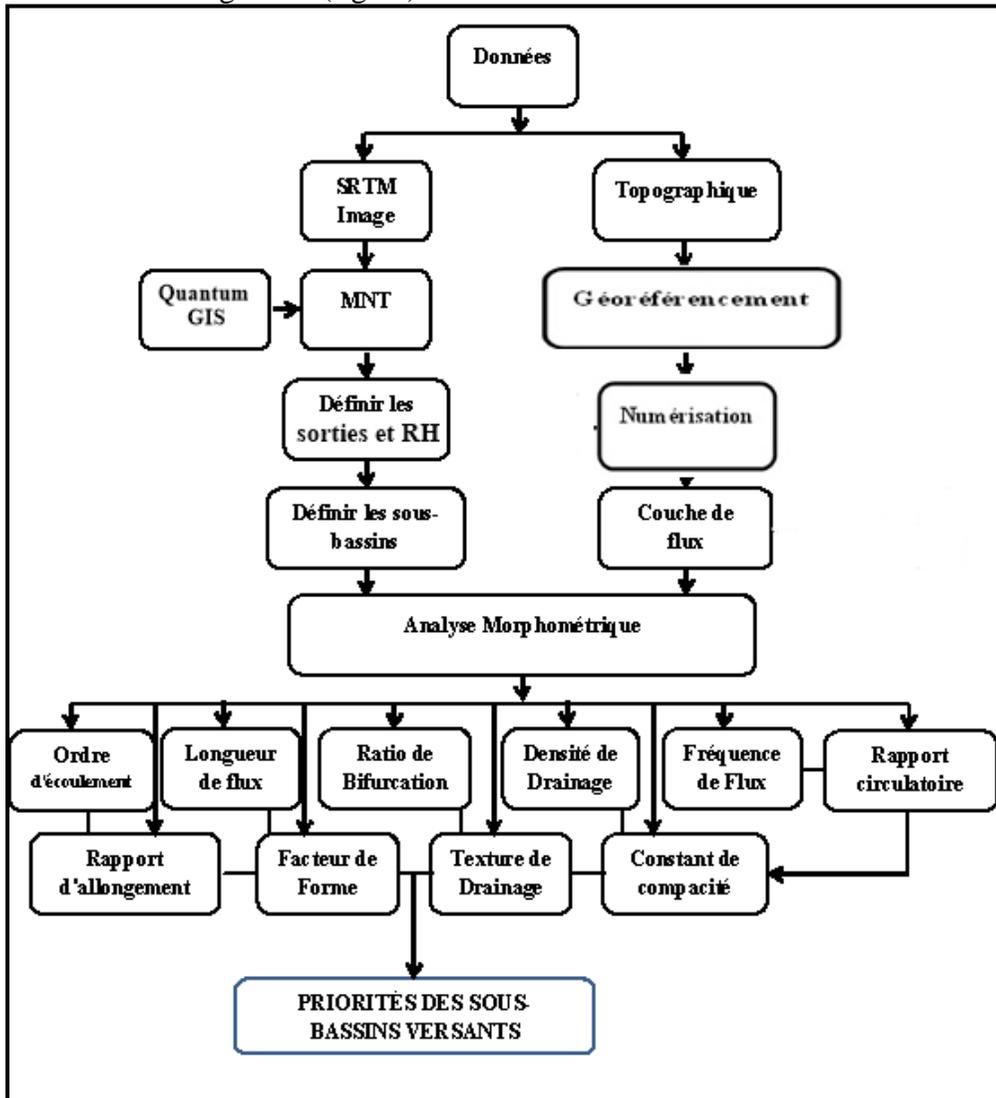


Figure 05 : Organigramme de la méthodologie du travail.

Pour déterminer l'ordre de priorisation des sous-bassins versants de la zone d'étude on subdivise les paramètres morphométriques en trois classes (tab.01) : les **paramètres linéaires**, les **paramètres de forme** et les **paramètres traitant l'aspect du relief** des sous-bassins versants.

Tableau 01 : Liste des paramètres morphométriques utilisés.

N°	Paramètres	Formules	Références
Paramètres Linéaires	Longueur du flux (Lu)	Longueur du flux	Horton, 1945
	Longueur moyenne de flux (Lsm)	$Lsm = Lu / Nu$	Strahler, 1964
	Flux rapport de longueur (RL)	$RL = Lu / (Lu + 1)$	Horton, 1945
	Bifurcation ratio (Rb)	$(Rb) = Nu / Nu + 1$	Schumm, 1956
	Rapport de bifurcation moyenne (RBM)	Rbm = moyenne des ratios de tout ordre de bifurcation	Strahler, 1964
	Densité de drainage (Dd)	$Dd = Lu / A$	Horton, 1945
	Drainage texture (T)	$T = Dd \times Fs$	Smith, 1950
	Fréquence de flux (Fs)	$Fs = Nu / A$	Horton, 1945
Paramètres de formes	Durée de l'écoulement de surface (Lo)	$Lo = \frac{1}{2} Dd$	Horton, 1945
	Rapport d'allongement (Ra)	$Ra = D / L$	Schumm, 1956
	Rapport de circularité (Rc)	$Rc = 4 \pi A / P^2$	Strahler, 1964
	Facteur de forme (Ff)	$Ff = A / L^2$	Horton, 1945
	Rapport de compacité (Cc)	$Cc = 0,2821P/A^{0,5}$	Horton, 1945
Paramètres de relief	Relief du bassin (Rb)	$Rb = H - h$	Hadley et Schumm, 1961
	Rapport du relief (Rr)	$Rr = R / L$	Schumm, 1963
	Relief relative (Rre)	$Rre = Hx 100/P$	Schumm, 1963
	Numéro de Robustesse (Rn)	$Rn = Rre \times Dd$	Schumm, 1963

Résultats et discussion

Dans le but de prioriser les sous-bassins versants d'Oued Inaouène, nous avons commencé par subdiviser le bassin versant en treize sous unités puis nous avons analysé les résultats calculés à partir des paramètres morphométriques (les paramètres linéaires, les paramètres de formes et les paramètres de l'aspect du relief), (fig.06).

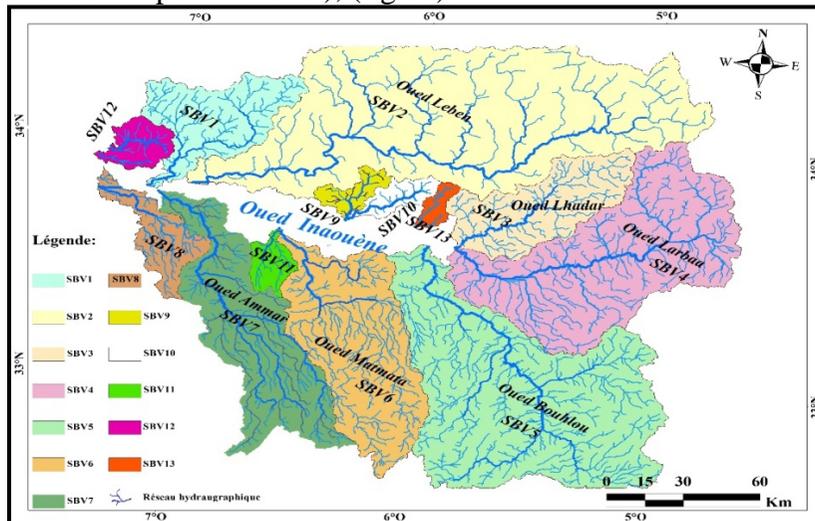


Figure.06 : Carte des sous-bassins et du réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Inaouène.

Les paramètres linéaires

Les paramètres linéaires comprennent : nombre du flux, ordre du flux, longueur du flux, rapport du flux, fréquence de flux, densité de drainage, texture du drainage, rapport de bifurcation et durée de l'écoulement de surface (tab.02 et 03).

Le nombre du flux et l'ordre (Nu) et Longueur du flux (Lu)

La hiérarchisation faite à l'aide du logiciel est basée sur la méthode de Strahler (1957). Les cours d'eau ayant pour extrémité amont une source sont d'ordre (1), la confluence de deux cours d'eau d'ordre (n) en donne un ordre (n+1) et la confluence d'un cours d'eau d'ordre n avec un ordre (n+1) donne un cours d'eau d'ordre (n+1). L'ordre du tronçon arrivant à l'exutoire est donc l'ordre maximum du bassin (fig.07).

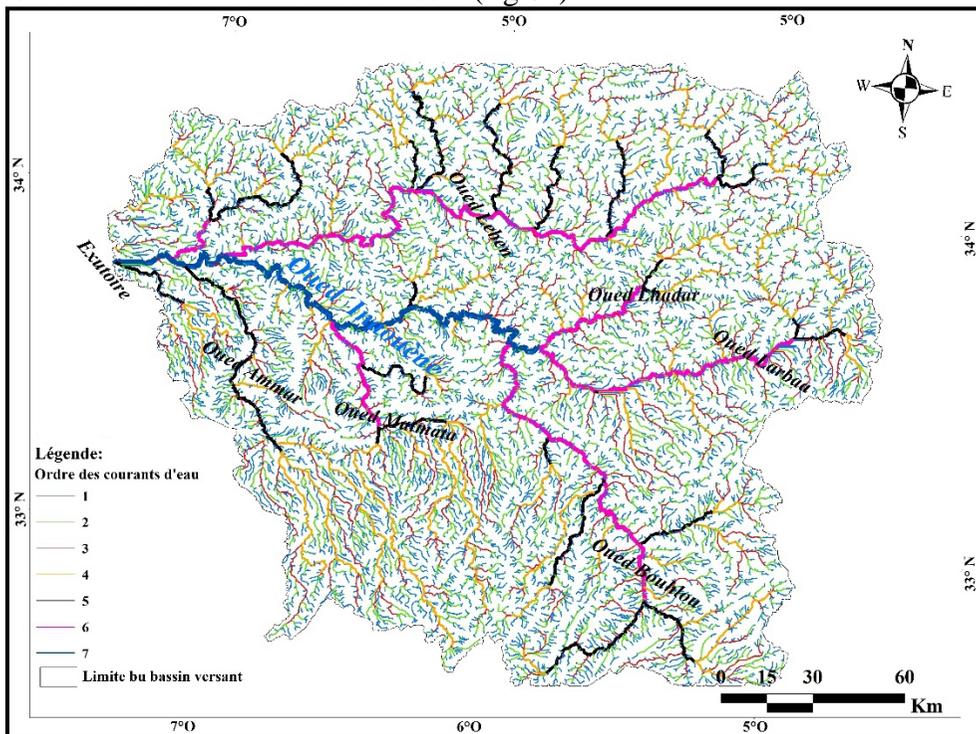


Figure.07 : Carte du réseau hydrographique hiérarchisé de l'Oued Inaouène

Tableau 02 : Analyse des courants des treize sous-bassins du bassin versant Inaouène.

Sous-bassins	Nombres du flux Nu							Longueur du flux (Km) Lu							Rapport de la longueur				
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	2/1	3/2	4/3	5/4	6/5
SBV01	1099	574	223	226	162	68	2	632,36	331,61	109,84	88,29	74,84	26,84	0,002	0,53	0,33	0,80	0,85	0,36
SBV02	5894	2302	1438	790	491	714	0	2921,22	1477,89	757,32	331,01	257,64	248,82	0	0,50	0,51	0,44	0,34	0,96
SBV03	1243	552	255	233	28	130	1	622,10	394,20	150,76	97,04	18,91	55	0,02	0,63	0,38	0,64	0,19	2,91
SBV04	3313	1515	942	657	95	323	0	1819,24	921,72	604,22	224,01	30,53	115,62	0	0,50	0,65	0,37	0,14	3,79
SBV05	4312	2115	918	584	317	267	2	2557,43	1336,78	605,63	307,63	182,04	135,46	0,006	0,52	0,45	0,51	0,59	0,74
SBV06	2755	1473	673	392	268	64	2	1439,22	706,48	394,35	278,05	70,83	48,54	0,03	0,49	0,56	0,70	0,25	0,68
SBV07	2142	1003	651	366	239	0	0	1280,05	663,92	377,14	225,69	97,12	0	0	0,52	0,57	0,60	0,43	0
SBV08	483	232	109	110	50	0	2	364,15	191,17	93,57	64,98	40,33	0	0,001	0,52	0,49	0,69	0,62	0
SBV09	223	78	33	52	10	0	0	110,81	54,07	20,30	19,72	10,80	0	0	0,49	0,37	0,97	0,55	0
SBV10	224	133	18	81	0	0	0	117,35	65,06	10,44	39,54	0	0	0	0,55	0,16	3,79	0	0
SBV11	267	68	53	108	0	0	2	125,24	55,58	48,08	21,40	0	0	0	0,44	0,86	0,44	0	0
SBV12	568	279	67	92	0	0	2	217,25	105,99	41,06	31,48	0	0	0,004	0,49	0,39	0,77	0	0
SBV13	86	22	56	1	0	0	2	55,23	19,65	39,33	1,02	0	0	0	0,35	2	0,02	0	0

Tableau 03 : Paramètres linéaires des sous-bassins versants d'Oued Inaouène.

SBV	Densité de drainage (Dd)	Fréquence du flux (Fu)	Rapport du Bifurcation (Rb)	Texture du drainage (Td)	Longueur l'écoulement de surface (Lo)
SBV01	0,71	1,32	43,24	7,78	0,35
SBV02	0,63	1,23	1,66	17,25	0,31
SBV03	0,66	1,20	24	8,93	0,33
SBV04	0,68	1,26	2,49	14,77	0,34
SBV05	0,71	1,18	23,74	15,33	0,35
SBV06	0,79	1,52	7,60	14,73	0,39
SBV07	0,77	1,28	1,74	8,95	0,38
SBV08	0,87	1,14	1,85	4,04	0,43
SBV09	0,69	1,26	2,76	3,24	0,34
SBV10	0,67	1,32	3,10	3,80	0,33
SBV11	5,17	1,42	1,9	4,84	2,58
SBV12	0,83	2,11	2,31	7,28	0,41
SBV13	0,62	0,90	20,1	2,19	0,31

L'analyse du réseau hydrographique hiérarchisé d'Oued Inaouène montre que le nombre total de flux est 45324 (tab.02). Les totaux des nombres et longueur du flux de chaque ordre diminuent de moitié pour les ordres 1 à 5 et restent presque les mêmes pour les ordres 5 et 6 (fig.08).

Le nombre maximum de flux se trouve dans le SBV 02 (11576) et le nombre minimum dans le SBV 13 (165). La longueur des flux suit celle du nombre des flux dans le classement des sous bassins versants, le SBV02 est le premier présente une longueur de 5994 Km. Le dernier sous-bassin est le SBV 13 avec 115 Km. Au fur et à mesure que le nombre d'ordre du flux augmente la longueur du flux diminue, à l'exception des SBV 03, SBV 04 et SBV 10 et ceci peut être dû soit à un changement brutal de la pente soit à un obstacle qu'il faut contourner.

Il est à noter que la variation de l'ordre et de la taille des sous-bassins versants est en grande partie liée à des conditions lithologiques ; ceci s'explique par le fait que le SBV02 a un substrat marneux, alors que le SBV13 repose sur les calcaires. A ces conditions lithologiques s'ajoute un contraste climatique caractérisé par des pluies sous forme d'averse. Et enfin la présence d'une pente raide qui augmente la vitesse du ruissellement et par conséquent le développement des badlands.

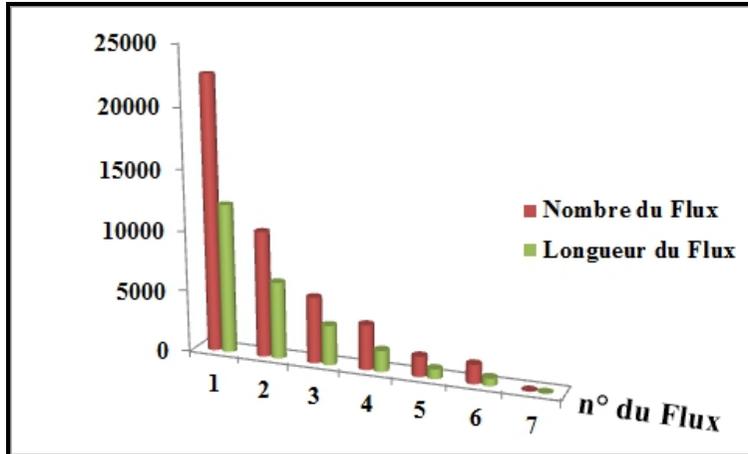


Figure 08: Nombre et longueur de courant de chaque ordre du bassin versant d'Oued Inaouène.

Rapport du flux (RI)

Il correspond au rapport de la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (n+ 1) sur la longueur moyenne des talwegs d'ordre (n) :

$$RL = L_{n+1} / L_n$$

Avec :

- **RL** : rapport de longueur ;
- **L_{n+1}** : longueur totale des drains d'ordre (n+1) exprimé en km;
- **L_n** : longueur totale des drains d'ordre (n), exprimé en km

On note des variations du rapport de longueur au niveau d'un même sous-bassin versant et d'un bassin à l'autre (tab.02). Ceci est dû à des variations dans la pente et la topographie des terrains drainés (M.L.Waikar and Aditya P. Nilawar, 2014).

Fréquence de flux (Fu) :

La fréquence du flux est exprimée par le nombre total de segments de courant de tous les ordres par unité de surface (Horton, 1932). Dans le bassin versant d'Oued Inaouène, la fréquence du flux est de l'ordre de 1,28 dans les 11 premiers sous-bassins, et atteint de 2,11 dans le SBV 12 et diminue vers 0,9 dans le SBV13 (tab03). Généralement une haute fréquence de flux est liée à un matériau imperméable. La faible variation de la fréquence du flux s'expliquerait par la dominance des marnes dans la zone d'étude.

Densité du drainage (Dd):

La densité du drainage (Dd), introduite par Horton (1932), est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface d'un bassin versant. Elle s'exprime en km/km². Elle est contrôlée par plusieurs facteurs notamment la nature géologique des terrains, la capacité d'infiltration du sol

et sous-sol, les conditions climatiques et le couvert végétal du bassin (Humbert, 1990). La densité du drainage des sous-bassins versants d'Oued Inaouène varie de 0,62 à 5,17 (tab03).

Les faibles valeurs de cette densité indiquent que le sol et le sous-sol sont très perméables, tandis que les hautes valeurs montrent que les terrains sont imperméables, dans notre cas d'étude le bassin versant de l'Inaouène est caractérisé, en grande partie, par un substratum marneux imperméable. Du point de vue couvert végétal, la zone d'étude est presque nue à l'exception de quelques oliviers, ceci favorise l'érosion du terrain. On ne peut oublier le rôle du contraste des saisons et l'influence des averses sur l'érosion des marnes.

Texture du drainage (Td) :

La texture du drainage est définie comme le nombre total de segments de courant de tous les ordres par périmètre de la zone (Horton, 1945). La texture du drainage dépend de certains facteurs naturels (le climat, les précipitations, la végétation, la lithologie des roches et le type de sol, capacité d'infiltration, le relief).

La texture du drainage regroupe ou se caractérise par cinq catégories : très grossière (<2), grossière (2-4), modérée (4-6), fin (6-8) et très fine (> 8) (Umair et Syed, 2014).

La texture du drainage des sous-bassins versant d'Oued Inaouène varie de 2,19 à 17,25 (tab.03). Seule quatre catégories de texture ont été constatées dans notre région (fig.09) :

- Texture du drainage très fine pour les : SBV02 (17,25), SBV04 (14,77), SBV05 (15,33), SBV06 (14,73) et SBV07 (8,95).
- Texture du drainage fin pour les : SBV01(7,78), SBV03 et SBV12 (7,28).
- Texture du drainage modéré pour les : SBV08 (4,04) et SBV11 (4,84).
- Texture du drainage grossier pour les : SBV09 (3,24), SBV10 (3,80) et SBV13 (2,19).

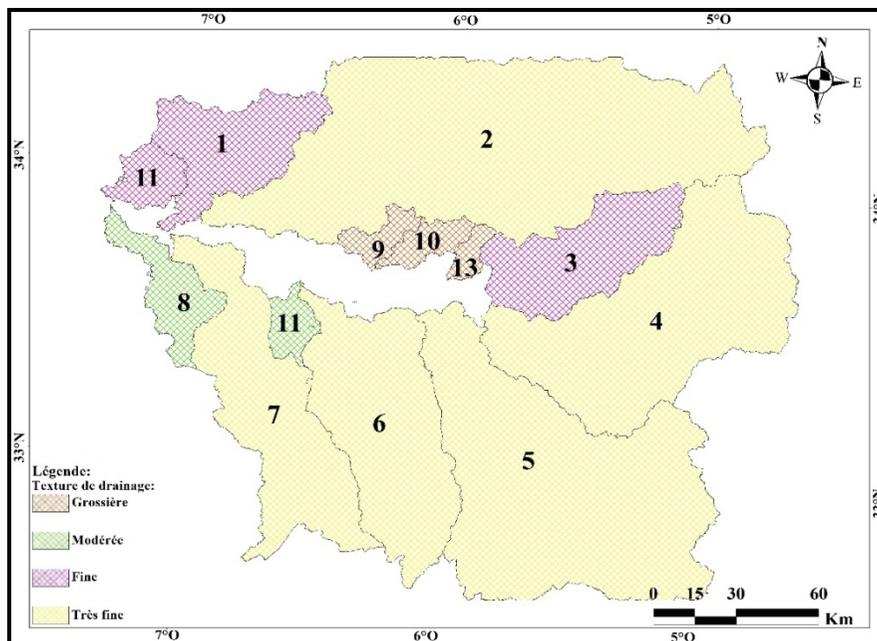


Figure 09: Carte de texture du drainage des sous-bassins versant d’oued Inaouène.

Rapport de bifurcation (Rb)

Le rapport de bifurcation (Rb) est un paramètre qui exprime le degré de ramification du réseau de drainage (N. S. Magesh and N. Chandrasekar, 2012). Il est défini comme le rapport entre le nombre de segments de flux d'ordre donné au nombre de segments du prochain ordre supérieur (Schumm 1956). Les valeurs du rapport de bifurcation des sous-bassins versants de d’Oued Inaouène varient de 1,66 à 7,21(tab03). Ce rapport est un indicateur du stade d’évolution des bassins versants (Strahler, 1964). La valeur élevée de Rb indique un fort contrôle structural sur le réseau de drainage alors que la valeur faible indique que le sous-bassin est moins affecté par les perturbations structurales. En règle générale la valeur moyenne de Rb varie entre 3,0 et 5,0 pour un bassin versant où l’influence des structures géologiques sur le réseau de drainage est négligeable (Vestappen, 1983).

Dans notre cas d’étude on peut classer le rapport de bifurcation moyen en trois classes (tab.04) : faible < 3, médium entre 3 et 5, et élevée > 5 (fig.10) :

Tableau.04 : Classement du rapport de bifurcation moyen des sous-bassins versant d’Inaouène

Rapport de bifurcation	Classes	Sous-bassins versants
> 5	Elevé	SBV01 (43, 24), SBV03 (24, 00), SBV05 (23, 74), SBV06 (7, 60), SBV13 (20, 1).
[3 - 5]	Médium	SBV10 (3,10)
< 3	Faible	SBV02(1,66), SBV04(2,49), SBV07 (1,74), SBV08 (1,85), SBV09 (2,76), SBV11 (1,9) et SBV12 (2,31).

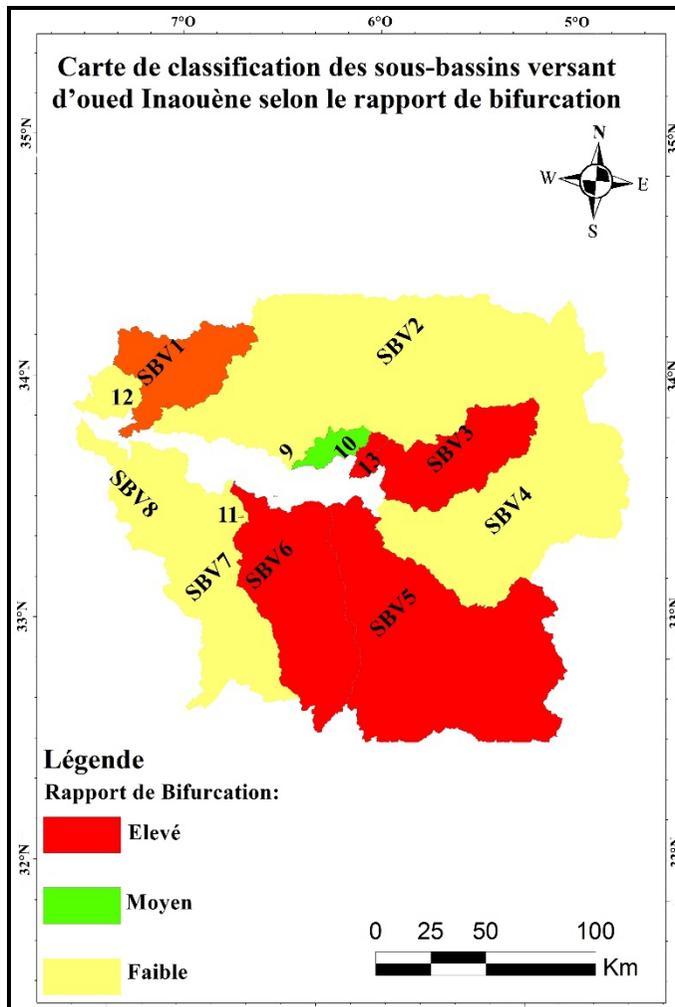


Figure 10 : Carte de classification des sous-bassins versant d'oued Inaouène selon le rapport de bifurcation

La longueur de l'écoulement de surface (Lo) :

La longueur de l'écoulement de surface est sensiblement égale à la moitié de l'inverse de la densité de drainage.

Lo = 1/2Dd

Ce facteur est inversement proportionnel à la pente moyenne du chenal (Shiva et Dharanirajan., 2014). La longueur de l'écoulement de surface des sous-bassins versants d'Oued Inaouène (tab.02) varie de 0,31 à 2,58. La longueur d'écoulement la plus courte est 0,31 pour SBV02 et SBV13 ce qui indique un processus de ruissellement rapide. Par contre la longueur d'écoulement la plus grande est 2,58 pour le SBV11 ce qui indique un processus de ruissellement lent.

Conclusion

Les paramètres linéaires ont une relation directe avec l'érosion des sols du fait que les cours d'eau sont les agents dynamiques de l'érosion. Une valeur élevée indique une forte probabilité d'érosion du sol ce qui est le cas de la majorité de nos sous-bassins versants et particulièrement SBV11, SBV12 et SBV06.

Paramètres de forme

Les paramètres de forme comprennent le facteur de forme, le rapport d'allongement, le rapport de la compacité et le rapport circulatoire (tab.05)

Facteur de forme (Ff)

Le facteur de forme est défini comme étant le rapport de la surface totale du bassin versant et de la longueur du bassin (Horton, 1932). Pour un bassin parfaitement circulaire, la valeur du facteur de forme sera supérieure à 0,78. Plus le bassin est allongé, plus la valeur du facteur de forme serait faible.

Les valeurs du facteur de forme (Ff) de nos sous-bassins versants varient de 0,17 à 0,28 (tab05). L'observation montre que les sous-bassins versants allant de SBV02 au SBV08 sont fortement allongés tandis que les sous-bassins versants SBV01, SBV09, SBV10, SBV11, SBV12 et SBV13 sont les moins allongés.

Tableau 05 : Paramètres de forme des sous-bassins versants d'Oued Inaouène.

SBV	Facteur de Forme (Ff)	Rapport Circulatoire (Rc)	Rapport d'Allongement (Ra)	Forme du bassin (Bs)	Coefficient de compacité(Cc)
SBV01	0,21	0,24	0,59	4,76	2,02
SBV02	0,17	0,26	0,52	5,98	1,95
SBV03	0,21	0,34	0,58	4,85	1,71
SBV04	0,18	0,32	0,54	5,54	1,77
SBV05	0,17	0,29	0,53	5,76	1,84
SBV06	0,19	0,32	0,56	5,26	1,77
SBV07	0,19	0,18	0,56	5,21	2,36
SBV08	0,19	0,18	0,61	4,32	2,34
SBV09	0,26	0,26	0,66	3,76	1,94
SBV10	0,26	0,30	0,65	3,81	1,82
SBV11	0,26	0,42	0,65	3,81	1,55
SBV12	0,25	0,31	0,64	3,98	1,79
SBV13	0,28	0,40	0,68	3,50	1,57

Rapport d'allongement (Ra) :

Selon Schumm, (1956), le rapport d'allongement est défini comme étant le rapport entre le diamètre du cercle de même surface que le bassin de drainage et la longueur maximale du bassin. Les valeurs du rapport

d'allongement (R_a) varient généralement de 0,6 à 1 sur une large variété de facteurs climatiques et géologiques. Les valeurs proches de 1 sont typiques des régions de très faible relief, alors que les valeurs dans la gamme de 0,6 à 0,8 sont généralement associées à de haut relief et de forte pente du terrain (Strahler, 1964). Les valeurs du rapport d'allongement des sous-bassins versants d'Oued Inaouène varient de 0,52 à 0,68 (tab.05), ce qui indique leur forme allongée et des pentes importantes.

Rapport circulatoire (R_c) :

Le Rapport circulatoire (R_c) est le rapport de la surface d'un bassin à l'aire d'un cercle ayant la même circonférence que le périmètre du bassin (Miller 1953). Il est contrôlé par plusieurs facteurs : la longueur, la fréquence des cours d'eau, la tectonique, la lithologie, le climat, la pente et le couvert végétal du bassin. Les valeurs de R_c sont corrélées stades du cycle de vie du bassin (N. S. Magesh and N. Chandrasekar, 2012). Les valeurs du rapport de circularité des sous-bassins versants d'Oued Inaouène varient de 0,18 à 0,42 (tab.05). La valeur la plus élevée correspond au stade terminal de maturité du bassin versant (SBV11 et SBV13).

Coefficient de Compacité (C_c) :

Le Coefficient de compacité est défini comme le périmètre du bassin divisé par la circonférence d'un cercle à la même zone du bassin. Le coefficient de compacité est proportionnel à l'évaluation du risque d'érosion ce qui nécessite la mise en œuvre des mesures de protection et de conservation. Dans notre étude on note que les valeurs de C_c présentent un écart type faible (1,55 pour SBV11 à 2,36 pour SBV07) (tab.05). D'après ce coefficient les SBV07 et SBV08 sont les plus exposés au risque d'érosion.

Conclusion

Les paramètres de formes comme le taux d'allongement, le facteur de forme et le coefficient de compacité sont inversement proportionnels à la vigueur de l'érosion des sols. L'étude permet de conclure que le paramètre de forme est le plus déterminant, la plus faible sa valeur est un indicateur de risque d'érodabilité.

Aspects du relief du bassin versant

L'aspect du relief du bassin comprend le relief du bassin (R_b), le relief relatif (R_r), le rapport du relief ou relief ratio (R_h), le numéro de robustesse (R_n) (Umair Ali and Syed Ahmad Ali, 2014) ou la pente du terrain (tab.06).

Tableau 06 : Paramètres d'aspect du relief des sous-bassins versants d'Oued Inaouène.

SBV	Relief du bassin (H en m)	Rapport du relief (Rh)	Relief relatif (Rr)	Nombre de Robustesse (Rn)
SBV01	842	0,009	0,003	0,598
SBV02	2421	0,010	0,003	1,525
SBV03	1560	0,015	0,006	1,030
SBV04	1907	0,011	0,004	1,297
SBV05	2926	0,014	0,005	2,077
SBV06	2057	0,015	0,005	1,625
SBV07	1759	0,013	0,003	1,354
SBV08	663	0,011	0,003	0,577
SBV09	559	0,016	0,004	0,386
SBV10	494	0,014	0,004	0,331
SBV11	929	0,025	0,007	4,803
SBV12	208	0,005	0,001	0,173
SBV13	565	0,022	0,007	0,350

Relief du bassin

Il est défini comme étant la différence d'altitude entre le point le plus bas (exutoire) et le point le plus élevé (linge de partage des eaux) d'un bassin versant (Kartic B. and Jatisankar B. 2013). Il joue un rôle important dans le développement des formes de relief, le développement de drainage de surface et l'écoulement de l'eau souterraine (N. S. Magesh and N. Chandrasekar, 2012). Les valeurs du relief des sous-bassins versant d'Oued Inaouène (tab.06) varient entre 2926 m pour le SBV05 et 208 m pour le SBV12. On remarque que les SBV02 à 07 ont un relief du bassin important et seront donc exposés à un drainage important, et une faible infiltration, par opposition aux SBV08 à SBV13 et SBV01 qui ont des valeurs de relief du bassin faibles.

Rapport du relief

Le relief ratio mesure la pente globale d'un bassin de drainage. C'est un indicateur de l'intensité du processus d'érosion se produisant dans un bassin versant (Schumm, 1956). Les valeurs du rapport du relief des sous-bassins versants d'Oued Inaouène varient de 0,009 à 0,025 (tab.06). La valeur la plus élevée est celle du SBV11 ce qui indique une pente raide, tandis que les valeurs les plus basses sont celles des SBV01 et SBV02 ce qui indique des degrés de pente faibles (fig.11).

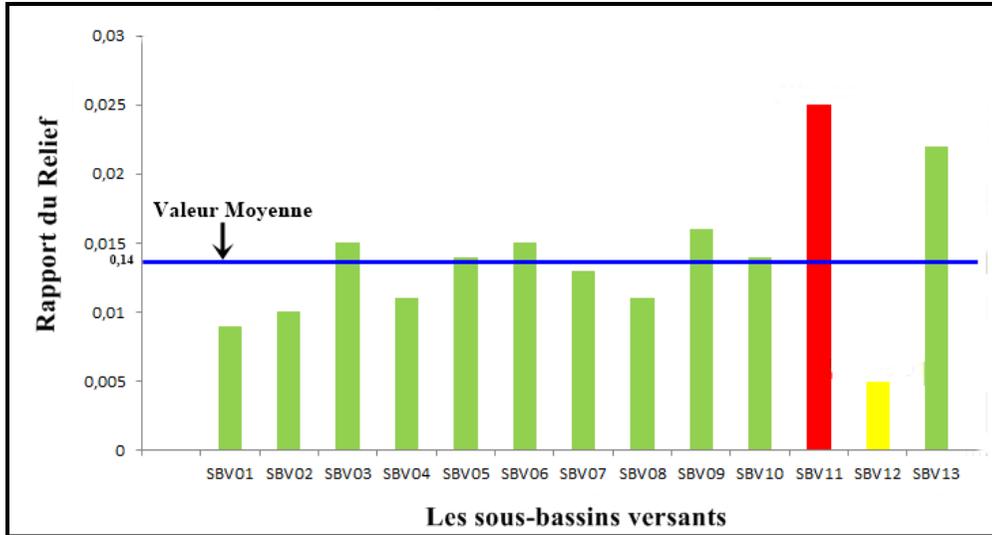


Figure 11 : Rapport du relief des sous-bassins versant d'Oued Inaouène.

Relief relatif

L'indice Relief relatif (Rr) est une variable morphométrique importante utilisée pour l'estimation des caractéristiques morphologiques générales du terrain (Umair et Syed, 2014). Il est calculé selon la formule suivante :

$$Rr = H*100/P$$

Avec : **H** : relief du bassin et **P** : périmètre du bassin.

Les sous-bassins versants ayant un relief relatif plus élevé ont un potentiel de ruissellement plus élevé que les autres (Umair et Syed, 2014). Le relief relatif pour les sous-bassins versants d'Oued Inaouène varie de 0,001 pour SBV12 à 0,007 pour SBV11 et SBV13 (tab.06). On peut conclure que SBV11 et 13 ont un potentiel de ruissellement élevé.

Nombre de robustesse (Rn)

Le nombre de robustesse (Rn) est le produit de la densité de drainage (Dd) et celui du relief du bassin (H) (Strahler, 1957 ; Melton, 1958) dans la même unité. Dans cette étude les valeurs du numéro de robustesse varient entre 0,173 et 4,803 (tab.06). La valeur la plus élevée a été observée dans le SBV11 (4,803), (fig.13).

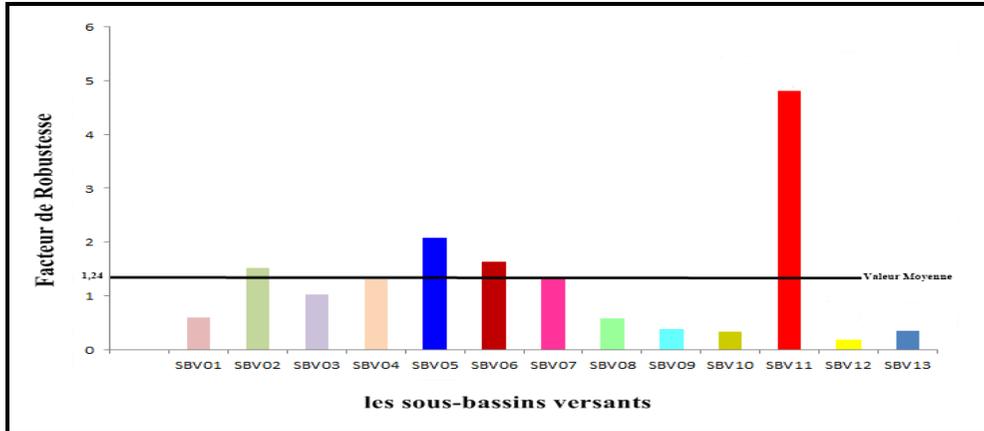


Figure 13 : variations de robustesse des sous-bassins versants d’Oued Inaouène.

Conclusion

L’analyse des paramètres du relief du bassin (le relief du bassin (Rb), le relief relatif (Rr), le rapport du relief (Rh) et le numéro de robustesse (Rn)), nous permet de tirer les conclusions suivantes : les SBV02 à 07 ont un drainage important et une pente plus au moins raide, alors que les SBV11 et 05 ont un potentiel de ruissellement important et drainent une décharge solide plus importante.

Classement et hiérarchisation des sous-bassins versants basés sur l'analyse morphométrique

Les Paramètres morphométriques sont considérés comme étant des paramètres d’évaluation des risques d’érosion et ont été utilisés pour hiérarchiser les sous-bassins versants (Bidwas et al, 1999).

Les paramètres linéaires ont une relation directe et proportionnelle avec l’érodabilité, plus la valeur est élevée, plus l’érodabilité est élevée (tab.07).

Tableau 07 : Classement des paramètres linéaires des sous-bassins versants d’Oued Inaouène

SBV	Les Paramètres Linéaires									
	(Dd)	Clas	(Fu)	Clas	(Rb)	Clas	(Td)	Clas	(Lo)	Clas
SBV01	0,71	6	1,32	4	43,24	1	7,78	7	0,35	6
SBV02	0,63	11	1,23	7	1,66	13	17,25	1	0,31	9
SBV03	0,66	10	1,20	8	24	2	8,93	6	0,33	8
SBV04	0,68	8	1,26	6	2,49	8	14,77	3	0,34	7
SBV05	0,71	6	1,18	9	23,74	3	15,33	2	0,35	6
SBV06	0,79	4	1,52	2	7,60	5	14,73	4	0,39	4
SBV07	0,77	5	1,28	5	1,74	12	8,95	5	0,38	5
SBV08	0,87	2	1,14	10	1,85	11	4,04	10	0,43	2
SBV09	0,69	7	1,26	6	2,76	7	3,24	12	0,34	7
SBV10	0,67	9	1,32	4	3,10	6	3,80	11	0,33	8
SBV11	5,17	1	1,42	3	1,9	10	4,84	9	2,58	1
SBV12	0,83	3	2,11	1	2,31	9	7,28	8	0,41	3
SBV13	0,62	12	0,90	11	20,1	4	2,19	13	0,31	9

Les paramètres de formes ont une relation inverse avec l'érodabilité, plus la valeur de ces paramètres est faible, plus l'érodabilité est élevée. Leurs valeurs sont classées dans un ordre croissant sous forme du rang (Nooka Ratnam et al., 2005 ; Akram J et al., 2009). Et c'est selon cette règle nous avons classé les différents paramètres de forme dans notre zone d'étude (tab.08).

Tableau08: Classement des paramètres de formes des sous-bassins versants d'Oued Inaouène

SBV	Les Paramètres de Formes									
	(Ff)	Clas	(Rc)	Clas	(Ra)	Clas	(Bs)	Clas	(Cc)	Clas
SBV01	0,21	4	0,24	2	0,59	6	4,76	7	2,02	10
SBV02	0,17	1	0,26	3	0,52	1	5,98	13	1,95	9
SBV03	0,21	4	0,34	9	0,58	5	4,85	8	1,71	3
SBV04	0,18	2	0,32	7	0,54	3	5,54	11	1,77	4
SBV05	0,17	1	0,29	4	0,53	2	5,76	12	1,84	7
SBV06	0,19	3	0,32	8	0,56	4	5,26	10	1,77	4
SBV07	0,19	3	0,18	1	0,56	4	5,21	9	2,36	12
SBV08	0,19	3	0,18	1	0,61	7	4,32	6	2,34	11
SBV09	0,26	6	0,26	3	0,66	10	3,76	2	1,94	8
SBV10	0,26	6	0,30	5	0,65	9	3,81	3	1,82	6
SBV11	0,26	6	0,42	11	0,65	9	3,81	4	1,55	1
SBV12	0,25	5	0,31	6	0,64	8	3,98	5	1,79	5
SBV13	0,28	7	0,40	10	0,68	11	3,50	1	1,57	2

Partant de ce qui précède, le classement des sous-bassins versant a été déterminée en attribuant le classement le plus élevé de priorité sur la base de la valeur la plus élevée dans le cas des paramètres linéaires et la valeur la plus basse en cas de paramètres de forme (Tab.08).

Le facteur composé calculé à partir de ces paramètres nous aide à faire un classement de priorité de chaque sous-bassin (tab.09). Le plus haut rang a été affecté au sous-bassin ayant le plus faible facteur composé et ainsi de suite.

Tableau 09 : Résultats de la priorisation de l'analyse morphométrique des sous-bassins versants d'Oued Inaouène.

SBV	Les Paramètres Morphométriques										Valeur CP	Priorité Finale
	Paramètres Linéaires					Paramètres de Formes						
	Dd	Fs	Lo	Rb	Td	Rc	Re	Rf	Bs	Cc		
SBV01	6	4	6	1	7	2	6	4	7	10	5,3	Elevée
SBV02	11	7	9	13	1	3	1	1	13	9	6,8	Médium
SBV03	10	8	8	2	6	9	5	4	8	3	6,3	Médium
SBV04	8	6	7	8	3	7	3	2	11	4	5,9	Elevée
SBV05	6	9	6	3	2	4	2	1	12	7	5,2	Elevée
SBV06	4	2	4	5	4	8	4	3	10	4	4,8	Elevée
SBV07	5	5	5	12	5	1	4	3	9	12	6,1	Médium
SBV08	2	10	2	11	10	1	7	3	6	11	6,3	Médium
SBV09	7	6	7	7	12	3	10	6	2	8	6,8	Médium
SBV10	9	4	8	6	11	5	9	6	3	6	6,7	Médium
SBV11	1	3	1	10	9	11	9	6	4	1	5,5	Elevée
SBV12	3	1	3	9	8	6	8	5	5	5	5,3	Elevée
SBV13	12	11	9	4	13	10	11	7	1	2	8	Faible

En se basant sur la valeur moyenne de ces paramètres, les sous-bassins ayant la valeur faible sont considérés comme étant au premier rang de priorité, et le sous-bassin versant ayant la valeur la plus élevée de facteur composé est le moins prioritaire. Les sous-bassins versants ont été classés, sur la base de la gamme des valeurs du facteur composé et qui varient entre 4,8 et 8, en trois catégories de priorisation : élevée, moyenne et faible (tab.09) et (fig.14) :

- Elevée : SBV01, SBV04, SBV05, SBV06, SBV11 et SBV12,
- Moyenne : SBV02, SBV03, SBV07, SBV08, SBV09, SBV10,
- Faible : SBV13.

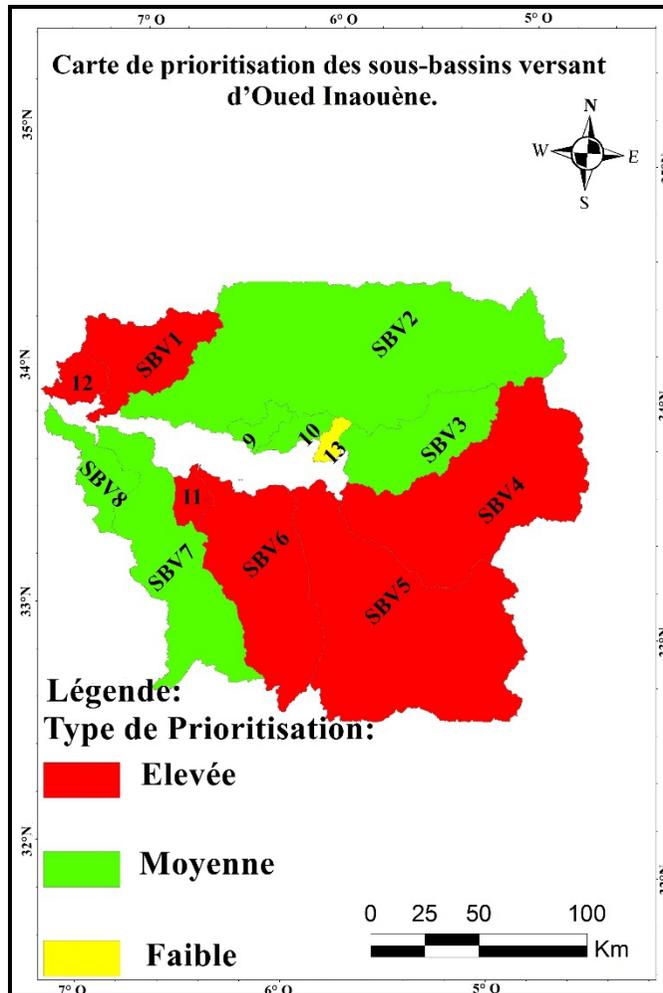


Figure 14 : Carte de priorisation des sous-bassins versant d'Oued Inaouène.

Conclusion:

La Prioritisation des bassins versants est l'une des approches les plus pertinentes dans la planification, la gestion des risques naturels et la mise en œuvre des programmes de développement durable.

Les résultats de l'étude des paramètres morphométriques, des différents sous-bassins versants d'Oued Inaouène, montrent leurs caractéristiques relatives et ainsi leur réponse hydrologique. Elles ont permis une hiérarchisation des sous-bassins versants en terme de priorisation. Elles montrent que les sous-bassins versants ; SBV01, SBV04, SBV05, SBV06, SBV11 et SBV12, ont une très haute priorité et sont plus sensibles à l'érosion des sols, ce qui peut induire le déclenchement de plusieurs risques naturels. Par conséquent une attention immédiate et particulière des responsables et les décideurs pour prendre des mesures de protection de ces bassins versants, afin de réduire les risques naturels.

References:

- Akram, J., Mohd Yousuf K., Rizwan A., (2009). Prioritization of Sub-watersheds based on Morphometric and Land Use Analysis using Remote Sensing and GIS Techniques. *J. Indian Soc. Remote Sensing* 37: 261-274
- Bidwas S., Sudhakar S., Desai VR., (1999). Prioritization of sub-watershed based on Morphometric analysis of drainage basin, District Midnapore. West Bengal. *J.Indian Soc. Remote Sensing* 27(3): 155-166
- Dridri A., Fadan A., (2001). 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, n° 23, 67-77.
- El Haji M., Boutaleb S., Laamarti R., Laarej L., (2012). Qualité des eaux de surface et souterraine de la région de Taza (Maroc) : bilan et situation des eaux. *Afrique SCIENCE* 08(1) (2012) 67 – 78.
- El Mizani F., (2006). Contribution à l'étude des ressources en eaux dans le bassin versant d'Inaouène (Maroc, Septentrional). Thèse d'état université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, faculté des sciences et Techniques Fès-Saïss, Maroc, 185p.
- Hadley R.F., and Schumm S.A., (1961). Sediment sources and drainage-basin characteristics in upper Cheyenne River basin: U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1531-B.
- Horton R. E., (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions A. Geophysical Union*, 13: 350-361.
- Horton R. E., (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, Vol.56, pp.275-370.

- Humbert J., (1990). Intérêt de la densité de drainage pour régionaliser les données hydrologiques en zone montagneuse. *Hydrology in Mountainous Regions. I -Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990)*. IAHS Publ. no. 193,1990, p 373-380.
- Kartic B., Jatisankar B., (2013). Prioritization of Watershed using Morphometric Analysis through Geoinformatics technology: A case study of Dungra subwatershed, West Bengal, India. *Int. Journal of Advances in Remote Sensing and GIS*, Vol. 2, No. 1, 2013.
- M.L.Waikar., Aditya P., Nilawar (2014). Morphometric Analysis of a Drainage Basin Using Geographical Information System: A Case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research (2014)*, Volume 2, P 179-184.
- Martin, J., (1981). Le moyen Atlas Central. Etude Géomorphologique, Notes et Mém. Serv. Geol. Maroc, 258 bis, 1981, 445 p.
- Melton., (1958). Correlations structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents. *Journal of Geology*, 66: 442–460.
- Miller V.C., (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics on the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Proj. NR 389-9042, Tech Rep 3, Columbia University, Department of Geology, ONR, New York.
- N. S. Magesh., N. Chandrasekar., (2012). GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani subbasin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. *Arab J Geosci* DOI 10.1007/s12517-012-0742-z.
- Naoura J., Benaabidate L., (2014). Etude du régime hydrologique du fleuve Inaouène, Maroc septentrional. *European Scientific Journal Décembre 2014 édition vol.10, No.35* ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- Nooka Ratnam K., Srivastava YK., Venkateshwara Rao V., Amminedu E., Murthy KSR., (2005). Check dam positioning by prioritization of micro-watershed using SY1 model and morphometric analysis Remote Sensing and GIS perspective. *J. Indian Soc. Remote Sensing* 33 (1): 25-38.
- Schumm S.A ., (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bull Geol Soc Am* 67:597–646.
- Schumm S. A., (1963). *Geological Society of America Bulletin Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains*, (9). doi:10.1130/0016-7606(1963)74.
- Shiva Shankar., Dharanirajan., (2014). Drainage Morphometry of Flood Prone Rangat Watershed, Middle Andaman, India- A Geospatial Approach. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. Volume-3, Issue-11, April 2014, P15-22.
- Sibari H S., Haidi A., Ait Fora., (2001). Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semiaride : bassin versant de

- l'Inaouène, Maroc. Revue Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 12, Numéro 3, 187-93, Septembre 2001, Notes de recherche.
- Smith K G., (1950). Standards for grading textures of erosional topography. Am. J. Sci., 248: 655-668.
- Strahler., (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. Am. Geophys. Union, 38: 913-920.
- Strahler A N., (1964). Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks, VT Chow (ed), Handbook of Applied Hydrology. McGraw Hill Book Company, New York, 4–11.
- Suter., (1964). Carte géologique du Maroc au 1/500000: Notes et Mémoires Service Géologique, Maroc n° 245.
- Taoussi A et al., (2009). Karst et ressources en eau au moyen atlas Nord-oriental. Géomagreb n° 05, P41-59.
- Umair A., Syed A A., (2014). Analysis of Drainage Morphometry and Watershed Prioritization of Romushi - Sasar Catchment, Kashmir Valley, India using Remote Sensing and GIS Technology. International Journal of Advanced Research (2014), Volume 2, Issue 12, P5-23.
- Vestappen H., (1983). The applied geomorphology, International Institute for Aerial Survey and Earth Science (ITC), Enschede.