Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 53-67

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'INONDATION DANS LA RÉGION SEMI-MONTAGNEUSE À LOUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE : APPORTS DES MNA ET DE L'IMAGERIE SATELLITAIRE

MAHAMAN BACHIR SALEY[a,1], FERNAND KOFFI KOUAMÉ[b,1,2], MARIE JOSÉE PENVEN[c,2] JEAN BIÉMI[a] et HÉLÈNE BOYOSSORO KOUADIO[d,1]

[a] *Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Laboratoire associé francophone (LAF n° 401), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody 22 B.P. 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire Téléphone/télécopieur : (225) 22-445-270*

[b] *Climat et occupation du sol par télédétection (COSTEL) Université de Rennes 2 – Haute-Bretagne, place du Recteur Henri Le Moal 35 043 Rennes Cedex, Franc Téléphone : (33) 0-299-141-844*

Courriel [1,2,3,4] : saley1@hotmail.com ; kouamef@yahoo.fr ; marie-josee.penven@uhb.fr ; kbhel@yahoo.fr

(soumis : 10 mars 2004 ; révisé : 25 mai 2004 ; accepté 6 octobre 2004)

L'objet de cet article est l'identification et la cartographie des zones à risque d'inondation de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Il est fondé sur l'intégration dans un système d'information géographique (SIG), de données interprétées à partir d'images TM de Landsat, de produits dérivés d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et des données hydroclimatiques. Le traitement des données comporte différentes phases : *1)* création d'un MNA à partir des courbes de niveau et de points cotés extraits d'une carte topographique, *2)* calcul de variables morphométriques à partir du MNA, *3)* traitement numérique des images TM et cartographie thématique, *4)* intégration des données (cartes thématiques issues des traitements d'images, MNA et images dérivées, données exogènes) et analyse spatiale dans un SIG. Les principaux facteurs de risque d'inondation considérés sont : la pluviosité, la couverture du sol, le réseau hydrographique, la pente du terrain et les domaines litho-structuraux. L'analyse spatiale multicritère, réalisée dans un SIG a permis d'élaborer la carte des aléas ainsi que celle de la vulnérabilité à l'inondation. La combinaison de ces deux cartes permet la cartographie des zones à risque d'inondation. Cette carte comporte quatre classes allant du faible risque au très fort risque d'inondation. Les zones à moyen et fort risque couvrent 65 % du territoire. Elles sont situées dans la partie australe et dans les plaines alluviales attenantes aux principaux cours d'eau (Sassandra, à l'ouest et Bafing au nord). La carte obtenue peut être utilisée non seulement pour la prévention des risques d'inondation mais aussi pour la gestion des ressources naturelles dans la région de Man (ouest de la Côte d'Ivoire).

Mots-clefs : Télédétection ; SIG ; MNA ; aléa ; risque d'inondation ; Côte d'Ivoire.

MAPPING OF THE FLOODING RISK AREAS OF WESTENR SEMI-MOUNTAINOUS REGION OF CÔTE D'IVOIRE: CONTRIBUTION OF DIGITAL ELEVATION MODEL AND SATELLITE IMAGERY

The aim of this paper is to identify and map the risk of flooding areas in the semi-mountainous region of Côte d'Ivoire. This work is based on the integration within a GIS of data interpreted from Landsat TM imagery, image based on a digital elevation model (DEM), and hydroclimatic data. The processing steps, using remote sensing and GIS softwares, include : *1)* DEM building with contour level extracted from topographic map, *2)* determination of morphometric variables using DEM, *3)* processing of Landsat TM imagery and thematic mapping, and *4)* integration of the different layers deduced from satellite data, DEM and its derived data, complementary data and spatial analysis within a GIS. The main flooding risk factors are : rainfall, land cover, rivers network, slopes, lithologic and structural domains. Multicriteria spatial analysis into a GIS allowed mapping the hazards and the vulnerable areas. The integration of these layers allowed mapping the flooding risk of this study area of Côte d'Ivoire. The resulting map shows four clusters varying from low to very high flooding risk. The risk of mean and high flooding is about 65 % of the whole study area and concern alluvial area of southern, and toward the principle rivers : Sassandra (in the western) and Bafing (in the northern). The large extension of vulnerable flooding areas imposes us to take it into account to predict flooding risk and to manage natural resources in the Man region (western of Côte d'Ivoire).

Keywords : Remote Sensing ; GIS ; DEM . hazard ; flooding risk ; Côte d'Ivoire.

1. INTRODUCTION

Les risques hydrologiques constituent une préoccupation majeure en matière d'aménagement et de gestion du territoire. En milieu tropical humide, ils sont liés aux occurrences de pluie de très forte intensité et de durée parfois longue. Les désastres environnementaux causés sont, entre autres, des glissements de terrain et des inondations qui ont des conséquences très graves sur les activités socio-économiques et sur les populations concernées.

Dans la région semi-montagneuse de Man, les inondations constituent une des manifestations les plus dramatiques de la variabilité hydroclimatique. En effet, la tendance à la hausse de la pluviométrie constatée depuis 1994 (Kouamé, 1999 ; Saley, 2003) a entraîné des catastrophes d'une gravité exceptionnelle dont des éboulements de terrain, des ruptures d'équilibre des aquifères perchés et des inondations dans de nombreuses localités.

En région de montagne, le relief constitue un facteur incontournable dans les études environnementales (Giannetti *et al.*, 2001 ; Mulders, 2001). Les attributs topographiques et la géomorphologie, représentés par les modèles numériques d'altitude (MNA), permettent de déterminer des paramètres descriptifs de l'environnement, pouvant être utilisés dans les analyses des états de surface. En effet, les MNA sont porteurs de la géomorphologie du terrain et peuvent donc renseigner l'espace hydrographique (Puech, 2000) sur ses grandes structures (crêtes, limites de bassin, cheminement de l'eau), mais aussi sur les éléments locaux du relief (degré, convexité et courbure de la pente).

L'identification et la cartographie des zones sensibles aux risques hydroclimatiques et géologiques constituent l'objet principal de cet article. L'approche méthodologique utilisée est fondée sur le couplage des données de la télédétection satellitaire, des MNA et des données exogènes complémentaires (lithologie, morphostructure, climat, etc.). Elle permet de créer de nouvelles couches d'informations thématiques, qui sont ensuite, intégrées dans un système d'information géographique (SIG).

Les images TM de Landsat sont adaptées à la connaissance des états de surface en région d'accès difficile, comme c'est le cas de l'Ouest ivoirien et permettent d'améliorer ou de mettre à jour les cartes thématiques avec le nécessaire contrôle sur le terrain. Une cartographie structurale détaillée de la région de Man-Danané (Kouamé *et al.*, 1999) a été réalisée par interprétation visuelle des images TM de Landsat, complétée et validée grâce aux données exogènes complémentaires : levés de terrain, cartes géologiques et photogéologiques.

Par ailleurs, l'utilisation des MNA en géologie et en géomorphologie (Chorowicz *et al.*, 1989 ; Deffontaines, 1990, 2000) permet la cartographie de certains indicateurs morphométriques du paysage telles que la pente, l'exposition, la convexité horizontale, les courbures minimales et maximales, etc. De ce fait, l'exploitation des MNA facilite l'identification et la cartographie des zones d'alluvions fluviatiles soumises à la fois à l'étiage et à la crue des eaux.

Dans ce travail, l'analyse croisée des facteurs relatifs à la vulnérabilité du terrain à l'inondation et des facteurs hydroclimatiques à l'intérieur d'un SIG a permis de cartographier les zones à risque d'inondation. La carte obtenue présente des intérêts socio-économique et sécuritaire et doit servir de support non seulement à la prévention des risques d'inondation mais aussi à la gestion intégrée des ressources naturelles dans cette région. L'utilisation et l'intégration dans un SIG d'images satellitaires à très haute résolution spatiale telles cilles des capteur d'IKONOS, de QUICKBIRD, de SPOT-5 et de RESOURCESAT-1, couplées à des données exogènes, sont indispensables pour des études détaillées au niveau des principales agglomérations localisées dans des zones à forte vulnérabilité telle que la ville de Man.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

2.1. Cadre géographique

La région semi-montagneuse de Man est située à l'ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 7° et 8° Nord et les longitudes 7° et 8° Ouest (figure 1a). Cette région constitue le prolongement oriental de la Chaîne guinéenne dont la plus grande partie se trouve en Guinée. Les massifs charnockitiques et granito-gneissiques occupent près de la moitié du territoire et culminent à plus de 1 000 m au niveau des monts Dan et des monts Toura (figure 1b).

Le climat de la région est de type tropical humide (1 400 à 2 200 mm de pluie par an avec une moyenne interannuelle estimée à environ 1 600 mm) avec deux saisons : une saison sèche qui dure 4 mois (novembre à février) et une longue saison pluvieuse de 8 mois (mars à octobre). La pluviométrie est croissante du NE vers le SO (Kouamé, 1999). Au cours des décennies 1970 à 1990, la sécheresse continue et quasi généralisée dans les régions tropicales africaines (Paturel *et al.*, 1995, 1998 ; Lubès *et al.*, 1998) a également affecté la région d'étude (Ouest de la Côte d'Ivoire). Cette régression pluviométrique temporelle et spatiale a eu un impact néfaste sur les ressources en eau et les écosystèmes naturels. Mais, depuis 1994, on observe une hausse de la pluviosité dans la région (Kouamé, 1999 ; Saley, 2003). La figure 2 illustre l'évolution de l'indice pluviométrique de Nickolson (Nickolson,

1980) à la station de Man, pendant la période allant de 1923 à 2000. Elle présente les fluctuations entre année humide et année sèche, ainsi que la période excédentaire de 1994 à 2000.

La forte pluviosité est un facteur de géorisque qui engendre des inondations et une instabilité des aquifères perchés sur les versants des massifs montagneux.

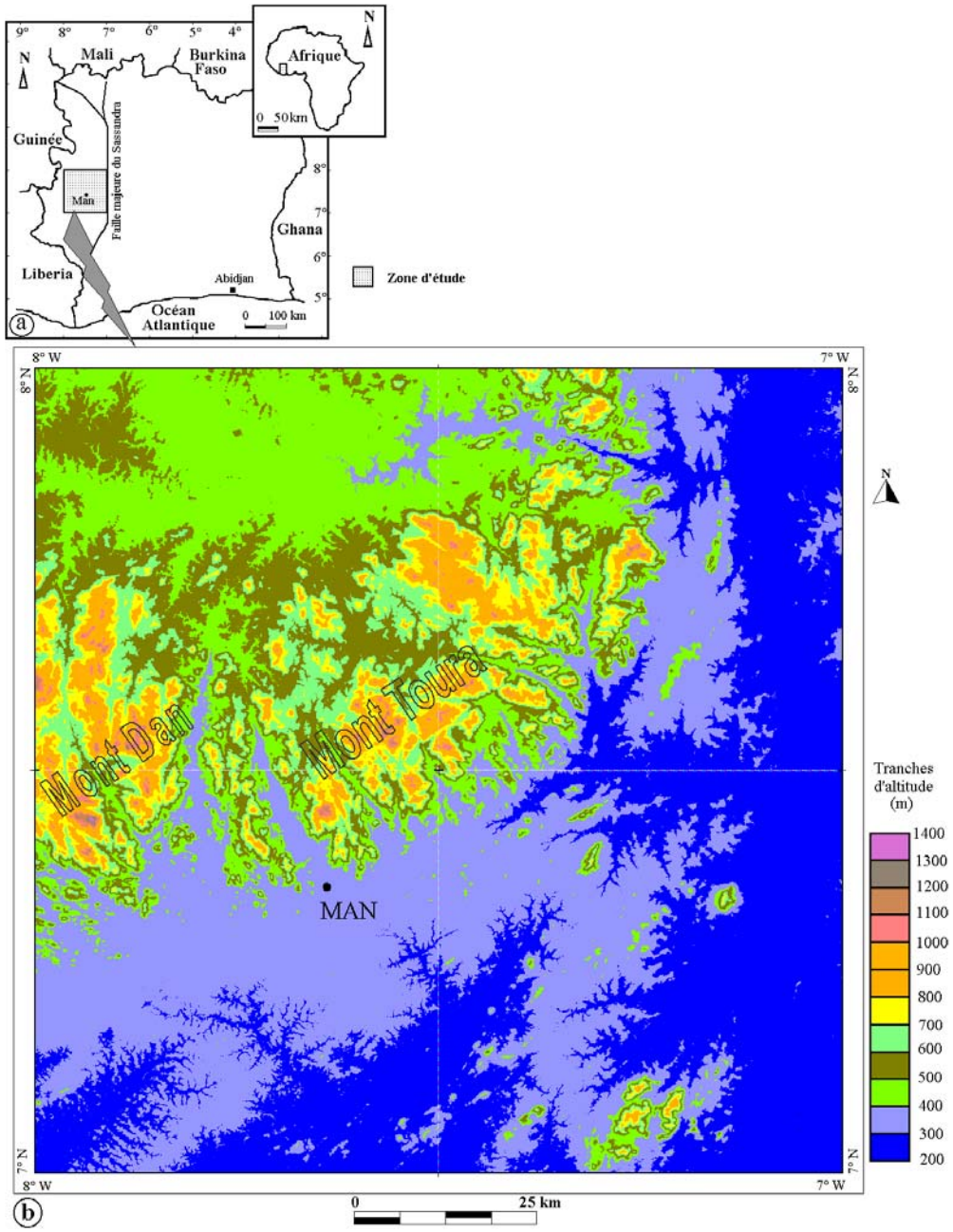


FIGURE 1 Présentation de la région semi-montagneuse de Man : a) situation géographique ; b) aperçu des altitudes. *Presentation of the semi-mountainous region of Man : a) geographical location ; b) elevation map.*

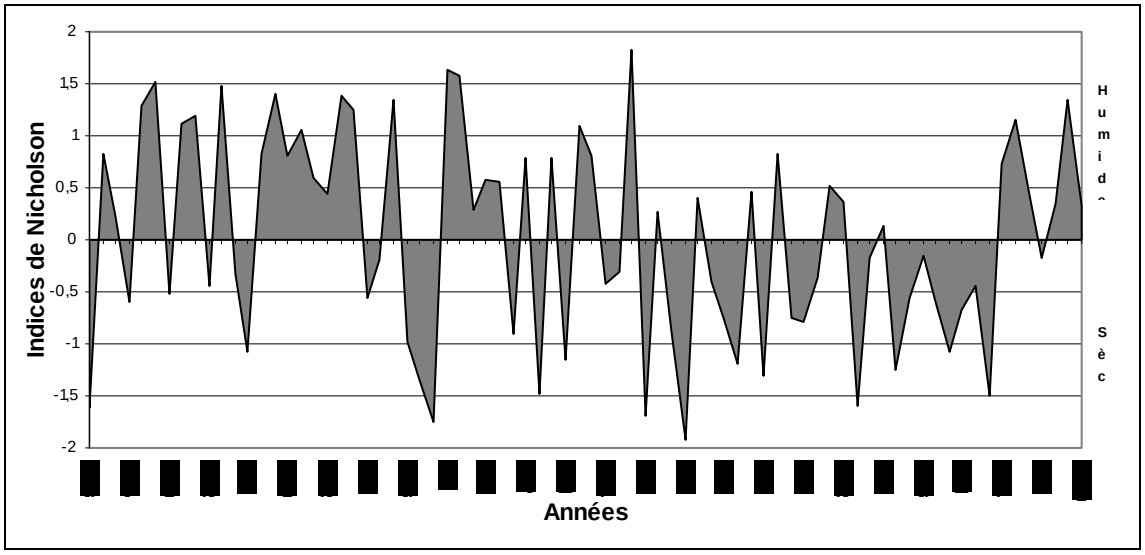


FIGURE 2 Variabilité temporelle du climat à la station de Man (1923-2000) ; l'indice de Nickolson est positif pour les années humides et négatif pour les années sèches. *Climatic temporal variability of Man station (1923-2000) ; Nickolson index is positive for wet years and negative for dry years.*

2.2. Contexte géologique

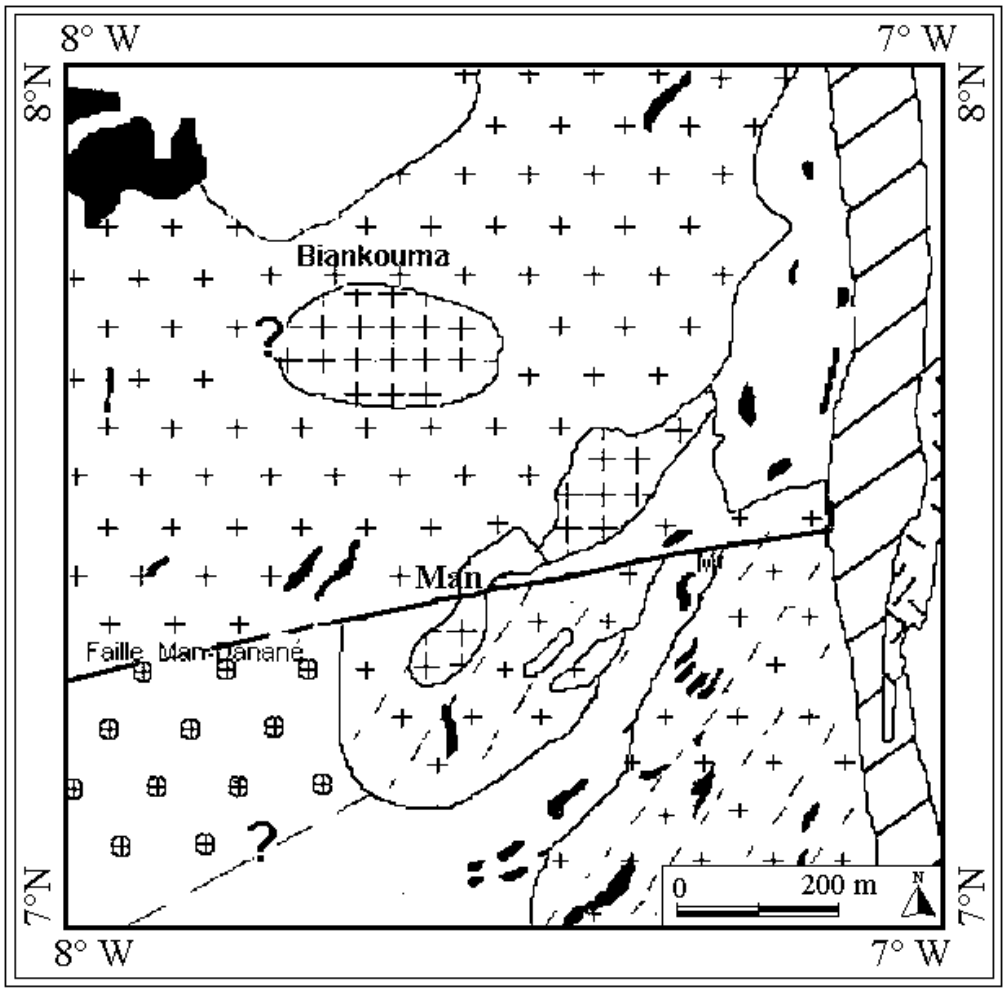
La région semi-montagneuse de Man appartient au domaine archéen (3 500-2 500 Ma.) de la dorsale de Man (Camil, 1984 ; Kouamélan, 1996 ; Yacé, 2002). Les roches sont de nature cristalline et cristallophyllienne (gneiss gris tonalitiques, charnockites, gneiss migmatitiques, migmatites, quartzites à magnétite, etc.) (figure 3) et se répartissent entre deux principaux domaines (Camil, 1984) séparés par la faille de Man-Danané d'orientation N 70-80° : le domaine granulitique au nord et le domaine migmatitique au sud. Un domaine intermédiaire de nature granulitique et migmatitique est identifié par Kouamélan (1996). Ces formations ont été structurées au cours des orogenèses Léonienne (3 500-2900 Ma.) et libérienne (2 900-2 500 Ma.).

Les travaux de Camil (1984) permettent de distinguer deux phases majeures de déformation : la première se manifeste par des plis isoclinaux à axes fortement plongeant (45-60°) de direction NE-SO et la seconde se caractérise par une succession de synformes et d'antiformes à flancs fortement redressés et d'orientation NE-SO. Le plongement de ces structures est faible (15 à 30°). Ces phases sont bien visibles non seulement sur les gneiss migmatitiques, mais aussi sur les quartzites à magnétite qui sont en concordance structurale avec les roches encaissantes. Par traitement numérique des images satellitaires TM de Landsat, Kouamé *et al.* (1999) ont établi une carte structurale (figure 4), qui témoigne de l'intense activité tectonique qui a affecté l'ouest semi-montagneux ivoirien. Le plus important de ces accidents est la faille majeure du Sassandra, de direction N-S, qui sépare le domaine archéen auquel appartient le secteur d'étude, du domaine paléoprotérozoïque (2 400-1 600 Ma) situé à l'est de la faille. De nombreux travaux réalisés sur l'histoire tectonique de la faille du Sassandra font d'elle un accident dextre pour Wilson (1968), sénestre pour de nombreux autres auteurs, dont Roques (1968), Tagini (1971) et Feybesse *et al.* (1989). Les travaux de Djro (1998) montrent que l'accident du Sassandra n'est pas un phénomène instantané ou unique. Il s'agit de multiples rejeux, dont le mouvement est fonction du tenseur de contraintes des différentes époques géologiques, accompagnées d'un degré de métamorphisme différent et de périodes de faible activité tectonique.

3. MATÉRIEL

L'imagerie satellitaire provenant du capteur TM de Landsat-5 et divers documents cartographiques sont utilisés. Les images TM (P/R : 198-55), enregistrées en période sèche (28/12/1990), en l'absence de couverture nuageuse, sont d'un niveau radiométrique acceptable et permettent une bonne perception des structures géologiques.

Les cartes géologiques de Camil (1984) au 1/200 000 et de Kouamélan (1996) au 1/500 000, la carte photogéologique au 1/200 000 (Kenting et SODEMI, 1978), réalisée à partir de photographies aériennes et complétée par les mesures structurales recueillies au cours des levés sur le terrain complètent la base de données litho-structurale.



Domaine granulitique Nord

Gneiss gris tonalitique

Charnockite et Granodiorite

Amphibolo-pyroxénite avec ou sans quartzite

Domaine Sud des migmatites à biotite

Migmatite à biotite

Complexe des quartzites

Domaine granulitique et migmatitique intermédiaire

Migmatite à hypersthène

Ilots de gneiss alumineux

Orthogneiss oeillés

Amphibolo-pyroxénite avec ou sans quartzite

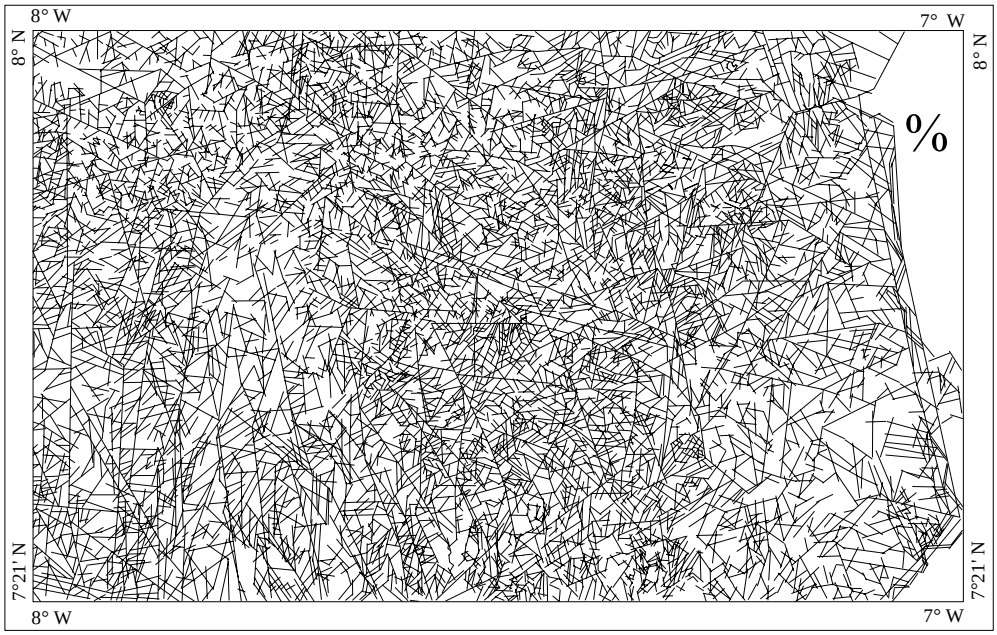
Zone mylonitique de la faille du Sassandra et volcanites Birrimiens

Contact ou contour inconnu

Faille

(extrait de Kouamélan, 1996)

FIGURE 3 Carte géologique de la région d'étude. *Geological map of the study area.*



(extrait de Kouamé *et al.*, 1999)

FIGURE 4 Carte linéamentaire détaillé de Man. *Detailed lineament map of Man area.*

La carte topographique de Man au 1/200 000, de l'Institut géographique national (France) (projection UTM, ellipsoïde de Clarke 1880) est numérisée (équidistance des courbes de niveau 40 m) pour créer un MNA, d'où peuvent être extraits divers produits dérivés (estompage, orientation des facettes, pentes, etc.).

La carte du bilan forestier (CCT, 1993) au 1/200 000 ainsi que les relevés pluviométriques de 1923 à 2000, acquis auprès de la Société de développement et d'exploitation aéroportuaire et maritime (SODEXAM) sont également utilisés.

Les traitements des images TM et des données géomorphométriques (Depraetère, 1984) sont réalisés à l'aide du logiciel EASI PACE de PCI 6.2®. La combinaison des différentes cartes thématiques et la cartographie des zones à risque d'inondation est effectuée à l'aide du logiciel de système d'information géographique (SIG) : ArcView 3.2® (ESRI). La figure 5 résume le processus de traitement des données.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1. Apports des MNA et des fichiers dérivés à l'analyse morphostructurale

Le MNA est créé au pas de 50 m à partir des courbes de niveau (équidistance : 40 m) et des points cotés relevés sur la carte topographique. Afin d'assurer une concordance et une conformité avec la résolution spatiale des images TM, le MNA est rééchantillonné au pas de 30 m. À partir du MNA, dans un premier temps, on procède au calcul de variables morphométriques (estompage, pente, orientation des facettes, convexité, courbures minimale et maximale, etc.) et, dans un deuxième temps, à la représentation en 2D ou en 3D des états de surface. Parmi les nouveaux produits obtenus grâce au MNA, l'image d'estompage qui est le produit vectoriel de l'illumination sur l'exposition du pixel, met bien en évidence l'aspect très accidenté de la région. À partir d'estompages variés, une cartographie morphostructurale peut être établie (Deffontaines *et al.*, 1994 ; Jenson and Domingue, 1998). Les analyses géologique et structurale réalisées à partir du MNA et des fichiers dérivés sont confrontées ensuite à celles provenant de l'interprétation des images TM de Landsat.

Après la caractérisation des ensembles morphologiques, les pentes du terrain sont extraites du MNA et s'organisent en quatre classes : faible (0-2 %), modérée (2-5 %), fort (5-15 %) et très fort (> 15 %). La caractérisation des systèmes de pente est nécessaire pour la cartographie de la vulnérabilité des terrains.

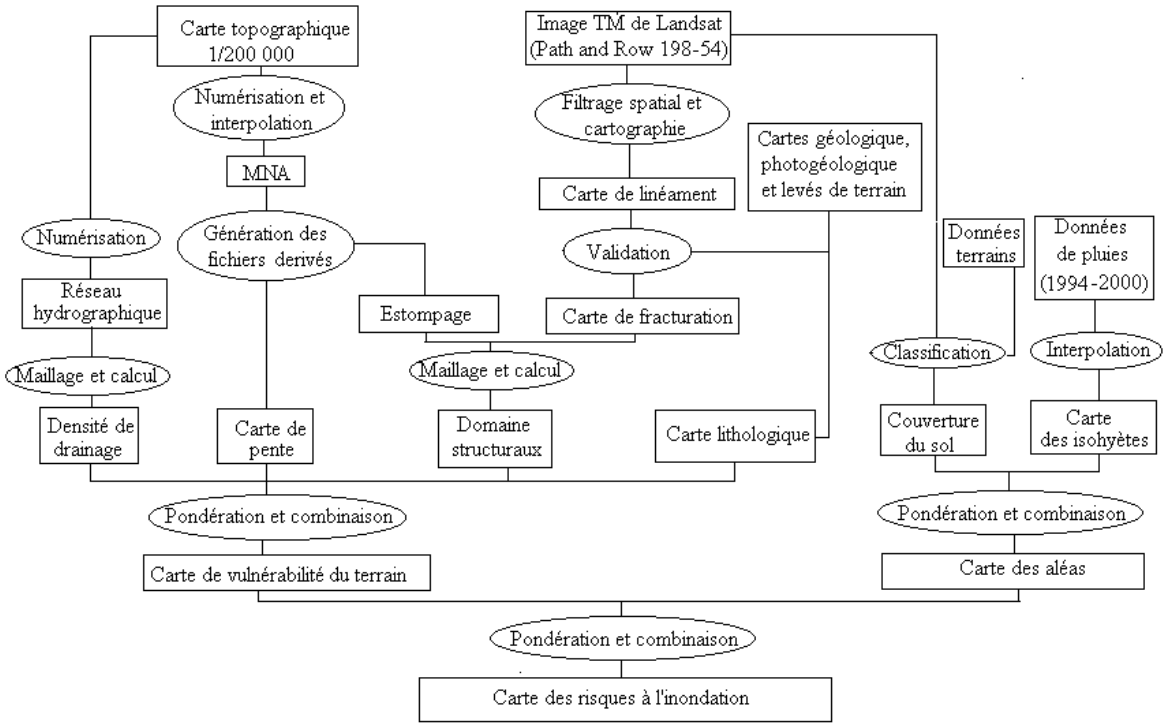


FIGURE 5 Organigramme des étapes de cartographie des risques à l'inondation. *Flowchart of mapping the flooding risk.*

4.2. Imagerie satellitaire et cartographie des états de surface

La cartographie des états de surfaces est effectuée à l'aide des images TM de Landsat. Deux types de cartes sont établies : la carte structurale et la carte des types de couverture du sol. La première carte est l'un des facteurs qui intervient dans la cartographie de la vulnérabilité du terrain et la seconde renseigne sur la typologie du couvert végétal et l'état de l'occupation du sol.

La première étape des traitements a consisté en une correction géométrique des images TM à partir de la carte topographique de Man (projection UTM, ellipsoïde de Clarke 1880). Une sélection de 15 amers, représentant des confluences de cours d'eau et des croisements de routes, permet de faire une rectification géométrique grâce à un polynôme du second degré. Le ré-échantillonnage des images est réalisé par la méthode du plus proche voisin et l'erreur résiduelle moyenne est évaluée à un demi-pixel (soit 15 m), ce qui est satisfaisant car une erreur globale de l'ordre du demi-pixel résulte d'une bonne correction (PCI, 1997).

La deuxième étape concerne l'extraction thématique, notamment la cartographie structurale et la cartographie de la couverture du sol. Pour la cartographie structurale, l'application des techniques de filtrage spatial (gradient ou dire-ctionnel) permet le rehaussement des discontinuités images et facilite l'identification ainsi que l'extraction manuelle des linéaments (Kouamé *et al.*, 1999). Le terme « linéament » a été défini pour la première fois par Hobbs (1904). Dans cet article, le linéament décrit, toute structure ayant un tracé rectiligne ou curviligne et dont l'interprétation à une signification géologique (Deslandes et Gwyn, 1991).

Le couplage de la carte des linéaments (extraits des images TM) à l'estompage (produit dérivé du MNA) permet d'améliorer l'interprétation des structures linéaires (failles, joints) et des morpho-structures. Les résultats cartographiques sont confrontés aux mesures structurales de terrain afin de faire une validation de la signification structurale des linéaments cartographiés.

Concernant la phase de cartographie des états de surface, les images TM, complétées par les relevés sur le terrain ont servi à l'établissement de la carte du couvert végétal (CCT, 1993). Les différentes classes sont : forêt, mosaïque forêt-culture, mosaïque culture-forêt, culture, savane (arbustive ou arborée), inselberg et agglomération + sol nu ou à couverture végétal peu dense.

Cette carte intervient dans l'analyse de l'écoulement de surface des eaux.

4.3. Cartographie spatiale par combinaison multicritère

L'étude du phénomène d'inondation est complexe et il apparaît utile de préciser les paramètres pris en compte dans la région semi-montagneuse de Man. Ces paramètres sont constitués des variables environnementales et naturelles dont la susceptibilité à produire une inondation est effective. Il s'agit des modelés, des systèmes de pentes, de la densité (en nombre) de fractures, de la lithologie, du réseau hydrographique, de l'occupation du sol et de la pluviométrie. Une analyse de ces facteurs conduit à définir deux descripteurs de l'inondation : la vulnérabilité du terrain à l'inondation et l'aléa hydroclimatique. Dans ce travail, les facteurs sont considérés comme ayant la même importance et, par conséquent, interviennent avec la même pondération lors des croisements dans le SIG. D'après Mulders (2001), l'utilisation d'une approche multicritère permet la prédiction spatiale des mouvements superficiels (glissements de terrain, fluages, inondations) et l'application d'analyses multiples aboutit à des cartographies thématiques fiables.

4.3.1. Cartographie de la vulnérabilité à l'inondation

Dans la région de Man, le secteur des hauts sommets (massifs des Dan et des Toura) présente une forme de croissant et occupe la partie centrale. Les zones de plateau se rencontrent au sud et au NE. Le relief constitue un facteur incontournable conditionnant les processus de cheminement de l'eau à la surface du sol. Les caractéristiques géomorphologiques (pente du terrain, réseau de drainage) et géologiques (domaines litho-structuraux) de la région de Man sont les différents facteurs pris en compte dans la cartographie de la vulnérabilité à l'inondation.

Le traitement des données relatives à ces différents facteurs a permis d'établir des cartes thématiques. L'une des cartes est celle des pentes, produit dérivé du MNA. Une autre est celle des ensembles lithologiques tels que décrits par Kouamélan (1996). Les deux dernières cartes sont des cartes de densité (drainage, fracturation), obtenues après un maillage (discrétisation) de la zone en carrés de 2 km de côté et le calcul de la longueur cumulée par maille. Des classes de faible, moyenne, forte et très forte densité sont définies. Le réseau hydrographique sert également à la modélisation des lits mineurs et majeurs dans la propagation des inondations. La zone d'influence des principaux cours d'eau est donc cartographiée (Sharon and Burnett, 2003).

La forte densité de drainage se rencontre dans les régions à substratum rocheux imperméable et la faible densité de drainage dans les régions à substratum rocheux perméable.

La densité de fracturation, elle, permet de caractériser les domaines structuraux, dont le comportement est fortement lié à la perméabilité induite par les fractures. C'est l'ouverture des fractures (Françiss, 1970) qui conditionne beaucoup ce paramètre. Les travaux sur le terrain permettent d'identifier les fractures conductrices, non colmatées et d'intérêt hydrogéologique certain. La carte lithologique et la carte de fracturation sont couplées pour délimiter les ensembles litho-structuraux.

L'analyse croisée de ces facteurs (même pondération pour tous les facteurs) dans le SIG permet l'élaboration de la carte de vulnérabilité à l'inondation de l'ouest semi-montagneux ivoirien. Les zones prédisposées à l'inondation sont celles situées dans les secteurs de faible perméabilité et à pente nulle ou faible, en contrebas des reliefs, où le réseau de drainage est dense (infiltration faible, concentration rapide des eaux) et où la densité de fracturation est faible. De plus, le risque à l'inondation est maximal aux abords immédiats des cours d'eau.

4.3.2. Cartographie de l'aléa

L'aléa fait référence aux phénomènes hydroclimatiques et à leurs conséquences sur l'écoulement des eaux. C'est la pluviosité qui déclenche les inondations. En effet, l'occurrence et l'intensité des pluies, paramètres naturels qui ne sont pas maîtrisables, quelles que soient les dispositions de prévention, sont les paramètres prépondérants de l'inondabilité. À partir des données de précipitations (période 1994-2000, où une hausse de la pluviosité est observée), la carte des isohyètes a été établie. Quatre classes de pluviosité sont définis : faible (< 1 500 mm), modérée (1 500-1 600 mm), forte (1 600-1 800 mm) et très forte (> 1 800 mm).

Un deuxième paramètre est le couvert végétal, qui retient une proportion variable de la pluie (eau d'interception) au cours d'une averse. La forêt, par exemple, intercepte une partie de la pluie par sa frondaison et exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. Elle régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues de faible et moyenne amplitudes. Par contre, son action sur les débits extrêmes causés par des crues catastrophiques peut être réduite. C'est pour cette raison que la typologie de la couverture du sol de l'ouest semi-montagneux est pris en compte dans la cartographie de l'aléa. En prenant en compte le rôle des différentes classes d'occupation de sol de la carte du couvert végétal (CCT, 1993) dans la production des écoulements de surface, une nouvelle classification est réalisée et permet de retenir quatre classes : rôle très faible (forêt et dômes rocheux dénudés), rôle faible (savane et mosaïques forêt-cultures), moyen (cultures et mosaïques cultures-

forêts) et fort (agglomérations et sols nus ou à couvert végétal peu dense). Le croisement de ces deux facteurs (pluviosité et couvert végétal) a permis de cartographier l'étendue spatiale et les zones potentiellement exposées aux aléas climatiques pouvant engendrer des inondations.

5. RÉSULTATS

5.1. Modelés morphostructuraux et linéaments

Les modelés structuraux et l'aspect très accidenté de l'Ouest ivoirien sont bien mis en évidence sur les images d'estompage (figure 6). On distingue :

1) une zone centrale marquée par un relief très accidenté en forme de croissant avec la concavité tournée vers le NO ;

2) des hauts plateaux au NO d'altitude comprise entre 400 et 600 m ;

3) une plaine occupant le sud et l'est, d'altitude comprise entre 200 et 400 m.

L'utilisation du MNA et des produits dérivés en combinaison avec les données provenant des images TM et des levés sur le terrain améliore l'analyse morphostructurale de la région de Man. En effet, les possibilités de représentation en perspective permettent de donner une signification structurale aux linéaments interprétés à partir de l'imagerie satellitaire, en plus des levés sur le terrain (mesures structurales). Tel que souligné par de nombreux auteurs, dont Chorowicz *et al.* (1989), Deffontaines *et al.* (1994) ainsi que Jenson et Domingue (1998), les MNA constituent un outil pertinent d'analyse des formes du relief et facilitent la cartographie morphostructurale.

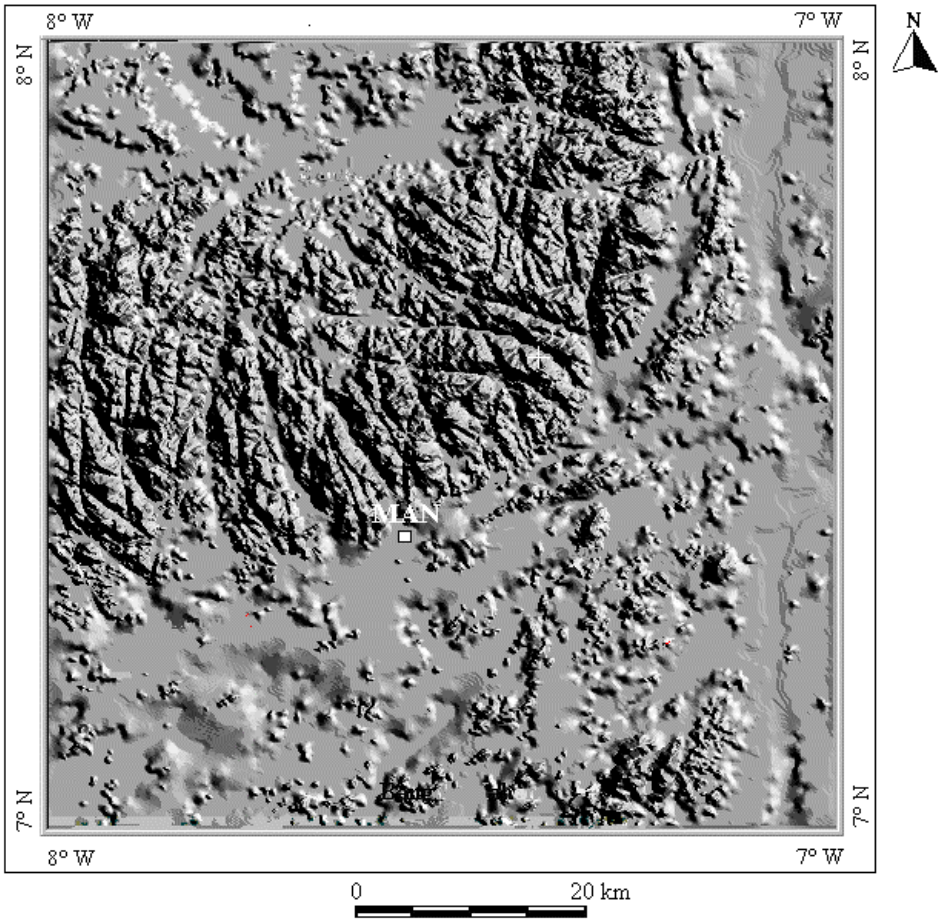


FIGURE 6 Estompage dérivé du modèle numérique d'altitude de Man. *Hillshading from the DEM of the Man region.*

5.2. Vulnérabilité à l'inondation

La carte de vulnérabilité à l'inondation provient de la combinaison, à l'intérieur d'un SIG, de diverses cartes : la carte des pentes (figure 7a), la carte de densité de drainage (figure 7b), la carte des zones d'influence des cours d'eau (7c) et celle des domaines litho-structuraux (figure 7d). La vulnérabilité à l'inondation identifie tous les secteurs où les caractéristiques intrinsèques de l'environnement (caractéristiques géologiques et géomorphologiques) sont susceptibles de favoriser une inondation. La carte de vulnérabilité à l'inondation (figure 8) présente quatre zones dont la vulnérabilité à l'inondation varie du faible au très fort.

Les zones de faible vulnérabilité à l'inondation couvrent 5 % du secteur d'étude et sont disséminés au niveau de la ligne de crête qui prolonge la Chaîne guinéenne. Les zones de vulnérabilité modérée à l'inondation correspondent aux zones à pente moyenne où le ruissellement sur les versants des massifs rocheux ne permet pas à l'eau de stagner. Ces zones sont localisées au centre et occupent 20 % du territoire. Les zones de forte vulnérabilité à l'inondation occupent 55 % du territoire. Ces zones concernent les vastes plaines sujettes à la submersion et sont situées au NO, au centre et au sud du territoire. Les agglomérations de Man, Biankouma et Sangouiné sont situées dans ces zones. Les zones de très forte vulnérabilité à l'inondation occupent 20 % du territoire et sont situées aux abords du lit mineur et aux points les plus bas du lit majeur des fleuves Sassandra à l'est et du Bafing au Nord.

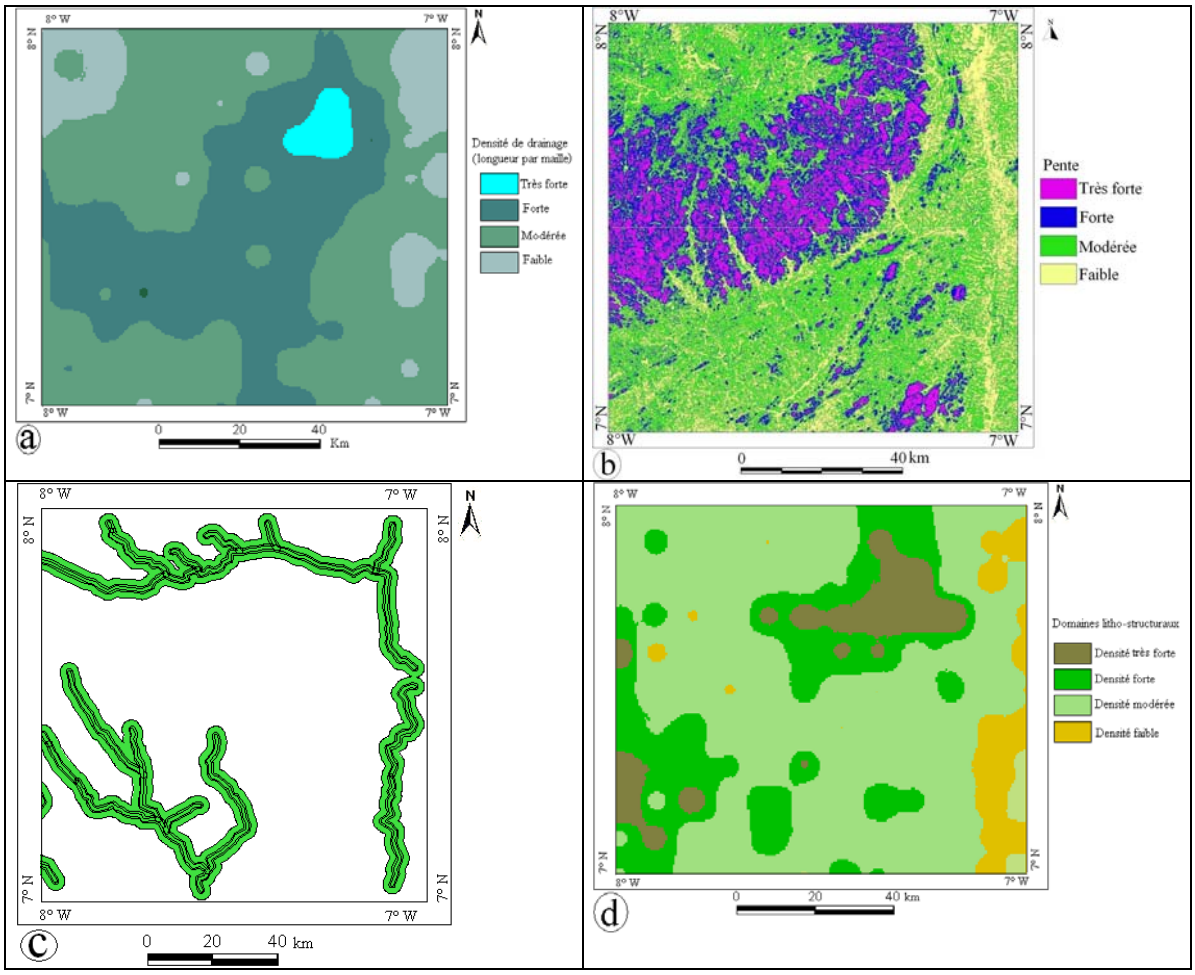


FIGURE 7 Différentes cartes thématiques pour l'établissement de la carte de vulnérabilité à l'inondation : a) carte des pentes ; b) carte de densité de drainage ; c) carte des zones d'influence des cours d'eau ; d) carte des domaines litho-structuraux. *Different thematic map for flooding vulnerability map establishment : a) slope map ; b) drainage density map ; c) rivers influence area map d) lithologic and structural domain map.*

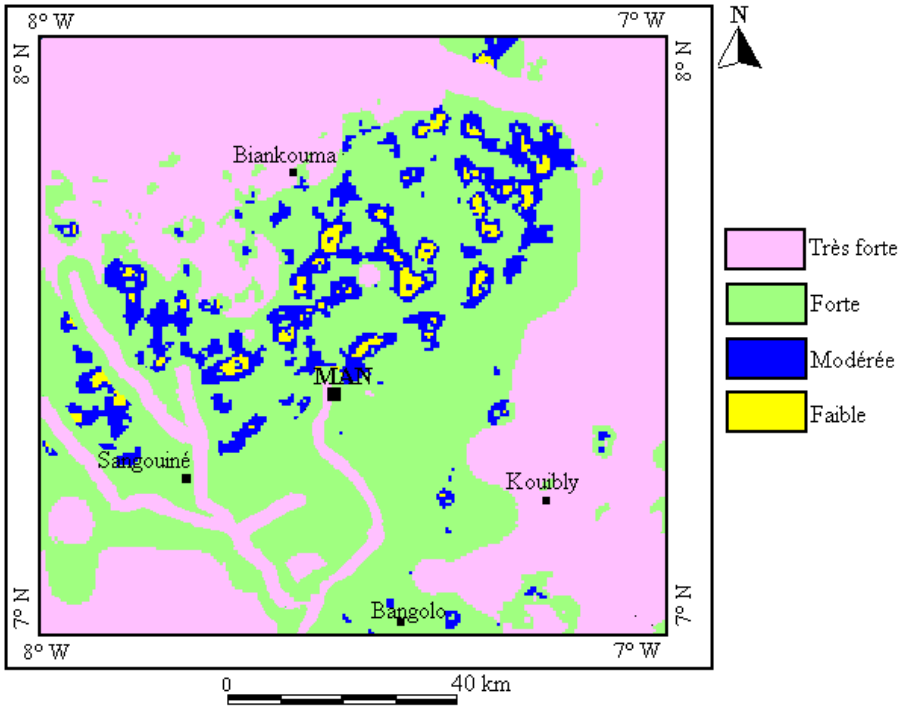


FIGURE 8 Carte de vulnérabilité à l'inondation de la région de Man.
Flooding vulnerability map of the Man region.

5.3. Évaluation de l'aléa : phénomène naturel physique

La carte de l'aléa établie par combinaison de la carte de la répartition spatiale des isohyètes (figure 9a) et de celle de la couverture du sol (figure 9b) comprend quatre classes à aléa variable et est représentée à la figure 9c.

La zone à faible aléa occupe 8 % du territoire et se situe principalement dans l'axe de drainage du fleuve Sassandra. Elle appartient au secteur à pluviométrie annuelle inférieure à 1 500 mm, à couvert végétal dense (forêt classée du haut Sassandra). Les zones à aléa moyen sont dispersées sur l'ensemble du territoire et correspondent aux secteurs à couverture végétale moyennement dense (mosaïque forêt-culture, savane). Elles représentent 7 % de la superficie totale du territoire. L'aléa est fort et très fort sur le reste du territoire, soit 85 % de la région. Lorsque le sol est nu ou qu'il est recouvert d'une végétation peu dense, avec une pluviométrie annuelle supérieure à 1700 mm, le risque est maximum. Les localités de Man, Kouibly, Biankouma et Sangouiné sont situées dans cette zone.

5.4. Zones à risque d'inondation

Le risque d'inondation s'évalue par le croisement des cartes thématiques relatives à la vulnérabilité à l'inondation et à l'aléa (facteur déclencheur). La carte du risque à l'inondation (figure 10) présente quatre zones dont le risque varie de faible au très fort.

Les zones à risque faible couvrent 11 % du territoire d'étude et correspondent aux sommets rocheux dénudés ou peu fracturés.

Les zones à risque moyen couvrent 15 % du territoire. Elles se rencontrent dans les secteurs à pente moyenne sur les flancs des montagnes. Ces zones peuvent évoluer vers les zones à risque fort lorsque la densité de fracturation y est élevée. L'inclinaison de la pente peut les rendre instables et très vulnérables en cas de grandes pluies. Aussi, les aquifères perchés cèdent parfois sous le poids de l'eau et peuvent engendrer des éboulements ou même des déplacements superficiels de matière solide (altérite).

Les zones à fort risque sont situées dans les secteurs à pente moyenne ou faible, avec un couvert plus ou moins dense, Elles occupent 44 % du territoire et s'étendent principalement dans la partie centrale. Ces zones présentent un danger évident lors des crues.

Les zones à très fort risque sont situées aux abords immédiats des cours d'eau et occupent 30 % du territoire. Ces zones correspondent aux plaines alluviales et aux lits majeurs des fleuves Sassandra (est) et Bafing (NO), et sont couvertes par les eaux au cours des mois les plus arrosés (juin-septembre) de la saison des pluies.

La carte de risque à l'inondation établie définit l'étendue et l'importance des inondations et constitue une base solide pour : des campagnes d'informations aux populations, informer les autorités régionales responsables des éventuels aménagements à entreprendre et pour délimiter les zones à haut risque.

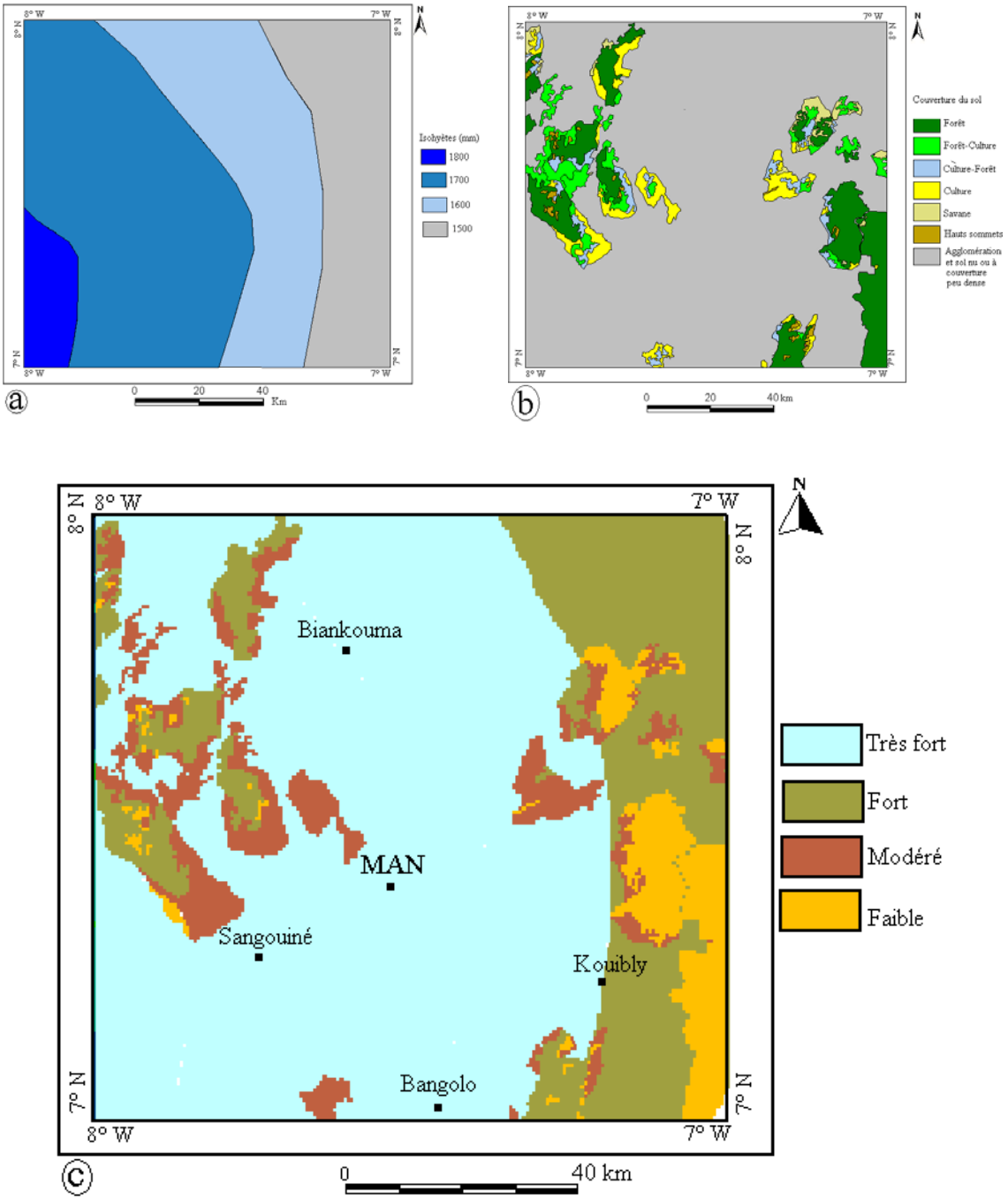


FIGURE 9 Cartographie de l'aléa d'inondation de la région de Man : a) carte des isohyètes ; b) carte de la couverture végétale ; c) carte de l'aléa d'inondation. *Flooding hazard mapping of the Man region : a) isohyet map; b) land cover map; c) flooding hazard map of the Man region.*

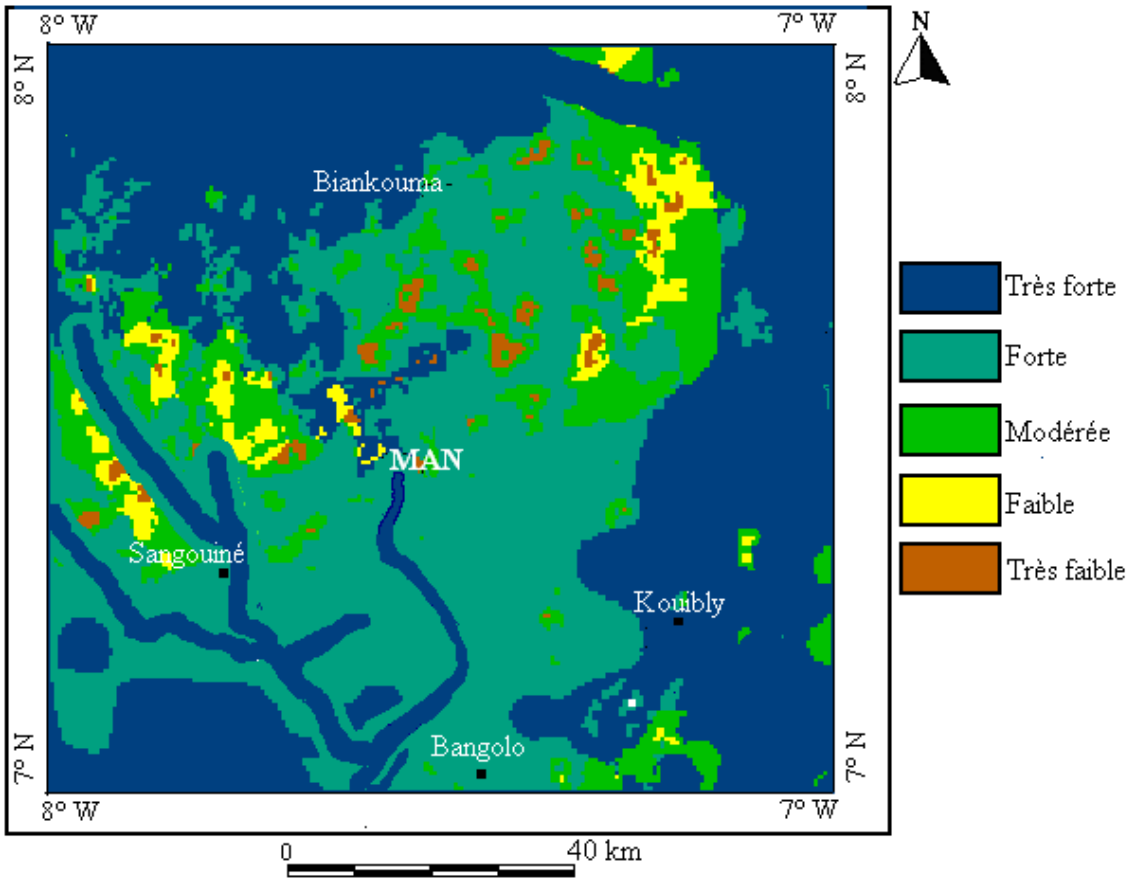


FIGURE 10 carte des zones à risques d'inondation de la région de Man. *Flooding risk map of the Man region.*

6. DISCUSSION

L'approche méthodologique, sur laquelle est fondée la cartographie des zones à risque d'inondation de la région de Man, présente l'avantage d'exploiter en synergie des données multisources. En effet, l'imagerie satellitaire, couplée au MNA a permis de définir des descripteurs de vulnérabilité et d'aléa, dont la combinaison donne la carte des zones à risque d'inondation. La fiabilité d'une telle carte est donc liée aux paramètres d'entrée, notamment les images TM et le MNA. La question de l'échelle de travail est importante et mérite d'être soulignée. L'approche régionale (zone d'étude de 110 km de côté représentant une superficie 12 100 km^2) a été préférée pour cette étude préliminaire et permet ainsi de justifier le choix des types de données (images TM, carte topographique à 1/200 000, pluviométrie moyenne annuelle, etc.). La résolution spatiale des images TM (30 m), ainsi que les caractéristiques spectrales ont considérablement amélioré les analyses morphostructurales, d'une part, et facilité la cartographie des types de couvertures végétales, d'autre part. Ces niveaux d'information ont été confrontés aux données exogènes de terrain pour une validation, avant de servir à l'élaboration de la carte des zones à risque d'inondation.

Concernant les spécifications de qualité du MNA, Polidori *et al.* (1991) et Polidori (1995) suggèrent de tester la fiabilité du MNA, soit à partir de données provenant a priori de la connaissance intrinsèque du relief, soit à partir des données de référence provenant d'une source externe. Même s'ils sont construits à partir de courbes de niveau qui ont intrinsèquement une cohérence vis-à-vis des écoulements, on observe des anomalies sur les altitudes calculées (Puech, 1993). En utilisant les points amers recueillis au cours des missions sur le terrain (Kouamé, 1999 ; Saley, 2003), on observe une concordance au niveau planimétrique, mais de faibles décalages au niveau altitudinal (7-10 m) dans le MNA créé. D'après Puech (1993), dans les tests de qualité des MNA, on doit intégrer d'autres plans plus sensibles comme les pentes et les azimuts.

Concernant la pente, qui est l'un des principaux facteurs intervenant dans la cartographie de la vulnérabilité du terrain, nous n'avons aucune

mesure de terrain pour effectuer un test de fiabilité. Par ailleurs, cette variable morphométrique, combinée aux domaines litho-structuraux et à l'analyse du réseau de drainage a contribué à identifier les zones vulnérables à l'inondation. Le relief (MNA et fichiers dérivés) est incontournable dans les études spatiales en environnement montagneux. Les discussions menées par Puech (1993) sur la précision du MNA, montrent qu'aucune des méthodes de construction des MNA ne donne pas de solution satisfaisante et universelle.

L'intégration des données hydroclimatiques dans la cartographie du risque à l'inondation est très importante dans la perspective de modélisation ou de simulation de scénarii, ainsi que dans la production d'informations pouvant alimenter les systèmes d'alertes sur l'inondation (Tholey et De Fraipont, 1991).

La carte finale obtenue permet la délimitation des zones à risques d'inondation. La zone étudiée apparaît comme une zone à très fort risque d'inondation au niveau des plaines alluviales attenantes aux lits mineurs et majeurs des principaux fleuves Sassandra (est) et Bafing (NO). Les zones à pente faible sont par endroits submersibles pendant les mois les plus arrosés (juin-septembre) de la saison des pluies. C'est le cas de certaines localités, telles que Voungoué, Gangbégouiné et Seupleu, où des inondations ont été signalées en 1996. Dans certains quartiers de la ville de Man, les crues du Kô (cours d'eau traversant la ville) ont causé des dégâts importants en septembre 1996 (effondrement de voies bitumées, habitations sous les eaux, pertes matérielles).

La carte de risque à l'inondation établie constitue donc une base solide pour des campagnes d'informations aux populations afin d'éviter les éventuels aménagements dans les zones inondables.

7. CONCLUSION

La combinaison des données satellitaires et d'un MNA a permis la cartographie des zones à risque d'inondation de la région semi-montagneuse de Man. Ces deux approches sont complémentaires et permettent une optimisation de l'exploitation des informations satellitaires et géomorphologiques. Ainsi, la carte des risques à l'inondation obtenue constitue une carte de base pour les éventuels aménagements des différents bassins fluviaux de l'Ouest semi-montagneux ivoirien. Le risque d'inondation varie de faible à très fort, mais 65 % de la région présentant un risque moyen à fort. L'étendue de ces zones mérite un suivi et une surveillance en vue de sécuriser les populations et les infrastructures socio-économiques de la région. Dans les zones de propagation des inondations et dans les plaines alluviales du sud, le risque élevé d'inondation demande une cartographie plus détaillée de ces secteurs. Le traitement et l'intégration des données stéréoscopiques et radar ainsi que d'images de très haute résolution spatiale (IKONOS, QUICKBIRD, RESOURCESAT) constituent une perspective de recherche qui pourra améliorer et affiner la carte élaborée.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements aux personnes physiques et morales qui ont mis gracieusement les données, les moyens logistiques et matériels à notre disposition pour mener à bien ce travail, notamment le CCT et la SODEXAM. Nous n'oublions pas aussi les évaluateurs Yves Auda, François Blasco et Benoît Deffontaines pour leurs critiques constructives qui ont permis d'améliorer de façon significative cet article.

Références

Camil, J. (1984) Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'État, Université de Côte d'Ivoire, Abidjan, 306 p.

CCT (Centre de cartographie et télédétection) (1993) Carte du bilan forestier de la région de Man (1/200 000), réalisée par le Centre de Cartographie et de Télédétection à partir de l'interprétation d'images TM de Landsat. Projet sectoriel forestier, Abidjan.

Chorowicz, J., Cervelle, B., Kim, J., Manoussis, S., Morasse, C., Prudon, D., Rudant, J.-P., Riazanoff, S., Breard, J.Y., Foin, P. et Veillet, I. (1989) Utilisation des modèles numériques de terrain pour la reconnaissance automatique de certaines formes en géologie et géomorphologie. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol. 115, n° 3, p. 5-7.

Deffontaines, B. (1990) Développement d'une méthodologie morphostructurale et morphonéotectonique : analyse des surfaces enveloppes, du réseau hydrographique et des modèles numériques de terrain. Application au nord est de la France. Thèse de doctorat, Université Paris VI, Paris, 194 p.

Deffontaines, B. (2000) Formes et déformations de la surface terrestre : approche morphométrique et application. Thèse d'habilitation à diriger la recherche, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 65 p.

Deffontaines, B., Lee, J.C., Angelier, J., Carvalho, J. and Rudant, J.-P. (1994) New geomorphic data on active Taiwan orogen : a multisource approach. Journal of Geophysical Research, vol. 99, p. 20243-20266.

Depraetère, C. (1984) Étude géomorphométrique comparative en Afrique du sud : applications hydrologique et géomorphologique. Thèse de doctorat, Université Paris IV Sorbonne, Paris, 190 p.

Deslandes, S. et Gwyn, Q.H.J. (1991) Évaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectre de Fourier. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 2, p. 98-110.

Djro, S.C. (1998) Évolutions tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma-Touba (Nord-Ouest Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'État, Université de Cocody, Abidjan, 121 p.

Feybesse, J.L., Milesi, J.P., Johan, V., Dommanget, A., Calvez J.Y., Boher, M. et Abouchami, W. (1989) La limite Archéen-Protérozoïque inférieur d'Afrique de l'Ouest : une zone de chevauchement majeure antérieure à l'accident du Sassandra ; l'exemple des régions d'Odienné et de Touba (Côte-d'Ivoire). Compte Rendu de l'Académie des Sciences de France, tome 309, série II, p. 1847-1853.

Françiss, F.O. (1970) Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Thèse de doctorat d'ingénieur, Université de Grenoble I, Grenoble, 108 p.

Giannetti, F., Montanarella, L. and Salandin, R. (2001) Integrated use of satellite images, DEMs, soil and substrate data in studying mountainous lands. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 3, nº 1, p. 25-29.

Hobbs, W.H. (1904) Lineaments of the atlantic border region. Geological Society of America Bulletin, vol. 15, p. 483-506.

Jenson, S.K. and Domingue, J.O. (1998) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n° 11, p. 1593-1600.

Kenting E.S. et SODEMI (1978) Carte photogéologique du degré carré de Man au 1/200 000 établie à partir des photographies aériennes, des données géologiques disponibles et des missions de vérification sur le terrain. Rapport n°479, Abidjan.

Kouamé, K.F. (1999) Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitales, des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse 3e cycle, Université de Cocody, Abidjan, 210 p.

Kouamé, K.F., Gioan, P., Biémi, J. et Affian, K. (1999) Méthode de cartographie des discontinuités images extraites d'images satellitales (exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, n° 2, p. 139-156.

Kouamélan, 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 de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, 277 p.

Lubès-Niel, H., Masson, J.M., Paturel, J.E. et Servat, E. (1998) Variabilité climatique et statistiques. Étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Revue des sciences de l'eau, n° 3, p. 383-408.

Mulders, M.A. (2001) Advances in the application of remote sensing and GIS for surveying mountainous land. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 3, nº 1, p. 3-10.

Nicholson, S.E. (1980) The natural rainfall fluctuations in sub tropical west Africa. Mondial Weather Revue, n° 108, p. 473-487.

Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B. et Boyer, J.F. (1995) Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. Sécheresse, vol. 6, n° 1, p. 95-102.

Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O. et Lubès-Niel, H. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 43, n°6, p. 937-946.

PCI (1997) USING PCI SOFTWARE, VOL. 2, VERSION 6.2, 553 P.

Polidori, L. (1995) Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 139, p. 10-19.

Polidori, L., Chorowicz, J. and Guillande, R. (1991) Description of terrain as fractal surface and application to digital elevation model quality assessment. Photogrametry Engeneering and Remote Sensing, vol. 57, n° 10, p. 1329-1332.

Puech, C. (1993) Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier (Grenoble 1), Grenoble, 213 p.

Puech, C. (2000) Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire d'habilitation à diriger la recherche, ENGREF/CEMAGREF, Montpellier, 100 p.

Roques, M. (1968) Les structures profondes terrestres et les problèmes géologiques de l'ouest africain. 5e Conférence de l'Association Scientifique Ouest Africaine, Abidjan, 10 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, Abidjan, 211 p.

Sharon, C. and Burnett, K. (2003) Comparison of Digital Elevation Models for Aquatic Data Development. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 69, n° 12, p. 1367-1375.

Tagini, B. (1971) Esquisse structurale de la Côte-d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Bulletin SODEMI, n° 5, 302 p.

Tholey, N. et De Fraipont, P. (1991) Intégration de méthodes et d'outils de traitements d'images de télédétection dans les S.I.G. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, vol, 121, n° 1, p. 68-72.

Wilson, A.F. (1968) Colloque sur les granites de l'Ouest Africain. UNESCO, p. 132-147.

Yacé, I. (2002) Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest : pétrologie, géologie régionale. Éditions CEDA, Côte d'Ivoire, 183 p.