

Apport des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) dans la caractérisation physiographique du bassin versant de la Loudima au sud-ouest de la République du Congo

NGOUALA MABONZO Médard*

Résumé

Le présent travail expose le potentiel des systèmes d'informations géographiques (SIG) et la télédétection spatiale pour la caractérisation physiographique d'un bassin versant qui dépend de ses caractéristiques morphométriques, géologiques et de l'occupation du sol de bassin versant de la Loudima qui se situe dans la vallée du Niari et qui s'étend sur une superficie d'ordre de 3880,40 km² et un périmètre de 420,50 km. L'extraction de bassin versant en question et ses caractéristiques géomorphologiques a été faite à partir du modèle numérique du terrain (MNT) issu d'images SRTM avec une résolution de 30 m. À l'essor des SIG et la qualité des MNT ont conduit à l'extraction du réseau hydrographique qui structure 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...). Ce travail a permis l'identification des zones à risque et l'établissement des cartes thématiques relatives au bassin (carte des pentes, carte de sens d'écoulement, carte de drainage).

Mots-clés : Congo, Loudima, SIG, bassin versant, République du Congo.

Abstract

This work exposes the potential of geographic information systems (GIS) and spatial remote sensing for the physiographic characterization of a watershed which depends on its morphometric, geological characteristics and land use of the Loudima watershed which is located in the Niari valley and which extends over an area of about 3880.40 km² and a perimeter of 420.50 km. The extraction of the watershed in

* Laboratoire de Géographie, d'Environnement et d'Aménagement (LAGEA), Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Université Marien Ngouabi, BP 69, Brazzaville, République du Congo.
E-mail : medngouala@yahoo.fr

question and its geomorphological characteristics was made from the digital terrain model (DTM) derived from SRTM images with a resolution of 30 m. The development of GIS and the quality of DTMs led to the extraction of the hydrographic network that structures space in hydrology, this led us to calculate the physical characteristics of the watershed (characteristics of shape, relief, and the hydrographic network, etc.). This work has enabled the identification of risk areas and the establishment of thematic maps relating to the basin (slope map, flow direction map, drainage map).

Keywords: Congo, Loudima, GIS, watershed, Republic of Congo.

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) (B. Benzougagh et *al.*, 2016, 2019 ; W. Bewket et G. Sterk, 2005, C. Faye, 2018 ; T. Narmatha et *al.*, 2013). Ces indices sont nécessaires pour déterminer la priorisation des bassins versants et ainsi planifier un programme pour la lutte contre les risques naturels. Le bassin versant représente l'unité topographique de base pour toute étude en hydrologie.

La connaissance des caractéristiques morphologiques et hydrodynamique de celui-ci, revêt une place de choix pour les gestionnaires des cours d'eau et des géorisques. En effet, les paramètres morphologiques sont ceux les plus déterminants pour l'écoulement des eaux dans un bassin versant et peuvent influencer dans une moindre mesure la gravité des crues. Dès lors, la caractérisation des variables de temps et d'espace qui gouvernent le cycle hydrologique sont indispensables pour la gestion efficace de l'eau dans un bassin versant.

L'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation des bassins versants même sans tenir compte de la carte des sols (S. Biswas et *al.*, 1999). Pour ce faire, un ensemble de paramètres quantitatifs importants sont utilisés dans la compréhension du dynamisme d'une rivière et de son bassin versant comme la superficie, le périmètre, la longueur, la largeur, l'indice de compacité

de Gravelius, l'indice de pente, la pente moyenne, l'altitude maximale et l'altitude minimale, etc. (M. Veltri et *al.*, 1996). Ceux-ci ont été obtenus à partir du MNT de la zone d'étude. L'utilisation de ces nouvelles techniques permettra ainsi de répondre aux exigences d'exploitation des eaux superficielles et de la prévention contre les risques d'inondation.

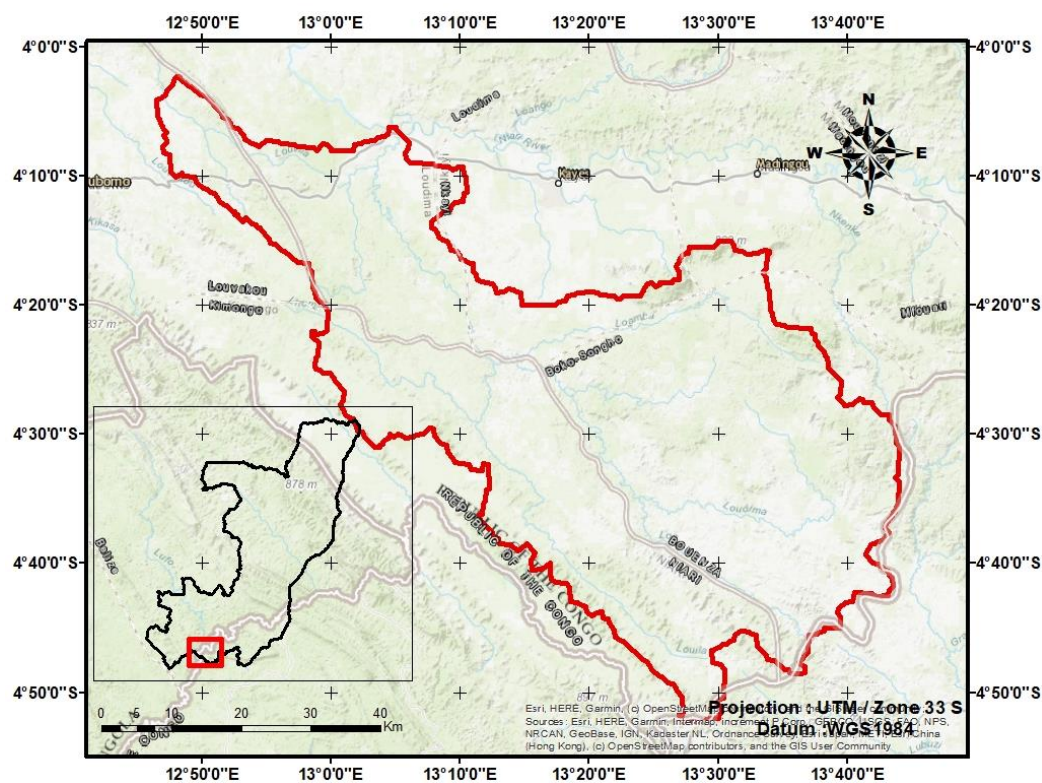
L'objectif de ce travail se limite à la caractérisation des aspects morphométriques et du relief du bassin versant de la Loudima situé dans deux entités (le bassin versant du Niari et la vallée du Niari), du fait que ces paramètres jouent un rôle déterminant dans le fonctionnement d'un système hydrologique.

1. Cadre physique du bassin versant de la Loudima

Le bassin versant de la Loudima est situé dans la vallée du Niari au sud-ouest de la République du Congo, entre les latitudes 4°0'0'' et 4°50'0'' Sud et les longitudes 12°50'0'' et 13°40'0' Est (Figure 1). Cette zone fait partie de deux unités orographiques à savoir : les pays du Niari et de la Nyanga et la vallée du Niari.

Du point de vue géologique, Le bassin versant de la Loudima fait partie d'un vaste ensemble de séries sédimentaires dont il s'agit de formations sédimentaires précambriennes associées à leurs produits d'altération qui les masquent en grande partie (F. Boudzoumou, 1986). Les sols du bassin versant sont répartis dans trois principales classes : on trouve ainsi des sols ferralitiques, des sols hydromorphes et des sols alluviaux. Ce bassin versant est couvert par une mosaïque forêt - savane avec une prédominance de la forêt et la savane.

Son climat est du type tropical humide caractérisé par une alternance de saisons : une saison chaude et pluvieuse qui s'étend d'octobre à mai et une saison sèche et fraîche de juin à septembre (M.J. Samba-Kimbata, 1978).

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2. Approche méthodologique

Dans le cadre de cette étude, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé provient des images SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ce Modèle Numérique de Terrain, d'une résolution de 30*30m, a été utilisé pour l'extraction des différents paramètres physiographiques du bassin versant de la Loudima.

Les études morphologiques et physiographique nécessitent, entre autres, l'analyse des paramètres tels que la structure et la forme du bassin versant. À partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), le bassin versant étudié peut être délimité avec précision avec extraction automatique des différents paramètres caractéristiques de son relief. Pour développer cette démarche, les logiciels dédiés au SIG (Système d'Information Géographique) sont très nécessaires.

Les caractéristiques morphologiques (surface, longueur, largeur, périmètre, forme, relief, pente) et les indices morphométriques du bassin versant sont indispensables pour caractériser son environnement physique et leurs influences sur l'écoulement superficiel. Ces facteurs, de nature purement géométrique ou physique, ont été extraits facilement par des techniques automatiques en faisant appel aux techniques digitales des SIG et aux modèles numériques de terrain MNT.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques géométriques (morphologiques)

Les principales caractéristiques physiques étudiées pour tout bassin hydrologique constituent des paramètres d'entrée des formules et des modèles de calcul pour la caractérisation des bassins versants.

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (S. Biswas, 1999, P. Michel, 1973). Le temps de concentration T_c , qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son relief, sa pente longitudinale et son orientation. À ces facteurs s'ajoutent encore la lithologie des terrains et la nature des sols, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et aux modèles numériques.

Le bassin versant marque à la fois la notion topographique de zone limitée par une ligne de partage des eaux et celle de surface d'interception des précipitations susceptibles d'être drainées jusqu'à l'exutoire par le réseau hydrographique (FAO, 1996).

3.1.1. Surface et périmètre

La superficie du bassin versant, ou surface drainante, est obtenue par planimétrie sur cartes topographiques où, comme dans ce travail, à l'aide des logiciels de cartographie par des techniques de digitalisation

et de limitation. Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

Le périmètre du bassin versant est obtenu par curvimètre sur cartes topographiques ou à l'aide de logiciels informatiques comme dans le présent travail.

Ces deux paramètres, superficie et périmètre, apportent des informations précieuses dans l'étude des bassins versants. Leur influence se manifeste dans la nature de la relation entre le débit et le temps. En ce qui concerne le bassin versant de la Loudima, il s'étale sur une superficie $A = 3880,40 \text{ km}^2$ et présente un périmètre $P = 420,50 \text{ km}$.

3.1.2. Indice de compacité de Gravelius (K_G)

L'indice de compacité de Gravelius (1914, In M. Roche 1963) K_G est appelé également coefficient de forme (Strahler, 1964). Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin versant (P) au périmètre d'un cercle de même superficie. Il donne une idée sur la forme du bassin versant qui a une influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme (représentation graphique de l'évolution du débit Q en fonction du temps t), résultant d'une pluie donnée, à l'exutoire du bassin.

L'indice K_G ne peut être calculé, avec suffisamment de précision, que si le périmètre P est mesuré sur un contour de bassin très simplifié. Pour cela, il est nécessaire de supprimer toutes les sinuosités qui ne correspondent pas à la tête d'un thalweg actif. Pour vérifier que la stylisation du périmètre est suffisante, on s'assurera que la longueur du rectangle équivalent Leq n'est pas sensiblement supérieure à la longueur du plus long cours d'eau, depuis son origine jusqu'à l'exutoire (FAO, 1996). Si A est la surface du bassin en km^2 et P son périmètre en km , le coefficient K_G est égal à :

$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec $A = 3880,40 \text{ km}^2$ et $P = 420,50 \text{ km}$, $K_G = 1,89$.

Cet indice est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire (bien drainé) possédant un potentiel d'infiltration plus important que ceux de forme allongée. Il est égal à 1,12 pour un bassin

versant de forme carrée et lorsqu'il devient supérieur à 1,12, le bassin est de forme allongée (Musy, 2005).

L'indice de compacité de la Loudima est $K_G = 1,89$; ce bassin versant a donc une forme allongée. Sa direction principale d'allongement est Sud-Est–Nord-Ouest. Elle est parallèle au sens d'écoulement général des eaux. Cette forme favorise une érosion linéaire et régressive et les faibles débits de pointe de crue en raison du temps élevé de concentration ou d'acheminement de l'eau jusqu'à l'exutoire (A. Musy et V. Laglaine, 1992). Ce type de bassin versant devrait connaître très peu de cas d'inondation des localités riveraines même pendant les hautes eaux.

3.2. Caractéristiques topographiques (Relief)

L'influence du relief sur l'écoulement est encore plus évidente et se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin versant. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement, les styles fluviaux que prennent les cours d'eau et l'évolution spatiale de l'importance des processus sédimentaires fluviaux.

Sur la carte, le relief est indiqué par les courbes de niveau en joignant les points d'égale altitude. Il est nécessaire de répartir le bassin versant en tranches d'altitude afin de pouvoir dégager les différents paramètres du relief. La répartition des altitudes a été déterminée à partir d'un MNT de 30*30m de résolution. Les résultats, obtenus à l'aide des logiciels SIG, ont permis d'établir la carte et la courbe hypsométriques.

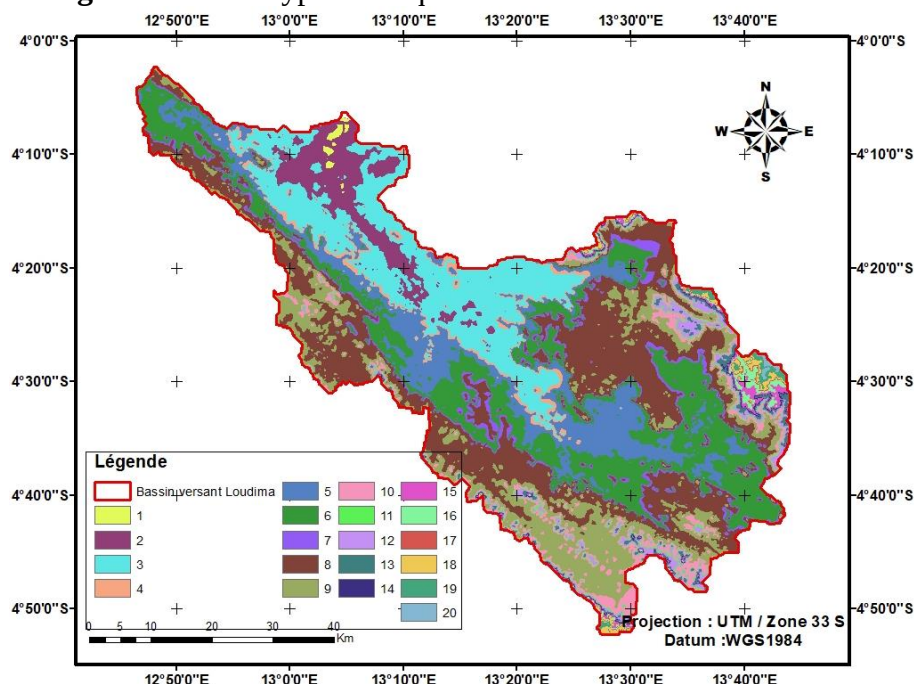
3.2.1. Carte hypsométrique

Le modèle numérique de terrain (MNT) permet de réaliser une analyse spatiale représentative car il reflète des informations relatives à la structure morphologique sur l'ensemble du bassin versant (L. Zhou, 2009). Il donne aussi des prévisions sur la nature et l'intensité des précipitations.

Les surfaces comprises entre les courbes de niveau de la carte hypsométrique sont représentées sous formes de classes de couleurs différentes (Figure 2), en partant de la classe de haute altitude dont le

point culminant se tient à 800 m jusqu'à celle de basse altitude dont le point le plus bas présente une altitude égale à 136 m.

Figure 2 : Carte hypsométrique du bassin versant de la Loudima



La carte hypsométrique présente des tranches d'altitudes dont l'équidistance de 10 à 20 m. Ces tranches, généralement orientées NE-SW, témoignent de la structure du bassin versant en relief très varié. Les zones de hautes altitudes figurent dans l'ensemble de la partie amont du bassin versant de la Loudima et les zones de basses altitudes se trouvent en aval et aux alentours de la confluence avec le fleuve Niari (Figure 2).

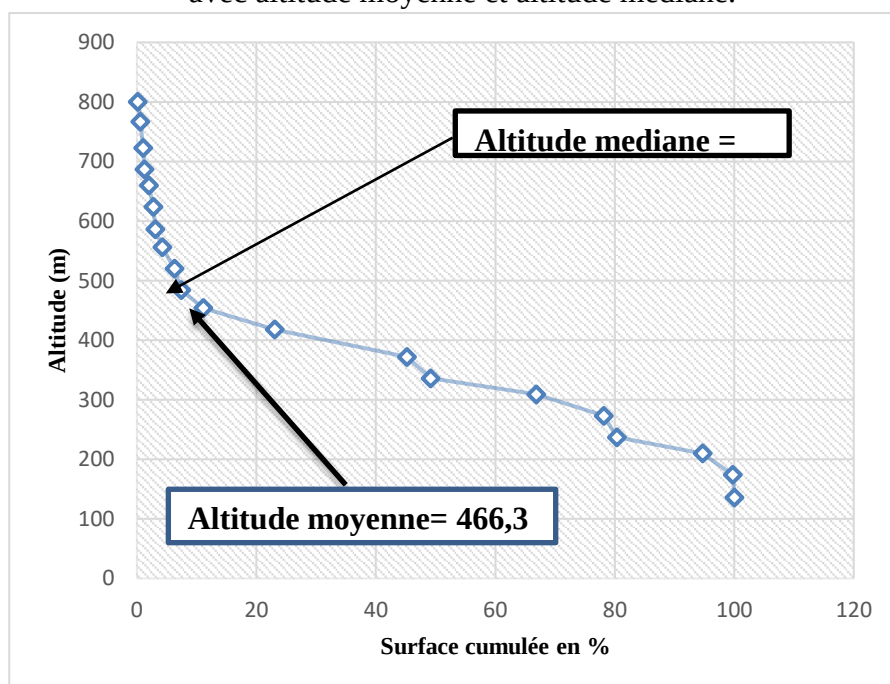
3.2.2. Courbe hypsométrique du bassin versant

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin versant et représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Cette courbe, qui porte en abscisse le pourcentage de surface (surface cumulée) du bassin qui se trouve au-dessus de l'altitude représentée en ordonnée,

reflète aussi son état d'équilibre dynamique potentiel. Elle demeure un outil pratique pour comparer plusieurs bassins versants entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elle peut en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donner des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique de celui-ci et de son système de drainage.

La courbe hypsométrique du bassin versant de la Loudima a été tracée à partir des élévations par tranches d'altitudes (en mètre) et des surfaces relatives calculées (en km²). Elle montre une légère concavité vers le bas, avec une pente assez élevée vers les hautes altitudes. Vers les basses altitudes, la pente devient faible (Figure 3 et tableau 1). Ces deux zones sont séparées par une zone d'inflexion dont le point culminant coïncide avec l'altitude médiane de 469 m. Cette dernière correspond de point de vue structural à un dôme qui sépare deux dépressions.

Figure 3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la Loudima avec altitude moyenne et altitude médiane.



Les aires situées au-dessous du profil d'équilibre, matérialisé par la droite passant par l'abscisse 100% des surfaces cumulées et l'ordonnée 800m d'altitude, sont supérieures à celles se trouvant en dessus. La courbe hypsométrique du bassin versant de la Loudima est celle d'un bassin versant qui a déjà dépassé l'état de maturité et d'équilibre (Figure 3) et n'a pas encore atteint par conséquent un stade relativement développé d'érosion. Nous pouvons d'ores et déjà avancer qu'au niveau de ce bassin versant, le pouvoir érosif lié à l'eau n'est pas développé.

La forte pente du profil longitudinal du cours d'eau supérieur ou amont de la Loudima est liée à une raison géologique : la lithologie du substrat, relativement plus dure que celle du substrat d'aval, qui est composée des formations schisto-calcaires à dominante calcaire et dolomitique et de formations schisto-gréseuses essentiellement constituées des schistes argileux, de grès et d'arkoses que coiffe des séries sédimentaires précambriennes associées à leurs produits d'altération qui les masquent en grande partie.

Les expressions géomorphologique et topographique dans cet espace géographique sont des unités topographiques plus au moins planes correspondant à des plateaux. Ces unités se présentent sur la carte hypsométrique (Figure 2) sous forme de bandes d'altitudes : 767-800, 723-767, 687-723, 660-687m etc. Les ruptures de pente qui séparent ces unités topographiques matérialisent le passage de ces failles ou accidents tectoniques. Soulignons que cette tectonique, qui est responsable de ce compartimentage en blocs étagés, s'exprimant dans la topographie sous forme de plateaux et collines dans la partie amont du bassin, l'est aussi dans la totalité du bassin versant. En effet celui-ci est formé d'une succession de plateaux étagés de plus en plus bas, qu'on peut classer en hauts, moyens et bas plateaux et collines et qui passent vers l'aval à des vallées dans la zone de confluence avec le fleuve Niari.

Ces différentes unités topographiques ou géomorphologiques ne sont en fait que l'expression d'un compartimentage tectonique en blocs étagés ayant été plus ou moins modifiés et modelés par les processus de géomorphogenèse surtout précambriens qui continuent à se produire actuellement.

Tableau 1 : Répartition par tranches d'altitudes de la superficie (Km²) du bassin versant de la Loudima

Classes d'altitudes (m)	Superficie (Km ²)	% de superficie
< 136	8,9	0,231
136-174	195,44	5,062
174-210	554,79	14,368
210-237	87,95	2,174
237-273	435,59	11,281
273-309	683,13	17,692
309-336	154,9	4,012
336-372	852,89	22,089
372-418	461,44	11,951
418-454	144,12	3,730
454-484	43,14	1,117
484-520	81,78	2,040
520-556	44,66	1,157
556-586	17,71	0,355
586-624	28,1	0,728
624-660	33,08	0,753
660-687	8,11	0,208
687-723	19,93	0,464
723-767	17,35	0,448
767-800	7,39	0,140
	3880,4	100

Source : M. Ngouala Mabonzo, 2023.

En résumé, l'analyse de la carte et de la courbe hypsométrique confirme qu'on est en présence d'un bassin où les différences d'altitudes sont très marquées avec différenciation d'une structure en plateaux étagés de moins en moins affaissés en allant du nord au sud et de l'est à l'ouest du bassin versant. Ces contrastes altimétriques, liés à des conditions morfo-litho-structurales différentes le long du bassin, favorisent l'écoulement des eaux de ruissellement à l'intérieur du bassin versant de la Loudima qui dispose d'un plus ou moins rare de couvert forestier. Ces conditions topo-hydrologiques ne vont pas permettre des pertes en terres plus grandes en provenance des sols et des formations

géologiques surtout les moins compétentes composées de schistes et d'argiles silteuses.

3.2.3. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent, ou rectangle de Gravelius, se définit comme le rectangle qui a la même surface et le même périmètre, le même indice de compacité et la même distribution hypsométrique à conditions climatiques similaires, une même distribution des formations lithologiques et pédologiques, de la végétation et même densité de drainage que le bassin versant. C'est une transformation purement géométrique dans laquelle les droites parallèles aux largeurs du rectangle et l'exutoire sont le petit côté ou largeur du rectangle (Laborde, 2009). Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. La répartition du bassin versant par tranches d'altitude, dans un rectangle équivalent, donne une importance capitale pour les études hydrologiques du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude.

Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement. Il faut noter que moins un bassin versant est allongé mieux il est drainé.

Soit L_{eq} et l_{eq} , la longueur et la largeur du rectangle (exprimées en km), $\pi = 3,14$, P , le périmètre en km et A , l'aire du bassin versant, exprimée en km^2 . Sa longueur et sa largeur sont données à partir de son indice de compacité K_G et de sa superficie A , par les expressions :

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

$$L_{eq} = \frac{1}{2} \cdot K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{1}{K_G} \right)^2} \right)$$

$$l_{eq} = \frac{1}{2} \cdot K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{1}{K_G} \right)^2} \right)$$

Donc : $L = 189,81$ Km et $l = 20,44$ Km

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

Longueur du rectangle équivalent (Km) : 189,81 Km ; largeur du rectangle équivalent : 20,44 Km.

3.2.4. *Altitude moyenne*

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques. Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. Elle est définie par :

$$H_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i h_i}{A}$$

Avec : H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ; A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ; h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ; A : superficie totale du bassin versant [km²].

L'altitude moyenne du bassin versant de la Loudima est $H_{moy} = 466,3$ m calculée manuellement d'après la formule ci-dessus et le tableau 2.

Les altitudes maximales et minimales sont obtenues directement à partir des cartes topographiques ou bien du MNT à l'aide des logiciels du SIG comme c'est le cas dans le présent travail. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

3.2.5. *Altitude médiane*

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne, dans le cas où la courbe hypsométrique, du bassin concerné, présente une pente régulière. L'altitude médiane dans le bassin versant de la Loudima est égale à $H_{med} = 469$ m (Figure 3).

Ainsi, l'altitude moyenne ($H_{moy} = 466,3 \text{ m}$) est inférieure à l'altitude médiane ($H_{med} = 469 \text{ m}$) avec un écart de 2,7 m. Donc la pente moyenne du bassin versant est irrégulière. Elle est trop forte en amont du bassin, où prédominent les hauts reliefs, et s'adoucit en descendant vers l'aval où dominant des bas plateaux.

3.2.6. Pente moyenne du bassin versant de la Loudima

La pente moyenne d'un bassin versant est un paramètre qui a un rapport important et complexe avec l'infiltration, le ruissellement superficiel et la saturation du sol en eau. Elle contrôle le temps de ruissellement et de concentration des eaux pluviales dans les artères de drainage. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin versant. Elles se basent toutes sur la lecture d'une carte topographique réelle ou approximative ou bien à partir d'un MNT en utilisant le SIG comme c'est le cas dans le présent travail.

Le calcul de la pente moyenne du bassin versant, donne un renseignement sur la topographie du bassin versant. En pratique on a besoin de la longueur L du rectangle équivalent et la différence entre les hauteurs extrêmes ΔH .

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad \begin{array}{l} H_{max} = 800\text{m} \\ H_{min} = 136\text{m} \end{array}$$

Avec : P_{moy} : la pente moyenne du bassin versant en m/Km ; ΔH : L'altitude moyenne en (m).

L : la longueur du rectangle équivalent en (Km)=189,81Km.

La pente moyenne du bassin versant de la Loudima est 3,49 m/Km.

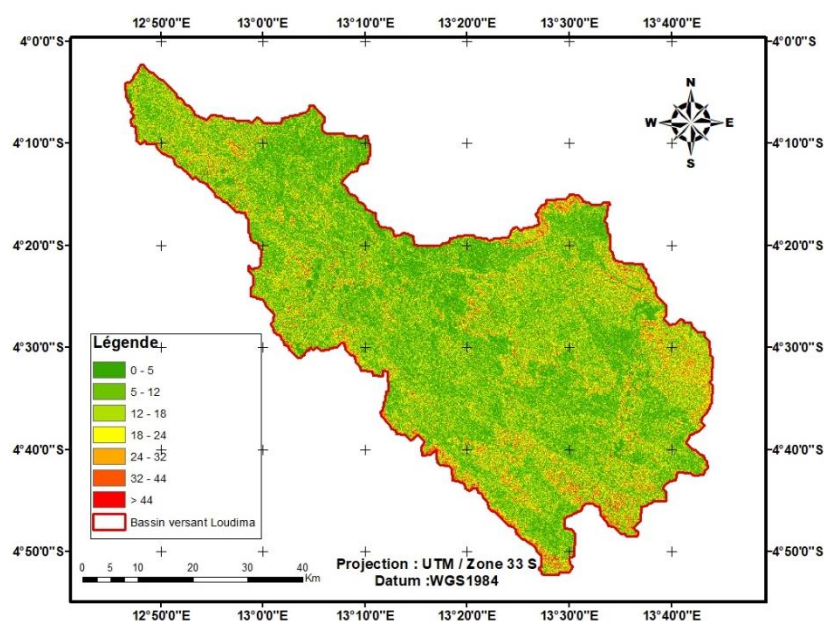
3.2.7. Cartographie des pentes du bassin versant de la Loudima

La pente topographique est un paramètre capital dans tout travail d'aménagement ; elle conditionne le drainage (H. Abbassi, 2004). En effet, elle affecte d'une façon directe par son intensité les phénomènes d'infiltration, de ruissellement et d'érosion, sa forme, et la longueur sur laquelle elle agit.

La carte des pentes du bassin versant de la Loudima a été établie à partir du MNT de la région étudiée (Figure 4). Elle montre sept classes

des pentes, qui se concentrent dans la partie l'ensemble du bassin versant, où prédominent les terrains précambriens.

Figure 4 : Carte des pentes du bassin versant de la Loudima



À partir de l'analyse de la base de données de la carte des pentes, on a calculé les superficies relatives à chaque tranche. Les pentes très faibles, faibles et assez faibles se développent dans la totalité de ce bassin versant (Figure 4).

La carte des pentes montre que plus de 79,17 % de la topographie du bassin versant de la Loudima présente des pentes inférieures à 18 % et le reste de cette topographie, soit 16,65% de la superficie du bassin versant, présente des pentes qui varient entre 18 et 44 % et la classe des pentes les plus fortes (> 44 %) n'en couvre que 4,18 % (tableau 2 et Figure 4).

Ces valeurs de pente sont à mettre en relation avec la structure géologique et surtout la lithologie des terrains qui déterminent leur comportement vis à vis de l'érosion. L'observation et l'analyse de la carte des pentes confirment les données de la carte hypsométrique et montrent que la topographie du bassin est formée en amont de plateaux étagés qui passent vers l'aval à des plaines. Toutefois parmi ces unités

topographiques, il y en a qui présentent des topographies accidentées liées à des entités topographiques de pente accusée. Ces topographies sont localisées dans la partie amont du SE du bassin et au NW de sa partie médiane. Les fortes valeurs de pente des versants sont liées à deux causes géologiques : la lithologie et la tectonique. La cause lithologique est la plus importante et due à l'existence de formations lithologiques de dureté ou de compétence différentes.

Tableau 2 : Classification des pentes du bassin versant de la Loudima

	Indice attribué	Type de relief	Valeur de la pente en %	Superficie en Km ²	Superficie en %
Bassin versant de la Loudima	1	Relief très faible	0 < pente < 5	3072,11	79,17
	2	Relief faible	5 < pente < 12		
	3	Relief assez faible	12 < pente < 18		
	4	Relief modéré	18 < pente < 24	646,08	16,65
	5	Relief assez fort	24 < pente < 32		
	6	Relief fort	32 < pente < 44		
	7	Relief très fort	Pente > 44	162,20	4,18
				3880,40	100

3.2.8. 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 climatologiques (F. Anctil et *al.*, 2012).

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

$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A}$$

Avec :

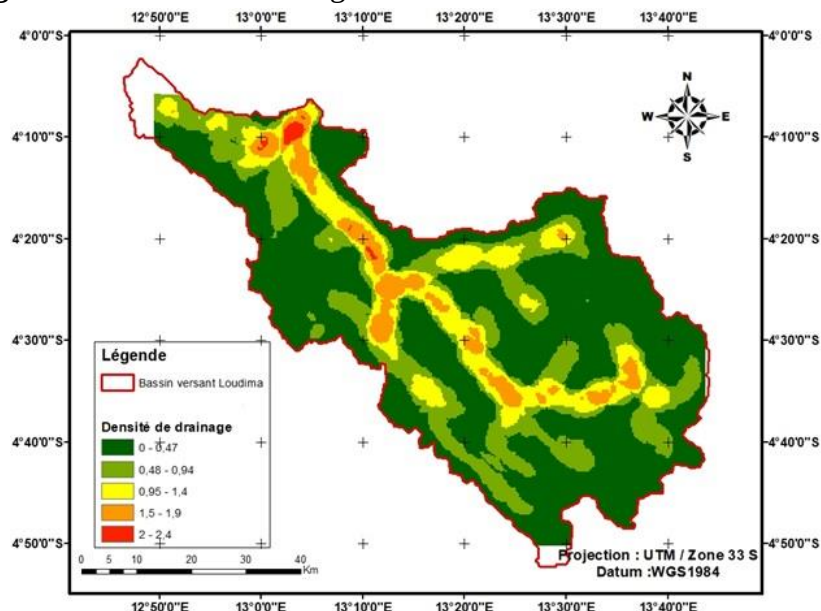
D_d : densité de drainage en (km/km²), L_i : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal, S : superficie du bassin versant.

Dans le cas du bassin versant de la Loudima : $L_i = 956,52$ Km et $A = 3880,40$ Km², $D_d = 956,52$ km / 3880,40 Km² ; $D_d = 0,25$ Km/Km², Cette faible densité de drainage du bassin versant, s'expliquerait par la perméabilité du substratum et par le relief qui est plus ou moins accidenté.

3.2.8.1. Texture de la densité de drainage dans le bassin versant de la Loudima

La texture du drainage est définie comme le nombre total de segments de courant de tous les ordres par périmètre de la zone (R. 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 de la densité de drainage dans le bassin versant de la Loudima regroupe ou se caractérise par cinq catégories (Figure 11) : très grossière (0 à 0,47 Km/Km²), grossière (0,48 à 0,94 Km/Km²), modérée (0,95 à 1,40 Km/Km²) ; fine (1,5 à 1,9 Km/Km²) et très fine (2 à 2,4 Km/Km²) (Figure 5).

Figure 5 : Densité de drainage du bassin versant de la Loudima

3.2.9. Densité hydrographique du bassin versant de la Loudima

Dans la notion de la densité hydrographique, on s'intéresse à l'extraction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain MNT en utilisant l'extension « Spatial analyst tools - Hydrology for ArcGIS 9.3 ». L'extraction du réseau hydrographique pratiqué dans cette étude se base sur le suivi du ruissellement de l'eau. C'est une méthode hydrologique qui s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chacun des pixels à partir des valeurs altimétriques du MNT, par simulation de l'écoulement de l'eau en surface, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente (C. Demargne, 2001).

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{N_i}{A}$$

Où : F : densité hydrographique [km^{-2}], N_i : nombre de cours d'eau ; A : superficie du bassin [km^2].

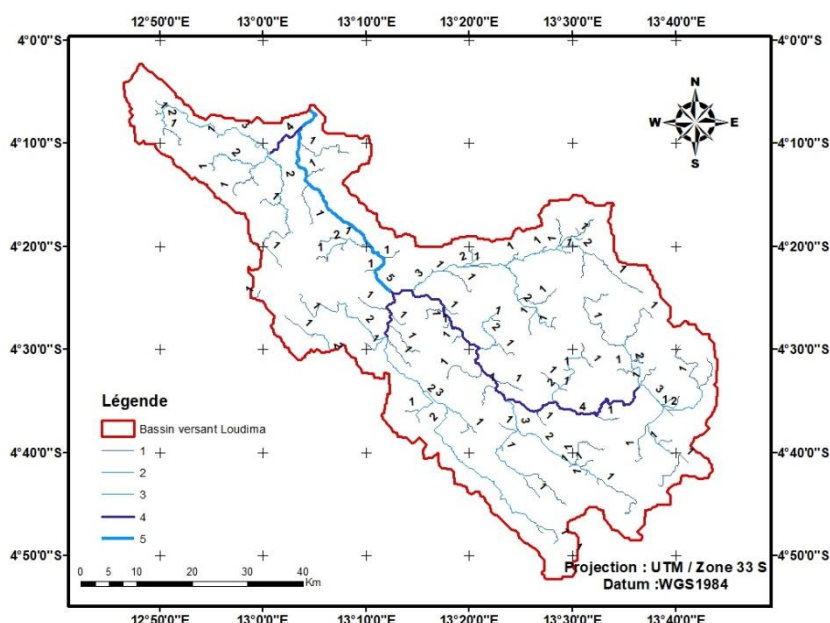
Le bassin versant de la Loudima compte en son sein plus ou moins 100 cours d'eau ; ainsi la densité hydrographique vaut :

$$F = 100/3880,40 \text{ km}^2 = 2,5.10^{-4} \text{ km}^{-2}$$

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) présentent en général une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux.

L'opposé, c'est-à-dire faible densité de drainage et faible densité hydrographique, se rencontre en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué ; c'est le cas du bassin versant de la Loudima. Il a un couvert végétal qui lui permet d'alimenter ses aquifères et a très peu des reliefs montagneux.

Figure 6 : Réseau hydrographique extrait à partir du MNT de bassin versant de la Loudima



La carte de la densité hydrographique établie ou la carte des hydropaysages représente une donnée d'entrée très importante dans les modèles d'érosion (Figure 6). En effet, elle représente l'ensemble des éléments paysagiques (végétation naturelle, espaces boisés, etc.) se situant dans un contenant lié à la circulation des eaux naturelles (bassins versants élémentaires, réseau hydrographique, etc.) et défini par le relief (pente et exposition) et les états de surface du sol, dont l'organisation spatiale permet de définir dans son ensemble (ou en partie) un bassin

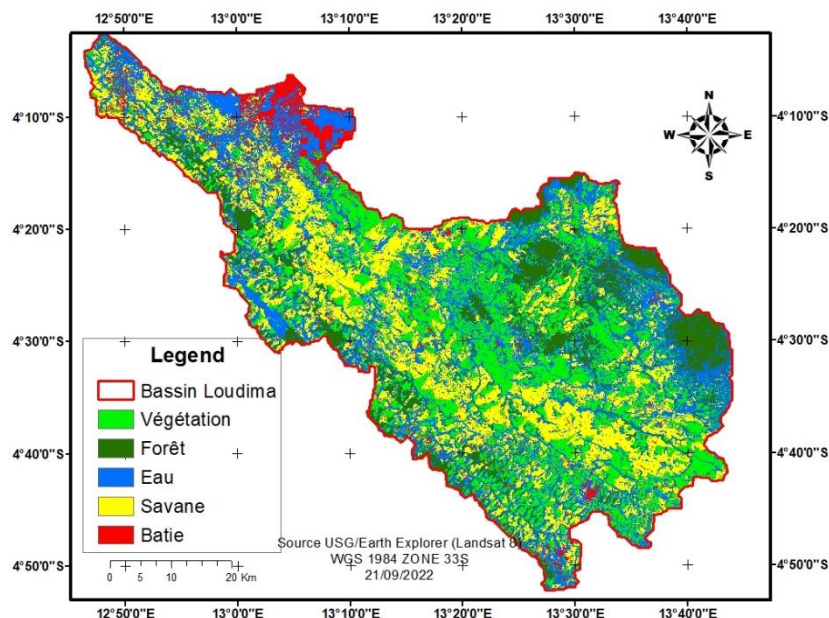
versant ou (ou une partie d'un) un réseau hydrologique : structure hydrique et spatiale.

3.2.10. Couvert végétal

Le couvert végétal est une caractéristique physique qui influence fortement sur le comportement hydrologique d'un bassin versant. Ainsi, une zone rocheuse avec peu de végétation, ou une surface agricole cultivée, ne réagiront pas de la même manière qu'une zone forestière face à une période de précipitations. La végétation est un facteur d'interception de la pluie, qui diminue la pluie nette, faisant obstacle au ruissellement et protégeant les sols (D. Snelder et R. Brayan, 1995), favorise l'infiltration, diminue le rendement en eau du bassin versant.

La Figure 7 montre la couverture végétale du bassin versant de la Loudima dans son ensemble est répartie en cinq grandes unités territoriales : la végétation (activités champêtres) dont la superficie était estimée à 997 km², soit 25,69% de la superficie totale qui est de 3880,40 km², la forêt était estimée à 483 Km² (12,44%), l'Eau était estimée à 1250 Km² (32,21%) et occupait la plus grande partie de la superficie de ce bassin versant, la savane était estimée à 944 Km² (24,32%). Quant au bâtie, elle était estimée à 189 Km², soit 4,87%.

Figure 7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Loudima



3.3. Caractéristiques orographiques : 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) :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Avec : I_G : Indice de pente globale, D : $H_{95\%} - H_{5\%}$ (Dénivellation), $H_{95\%}$: l'altitude correspondante à 95% de la superficie totale du bassin versant, $H_{5\%}$: l'altitude correspondante à 5% de la superficie totale d bassin versant, L : longueur du rectangle équivalent.

Selon la classification du relief donnée par l'ORSTOM, la valeur de l'indice de pente global du bassin versant de la Loudima montre que le relief est faible (tableau 3).

Tableau 3 : Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente globale

Valeur I_g	Relief
$I_g < 0,002$	Relief très faible
$0,002 \leq I_g < 0,005$	Relief faible
$0,005 \leq I_g < 0,01$	Relief assez faible
$0,01 \leq I_g < 0,02$	Relief modéré
$0,02 \leq I_g < 0,05$	Relief assez fort
$0,05 \leq I_g < 0,5$	Relief fort
$I_g > 0,5$	Relief très fort

La valeur de la pente globale, pour le bassin versant de la Loudima est 3,51 m/Km soit 0,003.

4. Discussion des résultats obtenus

Les résultats des interprétations présentés le long de ce travail permettent de mettre en lumière différents mécanismes de caractérisation de ce bassin versant. La discussion qui suit est structurée de manière à présenter les différents mécanismes hydrologiques qui peuvent se manifester dans la zone d'étude et définir l'importance qu'ils ont pour chacun des paramètres physiographiques.

Le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Loudima dans le système hydrologique du bassin versant du Niari a été réalisé à partir de l'ensemble des résultats déduits des observations et de son interprétation de la détermination des paramètres physiographiques. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence :

- **Le domaine physiographique du bassin versant de la Loudima**

L'étude des caractéristiques physiques du bassin versant de la Loudima peut se faire manuellement, mais c'est un travail pénible et moins fiable. C'est pourquoi nous avons choisi les systèmes d'information géographique 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 modèle numérique de terrain (MNT) a permis l'extraction automatique du réseau hydrographique sur une surface de 3880,40 Km², la délimitation du bassin versant dont le périmètre est de 420,50 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 de drainage etc.).

- **Les paramètres géométriques**

La caractérisation du bassin versant de la Loudima peut se faire à partir des indices morphométriques. La surface du bassin versant, 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. La rivière Loudima est d'une longueur de 117 km draine un bassin versant étiré ($KG > 1$). Cette forme allongée ralentit la réponse hydrologique.

- **Les paramètres de reliefs**

Les altitudes du relief sont des facteurs climatiques. Ils déterminent les ascendances des masses d'air ou 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 de la Loudima sont comprises entre 100 m et 800 m dans le couloir de la vallée du Niari et du bassin versant du Niari pour une altitude médiane de 336 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. Donc ce sont les extrémités méridionale et septentrionale qui sont plus arrosées et favorables aux précipitations neigeuses et l'allure de la courbe hypsométrique montre une allure indiquant que le réseau hydrographique de ce bassin versant est dense par rapport à son importance.

- **Les pentes du bassin versant de la Loudima**

L'analyse de la carte des pentes et le calcul de la pente moyenne montre que celle-ci est faible, de l'ordre de 3,68 m/Km, 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 ($I_G = 3.10^{-3}$) indique, selon la classification OSTRM, que le relief du bassin versant de la Loudima est faible.

- Le réseau hydrographique

Le bassin versant de la Loudima est caractérisé par un réseau hydrographique dense et ramifié. Les variations rencontrées sont dues à de changements de faciès, aux pentes faibles. Ce bassin est caractérisé par une faible densité de drainage ($0,25 \text{ Km/Km}^2$). Elle s'expliquerait par la perméabilité du substratum et par le relief qui est faiblement accidenté. Cette interprétation est confirmée par la géologie à cause de la forte perméabilité du Substratum.

En fin on constat que le bassin versant de la Loudima regroupe les conditions les plus favorables au bon fonctionnement de son système hydrologique dans l'ensemble.

Conclusion

Le bassin versant de la Loudima a été étudié à partir de son modèle numérique de terrain (MNT) pour l'extraction automatique, à l'aide des logiciels SIG, de ses caractéristiques géomorphologiques qui influencent l'écoulement de ses eaux de surface. L'évaluation de ces paramètres a permis la réalisation de nombreuses cartes thématiques et leur interprétation.

Le bassin versant étudié s'étale sur une superficie d'environ $3880,40 \text{ km}^2$ et présente un périmètre de $420,50 \text{ km}$. Il est caractérisé par un relief très faible à très fort et une forme allongée ($K_G = 1,89$) suivant une direction Sud-Est–Nord-Ouest parallèlement au sens de l'écoulement général des eaux. Cette forme, liée aux conditions morpho-structurales, favorise des faibles débits de pointes de crues en raison du temps élevé de concentration ou d'acheminement des eaux jusqu'à l'exutoire. Ce type de bassin versant devrait présenter des plaines d'inondation peu développées, des méandres avec de faible à moyen rayon de courbure, peu de méandres abandonnés et un style fluvial dominé par le style faiblement sinueux avec localement une tendance au tressage. Ce type de bassin devrait également connaître très peu de cas d'inondation des localités riveraines même pendant les périodes des hautes eaux.

D'après les résultats obtenus par le calcul des indices morphométriques on constate que le bassin versant de la Loudima n'est pas vulnérable aux risques naturels. Au niveau de l'amont les facteurs 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.

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.

Bibliographie

- ABBASSI Hassan, 2004, *Utilisation de l'outil SIG pour l'aménagement des bassins versants de Oued « Greb » et Oued « Rouriche » à l'Ariana*, Mémoire de PFE. ESIER de Medjez El Beb.
- ANCTIL François, Rousselle Jean, Lauzon Nicolas, 2012, *Hydrologie : cheminement de l'eau*, deuxième édition, Presses internationales polytechniques.
- BENZOUGAGH Brahim, DRIDRI Abdallah, BOUDAD Larbi, SDKAOUI Driss, and BAAMAR Brahim, 2019, « Apport des sig et télédétection pour l'évaluation des caractéristiques physiques du bassin versant d'oued inaouene (nord-est maroc) et leurs utilités dans le domaine de la gestion des risques naturels », *Am. J. Innov. Res. App. Sci.*, vol. 8, n° 4, p. 120-130.
- BENZOUGAGH Brahim, BOUDAD Larbi, DRIDRI Abdallah, SDKAOUI Driss, 2016, « Utilisation du Sig dans l'analyse morphométrique et la priorisation des sous-bassins versants de Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc) », *European Scientific Journal*, vol. 12, n° 6, p. 283- 306.
- BEWKET Woldeamlak, STERK Geert, 2005, « Dynamics in land cover and its effect on stream flow in Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia », *Hydrol. Proc.*, n° 19, p. 445-458.
- BISWAS Subedi, SUDHAKAR Sengan et DESAI Shri Valji, 1999, « Prioritization of sub watersheds based on morphometric analysis of drainage basin. Remote sensing and GIS approach », *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, vol. 27, n° 3, p. 155-166.

- BOUDZOU MOU Florent, 1986, *La chaîne ouest-congolienne et son avant-pays au Congo : Relation avec le Mayombien, sédimentologie des séquences d'âge protérozoïque supérieur*, Thèse de 3^e cycle, Université d'Aix Marseille III.
- DEMERGE Charleux, 2001, *La qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues*, Thèse de doctorat, Université de Marne-la vallée.
- ESKENAZI, 1991, *Eléments d'hydrologie I*. Université de Liège.
- FAO, 1996, « Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche », *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, WWW.document ird.fr>hor>fr , consulté le 28 mai 2023.
- FAYE Cheikh, 2018, « Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (Bassin continental Guineo-Sénégalais) », *Revue Marocaine de Géomorphologie*, n° 2, p. 110-127.
- HORTON Robert, 1945, « Erosional development of streams and their drainage basins (hydrophysical approach to quantitative morphology) », *Geological Society of America Bulletin*, n° 56, p. 275-390.
- MICHEL Pierre, 1973, *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Étude géomorphologique*, Doctorat d'État, Mémoires ORSTOM, n° 63, 3 tomes, Paris, Édition de l'Office de la Recherche Sciences et Techniques Outre-Mer.
- MUSY André & LAGLAINE Valérie, 1992, *Hydrologie générale*, Cours polycopié, section génie rural, environnement, mensuration, EPFL.
- MUSY André, 2005, *Cours d'hydrologie générale*, Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), École Polytechnique Fédérale, Lausanne (Suisse).
- NARMATHA Thanigasalam, JEYASEELAN Antonysamy, MAHALINGAM Shanmugam, NATCHIMUTHU Sivakiruthika, 2013, « Morphometric analysis of upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu », *India using Geographical Information System. J. Acad. Indus. Res*, vol. 1, n° 11, p. 726-729.

- ROCHE Marcel, 1963, *Hydrologie de surface*, Paris, Édition Gauthier-Villars et ORSTOM.
- SAMBA-KIMBATA Marie Joseph, 1978, *Le climat du Bas Congo*, Thèse de 3^e cycle, Univ. Bourgogne, Dijon.
- SNELDER Denyse, BRAYAN Rorke, 1995, « The use of rainfall simulations to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo district (Kenya) », *Cetana* 25, p. 105-116.
- STRAHLER Arthur, 1964, Quantitative geomorphology, *Handbook of Applied Hydrology* (ed. by V. T. Chow), Section 4-II. McGraw-Hill, New York, USA.
- VELTRI Michel, VELTRI Partin et MAIOLO Mario, 1996, « On the fractal dimension of natural channel network », *Journal of Hydrology*, n° 187, p. 137-144.
- ZHOU Lin, 2009, « Longitudinal and transverse profiles of hilly and mountainous watersheds in Japan », *Geomorph*, n° 111, p. 17-26.