

# Gestion intégrée des ressources en eau du Bassin versant de Soavina par télédétection et SIG, Région Amoron'i Mania Fianarantsoa

Rakotoarisoa D.<sup>1,2,\*</sup>, Rasolomanana J.<sup>2</sup>, Ralaimaro J.<sup>2</sup>, Andrimanaosoa N.<sup>2,3</sup>, Rakoto H.<sup>3</sup>, Mandimbiharison A.<sup>4</sup>

1 Institut Supérieur de Technologie, Ambositra, Région Amoron'i mania, B.P. 306

2 ED Ingénierie et Géosciences, ESPA, Université d'Antananarivo, B.P. 1500

3 Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, B.P. 3843

4 Mention Génie Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo, B.P. 1500

\*Auteur correspondant : Rakotoarisoa D., Tel.+261340184363, E-mail: rakotoarisoa\_daniel@yahoo.fr

**Résumé-** En matière de gestion intégrée des ressources en eau, la prise en compte de toutes les composantes du cycle hydrologique (*précipitation, infiltration, ruissellement, évapotranspiration, ...*) et leur interaction avec les milieux naturel et humain dans un Bassin versant sont parmi les clés majeures. Il s'agit d'essayer de modéliser l'écoulement des eaux dans le bassin en délimitant les zones d'infiltration potentielles. La détermination des paramètres favorisant l'infiltration et l'influence du sens de l'écoulement s'appuie sur l'apport de deux outils, ENVI pour le traitement des images satellitaires et ArcGIS pour la modélisation. L'exploitation des images satellitaires a permis de dégager les traits structuraux majeurs tout comme les données radar SRTM ont permis de déterminer l'accumulation et les écoulements des eaux dans le bassin. Finalement, le traitement des différentes données couvrant la zone d'étude a conduit à une meilleure connaissance du Bassin versant de Soavina, connaissance très importante en matière de prise de décision et d'aide à la gestion coordonnée et intégrée des eaux de surface et souterraine ainsi que des ressources connexes exploitées par la population.

**Mots clés-** Amoron'i Mania, Soavina, Bassin versant, Cycle de l'eau, Infiltration, Gestion intégrée des ressources en eaux, Télédétection, SIG ArcGIS.

**Abstract-** In terms of an integrated water resource management, the account of all the elements of hydrologic cycle and its correlation within the natural system as well as the human pressure in a watershed is one of the major keys for analyses (*runfall, runoff, infiltration, evapotranspiration, ...*). The main objective is to model the flow of water within the catchment area in delineating the potential infiltration effects. The determination of the parameters that promote infiltration and bring influence into the flow direction is done with the help of two tools ENVI for the treatment of the satellite images and ArcGIS for water modelling. Satellite images help to produce schematic ideas of flow direction and accumulation. The topographic map processing and other local database has led multidisciplinary and scientific knowledge about watershed in question. Also all acquired information are very important with respect to decision making and will help the management system for coordination, integrated surface water and groundwater as well as related resources exploited by the population.

**Key words-** Amoron'i Mania, Soavina, Watershed, Water cycle, Infiltration, Water resources integrated management, Remote sensing, GIS ArcGIS

## Introduction

La gestion intégrée de l'eau par Bassin versant est un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau et des ressources connexes à l'intérieur des limites de ce bassin (*Georges G. et al. 2004*). Elle aura pour conséquences d'orienter graduellement les ressources humaines et financières vers la recherche de résultats palpables quant aux usages judicieux des ressources en eau selon les besoins de la population concernée. A Madagascar, l'eau ne manque pas, elle est tout simplement mal gérée du fait d'utilisations anarchiques. Le problème réside principalement dans l'absence d'une structure responsable et d'une juridiction adéquate. Ce cas est si souvent remarqué dans la Région Amoron'i Mania, surtout

dans l'unité hydrologique de Soavina. La mise en œuvre de la gestion intégrée de l'eau par Bassin versant dans cette localité sera bénéfique à l'ensemble de ses usagers.

Par ses diverses fonctions (hydrologique, écologique, socio-économique, ...), le Bassin versant constitue l'unité naturelle par excellence de la gestion intégrée des ressources en eau. Elle peut concerner plusieurs domaines de préoccupation, tels le contrôle de la qualité, la gestion des risques associés à son aspect quantitatif (*Georges G. et al., 2004*). Elle peut, par ailleurs, se comprendre en termes de protection de la quantité (débit d'étiage, rabattement maximum, etc.) et de conservation des eaux et des sols (*Nguetora M., 1995*). La délimitation et la caractérisation de cette unité de gestion constitue un élément clef pour la gestion hydrologique (*Fossey M., 2008*) car la connaissance des divers paramètres qui la caractérise facilite et aide à la prise de décision. En plus, la connaissance de la zone d'infiltration potentielle permet aux décideurs de délimiter les zones d'intervention prioritaires en matière de protection, d'amélioration et de conservation qualitative des ressources en eau. Pour mieux appréhender les différents problèmes liés à la quantité et à la qualité de l'eau, il est nécessaire de tenir compte tout ce qui se passe dans le Bassin versant. Il convient également d'inclure autant les activités socio-économiques que les études multidisciplinaires intégrant la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie.

Grâce aux outils mis en œuvre, le SIG ArcGIS, les images LANDSAT 7 ETM+ et radar SRTM 30, des études multidisciplinaires (*extraction des réseaux de fracturation, détermination de zones d'accumulation de l'écoulement, détermination de paramètres caractéristiques des réseaux hydrographiques, délimitation des zones d'infiltration potentielles*) ont pu être menées dans le Bassin versant de Soavina.

### **1- Localisation de la zone d'étude**

Du point de vue administratif, elle se trouve dans la Région Amoron'i Mania, District d'Ambatofinandrahana, délimitée par les Communes Rurales: Ambondromisotra au Nord, Andakatany et Ihadilanana à l'Est, Ambatomarina au Sud et Ambatofinandrahana à l'Ouest (Figure 1).

Le climat est de type humide et subhumide avec une pluviométrie annuelle variant de 1.000mm à 1.400mm. Du point de vue géologique, la formation métamorphique prédomine si sur le plan pédologique, la région est essentiellement constituée de latérite ferrallitique rouge. L'activité principale de la population reste l'agriculture notamment la culture du riz et du maïs. En général, l'alimentation en eau potable de la population se fait par captage de sources.

Compte tenu de la nouvelle délimitation des Agences des Bassins par réseau hydrographique à Madagascar (*Rasolofoniaina J.D., 2012*), le Bassin versant de Soavina se situe dans l'Agence du Bassin du Centre-Ouest. Il couvre une superficie de 305,48 km<sup>2</sup> en zone des Hautes Terres Centrales avec des altitudes variant de 1.057m et de 1.800m. Le réseau hydrographique principal est la rivière Itsindra. Il fait partie du Bassin versant de Tsiribihina.

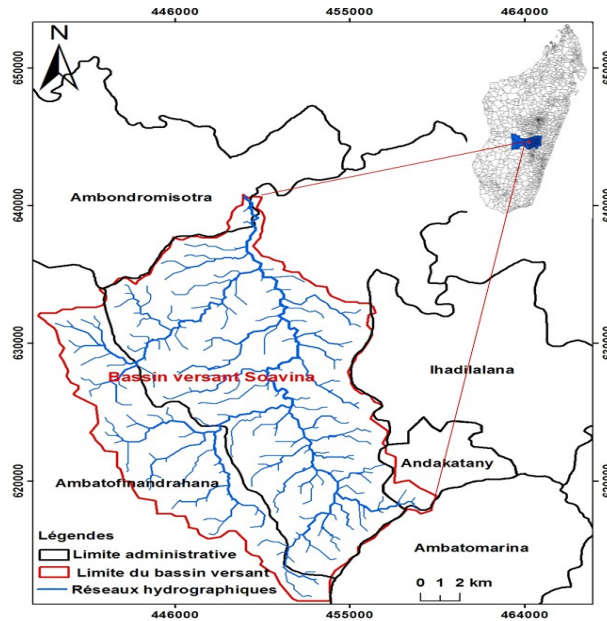


Figure 1 -Localisation de la zone d'étude

### 3- Matériels et méthodes

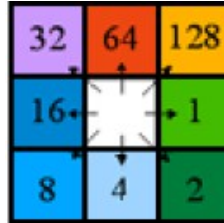
Pour avoir de bons résultats, les travaux ont commencé par la collecte de données de base auprès de divers organismes, sur internet, .... Des descentes sur terrain ont aussi été effectuées. ArcGIS a permis de produire différentes cartes thématiques suivant la disponibilité des données. Des images satellitaires (*Landsat 7 ETM+*) et un Modèle Numérique de Terrain extrait de SRTM 30 ont été utilisés pour l'extraction de linéaments en utilisant l'ENVI. Deux cartes topographiques 1/100.000<sup>ème</sup> Manandona et Ambatofinandrahana, respectivement les Feuilles N50 et N51 ont aussi été utilisées.

Afin d'atteindre l'objectif, tous les paramètres disponibles pouvant influencer l'écoulement des eaux et favoriser la recharge de la nappe souterraine (*densité de fracturation, densité de drainage ou densité du réseau hydrographique, pente du terrain, ...*) ont été exploités. La démarche méthodologique est la suivante :

#### - détermination de la direction et de l'accumulation de l'écoulement

Sur les MNTs, on peut observer plusieurs zones de dépressions. Elles sont formées de cellules isolées autour desquelles se trouvent des cellules qui ont des altitudes plus élevées et des zones relativement plates. Il s'agit de disposer d'un MNT hydrologiquement fiable, extrait de la zone d'étude puis de procéder aux divers traitements. On commence par la correction des valeurs aberrantes qui peuvent influencer le sens de l'écoulement, puis de la détermination de la direction de l'écoulement (*flow direction*) et de l'accumulation de l'écoulement (*flow accumulation*).

Le sens de l'écoulement de l'eau part de la cellule centrale vers les cellules voisines. La sortie de la commande lors de la détermination de la direction de l'écoulement est un fichier raster entier, codifié dont les valeurs varient de 1, 2, 4, ..., 128 (Figure 2).

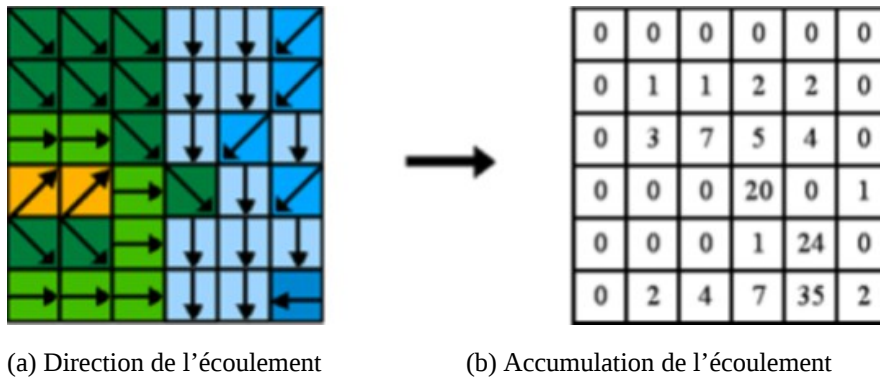


Source: Atilio F. (2015)

Figure 2- Code de la direction de l'écoulement

Pour l'accumulation de l'écoulement, quand aucune cellule ne s'écoule vers une cellule considérée, on prendra la valeur 0. Par contre, si plusieurs cellules s'écoulent vers une cellule donnée, la valeur sera égale à la somme des valeurs d'écoulement de ces cellules (Figure 3a et 3b). Ainsi, la valeur la plus grande correspond à l'exutoire principal du cours d'eau qui se trouve sur la cellule ayant la valeur 35 (Figure 3b), cellule qui reçoit le maximum d'écoulement.

Les cellules ayant les valeurs d'accumulation d'écoulement zéro (0) correspondent à une zone topographique élevée utilisée au tracé de la ligne de crête ou de la ligne de partage des eaux de surface.



(a) Direction de l'écoulement

(b) Accumulation de l'écoulement

Source: Atilio F. (2015)

Figure 3- Matrice de direction et d'accumulation de l'écoulement

### - conception des différentes cartes thématiques

Cette étape consiste à délimiter les zones d'infiltration potentielle (*zones de recharge ou de réalimentation favorables de la nappe souterraine*). La démarche méthodologique adoptée dans cette conception des cartes commence par l'identification des critères de décision, les cartographier en mettant en évidence les différentes classes respectives, et procéder à la pondération suivant la démarche multicritère en superposant les différentes cartes obtenues. A la fin de cette étape, une carte de synthèse illustrant les zones potentielles d'infiltration est établie.

#### ➤ Identification de critères de décision

Les densités de drainage et de fracturation devraient être prises en compte comme critères de décision (Rambert B., 1973; Bentekhici N., 2006 ; Kanohin F., O. et al, 2012). Après leurs superpositions pondérées, on vérifie le résultat obtenu par les valeurs numériques de la fréquence de cours d'eau, le coefficient de torrentialité et l'indice de compacité de Gravelius.

#### ➤ Cartographie de la pente

La pente est un élément essentiel. Elle détermine le temps de séjour des eaux dans la formation lithologique ou aquifère du territoire et la vitesse de l'écoulement sous l'influence de la force de gravité. Plus la pente est faible, plus le temps de séjour de l'écoulement est

long. La pente conditionne l'importance de l'infiltration des eaux. La détermination de sa valeur à partir du MNT se fait sous ArcGIS.

#### ➤ **Détermination de sens d'écoulement des eaux et délimitation du Bassin versant**

L'obtention de la valeur des paramètres morphométriques (*densité de drainage, densité hydrographique, indice de compacité de Gravelius, ...*) à partir de l'exploitation des réseaux hydrographiques, constitue un élément capital à la délimitation de la zone d'infiltration potentielle. Elle permet de connaître la relation entre le caractère physique de la formation géologique et l'infiltration. L'extraction des réseaux hydrographiques se fait à partir de la direction et de l'accumulation de l'écoulement. Grâce à ArcGIS, cette extraction se fait de manière pratiquement automatique et utilise une méthode classique mettant en œuvre le traitement de l'algorithme D8. Cet algorithme considère la direction de l'écoulement suivant le flux unidirectionnel à huit connexités. Le processus de traitement se résume comme suit:

- illustration de tous les cours d'eau suivi de son extraction;
- délimitation de Bassin versant.

La zone d'étude a été subdivisée en cinq sous bassins versants pour faciliter l'interprétation de chaque paramètre caractéristique du réseau hydrographique et pour que le résultat obtenu soit plus précis.

#### ➤ **Cartographie des linéaments**

Les linéaments sont des lignes significatives du paysage, ayant un tracé rectiligne ou curviligne, causés par des joints ou des failles (Yao K. Th. et al., 2014). Ils contribuent à l'écoulement des eaux. Différentes techniques de rehaussement des images LANDSAT (*composition colorée, ACP, filtre directionnel, ...*), des images satellitaires permettant de détecter le plus grand nombre de fractures ont été utilisées. Le processus de traitement de ces images comprend (Randrianasolo B, 2009; Koita M., 2010; Kanohin F. et al, 2012; Koffi S. et al, 2013) l'analyse ACP, la composition colorée et les filtres directionnels Sobel. Ce dernier de type de dimension 7x7 a été utilisé pour la direction N-S, E-W, NW-SE, NE-SW dont les matrices correspondantes sont présentées dans le Tableau suivant :

Tableau 1- Filtres directionnels de Sobel (matrice 7x7)

N-S							E-W						
1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
NE-SW							NW-SE						
0	1	1	1	1	1	2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
-1	0	2	2	2	3	1	-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-1	-2	0	3	4	2	1	-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1	-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	-1	0	2	2	2	3	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	1	1	2

#### - standardisation des données

Toutes les images traitées avec ENVI ont été exportées dans le logiciel ArcGIS10.3 pour la digitalisation de toutes structures linéaires et leur extraction. Pour que la carte finale ne comporte que des linéaments géologiques, tous les tracés rectilignes relatifs aux activités humaines (*route, piste*) sont alors vectorisés à partir de la carte topographique géoréférencée et superposée aux différentes images traitées avant l'extraction pour les supprimer.

Pour faciliter la combinaison, la pente de forme raster a été convertie en Grid. La densité de drainage et celle de la fracturation ont été transformées en multipoint pour l'interpolation. A la suite de cette opération, les surfaces obtenues sont distribuées en 10 classes pour faciliter l'attribution de note.

#### - délimitation des zones d'infiltration potentielle

La superposition des cartes de différents critères de décision obtenues précédemment (*cartes de pente du terrain, de densité de drainage et de fracturation, ...*) se fait avec ArcGIS 10.3 où les cartes de chaque cellule raster de la zone comportent une note pour chaque critère en entrée. En effet, l'addition de ces rasters entraîne une association mathématique des notes des pixels qui s'empilent. Une nouvelle valeur apparaît donc à chaque cellule de raster en sortie.

## 4. Résultats

### 4.1- Modélisation de l'écoulement des eaux

Après la correction des valeurs aberrantes dans la carte MNT de la zone d'étude, on a pu modéliser la direction et l'accumulation de l'écoulement.

#### 4.1.1- Direction et accumulation de l'écoulement

Les cellules correspondant à la valeur 64 prédominent dans le bassin étudié (*Figure 4*). Plusieurs cellules s'y écoulent. La direction de l'écoulement suit en effet ce sens. Ainsi, ces cellules prennent l'ensemble des eaux générées par les autres dans le Bassin versant. La valeur des cellules correspondant à 64 est égale à la somme des valeurs de toutes les cellules qui s'écoulent vers elle.

L'accumulation de l'écoulement dans ces cellules engendre une saturation en eau des formations géologiques sous-jacentes, d'où l'apparition du réseau hydrographique (Figure 5).

Figure 4 - Carte de la direction de l'écoulement Figure 5 - Carte de l'accumulation de l'écoulement

#### 4.1.2- Propagation de l'écoulement des eaux à la surface du sol

Le Bassin versant reçoit l'eau de pluie, une partie de l'eau non restituée à l'atmosphère se propage sous forme d'écoulement de surface dans diverses directions. Si l'écoulement se concentre dans une même direction, les sols sur ces zones sont très sensibles à l'érosion. Afin de visualiser le relief naturel, l'ombrage dans la zone d'étude sur laquelle la modélisation de la propagation des écoulements de l'eau à la surface du sol doit réaliser, est calculé (Figure 6). Sur la zone à forte déclivité (sous Bassin versant d'Amborompotsy), les rivières sont plus ou moins rectilignes, une augmentation progressive de vitesse de l'écoulement de l'amont vers l'aval peut favoriser l'érosion du sol dans ces secteurs. Le risque de débordement de cours d'eau et une augmentation d'érosion peuvent se produire. Ainsi, la formation pédologique s'amincit graduellement dans cette zone. Ces phénomènes réduisent l'infiltration des eaux. Ils favorisent le transport solide et l'ensablement du bas-fond en aval du bassin qui sont parmi les facteurs de contamination des ressources en eau superficielle, voire souterraine. La prise en compte de l'organisation des réseaux hydrographiques est alors indispensable pour une bonne compréhension de la propagation de l'écoulement.

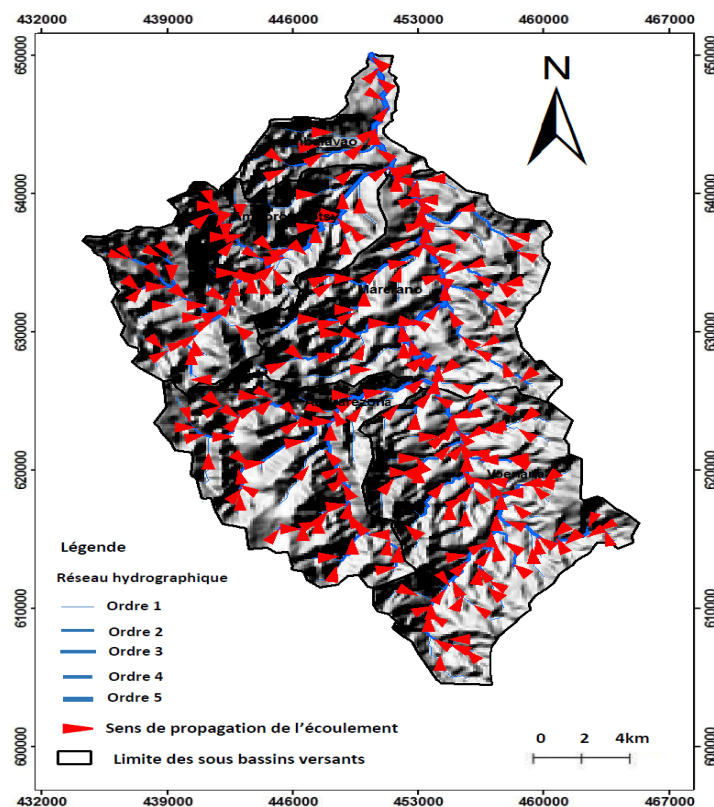


Figure 6- Modélisation de la propagation de l'écoulement des eaux à la surface du sol

Dans la zone montagneuse (Marofarafara, Marosahona), une fréquence des réseaux hydrographiques d'ordre inférieur par rapport au secteur plan (Voenana, Ambalavao) est observée. Cette observation signifie une faible alimentation de la nappe souterraine (formation lithologique peu perméable) dans cette zone.

#### 4.2- Délimitation de la zone d'infiltration potentielle

La zone d'infiltration potentielle est délimitée par la superposition pondérée des trois cartes: celles de la densité de drainage, de densité de fracturation et de la pente du terrain

#### 4.2.1- Densité de drainage et densité hydrographique

La densité de drainage et la densité hydrographique sont définies respectivement par :

$$D_d \quad (\text{Equation 1})$$

avec  $D_d$ : densité de drainage ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) ; L: longueur cumulée de cours d'eau (km) ; A: surface total du bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

$$(\text{Equation 2})$$

avec F: densité hydrographique ; N: nombre de cours d'eau

Les valeurs de la densité de drainage obtenues sont comprises entre 0,97 et 1,11  $\text{km}/\text{km}^2$  (Tableau 2). Des études ont montré qu'une zone à densité de drainage élevée est défavorable à l'alimentation de la nappe souterraine (Kanohin F. et al, 2012), qu'une faible densité de drainage et densité hydrographique présente une région à substratum perméable (Bentekhici N., 2006), et que le terrain le plus perméable correspond à la faible valeur de densité de drainage (Rambert B., 1973).

Plus la perméabilité est élevée, plus l'infiltration est forte. Dans la zone d'étude, on observe que les cinq sous-bassins versants ont des valeurs de densité de drainage plus ou moins faibles ( $D_d < 1,5 \text{ km}/\text{km}^2$ ). Donc, le Bassin versant de Soavina présente dans l'ensemble une formation lithologique perméable. D'après les valeurs de la densité de drainage de chaque sous-bassin versant (Tableau 2), une forte infiltration se situe dans le sous-bassin versant d'Andrarezona ( $D_d = 0,97 \text{ km}/\text{km}^2$ ) tandis qu'une faible infiltration se localise dans le sous-bassin versant Voenana.

Tableau 2- Valeur de la densité de drainage et de la densité hydrographique

Sous-bassin versant	Densité de drainage ( $\text{km}/\text{km}^2$ )	Densité de réseaux hydrographique ( $\text{km}/\text{km}^2$ )
Voenana	1,11	1,97
Amborompotsy	1,06	1,41
Andrarezona	0.97	1,17
Marerano	1.07	1,40
Ambalavao	1.09	1,31

Après interpolation, chaque carte dérivée est reclassée sur une échelle de mesure commune en donnant à chaque classe une valeur discrète de 1 à 10. Les plus hautes valeurs sont données aux attributs appropriés à l'infiltration. La valeur la plus élevée indique la zone favorable à l'infiltration (Figure 7).



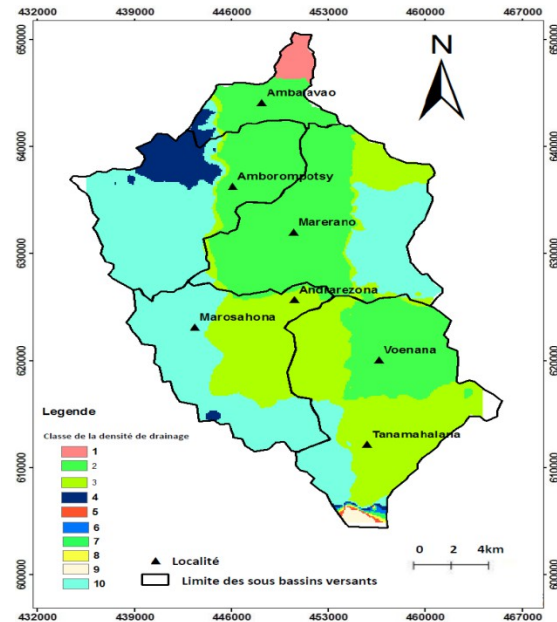


Figure 7- Carte de la densité de drainage interpolée

La densité de drainage (Dd) correspondant au nombre 10 est située sur la zone où la pente est faible (*infiltration favorable*) et le chiffre 1 sur la zone à pente la plus élevée (*défavorable à l'infiltration*).

#### 4.2.2- Pente du Bassin versant

La carte de la pente a été dérivée du MNT de la zone. La pente est l'un des paramètres indispensables à la détermination du sens de l'écoulement des eaux de surface et à la détection du point d'infiltration potentielle. Plus la pente est forte, plus la vitesse de l'écoulement augmente et l'intensité de l'érosion s'accroît. Ce qui signifie qu'aux zones à forte pente, le temps de séjour des eaux de ruissellement diminue. L'alimentation de la nappe souterraine dans cette zone est donc faible.

Une pente dont la valeur dépasse 25% provoque un écoulement superficiel très fort (*Boulghobra et al, 2006*). La classe de pente très forte (*supérieure à 25%*) prédomine dans les sous-bassins versants d'Amborompotsy et d'Andrarezona (*Figure 8a*). Elle s'adoucit entre 0 à 5% dans les sous-bassins de Marerano et d'Ambalavao (*zone à basse altitude*). En termes d'érodabilité du sol, des études (*PNUE/PAM, 2000*) ont montré que dans le secteur où une pente est supérieure à 3%, l'érosion devient active. En effet, dans la zone à forte pente, la couche pédologique est peu épaisse. En référence à ces études, en période de crue, 45% de la superficie du bassin versant de Soavina sont dominées par l'érosion hydrique très active. La vitesse de l'écoulement diminue dans le secteur à faible déclivité, le temps de séjour des eaux dans les formations superficielles dans cette zone est alors augmenté, ce qui favorise une infiltration efficace.

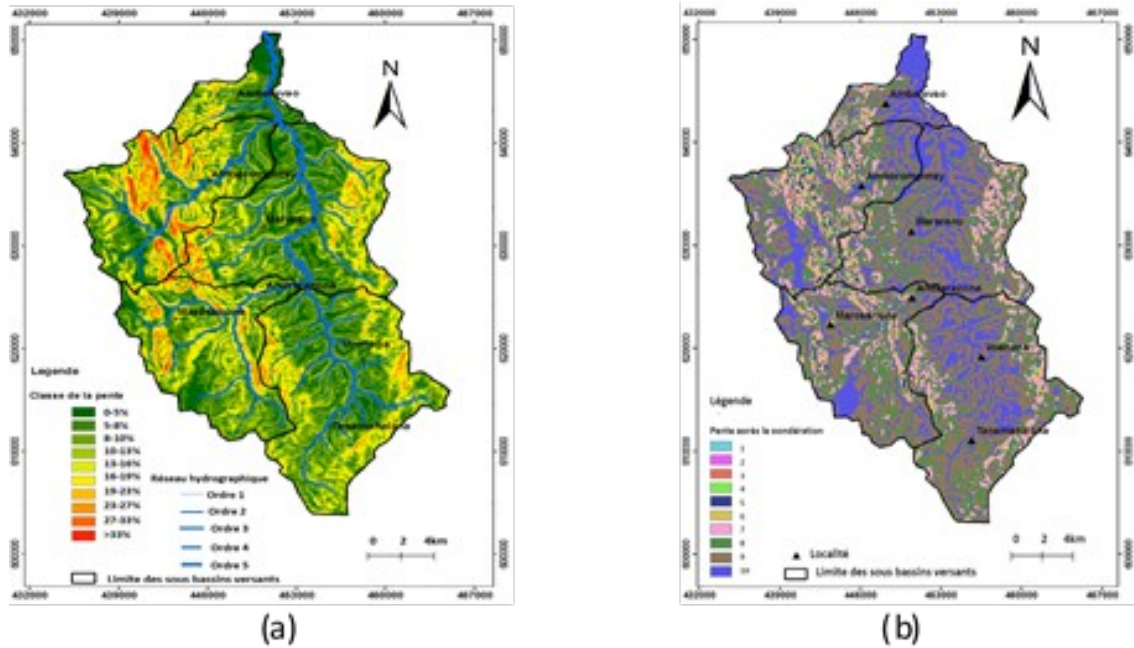


Figure 8- Cartes de pente: (a) classes avec réseaux hydrographiques - (b) différentes classes de pentes pondérées

Ainsi, la répartition spatiale des zones d'infiltration est connue en considérant la pente du terrain (Figure 8b) et la densité de drainage. La valeur élevée indique des zones favorables à la recharge de la nappe. Elles se localisent dans les régions relativement planes (*pente faible*). La valeur devient très faible en zone de relief escarpé (*massifs d'Amborompotsy et de Marosahona*). La recharge de la nappe souterraine augmente progressivement de l'amont vers l'aval du bassin étudié.

#### 4.2.3- Cartographie des linéaments

L'exploitation des images satellitaires Landsat 7 ETM+ à l'aide de ENVI et de ArcGIS a permis d'aboutir à l'extraction des réseaux de fractures dans la zone d'étude (Figure 9a). La rosace directionnelle (Figure 9b) résultats de l'analyse statistique des fractures montre 7 principales familles de linéaments : N00-15, N20-35, N45-55, N60-70, N75-90, N120-140, N150-175 avec dominance de N150-175 qui représente 25% des linéaments.

Le filtre directionnel de type Sobel permet de mettre en évidence les grandes fractures dans les différentes directions. Les fractures ouvertes, drainantes participent à la recharge de la nappe souterraine (Guillot *et al*, 1993; Kanohin F. O. *et al*, 2012). Plus la densité de fracturation est élevée, plus la recharge est importante. Cette recharge est donc très favorable dans les secteurs d'Andrarezona, de Marerano et d'Amborompotsy (Figure 9a).

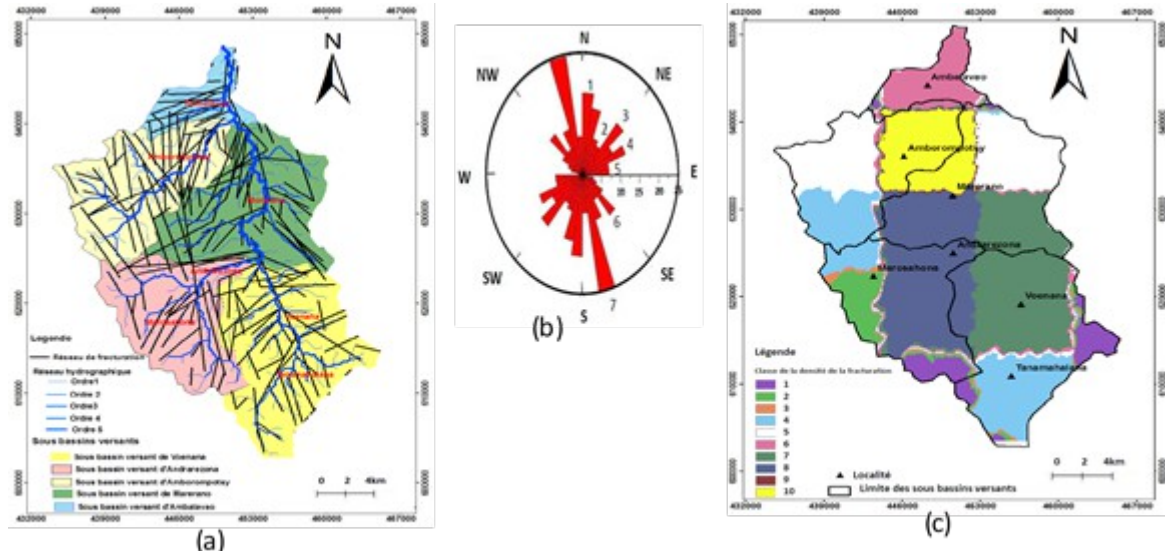


Figure 9- Cartes des linéaments: (a) réseau de fracture de filtres directionnels de direction N00 ; N45, N90; N135 et réseaux hydrographique; (b) rosaces directionnelles de fracture issue des images satellitaires; (c) densité de fracture interpolée

Quant à la disponibilité des ressources en eau souterraine, des chercheurs (*Issiaka S. et al., 2003*) ont montré qu'aux niveaux de l'intersection de deux ou plusieurs fractures, l'implantation de forage est conseillée pour avoir un grand débit en zone fracturée. Dans la zone d'étude, une telle zone se situe dans le secteur d'Amborompotsy. En considérant le réseau de fractures, la disponibilité et la recharge de la nappe souterraine se localisent dans les sous-bassins versants d'Amborompotsy et de Marerano.

La superposition de la carte des linéaments ou de fracturation avec celle du réseau hydrographique (*Figure 9a*) illustre que, dans le secteur de Tanamahalana et Ambalavao, des cours d'eau empruntent certaines directions de fracturation. Donc, les fractures influent aussi sur l'écoulement des eaux à la surface du sol (*Koffi Avy S. et al. 2014*). Elles jouent un rôle de drains et favorisent l'infiltration et le cheminement des eaux.

La carte issue de l'interpolation de réseau de fractures permet d'intégrer le rôle des linéaments dans la délimitation de la zone d'infiltration potentielle dans le bassin versant de Soavina. La valeur 10 correspond à la zone favorable à l'alimentation de la nappe souterraine. Sur la carte de spatialisation de densité de fracturation (*Figure 9c*), l'infiltration des eaux augmente de l'amont vers l'aval du bassin. Une légère diminution de l'infiltration marquée par la baisse de cette valeur est observée dans le sous-bassin versant d'Ambalavao où se trouve l'exutoire principal du bassin d'étude. La valeur la plus élevée est localisée dans les sous-bassins versants d'Amborompotsy et de Marerano et la plus faible se situe en grande partie en amont des sous-bassins versants de Voenana et d'Andrazona.

#### 4.2.4- Pondération et combinaison des critères

Afin de pouvoir créer une carte permettant de délimiter les zones potentiellement favorables à l'infiltration, les différentes cartes relatives à chaque critère sont combinées. Ainsi, tous les rasters d'entrée doivent être pondérés, en affectant un pourcentage d'influence à chacune d'eux. Les pourcentages les plus élevés sont donnés aux critères ayant des influences plus importantes (*favorisant l'infiltration*). Si les critères sont d'importances égales, un même pourcentage les sont attribués (*Tableau 3*).

Tableau 3- Attribution de pourcentage d'influence aux différents critères selon la nature de la carte

Critères	Influence (%)
Pente	50
Densité de drainage	25
Densité de fracturation	25

Dans le Bassin versant étudié, la superposition pondérée de différentes cartes thématiques a permis d'obtenir un raster en sortie indiquant la localisation de la zone potentiellement favorable à l'infiltration (Figure 10).

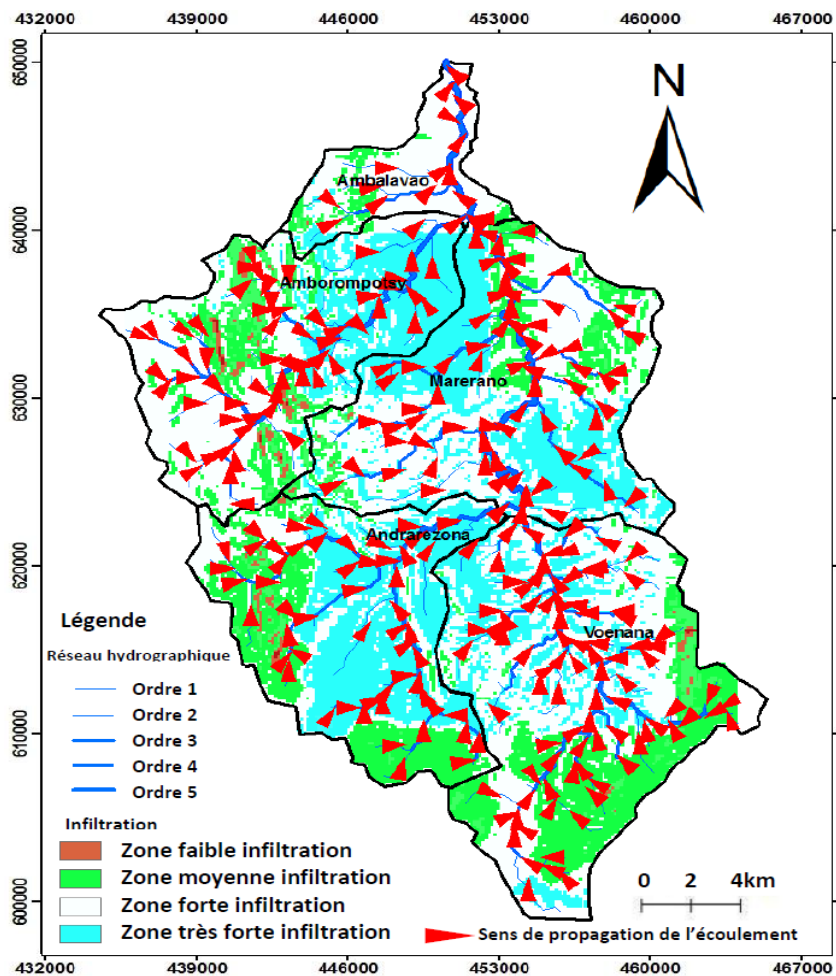


Figure 10-Carte de la délimitation de la zone d'infiltration potentielle

Cette carte montre que 3,67 % ( $0,71\text{km}^2$ ) de la surface du sous-bassin versant d'Ambalavao sont occupés par les zones d'infiltration potentielle. Quant au sous-bassin de Voerana, cette zone occupe 20,45% ( $17,33\text{km}^2$ ) de sa superficie, elle représente 27,81% ( $17,93\text{km}^2$ ) de la superficie du sous-bassin d'Amborompotsy. Pour les sous-bassins versants de Marerano et d'Andrazona, ces valeurs augmentent et occupent respectivement 34,85% ( $26,58\text{km}^2$ ) et 45,61% ( $27,78\text{km}^2$ ) de leur surface. D'après cette statistique, la majorité des zones potentiellement favorables à l'infiltration se localise dans le sous-bassin versant d'Andrazona. Par rapport à la surface totale du bassin versant de Soavina ( $305,48\text{km}^2$ ), la zone d'infiltration potentielle s'étale sur une superficie de 29,57% (soit  $90,32\text{km}^2$ ).

Pour assurer la protection, la conservation, ainsi que l'amélioration de la qualité des ressources en eau (*souterraine ou superficielle*) dans le bassin versant de Soavina, il suffit de dresser une autre carte de localisation de la source de contamination pour délimiter la zone d'intervention prioritaire.

#### 4.2.5- Indice de compacité de Gravelius

Il est défini par :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equation 3})$$

$K_G$  est proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire, et  $K_G \geq 1$  pour un bassin de forme allongée. Un bassin versant circulaire possède un potentiel d'infiltration plus important que celui de forme allongée (Alexandre P., 2008). Dans la zone d'étude, les valeurs de  $K_G$  montrent que les cinq sous-bassins versants présentent dans l'ensemble une forme plus ou moins allongée ( $1,42 < K_G < 1,69$ ) malgré la différence de leur taille (Tableau 4). Les deux sous-bassins Andrarezona et Marerano ont les valeurs de  $K_G$  plus proches de 1. Ils sont alors de potentiel d'infiltration élevé, ce qui confirme le résultat dans la Figure 10.

#### 4.2.6- Fréquence de cours d'eau et coefficient de torrencialité

La fréquence de cours d'eau représente le nombre de cours d'eau d'ordre 1 par unité de surface Le réseau hydrographique dans la zone d'étude présente une hiérarchisation moyenne (*fréquence de cours d'eau faible*). Pour le coefficient de torrencialité, il est défini par le rapport entre la fréquence de cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage (Tableau 4). La faible valeur de coefficient de torrencialité est liée à la forte perméabilité de la formation lithologique (Bouanani A., 2012). Les sous-bassins versants d'Andrarezona et de Marerano présentent des zones d'infiltration potentielle, vis-à-vis des autres sous-bassins versants, ce qui confirme le résultat obtenu sur la Figure 10.

Tableau 4: Valeurs des différentes caractéristiques

Sous-bassin versant	Fréquence des réseaux hydrographiques	Coefficient de torrencialité Km/km <sup>4</sup>	Indice de compacité de Gravelius
Voenana	0,98	1,09	1,46
Amborompotsy	0,70	0,74	1,42
Andrarezona	0,62	0,61	1,33
Marerano	0,67	0,72	1,40
Ambalavao	0,78	0,85	1,69

## 5. Discussion

L'application du SIG et de la télédétection a permis d'aboutir à la production de diverses cartes thématiques qui conduisent à une meilleure connaissance du bassin versant étudié sur le plan multi-dimensionnel. L'analyse de la carte des linéaments permet de mettre en évidence l'orientation dominante des réseaux de fractures, dont la superposition avec une autre carte illustre certains réseaux de fracturation gouvernant le sens de l'écoulement des eaux. L'exploitation de cette carte conduit à l'élaboration de la densité de fracturation (Figure 9c). L'étude de la densité spatiale du réseau hydrographique et l'analyse de la déclivité du terrain permettent de discerner des zones ayant une potentielle certaine d'infiltration ainsi que de secteurs dont le ruissellement est prépondérant.

La cartographie de la zone favorable à l'alimentation des eaux souterraines est fondée sur la cartographie des linéaments, de la pente et la densité de drainage. La superposition pondérée de ces trois cartes met en évidence que la zone d'infiltration potentielle occupe 29,57% (soit 90,32 km<sup>2</sup>) de la surface du bassin d'étude (305,48 km<sup>2</sup>) dont 0,23% dans le sous-bassin

versant d'Ambalavao, 8,71% dans le sous-bassin versant de Marerano, 9,10% dans le sous Bassin versant d'Andrarezona ; 5,87% dans le sous bassin d'Amborompotsy et 5,67 dans le sous-bassin de Voenana. Ces zones correspondent à des valeurs de pente faibles, de densité de drainage moyenne et de densité de fracturation forte. On y trouve aussi de faibles valeurs d'indice de compacité de Gravelius et de coefficient de torrentialité. La répartition spatiale de la zone d'infiltration des eaux signifie que la répartition géographique de la nappe souterraine et sa disponibilité sont inégaux. Ce résultat exige donc de nouveaux schémas de gestion intégrée des ressources en eau pour éviter les litiges liés à l'eau tant sur le pan quantitative que qualitative.

Pour orienter la zone d'intervention prioritaire à la protection et à la conservation qualitative des ressources en eau à l'échelle du bassin versant de Soavina, l'exploitation de la carte de synthèse (*Figure 10*) est un incontournable.

## **Conclusion**

Grace à son aptitude de produire des images multispectrales, la télédétection appuyée par un SIG approprié montre plusieurs avantages en matière de gestion des ressources en eau et d'aide à la décision. Ces outils permettent de produire différentes cartes thématiques à partir d'images satellitaires. La mise en relation de ces différentes cartes aboutit à la production d'une nouvelle carte de synthèse montrant la propagation de l'écoulement des eaux à la surface du sol ainsi que les zones d'infiltration potentielle qui occupent 30% (soit 90,32km<sup>2</sup>) de la surface du bassin versant de Soavina. La grande partie de cette zone se situe dans le sous-bassin versant d'Andrarezona. Sa localisation permet au décideur de choisir les zones d'intervention prioritaire en matière de protection et de conservation sur les plans quantitatif et qualitatif des ressources en eau existantes, de mettre en œuvre des plans d'action efficaces pour l'amélioration de la qualité et de prédire le risque de contamination des eaux souterraines.

Le bassin versant est l'unité naturelle de gestion des ressources en eau. La méconnaissance de cet espace et le non disponibilité de données physiques, caractéristiques au bassin restent un problème majeur pour les décideurs locaux dans la mise en œuvre de ce type de gestion. Pour le réduire, on a montré que le terrain le plus perméable correspond à la faible valeur de densité de drainage, à faible valeur d'indice de compacité de Gravelius et de coefficient de torrentialité, de se localiser aux intersections des fractures les plus longues et les plus nombreuses, d'avoir de faibles valeurs de pente et se situant sur des zones topographiquement basses et, enfin d'être en aval du bassin versant.

Les résultats ont permis d'avoir des perspectives encourageantes pour la suite des travaux. Ainsi, une modélisation hydrogéologique par une autre méthode est nécessaire pour déterminer la direction de l'écoulement et la disponibilité en eaux souterraines du bassin versant de Soavina.

## **Références bibliographiques**

- Atilio F., 2015. Détermination de Bassin versant d'un territoire, préparer un MNT corrigé pour l'hydrologie.
- Belhadj-Aissa A., et Smara Y., 2010. Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien à l'aide de la télédétection satellitaire. 10p.

- Bentekhici N., 2006. 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).
- Bouanani A., 2012. Hydrologie, transport solide et modélisation - Etude de quelques sous-bassins versants de la Tafna (NW-Algérie), p13-40.
- Boulghobra N., 2006. Protection de la wilaya de sikikda contre les inondations. 179p.
- El Hadani D., 1997. Télédétection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. p197-204.
- Faïza H. et *al.*, 2009. Simulation de comportement des écoulements d'eau en utilisant les réseaux hydrographiques d'un bassin versant, cas de l'Oued Benimessous, Algérie. p180-190.
- Fossey M., 2008. Etude hydrologique dans le Pacifique - Première étape d'une modélisation sous SIG. Rapport technique IDR.
- Georges G. et *al.*, 2004. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant - Concept et application. 55p.
- Hafida Bouaouda et *al.*, 2013. Apport de la télédétection et des SIG pour la recherche hydrogéologique dans la région du Sahel central des Doukkala (Maroc occidental). p205- 213.
- Kanohin F. O., et *al.*, 2012. Apport de la télédétection et du SIG dans l'identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), Vol. 1 No. 1, pp. 35-53.
- Koffi A. S. et *al.*, 2013. Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures à partir de l'image Landsat de la région d'Abidjan en Côte d'Ivoire, publication au Science Lib Editions Mersenne : Volume 5, 16p.
- Koffi T. Y. et *al.*, 2014. Rôle hydrogéologique des linéaments structuraux en milieu cristallin et cristallophyllien - Cas du Bassin versant du Sassandra, Sud-Ouest Côte d'Ivoire. p78-92.
- Nguetora M., 1995. Système d'information géographique et gestion de ressources en eau d'un bassin versant africain - Cas du bassin versant du Massili au Burkina Faso. p1-7.
- PNUE/PAM, 2000. Directives pour la gestion de programmes de contrôles d'érosion et de désertification, plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes.
- Rambert B., 1973. Recherche sur la signification hydrogéologique de la densité de drainage : Application à la détermination et à la cartographie de l'écoulement souterraine. p4-20.
- Randrianasolo B., 2009. Nouvelles méthodes de cartographie du socle protérozoïque du Sud de Madagascar. Nature et géométrie de la croûte continentale d'un domaine orogénique en convergence, implications économiques. p70-84.
- Rasolofoniaina J.D., 2012. Schéma Directeur de l'eau et de l'Assainissement de l'Agence de Centre Ouest, p22-101.
- Savane Issiaka et *al.*, 2003. Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat dans le bassin d'Odienné. p279-288.
- [Sébastien R.](#) 2013. Apport de l'imagerie satellitaire pour la recherche d'indices de drainage superficiels. Elevation data for geographic information system analysis, p1594-1600.