Afrique SCIENCE *17(3) (2020) 62 - 77*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Caractérisation géomorphométrique des formes de relief dans le bassin versant du Poni, au Burkina Faso

Sié PALE[1,2*], Adama KEKELE[2] et Dapola Evariste Constant DA[2]

[1] *Université de Ouahigouya, UFR-Sciences et Technologie, 01 BP 346 Ouahigouya 01, Burkina Faso*
[2] *Université Joseph KI-ZERBO, Département de Géographie, Laboratoire Dynamique des Espaces et Sociétés, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

* Correspondance, courriel : *palesie@gmail.com*

Résumé

L'objectif de cet article est de déterminer les formes actuelles du relief du bassin versant du Poni. La caractérisation de la dynamique du paysage et des formes de reliefs passe majoritairement, de nos jours, par une approche géomorphométrique et quantitative à partir du modèle numérique de terrain. Une image SRTM de 30 m de résolution a été utilisée pour obtenir le MTN du bassin versant. Avec des logiciels cartographiques, cette image a été automatiquement traitée en vue d'obtenir les caractéristiques morphométriques. Les résultats obtenus montrent un bassin versant d'âge mature dont le relief est vieillissant. La pente générale est très faible, de l'ordre de 1,74°. Les processus de l'évolution des reliefs ont affecté le terrain et expliquent la forme de pénéplaine actuelle du bassin versant dont l'altitude moyenne est 329 m. Les modelés sont les collines rocheuses et les buttes cuirassées (< 3 % de la superficie totale). Ces buttes se confondent par moments aux niveaux d'étagement des glacis cuirassés qui représentent 78 % du bassin. Quant aux plaines alluviales et vallées occupant 19 % de la superficie du bassin versant, elles se caractérisent par la densité du réseau hydrographique avec un ratio de bifurcation de 3,56. La méandrisation de la rivière Poni et ses affluents est importante et se matérialise par une sinuosité forte comprise entre 1,25 et 1,5.

Mots-clés : *Géomorphométrie, MNT, bassin versant, rivière Poni, Burkina Faso.*

Abstract

Landforms geomorphometric characterization of Poni river watershed in Burkina Faso

The objective of this paper is to determine the current forms of relief in the Poni watershed. The characterization of landscape and landform dynamics passes mainly, nowadays, by a geomorphometric and quantitative approach from the digital elevation model. A 30 m resolution SRTM image was used to obtain the watershed DEM. With cartographic softwares, this image was automatically processed in order to obtain morphometric characteristics. The results show a mature watershed with an ageing relief. The overall slope is very low, in the order of 1.74°. The processes of relief evolution affected the terrain and explain the current form of peneplain of the watershed whose average altitude is 329 m. The individual landforms are the rocky hills and the cuirass mounds (< 3 % of total area). These cuirass mounds are sometimes confused with the levels of cuirass glacis, which represent 78% of the watershed. As for the alluvial plains and valleys, which occupy 19 % of the catchment area, they are characterized by the density of the river network with a bifurcation ratio of 3.56. The meandering of Poni river and its tributaries is significant and is reflected by a strong sinuosity from 1.25 to 1.5.

Keywords : *Geomorphometry, DEM, watershed, Poni river, Burkina Faso.*

1. Introduction

La caractérisation de la dynamique du paysage et des formes de reliefs passe, de nos jours, par une approche géomorphométrique et quantitative à partir du modèle numérique de terrain (MNT) [1]. Même si les observations sur le terrain ne sont pas à écarter complètement dans l'explication de ces différents aspects et caractéristiques superficielles de la déformation actuelle, la méthodologie mise en place est largement basée sur l'extraction systématique et automatisée des différents paramètres et attributs morphométriques et du réseau de drainage numérique [1 - 3]. En Tunisie par exemple, cette méthodologie a été utilisée pour mettre en place un système de gestion de base de données de type « SIG-MORPHOMETRIQUE » [1]. Cette opération constitue la base de la géomorphologie digitale (morphométrie du MNT) et le noyau de l'analyse morphostructurale (morphométrie du réseau de drainage numérique) de l'architecture mise en place. Avec une technologie orientée-objets intégrée dans le SIG, elle permet d'analyser, d'interpréter et de discuter l'ensemble des paramètres morphométriques quantitatifs. Les progrès technologiques et instrumentaux permettent d'acquérir d'abondantes données de terrain ; ce qui aide et facilite la compréhension des processus de l'évolution des reliefs de la croûte terrestre [4]. L'accessibilité aux images satellite de haute résolution pour les détails des griffures et griffes d'érosion sur ces unités (glacis, versant de collines) reste limiter en raison de leurs coûts. De ce fait, le MNT devient de plus en plus incontournable dans l'évaluation des formes de terrain et d'en comprendre son fonctionnement à l'échelle des bassins versants, des versants, des talus d'éboulis ou des vallées. Cependant, [4] constate que l'étude des aspects morphologiques est reléguée au second plan ; il regrette ainsi ce désintérêt des géomorphologues à étudier les formes majeures du relief. L'accent est désormais porté sur la géomorphologie dynamique qui semble prendre le dessus sur la géomorphologie structurale. Or, la géomorphologie structurale consiste à décrire les formes du relief en utilisant un vocabulaire adéquat. Elle est bien autonome dans ses objectifs qui sont la compréhension des volumes de relief, de leur géométrie et de leur genèse [5].

Cependant, les deux sous branches de la géomorphologie (structurale et dynamique) ne sont pas dissociées l'une de l'autre car les facteurs ou agents qui agissent pour façonner le relief se font concomitamment, dans des ampleurs, des intensités et des échelles différentes [6]. La tendance des recherches actuelles sur la géomorphométrie est en partie orientée vers les microtopographies engendrées par les agents d'érosion. Ainsi, les différentes formes micro-topographiques induites par des processus érosifs pouvant conduire à la dégradation des terres, commencent à susciter un intérêt scientifique à la compréhension de leur dynamique évolutive [7, 8]. A partir du MNT, la géomorphométrie a indiscutablement sa place dans la panoplie des moyens permettant une approche plus objective des milieux géographiques. Elle redonne un nouvel élan à l'étude des formes structurales qui a connu une phase latente au profit de la géomorphologie dynamique. Les progrès technologiques accomplis au cours des dernières décennies ont permis, grâce à la télédétection et aux logiciels performants, de montrer davantage l'importance de la géomorphologie structurale [3]. Les mesures des volumes saillants ou creux, c'est-à-dire la rugosité d'un terrain, offrent la possibilité de définir les modelés, leurs ampleurs ou leurs envergures [9]. Qu'ils soient des milieux de montagnes, de plateaux ou de plaines, les modelés présentent des caractéristiques différentes. Dans les régions de plaines d'Afrique Occidentale en général et du Burkina Faso en particulier, les parcours des géomorphologues à la deuxième moitié du 20e siècle donnent les descriptions des reliefs et modelés en expliquant les processus qui ont concouru à leur mise en place. Bon nombre d'entre eux se sont principalement intéressés aux modelés éoliens et dunaires, aux reliefs résiduels et cuirassés sur des formations sédimentaires, volcano-sédimentaires et birimiennes [10 - 13]. Dans la région de Gaoua dans le sud-ouest du pays, les recherches ont porté sur les mêmes aspects de formes sur une échelle d'analyse beaucoup plus grande. Les détails sur le paysage géomorphologique sont fournis entre autres par BOEGLIN et MAZALTARIM, ainsi que DA [14, 15]. Les approches adoptées dans le cadre de ces travaux s'appuient généralement sur l'exploitation des photographies aériennes et les travaux de terrains. C'est dans ce contexte d'étude des formes structurales basée sur le calcul quantitatif que s'inscrit ce travail, effectué

dans un espace géographique beaucoup plus réduit et dont les processus dynamiques sont l'apanage des facteurs bioclimatiques et anthropiques. L'utilisation d'une image SRTM pour la caractérisation des paramètres géomorphométriques est-elle envisageable à toute échelle spatiale ? L'espace géographique concerné est le bassin versant du Poni dans la région du Sud-ouest du Burkina Faso. L'objectif de cet article est de déterminer les formes structurales actuelles du relief dans le bassin versant du Poni.

2. Méthodologie

2-1. Cadre géographique de l'étude

Le bassin versant du Poni dans le sud-ouest du Burkina Faso s'inscrit dans un domaine climatique sud-soudanien où la pluviométrie moyenne annuelle, depuis trente ans, dépasse 1000 mm. Ce type de climat se caractérise par une saison pluvieuse qui dure 7 mois (avril-octobre) et une saison sèche au vent d'harmattan sec et poussiéreux, de novembre à mars. La température moyenne annuelle est de 27,7 °C ; les minima et les maxima à la station synoptique de Gaoua se situent entre 15 °C (Juillet-Août) et 42 °C (Avril). Ce bassin versant est à cheval entre les provinces du Poni et du Noumbiel et couvre une superficie de 3654,02 km² ***(Figure 1)***.

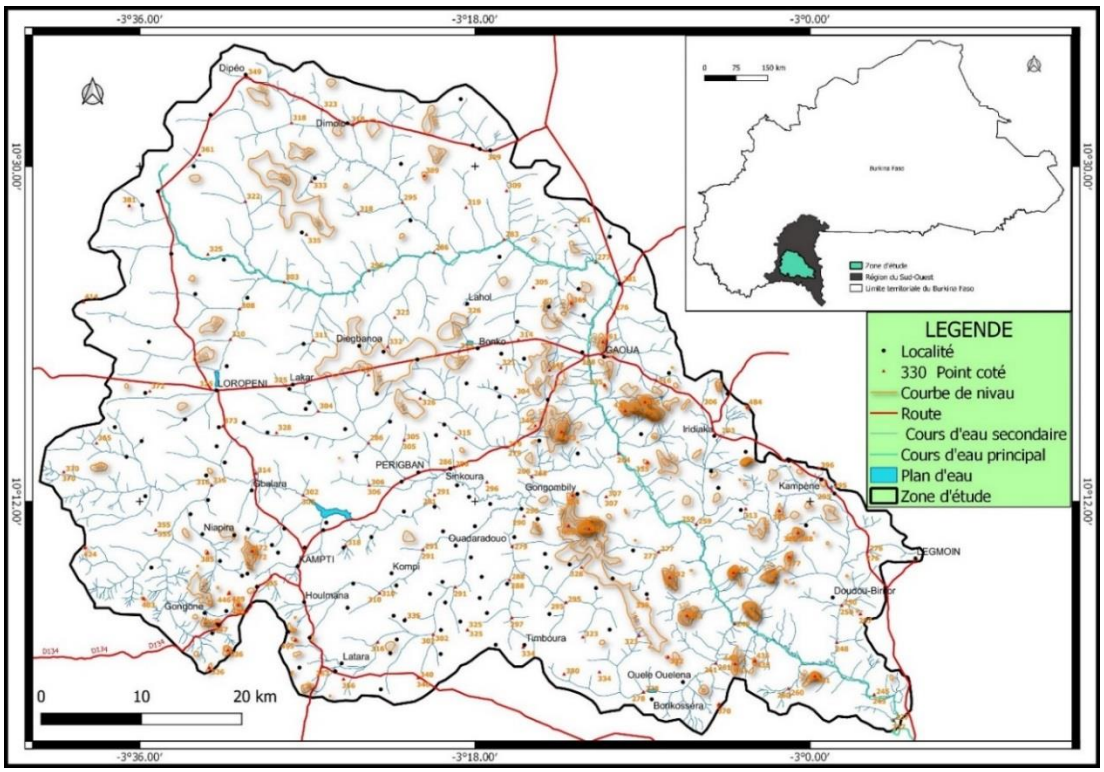

Figure 1 : *Localisation du bassin versant du Poni, la zone d'étude*

Il repose sur une formation géologique de type cristallin datant de l'Antébirimien et du Birimien. L'Antébirimien est un ensemble de formations rocheuses telles que des gneiss, des gneiss granitisés ou migmatites, des amphibolites, des gabbros et des granites. Quant au Birimien, il représente les parties non encore érodées du remplissage des sillons intracratoniques d'origines volcanique, pyroclastique et sédimentaire. Dans son organisation stratigraphique, l'on peut s'apercevoir, de la base au somment, la succession des formations basales constituées de basaltes et d'andésites, puis des formations volcaniques et volcano-sédimentaires. A ces dernières formations géologiques, on leur associe plusieurs autres types de roches : des séries de laves à caractère calco-alcalin dominant, des tufs basiques et neutres, des schistes, des niveaux de sédiments chimiques variés et des sédiments détritiques plus récents [16].

2-2. Méthodes et outils

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail s'articule autour d'une recherche documentaire et des travaux de terrains. La recherche documentaire concerne les résultats d'écrits scientifiques antérieurs obtenus autour de la problématique de recherche [1, 3, 11, 12, 15] et d'images satellitaires. La base de données morphopédologiques du Bureau National des Sols (BUNASOLS) et celle de l'Institut Géographique du Burkina (Base Nationale de Données Topographiques de 2014) ont été utilisées. Cette méthodologie intègre l'approche géomorphométrique qui consiste, à partir des outils de mesure exploitables en géomorphologie et topographie, à mesurer les formes du relief. De ce fait, le choix des images satellitaires a porté sur un extrait de STRM-30 m couvrant la zone d'étude. A l'aide de logiciels cartographiques (GLOBALMAPPER et ArcGis), cette image a été automatiquement traitée en vue d'obtenir les caractéristiques morphométriques du bassin versant. Ces caractéristiques sont entre autres les aspects de formes géométriques avec le calcul du ratio d'élongation, l'hypsométrie et les ordres des cours d'eau de Strahler. Le terrain effectué à plusieurs reprises dans la zone d'étude a permis d'apporter des corrections sur les résultats obtenus à partir des extractions automatiques d'informations par les logiciels.

3. Résultats

Les investigations portant sur l'exploitation de l'image SRTM de 30 m de résolution permettent de présenter les résultats en deux principaux paragraphes : les caractéristiques morphométriques et les différents modelés du bassin versant.

3-1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Dans ce paragraphe, les résultats présentés sont entre autres la géométrie du bassin versant, les altitudes et caractéristiques orographiques, le réseau hydrographique.

- *La géométrie du bassin versant*

Le bassin versant du Poni a une superficie de 3654,02 km² pour un périmètre de 324 km. Pour déterminer sa forme approximative, le ratio d'élongation de SCHUMM R_e a été calculé. Il consiste à faire le rapport entre le diamètre D du cercle ayant la même superficie A de celle du bassin et la longueur L dudit bassin versant. Ce ratio est de 0,73, ce qui sous-entend une forme géométrique plus ou moins circulaire (moins allongée) du bassin versant du Poni. Grâce à son indice de compacité K qui est de 1,5, la longueur du rectangle équivalent est déterminée ; elle vaut L = 134,815 km.

- *Les altitudes et les caractéristiques orographiques*

Le bassin versant du Poni a une altitude allant de 235 m à l'exutoire, à près de 575 m, soit une dénivelée de 340 m. Quant aux altitudes médiane et moyenne [17, 18], la première est déterminée par la lecture au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin versant, sur la courbe hypsométrique et vaut 325 m ; la deuxième H_{moy} est calculée à partir de la ***Formule (1)*** suivante ***(Figure 2)***:

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i * h_i}{A} \quad (1)$$

A_i étant la surface en km² comprise entre deux courbes de niveau, hi l'altitude moyenne en m entre deux courbes de niveau et A, l'aire totale en km² du bassin versant.

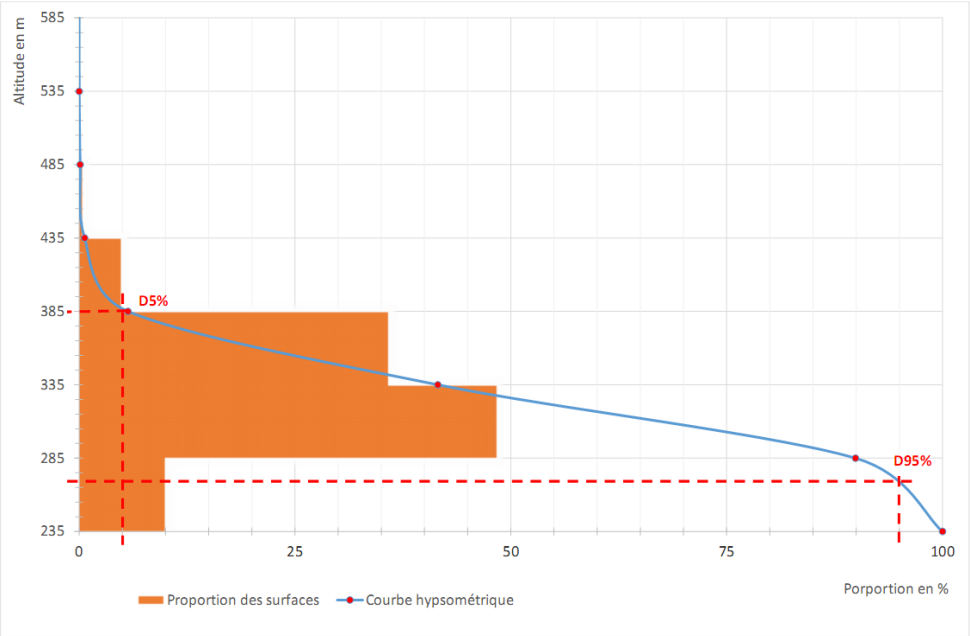

Figure 2 : *Courbe hypsométrique du bassin versant du Poni*

Cette ***Formule (1)*** a permis donc de déterminer l'altitude moyenne du bassin versant du Poni qui est de 329 m. L'indice de l'intégrale hypsométrique a également été calculé [19]. La valeur de cet indice I_h est toujours comprise entre 0 et 1, cet intervalle étant subdivisé en trois sous-classes : $I_h \leq 0{,}3$ pour un bassin versant vieux ; $0{,}3 < I_h \leq 0{,}6$ pour un bassin mature ; $0{,}6 < I_h \leq 1$ pour un bassin jeune. Dans notre cas, l'indice I_h est égal à 0,28 et s'inscrit dans la première sous-classe de bassin versant vieux. Concernant les pentes dans le bassin versant, elles évoluent de 0 à 41 degrés. A partir d'un découpage en six classes de degrés ***(Tableau 1)***, on constate que 40 % de la superficie du bassin est quasi-plat (0-2 °), 52 % environ légèrement ondulé (2-5 °) et environ 8 % pentu (5-15 °). Les pentes les plus fortes se localisent sur les versants raids des flancs de collines, sur les talus et les berges des cours d'eau. Après analyse du ***Tableau 1***, la pente moyenne du bassin versant du Poni est de 1,714 ° ; ce qui dénote d'une platitude générale de la zone d'étude. Quant à l'indice global ou général de pente I_G du bassin versant [18], elle est égale à 0,86 m/km. Avec une pente hydrographique aussi faible, cette valeur permet de situer le bassin drainée dans la catégorie des cours d'eau moyens. Cela dénote également de la platitude d'ensemble du profil en long du cours d'eau au regard de la valeur de cette pente hydrographique générale qui est inférieure à 1 °. La conséquence qui en résulte est la modification de sa forme et de son comportement hydrologique notamment au niveau de son tracé.

Tableau 1 : *Classes des pentes du bassin versant du Poni*

Classes	Valeur en degré	Signification morphologique	Emprise spatiale (ha)	Emprise spatial (%)
1	0 – 2	Plan	145.575,86	40,06
2	2 – 5	Légèrement ondulé	188.127,34	51,77
3	5 – 15	Pentu	28.318,83	7,79
4	15 – 25	Très pentu	1.319,24	0,36
5	25 – 35	Escarpé	46,09	0,01
6	35 – 55	Sub-vertical	0,62	0,00

- *Le réseau hydrographique*

L'extraction automatique du réseau hydrographique du bassin versant à partir d'image SRTM-30 m de résolution, a permis sa classification selon l'ordre de Strahler ***(Figure 3)***. Ainsi, sept ordres ont été obtenus à partir desquels les ratios de bifurcation et de longueur ont été calculés ***(Tableau 2)***.

Tableau 2 : *Ratios de bifurcation et des longueurs du bassin versant du Poni*

N° d'ordre des cours d'eau	Nombre de bras	Longueur (en km)	Longueur moyenne par ordre (km)	Fréq. cum. des longueurs moyennes	Ration de bifurcation	Ration des Longueurs moyennes
1	871	1045,72	1,2	1,2	4,54	2,5
2	192	575,89	3	4,2	5,05	2,93
3	38	33,21	8, 8	13	4,75	0,87
4	8	61,3	7,66	20,66	4	2,78
5	2	42,6	21,3	41,96	2	0,57
6	1	12,14	12,14	54,1	1	10,86
7	1	131,87	131,87	185,97	-	-
TOTAL		2203,73			3,56	3,42

Source : Extrait automatiquement de l'image SRTM-30 m

Le ratio de bifurcation est le rapport du nombre de bras d'ordre *n* sur le nombre de bras de l'ordre supérieur *n + 1* ; quant au ratio des longueurs, c'est le rapport de longueur d'ordre *L* sur la longueur de l'ordre inférieur *L - 1*. C'est deux ratios constituent une moyenne et sont obtenus en application numérique des ***Formules (2) et (3)*** ci-après [20] :

$$R_b = \sum n / \sum (n+1), \quad (2)$$

$$R_L = \sum L / \sum (L-1) \quad (3)$$

R_b étant le ratio de bifurcation, n le nombre d'ordre de bras de cours d'eau de Strahler, R_L le ratio d'élongation et L la longueur d'ordre de bras du cours d'eau de Strahler.

La signification du ratio de bifurcation est d'évaluer la vitesse à laquelle un réseau de cours d'eau bifurque. Il aide à la compréhension de certains facteurs liés au transport des charges liquides et solides, et renseigne sur le risque d'inondation et également sur les caractéristiques géologiques du bassin versant selon [21] ; plus il est élevé, c'est-à-dire pour une valeur supérieure à 5, plus le risque d'une inondation majeure est imminent. Lorsque la valeur de R_b est comprise entre 3 et 5, la géologie n'a aucune influence sur le développement du réseau hydrographique. En restant dans sa logique, il n'y a donc aucune influence géologique sur le développement hydrographique du bassin versant du Poni, puisque la valeur de R_b dans le bassin versant du Poni est égale à 3,56.

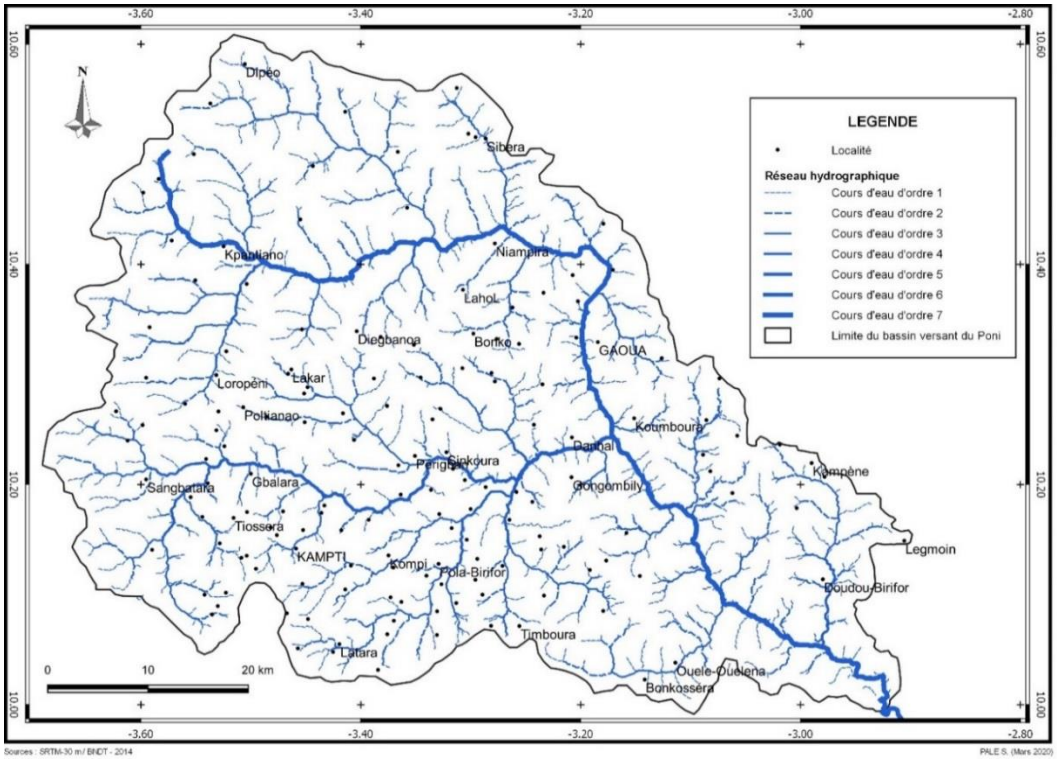

Figure 3 : *Réseau hydrographique du bassin versant du Poni selon l'ordre de Strahler*

Pour mieux appréhender l'influence géologique et renforcer l'analyse sur les caractéristiques du bassin versant, la loi des nombres de bras des cours d'eau d'Horton en fonction de leur ordre ont été appliquée. Cette loi stipule que « le nombre de cours d'eau d'ordres différents dans un bassin de drainage donné tend à se rapprocher étroitement d'une suite géométrique inverse dans laquelle le premier terme est l'unité et le rapport est le ratio de bifurcation » [20]. La ***Figure 4*** ci-après montre la distribution des bras des cours en fonction de leur ordre selon cette loi. La représentation graphique permet d'obtenir une courbe linéaire décroissante. Cette allure de la droite signifie que le réseau hydrographique n'est pas sous l'influence géologique. Sur la ***Figure 4***, le décalage de la courbe par rapport à sa droite de tendance est très peu significatif. Cette légère confusion de la courbe et sa droite de tendance montre que le réseau hydrographique du bassin versant du Poni est plus ou moins bien organisé.

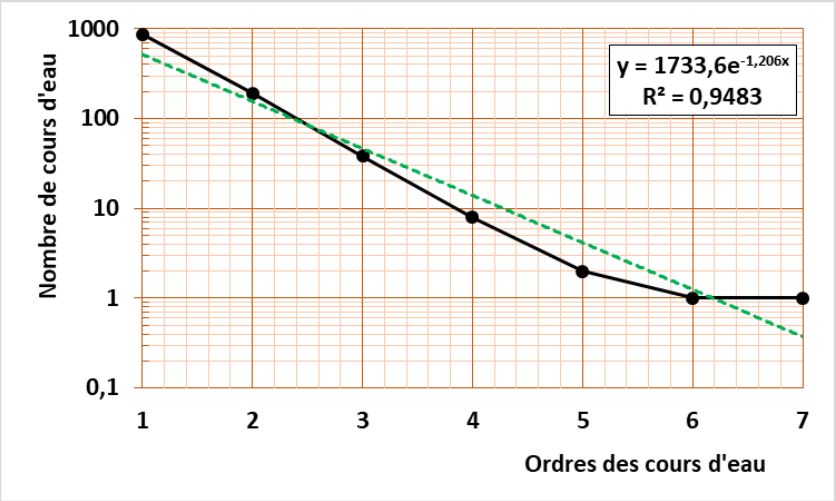

Figure 4 : *Distribution du nombre de bras par ordre de cours d'eau selon la loi Horton*

Cet état de fait du bassin versant est davantage renforcé par le calcul du facteur d'asymétrie (*Asymmetry factor*, en anglais). En effet, ce facteur d'asymétrie *(AF)* se détermine en rapportant la superficie de la rive droite du bassin (*Ar*) sur sa superficie totale *(At)*, le tout multiplié par 100 comme l'indique la ***Formule (4)*** ci-dessous [20] :

$$AF = (Ar/At) * 100 \quad (4)$$

AF étant le facteur d'asymétrie, Ar la superficie de la rive droite du bassin et At la superficie totale du bassin versant.

Ici, la valeur du facteur AF est égale à 65,76 ; elle est supérieure à 50, ce qui signifie que l'influence tectonique n'est pas évidente, sinon inexistante sur le réseau hydrographique. L'analyse de ce facteur d'asymétrie permet de déterminer toute inclinaison tectonique dans le bassin, liée probablement au mouvement de glissement, conséquence des zones de failles tectoniquement actives et/ou d'autres accidents récents de type fracture ou linéament. Ce bassin versant n'est donc pas sous l'influence tectonique. L'organisation morphologique du réseau hydrographique influe sur la répartition des flux depuis l'amont jusqu'à l'aval. Dans son fonctionnement morphohydrologique, des processus encadrent cette organisation du réseau qui se démarque à travers l'incision de la vallée, les modifications longitudinales du profil ou du déplacement progressif du lit du cours d'eau par endroits. Le profil en long du cours d'eau principal présente une pente générale inférieure à 1°, soit 0,9 m / km ; il s'enfonce davantage à l'approche de son exutoire, 1 m de profondeur par kilomètre sur les 25 derniers kilomètres. Le temps de concentration, obtenu à partir de la formule de Giandotti [22] (***Formule (5)*** ci-dessous) est la durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre le point du bassin le plus éloigné de l'exutoire et celui-ci. Il dépend essentiellement de la superficie du bassin, des pentes, de la longueur et de la densité du réseau hydrographique.

$$TC = \frac{4\sqrt{A}+1{,}5L}{0{,}8\sqrt{Hmoy-Hmin}} \quad (5)$$

TC étant le temps de concentration en heures, A la surface du bassin versant en km², L la longueur du rectangle équivalent en km, Hmoy l'altitude moyenne en m et Hmin l'altitude minimale de l'exutoire en m. A partir de la ***Formule (5)***, le *TC* du bassin versant du Poni calculé est de 57,25 heures, soit plus de deux jours ; il est relativement long.

3-2. Modelés du bassin versant

L'ensemble du relief du bassin versant est constitué par les collines et les buttes cuirassées, les talus et les glacis de raccordement ainsi que les plaines alluviales. Le MNT de la ***Figure 5*** et la carte morphologique de la ***Figure 6*** permettent d'individualiser ces unités et de les caractériser.

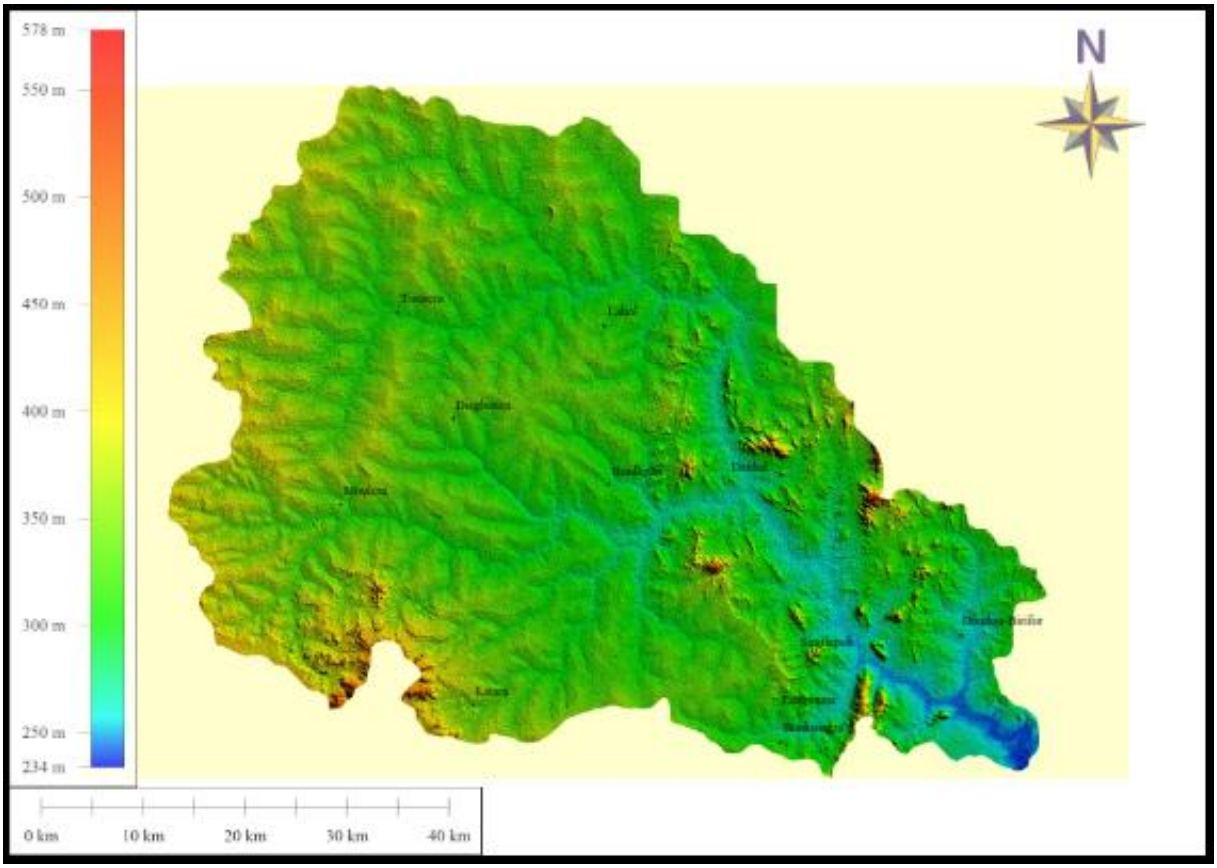

Figure 5 : *Modèle Numérique de Terrain du bassin versant du Poni*

- *Les collines et les buttes cuirassées*

Elles constituent les unités les plus hautes du bassin versant et occupent les espaces compris entre 400 et 575 m d'altitude. La superficie couverte par ces entités est de 95,7 km², soit 2,62 % de la superficie totale. Dans leur organisation, les collines alignées de formation birimienne sont en général entourées des buttes cuirassées, les premières étant séparées des secondes par des dépressions périphériques. Les versants de ces collines sont convexes à convexo-concaves. Quant aux buttes cuirassées, leur rebord supérieur est orienté vers la colline à laquelle elles étaient morphologiquement rattachées.

- *Les glacis et les talus de raccordement*

Les glacis sont fortement représentés dans le bassin versant avec une couverture surfacique de 2845,5 km² (soit, 77,93 % de la superficie totale). Ils culminent généralement entre 300 et 400 m d'altitude. Ils sont pentus de 2 à 5° et sont par endroits cuirassés ; leurs rebords amont et aval présentent des aspects différents. Le rebord amont est abrupt avec une cuirasse sommitale de 1 à 2 m de puissance de commandement. Le rebord aval est, par contre, imperceptible avec une transition plus ou moins douce vers l'unité morphologique en contre-bas. Les talus abrupts conséquents aux dalles de cuirasse de plusieurs périodes successives de formation, présentent une concavité basale due à la dynamique hydrique érosive ou de grottes étroites dues soit aux animaux fouisseurs soit à l'altération et à l'affaissement des horizons intermédiaires.

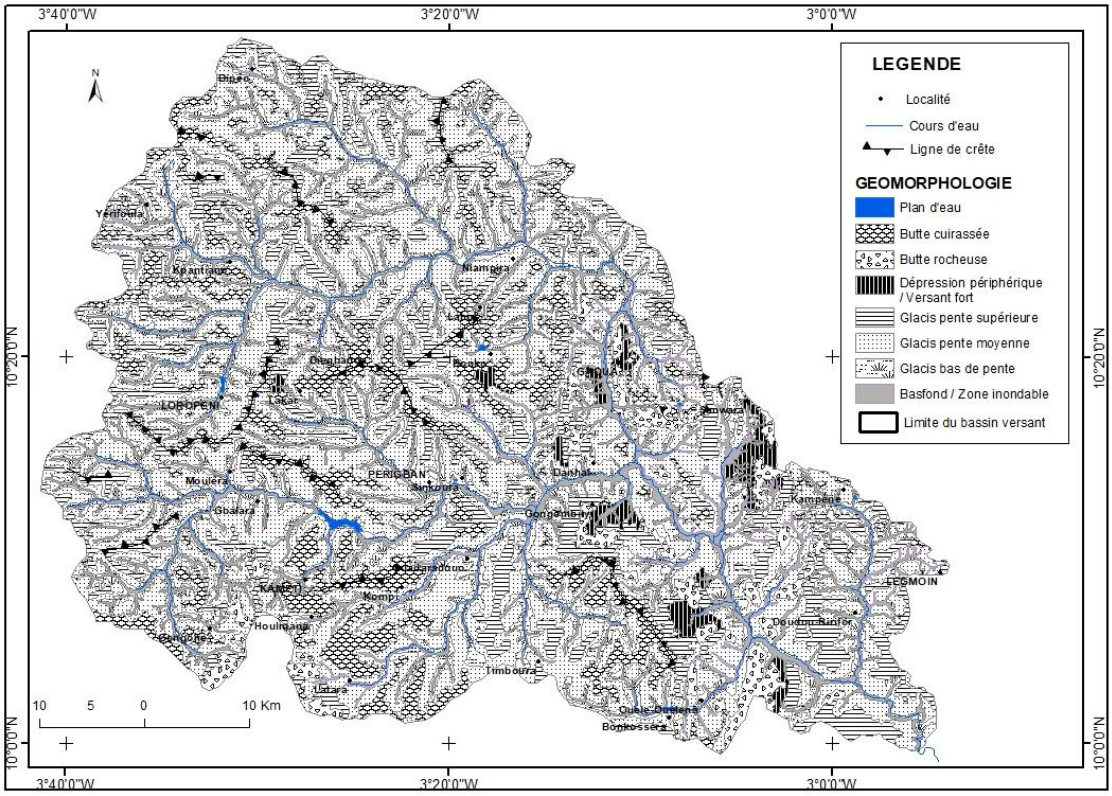

Figure 6 : *Unités morphologiques du bassin versant du Poni*

- *Les plaines alluviales et les vallées*

Avec une pente inférieure à 2°, les plaines alluviales du bassin versant du Poni sont quasi-plates (230-300 m). Elles couvrent une superficie de 710,8 km² (19,45 %) et se confondent entièrement par endroits aux vallées drainées. Ce réseau hydrographique draine une plaine inondable à caractéristiques différentes par endroits : des vallées sèches et étroites sur de hautes altitudes, servant de collecteurs de sédiments ; elles deviennent progressivement larges et planes où séjournent les eaux de crues, fortement chargées de fines, de colloïdes et autres matières en suspension (MES), pendant au moins deux mois par an. C'est notamment sur ces zones d'inondation que la plupart des matières en suspension (matières organiques et sédiments fins : sable, limon et argile) se déposent, contribuant à la fertilisation des sols ***(Figure 7)***. Dans ces vallées, le tracé des cours d'eau est caractérisé par l'indice ou coefficient de sinuosité *(SI)* de Schumm ***(Formule (6)***. Cet indice est déterminé en rapportant la longueur actuelle (La = 131,87 km) du cours d'eau principal sur la longueur supposée du tracé rectiligne (Lr = 91,33 km).

$$SI = La/Lr \quad (6)$$

SI étant l'indice de sinuosité, La la longueur actuelle réelle du cours d'eau et Lr la longueur supposée du tracé rectiligne du même cours d'eau.

Les résultats de l'opération montrent que le coefficient *SI* du cours d'eau principal est de 1,44 contre 1,31 pour son affluent d'ordre 6. A cet effet, [23] ont identifié quatre classes d'indice de sinuosité des cours d'eau auxquelles nous nous sommes conformé pour expliquer ces résultats :

- $SI < 1{,}05$: le cours d'eau est quasiment rectiligne ;
- $1{,}05 < SI < 1{,}25$: le cours d'eau est sinueux ;
- $1{,}25 < SI < 1{,}5$: le cours d'eau est très sinueux ;
- $SI \geq 1{,}5$: le cours d'eau est méandriforme.

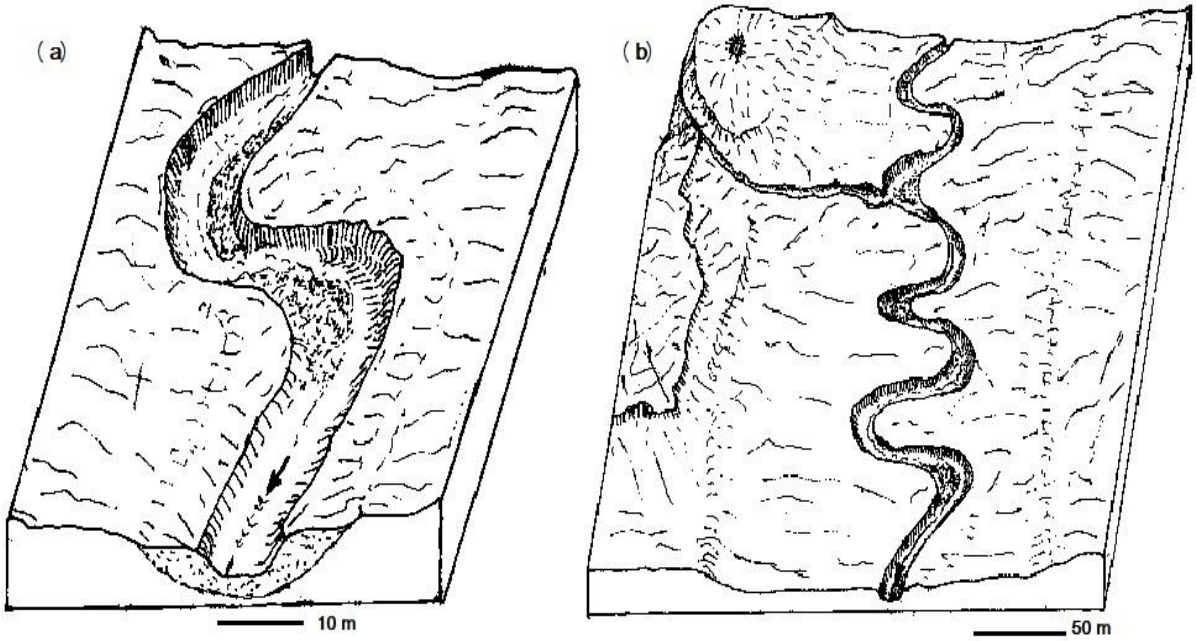

Figure 7 : *Importance de la plaine inondable dans le bassin versant du Poni :*

(a) : zone d'inondation exiguë, la sinuosité est faible. De part et d'autre du lit, la zone inondable couvre une distance de 10 à 50 m, en fonction du rayon d'inflexion ou de la courbure des coudes.
(b) : la zone inondable devient plus large (plus de 100 m sur chaque rive), et le tracé du cours d'eau, faiblement encaissé (moins de 1,5 m) et sinueux, contribue à la distribution latérale des excès d'afflux d'eau. Les matières en suspension sont progressivement déposées sur les lits majeurs et enrichissent chaque année les champs qui y sont emblavés. C'est également sur ces zones (notamment dans les champs de basfonds) que l'érosion en nappe est fortement constatée dès les premières pluies.

Ainsi, ces coefficients *SI* du cours d'eau principal et de son affluent appartiennent tous au troisième niveau de sinuosité. Dans leur tracé, ils présentent un profil en long très sinueux dont le rayon de courbure mesuré sur cinq tronçons différents (Dimolo, Kompi, Kpakpalanboura, Tolkaboua) va de 10 à 25 m pour les cours d'eau d'ordre 3 ***(Figure 8)***.

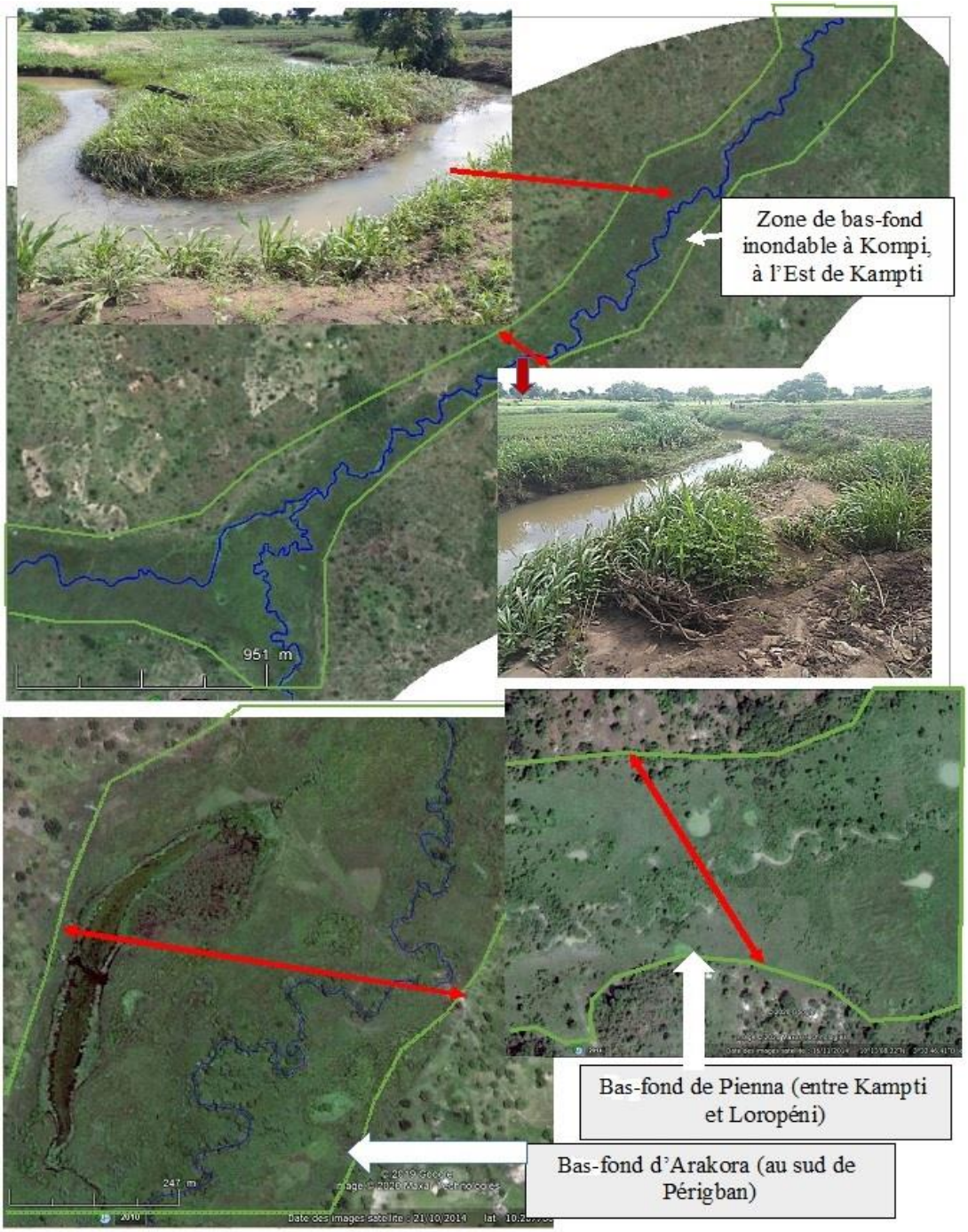

Figure 8 : *Zones inondables et sinuosité du tracé du cours d'eau dans le bassin versant du Poni*
Sources : Extrait de GoogleEarth Pro (2020) et clichés terrain (PALE S., mai et juin 2019)

Dans ces méandres encore en processus d'accentuation [24], le talweg est moins encaissé dans tous les ordres avec une profondeur moyenne de 1,5 m ; quant à la largeur, elle est également très variable, soit 2 m environ en amont à 15 m à la confluence des ordres 6 et 7. Le cours d'eau principal est, par contre, bien large (20 - 35 m) et surtout surcreusé dans sa partie aval où la profondeur dépasse 3 m par endroits (Yapouontéon à 10 km de l'exutoire). Dans le détail, un développement d'un réseau de bras qui dérivent et se rejoignent en formant un aspect de tresses a été observé dans une plaine inondable, à la hauteur de Danhal et Gongombily. Ce réseau s'étale plus ou moins sur toute la largeur de cette plaine inondable quasi-plate. C'est un processus avancé de la méandrisation qui aboutit à la formation de ce réseau en tresses [23].

4. Discussion

Les résultats présentés dans le paragraphe précédent sont issus de l'exploitation de l'image SRTM de 30 m de résolution. Ainsi, des indices géomorphométriques ont été calculés pour caractériser le bassin et le MNT a servi à l'identification des modelés. Ici, la discussion est orientée sur deux points tels que les indices géomorphométriques et les formes structurales du relief.

4-1. Regard sur quelques indices géomorphométriques

Avec un indice de compacité *K* égal à 1,5, la forme du bassin versant du Poni devrait logiquement être allongée, une caractéristique des bassins versants torrentiels et jeunes. Ce résultat sur la forme allongée du bassin est remis en cause par le calcul du ratio d'élongation de SCHUMM R_e qui est de 0,73. Ce ratio donne une forme plus ou moins circulaire (moins allongée) au bassin versant. Cette forme corrobore les résultats obtenus par l'équipe de [25 - 27], dans les mêmes conditions de description de bassin versant. L'impertinence de l'indice de compacité de Gravelius a cependant, été démontrée par [18]. Pour eux, le facteur périmètre du bassin n'est pas fiable pour la détermination de sa forme géométrique. De ces deux indices, nous retenons donc celui du ratio d'élongation pour mieux déterminer la forme du bassin versant. Cette forme géométrique est également un indicateur de l'âge qualitatif du bassin versant. Ainsi, au regard de sa forme, le bassin versant du Poni est d'âge mature. Le calcul de l'intégrale hypsométrique [28, 29] renseigne et confirme cette maturité du bassin. En intégrant les altitudes caractéristiques dans son calcul [29 - 31], la valeur de l'intégrale hypsométrique est de 0,28, ce qui signifie que le relief du bassin versant du Poni est vieillissant (relief vieux). Cet indice a cet avantage de caractériser le relief d'un bassin donné en tenant compte de la dynamique érosive qui contribue à son aplanissement. [29], ainsi que [32] l'ont utilisé avec succès comme l'un des marqueurs fiables à l'identification de la déformation des reliefs. En faisant appel à l'indice général de la pente dans la caractérisation du bassin qui est égale à 0,86 m/km, il permet de classer la rivière Poni selon l'importance du cours d'eau. En effet, l'indice général de pente [29, 36] varie beaucoup d'un type de cours d'eau à un autre. Ainsi, il ressort que lorsque I_G est supérieur à 10^2 m/km, il s'agit de petits bassins versants dont les torrents sont fortement pentus ; lorsque I_G est inférieur à 10^{-2} m/km, il est caractéristique des grands fleuves. Cette catégorisation par les valeurs de classes permet de situer la rivière du Poni dans la catégorie des cours d'eau de type moyen, compte tenu de son I_G qui est compris entre 10^{-2} m/km et 10^2 m/km. La détermination de ces indices permettent de définir sa forme, sa maturité et d'en déduire son comportement hydrologique. La faiblesse de la pente hydrographique du bassin versant du Poni (inférieure à 1 °, soit 0,0086 %) apporte une précision sur la platitude d'ensemble du profil en long du cours d'eau. La conséquence qui en résulte est la modification de sa forme notamment au niveau de son tracé et de son comportement hydrologique [23, 25, 28, 30, 33]. Le processus de méandrisation est assez avancé et la vitesse d'écoulement des eaux est plus ou moins faible comme le démontre le temps de concentration, supérieur à 50 heures. Il en est de même du lit principal du cours qui tend à s'équilibrer et dont la profondeur est assez importante (2 à 3,5 m par endroits) principalement dans sa partie aval.

4-2. Formes structurales du relief du bassin versant du Poni

La dynamique érosive qui tend à aplanir le bassin versant régit la chevelure hydrographique par lequel les unités se sont individualisées [28, 30]. Les formes élémentaires qui se sont dégagées à travers le MNT [25, 29], les travaux de terrain et la carte morphologique corroborent les résultats de [15, 34] et de [16]. En définitive, les formes géomorphologiques du bassin versant du Poni se présentent comme suit :

- un ensemble de collines à roches vertes volcaniques d'origine birimienne, formant des lignes de crêtes, dont les altitudes varient de 400 à 550 m ;
- une ceinture de buttes cuirassées, plus ou moins parallèles à ces collines rocheuses ; ces buttes laissent envisager leur rattachement aux précédentes, mais sont plutôt séparées d'elles par des dépressions périphériques ;

- un ensemble de plaines légèrement ondulées, avec des pointements d'affleurements granitiques d'altitudes moyennes (300 à 350 m) : c'est le domaine de dos de baleine (Kompi, Latara, Houlmana, Tobroura) et de chaos granitiques (Pola-Birifor, Mitéra, Moulera, Doudou-Birifor, Holy, Boulkpan, etc.) ;
- un ensemble de zones inondables ou de basfonds qui occupent les unités de plus basses altitudes (220 à 300 m) : ce sont les zones de distribution, de dépôts ou d'accumulation de sédiments fins (limons, læss) ou les activités d'altération sont plus accentuées ;
- un ensemble étagé de buttes cuirassées sur toutes les unités : ces buttes sont limitées par des rebords émoussés à pente douce en aval et par des rebords abrupts, bien pentus à escarpés en amont, à cause de la puissance de la cuirasse sommitale. Cet étagement constitue une série de glacis de niveaux différents (haut, moyen, bas), très dynamiques dans le processus hydrologique.
- le réseau hydrographique : c'est un tissu assez dense et organisé depuis les collines et buttes sous forme de dendrites ; environ 95 % des bras sont orientés d'ouest en Est avant de bifurquer dans le sens Nord-ouest / Sud-est, autour d'un cours d'eau principal du même aspect et sinueux, donnant au bassin versant sa forme asymétrique. Cette surimposition des cours d'eau liée à la tectonique cassante, explique en partie la dynamique actuelle du bassin, tendant à niveler les formes tout en cherchant son équilibre.

En Côte d'Ivoire, [35] est parvenu à dégager les différents éléments constitutifs du relief en fonction des critères géomorphométriques et hydrométriques à partir d'une méthode d'analyse quantitative similaire basée sur le MNT, dans le bassin versant de Booro-Borotou. Cette méthode a cet avantage de valider et de préciser les observations de terrain relatives à l'étagement des formes de terrain, notamment les buttes et les glacis cuirassés sur le bassin versant.

5. Conclusion

Les formes structurales des modelés qui se sont dégagées (buttes cuirassées, collines rocheuses, glacis et plaines alluviales), sont la résultante des processus hydrodynamiques desquels elles sont issues. A la faveur des conditions géologiques liées à la tectonique, des conditions climatiques passées et actuelles, les processus d'altération et d'aplanissement du bassin ont engendré des modelés qui forment le paysage géographique actuel. Les chaînes de collines de formations birimiennes sont parallèlement entourées d'une dépression périphérique, puis d'un ensemble de buttes cuirassées et des glacis. En contrebas des glacis bas de pente, se développent des plaines alluviales et des vallées d'ampleur graduellement étroite à large, de l'amont vers l'aval. Dans son ensemble, le bassin versant du Poni constitue une pénéplaine où les modelés les plus hauts sont les collines rocheuses et les buttes cuirassées, celles-ci dominant la plaine d'au plus 300 m. En somme, l'utilisation d'une image SRTM de 30 m de résolution est un moyen efficace pour la détermination des formes structurales de reliefs à l'échelle du bassin versant.

Références

[1] - T. SLAMA, " Géomorphométrie numérique et SIG pour l'analyse morphostructurale Localisation des failles actives et récentes zones de soulèvements tectoniques (Tectonic Uplift). Tunisie septentrionale ". Editions Universitaires Européennes EUE, (2016) 556 p.

[2] - A. S. GOUDIE, " Encyclopedia of geomorphology ". Volume 1. Routledge Taylor & Francis Group, IAG, London and New York, (2004) 609 p.

[3] - C. DEPRAETERE, " Le relief aussi s'informatise ", in *ORSTOM Fonds Documentaire,* N°24 (1984) 15 - 17

[4] - J.-C. DIONNE, " Compte rendu de [Peulvast, Jean-Pierre et Vanney, Jean-René, 2001. Géomorphologie structurale : terre, corps planétaires solides ; Tome 1 : Relief et structure. Co-édition Gordon and Breach Science Publishers, Paris, Éditions du BRGM, Orléans, et Société géologique de France, Paris, 505 p., 436 fig., 14 tabl., 17 X 24,5 cm ; 45 m ; ISBN-2-88449-063-9]" in *Géographie physique et Quaternaire*, 55 (2) (2001) 193 - 195. https://doi.org/10.7202/008304ar

[5] - M. CALVET, C. GIUSTI et Y. GUNNELL, " Regards croisés sur l'histoire et l'épistémologie de la géomorphologie ", in *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Lille/France, Vol. 13, N°2 (2007) [en ligne]. URL : https://geomorphologie.revues.org/752

[6] - D. C. SANOU, " ABC de la géomorphologie structurale ", Ouagadougou, Burkina Faso, (2016) 104 p.

[7] - V. PETRAS, H. MITASOVA et A. PETRASOVA, " Mapping gradient fields of landform migration ". In: Geomorphometry for Geosciences, J. Jasiewicz, Zb. ZWOLINSKI, H. MITASOVA, T. HENGL (eds). Adam Mickiewicz University in Poznań - Institute of Geoecology and Geoinformation, *International Society for Geomorphometry*, Poznań, (2015) 173 - 176

[8] - A. BANNARI, A. EL-HARTI, D. HABOUDANE, E. M. BACHAOUI et A. EL-GHMARI, " Intégration des variables spectrales et géomorphométriques dans un SIG pour la cartographie des aires exposées à l'érosion ", in *Revue Télédétection*, Vol. 7, N° 1-2-3-4 (2007) 327 - 342

[9] - S. ŠAMANOVIC, D. MEDAK et D. GAJSKI, " Analysis of the pit removal methods in digital terrain models of various resolutions ", in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B2, XXIII ISPRS Congress, 12—19 July 2016, Prague, Czech Republic, (2016) 235 - 239

[10] - G. HUGOT, " A la recherche du Gondwana perdu. Aux origines du monde ". U.M.R. 6012 du C.N.R.S. (''ESPACE''), (2002) 311 p.

[11] - G. BEAUDET et R. COQUE, " Les modelés cuirassés des savanes du Burkina Faso (Afrique Occidentale) ", in *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, Vol.27, Fasc. 3-4, Paris, (1986) 213 - 224

[12] - R. BOULET, " La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale ", in *Cahier Orstom — série Pédo* - t. VIII, N°3 (1970) 245 - 272

[13] - S. DAVEAU, M. LAMOTTE et G. ROUGERIE, " Cuirasses et chaînes birrimiennes en Haute-Volta ", in *Ann. Géogr.,* 387 (1962) 460 - 482

[14] - J.-L. BOEGLIN et D MAZALTARIM, " Géochimie, degrés d'évolution et lithodépendance des cuirasses ferrugineuses de la région de Gaoua au Burkina Faso ", in *Sci. Géol., Bull., 42*, 1, Strasbourg, (1989) 27 - 44

[15] - D. E. C. DA, " Recherches géomorphologiques dans le Sud-ouest de la Haute —Volta La dynamique actuelle en pays Lobi ". Thèse de doctorat de Troisième cycle de Géographie de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, France, septembre, (1984) 308 p.

[16] - IWACO, " *Notice explicative de la carte hydrogéologique du Burkina Faso. Echelle 1:500000, Feuille Gaoua* ". Rapport 60.451/31, Ouagadougou, septembre, BEEE / DIRH-Burkina Faso / BILAN D'EAU / DGIS- Pays-Bas, (1993) 38 p. + cartes

[17] - N. BENTEKHICI, " Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie)", https://www.esrifrance.fr/sig-2006/bentekhici.html (10 août 2020)

[18] - H. BENDJOUDI et P. HUBERT, " Le coefficient de compacité de Gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants ", in *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47 (6) (décembre 2002) 921 - 930

[19] - M. MEYBECK, P. GREEN et C.VÖRÖSMARTY, "A new typology for mountains and others relief classes", In *Mountain Research and Development, 21(1)*, Berne, Suisse, (2001) 34 - 45; DOI : http://dx.doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0034:ANTFMA]2.0.CO;2

[20] - R. E. HORTON, " Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology ", in *Geological Society of America Bulletin*; 56, N°3 (1945) 275 - 370, doi: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

[21] - S. A. SCHUMM, " The relation of drainage-basin relief to sediment loss ", in *Assoc. Int. Sci. Hydrol., Proc. Ass. Gén.* Rome, Vol. 1, (36) (1954) 216 - 219

[22] - A. BOUANANI, "Hydrologie, transport solide et modélisation : Etude de quelques sous-bassins de la Tafna (NW-Algérie)". Doctorat d'Etat en hydrogéologie, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, (2004) 250 p.

[23] - J.-R. MALAVOI et J.-P. BRAVARD, " Eléments d'hydromorphologie fluviale. Comprendre pour agir ", ONEMA, (2010) 224 p.

[24] - A. D. MIALL, " The geology of fluvial Deposits. Sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology ". 4th printing, Springer, Berlin / Germany, (2006) 582 p.

[25] - M. V. VINCY, B. RAJAN et A. P. PRADEEPKUMAR, "Geographic information system-based morphometric characterization of sub-watersheds of Meenachil river basin, Kottayam district, Kerala, India", In *Geocarto International*, 27, 8 (2012) 661 - 884. http://dx.doi.org/10.1080-/10106049.2012.657694

[26] - V. KUMAR, " Elongation ratio ". In : Vijay P. Singh, Pratap Singh & Umesh K. Haritashya (eds.), Encyclopedia of Snow, *Ice and Glaciers*, (2011) 257, DOI 10.1007/978-90-481-2642-2. © Springer Science + Business Media B.V. 2011

[27] - S. A. SCHUMM, " Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey ", in *Geological Society of American Bulletin*, 67 (1956) 597 - 646

[28] - D. R. SAMAL, S. S. GEDAM et R. NAGARAJAN, " GIS based drainage morphometry and its influence on hydrology in parts of Western Ghats region, Maharashtra, India ", In *Geocarto International*, (2014) DOI:10.1080/10106049.2014.978903

[29] - M. BEN HASSEN, B. DEFFONTAINES et M. MONCEF TURKI, "Recent tectonic activity of the Gafsa fault through morphometric analysis: Southern Atlas of Tunisia", In *Quaternary International xxx,* (2014) 1 - 14, http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.009

[30] - B. SARRAZIN, "MNT et observations multi-locales du réseau de drainage d'un petit bassin versant rural dans une perspective d'aide à la modélisation spatialisée". Thèse de doctorant de l'Université de Grenoble, France, (2012) 283 p.

[31] - A. N. STRAHLER, " Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography ", in *Geological Society of America Bulletin*, 63, N° 11 (1952) 1117 - 1142. doi: 10.1130/0016-7606 (1952) 63 [1117:HAAOET]2.0.CO;2

[32] - J.-M. CAROZZA et B. DELCAILLAU, " Réponse des bassins versants à l'activité tectonique : l'exemple de la terminaison orientale de la chaîne pyrénéenne. Approche morphotectonique ", in *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, N° 1 (2000) 45 - 60

[33] - M. DEKAVALLA et D. ARGIALAS, "Evaluation of a spatially adaptative approach for land surface classification from digital elevation models", In *International Journal of Geographical Information Science*, 31, 10 (2017) 1978 - 2000, DOI: 10.1080/13658816.2017.1344984

[34] - D. E. C. DA, " BDOT, BD-Géomorphologie (Echelle 1/500 000) ", in : *BDOT Burkina Faso, IGN International, PNGT, IGB*, (2005) 40 p. + métadonnées + guide + couches 1998, (2002), change et BD-Géomorphologie

[35] - C. DEPRAETERE, "Etude géomorphométrique du bassin-versant de Booro-Borotou à partir d'un Modèle Numérique de Terrain", In *ORSTOM Fonds Documentaires,* 64 (1990) 59 - 67