

UTILISATION DES SIG ET DE LA TELEDETECTION POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS D'INSTABILITE DE VERSANT DANS L'OUEST MONTAGNEUX DE LA CÔTE D'IVOIRE

Boyossoro Hélène Kouadio^{(1,2)*}, Kan Jean Kouamé⁽¹⁾, Sika Brice⁽¹⁾, Gabriel Etienne Aké⁽¹⁾, Vami Hermann N'guessan Bi⁽²⁾, Assa Yapi⁽²⁾,

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire). Tél. : (+225) 22-483-803
kbhel@yahoo.fr ; kouame_kan2001@yahoo.fr ; ak_gabe@yahoo.fr ; jbiemi@yahoo.fr

²Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B. P. 801 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire) ; tél (225) 22-445-270
kbhel@yahoo.fr ; kouame_kan2001@yahoo.fr ; vami@outlook.com ;

Résumé

Les phénomènes d'instabilité de versant, par leur caractère essentiellement aléatoire, engendrent des risques pour les divers éléments du patrimoine montagnard. Dans la région des montagnes de Man, située à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, la manifestation de ces phénomènes se fait de plus en plus en raison du relief accidenté et du changement climatique. Cette étude vise à cartographier des zones potentielles de mouvements d'instabilité de versant dans la région de Man en vue de prévenir les dégâts naturels et/ou les victimes. L'approche méthodologique utilisée dans ce travail est basée sur la télédétection, les systèmes d'information géographiques (SIG) et l'analyse multicritère (AHP) de Saaty. Six facteurs impliqués dans l'occurrence des glissements de terrain à savoir l'inclinaison de pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altérite, les précipitations et l'indice de végétation normalisé (NDVI) ont été cartographiés. Leur intégration dans un système d'information géographique (SIG) a permis de cartographier la susceptibilité aux mouvements de terrain de la région. En effet, à l'aide de la méthode d'analyse multicritère de Saaty, une hiérarchisation, une pondération puis une classification des différents facteurs ont été faites. Cela a facilité la combinaison linéaire des différents facteurs dans le SIG. La carte de susceptibilité obtenue a fait l'objet de vérifications sur le terrain pour aboutir à une carte de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de terrain de la région de Man. Cette carte révèle des degrés d'instabilité : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé. Les zones d'instabilité élevée et très élevée représentent 14,65% de la zone étudiée. Elles sont localisées dans le Centre-Ouest de la région étudiée. La plupart de ces zones se trouvent sur les versants des monts Toura et Dan, situés entre Biankouma et Man, qui se caractérisent par des pentes abruptes et enregistrent des précipitations de plus de 1500 mm.

Mots-clés : Susceptibilité, instabilité de versants, AHP, télédétection et SIG, région de Man, Côte d'Ivoire

Abstract

Slope instability phenomena, by their essentially random nature, generate risks for various elements of mountain heritage. In Man Mountains region of Man, located in the west of Côte d'Ivoire, the manifestation of these phenomena is made more and more because of the rugged terrain and climate change. This study aims to map potential areas of slope instability movements in the Man area to prevent natural damage and/or casualties. The method used in this work, is based on remote sensing, Geographic Information System (GIS) and Saaty's analytic hierarchy process (AHP) method. Six (6) factors involved in the occurrence of landslides such as slope, drainage density, fracturing density, regolith thickness, precipitation, and normalized vegetation index (NDVI) have been mapped. Their integration into a GIS has made it possible to map the region's susceptibility to slope instability movements. Indeed, using Saaty's analytic hierarchy process (AHP) method, a prioritization, a weighting and a classification of the different factors were made. This facilitated the linear combination of the different factors in the GIS. The resulting susceptibility map was field-verified to yield a susceptibility map to slope instability movements of Man area. This map shows classes of very low, low, moderate, high and very high susceptibility. Areas of high and very high instability represent 14.65%. They are located in the West Central of the study area. Majority of these areas are found on the slopes of the Tours and Dan, mountains located between Biankouma and Man, which are characterized by steep slopes and registrate rainfall of more than 1500 mm.

Keywords : Landslide susceptibility, slope instability, AHP, remote sensing and GIS, Man region, Côte d'Ivoire

1. Introduction

Le domaine montagnard est le théâtre privilégié de la manifestation des phénomènes en raison du relief souvent très accidenté. Les phénomènes d'instabilité de versant (éboulements de terrain, glissements de terrain, écroulements, coulées de boue, etc...) par leur caractère essentiellement aléatoire, engendrent des

risques pour les divers éléments du patrimoine montagnard [Péloquin, 1999]. Ainsi, l'évaluation du degré de susceptibilité aux mouvements d'instabilités de versant en milieu montagneux est devenue une préoccupation majeure universelle.

Par ailleurs, l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire est touché par des mouvements d'instabilité de versant. En

1988, des mouvements de versant ont coupé momentanément la route Man-Touba et ceux qui se sont produits dans la localité de Gbangbéguiné au Sud-Ouest de la ville de Man (en 1996) ont provoqué la destruction de plusieurs plantations. Ces mouvements provoquent ainsi des dommages importants au réseau routier, aux habitats et causent parfois des pertes de forêts et de plantations.

Considérant l'importance des enjeux humains et économiques face aux mouvements d'instabilité de versant dans la région de Man, il apparaît plus que nécessaire de réaliser une étude qui permettra la réduction de leurs dommages dans l'avenir. En effet, si les zones exposées ne sont pas connues et délimitées, les risques représenteront une plus grande menace. L'objectif visé par cette étude est de cartographier les zones potentielles de mouvements d'instabilité de versant du degré carré de Man. A cet effet, la méthode d'analyse multicritère hiérarchique de [Saaty, 1980], associée aux observations de terrain a été utilisée pour l'évaluation des facteurs d'occurrence et la détermination des zones à fortes susceptibilités. Cette méthode, qui est heuristique et non déterministe, ni statistique, a l'avantage d'être relativement simple d'utilisation, d'appréhender le monde réel [Svoray et al., 2005], d'être souple et adaptable. La connaissance de zones de susceptibilité est une importante contribution à la prévention aux mouvements d'instabilité de versant en vue de la protection de la communauté et des biens.

2. Zone d'étude et historique des mouvements d'instabilité de versant

2.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est la région de Man qui constitue le degré carré de Man et fait partie de l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire. Elle est située à l'Ouest de la faille de Sassandra. Cette région est localisée entre les latitudes 7° et 8° Nord et les longitudes 7° et 8° Ouest (Figure 1a).

La région de Man compte 4 départements : Biankouma, Man, Facobly et Kouibly. Sa population atteint 148232 habitants [INS, 2015]. La région est drainée par plusieurs cours d'eau dont le principal est le Sassandra et ses affluents comme le N'zo et le Ko. C'est une région de socle constituée de roches cristallines et cristallophylliennes d'âges léonien (3200 à 3000 Ma) et libérien (2850 à 2650 Ma). La zone d'étude recèle une grande variété de minerais dont l'exploitation participerait à une véritable industrialisation de cette région.

Le relief de la région est très accidenté et est constitué d'une succession de dômes séparés par des vallées profondes dont les monts Touras et les monts Dan

(Figure 1b). La région est soumise à un climat de montagne caractérisé par une forte pluviométrie (2000 mm à Man et environs). L'association de la forte pluviométrie au relief est favorable aux occurrences de "géorisques". En effet, la forte pluviométrie engendre des inondations et une instabilité des aquifères perchés sur les versants des massifs montagneux [Saley, 2003].

2.2 Historique des mouvements d'instabilité de versant dans la région de Man et désordres

L'inventaire des mouvements de terrain dans la région de Man a commencé avec les travaux de [Kouadio, 2001] qui ont été parmi les premières études sur les risques naturels en Côte d'Ivoire. Aucun inventaire des risques naturels n'ayant été fait auparavant, c'est à l'occasion de ces travaux que les informations sur les phénomènes tels que les glissements de terrain, les fluages d'argile, les éboulements ont été recensés auprès des populations dans la région de Man et à travers les indices laissés par ceux-ci. Les événements majeurs sont :

- L'éboulement de blocs rocheux survenu en 1962 au niveau du mont Gblan à Gouélé, qui a causé un décès.
- Le glissement de terrain communément appelé « DLA » de Gbangbéguiné situé sur l'axe principal Biankouma-Man. Dans la nuit du jeudi 5 septembre 1996, un glissement de terrain lié à une rupture (Figure 2a et 2b) de poche d'eau s'est produit au niveau du mont Zô, non loin du village de Gbangbéguiné. Il s'en est suivi une importante inondation des régions environnantes. L'eau a engendré la crue des rivières. De vastes étendues de terrain ont été inondées (Figure 2c) et ont provoqué de lourdes conséquences socio-économiques (destruction de plusieurs plantations de café, de cacao et de plusieurs campements).
- Les phénomènes de fluage d'argile de Seupleu : village situé sur l'axe Man-Facobly, Seupleu, n'a aucun puits contrairement aux autres villages. De l'avis des villageois, quelques jours après l'exécution d'un puits dans le village, on a constaté des remontées de boue ou des éboulements dans le tube de celui-ci. Les habitants s'alimentent en eau grâce à deux forages d'Hydraulique Villageoise et à une source naturelle d'eau. La disparition des puits serait liée aussi bien à l'instabilité de la zone de Seupleu du fait de la remontée de boue dans les puits, ou d'éboulement dans ceux-ci, qu'à la remobilisation des failles majeures du socle. La mobilisation des couches d'argiles profondes dans les altérites serait à l'origine de ce phénomène.

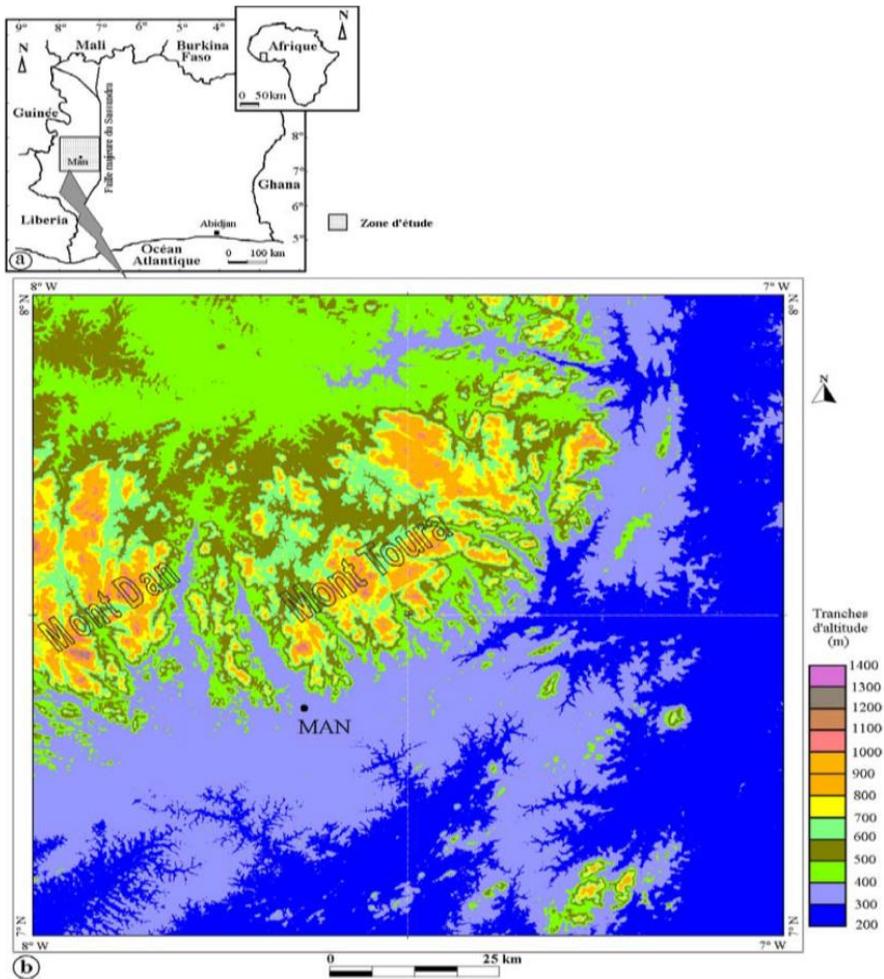


Figure 1 : présentation de la région de Man [Saley, 2005 modifié] : a) carte de la Côte d'Ivoire présentant la région de Man (zone d'intérêt), à l'Ouest de la faille du Sassandra ; b) carte des altitudes (m) de la région de Man montrant les monts Touras et Dan



a : surface de rupture vue de loin



b : Surface de rupture vue de près



c : zone inondée suite au glissement de terrain avec les restes des plantations de café et de cacao détruites

Figure 2 : indices du glissement de Gbangbegouiné de 1996 (photos du 27 décembre 1998 par [Kouadio, 2001])

La preuve de l'instabilité de cette zone est l'existence d'un grand bas-fond à proximité du village. Les versants de ce bas-fond sont soumis à des éboulements perpétuels, entraînant un agrandissement permanent de ce dernier (Figure 3).

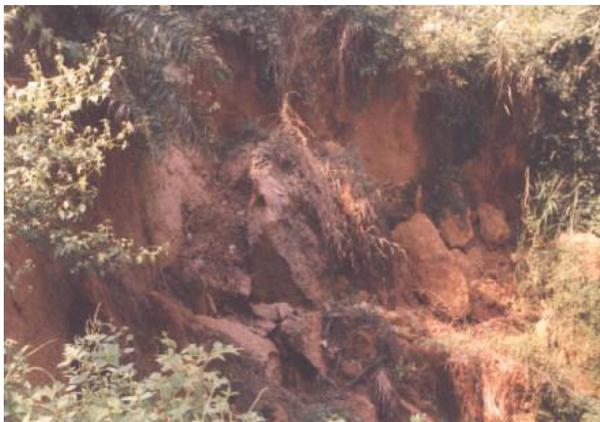


Figure 3 : indices du fluage de Seupleu (photo du 27 décembre 1998 par [Kouadio, 2001])

3. Matériel et méthodes

3.1. Matériel et données utilisés

L'occurrence de mouvements d'instabilité de versant dans une région est favorisée par plusieurs facteurs. Le choix des facteurs est basé sur plusieurs travaux dont ceux de [Aboubakar et al., 2013]. Ceux-ci sont la pente, l'indice de végétation, la densité de fracturation, la densité de drainage, l'intensité de précipitation et l'épaisseur d'altération. En effet, les travaux de [Aboubakar et al., 2013] montrent que ces facteurs sont parmi les plus importants qui conditionnent les mouvements de terrain en milieu montagneux tropical.

En relation avec ces facteurs, les données collectées et utilisées pour cette étude sont :

- les données d'altérites, issues des logs stratigraphiques de 184 forages de la Direction de l'Hydraulique Villageoise réalisés dans la région de Man dans les années 1980-1990 par FORACO et FOREXI, qui ont servi à la réalisation de la carte d'épaisseur d'altérite ;
- les données de pluviométrie (de 1985 à 2014) provenant de données de radars pluviométriques stockées sur le site <http://iridl.ldeo.columbia.edu>, ainsi que les données pluviométriques in situ issues de la SODEXAM de 1985 pour la distribution spatiale de la pluviométrie ;
- la carte topographique de la région de Man au 1/200000, provenant du centre de cartographie et de télédétection (CCT) éditée en août 2013, pour l'affinage de la carte de linéament en vue de l'obtention de la carte de fracturation ;
- les images Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de résolution 30 m pour l'année 2000, fournies par le site américain

"<https://earthexplorer.usgs.gov>" pour obtenir le MNT de la région de Man et fichiers dérivés (pentes, drainage et densité de drainage) ;

- les images Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) de la scène 198-055 qui date du 7 janvier 2015. Ces images ont été traitées pour l'élaboration d'une part de l'indice de végétation, et d'autre part des cartes de fracturation et de densité de fracturation.

Le matériel utilisé est constitué de logiciels (Envi 5.1 pour le traitement des images satellitaires et ArcGIS 10.3.1 pour le SIG), de matériel de terrain (GPS Garmin Etrex Vista, précision 3 m et d'un appareil photo numérique).

3.2. Méthodes

La susceptibilité représente la prédisposition d'une zone à être touchée par certains phénomènes dangereux, en un temps indéterminé, évaluée à l'aide de critères de prédisposition à ces phénomènes ou actions, sans prendre en compte sa période de retour ou la possibilité de se reproduire [Dai et al., 2002]. Les méthodes couramment utilisées pour l'évaluation de la susceptibilité sont les approches déterministes, heuristiques et statistiques.

Les méthodes déterministes se basent sur l'analyse de stabilité des pentes selon leurs paramètres physiques et géotechniques pour la création des cartes de susceptibilité. Ces méthodes nécessitent des données géotechniques détaillées de la zone d'étude, c'est pourquoi celle-ci sont en général appliquées sur des zones relativement petites [Sedan et al., 2013]. Les méthodes statistiques permettent de quantifier les corrélations existantes entre les facteurs de prédispositions et la répartition spatiale des mouvements de terrains [Guillard, 2009]. Pour réaliser ces méthodes, il est primordial de disposer d'informations sur les facteurs déclenchants mais aussi d'un inventaire de mouvements de terrain datés [Sedan et al., 2011]. Les méthodes heuristiques basées sur l'expertise sont des analyses géomorphologiques de susceptibilité aux mouvements de terrain à partir de la visite des terrains et d'interprétation des photos aériennes ou images satellitaires. L'évaluation peut être «directe» ou «indirecte». La méthode indirecte est la plus utilisée des deux, car pouvant être énoncée clairement et automatisée [Visintainier et turrini, 1995]. La méthode choisie pour évaluer la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant dans ce travail est une méthode heuristique à savoir la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) de [Saaty, 1980]. Il existe plusieurs méthodes d'analyse multicritère qui sont entre autres les méthodes ELECTRE I, III et IV, les méthodes PROMETHEE I et II, la somme pondérée [Caillet, 2003]. Le choix de l'AHP de Saaty est motivé d'abord par l'envergure de la zone d'étude et l'accessibilité qui rendent difficile une cartographie détaillée sur le terrain, ce qui empêche

l'utilisation des méthodes déterministes, et aussi par le manque d'un inventaire des mouvements de terrain, excluant toute méthode statistique. En plus de cela, l'analyse multicritère hiérarchique de Saaty est une méthode de mesure de critères d'une situation donnée, fondée sur la dérivation de priorités relatives à partir de comparaisons par paires partageant un attribut commun [Saaty, 1994 ; Kendrick et Saaty, 2007]. Il s'agit d'une méthode d'aide à la décision qui permet d'élaborer une décision fondée sur une structure hiérarchique [Laaribi, 2000]. Avec l'avantage d'être relativement simple d'utilisation, d'appréhender le monde réel [Svoray et al., 2005], d'être souple et adaptable, c'est la seule méthode qui permet de vérifier la cohérence de l'ensemble des jugements de comparaison [Renard et Chapon, 2010] et d'arriver à une décision dite rationnelle, systématique et correctement prise. Cette méthode s'articule autour des étapes suivantes :

- première étape : identification et élaboration des paramètres d'occurrences (réalisation des cartes thématiques). L'expert sélectionne les facteurs de susceptibilité au mouvement d'instabilité.
- seconde étape : détermination des poids (pondération). L'expert attribue à chaque facteur un poids représentant la contribution de ce facteur à une potentielle instabilité.

Chaque carte de facteur comprend plusieurs niveaux traduits par des valeurs d'indices. Ainsi, la zone d'étude est subdivisée en zone d'indices différents selon leur niveau ;

- troisième étape : évaluation du phénomène « susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant ». Les cartes de facteurs sont combinées et les indices sommés en respectant les poids des différents facteurs. Des niveaux d'aléa sont définis selon les valeurs finales d'indices.

Dans cette étude, en vue d'affiner la cartographie thématique, la méthode d'analyse multicritère de Saaty a été combinée à la télédétection et au SIG.

3.2.1. Identification des critères et élaboration des cartes thématiques

Le choix des facteurs (pente, précipitations, densité de drainage, couvert végétal, indice de végétation normalisé et épaisseur d'altérite) et leur classification ont été faits sur la base des travaux de [Aboubakar et al., 2013 ; Aubié et al., 2007 ; Narumon et Songkot, 2010 ; Kundu et al., 2011 ; Rahaman et al., 2014]. En effet, selon [Kouadio, 2001, Saley, 2003], ces facteurs ont une grande importance dans la manifestation des risques naturels dans la région de Man.

- Pente

La pente est l'un des principaux facteurs pris en compte dans l'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrain [El Fahchouch et al., 2015]. En effet, pour

qu'une rupture survienne sur un versant, il faut nécessairement qu'il y ait un appel de vide quelque part [Sossey, 2005]. La pente est donc directement reliée aux mouvements de terrain et est fréquemment utilisée dans l'élaboration des cartes de susceptibilité de ces derniers [Dai et al., 2002 ; Yalcin, 2008]. La carte des pentes a été réalisée à partir de l'image SRTM à l'aide de l'outil «Slope» de «Spatial Analyst» sous environnement ArcGis.

- Précipitations

Les précipitations jouent un rôle important et direct dans le déclenchement des instabilités de terrain [El Fahchouch et al., 2015]. La plupart des glissements de terrain se produit après la forte pluie tombée. L'eau s'infiltre rapidement au cours des fortes précipitations et augmente le degré de saturation et la fréquence des glissements de terrain [Moradi et al., 2012].

La carte d'intensité pluviométrique a été élaborée à partir des hauteurs de pluies mensuelles enregistrées par les radars pluviométriques sur 31 ans (1985-2015) pour 36 points couvrant le degré carré de Man. L'utilisation de ces données radar s'est faite après la mesure de leur homogénéité interne qui a été faite par la méthode "des doubles cumuls pluviométriques" proposée par [Ancil et al. 2005]. Les données *in situ* mensuelles de la station météorologique synoptique de Man (de janvier 1986 à décembre 1995) de la SODEXAM ont été utilisées à ce effet. L'évolution proportionnelle entre les deux jeux de données montre que les pluies radar de la zone d'étude ne présentent pas d'anomalies. De plus le test de corrélation de Bravais-Pearson a été fait. Le coefficient de corrélation simple de Pearson, qui montre s'il existe une corrélation entre au moins deux variables [Hauke and Kossowski, 2011] est déterminé pour les deux jeux de données. Ce coefficient est de 96% (Figure 4). Cela justifie l'utilisation des données IRI dans cette étude.

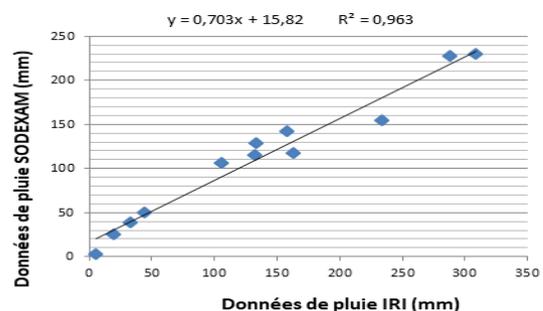


Figure 4 : courbe de corrélation entre pluie mensuelle *in situ* et pluie IRI à la station de Man

L'obtention de la carte de la distribution spatiale des hauteurs de pluie a été possible grâce à l'interpolation de ces données suivant la méthode Inverse Distance Weighted (IDW) du module «Spatial Analyst Tools» de ArcGis, Les résultats obtenus avec cette méthode

donnant une variabilité des pluies plus proches des normes de la région, par rapport à ceux obtenus par l'interpolation par krigeage, la méthode IDW a été retenue.

- Densité de drainage

Les cours d'eaux peuvent avoir des effets indésirables sur la stabilité des pentes, par érosion ou par saturation jusqu'à la partie inférieure des roches, résultant de l'élévation du niveau de l'eau [Gokceoglu and Aksoy, 1996]. La densité de drainage est le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la surface du bassin versant.

L'exploitation des données SRTM a permis d'extraire le réseau hydrologique par le biais de l'outil « hydrologie » d'ArcGis.

Le réseau de drainage est simulé à partir des données d'accumulation de l'écoulement par l'application de la fonction « Con » d'ArcGIS qui permet d'effectuer de nombreuses évaluations conditionnelles. Ainsi, les pixels ayant une valeur d'accumulation supérieure à 1000 sont retenus pour être classés comme drain et cela est dû au fait de l'absence d'une valeur limite dans la littérature. Le choix arbitraire de cette limite de valeur permet d'inclure des rivières permanentes et d'obtenir un réseau de drainage semblable à celui du réseau hydrographique permanent.

A partir du réseau de drainage obtenu, la densité de drainage est calculée. Sous le même environnement, la réalisation de la carte de densité de drainage a été possible grâce à la commande «line density».

- Couvert végétal

En général, la couverture du sol a un effet sur la résistance des matériaux de pente contre le glissement et le contrôle de la teneur en eau de la pente. Elle absorbe l'eau du sol et diminue le potentiel de glissement de terrain [Moradi *et al.*, 2012]. L'indice de végétation normalisé (NDVI) est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Le NDVI est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) [Narumon et Songkot, 2010] selon l'équation suivante (Equation 1) :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}} \quad (1)$$

Pour la présente étude, les canaux R et PIR de l'image Landsat 8 OLI ont été utilisées. La carte du NDVI a été par la suite reclassée suivant les études de [Narumon et Songkot, 2010] et de [Rahaman *et al.*, 2014]. Elle a permis d'avoir la variation spatiale du couvert végétal.

- Densité de fracturation

La stabilité des pentes de roches est essentiellement contrôlée par les fractures tectoniques, en particulier par leur densité et leurs orientations [Aaggad *et al.*, 2015]. En effet, l'eau s'infiltré à travers les diverses failles entraînant l'accroissement de la pression interstitielle, ce qui réduit la résistance au cisaillement

des sols. Une fois arrivée à saturation, le mouvement en masse est déclenché avec formation d'un plan de cisaillement profond [El Fahchouch *et al.*, 2015].

La carte de densité de fracturation a été réalisée selon un long processus, sur la base des travaux de [Jourda *et al.*, 2006] et [Youan Ta, 2008], dans un ordre avec les étapes suivantes : les corrections radiométriques (les images téléchargées étant déjà géométriquement corrigées dans le système UTM (Universal Transverse Mercator) WGS 84), l'amélioration du contraste et le rehaussement des contours, le ré-échantillonnage, le filtrage spatial de l'image Landsat OLI de janvier 2015 et l'extraction manuelle du réseau de linéaments. La superposition de de la carte topographique de la région à la carte linéamentaire réalisée, a permis d'éliminer les linéaments représentant les routes, les fils de courant, de téléphones et de haute tension que contient la carte linéamentaire afin d'obtenir la carte de fracturation. L'utilisation de la carte des accidents majeurs du territoire ivoirien [Biemi, 1992], des cartes de fracturation et rosaces directionnelles associées de la région de Man [Kouamé, 1999, Lasm, 2000 et Saley, 2003] et des mesures (longueur, orientation) à l'affleurement ont permis de valider la carte de fracturation. Un maillage régulier de la carte de fracturation a servi pour calculer la longueur des fractures et leur direction par maille. Ces données ont permis d'élaborer la carte de densité de fracturation sous ArcGis.

- Épaisseur d'altérites

Les altérites présentent un intérêt fondamental dans l'étude des instabilités [Aubié *et al.*, 2007].

Sur le plan géologique, les formations géologiques de la région sont regroupées en deux principaux domaines, séparés par le couloir mylonitique de Man-Danané, de direction N 70° [Camil, 1994, Kouamelan, 1996] :

- le domaine granulitique nord qui est composé essentiellement de granulites roses, de charnockites, de gneiss gris granulitiques et de granodiorites ;
- un domaine anatectique sud qui est beaucoup plus complexe et regroupe les gneiss migmatitiques à biotite, les gneiss charnockitiques, les gneiss intermédiaires, les mobilisats anatectiques et les quartzites à magnétiques et formations associées (d'âge birimien). Une synthèse des formations géologiques est donnée par la figure 5.

Les différents niveaux d'altération se développant sur ces roches sont les terres végétales, les cuirasses, l'argile latéritique, l'argile et l'arène grenue [Kouadio, 2001].

La carte d'épaisseurs d'altérites est obtenue par l'interpolation des données issues des fiches techniques des 184 forages. La méthode d'interpolation Inverse Distance Weighted (IDW) du module «Spatial

Analyst Tools» d'ArcGis, utilisée par [Coulibaly et al., 2015] pour la cartographie de l'épaisseur d'altérite dans ses travaux sur l'estimation des potentialités en eau dans la région du Dengele en Côte d'Ivoire, a été

utilisée. En plus, l'interpolation IDW a donné des résultats meilleurs par rapport au Krigeage dans la présente étude.

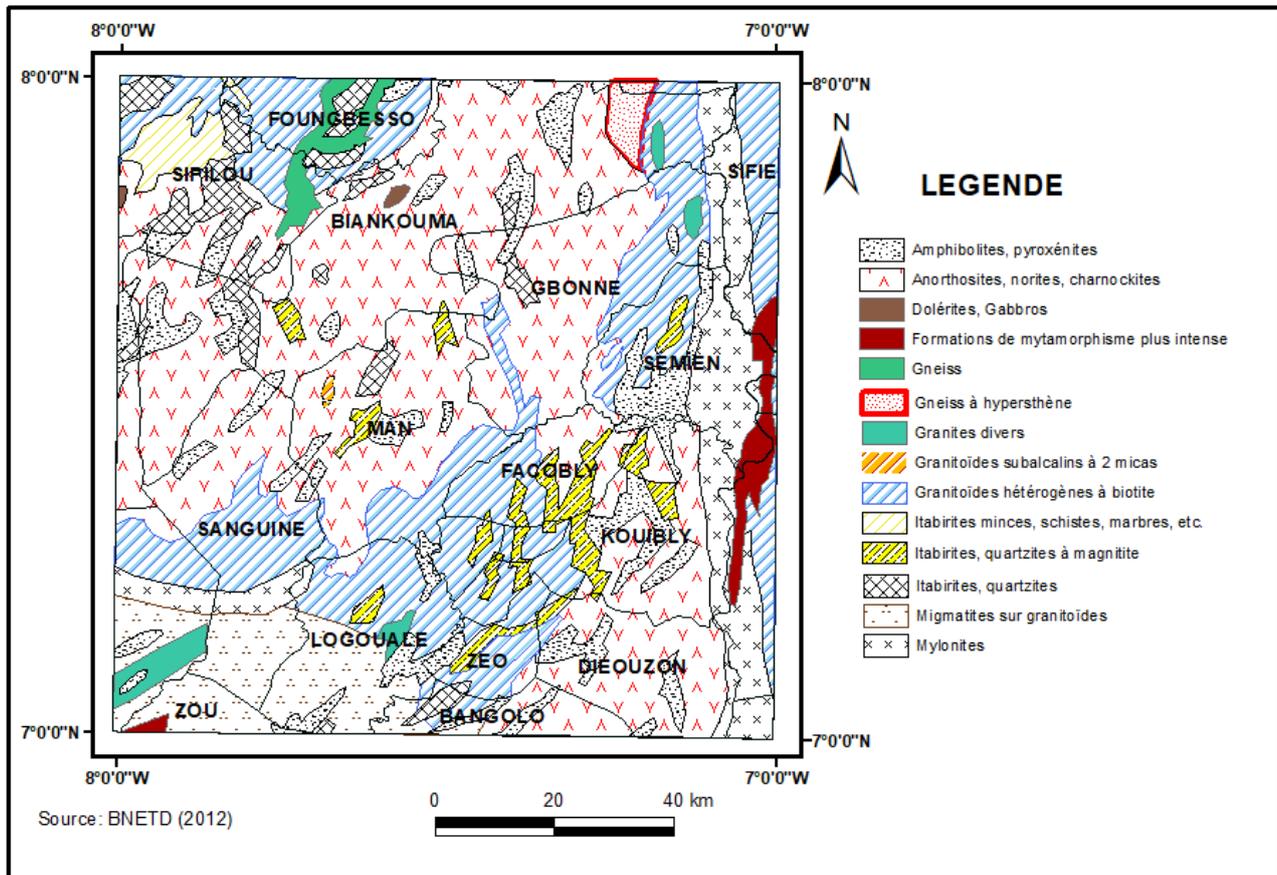


Figure 5 : carte géologique de la région de Man [BNETD (Bureau National d'Etude Techniques et du Développement), 2012]

3.2.2. Détermination des poids et indice de susceptibilité

La méthode des comparaisons par paire par le Processus d'Analyse Hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP) de [Saaty, 1980] a été utilisée pour la pondération des critères. Elle vise à affiner le processus de décision en examinant la cohérence et la logique des préférences du décideur. L'application de cette méthode consiste à : décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique, effectuer les combinaisons binaires, déterminer les poids ou priorités, synthétiser les priorités et tester la cohérence des jugements.

- Élaboration de la hiérarchie

Pour la construction de la hiérarchie, les paramètres recensés plus haut sont regroupés en un ensemble homogène et disposés dans différents niveaux de la AHP [Narumon et Songkot, 2010] :

- niveau 0 : objectif général qui est la cartographie des zones susceptibles aux mouvements d'instabilité.

- niveau 1 : critère de décision ou d'analyse. Six (6) critères d'analyse sont retenus dans le présent travail. Saaty recommande de limiter le nombre de critère de décision à sept (7) au plus [Saaty, 1980] .
- niveau 2 : caractéristiques des critères : Les caractéristiques des critères dans cette étude sont les différentes classes de chaque critère, qui influencent la prédisposition de la région de Man aux mouvements d'instabilités de versant.

La hiérarchie établie pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant est illustrée à la figure 6.

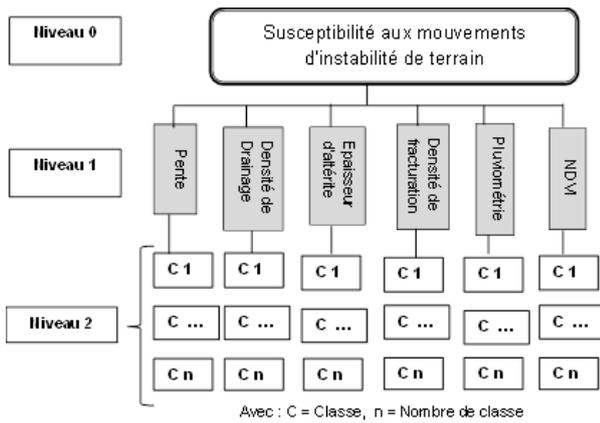


Figure 6 : hiérarchie des paramètres de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant

Élaboration des matrices de comparaison

Dans le cadre de la structure représentée par la figure 2, sept matrices se distinguent.

Les six premières matrices permettront d'effectuer les comparaisons de chaque élément en fonction de chaque critère et la dernière permettra la comparaison de chaque critère par rapport à l'objectif général. La comparaison des différents éléments est faite selon l'échelle verbale de [Saaty, 1984] donnée par le tableau 1, le choix du nombre de classes au niveau de chaque critère étant basé sur les études antérieures.

- Détermination des poids ou priorités

En utilisant la matrice générée par la comparaison par paire sur l'échelle de Saaty ci-dessus, le calcul des vecteurs propres et des coefficients devient alors aisé. Les valeurs des vecteurs propres (Vp) sont obtenues en calculant leur moyenne géométrique par ligne selon l'équation 2 :

$$Vp = \sqrt[k]{w_1 * \dots * w_k} \quad (2)$$

Avec k le nombre de paramètres comparés et w_k les principales notes attribuées aux paramètres ;

En outre, celui-ci doit être normalisé ($Cp_i = Vp_i / \sum Vp_k$) pour que la somme de ses éléments soit égale à l'unité. Pour cela, il suffit de calculer la proportion de chaque élément par rapport à l'addition (Equation 3).

$$T = \left[\frac{Vp_1}{\sum Vp}, \frac{Vp_2}{\sum Vp}, \dots, \frac{Vp_k}{\sum Vp} \right] \quad (3)$$

Soit T le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère.

Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, [Saaty, 1984] propose de suivre le procédé suivant (Equation 4) :

$$\lambda_{\max} = \frac{T}{W} \quad (4)$$

où w est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaisons normalisée.

On calcule, alors, l'indice de cohérence (IC) (Equation 5) :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1} \quad (5)$$

Le ratio de cohérence (RC) se calcule par l'équation 6 :

$$RC = IC / I_a \quad (6)$$

RC est le ratio entre IC et un indice de cohérence aléatoire (CA). L'indice CA, présenté dans le tableau 2, dépend du nombre de paramètres.

Selon [Saaty, 1984] un ratio de cohérence inférieur à 0,10 montre que les jugements sont cohérents.

L'application de toutes ces étapes de calcul a permis d'avoir les matrices de comparaison par paire, les principaux vecteurs propres et ratio de cohérence, ainsi que les classes au sein des différents critères qui sont représentés par les tableaux 3 et 4.

3.2.3. Evaluation de la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant

La spatialisation des aléas liés au mouvement des instabilités de terrain utilise un modèle qui prend en compte les poids des couches thématiques. Ainsi ce modèle algébrique exprime la combinaison linéaire des couches thématiques avec leurs poids respectifs.

La méthode de la combinaison linéaire ou WLC method [Voogd, 1983] permet de fusionner des critères pour former un score unique d'évaluation.

Cette fusion se fait à l'échelle du pixel sur la base du calcul de l'indice de susceptibilité qui est obtenue par la formule suivante :

$$S = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij} \quad (7)$$

Avec S : l'indice de susceptibilité d'instabilité, W_j : le poids du paramètre j , w_{ij} : le poids de la classe i dans le paramètre j et n : le nombre de paramètres.

Sur cette base et celle de la cohérence des jugements, (RC= 0.03), l'indice (S) de susceptibilité aux mouvements d'instabilités de versant, selon les coefficients de pondération du tableau 3, est donné par l'expression suivante (Equation 8) :

$$A = 0.36Pe + 0.18Df + 0.04Dd + 0.07Ea + 0.27Pr + 0.08NDVI \quad (8)$$

Avec Pe : Pente ; Df : Densité de fracturation ; Dd : Densité de drainage ; Ea : Epaisseur d'altération ; Pr : Précipitation et $NDVI$: indice de végétation normalisé.

Après la projection de toutes les cartes thématiques dans le système UTM WGS 84, elles ont été intégrées dans le SIG ArcGis par le module Spatial

Tableau 3 : matrice de comparaison par paire, principaux vecteurs propres et ratio de cohérence relatifs au niveau 0

| Facteurs | classes | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | Vp | Cp |
|--|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Densité de drainage <i>RC = 0,072</i> | (1) < 0,5 km/km ² | 1 | 0.33 | 0.2 | | | 0,41 | 0,10 |
| | (2) 0,5 – 1 km/km ² | 3 | 1 | 0.25 | | | 0,91 | 0,23 |
| | (3) > 1 km/km ² | 5 | 4 | 1 | | | 2,71 | 0,67 |
| Précipitation <i>RC = 0,056</i> | (1) < 1500 mm/an | 1 | 0.2 | 0.14 | | | 0,31 | 0,07 |
| | (2) 1500 – 1700 mm/an | 5 | 1 | 0.33 | | | 1,19 | 0,28 |
| | (3) 1700 mm/an | 7 | 3 | 1 | | | 2,76 | 0,65 |
| Epaisseur d'altération <i>RC = 0,043</i> | (1) < 10 m | 1 | 3 | 5 | 7 | | 3,20 | 0,56 |
| | (2) 10 – 20 m | 0.33 | 1 | 3 | 5 | | 1,50 | 0,26 |
| | (3) 20 – 30 m | 0.14 | 0.33 | 1 | 3 | | 0,67 | 0,12 |
| | (4) > 30 m | 0.14 | 0.2 | 0.33 | 1 | | 0,31 | 0,06 |
| Densité de fracturation <i>RC = 0,035</i> | (1) < 1 km/km ² | 1 | 0.33 | 0.2 | 0.14 | | 0,31 | 0,06 |
| | (2) 1 – 2 km/km ² | 3 | 1 | 0.25 | 0.2 | | 0,62 | 0,11 |
| | (3) 2 – 3 km/km ² | 5 | 4 | 1 | 0.5 | | 1,78 | 0,32 |
| | (4) > 3 km/km ² | 7 | 5 | 2 | 1 | | 2,89 | 0,51 |
| Pente <i>RC=0,035</i> | (1) < 5° | 1 | 0.5 | 0.25 | 0.16 | 0.14 | 0,31 | 0,04 |
| | (2) 5° - 15° | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 | 0.14 | 0,51 | 0,07 |
| | (3) 15° - 25° | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 | 1 | 0,14 |
| | (4) 25° - 35° | 6 | 4 | 2 | 1 | 0.25 | 1,64 | 0,23 |
| | (5) > 35° | 7 | 7 | 4 | 4 | 1 | 3,79 | 0,52 |
| NDVI <i>RC = 0,03</i> | (1) -1 – 0,2 | 1 | 3 | 5 | 6 | 7 | 3,63 | 0.51 |
| | (2) 0,2 – 0,4 | 0.3 | 1 | 3 | 4 | 5 | 1,82 | 0,25 |
| | (3) 0.4 – 0,6 | 0.2 | 0.33 | 1 | 2 | 3 | 0,83 | 0,12 |
| | (4) 0,6 – 0,8 | 0.16 | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 0,53 | 0,07 |
| | (5) > 0,8 – 1 | 0.14 | 0.2 | 0.33 | 0.5 | 1 | 0,34 | 0,05 |

Tableau 4 : matrices de comparaison par paires, principaux coefficients de pondération et ratio de cohérence des classes des paramètres relatifs au niveau 1

La géolocalisation des indices d'instabilité de versants antérieurs a été faite grâce au GPS de précision ± 3 m. Un appareil photo numérique a servi pour les prises de vues des indices de terrain.

Les coordonnées des sites où les indices de terrain ont été observés sur le terrain ont été intégrées par la suite à la base de données dans le SIG, afin de vérifier l'adéquation entre la localisation des sites observés et de celle des zones à susceptibilité élevée déterminée sur la carte de susceptibilité réalisée. La superposition des indices de terrains aux zones à susceptibilité élevée cartographiées est une preuve qui a permis de valider la carte de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant de la région de Man.

4. Résultats et discussion

4.1 Analyse spatiale des facteurs de la susceptibilité

Les facteurs de susceptibilité aux mouvements d'instabilités de terrain, dans la région de Man, élaborés dans ce travail sont : la pente, l'indice de végétation, la densité de fracturation, la densité de drainage, l'intensité de précipitation et l'épaisseur d'altération.

- La densité de fracturation : La carte de fracturation obtenue (Figure 7) fait ressortir les directions majeures de la tectonique cassante suivante : N170-N190, N30-N40, N80-N100, N120-N130. Ces directions sont celles mises en évidence sur le territoire ivoirien par [Biemi, 1992]. Les accidents NO-SE et NE-SO, qui représentent respectivement les directions libériennes et éburnéennes de l'Afrique de l'Ouest sont également mises en évidence. De plus, les directions

N0-N10 et N170-N180 sont déterminées comme l'ont fait [Kouamé, 1999, Lasm, 2000 et Saley, 2003].

- La carte de densité de fracturation, issue de la carte de fracturation, a été par la suite classifiée. Cette densité varie entre 0,61 et 4,62 km/km².

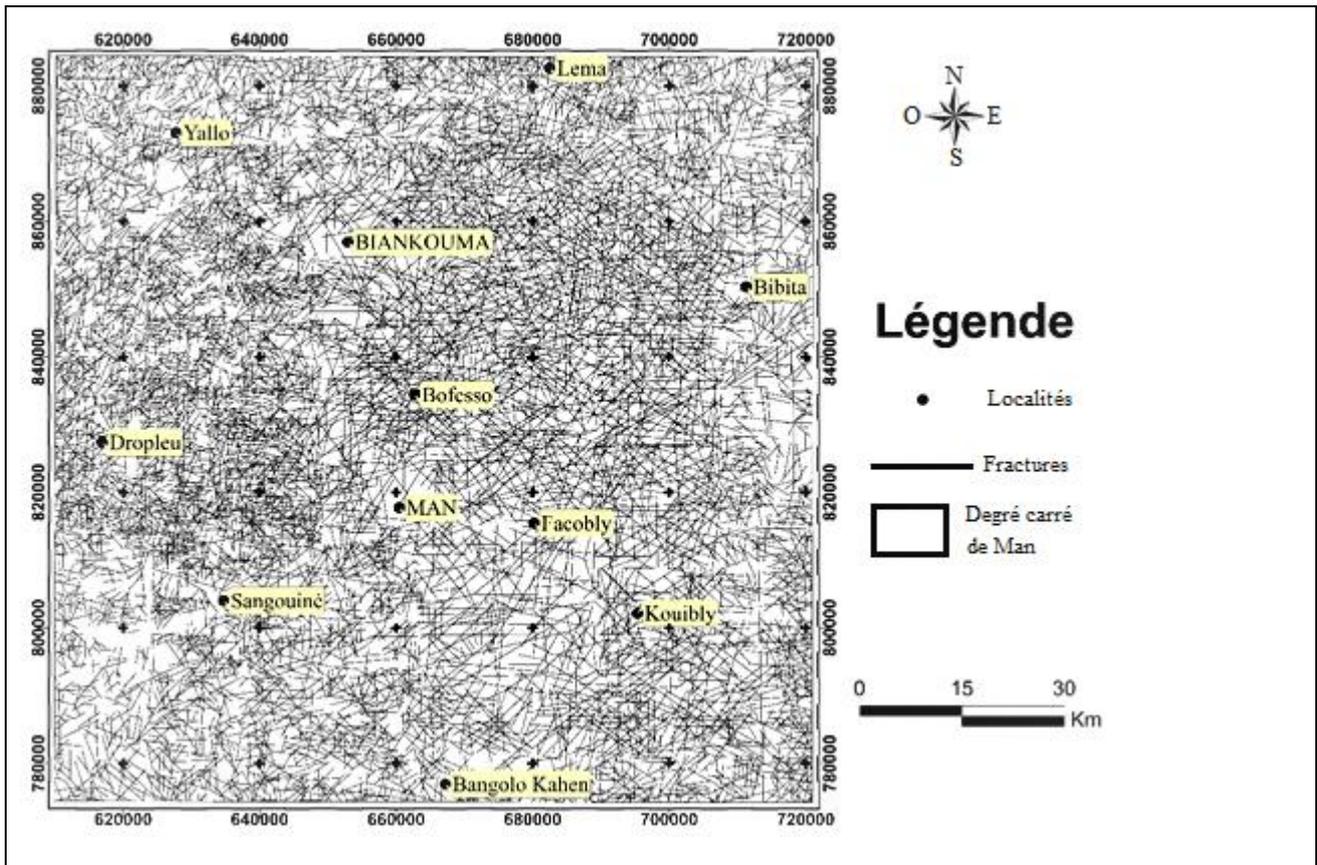


Figure 7 : carte de fracturation de la région de Man

Les faibles densités de fracturation (<1 km/km²) s'observent en très faible proportion (0,6%) à l'Est et au Sud-Ouest de la zone d'étude. Les densités moyennes à fortes (1-3 km/km²) occupent 77,7% de la surface de la région de Man et se disposent suivant les cours d'eau principaux. Les densités de fracturation très élevées (3 à 4,62 km/km²) couvrent 21,7% de l'aire d'étude. Cette classe est observée majoritairement au niveau des deux chaînes (Mont Dan et Mont Toura) et apparaît en îlots au Sud-Est de la zone d'étude (Figure 8a). L'utilisation d'une autre image satellitaire optique ou radar aurait influencé la taille des fractures

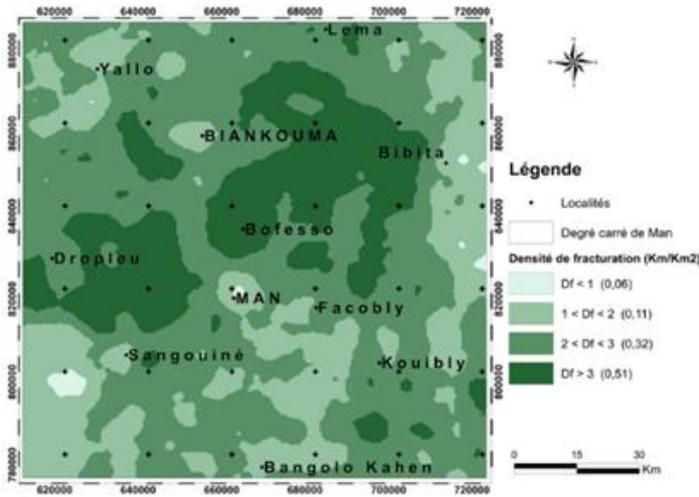
- La pente : Les valeurs de pente très faible et faible (<15°) sont dominantes (88,1% de la zone étudiée) et sont pour la plupart réparties le long des cours d'eau et des thalwegs de l'aire d'étude. Les pentes moyennes, fortes et très fortes ne représentent que 11,9% de la superficie totale de la zone étudiée et sont rencontrées majoritairement à l'Ouest, dans le centre, le Nord (en forme de croissant) et dans le Sud-Est de la zone d'étude, coïncidant généralement avec des zones de hautes altitudes (Figure 8b).
- La pluviométrie : Les précipitations moyennes annuelles varient de 1327 à 1985 mm avec une

moyenne de 1660 mm. Les différentes classes de la pluviométrie sont réparties sur la zone d'étude selon différentes unités homogènes. Les précipitations supérieures à 1700 mm couvrent 41,7% à l'Ouest de la région de Man (Figure 8c). Cette répartition des précipitations fait ressortir la tendance générale du climat à la baisse que connaît la région de Man et qui a été mise en évidence par [Saley, 2003 ; Kouamé, 2011 ; Kouadio et al., 2017].

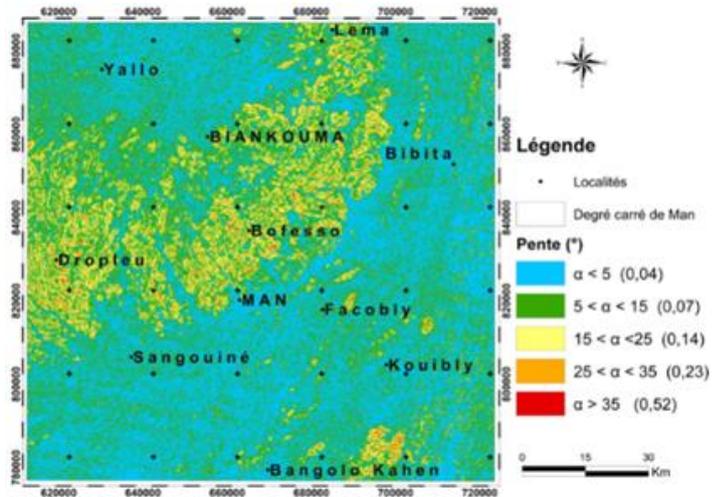
- L'Indice de végétation normalisée (NDVI) : cet indice met en évidence la répartition spatiale de la densité du couvert végétal. Les valeurs de NDVI varient entre - 0,097 et 1. Les faibles valeurs (<0,4) occupent 5,02 % de la zone étudiée, se rencontrent au niveau des cours d'eau, des routes et des localités, surtout au Nord-Est de la zone d'étude. La seconde classe (de 0,4 à 0,8) est la plus importante (80,07%) et présente un couvert végétal de densité croissante. La dernière classe (de 0,8 à 1) couvre 14,91% de la zone étudiée et exprime un couvert végétal très dense. Elle est localisée majoritairement au niveau des monts Toura et Dan, puis au Sud de la région de Man (Figure 8d).
- L'épaisseur d'altérites : Dans la région de Man, les épaisseurs d'altérites varient de 0,4 à 50 m environ. Les plus grandes épaisseurs d'altération (>30 m)

représentent 5,22% de la région de Man et se localisent au Nord-Ouest avec des îlots au Centre et au Sud de la zone. Les épaisseurs d'altérites allant de 10 à 30 m couvrent 71,06% de la zone étudiée.

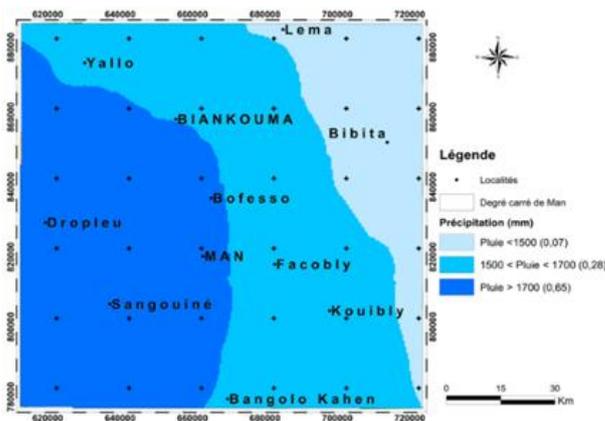
La surface restante (23,72%) représente les faibles épaisseurs (<10 m), et s'étend dans tout l'Est avec des enclaves à l'Ouest et au Centre (couvrant les localités de Léma, Bibita et de Kouibly) (Figure 8e).



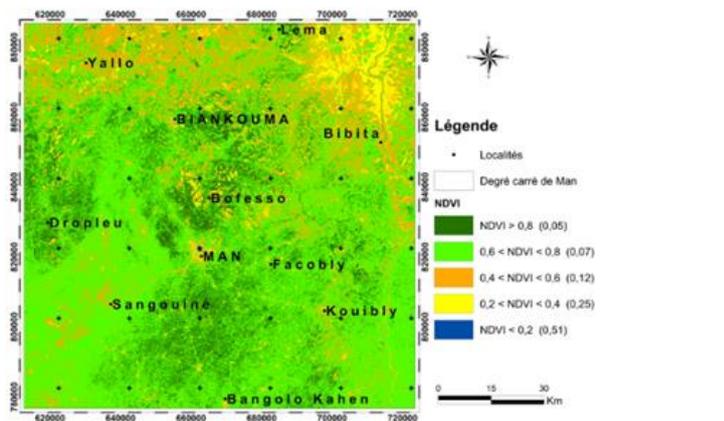
a : carte de densité de fracturation



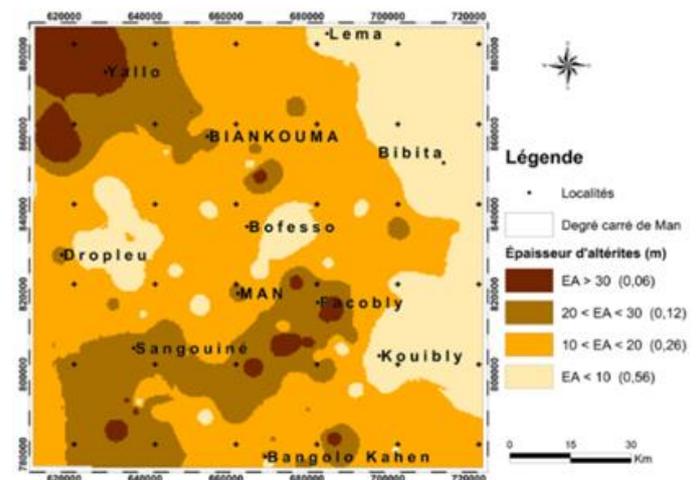
b : carte de pente



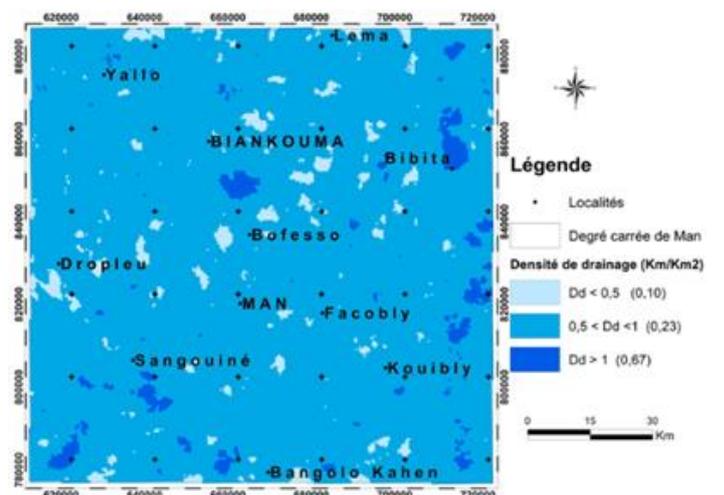
c : carte de la pluviométrie



d : carte du NDVI



e : carte de l'épaisseur d'altérite



f : carte de densité de drainage

Figure 8 : cartes thématiques des facteurs de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant de la région de Man

- La densité de drainage : Trois classes de densité de drainage ont été obtenues. Les densités de drainage inférieures à $0,5 \text{ km/km}^2$ occupent 4% de la zone d'étude et sont présentes en îlots sur toute la zone. La classe dont la densité de drainage est comprise entre $0,5$ à 1 km/km^2 , est majoritaire ou plus importante car elle couvre 93% de la région de Man. Elle est étendue à toute la zone. Enfin, les densités de drainage supérieures à 1 km/km^2 sont minoritaires avec 3% se retrouvent dispersées suivant les cours d'eau principaux à l'Est, au Sud-Ouest et au Centre-Nord de la région de Man (Figure 8f).

4.2 Évaluation de la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant du degré carré de Man

La carte de susceptibilité (Figure 9) montre cinq classes qui traduisent cinq niveaux de susceptibilité différents répartis sur l'ensemble de la zone d'étude définis comme suit : susceptibilité très faible, susceptibilité faible, susceptibilité modérée, susceptibilité élevée et susceptibilité très élevée. Ces classes sont définies par des indices de susceptibilité qui vont de 0,0793 à 0,4855 avec une valeur moyenne de 0,2117. Les indices de susceptibilité sont les attributs liés aux différents niveaux de susceptibilité et qui sont créés dans la base de données lors de la combinaison dans le SIG. Par conséquent, plus l'indice est élevé, plus la zone est sensible aux mouvements d'instabilité de versant.

Le tableau 5 donne les différentes classes des indices de susceptibilité et leur répartition.

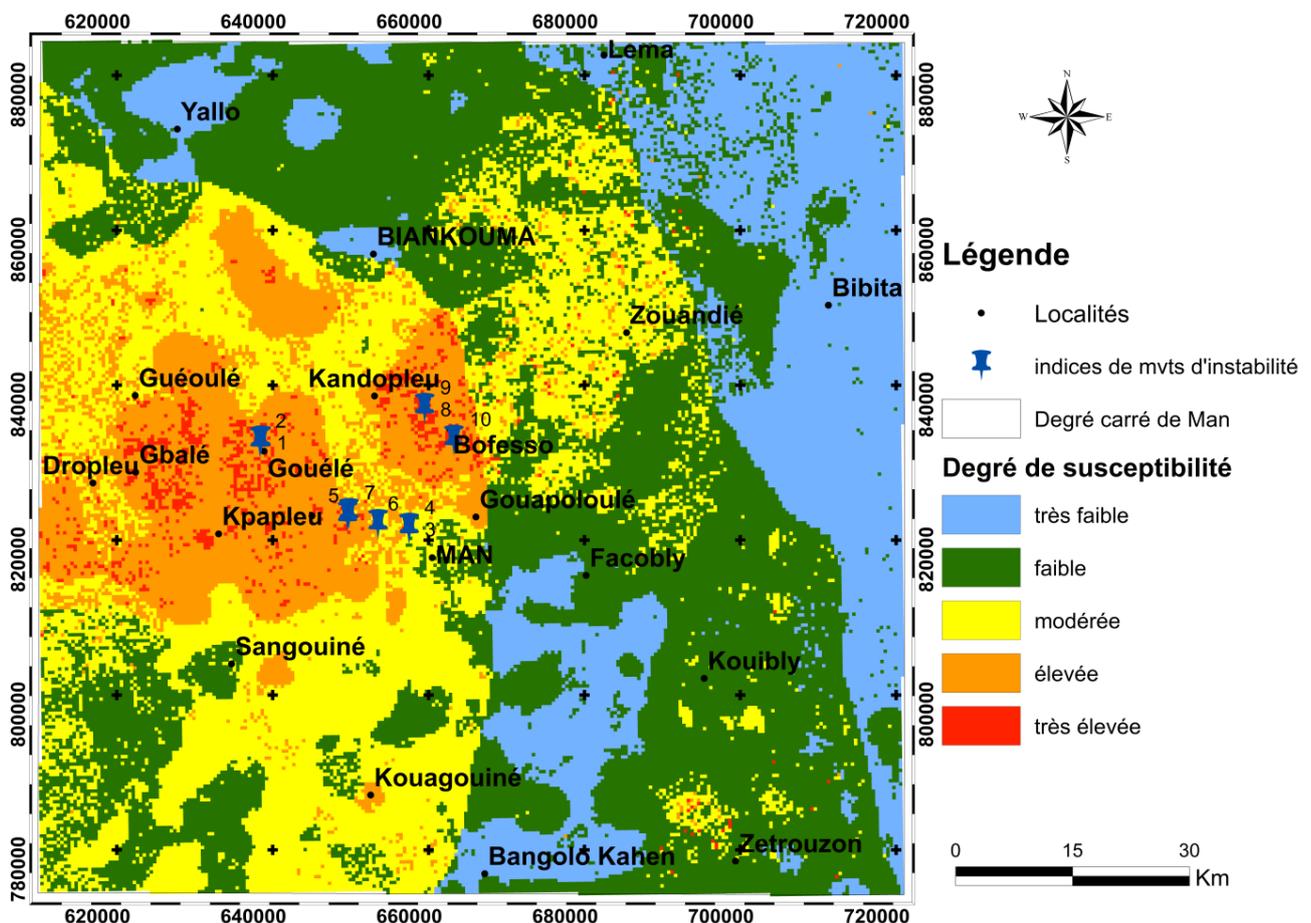


Figure 9 : carte de susceptibilité aux mouvements d'instabilités de versant de la région de Man.

| Classe | Indice de susceptibilité | Superficie (%) |
|-------------|--------------------------|----------------|
| Très faible | 0,0793 – 0,1637 | 20,115 |
| Faible | 0,1637 – 0,2195 | 39,037 |
| Modérée | 0,2195 – 0,2720 | 26,199 |
| Élevée | 0,2720 – 0,3278 | 13,176 |
| Très élevée | 0,3278 – 0,4855 | 1,473 |

Tableau 5 : répartition des classes de susceptibilité au mouvement d'instabilité de versants

Ce tableau montre que seulement 14,65% de la zone étudiée présente une susceptibilité très élevée (1,473%) et élevée (13,176%). La répartition des autres niveaux de susceptibilité sur la région d'étude est dans les proportions suivantes : susceptibilité modérée (26,199%), faible (39,037%), et très faible (20,115%). Les terrains avec une susceptibilité élevée couvrent principalement les localités telles que Kandopleu, Gouapoloulé au centre, Guéoulé, Pkappleu plus à l'Ouest et Kouagouiné au Sud de la région de Man. Les zones à susceptibilité très élevée se retrouvent principalement dans l'Ouest (à Gouélé, Gbalé, Biakaleu etc...) et au Centre à Bofesso.

4.2. Validation des niveaux de susceptibilité liés aux mouvements d'instabilité de versant

Sur le terrain, du 15 au 18 novembre 2016 ; les indices de mouvements d'instabilités de versant qui se sont produits dans la région ont été recensés et géolocalisés. Ces indices concernent les sites de mouvement de versant antérieur ; la surface de rupture, les masses de terre accumulées, les éboulis, les déracinements des arbres et cultures. Les figures 10, 11 et 12 donnent une illustration des indices répertoriés sur les différents sites. Ce sont (cf. page suivante) :

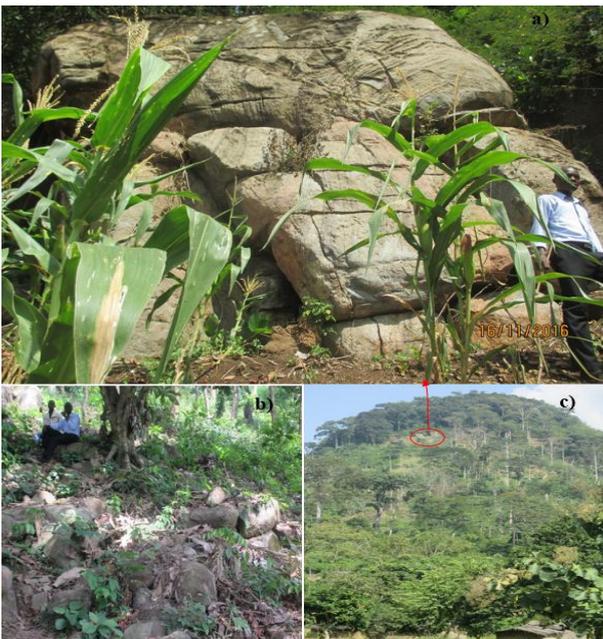


Figure 10 : indice au mont gblan ; a) affleurement rocheux fortement fracturé en voie d'éboulement situé au sommet du mont Gblan ; b) éboulis au bas versant du mont Gblan ; c) vue synoptique du mont Gblan (photos prises le 16 novembre 2016)



Figure 11 : bloc rocheux susceptible de s'ébouler sur l'axe Man-Biankouma ; a) vue de profil ; b) vue de face (photos prises le 18 novembre 2016)

 = Limite de trajectoire potentielle du bloc rocheux



Figure 12 : indices du glissement de terrain dans la localité de Bofesso, (DRA) ; a) vue du bas ; b) vue de haut (photos prises le 18 novembre 2016)

- les éboulis issus de plusieurs éboulements de blocs rocheux du mont Gblan qui surplombent le village de Gouélé (Figure 10). Le plus remarquable de ces éboulements fut celui de 2008 qui a créé une grande secousse, a libérée des blocs de roche qui ont causé de nombreux dégâts.
- des blocs rocheux susceptibles de s'ébouler avec des installations anthropiques sur les versants des montagnes (Figure 11) au quartier Zélé, à la sortie nord de Man sur l'axe principal Man-Biankouma, De plus la présence d'un gros bloc pratiquement détaché du reste du massif rocheux attire vraiment l'attention
- Indices du glissement dans la localité de Bofesso (Figure 12): un glissement de terrain connu sous le nom de DRA dans la région s'est produit en juin 2016 en pleine saison pluvieuse. Selon les témoignages des riverains de ladite localité, ce glissement a eu lieu sur le mont Gba, depuis son sommet jusqu'au thalweg et a occasionné la destruction des plantations situés sur le versant de ce mont. Il a également causé la pollution de la rivière Donhaï qui représente la limite entre le mont Gba et le mont Gbéan. Cette rivière est restée rougeâtre pendant environ deux mois, privant d'eau sur toute cette période, la population située en aval qui la consommait.

L'intégration dans le SIG des coordonnées des sites où les indices de terrain ont été observés fait ressortir une superposition de ces sites (symbole bleu) aux zones à susceptibilité élevée et très élevée (voir Figure 9) déterminées sur la carte réalisée. Ce qui permet de valider la carte de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant réalisée.

5. Discussion

La combinaison sous les SIG, des cartes de répartition spatiale des facteurs (pente, pluviométrie, de densité de drainage, de densité de fracturation, indice de végétation normalisée et épaisseurs d'altération) suivant l'analyse multicritère hiérarchique, a permis de produire une carte de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant dans la région de Man. Les zones de susceptibilité très faible et faible couvrent 59,15% de la superficie cartographiée. Ces zones sont localisées au Nord, à l'Est et au Sud de la zone d'étude où les pentes sont faibles (<15°). Bien que la précipitation et les autres paramètres soient relativement forts, ces zones ne sont presque pas exposées aux mouvements d'instabilité de versants. Cela montre l'importance de la pente. En effet, selon [Mayer, 1995], les terrains sont exposés aux éboulements ou glissements de terrain lorsque les pentes dépassent 15° dans une région donnée.

Les valeurs de pente utilisées dans ce travail sont dérivées du traitement du MNT issu de l'image SRTM

de 2000 qui a un pas de 30 m. Cette approche basée sur l'utilisation des images SRTM a été utilisée par plusieurs auteurs dont [Aboubakar et al., 2013 ; Koussa et Bouziane, 2018 ; Rezak et al., 2012] qui ont travaillé sur l'érosion hydrique des sols et les glissements de terrain en Afrique. Ce type de MNT est influencé par la végétation de surface et tend à minimiser les valeurs de pente quelle que soit la précision d'interpolation [Aké et al., 2012]. Elle ne traduit donc pas toujours la réalité « terrain » de la dénivellation entre deux pixels et pourraient sous-estimer la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de terrain. Dans la région de Man à relief très accidenté, la fiabilité des résultats est liée au MNA dont la qualité doit être testée, soit à partir de données issues a priori de la connaissance intrinsèque du relief, soit à partir de données de référence issues d'une source externe [Polidori, 1995]. Le manque de données précises et continues sur la région constitue un frein à cette vérification. L'utilisation d'images à très haute résolution et d'une grande précision comme les images Lidar donnerait une plus grande précision aux résultats. En effet, le Lidar est une méthode de collecte rapide de données, avec une précision élevée et une forte densité de point, qui profite des avantages des capteurs actifs, et n'est donc pas (ou très peu) affecté par les perturbations météorologiques et les conditions d'éclairement solaire. [Lemmens, 1997] indique que le Lidar est plus avantageux que les autres méthodes d'acquisition de données en 3D. Il serait, par conséquent, la meilleure technique pour l'étude de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans une telle région.

La susceptibilité modérée couvre 26,2% de la zone étudiée. Ces zones reposent sur des formations fracturées (2 à 3 km/km²) avec de fortes épaisseurs d'altérites (>20m). Les fractures ont leurs propres propriétés hydrauliques qui sont bien meilleures que celles de la roche. Au niveau du degré de saturation du massif, des gradients vont être créés entre les zones fracturées et les zones non fracturées [Saad, 2012]. Selon le même auteur, toutes ces caractéristiques vont influencer les phénomènes d'altération particulièrement ceux pour lesquels le degré de saturation joue un rôle (dissolution, activité biologique...).

Les classes de susceptibilité majeure (élevé et très élevé) sont réparties sur seulement 14,65% de la zone d'étude. Les données utilisées, notamment les pluies satellitaires et l'image SRTM, ainsi que les techniques d'interpolation utilisées pourraient être à l'origine de cette sous-estimation de la susceptibilité.

Elles couvrent la partie ouest de la surface cartographiée qui présente une fracturation élevée avec de faibles épaisseurs d'altérite. La présence de ce niveau de susceptibilité pourrait être liée d'une part aux pentes fortes (>25°) car pour [Hugonie, 2004], les mouvements de terrain ne deviennent importants ou

nombreux que lorsque la pente dépasse 25° à 30°. D'autre part, elle pourrait être due à la fracturation dense ($Df > 3 \text{ km/km}^2$) en ce sens que selon [Aboubakar *et al.*, 2013] les roches de nature cataclastique, fortement mylonitisées et densément fissurées les rend vulnérables avec les eaux qui s'infiltrent à des profondeurs importantes.

La différence entre les classes de susceptibilité élevées et très élevées réside aussi dans la faible couverture végétale et les fortes densités de drainage des zones de susceptibilités très élevées. Selon [Sedan *et al.*, 2013] la végétation joue un rôle certain dans les chutes de blocs, que ce soit en intervenant sur le départ des blocs ou sur la propagation, une fois que le bloc s'est détaché. Elle peut réduire de moitié l'aléa pour des blocs de petite taille mais cette efficacité est réduite pour des blocs de taille plus importante. Par contre le rôle de la végétation sur les glissements de terrain profond reste très limité. Aussi, selon [Patricia et Irasema, 2011] la végétation constitue un facteur inhibiteur dans le processus de génération des glissements de terrain.

L'épaisseur d'altérite dépend de divers facteurs et le plus important est la variation locale de la morphologie du terrain ; c'est pourquoi il est très difficile de modéliser l'épaisseur d'altération d'une grande superficie. La carte d'épaisseur d'altération et celle de la pluviométrie ont été interpolées. Or, l'interpolation de pondération par l'inverse de la distance (IDW) présente toujours des marges d'erreur appréciables. En effet, l'interpolation peut entraîner des erreurs dans l'estimation des paramètres.

L'eau est le facteur déclencheur principal des mouvements de terrain [Aboubakar 2013]. La région de Man est soumise à une forte pluviométrie moyenne (>1500 mm/an) même si la tendance générale d'évolution est à la baisse [Kouamé, 2011] et est dotée d'aquifères de versants [Saley, 2003]. Ces caractéristiques sont à surveiller pour mieux prévenir les mouvements de terrain dans la région.

Les facteurs pris en compte dans le cadre de ce travail ont été jugés cohérents et acceptables sur la base de la méthode AHP de [Saaty, 1980] car un ratio de cohérence $RC = 0,043 (< 0,10)$ est obtenu. Cette méthode permet d'élaborer une décision fondée sur une structure hiérarchique et des observations de terrain. C'est une technique d'aide à la décision éprouvée depuis de nombreuses années. Elle a été largement utilisée pour résoudre les problèmes variés et complexes [Caillet, 2003].

La méthode d'analyse multicritère utilisée dans ce travail a l'inconvénient de laisser place à beaucoup de subjectivité dans la pondération des facteurs et le choix des seuils fixés. En effet, tout cela dépend de l'appréciation de l'expert qui est fortement liée à sa sensibilité et sa connaissance du phénomène [Caillet, 2003].

La pondération est basée sur la comparaison relative des facteurs impliqués, les uns par rapport aux autres. La pente a le poids (0.36) le plus important dans cette analyse en raison du fait qu'une importance relativement grande lui a été accordée par rapport aux autres facteurs de susceptibilité. Le choix de procéder ainsi est en conformité avec les études de [Charbel et El Hage Hassan, 2017]. Ces auteurs ont accordé une importance relativement importante à la pente par rapport aux autres facteurs pris en compte pour le modèle de glissement de terrain dans leurs travaux au Sud du Liban localisé majoritairement sur les pentes supérieures à 6°. Il est aussi basé sur les travaux de [Mayer, 1995] qui montrent que, lorsque les pentes de terrain dépassent 15° dans une région donnée, ces terrains sont exposés aux éboulements ou glissements de terrain. Ce choix s'appuie également sur les études de [Aboubakar *et al.*, 2013], qui exposent que la pente très forte (>30°) dans une région peut créer le contraste de gravité et induire le mouvement de masse. Cela montre l'importance de la pente dans la prédisposition aux mouvements d'instabilité de terrain.

L'utilisation d'une autre méthode multicritère et d'autres facteurs en plus tels que les facteurs anthropiques pourrait donner des résultats de plus grande précision.

La méthode d'interpolation utilisée est le IDW qui a donné de meilleurs résultats dans le présent travail. Cependant, les études de [Kouassa, 2018] montrent que la méthode d'interpolation par Krigeage est plus représentative pour la cartographie des variables naturelles car elle est basée sur des techniques géostatistiques.

L'observation de seulement six facteurs sur le terrain constitue une faiblesse dans la validation. Par ailleurs, l'observation de plusieurs sites auraient permis d'avoir une plus grande précision dans la validation de la carte élaborée. Ce qui donnerait plus de crédibilité à la carte de susceptibilité finale. Cependant, la superposition des sites identifiés aux zones de susceptibilité élevée et très élevée montre bien que la région de Man est propice à l'occurrence de ces phénomènes. Ces travaux sont en adéquation avec ceux de [Kouadio, 2001], qui a identifié des indices de mouvements de versant instable dans la région de Man. Il s'agit du glissement de terrain (rupture de versant) de Gbangbéguiné localisé entre Man et Danané, de l'éboulis d'altérites liés au fluage d'argile à Seupleu et de l'éboulis situé non loin de la Cascade de Zadépleu, placé dans la zone de susceptibilité élevée.

6. Conclusion

L'objectif principal de cette étude est l'identification des zones susceptibles aux mouvements d'instabilité de versant de la région de Man. A cet effet, les facteurs tels que la pluviométrie, la pente, les densités de drainage et de fracture, l'épaisseur d'altération et

l'indice de végétation ont été cartographiés et combinés dans un SIG en utilisant l'analyse multicritère de Saaty.

Cette combinaison des cartes paramétriques a permis de concevoir la carte de susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant qui présente cinq classes dont deux majeures :

- la susceptibilité élevée (13,18% de la superficie), déterminée principalement à Kandopleu, Gouapoloulé au centre, Guéoulé, Pkapeu plus à l'Ouest et Kouagouiné au Sud du degré carré ;
- la susceptibilité très élevée qui occupe 1,47% de la région de Man. Cette susceptibilité s'observe principalement à l'Ouest (à Gouélé, Gbalé, Biakaleu etc...) et au Centre à Bofesso.

Il ressort de cette étude que 14,65% de la région de Man est sujet au mouvement d'instabilité de versant. Cette zone à fort degré de susceptibilité couvre plusieurs localités et a un grand intérêt économique. Cette zone est située entre Biankouma et Man, occupant une partie des versants des Monts Toura et Dan.

Nonobstant les limites méthodologiques évoquées, cette étude a permis la conception d'une base de données, sur la susceptibilité aux mouvements d'instabilité de versant de la région de Man, qui est un outil d'aide à la décision. La mise à jour de cette base de données, par intégration de données plus détaillées peut rendre plus efficace la prévention et la gestion des mouvements d'instabilité de terrain dans la région. Ainsi, les autorités et les collectivités locales de la région de Man pourraient se baser sur cet outil pour mieux orienter les actions prioritaires à mener afin de protéger les zones fortement prédisposées et réduire le niveau de susceptibilité

Références

Aaggad E. N., Algouti A., Algouti A. et Amaya A., 2015. Cartographie par SIG de l'aléa d'éboulement dans le bassin versant de Dades (Haut Atlas Central), Maroc. *European Scientific Journal* Edition vol.11, No.18. pp. 222-237.

Aboubakar B., Dongmo K. A., Nkouathio D. G. et Ngague F., 2013. Instabilités de terrain dans les hautes terres de l'Ouest Cameroun : caractérisation géologique et géotechnique du glissement de terrain de Kekem. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2013, n° 35, 39–51

Ake G. E., Kouadio B. H., Adja M. G., Ettien J.-B., Effebi K. R. et Biemi J., 2012. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, Volume 6 | 2012 : Varia 2012, p. 1-42

Anctil F., Rousselle J. et Lauzon N. 2005. Modélisation des débits de crue. *Hydrologie: cheminements de l'eau*. Presses Internationales Polytechnique, Montréal , pp. 217-270

Aubie S., Peter-borie M. et Genna A., 2007. Atlas cartographique des phénomènes naturels et des caractéristiques géologiques du littoral de la Côte Basque. Rapport BRGM/RP-55262-FR, 30illus. 3 Ann. 16 p.

Biémi J. (1992). Contribution à l'étude éologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens 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 d'Etat, Univ. Nat. d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 493 p.

BNETD, 2012. Carte géologique de la Côte d'Ivoire, Coupure du degré carré de Man, édition 2012

Caillet R., 2003. Analyse multicritère : Etude comparatives des méthodes existantes en vue » d'une application en analyse de cycle de vie. CIRANO, Série scientifiques, N°2003s-53, Montréal

Camil J. (1984). Pétrographie, chronologie, des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implication pour l'histoire géologique du craton ouest-africain. Thèse d'État, université d'Abidjan,

Charbel L. et El Hage Hassan H., 2017. Modélisation de la perte de sol dans la forêt de Bkassine (Liban sud). *Geo-Eco-Trop.*, 2017, 41, 31, n.s. : 479-492

Correia R. B., 2007. Modelação cartográfica em ambiente SIG de suscetibilidade à erosão hídrica dos solos, caso da bacia da Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo Verde). Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra. 162 p.

Coulibaly Naga P. H., Coulibaly T. J. H. et Savane I., 2015. Cartographie des potentialités en eaux souterraines par l'utilisation de l'analyse multicritère et les SIG : cas du district du Denguele (Nord-ouest de la côte d'ivoire). *European Scientific Journal* December 2015 edition vol.11, No.35 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431

Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology* volume 64, Issue 1, April 2002, pp. 65-87.

El Fahchouch N. A., Brahim A. L., Raji O. et Khouakhi A., 2015. Apport du SIG et de la télédétection dans la modélisation spatiale de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la région d'Al Hoceima, Rif Oriental, Maroc. *Afrique Science* 11(2), pp.44 - 57.

Gokceoglu C. and Aksoy H., 1996. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44, pp. 147-161.

Guillard C., 2009 : Evaluation et cartographie du risque glissement de terrain d'une zone située au Nord de Lisbonne. Mémoire du Master « Systèmes Territoriaux, Développement Durable et Aide à la Décision ». Ecole Nationale Supérieure des Mines (Saint –Etienne) 59 p.

Hauke J. and Kossowski T., 2011. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficient on the same sets of data. *Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań. Quaestiones Geographicae*, Vol. 30, N°2, 52p

- Hugonie G., 2004. Les facteurs de l'instabilité des versants en Sicile [article]. L'information géographique. Volume 68, Numéro 1, pp. 27-39
- INS, 2015. Recensement Général de la Population et de l'Habitat. Édit. RGPH-2014, Document technique, 26 p.
- Jourda J. P. R., 2005. Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest concept de l'hydrotechnique spatiales cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles de l'Université Felix Houphouët Boigny Abidjan, 430 p.
- Kendrick, John and Dan Saaty, 2007. «Use analytic hierarchy process for project selection ». ASQ, Six Sigma forum magazine, vol. 6, no 4, p. 22-29.
- Kouadio B. H., 2001. Insécurité climatique et géorisques en Afrique de l'Ouest : Apport des systèmes d'information géographique et de la télédétection à l'étude des phénomènes de risques naturels dans la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université de Cocody, 164p.
- Kouadio B. H., N'guessan Bi V. H., Djè K. B., Aké G. E., Yapi A., Brice S., Biémi J., 2017. Analyse spatio-temporelle des extrêmes climatiques dans la région semi-montagneuse de Man-Danané par utilisation du programme RCLIMDEX. Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement N°2 - 2017
- Kouame K. F (2011). 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 de Doctorat d'Etat, Université Félix Houphouët Boigny Ex Université de Cocody, 389p
- Kouamé K.F. (1999). Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse 3è Cycle. Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.
- Kouamelan A. N. 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse unique, université de Rennes 1, 1996.
- Koussa M. et Bouziane T., 2018. Apport du SIG a la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans la région de Djelfa, Algérie. Journal Scientifique Libanais, 19(1): 31-46.
- Kundu S., Sharma D. D., Saha A. K., pant C. C. and Mathew J., 2011. GIS-based statistical landslide susceptibility zonation : a case study in ganeshganga watershed, the himalayas. 12th Esri India User Conference, 9 p.
- Laaribi A., 2000. SIG et analyse multicritère. Paris Hermès sciences publications, 196p,
- Lasm T., 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse Univ. Poitiers, France, 274 p.
- Lemmens, M. J. P. M., 1997. Accurate Height Information from Airborne Laser-Altimetry. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development'.
- Mayer L, 1995. Hillslopes. Introduction to quantitative geomorphology – NY, pp. 227-252
- Moradi M., Bazayr M. H. and Zargham M., 2012. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping by AHP Method, A Case Study, Dena City, Iran. J. Basic. Appl. Sci. Res., vol 2, No 7, pp. 6715-6723.
- Narumom I. and Songkot D., 2010. Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chaem watershed, northern Thailand. School of Remote Sensing, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 16 p.
- Patricia F. and Irasema A. A., 2011. Susceptibility to shallow landslides of soil in themunicipality of Temoaya, Mexico : multicriteria analysis. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, ISSN 0188-4611, pp. 31-47.
- Peloquin S., 1999. Utilisation de la télédétection, des SIG et de l'intelligence artificielle pour déterminer le niveau de susceptibilité aux mouvements de terrain : application dans les Andes de la Bolivie. Thèse de Doctorat en Télédétection : Université de Sherbrooke. 163 p.
- Polidori. L. (1995) : Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain. Bull S.F.P.T, N° 139, pp. 10- 19.
- Rahamana S. A., Aruchamy B. S. and Jegankumar R., 2014. Geospatial approach on landslide hazard zonation mapping using multicriteria decision analysis : a study on coonor and ooty, part of kallar watershed, the nilgiris, tamil nadu. ISPRS Volume XL-8, pp. 1417-1422.
- Ramos A., Cunha L. et CUNHA P.P., 2014. Application de la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré. Geo-Eco-Trop, 38: 33-43.
- Renard F. et Chapon P.-M., 2010. Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise. L'Espace géographique. Edition Belin, 2010/1 Vol. 39, pp 35-50
- Rezak S., Laborde J.-P., et Errih M., 2012. Validation d'un modèle numérique de terrain adapté à la modélisation hydrologique régionale sur l'Algérie du Nord. Hydrological Sciences Journal, 57 (5), 928–941
- Saad A., 2012. Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés. Rôle des fluides dans leur processus d'altération. Thèse réalisée à l'IFFSTAR. 200 p.
- Saaty T. L., 1980. The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Mc Graw Hill, New York. 17 p.
- Saaty T. L., 1994. « Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process ». European Journal of Operational Research, no 74, p. 426-447.

Saaty T.L., 1984. Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision. collection université-entreprise, entreprise moderne d'édition, Paris. 367 p.

Saley M. B., 2003. Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale, Discontinuités pseudo images et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, 211 p.

Saley M. B., 2003. Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale, Discontinuités pseudo images et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, 211 p.

Saley M.B., Kouame K.F., Penven M.J., Biemi J. et Kouadio B.H. (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : Apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. Télédétection, Vol.5, n°1-2-3, pp 53-67.

Sedan O., Mathon C., Nachbaur A., Jacq F. A., Butaud J.F., 2013. Programme ARAI 3 : Rôle de la végétation vis-à-vis des mouvements de terrain en Polynésie française. BRGM/RB-62203-FR - Rapport final, juin 2013

Shahabi H., Khezri S., Ahmad B. B et Allahverdias H (2012). Application of satellite images and comparative study of analytical hierarchy process and frequency ratio methods to landslide susceptibility mapping in central zab basin, nw iran. International Journal of Advances in Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 2, pp. 103-112.

Sossey A., 2005. Traitement et intégration des données satellitaires optiques et Radar dans un SIG en vue de l'obtention de carte de l'aléa lié aux instabilités de terrain dans la péninsule de Tanger (Rif septentrional, Maroc). Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat. 175p.

Svoray T, Bar P, Bannet T. 2005. Urban land-use allocation in a Mediterranean Ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using multi-criteria mechanism. Landscape and Urban Planning 72: 337–351.

Visintainer P., Turrini M. C. 1995. Carta della pericolosità di eventi naturali della Val Duron (Trentino Alto Adige). Geologia Tecnica ed Ambientale 2:17–33

Voogd H., 1983. Multi-criteria evaluation for urban and regional planning. Pion Ltd., Londres, 255p.

Yalcin A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey) : comparisons of results and confirmations. Catena, 72, pp 1–12.

Youan T. M., 2008. Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de l'Université Felix Houphouët Boigny, 270 p.