

## Caractérisation des interactions nappe/rivière à partir du réseau hydrographique et du réseau de fractures du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire)

### [ Characterization of groundwater/river interactions based on the hydrographic network and the fracture network: Application to the Lobo watershed in Nibéhibé (Centre-West, Côte d'Ivoire) ]

*Gningnéri Souleymane Ouattara<sup>1</sup>, Brou Dibi<sup>1</sup>, Parfait Abé Sombo<sup>2</sup>, and Oi Mangoua Jules Mangoua<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Department des Sciences de la terre, Université Jean Lorougnon Guédé, Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement, Daloa, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Department des Sciences de la terre, Université Jean Lorougnon Guédé, Laboratoire de Géologie Appliquée, Daloa, Côte d'Ivoire

---

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The people living along the Lobo catchment area in Nibéhibé are experiencing difficulties in supplying drinking water due to the impacts of climate variability and the anthropic pressures on the surface water used. The objective of this study is to characterise the groundwater-river interactions based on the major fracturing and the hydrographic network. The hydrographic network and the major fracturing map were used as data for the different treatments. Also, the hierarchy of the hydrographic network using the Strahler method highlighted the rivers of order 1 to 5. Frequency curves of the number of drains and cumulative lengths according to Strahler's orders were constructed and then interpreted using the «law of rivers» to detect drains with a structural origin. The distribution of drains in the river system follows the exponential law with a good correlation coefficient ( $R^2 = 0.97$ ). Moreover, the coupling of the map of watercourses of structural origin and the map of major fractures has made it possible to highlight potential areas of groundwater-river exchange. These zones represent the intersection of permanent watercourses and areas of very high fracture density.

**KEYWORDS:** Interaction, water table-river, fracturing, hydrographic networks, Lobo catchment area in Nibéhibé.

**RESUME:** Les populations riveraines du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé connaissent des difficultés d'approvisionnement en eau potable du fait des impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques que subissent les eaux de surfaces utilisées. L'objectif de cette étude est de caractériser les interactions nappe-rivière à partir de la fracturation majeure et du réseau hydrographique. Le réseau hydrographique et la carte de fracturation majeure ont servi de données aux différents traitements. Aussi, la hiérarchisation du réseau hydrographique par la méthode de Strahler a mis en évidence les cours d'eau d'ordre 1 à 5. Les courbes de fréquence du nombre des drains et des longueurs cumulées en fonction des ordres de Strahler ont été construites puis interprétées à l'aide de la «loi des rivières» pour détecter les drains ayant une origine structurale. La distribution des drains du réseau hydrographique obéit à la loi exponentielle avec un bon coefficient de corrélation ( $R^2 = 0,97$ ). Par ailleurs, le couplage de la carte des cours d'eau d'origine structurale et la carte des fractures majeures a permis de mettre en évidence des potentielles zones d'échanges nappe-rivière. Ces zones représentent l'intersection des cours d'eau permanents et les zones de très forte densité de fracturation.

**MOTS-CLEFS:** Interaction, nappe-rivière, fracturation, réseaux hydrographiques, bassin versant de la Lobo à Nibéhibé.

## **1 INTRODUCTION**

L'approvisionnement en eau potable constitue ces dernières années une préoccupation essentielle pour les populations riveraines. Dans les environs des principales villes africaines et singulièrement dans celles de la Côte d'Ivoire, les retenues et les cours d'eau sont constamment sollicités pour fournir cette ressource en eau potable à une population sans cesse croissante [1]. Toutefois, ces eaux de surface sont généralement sujettes aux pollutions de tout genre et à la variabilité climatique. Face à cette situation, les eaux souterraines apparaissent comme une opportunité car se présentent généralement comme une excellente source d'approvisionnement en eau potable du fait du filtre naturel constitué par les matériaux géologiques [2]. Elles pourraient cependant subir l'influence des eaux de surface. En effet, selon les travaux de [3], les bras des cours d'eau coulent souvent dans une fracture donnant ainsi une assez bonne similitude entre le réseau hydrographique et le réseau de linéaments issu du traitement des images satellitaires. De plus les principaux fleuves s'installent le plus souvent dans les grandes fractures du socle précambrien. Ainsi, une mauvaise qualité de ces eaux de surface pourrait manifestement affecter les eaux souterraines à cause des interactions eaux de surface contenues dans les lacs, rivières et fleuves avec les eaux souterraines dans un sens ou dans l'autre [4]. La connaissance des zones potentielles d'échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines s'avère nécessaire pour comprendre le degré d'interconnexion des deux hydrosystèmes (eau de surface et eau souterraine). Au niveau du bassin versant de la Lobo, site de cette étude, les zones potentielles d'échanges nappe-rivière pourraient constituer des sources d'alimentation de la rivière dont la retenue reste très sollicitée pour l'alimentation de la commune en eau potable. Aussi, ces zones peuvent contribuer à recharger les nappes d'eau souterraine, principales sources d'alimentation en eau pour les populations majoritairement rurales [5]. La compréhension d'un tel phénomène nécessite l'étude des relations nappe-rivière qu'il convient de caractériser surtout à travers les réseaux de fractures et le réseau hydrographique.

La présente étude a pour objectif de mettre en évidence les éventuelles relations entre le réseau hydrographique et les fractures majeures du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé. Il s'agit de montrer, à partir de l'analyse de données spatiales des SIG, les potentielles zones d'échanges de masse d'eau entre la fracturation et le réseau hydrographique.

## **2 MATERIEL ET METHODES**

### **2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

Le bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé (Figure 1) est situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire entre 6°15' et 6°55' de longitude Ouest et entre 6°45' et 7°55' de latitude Nord avec une superficie d'environ 7000 Km<sup>2</sup>. Elle prend sa source à 400 m d'altitude au sud de Séguéla [6]. Le climat est de type tropical humide de transition. Il est caractérisé par une saison sèche allant d'octobre à mars et une saison des pluies ayant deux maximas, l'un en juin et l'autre en septembre. Les saisons sèches et humides alternent avec des températures variant de 24,65 °C à 27,75 °C en moyenne [7].

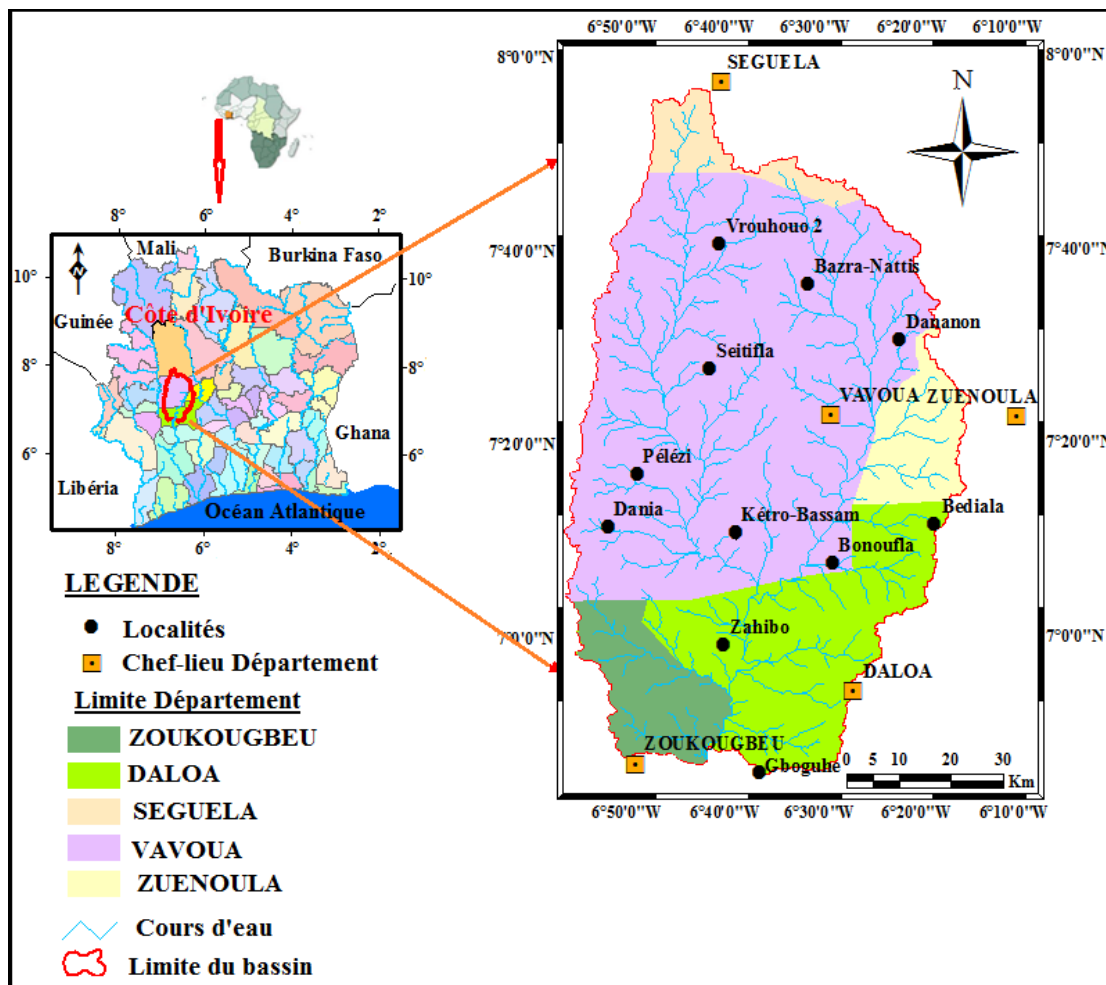


Fig. 1. Situation géographique du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé

## 2.2 MATÉRIEL

Le matériel utilisé est composé d'une image de Modèle Numérique Topographique (MNT) utilisé pour extraire le réseau hydrographique avec ArcGIS 10.4.1. Les images radar sentinel 1A utilisées pour extraire les linéaments à l'aide du logiciel SNAP 7.0. Le logiciel Linwin 2.0 a été utilisé pour élaborer les rosaces directionnelles et Excel pour les traitements statistiques et graphiques.

## 2.3 MÉTHODES

### 2.3.1 ELABORATION DE LA CARTE DE FRACTURATION MAJEURE DU BASSIN VERSANT DE LA LOBO

Cette carte a été réalisée à partir des images radar sentinel 1A. Ces images ont subi différents traitements dont la calibration radiométrique de l'image brute, le géoréférencement et le filtrage à l'aide des filtres de Lee [8], Frost [9] et Gamma [10]. Cette image a été importée dans Arcgis 10.4.1 pour l'extraction des linéaments. De ces linéaments totaux, les linéaments majeurs dont les longueurs est supérieure ou égale 9 kilomètres (Km) ont été extraits.

### 2.3.2 CRÉATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique est généré à partir d'un MNT à partir de plusieurs traitements. Il faut déterminer les directions des écoulements, leur concentration dans les talwegs, définir la taille minimale du bassin versant et du tronçon hydrographique souhaitée. Plusieurs méthodes sont possibles. Dans cette étude, notre choix s'est porté sur la méthode déterministe 8 (D8) [11], qui est une méthode couramment utilisée grâce à sa capacité à représenter plus fidèlement le réseau hydrographique.

### **2.3.3 IDENTIFICATION DES DRAINS AYANT UNE ORIGINE STRUCTURALE**

La classification des cours d'eau par la méthode de [12] permet de constituer une série de données statistiques que sont le nombre et les longueurs cumulés. A partir de ces données statistiques, on procède à la construction de deux courbes dont la première utilise le nombre de drains en fonction des ordres et la seconde concerne la longueur cumulée des drains en fonctions des ordres. Les courbes obtenues sont analysées et interprétées selon la loi des rivières [13] afin de déterminer les drains dont la mise en place est dictée par les structures géologiques que sont les fractures. En effet, les cours d'eau liés aux structures géologiques sont marquées par une stabilisation de la courbe parabolique et ceux liés à la topographie sont marqués par une décroissance brutale de la courbe.

### **2.3.4 DÉTERMINATION DES ZONES POTENTIELLES D'ÉCHANGES DE MASSE D'EAU ENTRE LA RIVIÈRE ET LA NAPPE**

Afin de mieux observer la distribution spatiale de la densité de fracturation suivant le nombre de fracture par unité de surface, il est primordial de construire la carte d'isovaleur de la densité en nombre cumulées des fractures par unité de surface. Une analyse globale de cette carte permet de connaître le degré de fracturation de la zone d'étude. La carte du réseau hydrographique est, par la suite, superposée à celle de densité de fracturation afin d'identifier les zones susceptibles de présenter de forts échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. En effet, les cours d'eau observés dans les zones de forte densité de fracturation sont supposés avoir des échanges avec les fractures [14].

## **3 RESULTATS**

### **3.1 CARTE DE FRACTURATION MAJEURE DU BASSIN VERSANT DE LA LOBO À NIBÉHIBÉ**

Le recours aux images radar sentinel 1A après filtrage a conduit à différents résultats. Ces images ont permis de relever 1130 linéaments (Figure 2a) avec des longueurs allant de 0,08 à 82 km. De ces linéaments totaux, 121 fractures majeures (Figure 2b) ont été extraits. La rosace directionnelle avec un intervalle de 10° présente en fonction du nombre deux directions majeures (Proportion supérieure ou égale à 10%) N-S et E-O (Figure 2c). Le recours aux images radar sentinel 1A après filtrage a conduit à différents résultats. Ces images ont permis de relever 1130 linéaments (Figure 2a) avec des longueurs allant de 0,08 à 82 km. De ces linéaments détaillés, 121 fractures majeures (Figure 2b) ont été extraits. La rosace directionnelle (Figures 2c) avec un intervalle de 10° associée au réseau de linéaments détaillés révèle deux orientations majeures N0-10 (14%) et N90-100 (12%) qui correspondent respectivement aux directions N-S et E-O. Les orientations secondaires sont les classes N70-80 (7%), N100-110 (7%), N150-160 (7%). Dans la région, on note également la présence des linéaments d'orientation N 60-70, N 110-120 et N 160-170. Ils présentent des fréquences en nombre et en longueur cumulée de 6%, ils sont minoritaires. Quant à la rosace directionnelle des fractures majeures (Figure 2c), celle-ci présente également deux directions majeures dont la direction N-S et NO-SE. Ce réseau de fracture indique une chenalisation des écoulements souterrains suivant les différentes orientations. Ces écoulements en eau souterraine, sont pour la plupart imposés par les grands couloirs de fractures selon qu'elles soient ouvertes ou semi-ouvertes.

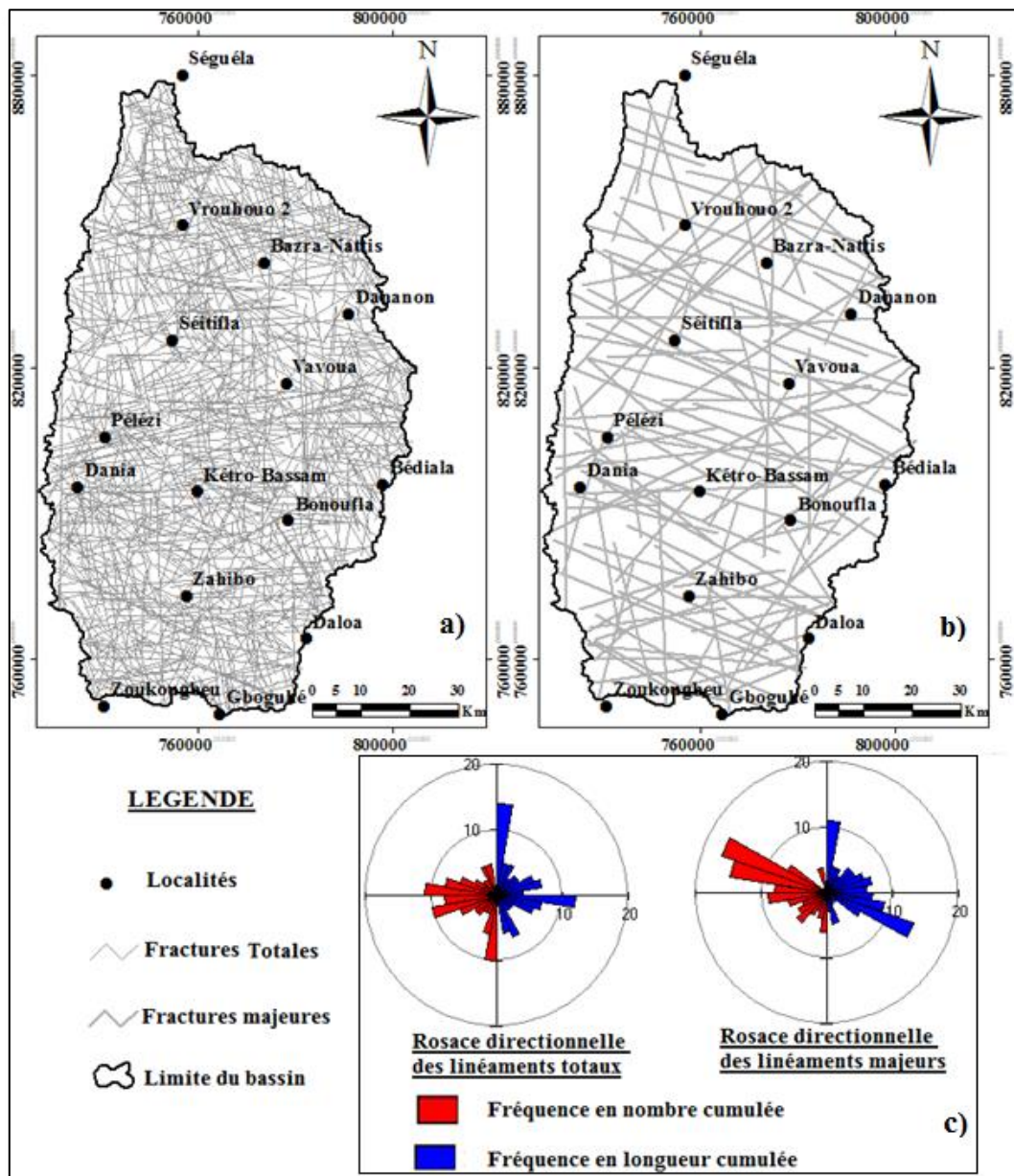


Fig. 2. Cartes linéamentaires du bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé

### 3.2 HIÉRARCHISATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

La hiérarchisation du réseau hydrographique selon la méthode de Strahler accorde une importance particulière aux interconnexions des drains. Elle a permis de mettre en exergue les différents ordres des cours d'eau qui varient de 1 à 5 (Figure 3). Les cours d'eau d'ordre 1 et 2 représentent respectivement 46% et 24% de l'effectif total des cours d'eau du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé. Cette situation témoigne de la contribution des petits cours d'eau dans le drainage du bassin. Aux drains qui constituent des sources à l'échelle de l'image satellitaire, l'ordre 1 fut affecté. Les drains qui résultent de l'interconnexion de deux drains d'ordre 1, l'ordre 2. Ainsi, l'ordre 3 fût-il attribué aux drains résultants de l'interconnexion entre deux drains d'ordre 2. La même démarche fut appliquée jusqu'à l'obtention du plus grand ordre possible (ordre 5). L'interprétation des courbes s'est appuyée sur les modèles définis par la « loi des rivières ».

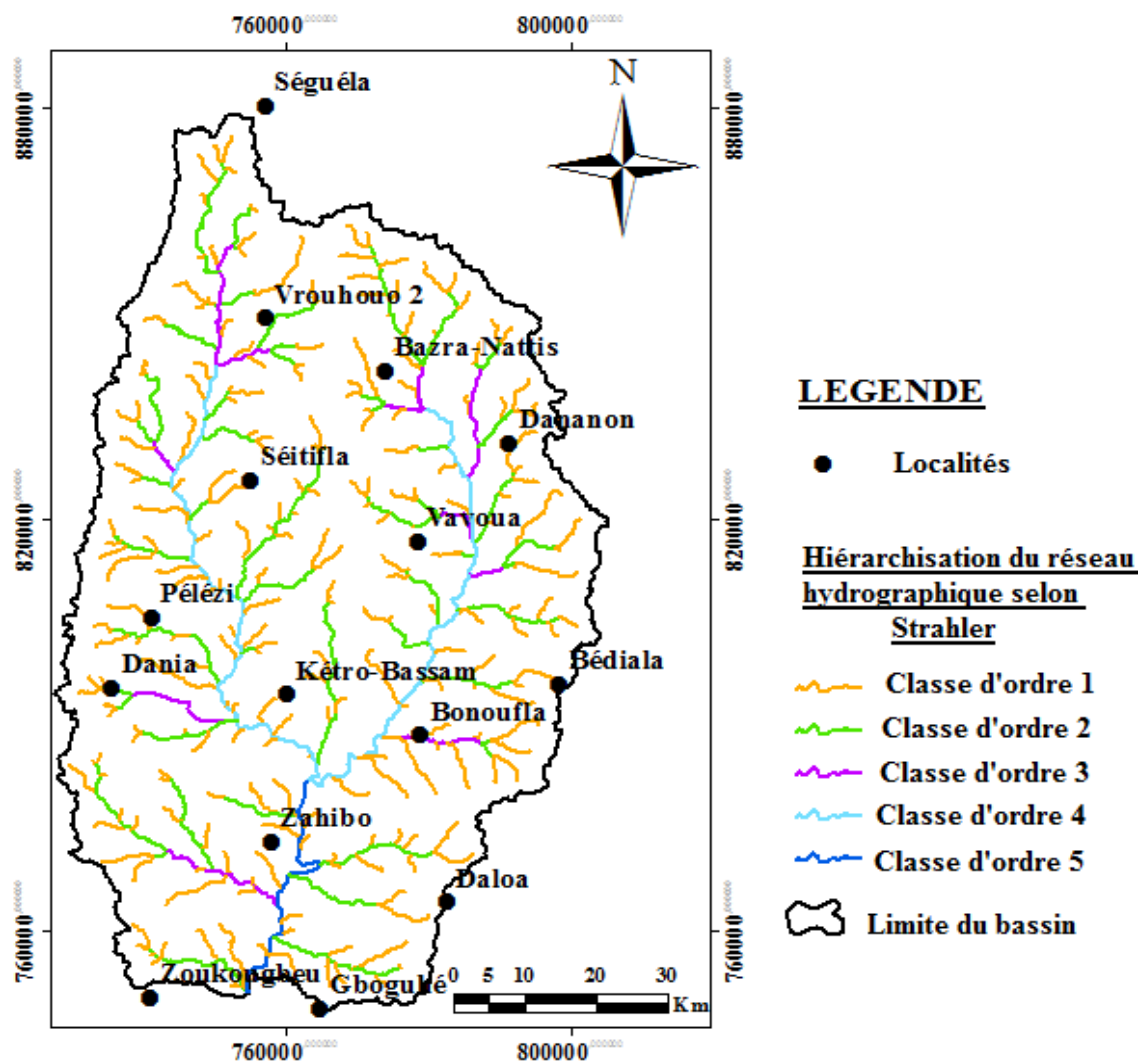


Fig. 3. Classification des cours d'eau

### 3.3 IDENTIFICATION DES DRAINS STRUCTURAUX

La relation qui lie l'effectif des drains à l'ordre des cours d'eau de la zone de socle est illustrée à la Figure 4. La courbe du nombre des drains et de la longueur des drains en fonction des ordres a une allure parabolique à décroissance exponentielle tendant vers une asymptote horizontale, avec des coefficients de corrélation proches de 1 ( $R^2 = 0,969$ ). En effet, de l'ordre 1 à l'ordre 3, la courbe décroît très rapidement selon deux types de pentes fortes. La pente est abrupte de l'ordre 1 à l'ordre 2. Ensuite, elle est moins raide entre l'ordre 2 et l'ordre 3. Ces résultats indiquent que les cours d'eau d'ordre 1, 2 et 3 sont mis en place par le relief. En effet, au fur et à mesure que les connections deviennent importantes, ces cours d'eau acquièrent une énergie leur permettant de modeler le relief par le biais de l'érosion. Les courbes se stabilisent à partir des ordres 4 et 5, cela signifie que les cours d'eau d'ordre 4 et 5 ont une énergie forte et un important volume qui leur permet d'emprunter les zones de moindres résistances que sont les éléments des structures géologiques et des discontinuités hydrogéologiques que sont les fractures. On note, enfin, que les cours d'eau qui sont directement liés aux structures géologiques et aux discontinuités hydrogéologiques sont les cours d'eau d'ordre 4 et 5 (Figure 4). Le drain d'ordre 4 à l'Ouest combiné au drain d'ordre 5 constituent la rivière Lobo dont l'exutoire est à Nibéhibé (Figure 5). Quant au drain d'ordre 4 à l'Est, il constitue la rivière Dé. Ces drains peuvent donc être connectés aux aquifères fissurés de socle de la zone d'étude.

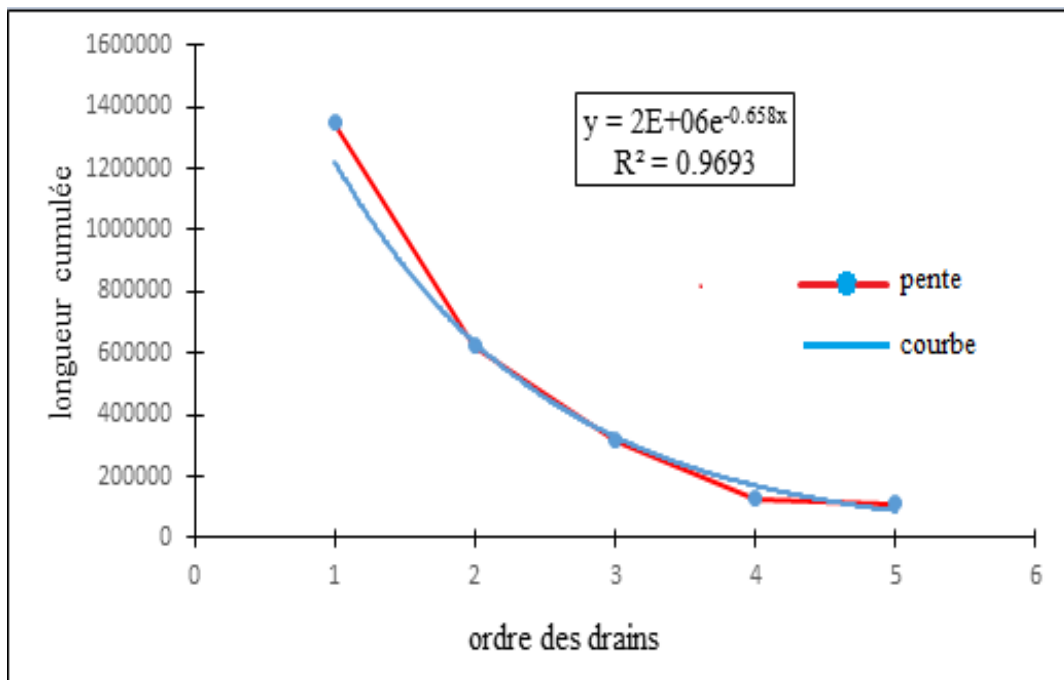


Fig. 4. Courbe des longueurs cumulées des drains en fonction des ordres

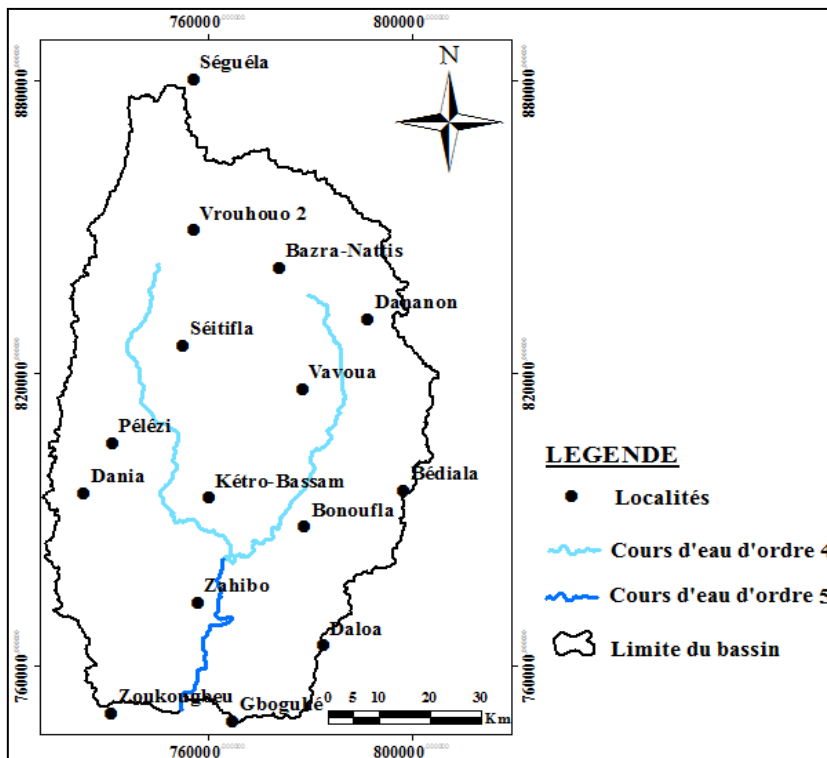


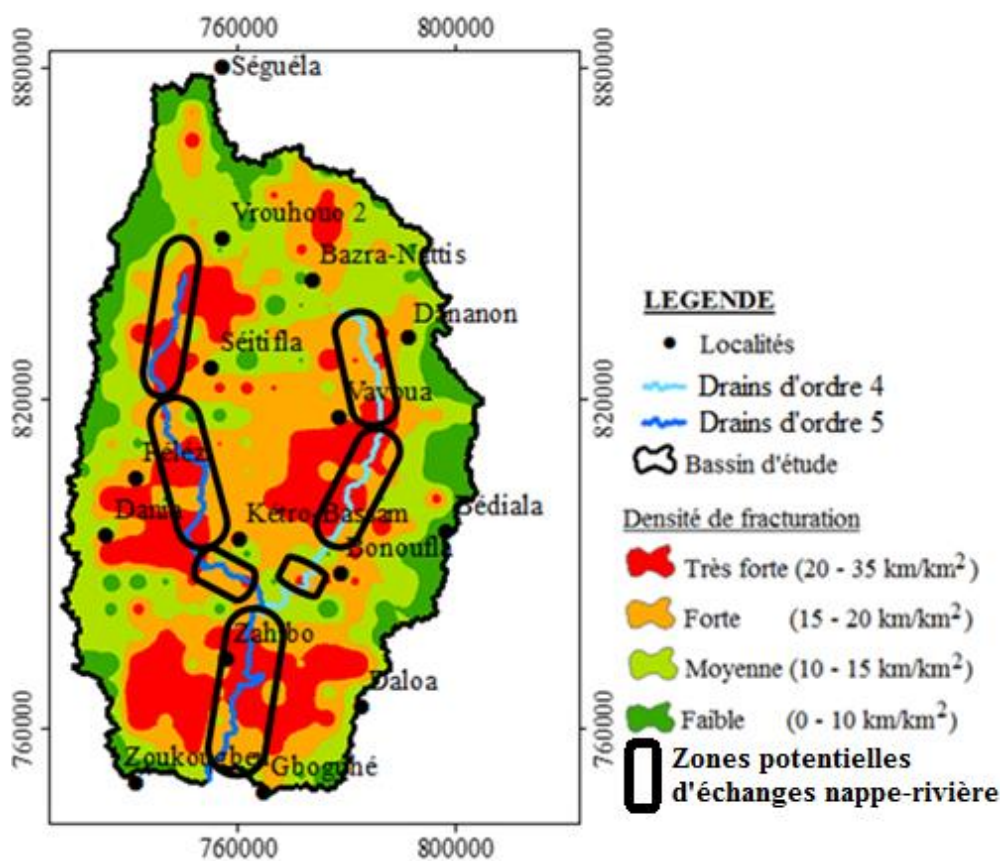
Fig. 5. Carte des cours d'eau ayant une origine structurale

### 3.4 DÉTERMINATION DES ZONES POTENTIELLES D'ÉCHANGES DE MASSE D'EAU ENTRE LA NAPPE ET LA RIVIÈRE

Le réseau hydrographique d'origine structurale (drains d'ordre 4 et 5) obtenu par l'application de la « loi des rivières » a été superposé aux fractures de grande conductivité (fractures majeures) pour évaluer leur degré d'interconnexion. Cette évaluation nécessite la mise en relation d'une carte de densité de fracturation obtenue à partir des fractures majeures avec

les drains d'ordre 4 et 5 (Figure 6). La carte d'isovaleurs de distribution de la densité de fracturation montre une hétérogénéité de la densité de fracturation sur tout le bassin. Une analyse globale de cette carte permet de dire que le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé est fortement fracturé, donc propice à des échanges de masse d'eau entre les deux hydrosystèmes (aquifères et rivières). La superposition de la rivière Lobo (combinaison du drain d'ordre 4 à l'Ouest et du drain d'ordre 5) ainsi que de la rivière Dé (drain d'ordre 4 à l'Est) à la carte de densité de fracturation montre que ces deux cours d'eau coïncident avec les zones de forte et très forte fracturation. Cette superposition nous a permis d'identifier 6 zones potentielles d'échanges nappe-rivière. Au niveau de la rivière Dé, trois (3) secteurs sont identifiés dont le secteur situé au Sud-Ouest de Bonoufla, les secteurs situés au Nord-Est et au Sud-Est de Vavoua. Par contre, au niveau de la rivière Lobo, quatre (4) secteurs sont identifiés dont les secteurs situés à l'Ouest de Séitifla, à l'Est de Pélézi et Dania, au Sud de Ketro Bassam et à l'Est de de Zahibo tout au long de la confluence. IL ressort de cette étude que les rivières Lobo et Dé s'écoulent essentiellement sur des zones de forte et très forte densité de fracturation qui constituent les zones potentielles d'échanges nappe-rivière.

. Ces résultats sont confirmés par des visites de terrain en période de basses eaux et en période de hautes eaux. Il a été observé qu'en période de basses eaux, la rivière Lobo maintient un débit minimal d'écoulement d'amont en aval sans interruption aucune. Quant à la rivière Dé, celle-ci maintient un débit minimal d'écoulement d'amont en aval avec quelques interruptions par endroit surtout en période d'étiage.



**Fig. 6. Superposition des drains d'origine structurale à la carte de densité de fracturation**

#### **4 DISCUSSION**

Le nombre de fractures majeures relevées dans cette étude à partir des images Radar Sentinel 1A sont au nombre de 121, il semble élevé comparativement aux travaux [6] qui ont mis en évidence 59 fractures majeures à partir des images ETM+ Landsat 7 sur la même zone d'étude. En effet, le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé regorge d'importantes ressources en eau souterraine [15] qui témoignent bien de l'existence des fractures dans le bassin. La différence des résultats obtenus dans les deux études est certainement liée aux types d'images. En effet, les images radar sentinel sont bien adaptées au milieu tropical, celles utilisées dans cette étude ont une résolution de 10 m permettant une bonne visibilité. De plus, ces images peuvent s'affranchir de la couverture végétale et peuvent pénétrer la couche pédologique. Par conséquent, elles sont bien adaptées



pour mettre en évidence les linéaments qui pourraient passer inaperçue avec les images ETM+ Landsat 7 [16]. Les résultats obtenus avec l'approche hydrographique ont mis en évidence l'existence des drains d'origines structurales (drain 4 et 5). Ces résultats sont en accord avec les travaux de [14] qui ont montré l'influence de la fracturation sur les drains de grands ordres (3, 4, 5 et 6) du bassin versant de l'Agneby. Selon [12], le réseau hydrographique constitue jusqu'à un certain ordre, les empreintes de la fracturation. La carte de densité de fracturation montre que le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé est fortement fracturé avec les classes moyennes, fortes et très fortes fracturations représentées par 88%. Ces résultats sont quasi-identiques à ceux obtenus par [6] qui est de 90%. En utilisant l'hypothèse que les linéaments correspondent à des structures cassantes dans le socle rocheux, l'intersection apporte de l'information importante. Une plus forte intersection de linéaments et une plus forte densité indiquent donc des endroits où l'eau souterraine pourrait circuler davantage [17].

Ces réservoirs de fissures seraient situés dans des substratums à couloirs mylonitiques où les structures conductrices sont bien développées [18]. Ces zones pourraient constituer des zones cibles dans la recherche d'eau souterraine. En outre, le suivi optimisé de la relation eau de surface - eau souterraine dans le cadre des applications environnementales (transfert de polluant, gestion de l'eau, gestion des zones humides, etc.) peut être effectué aux endroits où le cours d'eau coïncide avec zones de très forte densité de fracturation.

## 5 CONCLUSION

Dans cette étude, la superposition de la carte de la distribution de la densité de fracturation à celle du réseau hydrographique du bassin a mis en évidence une relation entre la rivière Lobo, les structures géologiques et les discontinuités hydrogéologiques du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé. Le réseau hydrographique du bassin a un ordre qui varie entre 1 et 5. Les cours d'eau d'ordre 4 et 5 caractérisent les cours d'eau permanents, concernant les ordres 1 et 3, ils caractérisent les petits cours d'eau ou tête de bassin. Le bassin versant héberge de nombreuses fractures parmi lesquelles on dénombre 121 majeurs. De l'analyse du couplage de la carte de densité de fracturation et du réseau hydrographique, il ressort que les cours d'eau d'ordre 4 et 5 sont sous contrôle structural tandis que les cours d'eau d'ordre 1 à 3 sont mis en place par le relief. La détermination des zones potentielles d'échanges de masse d'eau entre la nappe et la rivière montre que les deux principaux affluents de la Lobo que sont la Dé et la Lobo coïncident avec les zones de très forte fracturation. Cette étude montre le rôle fondamental des fractures dans la mise en place du réseau hydrographique. Elle peut être considérée comme un bon révélateur des relations qui existent entre les eaux de surface et les eaux souterraines ou entre la nappe phréatique et les aquifères sous-jacents. En perspective, cette caractérisation des relations nappe-rivière pourrait permettre de comprendre l'origine probable des eaux souterraines.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent au Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour le soutien apporté au cours de la réalisation de cette étude. Nous remercions aussi l'Université Jean Lorougnon GUEDE de Daloa pour leur contribution dans la réalisation de cette étude.

## REFERENCES

- [1] A. Koudou, B. Adiaffi, T. V. Assoma, A. P. Sombo, E. M. E Amani, J. Biémi, "Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du Sud-Est de la Côte d'Ivoire", *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicale*, vol 37, pp. 211-226, 2013.
- [2] M-L Tremblay, D. W. Roy, P. A. Cousineau, 2006. Paramètres influençant les propriétés hydrogéologiques d'un aquifère. Section 3 dans *Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine*. Rasmussen, H., Rouleau, A. et Chevalier, S. (éditeurs scientifiques). 43 pages. Document diffusé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/alim-protec/index.htm> (2006).
- [3] Y. H. Tie, M. Ouedraogo, K. L. Kouassi, K. Bamory, B. Yao et J. Biémi, "Géomorphologie et productivité des forages dans le nord du bassin du fleuve Comoé en Côte d'Ivoire", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 8, n°. 2, pp. 755-765, 2014.
- [4] J. F. Vernoux, J. Lions, E. Petelet-Giraud, J. J. Seguin, P. Stollsteiner et E. Lalot, "Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE", rapport BRGM/RP-57044-FR, p. 207, 2010.

- [5] O. A. Adjiri, B. Koné, N. Aka, I. Djabagaté et B. Dibi, "Caractérisation physico-chimique et source de la minéralisation des eaux souterraines des départements de Daloa, Zoukougbeu, Côte D'Ivoire", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, n°. 4, pp. 2388-2401, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i4.40>.
- [6] A. B. Yao, Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse De Doctorat, Université Nanguy Abrogoua, Abidjan, p. 323, 2015.
- [7] R. Ligban, D. L. Gone, B. Kamagate, M. B. Saley et J. Biemi, "Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol.3, n°.1, pp. 38-47, 2009. DOI: 10.4314/ijbcs. v3i1.42733.
- [8] J. S. Lee, "Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images", *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 17, n°1, pp. 24–32, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(81\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(81)80005-6).
- [9] V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, J. C. Holtzman, "A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4, n°. 2, pp. 157–166, 1982. DOI: 10.1109/tpami.1982.4767223.
- [10] A. Lopes, R. Touzi, E. Nezry, "Adaptive speckle filters and scene heterogeneity", *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, n°6, pp. 992–1000, 1990. DOI: 10.1109/36.62623.
- [11] J. F. O'Callaghan, D. M. Mark, "The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 28, pp. 328–344, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0).
- [12] A. N. Strahler. Quantitative geomorphology. « Encyclopedia of Geomorphology In: Fairbridge, R.W. (eds), *The Encyclopedia of Geomorphology*, Reinhold Book Crop, New York, 1968.
- [13] R. E. Horton, "Erosional development of streams and their drainage basin: hydrological approach to quantitative morphology", *Bulletin of the Geological society of America*, vol. 56, pp. 275–370, 1945. DOI: <https://doi.org/10.1177/030913339501900406>.
- [14] A. Koudou, B. Adiaffi, T. Assoma, B. Kouadio, E. A. Assi et D. Z. Lasmé, "Contribution des données multi-sources à la connaissance du réseau hydrographique du bassin versant du N'Zi (Centre de la Côte d'Ivoire)", *European Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 54, n°. 2, pp. 33–45, 2018.
- [15] A. B. Yao, B. T. A. Goula, A. Kane, O. M. J. Mangoua et K. A. Kouassi, "Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère", *Hydrological Sciences Journal*, vol. 32, pp. 1–12, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.932360>.
- [16] R. Desjardins, S. Iris, D. W. Roy, G. H. Lemieux et T. Toutin, "Efficacité des données de RADARSAT-1 dans la reconnaissance des linéaments : un bilan", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n°6, pp. 537–548, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2000.10874794>.
- [17] G. T. Lalèyè, E. W. Vissin, C. S. Houssou et P. Edorh, "Relation eau de ruissellement et eau des sources et forages artésiens dans la région Zagnanado-Zogbodomey au Bénin: Approche couplée (pollution microbiologique – télédétection)", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 8, n°. 6, pp. 2786-2803, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.36>.
- [18] B. Kamagaté, D. L. Goné, I. Doumouya, I. Ouattara, M. Ouédraogo, A. Bamba et I. Savané, "Relation nappe-rivière dans le bassin versant du Bandama en milieu de socle fissuré en Côte d'Ivoire", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 5, n°. 1, pp. 206-216, 2011. DOI: 10.4314/ijbcs.v5i1.68099.