

## **UTILISATION DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE MODIS POUR LA CARTOGRAPHIE DES FRACTURES MAJEURES DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA, CÔTE D'IVOIRE**

**Kassi Alexis KOUAMÉ<sup>1\*</sup>, Sékouba OULARE<sup>1</sup>, Lassina KONATÉ<sup>2</sup>  
et Koffi Fernand KOUAMÉ<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des  
Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et  
des Géomatériaux, 22 BP 582 Abidjan, Côte d'Ivoire*

*<sup>2</sup>Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo, UFR des Sciences  
Biologiques, Département de Géosciences, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire*

(reçu le 17 Septembre 2022; accepté le 31 Octobre 2022)

\* Correspondance, e-mail : [kassialexiskouame@yahoo.com](mailto:kassialexiskouame@yahoo.com)

### **RÉSUMÉ**

L'objectif de cette étude est d'établir la carte de fracturation du bassin versant du Bandama en vue d'une meilleure exploitation des ressources en eau souterraine. Pour ce faire, des images satellitaires MODIS ont été utilisées. Ces images ont été traitées à l'aide des méthodes de télédétection et SIG, afin de générer une base de données nécessaire à la réalisation de la carte des fractures majeures. Elles ont d'abord été rehaussées puis passées au filtre 3X3 de Sobel. Ce qui a permis d'extraire manuellement les linéaments majeurs. Les résultats montrent que les trois premières composantes principales de l'ACP renferment la quasi-totalité des informations (99,86 %) : CP1 (92,06 %), CP2 (7,35 %) et CP3 (0,5 %). La carte détaillée des linéaments comporte environ 1590 linéaments de l'ordre du kilomètre. La distribution des orientations en nombre de fractures donne trois directions principales à savoir N0-10, N40-50 et N90-100. La rosace des longueurs cumulées des fractures montre que les directions N0-10 ; N10-20 ; N40-50 ; N90-100 ; N130-140 sont les directions majeures. La méthode de régression linéaire indique une forte corrélation entre le nombre de fractures et les longueurs cumulées. Cette corrélation est caractérisée par la droite d'équation  $y = 0,8479x + 20,414$  avec un coefficient de corrélation  $R = 0,72$ . Au terme de cette étude, une carte qui met en évidence l'état de fracturation du bassin versant du Bandama a été réalisée. Cette carte est un indicateur des potentiels sites d'implantation de forages à gros débit pour l'approvisionnement en eau potable des populations du bassin versant du Bandama.

**Mots-clés :** *imagerie satellitaire, Modis, fractures majeures, bassin versant du Bandama.*

## ABSTRACT

### Using MODIS satellite imagery to map major fractures in the Bandama watershed, Ivory Coast

This study aims to map the fracturing of the Bandama watershed for better exploitation of groundwater resources. To achieve this, MODIS satellite images were used. These images were processed using remote sensing and GIS methods, in order to generate the database required to produce the major fracture map. They were first enhanced and then passed through Sobel's 3X3 filter. The major lineaments were then extracted manually. The results show that the first three principal components of the PCA contain almost all the information (99.86 %) : CP1 (92.06 %), CP2 (7.35 %) and CP3 (0.5 %). The detailed lineament map contains around 1,590 lineaments of the order of one kilometer. The distribution of fracture orientations gives three main directions: N0-10, N40-50 and N90-100. The rosette of cumulative fracture lengths shows that directions N0-10; N10-20; N40-50; N90-100; N130-140 are the major directions. The linear regression method shows a strong correlation between the number of fractures and cumulative lengths. This correlation is characterized by the straight line equation  $y = 0.8479x + 20.414$  with a correlation coefficient  $R = 0.72$ . At the end of this study, a map highlighting the fracturing status of the Bandama watershed has been realized. This map is an indicator of potential sites for the installation of high-flow boreholes to supply drinking water to the populations of the Bandama watershed.

**Keywords :** *satellite imagery, Modis, major fractures, Bandama watershed.*

## I - INTRODUCTION

L'eau, source de vie, est également un facteur de développement dans le monde entier. Son importance dans les activités socio-économiques, agro-pastorales et industrielles, est incontestable. L'inégale répartition de cette ressource à travers le monde entier, le réchauffement climatique de la planète avec son corollaire de désertification et/ou inondation, les différentes formes de pollution sont autant de facteurs qui concourent à la raréfaction de cette ressource naturelle dont la demande se fait toujours plus en plus pressante. Ceci conduit à des situations de difficultés d'approvisionnement en eau potable, voire de pénuries de plus en plus fréquentes à travers le monde [1 - 5]. Longtemps considérée comme inépuisable et inaltérable, l'eau est perçue aujourd'hui comme un bien précieux qu'il faut préserver. En Afrique et particulièrement dans la sous-région, différents programmes nationaux et sous régionaux de mise en place d'un observatoire des ressources en eau visant à

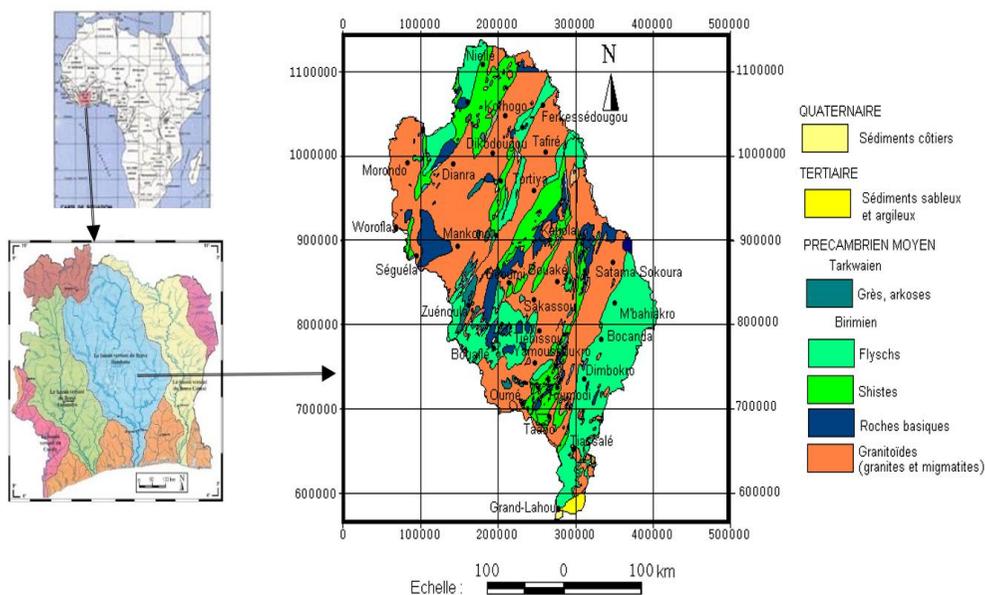
mieux connaître les ressources en eau et son partage sont devenus une préoccupation pour tous les acteurs du domaine de l'eau. A l'instar des pays d'Afrique subsahariens, la question de l'eau potable n'est guère reluisante en Côte d'Ivoire. L'état ivoirien, conscient de ce danger, a décidé de lancer un vaste Programme National de l'Hydraulique (PNH) qui a abouti en 1985 à la réalisation de plus de 12000 ouvrages de captage dans près de 8000 villages [6 - 9]. Malheureusement, sur le territoire national, constitué à 97,5 % de socle cristallin et cristallophyllien, les réserves d'eau souterraine sont généralement de faible quantité. Ces réserves sont localisées à travers les aquifères fissurés ou fracturés qui présentent des structures très complexes dont la configuration est liée à la nature lithologique et la fracturation orientée des roches. Pour ce faire, de nombreux projets de prospection et d'implantation de forages d'eau ont été entrepris un peu partout sur le territoire national [10 - 13]. Cependant, le taux d'échec et les débits d'exploitation souvent très faibles ( $< 1 \text{ m}^3/\text{h}$ ) de ces ouvrages contribuent à entretenir le stress hydrique dans cette grande partie du pays. L'approvisionnement des populations en eau potable constitue une priorité pour l'Etat qui encourage la recherche sur les potentialités en eau du pays. La caractérisation de ces aquifères est nécessaire pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise [14 - 21]. Ainsi, plusieurs études ont été menées à différents endroits du bassin versant du Bandama en vue d'identifier les zones d'intense fracturation, propices à l'implantation de forages à partir des images Landsat [22 - 24] et Spot [25]. Toutefois, la résolution spatiale de ces images Landsat (30 m) et Spot (20 m) constitue une limite dans leur utilisation sur de grandes superficies telles que celle du bassin versant du Bandama (97 000 km<sup>2</sup>). L'objectif de cette étude est donc d'établir la carte de fracturation de l'ensemble du bassin versant du Bandama, à l'aide des images satellitaires MODIS en vue de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau.

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

### II-1. Zone d'étude

Le bassin versant du fleuve Bandama est entièrement situé en Côte d'Ivoire, il occupe une superficie de 97 000 km<sup>2</sup> entre 3°50' et 7°W et 5° et 10°20' N [4]. Il est limité par le bassin versant du Niger au Nord, les bassins versants du Boubo, de l'Agnéby et l'océan atlantique au Sud, le bassin versant de la Comoé à l'Est et le bassin versant du Sassandra à l'Ouest (**Figure 1**). Sur le plan lithologique, il est constitué principalement du Précambrien moyen, du Tertiaire et du Quaternaire. Le Précambrien moyen comprend le Birimien et le Tarkwaïen. Le Birimien est constitué de roches magmatiques (granitoïdes) situées dans les régions de Yamoussoukro, Bouaké, Mankono et Korhogo et de roches métamorphiques (schistes et amphibolites) dans les régions de

Tiassalé, Dimbokro, M'Bahiakro, Bouaflé et Niellé. Le Tarkwaien, composé d'arkoses et de grès, se rencontre à Oumé et Zuénoula. Les sables tertiaires et quaternaires, très peu représentés sur le bassin, se trouvent principalement à l'embouchure du fleuve Bandama à Grand-Lahou. Du point de vue structural, les contacts entre les différentes unités suivent une direction NNE-SSO. Dans le Nord et le Nord-Est, il y a une prédominance de la direction ONO-ESE ; tandis que sur le reste de la carte, la direction ENE-OSO est assez remarquable. Sur le plan tectonique, trois accidents de décrochement vertical ont été identifiés : un premier, à 2 km au Nord du pont de Béoumi, de direction NO-SE ; un deuxième, de direction ENE-OSO, qui débute à partir de l'ancien bac de Béoumi ; un troisième, qui longe la bordure Est de la bande amphibolique de Tiassalé. Le bassin du Bandama comprend deux types d'aquifères : les aquifères de socle (aquifères discontinus, fissurés ou fracturés) sur la quasi-totalité du territoire et les aquifères du bassin sédimentaire (aquifères continus) à l'embouchure.



**Figure 1 :** Carte géographique et géologique du bassin versant du Bandama [4]

## II-2. Matériel et Données

Le matériel utilisé est constitué de logiciels :

- ENVI 5.1: pour le traitement des images satellites ;
- Arc GIS 10.5: pour la réalisation des différentes cartes ;
- Rockworks 16 : pour la réalisation des rosaces directionnelles.

Les données utilisées sont des images MODIS de 2006 (résolution spatiale = 1km) :

- scène MOD13A3 h17v07 (Nord de la Côte d'Ivoire) ;
- scène MOD13A3 h17v08 (Sud de la Côte d'Ivoire).

### II-3. Méthode de traitement de l'image satellite

Les images Modis étant déjà géoréférencées, la première phase a consisté au rehaussement (étalement dynamique, rapports de bandes, analyse en composantes principales et compositions colorées) et au filtrage (filtrage directionnel de Sobel) des images pour la mise en évidence de discontinuités linéaires. En seconde partie, l'interprétation structurale aboutit à l'extraction des discontinuités-images, qui correspondent aux accidents structuraux majeurs. Les accidents déjà identifiés à partir du traitement des images satellitaires Spot [25] et Landsat [24] du bassin versant du Haut Bandama et leurs rosaces directionnelles sont comparés à ceux issus du traitement des images satellitaires Modis pour la validation de la carte linéamentaire. Cette carte a été utilisée pour faire ressortir le réseau de failles responsables de l'écoulement souterrain dans le bassin versant du Bandama.

## III - RÉSULTATS

### III-1. Analyse en composantes principales (ACP)

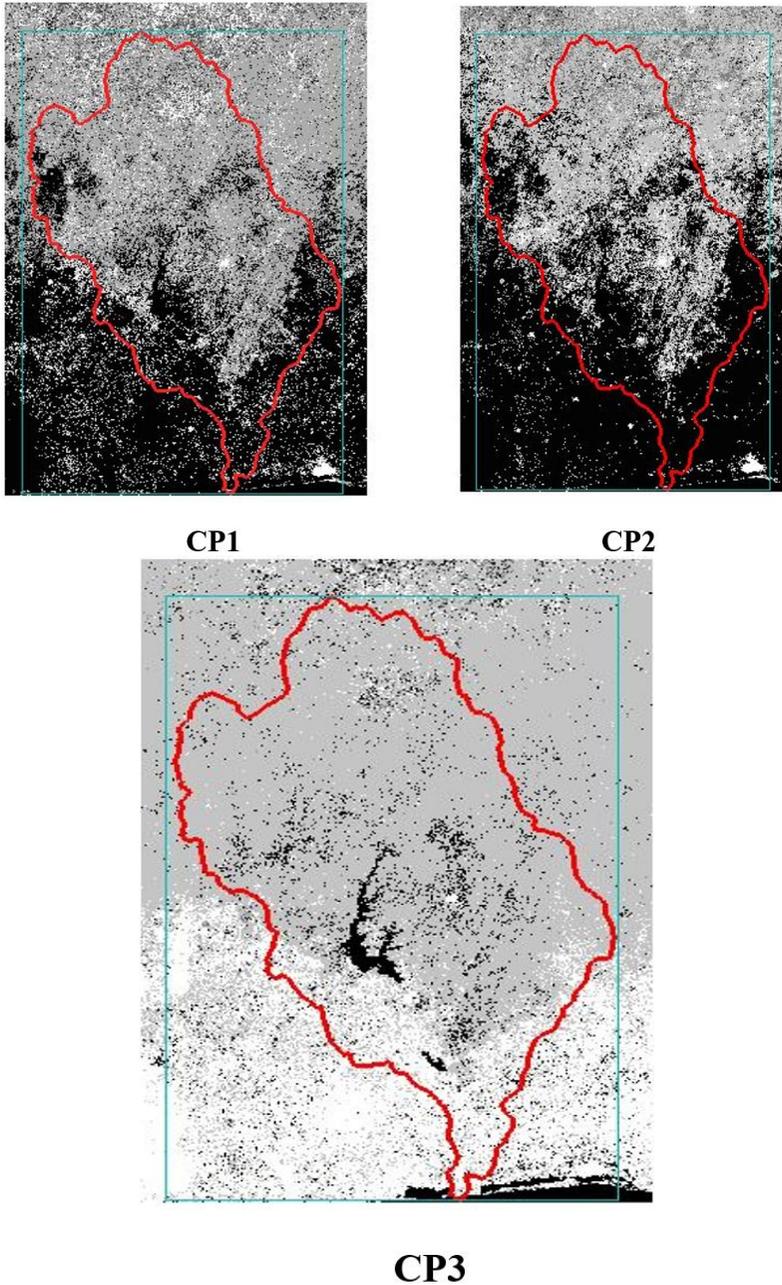
L'ACP montre que les trois premières composantes principales de l'ACP (CP1 ; CP2 ; CP3) renferment la quasi-totalité des informations (99,86 %). Le **Tableau 1** indique le pourcentage de chaque néocanal. Ainsi, la première composante principale (CP1) concentre la majorité des informations contenues dans l'image, soit 92,06 %. La seconde composante principale (CP2) et troisième composante (CP3) renferment respectivement 7,35 % et 0,5 % d'informations.

**Tableau 1 :** Pourcentage d'informations des trois premières composantes de l'ACP

Composante principale (CP)	Variance	Pourcentage d'informations	Pourcentage d'informations cumulées
CP1	4,05	92,06	92,06
CP2	1,92	7,3	99,36
CP3	0,21	0,5	99,86

Au vu des différents pourcentages d'informations exprimées par les néocanaux, la première composante principale rehausse de façon efficiente les informations de la zone d'étude. En effet, elle met en évidence les linéaments associés au réseau hydrographique, les zones de forêt humide dans des nuances de ton sombre, les zones d'urbanisation et sols nus dans des nuances de tons plus claires. La seconde composante principale montre les zones humides et des étangs dans des nuances de ton plus claires qui sont bien visibles. Mais, les

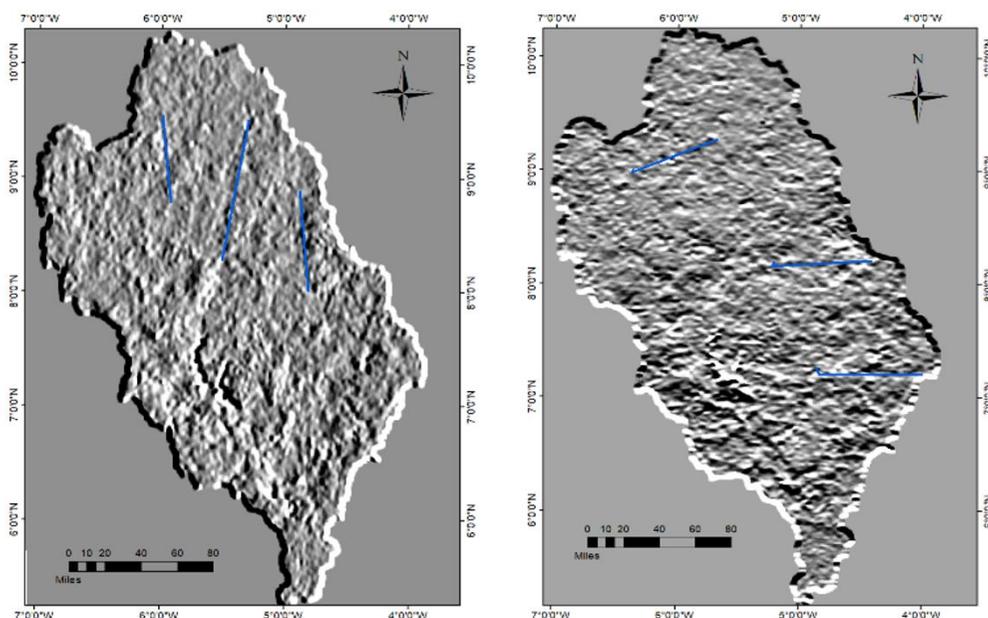
bâties et le réseau hydrographique sont très peu visibles. En ce qui concerne la troisième composante principale, bien qu'elle n'exprime pas un pourcentage important d'informations, elle est rehaussée dans le même registre que la première composante principale (*Figure 2*).



**Figure 2 :** *Produits des composantes principales de l'ACP*

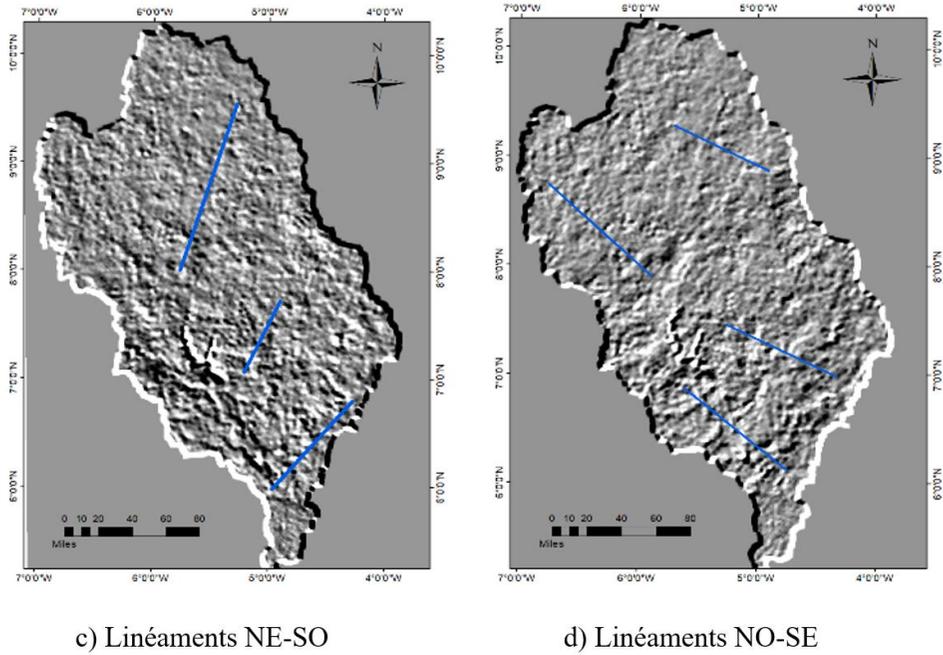
### III-2. Images filtrées

La valorisation des linéaments structuraux est une étape très cruciale pour l'établissement d'une carte de fracturation. En effet, les linéaments représentent la discontinuité lithologique observable sur les images. Ces discontinuités sont rehaussées par l'application des filtres directionnels, puis extraites manuellement ou automatiquement, avant d'être validées. Le filtrage est une opération qui vise à trouver la meilleure façon de mieux identifier les linéaments dans les images correspondantes à des discontinuités lithologiques ou structurales. Dans cette étude, les filtres directionnels de Sobel ont été appliqués à la première composante principale (CP1) ; il s'agit des filtres 7×7 affectés du poids 6 dans les directions N-S ; E-O, NE-SO et NO-SE. Sur les images filtrées, les linéaments sont matérialisés par les discontinuités et les changements brusques de tonalité (*Figure 3*).



a) Linéaments filtre N-S

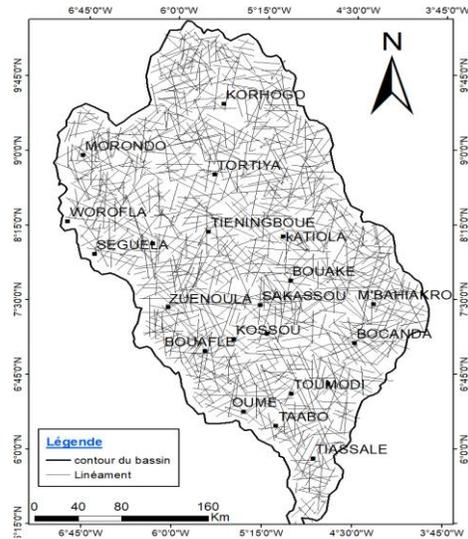
b) Linéaments filtre E-O



**Figure 3 :** Images filtrées du bassin versant du Bandama

### III-3. Carte linéamentaire

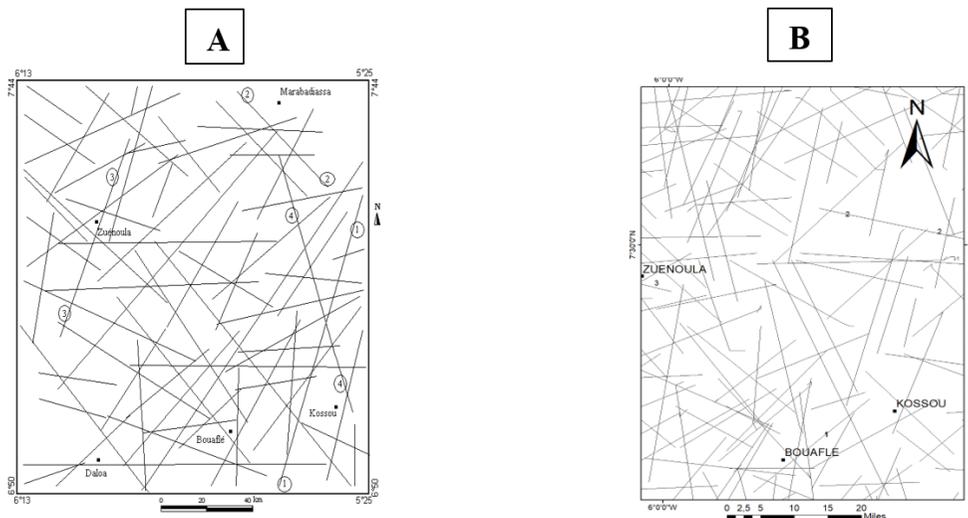
La carte détaillée des linéaments extraits des images Modis du bassin versant du Bandama comporte environ 1590 linéaments (**Figure 4**). La densité linéamentaire est variable selon les endroits. La résolution spatiale des images satellitaires Modis étant de 1 km, les linéaments observés sont alors de l'ordre du kilomètre. Par conséquent, les images Modis permettent de faire ressortir grâce à leur résolution les linéaments majeurs. La carte observée est donc celle des linéaments majeurs du bassin versant du Bandama.



**Figure 4 :** Carte des linéaments majeurs du bassin versant du Bandama

### III-4. Validation de la carte de fracturation

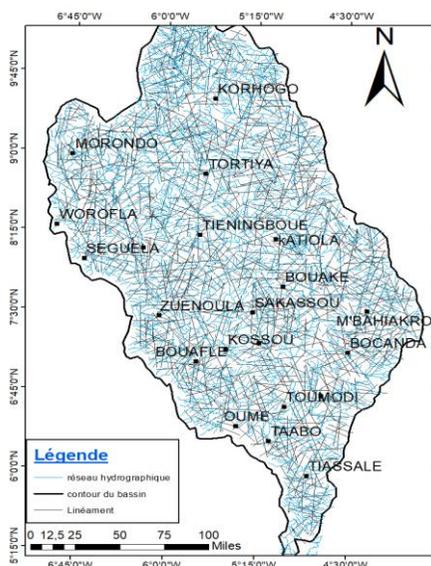
La validation de la carte de fracturation (**Figure 5**) est très importante car elle permet le passage du terme linéaments au terme fracture. Le bassin versant du Haut Bandama étant un sous bassin du bassin du Bandama, l'orientation des fractures du haut Bandama est aussi celle du Bandama dans cette zone caractéristique. Les accidents régionaux correspondent en partie à ceux identifiés dans la zone de confluence du Bandama blanc et de la Marahoué à partir des images Spot [25]. Ces accidents majeurs appartiennent pour la plupart aux grandes directions suivantes : N-S, NE-SW, E-W et NW-SE. Les principaux accidents, identifiés par les images Spot sont, pour la plupart, reconnus sur l'image Modis. C'est le cas, par exemple, des failles de Bouaflé NE-SW (1) et de Marhana NW-SE (2). Cependant, il existe d'autres failles très importantes telles que la faille de Zuénoula NNE-SSW (3).



**Figure 5 :** Carte du réseau de fractures du bassin Bandama (A-image Spot ; B- image Modis)

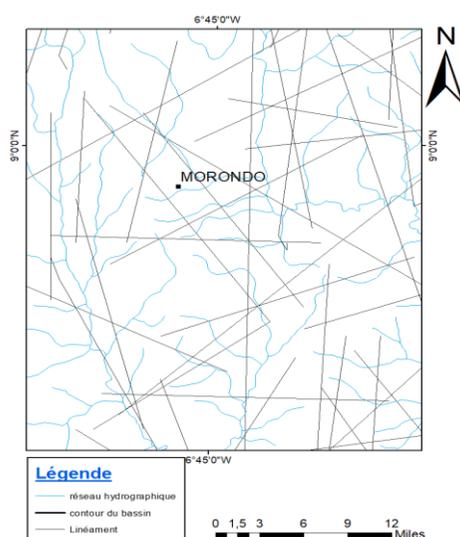
### III-5. Relation entre les réseaux souterrains et de surface

La validation réalisée montre des similitudes entre les fractures et le réseau hydrographique. Il faut noter qu'en milieu de socle la majorité des cours d'eau empruntent généralement la direction des fractures. Ainsi, la **Figure 6** met en évidence la conformité entre les fractures et réseau hydrographique du fleuve Bandama.



**Figure 6 :** Carte de fracturation superposée au réseau hydrographique du Bandama

Le réseau hydrographique et la fracturation présentent des orientations similaires. Les cours d'eau du bassin versant du Bandama ont tendance à s'écouler dans la direction des fractures identifiées. La carte des fractures peut être validée partant sur la base que les cours d'eau empruntent généralement la direction des fractures. La **Figure 7** met en évidence la relation entre réseau hydrographique et accidents majeurs de la région de Morondo au Nord-Ouest du bassin du Bandama. A l'analyse, on constate une interconnexion entre les différentes fractures. Les cours d'eau coulent visiblement dans deux faisceaux d'accidents parallèles NW-SE. Il y a, par ailleurs, la direction NE-SW qui apparaît très bien et aussi des couloirs N-S, au Sud de la carte. Ces cours d'eau coulent dans des fractures affectant le granite et le schiste (carte géologique) ; ce qui donne une assez bonne similitude entre le réseau hydrographique et les accidents majeurs.

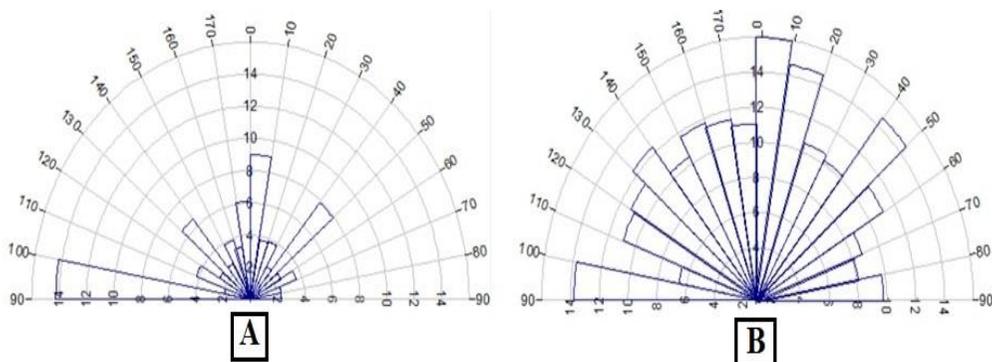


**Figure 7 :** *Relation entre réseau hydrographique et accidents majeurs de la région de Morondo*

### III-6. Analyse de la distribution des fractures

#### III-6-1. Comparaison des rosaces directionnelles

L'analyse statistique du réseau de fractures a pour but d'identifier les directions principales des fractures dans leur ensemble et celles des fractures majeures qualifiées de directions prédominantes (**Figure 8**).

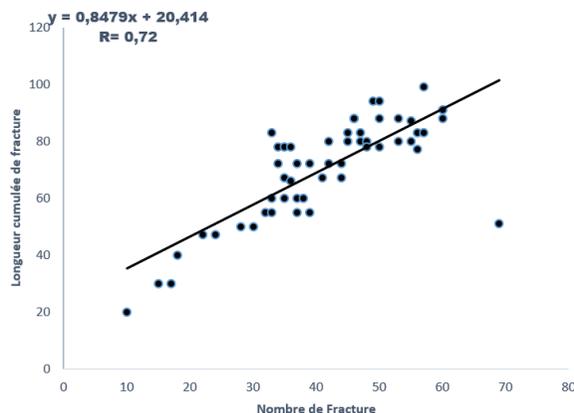


**Figure 8 :** Rosaces directionnelles des fractures du bassin du Bandama  
(A : nombre ; B : longueurs cumulées)

La distribution des orientations en nombre de fractures du champ global de fracturation donne trois directions principales à savoir N0-10, N40-50 et N90-100. En effet, il y a en proportion 8 % de linéaments dans les directions N0-10 et N40-50 et 14 % de linéaments dans la direction N90-100. Les autres directions présentent des proportions inférieures à 4 %. Concernant la rosace des longueurs cumulées des fractures (figure 18 B) les proportions supérieures à 12 % dans les directions N0-10 ; N10-20 ; N40-50 ; N90-100 ; N130-140 apparaissent comme des directions majeures. À eux, s'ajoutent les directions dites secondaires de proportions supérieures à 8 %. Il s'agit des directions : N20-30 ; N30-40 ; N50-60 ; N80-90 ; N140-150. Les autres directions sont inférieures à 8 %, elles correspondent aux orientations dites mineures. Le bassin versant du Bandama est donc caractérisé selon la rosace directionnelle par des fractures majeures de direction N0-10 ; N40-50 et N90-100.

### **III-6-2. Corrélation entre longueurs cumulées et nombre de fractures**

Deux paramètres très importants permettent d'exprimer l'intensité de la fracturation. Il s'agit du nombre de fractures et des longueurs cumulées de fractures par maille. La méthode de régression linéaire a permis d'établir une relation entre les longueurs cumulées et le nombre de fractures (**Figure 9**). Il existe une forte corrélation entre le nombre de fractures et les longueurs cumulées de fractures. Cette corrélation est caractérisée par la droite d'équation  $y = 0,8479x + 20,414$  avec un coefficient de corrélation  $R = 0,72$ . Ce coefficient proche de 1, exprime une forte corrélation entre longueurs cumulées et nombre de fractures.



**Figure 9 :** Relation entre les longueurs cumulées et le nombre de fractures

## IV - DISCUSSION

### IV-1. Cartographie structurale

L'utilisation des images satellitaires Modis est justifiée par le potentiel qu'elles offrent à la réalisation d'études multiples et diverses. En effet, ces images grâce à leur résolution spatiale de 1 Km ont permis de cartographier les fractures majeures du bassin versant du Bandama. Elles ont été également utilisées et mentionnées par plusieurs auteurs [4, 26, 27] respectivement dans la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide, dans la télédétection globale des aérosols et dans l'échantillonnage de la chlorophylle océanique. Cela démontre la capacité des images satellitaires Modis à la discrimination des entités au sol, dans l'eau et dans l'air. Le traitement des images Modis par les techniques d'ACP, de combinaisons d'images et de compositions colorées ont permis de mieux percevoir les éléments structuraux, tout comme les images Spot [25] et Landsat [24]. Les combinaisons d'images (EVI+MIR+NDVI) et l'application des filtres directionnels de Sobel ont permis la mise en évidence d'accidents d'extension régionale et locale. C'est le cas par exemple des failles de Bouaflé NE-SW et de Marhana NW-SE, la faille de Zuénoula NNE-SSW et la faille de Kossou NNW-SSE [25]. Ces différents accidents géologiques ont été mis en évidence également dans les travaux antérieurs dans la Haute Marahoué et dans la région de Séguéla [24]. Toutes ces structures géologiques reconnues un peu partout dans le bassin du Bandama sont validées par les travaux antérieurs cités précédemment, ce qui concourt à la validation de la carte de fracturation. L'analyse de texture et les techniques de mise en évidence des structures linéamentaires (filtres spatiaux de type Sobel 7×7) effectuées aussi bien sur les images brutes que sur les

nouvelles images issues des traitements précédents, ont permis d'extraire manuellement les linéaments. Cette extraction a abouti à la cartographie des nombreux accidents et couloirs régionaux et la réalisation de la carte des fractures majeures du bassin du Bandama comportant après validation plus de 1590 fractures. Ainsi, de nombreuses fractures régionales non matérialisées sur les cartes existantes ont été repérées, cartographiées et le tracé de certaines ont été améliorées. L'extraction manuelle des linéaments est une technique robuste qui a déjà fait l'objet de plusieurs travaux sur le socle ivoirien [28 - 33]. La carte détaillée de fractures pourra servir à la caractérisation géométrique des réservoirs d'eau souterraine du bassin versant du Bandama. L'extraction automatique des linéaments est quant à elle une nouvelle approche. Elle a permis aussi de mettre en évidence à l'aide du module LINE de PCI Geomatica des linéaments dans la Haute Marahoué [24] similaires à ceux obtenus dans le Haut Bandama [25]. L'utilisation de l'imagerie satellitaire Modis pour la réalisation de la carte de fracturation du bassin versant du Bandama est une première en Côte d'Ivoire. Les images Modis ont permis d'avoir une meilleure vue des fractures majeures de la zone grâce à leur résolution spatiale qui est de l'ordre du kilomètre. Avant cette étude, plusieurs travaux ont montré l'apport majeur des images Landsat [28 - 33] et Spot [25] pour la reconnaissance des réservoirs discontinus. L'utilisation des images satellitaires Modis est donc une innovation pour la cartographie des éléments structuraux.

#### **IV-2. Orientation des fractures**

Au niveau structural, la carte de fractures obtenue met en évidence l'ensemble des directions majeures. Les directions principales sont N0-10 ; N40-50 ; N90-100. La rosace directionnelle donne une proportion supérieure à 14% dans la direction N90-100 à 8% dans la direction N0-10 et N40-50. Par ailleurs, les autres directions dites mineures présentent des proportions inférieures à 4%. Les travaux antérieurs dans le bassin de la Marahoué, sous-bassin du Bandama [24, 25, 28] donnent des directions de fractures similaires à celles obtenues dans cette étude (N0-10 ; N 30-40 et N 90-100). La direction des fractures majeures obtenue dans le bassin versant du Bandama blanc amont (N90-100 ; N130-140) correspond vraisemblablement à celle de la présente étude [34]. Selon la carte des accidents géologiques de la Côte d'Ivoire [28], les mégafractures appartiennent pour la plupart aux grandes directions suivantes : N-S, NE-SW, E-W et NW-SE). Les directions préférentielles des fractures identifiées dans le bassin versant du Bandama présentent plus au moins une similitude avec les directions des événements tectoniques ayant affecté le socle ivoirien. La carte des fractures du bassin versant du Bandama est à présent actualisée et comporte de nouvelles fractures qui n'étaient pas connues jusque-là grâce aux images satellitaires Modis.

## V - CONCLUSION

Cette étude a permis d'établir la carte de fracturation du bassin versant du Bandama. Les images satellitaires Modis utilisées ont permis de cartographier environ 1590 fractures de l'ordre du Kilomètre. La distribution des orientations des fractures a révélé que les directions N0-10 ; N40-50 ; N90-100 constituent les directions majeures. La télédétection constitue un puissant outil pour les recherches concernant la prospection des eaux souterraines. Le traitement et l'analyse des images Modis a permis de cartographier les réseaux de fractures dans le bassin du Bandama, actualiser la carte des fractures et mettre en évidence des fractures méconnues jusque-là. La superposition du réseau hydrographique aux fractures identifiées permet d'affirmer que certaines fractures sont hydrauliquement actives et peuvent faire l'objet d'étude plus approfondie pour la reconnaissance des zones d'implantation de forages afin d'approvisionner en eau potable les populations rurales, voire celles des grandes agglomérations. Cette étude est une importante contribution à la caractérisation des réservoirs d'eau souterraine du bassin versant du Bandama, dans la mesure où elle a permis de connaître les zones à forte fracturation telles que Bouaflé, Séguéla, Tiassalé. Cependant, il est nécessaire d'envisager d'autres études par les méthodes géophysiques afin de déterminer avec plus de précision les sites de forages à gros débit.

## REMERCIEMENTS

*Les auteurs remercient le Centre de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) de l'Université Félix Houphouët-Boigny pour la mise à disposition des images satellites Modis.*

## RÉFÉRENCES

- [1] - G. E. AKE, « Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) », Thèse unique, Université de Cocody, Abidjan, (2010) 200 p.
- [2] - K. F. KOUAME, « Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL », Thèse d'Etat ès sciences naturelles, Université de Cocody, Abidjan, (2011) 379 p.
- [3] - T. V. ASSOMA, « Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire : apport des outils statistiques, de la modélisation et de la télédétection optique et radar », Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, (2013) 220 p.
- [4] - K. A. KOUAMÉ, « Application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL à la stimulation des écoulements des eaux en milieu tropicale humide soumis aux pressions anthropiques : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire », Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan, (2013) 185 p.
- [5] - A. K. KOUAME, C. G. ADON, M. A. KOUASSI, A. KOUDOU et F. K. KOUAME, « Impact de la répartition spatiale de la pluviométrie et de l'occupation du sol sur la recharge des aquifères du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire », *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 27 (4) (2019) 1024 - 1036
- [6] - A. M. KOUASSI, K. F. KOUAME, K. E. AHOUSI, S. OULARE, J. BIEMI, « Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire) », *Revue Ivoirienne de Science et Technologie*, N° 20 (2012) 124 - 146
- [7] - A. M. KOUASSI, A. V. S. ASSOKE, K. E. KOUAKOU, K. B. DJE, K. F. KOUAME et J. BIEMI, « Analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire », *Larhyss Journal*, N° 31 (2017) 19 - 40
- [8] - A. M. KOUASSI, J. M. KOUAO et K. E. KOUAKOU, « Caractérisation intra-annuelle de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire. Bulletin de l'association de géographes français », *Géographies*, Vol. 99, N°2 (2022) 289 - 306

- [9] - R. A. NASSA, A. M. KOUASSI, K. A. KOUAME et J. BOSSA, "Impacts of climate change on hydrological standards in West Africa : case of Ivory Coast", *International Journal Water Sciences and Environment Technologies*, Vol. (vii), Issue3 (2022) 6 - 23
- [10] - K. E. KOUADIO, N. SORO et I. SAVANE, « Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle : Application à la région du Denguélé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire », *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 23, N°1 (2010) 1 - 15
- [11] - A. M. KOUASSI, K. K. R. KADIO, K. E. AHOUSI et J. BIEMI, « Stratégie de prospection hydrogéologique par prévision de l'épaisseur de socle à forer ». *Larhyss Journal*, Vol. 20, (2014a) 209 - 224
- [12] - A. M. KOUASSI, K. E. KOUAKOU, K. K. R. KADIO et J. BIEMI, « Conception de modèles statistiques à variables hydrogéologiques pour la prévision de la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau en milieux de socle en Côte d'Ivoire », *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 11, N°1 (2014b) 181 - 197
- [13] - A. M. KOUASSI, K. E. KOUAKOU, K. A. KOUAME, K. K. R. KADIO et J. BIEMI, « Prospection hydrogéologique par optimisation de la profondeur limite d'arrêt de forage en milieux de socle ivoirien : performance et robustesse des modèles », *Afrique Science*, 12 (1) (2016) 282 - 296
- [14] - O. Z. ONETIE, T. LASM, D. BAKA, R. M. N. FOSSOU, O. S. KOUAKOU, M. YOUAN TA, O. DE LASME, M. S. OGA et N. SORO, « Influence des pertes de charges quadratiques sur la transmissivité et le débit spécifique déterminés sur des forages isolés : cas de la région de Korhogo au Nord de la Côte d'Ivoire », *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, N°16 (2010) 261 - 283
- [15] - G. SORO, N. SORO, K. E. AHOUSI, T. LASM, F. K. KOUAMÉ, T. D. SORO et J. BIÉMI, « Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristallines et métamorphiques dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) », *European Journal of Scientific Research*, Vol. 2, N°66 (2010) 1 - 16
- [16] - D. BAKA, T. LASM, M. S. OGA, M. YOUAN TA, O. Z. DELASME, S. O. KOUAKOU et F. E. ETTIEN, "Characterization of Transmissivity in the Fractured Reservoirs in the Oumé area (Centre of Côte d'Ivoire)", *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2 (2) (2011) 10 - 322
- [17] - D. BAKA, « Géométrie, Hydrodynamisme et Modélisation des Réservoirs Fracturés du Socle Protérozoïque de la Région d'Oumé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) », Thèse unique, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, (2012) 249
- [18] - Z. O. DE LASME, T. LASM, M. S. OGA, M. YOUAN TA, D. BAKA, B. F. ETTIEN, S. KOUAKOU, O. Z. ONETIE et Y. T. KOFFI, « Analyse des propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de la

- région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)», *Estudios Geologicos*, Vol. 68, N°2 (2012) 217 - 232
- [19] - T. LASM, R. M. N. FOSSOU, N. SORO, O. Z. ONETIE, D. BAKA, M. YOUAN TA, M. S. OGA et N. SORO, « Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du département de Ferké (Nord de la Côte d'Ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable », *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, N°19 (2012) 114 - 135
- [20] - F. M. GNAMBA, Y. M. S. OGA, T. GNANGNE, T. LASM, J. BIEMI et Y. K. N. KOUAKOU, « Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire) », *European Scientific Journal*, Vol. 10, N°5 (2014) 1 - 20
- [21] - S. OULARE, A. K. KOUAME, M. B. SALEY, G. E. AKE, M. A. KOUASSI, G. C. ADON, F. K. KOUAME et R. THERRIEN, « Estimation de la conductivité hydraulique des zones discrètes de réseaux de fractures à partir des charges hydrauliques : application au bassin versant du N'zo (Ouest de la Côte d'Ivoire), *Revue des Sciences de l'Eau*, 29 (3) (2016) 279 - 301
- [22] - M. KOITA, H. JOURDE, D. RUELLAND, K. KOFFI, S. PISTRE et I. SAVANE, « Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l'hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d'Ivoire) », *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 55, N°5 (2010) 805 - 820
- [23] - Y. A. N'GO, T. LASM, M. KOITA et I. SAVANE, « Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) », *Télédétection*, Vol. 9, N°1 (2010) 33 - 42
- [24] - G. C. ADON, S. OULARE, K. A. KOUAME, M. B. SALEY et K. F. KOUAME, « Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire) », *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 8 (1) (2019) 24 - 32
- [25] - K. A. KOUAME, A. KOUDOU, V. M. SOROKOBY, K. F. KOUAME et A. M. KOUASSI, « Relation entre les écoulements de surface et souterrain dans le bassin versant du Haut Bandama en Côte d'Ivoire », *Larhyss Journal*, 29 (2017) 137 - 152
- [26] - C. ICHOKU, Y. KAUFMAN, L. REMER et R. LEVY, « Télédétection globale des aérosols de MODIS », *Progrès de la recherche spatiale*, 34 (4) (2004) 820 - 827

- [27] - W. WATSON et W. NANCY, « Biais d'échantillonnage dans les données MODIS et SeaWiFS sur la chlorophylle océanique », *Téledétection de l'environnement*, 111 (2007) 25 - 35
- [28] - J. BIÉMI, « Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) », Thèse de Doctorat *ès Sciences Naturelles*, Université Abidjan, (1992) 493 p.
- [29] - I. SAVANÉ, « Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale (S.I.H.R.S.) », Thèse Doctorat d'Etat *ès Sciences Naturelles*, Université de Cocody, Abidjan, (1997) 386 p.
- [30] - M. B. SALEY, « Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire) », Thèse unique, Université de Cocody, Abidjan, (2003) 211 p.
- [31] - J. P. R. JOURDA, E. V. DJAGOUA, K. KOUAME, M. B. SALEY, C. GRONAYES, J. J. ACHY, J. BIEMI et M. RAZACK, « Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat », *Téledétection*, Vol. 6, N°2 (2006a) 123 - 142
- [32] - M. YOUANTA, T. LASM, J. P. R. JOURDA, K. F. KOUAME et M. RAZACK, « Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) », *Téledétection*, Vol.8, N°2 (2008) 119 - 135
- [33] - V. M. SOROKOBY, M. B. SALEY, K. F. KOUAME, M. E. V. DJAGOUA, M. BERNIER, K. AFFIAN et J. BIEMI, « *Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Méagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine* », *Téledétection*, Vol. 9, N°3-4 (2010) 209 - 223
- [34] - M. OUEDRAOGO, « Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire) », Thèse de doctorat de l'Université PARIS-SALAY, préparé à l'Université Paris-Sud, (2016) 170 p.