



Exploitation du SIG et de la télédétection en le Traitement
physiographique et la détermination de l'indice d'aridité global du
bassin versant Moulouya

(Maroc oriental).

Abdelaziz SEHLI

Abdelkader SBAAI

Yahya CHETOUANI

Département de Géographie. Faculté des Lettres et Sciences Humaines

Université Mohammed Premier, Oujda

Maroc

Résumé :

Le traitement physiographique d'un bassin versant est primordial. L'exploitation du SIG et de la télédétection est l'opération de base pour configurer la réalité morphologique, ainsi que de constater les différentes caractéristiques et indices appropriés. Il s'agit d'un diagnostic préliminaire effectué sur le bassin versant, chose qui pourra constituer une plateforme pour une telle étude par la suite, et qui vise à traiter une problématique déroulant à l'intérieur du bassin en question. A travers cet article, on a exploité quelques compétences offertes par le système d'information géographique, ainsi que les données tirées par télédétection, afin d'obtenir plusieurs résultats quant aux principaux paramètres physiographiques, et établir une carte thématique de l'aridité global du bassin versant de la Moulouya, occupant une surface de 51862 Km², situé dans la région orientale du Maroc.

Mots clés : physiographie, bassin versant, SIG, Télédétection, aridité.



**Exploitation of GIS and remote sensing in physiographic processing and determination of the overall aridity index of the Moulouya watershed
Eastern Morocco.**

Abstract :

The physiographic treatment of a watershed is essential. The exploitation of GIS and remote sensing constitutes the basic tools for configuring the morphological reality, as well as observing the different characteristics and appropriate indices. This is a preliminary diagnosis carried out on the watershed, something which could constitute a platform for such a study subsequently, and which aims to address a problem occurring within the basin in question. Through this article, we exploited some skills offered by the geographic information system, as well as data drawn from remote sensing, in order to obtain several results regarding the main physiographic parameters, and establish a thematic map of global aridity of the Moulouya watershed, occupying an area of 51,862 km², located in the eastern region of Morocco.

Key words: physiography, watershed, GIS, Remote sensing, aridity.



INTRODUCTION

Les caractéristiques physiographiques du bassin versant influencent la réponse hydrologique lors de l'écoulement superficiel soit en période de crue ou d'étiage, autrement dit : la physiographie du bassin intervient dans ses modalités de drainage superficiel.

Chaque phénomène existante sur terre, puisqu'il a une dimension spatiale et qu'on peut le figurer sur carte, donc on peut l'introduire au système d'information géographique, et la même chose que pour la télédétection. L'air, le vent, les précipitations, les températures...tous ces phénomènes tant qu'ils ont des dimensions spatiales, on peut les traiter à l'aide du SIG et de la télédétection.

Chaque paramètre relatif à la physiographie d'un bassin versant, peut être constaté automatiquement en exploitant la télédétection et le système d'information géographique.

Aujourd'hui, des sites relevant de plusieurs sources d'information tels que : (<https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/>, et <https://worldclim.org/data/index.html#>), nous permettent d'extraire les données d'une zone objet d'étude. On procède par la suite aux opérations sur ces données sous format Raster et les transformer en vecteur afin de tirer les informations techniques désirées.

L'indice d'aridité est un indice quantitatif, à travers lequel on peut arriver à constater le déficit pluviométrique ou la diminution des apports des eaux au niveau du site.

On estime utile de rappeler brièvement la définition de chaque caractéristique, afin d'être conscient des résultats obtenus et d'avoir l'information sur la morphologie globale de ce bassin versant, et à la suite de chaque définition, le résultat y afférent lui sera associé.

MÉTHODES ET DONNÉES.

Pour la première partie « physiographie du bassin versant de la Moulouya » :

A travers une résolution de 30mètre de trois images satellitales composées (extraite du site USGS), plusieurs opérations ont été effectuées. Les outils d'Arctool-Box sont exploités, afin d'établir le modèle numérique du terrain, la triangulation irrégulière (Triangular Irregular Network), la délimitation automatique du bassin versant, la génération du réseau hydrographique, la densité du drainage, la détermination des classes de pentes et de tranches altitudinales, la courbe hypsométrique, la longueur et la largeur du rectangle équivalent, l'indice globale de pente, la dénivelée spécifique...

Pour la seconde partie « carte thématique de l'indice d'aridité globale » :

Partant du principe que l'aridité est généralement exprimée comme une fonction généralisée des précipitations, de la température et évapotranspiration de



référence (ET0). Un indice d'aridité (PNUE, 1997) peut être utilisé pour quantifier la disponibilité des précipitations sur la demande en eau atmosphérique.

L'équation exprimant l'indice d'aridité est calculée comme suit :

$$\text{Indice d'aridité globale (AI)} = \text{MA-Pr} / \text{MA-ET0}$$

Où:

MA-Pr = Précipitations annuelles moyennes

MA-ET0 = Évapotranspiration Annuelle Moyenne de Référence

On s'est basé sur les données disponibles en ligne sur :

<https://cgiarcsi.community/2019/01/24/globalaridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v3/>. La consistance de données exploitées est :

Pour l'évapotranspiration de référence (Global-ET0_v3), les ensembles de données raster géospatiales couvrant le monde entier sont disponibles en moyenne mensuelle (12 couches de données, c'est-à-dire un jeu de données pour chaque mois) ou en moyenne annuelle (1 jeu de données), pour la période 1970-2000, plus l'écart-type de la moyenne annuelle.

Pour l'indice d'aridité globale (Global-AI_v3), les couches géospatiales sont disponibles en moyennes mensuelles (12 couches de données, soit une couche pour chaque mois) ou en moyenne annuelle (1 couche de données) pour la période 1970-2000.

Les valeurs du jeu de données géographiques Global-ET0 sont définies comme le nombre total de mm d'ET0 par mois ou par an.

Les valeurs Global-AI doivent être multipliées par 0,0001 pour récupérer les valeurs dans les unités correctes

La résolution spatiale est de 30 secondes d'arc ou 0,008333 degrés. Arc

Les couches de données Global-ET0 et Global-AI sont traitées et finalisées en tant que données GeoTIFF format. Ces rasters ont été compressés (.zip) en séries mensuelles ou en couches annuelles individuelles.

Notre travail a été fondé sur les valeurs des précipitations annuelles moyennes (MA-Pr) obtenues à partir du WorldClim2 Global Climate.Version de données 2.1 (Fick et Hijmans, 2017), tandis que les couches ET0 estimées sur une moyenne mensuelle par le Global-ET0 (i.e. modélisé selon la méthode PM-FAO, ont été agrégées en valeurs annuelles moyennes (MA-ET0).

LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA

Le bassin versant de la Moulouya (figure 1) est situé à l'extrême Est du territoire marocain, limité au Nord par la méditerranée, à l'Est par la frontière algérienne, au sud par le bassin versant de ziz ghriss ghir et à l'ouest par les

bassins de loukouss, sebou et autres. Ce grand bassin est subdivisé en trois grandes unités hydrologiques : la haute Moulouya, la moyenne et la basse Moulouya.

Ce bassin versant occupe une surface de 51862 km², localisé entre (Lat : 35,10 – Long : -2,35) et (Lat : 32,29 – Long : 5,22).

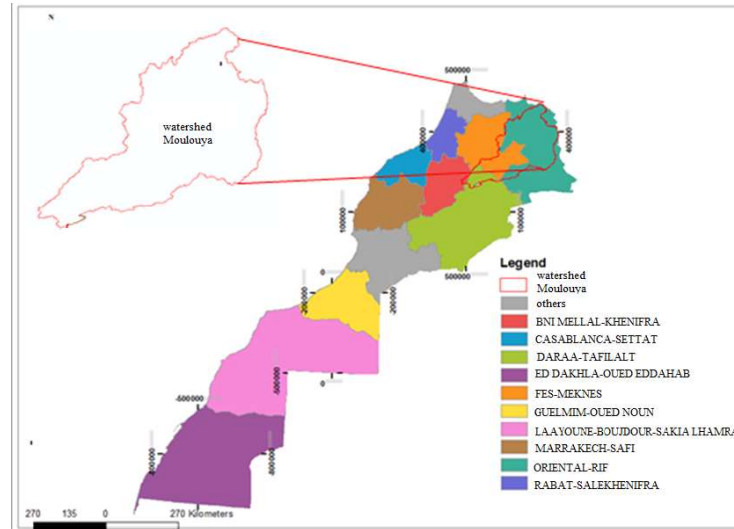


Figure1 : Localisation du bassin versant de la Moulouya.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Traitement physiographique.

La surface du bassin versant

C'est une aire de drainage délimitée par la ligne de partage des eaux. Cette ligne joint les côtes les plus élevées. A l'intérieur de cette limite, toutes les précipitations qui tombent s'écoulent à travers le réseau hydrographique suivant le gradient hydraulique le plus faible afin de se confluer et se converger vers l'exutoire. La surface du bassin versant est mesurée en kilomètre carré ou en hectare selon l'importance de son étendue, à l'aide d'instrument de planimètre (méthode classique) ou mieux, par les techniques de digitalisation (logiciels du SIG).

Après composition et traitement de trois images Landsat de résolution 30 mètre, on obtient le raster (figure 2), présentant le modèle numérique du terrain (MNT) correspondant à la zone d'étude. La délimitation automatique du bassin versant est faite en exploitant les outils du traitement hydrologique (ArcToolBox) en considérant le point d'exutoire qui correspond à l'embouchure de Moulouya.

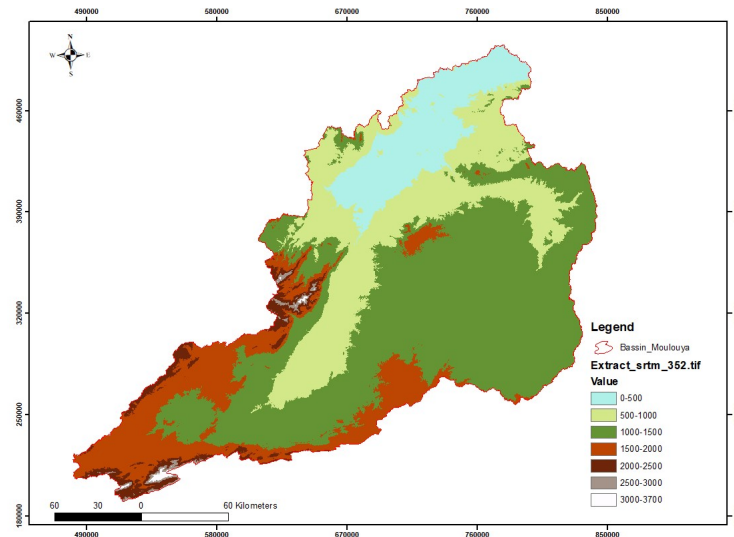


Figure 2 : MNT du bassin versant de la Moulouya (tranches altitudinales)

Le périmètre du bassin versant

C'est la longueur exprimée en kilomètre de la ligne de crête (ligne de partage des eaux), c'est une longueur totale de la limite du bassin versant, mesurée soit par le curvimètre ou calculée automatiquement par logiciel.

Le périmètre calculé automatiquement - à partir de la figure 1- a donné $P = 1598,91$ Km.

Indice de compacité de Gravelius

Après le calcul de surface et du périmètre du bassin versant, l'indice de compacité ou l'indice de Gravelius renseigne la forme du bassin, définit la façon de drainage et aussi l'allure de l'hydrogramme de crue, il relie le périmètre et la surface du bassin par la formule (ROCHE, 1963) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec : K_G : indice de compacité de Gravelius.

P : périmètre du BV en Km.

A : surface du BV en Km^2 .

Un bassin de forme quasi circulaire son K_G est proche de 1, tandis que celui allongé son K_G est supérieur à 1. Le premier est mieux drainé que le second.

Pour notre bassin on a trouvé $K_G = 1,61$ c'est une forme allongé.

Le rectangle équivalent

Il s'agit d'une transformation géométrique du bassin versant, c'est une forme rectangulaire qui garde la même surface du bassin versant, et le même indice de Gravelius ce qui traduit aussi la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveaux deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent, notant que l'occupation du sol et les conditions climatiques restent inchangées entres



courbes de niveaux. Le rectangle équivalent allongé est moins drainé. Ses dimensions se déterminent par les formules suivantes (ROCHE, 1963) :

$$\text{La longueur : } L = \frac{K_G \times \sqrt{A}}{1.12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right)$$

$$\text{La largeur : } l = \frac{K_G \times \sqrt{A}}{1.12} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right)$$

Avec :

A : superficie du BV en Km².

K_G : indice de Gravelius.

P : périmètre du BV en Km.

L : Longueur du rectangle équivalent en Km.

l : Largeur du rectangle équivalent en Km.

Notant qu'à partir de la répartition hypsométrique cumulée, se tracent les segments des courbes de niveau du rectangle équivalent. On ne tient pas compte des irrégularités de la limite de délimitation.

Pour notre bassin on trouve que L = 507,96 Km et l = 102 Km.

D'après les résultats, on remarque que la longueur est supérieure à la largeur. Ces dimensions confirment la forme allongée du bassin versant.

La longueur du cours d'eau principal et la longueur totale du réseau hydrographique

La longueur du cours d'eau principal est la distance curviligne en Km, mesurée de l'exutoire au point le plus éloigné appartenant à la ligne du partage en amont, qui correspond au point de départ et de matérialisation du cours d'eau principal. Le suivi de l'itinéraire se fait selon l'ordre le plus élevé du réseau lorsqu'il y a un embranchement, à l'exception si deux tronçons à l'embranchement ont le même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

Pour la longueur totale du réseau hydrographique, et en fixant le cinquième ordre (de 1 à 5), et ce, en prenant en considération la classification du réseau hydrographique qui sert à attribuer un ordre numérique qui permet d'identifier et de classer les types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluent. L'ordre le plus grand correspond au cours principal. Aussi, la somme totale du réseau s'affiche sur la statistique tirée à partir des propriétés du fichier de forme (Shapefile) obtenu du traitement Arcmap.

Le caractère méandriforme du cours d'eau principal lui a donné une longueur de 519 Km.

La somme totale du réseau (ordre 1 à 5), a donnée : 88570 Km.

Le réseau principal (figure3), figure uniquement des affluents nommés des talwegs les plus importants :

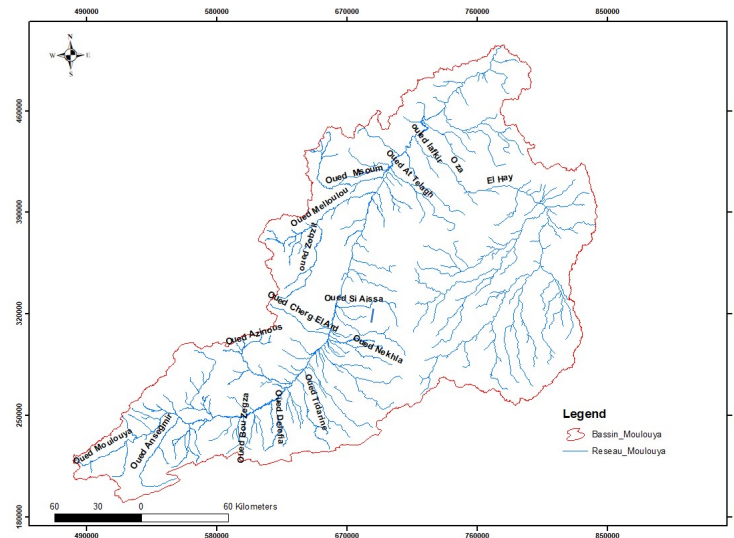


Figure 3 : réseau hydrographique principal du bassin versant de la Moulouya.

Altitudes maximale moyenne et minimale du bassin versant

La création des courbes de contour - selon l'équidistance fixée (100m) à partir du model numérique du terrain et l'observation de la statistique de la table tribulaire du fichier édité, nous amènent à constater directement l'altitude maximale et minimale du bassin versant. On a trouvé que l'altitude maximale est 3611m NGM (Nivellement général du Maroc), et celle minimale est 0m NGM, qui correspond à l'embouchure sur la méditerranée.

L'altitude moyenne du bassin est 451m NGM.

La pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne du bassin nous offre une information sur la vitesse avec laquelle les eaux ruisselées rejoignent l'exutoire. Elle renseigne sur l'altimétrie qui le caractérise. La vitesse de l'écoulement est en grande relation avec sa pente, si cette dernière est forte, le bassin se réagit plus vite lors des averses et de ruissellement. Les pentes très fortes sont à la cause de l'écoulement torrentiel qui produit les crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin versant est la moyenne pondérée de toutes les pentes des surfaces élémentaires délimitées par les courbes de niveau. Sa valeur approchée est donnée par la formule (ROCHE, 1963) suivante :

$$S = \frac{l}{A} \times \sum di$$

Avec :

S= pente moyenne du bassin versant exprimé en %.

l= largeur du rectangle équivalent en Km.



d_i =distance entre deux courbes de niveaux consécutives (si les courbes sont trop serrées, la pente est très forte et l'inverse).

A= surface du bassin versant en Km^2 .

Les courbes de niveau (figure 4) selon une équidistance de 100m, montrent des zones de forte pente (courbes de niveau qui sont trop serrées) et d'aplatissement (courbes de niveaux espacées) sont observées :

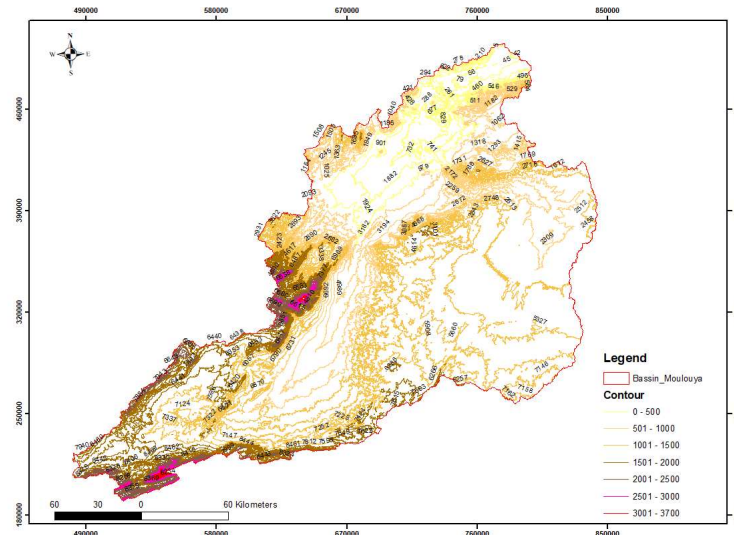


Figure 4 : courbes de niveau du bassin versant de la Moulouya

La pente moyenne du bassin versant Moulouya est de 7%. Cette pente est importante mais non qualifiée de forte.

Récapitulatif des résultats

Tableau1 : paramètres physiographiques du bassin versant Moulouya

S (Km^2)	P (Km)	K G	L (Km)	l (Km)	L CP (Km)	LR (Km)	P (%)	D (Km^{-1})	Ig (m/Km)	Ds (m)
5186 2,79	159 8,91	1, 61	507 ,96	10 2	51 9	88 570	7	1, 7	2,75	626 ,26

S : surface en Km^2 ; P : périmètre en Km ; L : longueur du rectangle équivalent en Km ; l : largeur du rectangle en Km ; LCP : longueur du cours principal en Km ; LR : longueur totale du réseau en Km ; P : pente moyenne du bassin en% ; D : densité du drainage en Km^{-1} ; Ig : indice de pente global en m/Km, Ds : dénivelée spécifique en m

Le raster obtenu après triangulation (figure 5) et classifié selon sept classes (figure 6) ou tranches d'altitudes pour chaque surface élémentaire.

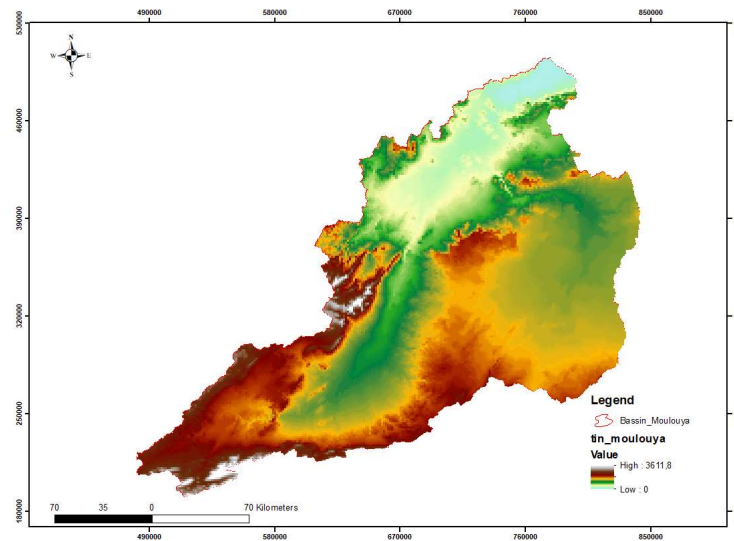


Figure 5 : TIN du bassin versant de la Moulouya.

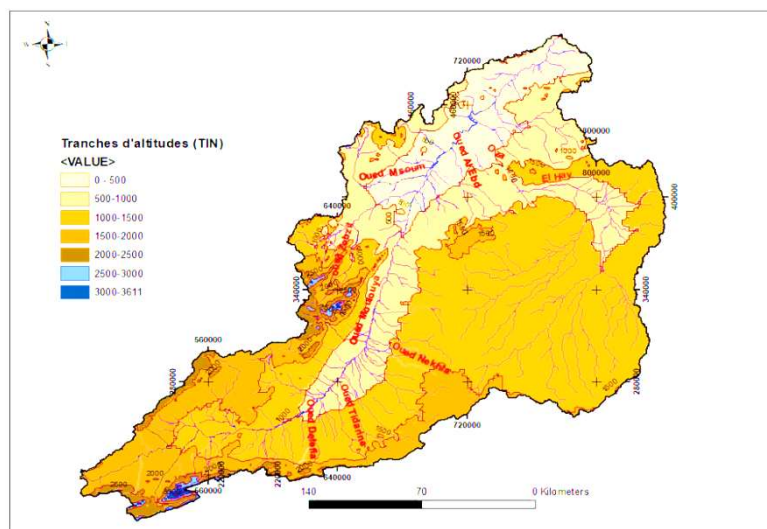


Figure 6 : les tranches altitudinales du bassin versant de la Moulouya et réseau hydrographique principal.

La courbe hypsométrique du bassin versant Moulouya

Les surfaces partielles, les tranches d'altitudes, les pourcentages partiels et cumulés (tableau 2), ont servi pour dresser la courbe hypsométrique correspondante au bassin versant.



Tableau2 : statistique des tranches altitudinales

Alt min (m)	Alt max (m)	surface partielle (Km ²)	Pourcentage (%)	Cumul (%)
0	240	1123,37	2,17	100,00
240	480	3971,90	7,66	97,83
480	720	4776,42	9,21	90,18
720	960	5847,00	11,27	80,97
960	1200	13712,67	26,44	69,69
1200	1440	10120,86	19,51	43,25
1440	1680	7128,73	13,75	23,74
1680	1920	2567,69	4,95	9,99
1920	2160	1380,98	2,66	5,04
2160	2400	686,27	1,32	2,38
2400	2640	276,62	0,53	1,05
2640	2880	145,70	0,28	0,52
2880	3120	63,35	0,12	0,24
3120	3360	44,34	0,09	0,12
3360	3611	16,89	0,03	0,03
		51862,79	100	0

Cette courbe (figure 7), représente la distribution de la surface du bassin versant en fonction d'altitude.

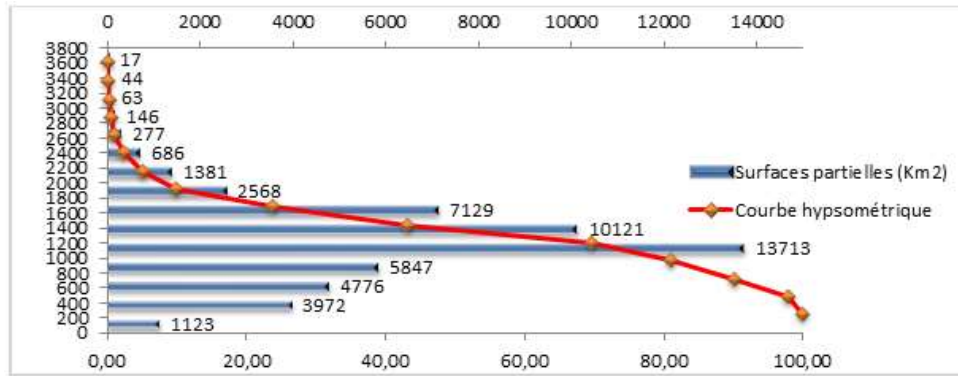


Figure 7 : courbe hypsométrique du bassin versant de la Moulouya.

Indice de pente globale (I_g) m/Km

C'est un indice qui caractérise le relief d'un bassin. Il est défini par la formule

$$I_g = D/L$$

Où :

D : représente la dénivelée en mètre, séparant les altitudes ayant approximativement 5% et 95% de la surface. Ces altitudes sont déterminées sur la courbe hypsométrique.

L : longueur du rectangle équivalent, exprimée en Km.

$$D = H_{95\%} - H_{5\%} = 2200 - 800 = 1400\text{m}$$

$$I_g = 1400 / 507,96 = 2,75 \text{ m/km}$$

Dénivelée spécifique

C'est le produit de l'indice de pente globale (I_g) par la racine carrée de la superficie du bassin (S), elle s'exprime en mètre.

$$D_s = I_g * \sqrt{S}$$

$$D_s = 2,75 * 277,73 = 626,26\text{m}$$

Selon la classification de l'*OROSTOM* (tableau 3), le bassin versant présente un relief fort. Effectivement, presque la moitié du bassin est comprise entre l'altitude 960m et 1440m.



Tableau 3 : classes de reliefs à partir de la dénivelée spécifique

Classe	Dénivelée spécifique	Type de relief
1	$D_s < 10$	Relief très faible
2	$10 < D_s < 25$	Relief faible
3	$25 < D_s < 50$	Relief assez faible
4	$50 < D_s < 100$	Relief moyen
5	$100 < D_s < 250$	Relief assez fort
6	$250 < D_s < 500$	Relief fort

La carte thématique de l'indice d'aridité.

L'indice d'aridité est un indice quantitatif, à travers lequel on peut arriver à constater le déficit pluviométrique ou la diminution des apports des eaux au niveau du site. Il s'agit d'équations et d'indices utilisés mais on les attribue un indice quantitatif sur l'ampleur de pénurie et de carence en eau.

Pour chaque indice, une valeur critique ou seuil détermine ses limites et ses types. Il s'agit d'équations et de relations empiriques utilisées fréquemment afin d'apprécier et de constater la répartition spatiale du couvert végétal et d'humidité du sol et par conséquent déterminer les différents degrés d'aridité.

Köppen (1918) a déterminé les limites d'une moyenne pluviométrique de 200mm, au-dessous de laquelle commencent les zones sahariennes et steppiques (désert-steppe) à se manifester.

Les équations et les relations empiriques ne sont pas mises aléatoirement, et d'après Köppen, il n'existe pas de saisons pluvieuses bien déterminées, mais selon le climat saharien, les précipitations peuvent avoir lieu en n'importe quel moment et de façon brutale et concentrée.

Il a aussi liée les limites des zones désert-steppe à une valeur moyenne de température entre 5 et 10°C.

En somme, l'indice d'aridité est un indice numérique qui exprime le degré de déficit pluviométrique en une zone donnée.

Parmi les relations utilisé dans ce sens, on a celui du LANG, connu par l'indice ou le facteur pluie (Rain Index), définie par : $RI = \frac{P_m}{T^{\circ}C}$

Avec : P est la moyenne annuelle pluviométrique (mm) et T°C est la moyenne annuelle de température.

LANG a défini les zones arides par celles qui ont un résultat inférieur à 40.



DE MARTON a développé la relation du *LANG* et a mis : $\frac{Pm}{(T^{\circ}C+10)}$

Avec : P est la moyenne annuelle pluviométrique (mm) et T°C est la moyenne annuelle de température.

DEMARTON a déterminé les limites des zones arides qui ont des résultats inférieurs à 5.

Après *LANG* et *DEMARTON*, en 2009, *Trabucco, A.* et *Zomer, R.* ont définis l'indice d'aridité global par la relation suivante :

$$\text{Aridity Index (AI)} = \frac{\text{MAP}}{(\text{MAE})}$$

Avec : MAP est la moyenne annuelle de précipitation et MAE est la moyenne annuelle de l'évapotranspiration. A travers la relation citée, ont classifiés les climats (tableau 4), en Cinq classes:

Tableau 4 : classes climatique selon l'indice d'aridité

Valeur de l'IA	Classe climatique
< 0,03	Hyper aride
0,03 – 0,2	Aride
0,2 – 0,5	Semi-aride
0,5 – 0,65	Sub-humide sec
> 0,65	Humide

Remarque : Dans le jeu de données (Global-Aridity), qui utilise cette formulation, les valeurs de l'indice d'aridité augmentent pour des conditions plus humides, et diminuent avec des conditions plus arides.

L'indice d'aridité globale (Global-AI) calculé pour l'ensemble du globe (figure 8). Nous informe qu'un IA plus élevée (couleurs vertes/bleues) représente des conditions plus humides, et un AI faible (couleurs marrons/jaunes) représentant une aridité plus élevée

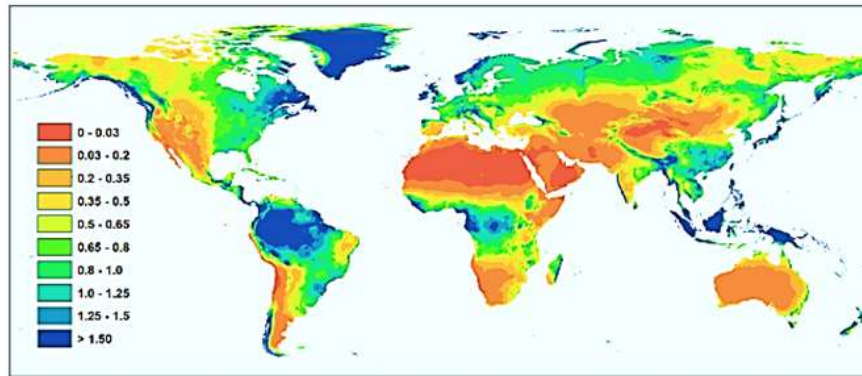


Figure 8 : Indice d'aridité global du monde.

Source : <https://cgiarcsi.community/2019/01/24/global-aridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v3/>

Le résultat obtenu pour notre espace du travail (figure 9), présente la répartition spatiale de l'indice d'aridité, avec seuils déterminés par défaut. Notre zone selon la classification de DEMARTON, est incluse en climat aride et semi-aride (figure 10).

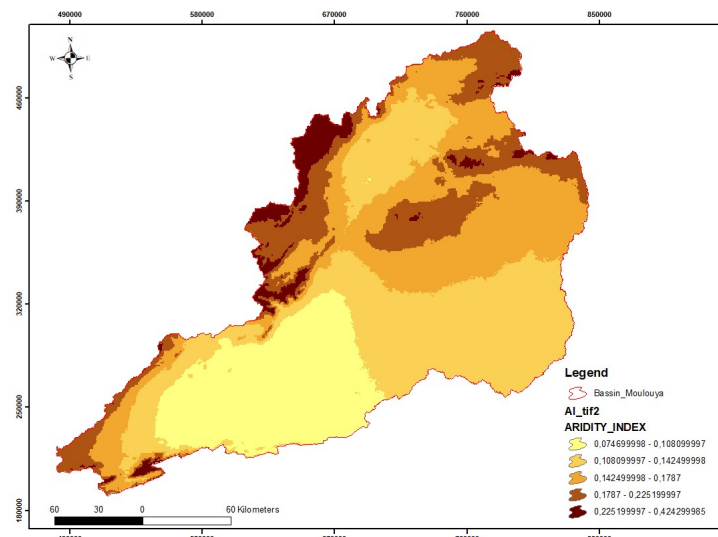


Figure 9 : répartition spatiale de l'indice d'aridité dans le bassin versant de la Moulouya.

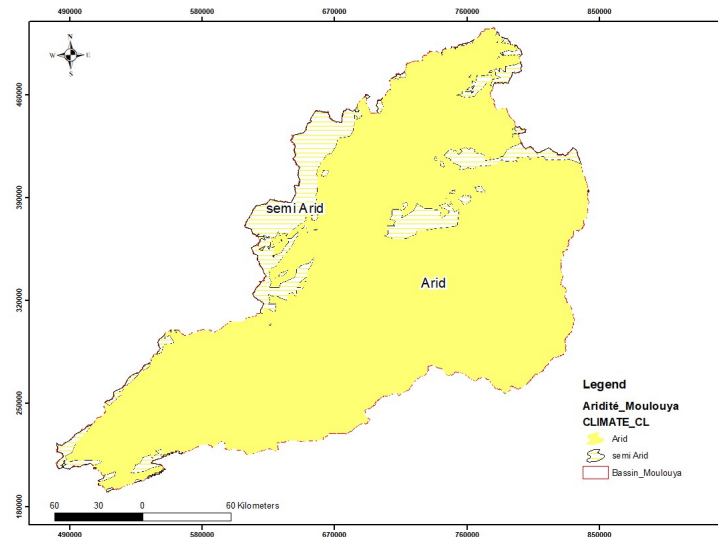


Figure 10 : répartition spatiale des classes climatiques dans le bassin versant de la Moulouya.

De ce fait, l'aire de chaque commune peut être conclue et localisé selon son appartenance aux différentes classes climatique.

CONCLUSION

Il s'agit d'un bassin de grande surface (51862 Km²), orienté SW-NE. Les tranches altitudinales les plus élevées se localisent au Sud et à l'Ouest. Des hauts plateaux sont installés à l'Est. L'altitude décroît évidemment de l'amont à l'aval, elle commence à 3611m et finit à l'embouchure à 0 (niveau de la mer méditerranéen). Le compartiment Ouest est plus élevé que celui de l'Est. La tranche altitudinale comprise entre 1100 et 1700 occupe 60% de la surface totale du bassin. Ceci est dit, du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude.

La forte pente créée par les reliefs du Sud et de l'Ouest favorise la dégradation superficielle et le transport solide qui s'achemine vers le cours principal. La forme allongée du bassin lui accorde une réponse hydrologique non accélérée, en revanche, la réaction est assez vite en zones de fort pendage.

L'élaboration de la carte thématique de l'indice d'aridité globale, par la télédétection, nous a renseigné sur la classe climatique aride qui s'étale sur la quasi-totalité du bassin. De ce fait, il s'agit d'une zone frappée par les conditions de sécheresse, à l'exception de quelques portions situées en contexte montagnard ou au nord du bassin où l'influence due à la proximité de la méditerranée minimise l'effet envahissant de la sécheresse du sud au nord.



BIBLIOGRAPHIE

- Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET₀) Database”: Estimation of Penman-Monteith Reference Evapotranspiration. (In Press). Available online from the CGIAR-CSI GeoPortal at: <https://cgiarcsi.community/2019/01/24/globalaridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v3/>.
- Al-Nour, Mukhtar M., and Muhammad A. Al-Qasim. "Application of Aridity Indices in the Eastern Region of the Kingdom of Saudi Arabia Mohammed Hasan Mheisen." *Journal of the University of Anbar for Humanities* 2.2 (2021).
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Zomer, Robert J., Jianchu Xu, and Antonio Trabucco. "Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database." *Scientific Data* 9.1 (2022): 409.