Télédétection, 2006, vol. 6, n° 2, p. 123-142
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne Éditions Scientifiques GB

IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES UNITÉS LITHOLOGIQUES ET DES ACCIDENTS STRUCTURAUX MAJEURS DU DÉPARTEMENT DE KORHOGO (NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE) : APPORT DE L'IMAGERIE ETM+ DE LANDSAT

Jean Patrice JOURDA[1], Éric Valère DJAGOUA[1], Koffi KOUAMÉ[1],Mahaman Bachir SALEY[1], Célin GRONAYES[2], Jean-Jacques ACHY[2], Jean BIÉMI[1] et M. RAZACK[3].

[1] Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
22 B.P. 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone : (225) 22 44 52 70 ;
télécopieur : (225) 22 44 35 00 ;
courriel : jourda_patrice@yahoo.fr

[2] Laboratoire de géologie du socle et de métallogénie,
UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone : (225) 05 738 097 ; télécopieur : (225) 22 443 500

[3] Laboratoire d'Hydrogéologie,
UMR 6532 HydrASA CNRS,
Université de Poitiers,
40 avenue du Recteur Pineau,
86022 Poitiers cedex,
France.

Soumis le 27 juillet 2005 ; révisé le 24 avril 2006 ; accepté le 25 octobre 2006

Dans les zones équatoriales humides, l'épaisseur importante de l'altération et le couvert végétal masquent souvent les informations géologiques et structurales. Le principal objectif de cette étude est de mieux identifier les unités lithologiques et structurales afin de faciliter leur cartographie.

L'étude des unités géologiques et des accidents majeurs du département de Korhogo à partir des images ETM+ de Landsat montre une amélioration des limites entre les différentes unités lithologiques et une meilleure perception de grandes structures géologiques. En effet, les techniques de traitements spécifiques employés, à savoir l'analyse en composantes principales sélectives, les rapports de bandes et les différentes compositions colorées réalisées à partir de néo-bandes générées et de certaines bandes ETM+ ont permis de délimiter les contours du granite de Korhogo et du massif de Dikodougou grâce à la variation des teintes lithologiques entre les deux unités voisines. L'utilisation de quatre matrices 7 x 7 du filtre de Sobel, à laquelle un poids plus élevé a été affecté, a aussi permis de mieux identifier les fractures majeures de la zone d'étude, dont les orientations sont comparables aux accidents principaux mis en évidence dans toute la Côte d'Ivoire. Une carte géologique téléanalytique et une autre des accidents majeurs ont été réalisées.

Mots clef : Côte d'Ivoire ; Korhogo ; images satellitaires ; cartographie géologique ; accidents géologiques.

DISCRIMINATION AND MAPPING OF LITHOLOGICAL UNITS AND MAJOR STRUCTURES OF THE KORHOGO DEPARTMENT (NORTH OF CÔTE D'IVOIRE) : CONTRIBUTION OF LANDSAT ETM+ IMAGERY

In wet equatorial zones, the significant thickness of deterioration and vegetation cover often mask geological and structural information. The main objective of this study is to better discriminate the lithological and structural units in order to facilitate their mapping.

The study of the geological units and the major accidents of the Korhogo department using Landsat ETM+ enhances the limits between the different lithological units and provides better distinction between the major geological structures. The specific processing techniques used, such as selective principal components analysis, band ratios and various colour compositions obtained from generated neo-channels and specific ETM+ bands made it possible to identify the limits of the granites of Korhogo and of the Dikodougou Massif, following the variations in the lithological colours between the two units. The use of four 7 x 7 Sobel filter matrices, to which a higher weight was affected, also made it possible to better discriminate between the major fractures in the study area. Their directions are comparable to the main accidents highlighted in Côte d'Ivoire overall. A remotely derived analytical geological map and another of the major accidents were derived.

Key words : Côte d'Ivoire ; Korhogo ; satellite images ; cartography ; geological mapping ; geological structures.

1. INTRODUCTION

Pour répondre aux besoins de plus en plus croissants en eau, dus à une augmentation de sa population, la Côte d'Ivoire a entrepris depuis peu de mettre l'accent sur des études hydrogéologiques pour le choix des sites d'implantation de forages et pour la construction de retenues d'eau. C'est dans ce cadre que le projet ATTAO (Application des Techniques de Télédétection en Afrique de l'Ouest) a été initié. De nombreux travaux ont été réalisés dans la région et ont permis de mettre en évidence les accidents majeurs du sillon intracratonique de Boundiali et les contours du granite circonscrit de Séguéla (Biémi, 1992 ; Biémi *et al*., 1991), la carte géologique téléanalytique de la région de Ferké (Ouattara, 1998), l'évaluation des relations entre les directions de ces accidents majeurs et l'emplacement de forages permettant ainsi de définir les profils de productivités associés à ces différentes directions (Biémi, 1992 ; Savané et Biémi, 1999 ; Jourda *et al*., 2005). Malgré tous ces travaux, des problèmes demeurent. En effet, dans les zones équatoriales humides, l'épaisseur importante de l'altération et le couvert végétal masquent souvent les informations géologiques et structurales. Une autre difficulté est l'identification des différents ensembles géologiques à l'aide de l'imagerie satellitaire sur le socle précambrien d'Afrique de l'Ouest afin de faciliter leur cartographie et mieux étudier les aquifères qui s'y trouvent. L'objectif de cet article vise donc à extraire des images satellitaires des informations géologiques et structurales afin de permettre une cartographie des unités lithostructurales majeures en rapport avec les principales réserves d'eau du département de Korhogo. Des études réalisées sur la végétation à partir des données de HRV de SPOT ont montré la relation qui existe entre le couvert végétal et le substratum rocheux (Bonn, 1996). Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Deroin *et al*., (1990) et Ouattara (1998) pour identifier les unités de paysage ainsi que sur les méthodes de l'analyse en composantes principales sélectives (Chavez *et al*.,1989) et des filtres directionnels pour l'identification des unités structurales. La cartographie des unités géologiques et structurales dans le socle précambrien requiert une méthodologie appropriée de traitement numérique d'images satellitaires qui puisse les mettre en évidence sans ambiguïté. Les résultats de cette étude doivent permettre une meilleure cartographie géologique et structurale.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. Cadre d'étude

La zone d'étude est située au nord de la Côte d'Ivoire, le département de Korhogo faisant partie de la région des savanes avec les départements de Ferkessédougou, de Boundiali et de Tengrela. Ce département couvre une superficie de 12 500 km2 compris entre 5°16 et 6°16 de longitude ouest et 8°32 et 10°20 de latitude nord. Il est limité au nord par la République du Mali, à l'est par les départements de Ferkessédougou et de Katiola, à l'ouest et au sud par les départements de Boundiali et de Mankono (figure 1).

Le territoire est en grande partie couvert par différentes catégories de savanes : savanes boisées, savanes arborées, savanes arbustives et savanes herbeuses. Il est aussi couvert par des steppes arborées-arbustives ou herbacées ainsi que des forêts claires et des forêts galeries. On rencontre également de nombreuses plantations de coton, d'anarcades, d'ignames et des rizières dans les bas-fonds au centre et à l'est du département. On dénombre de nombreuses agglomérations villageoises concentrées autour des barrages agro-pastoraux construits sur les affluents du Bandama Blanc et une dizaine de sous-préfectures relativement peuplées en moyenne d'environ 2 000 habitants chacune. Les sols nus sont constitués par les affleurements de roches cristallines rencontrés surtout dans le secteur autour et au sud-est de la ville de Korhogo. Le relief de la zone est monotone avec des altitudes variant en moyenne entre 300 et 400 m. Dans le paysage, on note des inselbergs granitiques culminant parfois à plus de 500 m d'altitude. Le département de Korhogo est constitué de plateaux latéritiques de hauteur variant de 0 à 3 m, témoins d'une ancienne pénéplaine. Ces plateaux sont affectés d'une pente très faible et régulière vers le fleuve Bandama (Jourda, 2005).

2.2. Contextes climatique et hydrologique

Le département de Korhogo appartient au système climatique tropical de type soudano-sahélien dont le rythme des saisons est réglé par le déplacement du front intertropical (FIT). Il est caractérisé par deux grandes saisons : une saison sèche de novembre à mars et une saison de pluie d'avril à octobre. Le maximum des précipitations se situe en août et septembre et oscille entre 255 et 267 mm, avec une moyenne annuelle de 1 200 mm environ. Les températures moyennes journalières s'élèvent à 29° C environ en saison sèche et à 25° C en saison des pluies.

La région est surtout drainée par le Bandama et ses affluents (le Yoré Lorho, le Solomougou, le Badenou et le Bou). Ce dernier décrit un grand arc de cercle d'environ 36 km de rayon autour de Korhogo et développe en maints endroits, avec ses affluents, des plaines d'inondation de 1 à 1,5 km de largeur. Chacun de ses affluents est alimenté par de nombreuses rivières dont le cours supérieur est souvent intermittent**.** La plupart des cours d'eau sont temporaires, surtout dans leur partie amont et tarissent en saison sèche. Il s'ensuit une pénurie d'eau en surface et la formation de nappes de socle. Ces eaux d'infiltration constituent des aquifères de fissures et d'altérites, et les nappes du niveau d'altération renferment des réserves

d'eau dont le volume dépend de l'épaisseur, de la perméabilité et de l'extension des arènes granitiques. Ces aquifères sont généralement captés par les ouvrages de petites et moyennes profondeurs (puits paysans et puits modernes).

2.3. Contexte géologique du département de Korhogo

Le contexte géologique et tectonique du département de Korhogo s'intègre dans l'histoire du craton ouest africain. Plusieurs travaux ont porté sur la géologie (Arnould, 1961 ; Tagini, 1971 ; Yacé, 1976 ; Pothin, 1988) et la tectonique de cette région (Lemoine, 1988 ; Yobou, 1993 ; Ouattara, 1998).

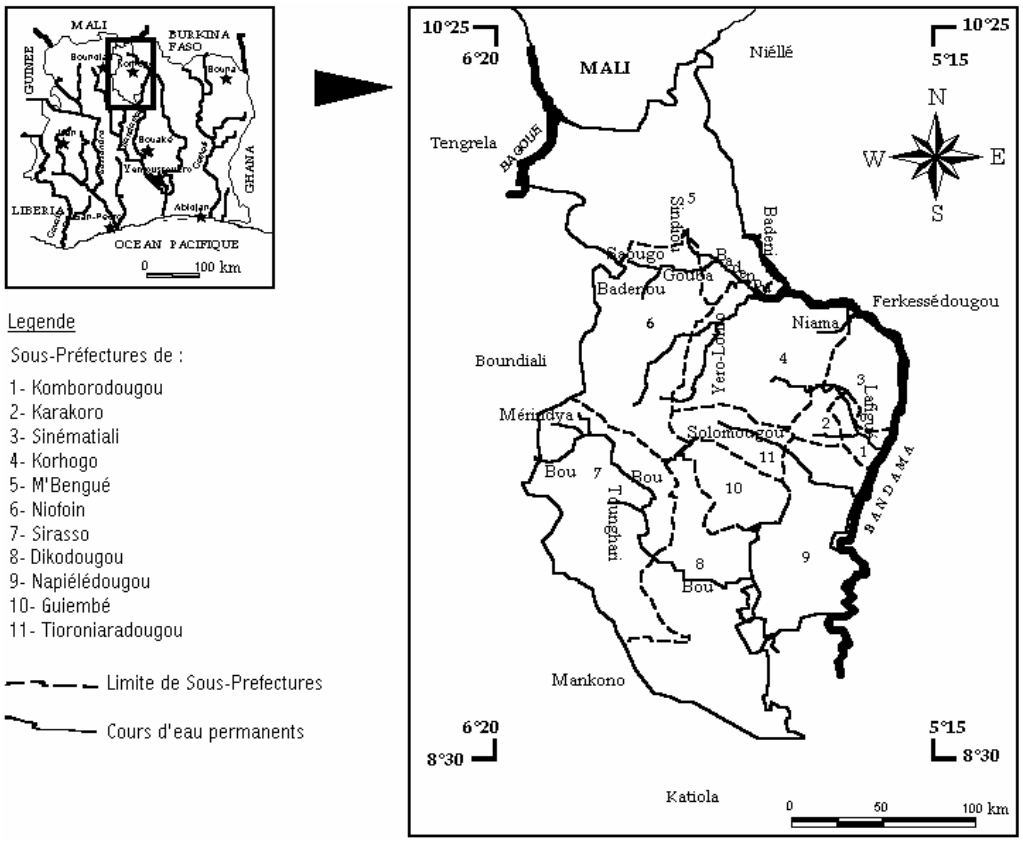
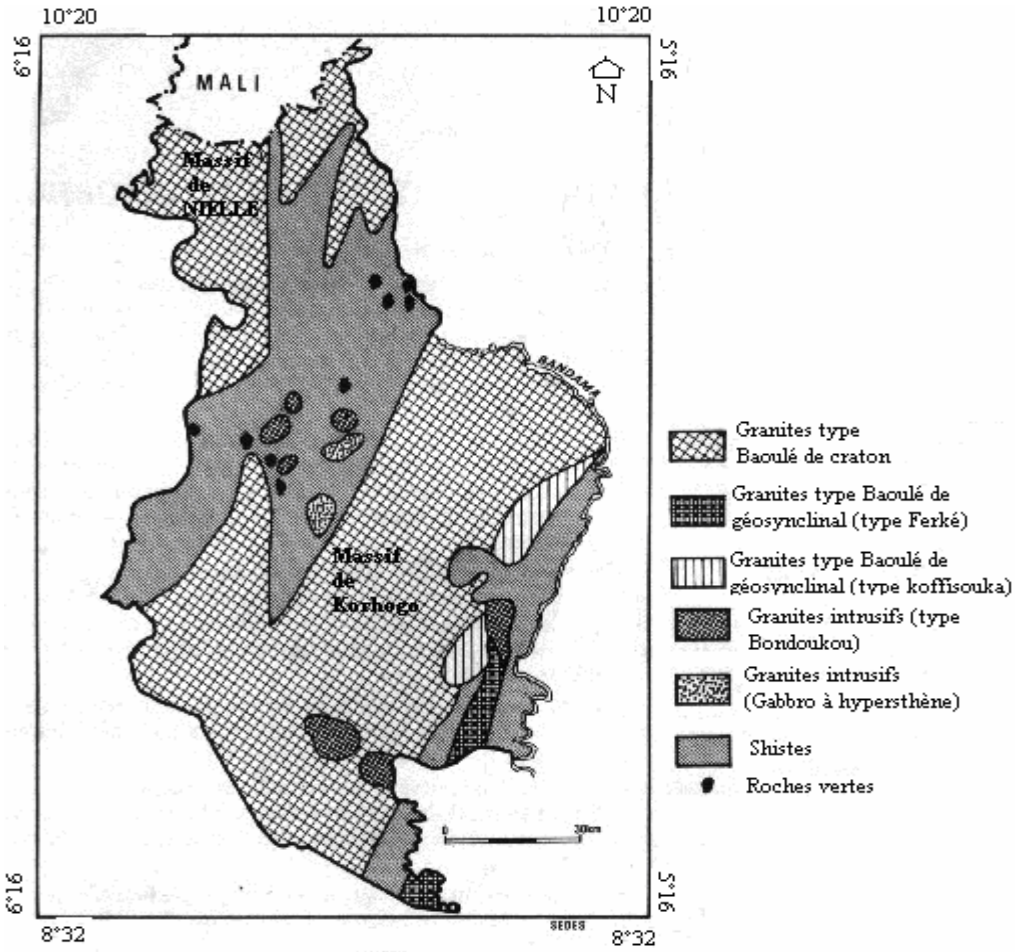


FIGURE 1 : Localisation de la zone d'étude. *Study area location.*



Tiré de SEDES (1965)

FIGURE 2 : Carte géologique du département de Korhogo. *Geological map of the Korhogo department.*

La géologie du secteur d'étude appartient au domaine éburnéen (figure 2). On dénombre plusieurs générations de granites dont le type Baoulé de craton, le type Baoulé de géosynclinal (types Ferké et Koffisouka) et le type Bondoukou. À ces granites, s'associent l'ensemble des schistes et des roches vertes. Sur le plan pétrographique, ces différentes roches se répartissent en cinq grandes unités qui ont été identifiées (Jourda, 2005). Ce sont :

- l'ensemble volcanique et plutonique ;
- l'ensemble de métasédiments ;
- l'ensemble volcanosédimentaire ;
- les gneiss et migmatites ;
- les granitoïdes.

Au niveau des granitoïdes comme des migmatites et des gneiss, on distingue deux faciès : le faciès de Korhogo dont les roches sont de couleurs plus claires et le faciès de Guèmbé-Dikodougou-Kaprémé-Kiémou dont les roches sont de couleurs plus sombres.

Les études structurales menées sur le terrain ont démontré l'existence, dans la région, d'un style tectonique par pli d'aplatissement correspondant à la phase de déformation D1, par cisaillement ductile avec des plis asymétriques intrafoliaires, correspondant à la phase de déformation D2 et, enfin, par un cisaillement cassant N140 à N180°, témoin de la phase de déformation D3.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Matériel

Pour couvrir le département de Korhogo, trois images ETM+ de Landsat ont été utilisées. Ce sont les images 197-53, 197-54 et 198-53 prises en saison sèche, respectivement le 31 janvier 2000, pour les deux premières images et le 21 décembre 1999 pour la dernière image. La création de mosaïques des trois images a d'abord exigé un calibrage radiométrique, qui a permis le réajustement de la moyenne et de l'écart type entre les différentes scènes. Ensuite, nous avons procédé à une correction géométrique par la méthode de modélisation mathématique polynomiale. C'est la variante de la correction d'image à carte qui a été choisie. Dans ce cas, le système de référence a

exigé la numérisation et l'utilisation d'une mosaïque de six cartes topographiques des départements de Korhogo, Mankono, Katiola, Tengrela, Nielle et Boundiali, Ces cartes au 1 : 200 000 ont été produites en 1967 par l'Institut Géographique National de France (IGNF). La précision est attestée par des erreurs de 0,13 (soit 3,9 m) suivant les pixels ou suivant les lignes.

3.2. Méthode

Le traitement de l'image de la zone d'étude extraite des trois mosaïques a porté sur la recherche de traitements spécifiques de combinaisons d'images et de matrices de filtres directionnels, favorisant l'identification des faciès morpholithologiques et des linéaments. Ainsi, l'identification des ensembles lithologiques est rendue possible grâce à l'analyse en composantes principales sélectives (ACPs), aux rapports de bandes ETM^+_3 / ETM^+_4, ETM^+_5 / ETM^+_4 et ETM^+_5 / ETM^+_3 et aux différentes compositions colorées réalisées à partir des néobandes générées et de certaines bandes ETM+.

3.2.1. Rapports de bandes

La méthode des rapports de bandes est basée sur la notion de réflectance, qui est le rapport entre la quantité de radiations réfléchies par un matériau et la quantité d'énergie reçue par le radiomètre pour une longueur d'onde donnée (Scanvic, 1983). Les rapports de bandes ETM^+_5 / ETM^+_8, ETM^+_3 / ETM^+_4 et ETM^+_5 / ETM^+_4 ont été calculés. L'indice de végétation normalisé des bandes $(ETM^+_4 - ETM^+_3) / (ETM^+_4 + ETM^+_3)$ a été réalisé pour une meilleure cartographie de la végétation.

3.2.2. Analyse en composantes principales sélectives

L'ACP est une transformation mathématique basée sur l'analyse de la covariance de l'image ou de la matrice de corrélation de plusieurs séries de données (Bonn et Rochon, 1992). Cette transformation mathématique va générer des nouvelles images, composantes ou axes, qui sont en combinaison linéaire avec les images originales. Les trois premières composantes contiennent un grand pourcentage de la variance totale présente dans les six bandes originales des canaux ETM+. Cependant, avec l'analyse en composantes principales classique, on est confronté à deux problèmes essentiels :

- les informations qui n'ont pas été cartographiées dans les trois premières composantes peuvent avoir un intérêt significatif dépendant du degré de corrélation et de contraste spectral existant entre les six bandes de TM de Landsat (Chavez, 1984 ; Williams Jr.,1983) ;
- une composition colorée réalisée à partir de trois des six composantes peut être difficile à interpréter visuellement (Williams Jr., 1983).

L'analyse des images ETM+ indique, en général, que les bandes $ETM^+_{1,2,3}$ (bandes visibles) peuvent être utilisées comme un groupe parce que fortement corrélées (tableau 1) et les bandes $ETM^+_{5,7}$ (bandes du moyen infrarouge) peuvent constituer un second groupe. La bande 4 de ETM+ (bande du proche infrarouge) demeure seule. On relève donc trois zones spectrales distinctes et c'est pour cette raison que, dans cette présente étude, le choix s'est porté sur l'application de l'ACP sélective qui peut contribuer à minimiser les deux problèmes soulevés ci-dessus comme le préconise Chavez (1984).

TABLEAU 1 : Matrice de corrélation des 6 bandes ETM+ de Landsat du département de Korhogo. *Correlation matrix of the 6 Landsat ETM+ bands of the Korhogo department.*

Bandes ETM+	1	2	3	4	5	7
1	1,00					
2	0,94	1,00				
3	0,89	0,95	1,00			
4	0,73	0,82	0,88	1,00		
5	0,48	0,61	0,57	0,62	1,00	
7	0,75	0,79	0,87	0,91	0,42	1,00

Pour l'appellation des composantes, les chiffres en indice indiquent toujours les bandes qui rentrent dans la réalisation de l'ACP :

- $CP1_{123}$ = première composante de l'ACP des bandes $ETM^+_{1,2,3}$
- $CP2_{57}$ = deuxième composante de l'ACP des bandes $ETM^+_{5,7}$

Une première ACP a été réalisée avec les bandes $ETM^+_{1,2,3}$ dans le visible et on obtient trois composantes : composantes 1, 2 et 3 ($CP1_{123}$, $CP2_{123}$ et $CP3_{123}$).

On réalise ensuite des analyses en composantes principales avec seulement deux bandes. Ici, l'objectif visé est de cartographier le contraste entre les différentes parties du spectre électromagnétique pour retenir les informations différentes plutôt que celles qui sont communes à chaque bande. En utilisant seulement deux images en entrée, les informations communes aux deux bandes seront cartographiées dans la première composante et les informations spécifiques à chaque bande seront regroupées dans la deuxième composante (Chavez and Kwarteng, 1989). Cinq analyses en composantes principales ont été effectuées :

- ETM^+_2 et ETM^+_4 (visible et proche infrarouge) ;
- ETM^+_2 et ETM^+_7 (visible et moyen infrarouge) ;
- ETM^+_4 et ETM^+_7 (proche infrarouge et moyen infrarouge) ;
- ETM^+_1 et ETM^+_2 (visible, bleu et vert) ;
- ETM^+_5 et ETM^+_7 (moyen infrarouge et moyen infrarouge).

Une sélection des trois premières paires est faite afin de relever le contraste spectral existant entre les trois régions majeures du spectre électromagnétique. Ce choix est motivé par le fait que, dans le cas des quatrième et cinquième paires, les bandes sont adjacentes. D'une part, ETM^{+}_{1} et ETM^{+}_{2} appartiennent toutes deux au visible et sont proches sur le plan spectral (bleu et vert) et, d'autre part, ETM^{+}_{5} et ETM^{+}_{7} appartiennent toutes deux au moyen infrarouge et sont aussi proches sur le plan spectral. Le tableau 2 révèle que plus la corrélation est faible entre les deux bandes d'entrée, fort est le pourcentage de variance exprimé par la composante 2, laquelle indique un contraste spectral élevé. Par exemple, les bandes ETM^{+}_{5} et ETM^{+}_{7} ont un coefficient de corrélation de 0,42 et la deuxième composante (CP2) de l'ACP de cette paire de bandes a un pourcentage de variance exprimé beaucoup plus élevé. Le tableau 2 indique aussi que les premières composantes contiennent la moyenne des deux bandes d'entrée, tandis que les deuxièmes composantes contiennent approximativement leur différence. Ces résultats sont similaires à ceux de Chavez et Kwarteng (1989). Ces informations contenues dans les deuxièmes composantes seront donc très contrastées et les compositions colorées réalisées avec ces deuxièmes composantes seront judicieuses pour la cartographie des unités lithologiques et structurales.

TABLEAU 2 : Coefficient de corrélation. Pourcentages de la variance exprimée par la CP1 et la CP2, et la participation de chaque paire de bandes aux différentes CP1 et CP2. *Coefficient of correlation. Percentages of variance expressed by PC1 and PC2, and the participation of each pair of bands in various PC1 and PC2.*

Paire de bandes ETM+	Coefficient de corrélation	CP1 % Variance	CP2 % Variance	CP1 Participation de chaque bande ETM+	CP2 Participation de chaque bande ETM+
ETM+ 1 et 2	**0,94**	97,07	**2,93**	(0,98 ; 0,98)	(-0,17 ; 0,17)
ETM+ 2 et 4	0,82	91,02	8,98	(0,95 ; 0,96)	(0,31 ; -0,30)
ETM+ 2 et 7	0,79	89,69	10,31	(0,94 ; 0,95)	(0,32 ; -0,32)
ETM+ 4 et 7	0,91	95,66	4,34	(0,98 ; 0,97)	(-0,20 ; 0,21)
ETM+ 5 et 7	**0,42**	71,2	**28,8**	(0,84 ; 0,84)	(0,53 ; -0,53)

3.2.3. Compositions colorées

En se basant sur les résultats des tableaux 1 et 2, plusieurs compositions colorées ont été réalisées avec les différentes composantes 2 de l'ACP sélective. Les différentes bandes ETM+ ayant servi à l'ACP sélective sont placées en indice pour préciser la provenance de chaque composante 2. Une première composée couleur est réalisée avec la première composante des ACP_{123} et ACP_{57} et la bande ETM^{+}_{4} dans l'ordre d'affichage suivant : $CP1_{123}$ / ETM+4 / $CP1_{57}$.

Ensuite, une série de compositions colorées a été réalisée en remplaçant la bande ETM^{+}_{4} et la première composante de l'ACP_{123} et ACP_{57} par les deuxièmes composantes des ACP réalisées avec les paires de bandes pour tirer profit des informations différentes qui sont regroupées dans les deuxièmes composantes de ces différentes ACP sélectives.

En se basant également sur le contenu du tableau 1, quatre compositions colorées des bandes ETM+ ont été réalisées : ETM^{+}_{542}, ETM^{+}_{432}, ETM^{+}_{583} et ETM^{+}_{452}.

3.2.4. Identification des unités de paysage

L'unité de paysage est définie comme un ensemble de surfaces ayant des caractéristiques communes sur une image. Parmi ces caractéristiques, les plus importantes sont d'ordre spectral, morphologique et textural (Deroin *et al.*, 1990). L'unité de paysage peut être considérée comme un « faciès image ». L'identification des unités de paysages en « téléanalyse » va se baser sur l'utilisation du critère spectral. L'objectif visé est de caractériser, sur le plan spectral, les unités de paysage qu'on vient d'identifier. Pour cela, un échantillonnage de 25 parcelles d'images de taille 26 x 26 pixels correspondant aux sites-tests a été fait. Les sites-tests sélectionnés seront étudiés sur le plan spectral dans les six canaux ETM+1, 2, 3, 4, 5 et 7. Ces sites ont été choisis en tenant compte de la réalité de terrain et des informations tirées des cartes géologiques. Ces sites sont surtout situés sur les différentes unités identifiées correspondant, sur le terrain, à des ensembles géologiquement connus. Pour mieux discrétiser les valeurs spectrales des sites, Deroin *et al.* (1990) proposent un diagramme triangulaire et un diagramme orthonormé. Le diagramme triangulaire permet seulement de visualiser directement les pourcentages de chaque bande et la corrélation existante entre les bandes (forte corrélation entre XS1 et XS2), mais ne fait pas réellement ressortir de distinction entre les entités (Deroin *et al.*, 1990 ; Ouattara, 1998). Cela conduit à une confusion entre les entités. C'est pour ces raisons que le choix s'est porté sur le diagramme orthonormé (Deroin *et al.*, 1990) qui est de la forme : XS3 / XS1 = f (XS3+XS2+XS1).
Les applications précédentes ont été faites à l'aide des images HRV de SPOT (Deroin *et al.*, 1990 ; Ouattara, 1998). Dans le cadre de ces travaux, le diagramme orthonormé est appliqué sur des images ETM+ pour la première fois sur le socle précambrien. Son application pose un problème à cause de l'utilisation des images ETM+. Pour être dans les mêmes conditions d'expérimentation,

nous avons sélectionné les bandes ETM^+_2, ETM^+_3 et ETM^+_4 qui couvrent à peu près les mêmes intervalles de longueur d'onde que les données HRV. La matrice de corrélation des valeurs spectrales des sites-tests a été calculée (tableau 3). Une des conditions pour une bonne distinction des sites est que XS3 / XS1, qui équivaut à ETM^+_4 / ETM^+_2, doit être un rapport entre des bandes très peu corrélées (Deroin *et al*., 1990). L'analyse de la matrice de corrélation des valeurs spectrales des sites-tests (tableau 3) indique que le coefficient de corrélation entre les bandes ETM^+_4 et ETM^+_2 est très faible (11 %). Les bonnes conditions d'utilisation du diagramme orthonormé sont donc réunies. En plus des bandes proposés par Deroin *et al.* (1990), un autre ensemble de bandes ETM^+_5, ETM^+_4 et ETM^+_2 a été également utilisé à cause du coefficient de corrélation entre les bandes ETM^+_5 et ETM^+_4 aussi très faible (37 %). La recherche d'une plus grande distinction des réponses spectrales a conduit à réaliser deux modèles de diagrammes orthonormés :

- $ETM^+_4 / ETM^+_2 = f(\sum ETM^+_4 + ETM^+_3 + ETM^+_2)$ (1)
- $ETM^+_5 / ETM^+_4 = f(\sum ETM^+_5 + ETM^+_4 + ETM^+_2)$ (2)

L'utilisation de ces diagrammes doit permettre d'identifier les unités de paysage dans l'image, unités qui correspondent à des réalités géologiques. Chaque faciès-image représentant un ensemble géologique, l'objectif est de démontrer que le faciès de Korhogo (faciès B), correspondant au massif granitique de Korhogo, est différent du faciès de Guiembé, Dikodougou et Kiémou (faciès A) situé plus au sud. Les unités morpho-lithologiques observées sur les images seront validées par l'analyse des données géochimiques et pétrographiques.

TABLEAU 3 : Matrice de corrélation des valeurs spectrales des sites-tests. *Correlation matrix of the spectral values of the test sites.*

	ETM+1	**ETM+2**	**ETM+3**	**ETM+4**	**ETM+5**	**ETM+7**
ETM+1	1					
ETM+2	0,92	1				
ETM+3	0,78	0,95	1			
ETM+4	0,01	**0,11**	0,16	1		
ETM+5	0,49	0,69	0,80	**0,37**	1	
ETM+7	0,72	0,85	0,86	0,15	0,89	1

3.2.5. Filtrage spatial des images

L'objectif visé dans l'application des filtres est de trouver la meilleure façon de mieux identifier les linéaments dans les images correspondant à des discontinuités lithologiques ou structurales. Pour ce faire, dans une première étape ont été éliminés les bruits de fond que comportent les images satellitaires brutes par application d'un filtre passe bas médian 3 x 3 sur la mosaïque de toutes les bandes. Ensuite, la bande ETM^+_7 est choisie, sur laquelle est appliquée quatre filtres directionnels de Sobel de taille 7 x 7. La taille de la fenêtre du filtre utilisé a une incidence sur la longueur des linéaments rehaussés, c'est-à-dire que seuls les linéaments et les structures de taille supérieure ou égale à la moitié de la fenêtre de convolution du filtre sont détectés alors que ceux de taille inférieure se confondent avec le bruit de l'image (Kouamé *et al.*, 1999). Quatre nouveaux filtres de Sobel ont été calculés, différents des précédents filtres Sobel utilisés jusqu'alors, par l'affectation de poids plus élevés (6) au niveau de la matrice de convolution (figure 3). Ces filtres ont été utilisés pour une meilleure identification des discontinuités images (figure 4) afin de faciliter leur extraction. Les discontinuités linéaires observées sur les images filtrées sont relevées à l'intérieur du logiciel ENVI v4.1 en vue d'établir une carte de fracturation détaillée (Jourda *et al.*, 2005) et celle des accidents majeurs du département de Korhogo. Ces accidents majeurs ont été validés par les accidents tectoniques relevés sur des cartes existantes dans la région.

4	**3**	**3**	**2**	**2**	**1**	**0**
3	**5**	**4**	**4**	**3**	**0**	**-1**
3	**4**	**6**	**5**	**0**	**-3**	**-2**
2	**4**	**5**	**0**	**-5**	**-4**	**-2**
2	**3**	**0**	**-5**	**-6**	**-4**	**-3**
1	**0**	**-3**	**-4**	**-4**	**-5**	**-3**
0	**-1**	**-2**	**-2**	**-3**	**-3**	**-4**

Filtre 7 x 7 SE-NO de SOBEL

0	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**
-1	**0**	**3**	**4**	**4**	**5**	**3**
-2	**-3**	**0**	**5**	**6**	**4**	**3**
-2	**-4**	**-5**	**0**	**5**	**4**	**2**
-3	**-4**	**-6**	**-5**	**0**	**3**	**2**
-3	**-5**	**-4**	**-4**	**-3**	**0**	**1**
-4	**-1**	**-2**	**-2**	**-3**	**-3**	**0**

Filtre 7 x 7 SO-NE de SOBEL

1	2	3	4	3	2	1
2	3	4	5	4	3	2
3	4	5	6	5	4	3
0	0	0	0	0	0	0
-3	-4	-5	-6	-5	-4	-3
-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1

Filtre 7 x 7 S-N de SOBEL

1	2	3	0	-3	-2	-1
2	3	4	0	-4	-3	-2
3	4	5	0	-5	-4	-3
4	5	6	0	-6	-5	-4
3	4	5	0	-5	-4	-3
2	3	4	0	-4	-3	-2
1	2	3	0	-3	-2	-1

Filtre 7 x 7 E-O de SOBEL

FIGURE 3 : Matrices de filtres de Sobel utilisés pour l'extraction des linéaments des images satellitaires de Korhogo. *Sobel filters matrix used for lineament extraction in Korhogo satellite images.*

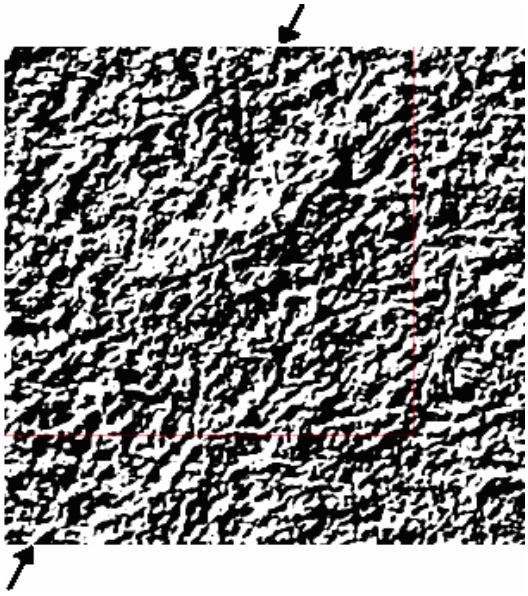


FIGURE 4 : Filtrage directionnel de Sobel avec une matrice de 7 x 7 rehaussant les discontinuités-images dans la direction SE-NO. *Sobel directional filtering with a 7 x 7 matrix allowing the enhancement of image discontinuities in SE-NW direction.*

4. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats des différentes analyses effectuées sont consignés sous forme de cartes thématiques.

4.1. Cartographie des unités géologiques

Les images proviennant des traitements spécifiques comme les rapports de bandes, les compositions colorées et l'ACP sélective ont permis de distinguer les différentes unités lithologiques du département de Korhogo. En effet, à partir des trois néo-bandes provenant des rapports de bandes ETM^{+}_{5}/ ETM^{+}_{3}, ETM^{+}_{3}/ ETM^{+}_{4} et ETM^{+}_{5}/ ETM^{+}_{4}, une composition colorée en RVB a été réalisée (figure 5).

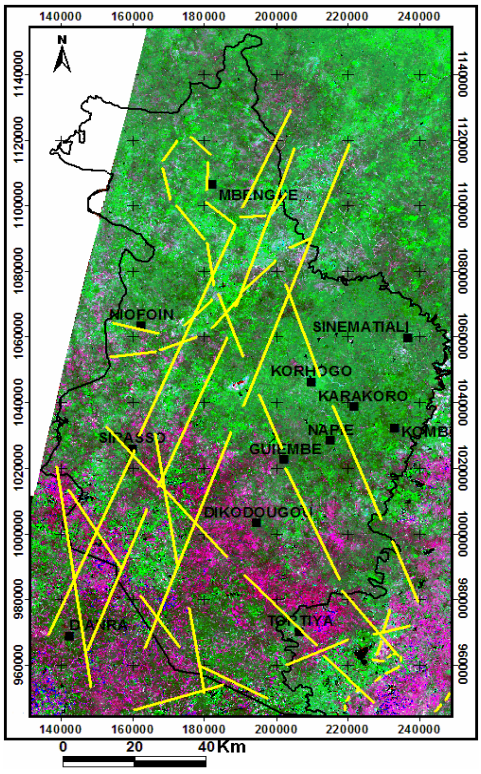


FIGURE 5 : Exemple d'une composition colorée établie des rapports de bandes ETM+5 / ETM+3, ETM+3 / ETM+4 et ETM+5 / ETM+4. *Example of a colour composite produced using the ETM+5 / ETM+3, ETM+3 / ETM+4 and ETM+5 / ETM+4 band ratios.*

Cette composition colorée permet de distinguer les traces du sillon volcanosédimentaire de Boundiali avec l'incursion vers la ville de M'bengue. Les limites de ce sillon se poursuivent jusqu'au sud-ouest de la ville de Dikodougou. Les compositions colorées des bandes brutes (ETM^{+}_{542}, ETM^{+}_{432}, ETM^{+}_{583}, ETM^{+}_{452}), elles, donnent les mêmes résultats, à savoir la mise en évidence des zones granitiques dénudées qui se différencient parfaitement des autres secteurs de la région. La composition colorée des bandes ETM^{+}_{542} (figure 6) est de loin la meilleure dans cette série et adaptée pour discerner les roches basiques (Davis *et al.*, 1987).

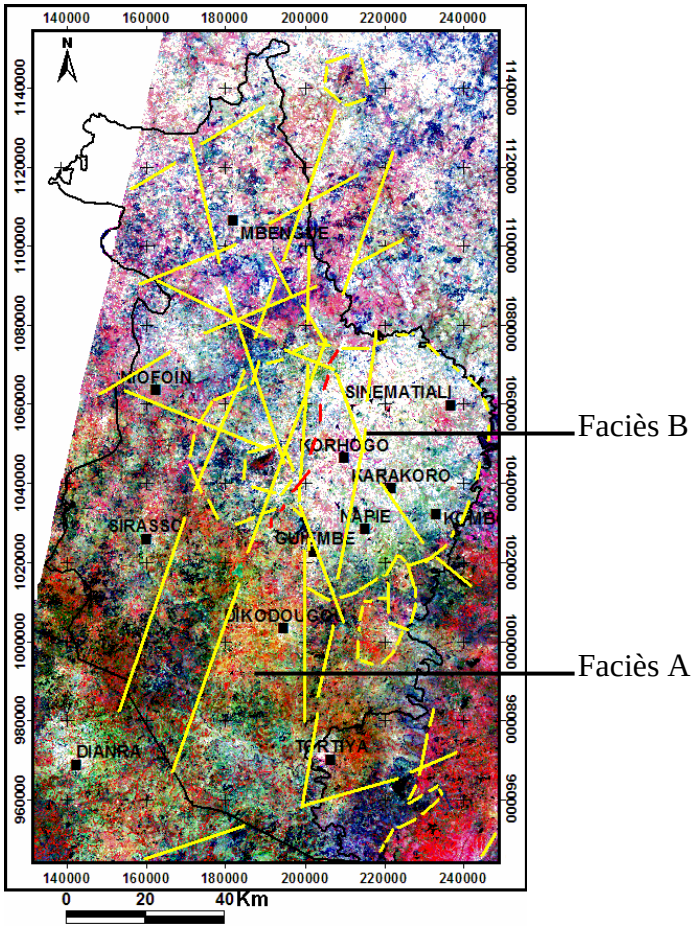


FIGURE 6 :. Exemple d'une composition colorée établie avec les bandes ETM+5, ETM+4 et ETM+2.
Example of a colour composite produced using the ETM+5, ETM+4 and ETM+2 bands

Cette composition colorée a la particularité de faire ressortir en rouge toutes les formations riches en fer. Les intrusions de gabbro sont fortement colorées en rouge ainsi que le granite de Ferké et les roches du sillon volcanosédiementaire de Boundiali. Le granite de Korhogo et les faciès qui lui sont proches sont dans une teinte qui va du blanc au vert. Les différentes unités lithologiques sont bien identifiées et apparaissent sous des faciès de teinte bien distincte. Les métasédiments de la série du Haut Bandama sont distincts des formations volcanosédimentaires de la série de Diaouala. On retrouve aisément le contour du granite de Korhogo, les différents contours lithologiques, comme par exemple dans le secteur sud-est, du granite de Ferké et la série du Haut Bandama. Les résultats de l'ACP sélective (figure 7) révèlent bien le faciès granitique du secteur de Dikodougou (faciès A) ainsi que le granite de Korhogo (faciès B). Le contraste est net entre le batholite de Ferké et la série du Haut-Bandama.

La recherche d'une plus grande distinction des réponses spectrales a conduit à réaliser deux modèles de diagrammes orthonormés.

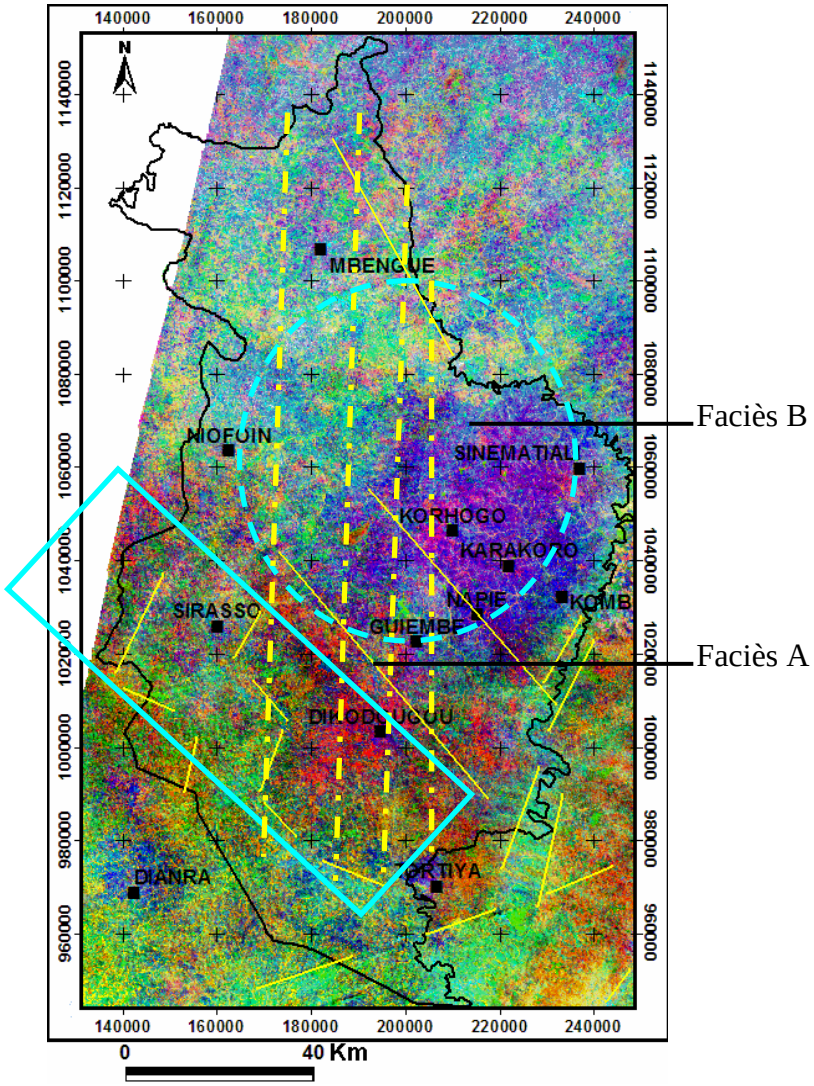


FIGURE 7 : Exemple d'une composition colorée établie avec les composantes CP257, CP2123 et CP1123. *Example of a colour composite produced using PCA components CP257, CP2123 and CP1123* .

Le premier diagramme (figure 8) permet de différencier les différentes entités géologiques. Sept grands groupes ont été dégagés :

- le premier groupe est représenté par le massif granitique de Korhogo (faciès B) ;
- le deuxième groupe est représenté par le massif granitique des secteurs de Guiembé, Kaprémé, Dikodougou et Kiémou (faciès A) ;
- le troisième groupe est représenté par les granites de type Ferké ;
- le quatrième groupe par les granites calco-alcalins des secteurs de Niofoin et de M'bengue ;
- le cinquième groupe est représenté par les métagabbros du mont Gnambaraga ;
- le sixième groupe est représenté par les métasédiments ;
- le septième groupe est représenté par les terrains volcanosédimentaires.

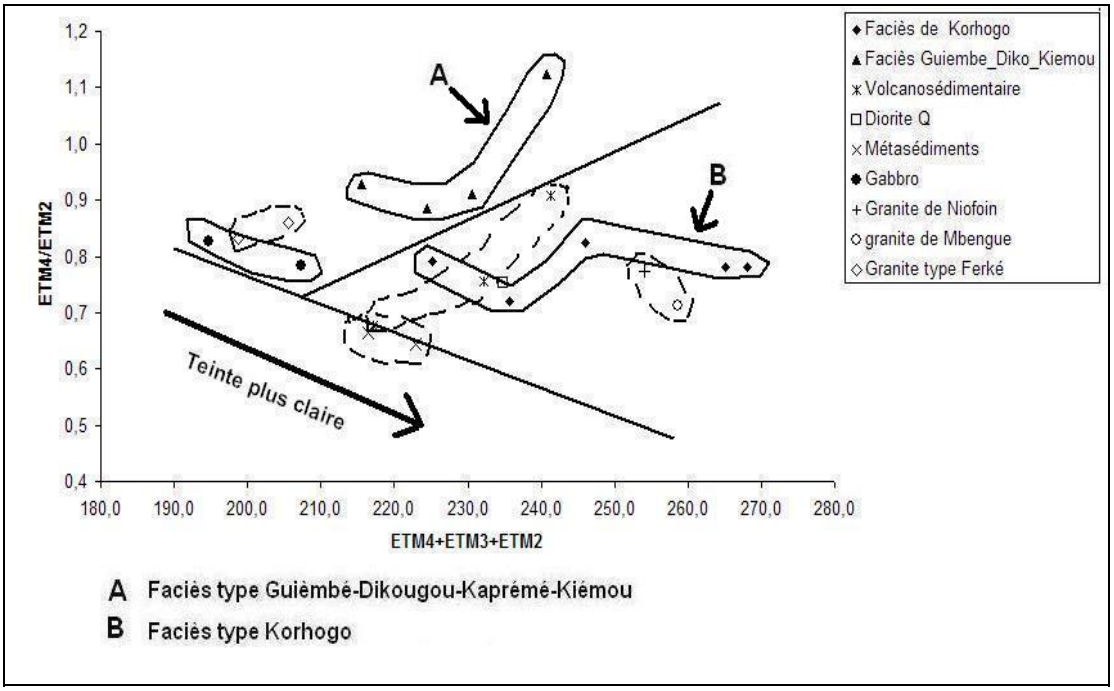


FIGURE 8 : Diagramme orthonormé ETM+4 / ETM+2 = f (∑ETM+4, ETM+3, ETM+2) des ensembles lithologiques du département de Korhogo. *ETM+4 / ETM+2 = f (∑ETM+4, ETM+3, ETM+2) diagram of the geological formations of the Korhogo department.*

À ces groupes, a été ajoutée la granodiorite quartzique du lit de la rivière Bou près de la ville de Tortiya. On note une distinction nette entre le faciès de Korhogo (massif granitique de Korhogo) et le faciès de Guiembé, Kaprémé, Dikodougou et Kiémou, démontrant ainsi leur différence sur le plan spectral. Le quatrième groupe semble très proche du faciès de Korhogo. Le cinquième groupe, représenté par les métagabbros, a la somme des valeurs de réflectance la plus faible. On note une évolution, pas très nette mais sensible, de la teinte allant du plus sombre (métagabbro) au plus clair (granite de Korhogo). Les métasédiments sont parfaitement séparés des autres terrains géologiques, mais on remarque un rapprochement avec le faciès de Korhogo. Cela est normal, en ce sens que les métasédiments sont riches en silice, ce qui les rapprochent des granites qui sont aussi riches en silice.

Les résultats du second diagramme (figure 9) montrent que les sept groupes définis dans le graphe précédent existent toujours et sont encore mieux distingués. Le rapport de bandes ETM^{+}_{5} / ETM^{+}_{4} augmente des teintes plus sombres (métagabbro) vers les teintes plus claires (granite type Korhogo). En effet, on passe du pôle basique (métagabbro) vers le pôle plus acide (granite de Korhogo), en passant par les termes intermédiaires (faciès de Guiembé - Kaprémé-Dikodougou-Kiémou) constitués de métagranodiorites. Dans ce deuxième diagramme, la distinction entre le faciès de Korhogo et celui de Guiembé-Kaprémé-Dokodougou-Kiémou est plus nette, ce qui confirme l'évolution des teintes au niveau spectral. Par conséquent, le faciès de Korhogo serait un massif granitique circonscrit formant une entité géologique, contrairement à ce qui était écrit jusqu'à présent dans la littérature, où ce granite n'est pas intrusif et circonscrit, mais forme un grand panneau syntectonique et concordant (ancien massif de Korhogo) avec les formations encaissantes dont il semble dérivé (Arnould, 1961).

Pour valider les unités lithologiques observées sur les images satellitaires, nous avons fait appel aux données géochimiques par l'utilisation des diagrammes de Harker (Yobou, 1993) qui représente les oxydes en fonction de la silice.

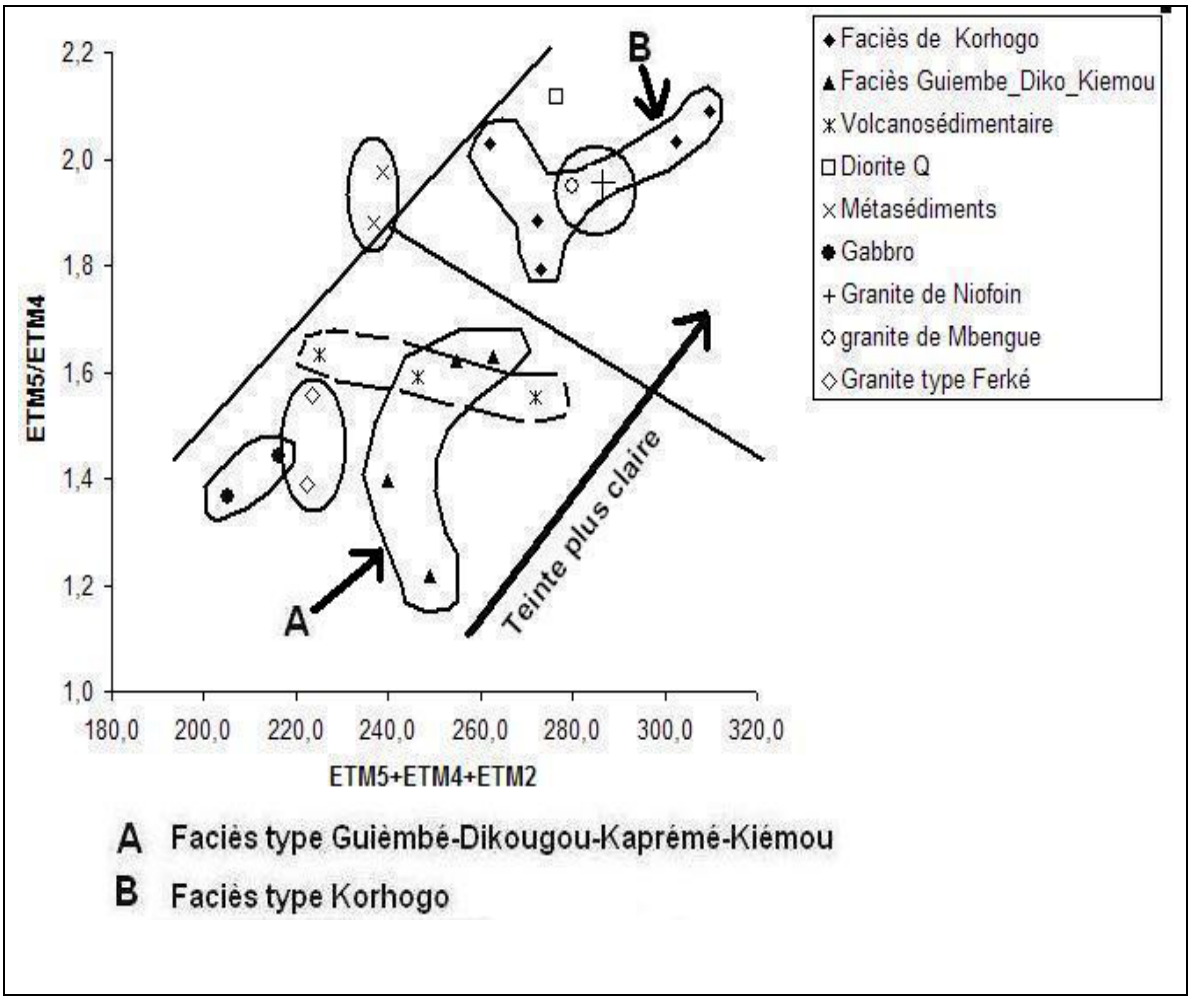


FIGURE 9 : Diagramme orthonormé ETM+5 / ETM+4 = f (∑ETM+5, ETM+4, ETM+2) des ensembles lithologiques du département de Korhogo. *ETM+5 / ETM+4 = f (∑ETM+5, ETM+4, ETM+2) diagram of the geological formations of the Korhogo department.*

Les résultats des analyses (figure 10) montrent la position des deux faciès (granite de Dikodougou ou faciès A et granite de Korhogo ou faciès B par rapport aux échantillons des massifs de Bada-Sagnambaho (faciès clair) et de Timbe-Koffissouka (faciès sombre), pris comme référence (Yobou, 1993). L'analyse révèle que la majorité des échantillons du faciès type Korhogo ont une teinte plus claire que le faciès clair du massif de Bada-Sanambaho. Le faciès type Guiembé-Kaprémé-Dikodougou-Kiémou a la même teinte que les roches du massif de Timbé-Koffissouka (faciès sombre). Le faciès type de Guiembé-Kaprémé-Dikodougou-Kiémou peut-être qualifié de faciès sombre et le faciès type Korhogo de faciès clair. Il existe donc une relation linéaire entre les faciès très sombres représentés par les métagabbros, les faciès sombres représentés par le faciès de type de Guiembé-Kaprémé-Dikodougou-Kiémou et les faciès clairs représentés par le faciès de type Korhogo. Cette tendance est parfaitement illustrée par les diagrammes de la figure 11, qui montrent que les roches du faciès type A sont plus basiques (intermédiaires) que les roches du faciès type B (acide). La tendance du faciès type A vers les roches calco-alcalines pourrait expliquer la présence de la végétation abondante sur ce faciès. Ces résultats permettent d'affirmer que le massif granitique de Korhogo et celui de Guiembé-Kaprémé-Dikodougou-Kiémou sont deux massifs distincts. Cela confirme et valide les résultats obtenus par la télédétection numérique et spectrale.

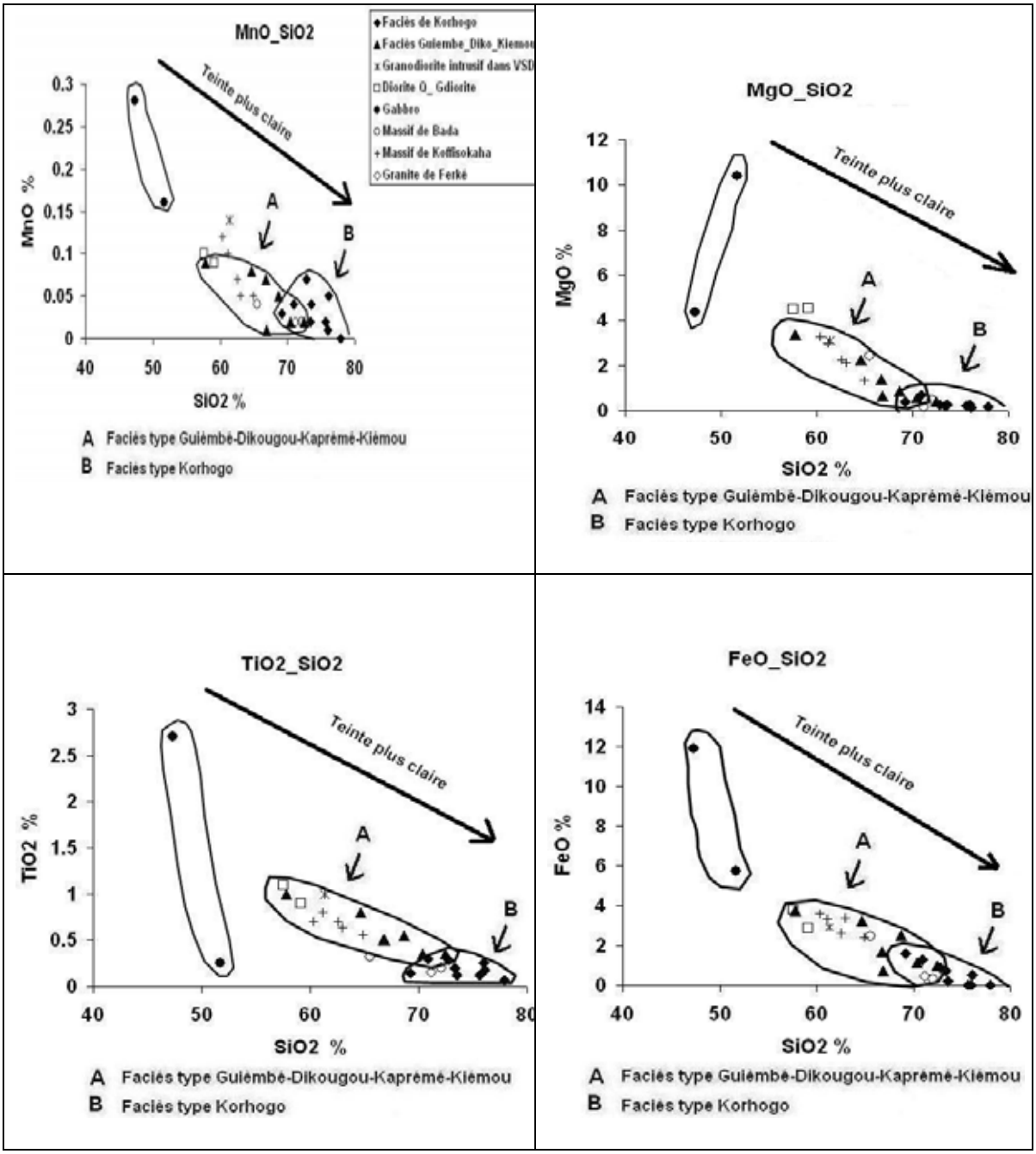


FIGURE 10 : Diagramme de Harker avec les oxydes = f (SiO2) des granitoïdes de Korhogo. *Harker diagram with oxides = f (SiO2) of the Korhogo granites.*

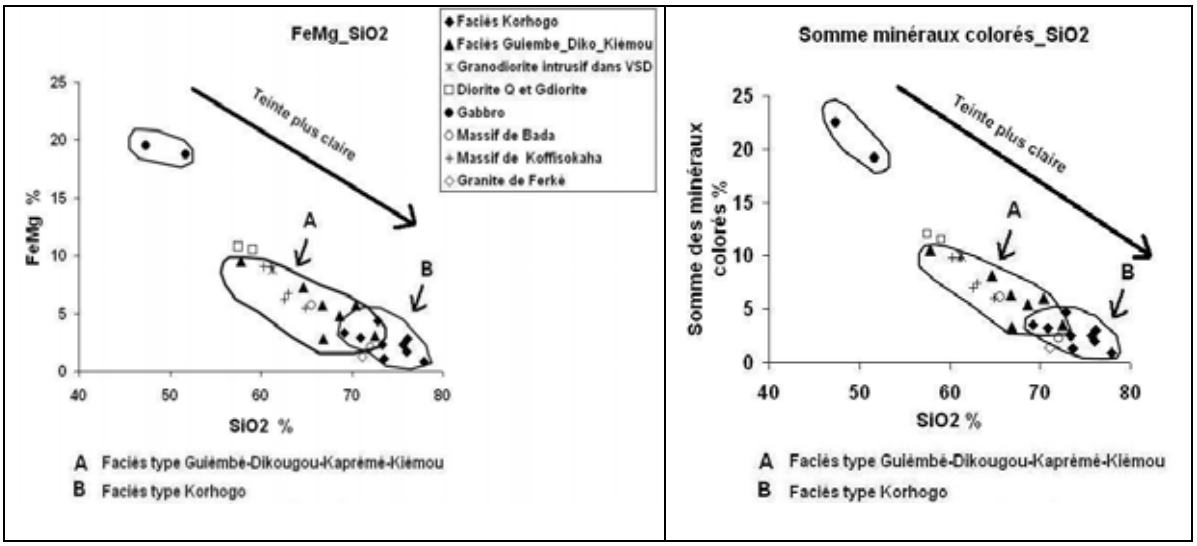
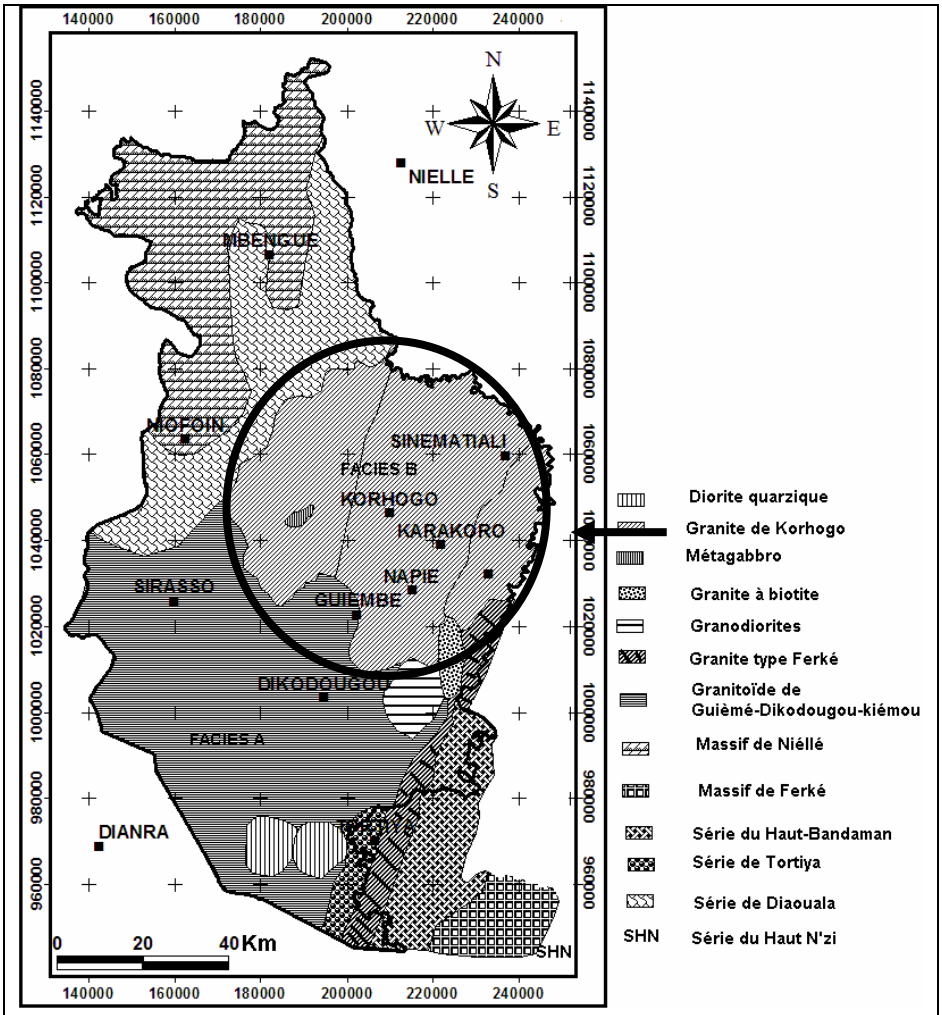


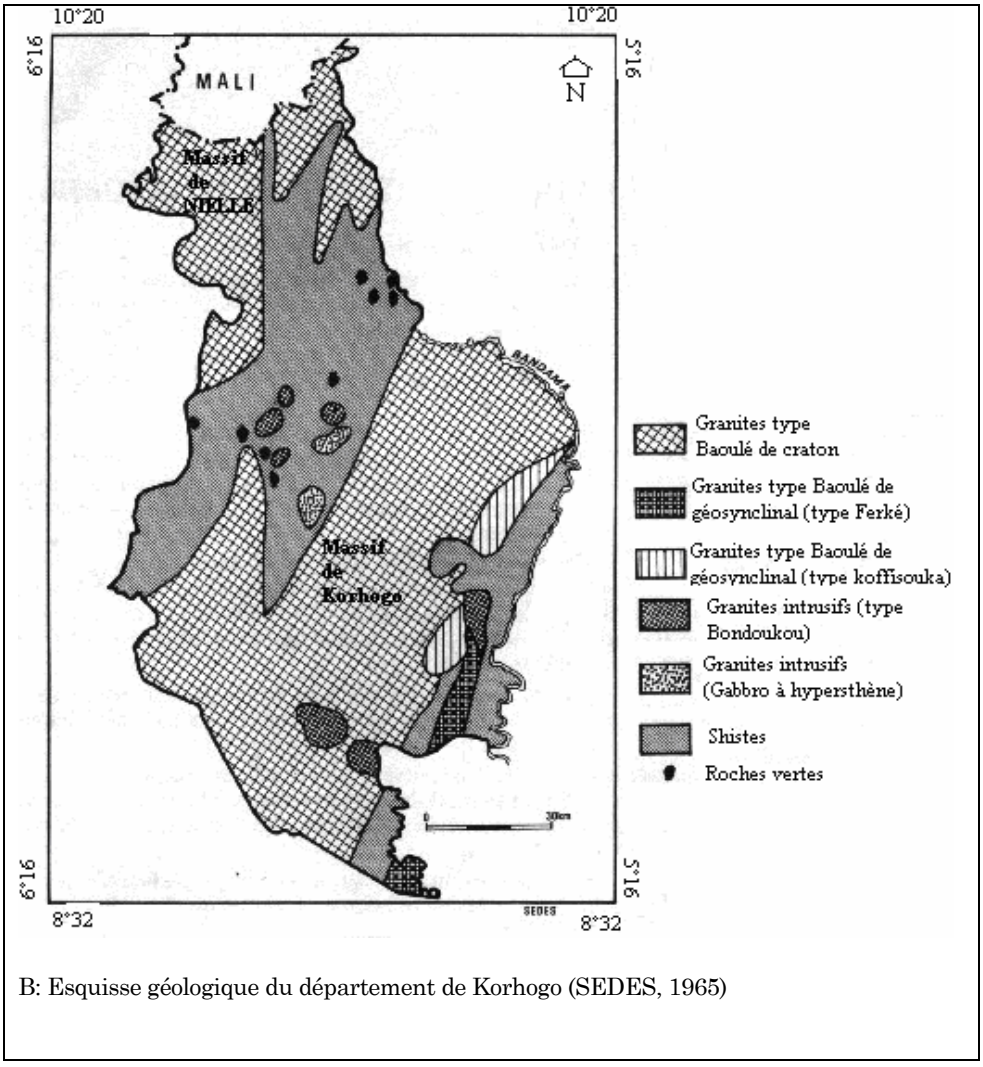
FIGURE 11 : Diagrammes des FeMg et de la ∑(FeOt+MgO+MnO+TiO2) en fonction de SiO2. *Diagrams of FeMg and ∑(FeOt+MgO+MnO+TiO2) according to Si O2.*

L'interprétation de toutes les analyses (images satellitaires et géochimiques) a permis de réaliser une carte des unités géologiques de la zone d'étude (figure 12). La comparaison de cette carte avec celle réalisée par SEDES (1965) (figure 12) montre que toutes les grandes unités géologiques de la région ont été distinguées. Les contours du granite de Korhogo sont précisés ainsi que les limites de la série de Diaoula appartenant au sillon de Boundiali. L'identification de ces limites lithologiques est basée sur la variation des teintes observées sur les différents traitements des images. La forme en W du sillon de Boundiali n'existe plus. L'autre forme en V est désormais intégrée au granite de Korhogo dont elle constitue la bordure est. L'ancien massif de Korhogo (Arnould, 1961) est séparé en deux massifs distincts : au sud, le faciès de type A et, au nord, un autre massif centré sur Korhogo constituant le faciès de type B. Ce résultat est confirmé par la réalité de terrain qui révèle, qu'au plan des granitoïdes comme les migmatites et gneiss, on distingue deux faciès : le faciès de Korhogo dont les roches sont plus claires et le faciès de Guèmbé-Dikodougou-Kaprémé-Kiémou dont des roches plus sombres (Jourda, 2005). La méthode utilisée est fiable et permet de bien cartographier les formations du Paléoprotérozoïque.



A : Carte géologique téléanalytique du département de Korhogo

FIGURE 12 : Comparaison de la carte géologique (A) obtenue par analyse des images de ETM+ de Landsat et de la carte géologique (B) établie par SEDES (1965). *Comparison of the geological map (A) extracted from Landsat ETM+ data and the geological map (B) established by SEDES (1965).*



B: Esquisse géologique du département de Korhogo (SEDES, 1965)

FIGURE 12 : Comparaison de la carte géologique (A) obtenue par analyse des images de ETM+ de Landsat et de la carte géologique (B) établie par SEDES (1965). *Comparison of the geological map (A) extracted from Landsat ETM+ data and the geological map (B) established by SEDES (1965).*

4.2. Cartographie des accidents majeurs

Sur la carte des accidents majeurs dans le département de Korhogo (figure 13), on constate d'abord une densité élevée de ces accidents qui morcellent tout le territoire. Ils ont une extension qui dépasse parfois le cadre du département de Korhogo. L'analyse de la rosace de distribution par classe d'orientation du nombre des accidents majeurs révèle quatre directions principales (N170°-190°, N30°-40°, N90-100°, N120°-130°) et une direction mineure (N50°-80°) (figure 14). Ces directions ont déjà été mises en évidence dans les régions voisines de Séguela (Biémi *et al.,* 1991 ; Biémi, 1992) et de Ferkessedougou (Ouattara, 1998). Tagini (1971) avait déjà noté ce style tectonique cassant qui débite en blocs le socle épi-éburnéen. En effet, Lemoine (1982) propose une évolution en trois blocs plus ou moins indépendants, séparés par des grands décrochements ductiles senestres de d'orientation nord-sud que sont les accidents de Sassandra et de Brobo (Lemoine, 1982) ainsi que de Wango-Fitini (Vidal, 1983 ; Vidal et Guibert, 1984).

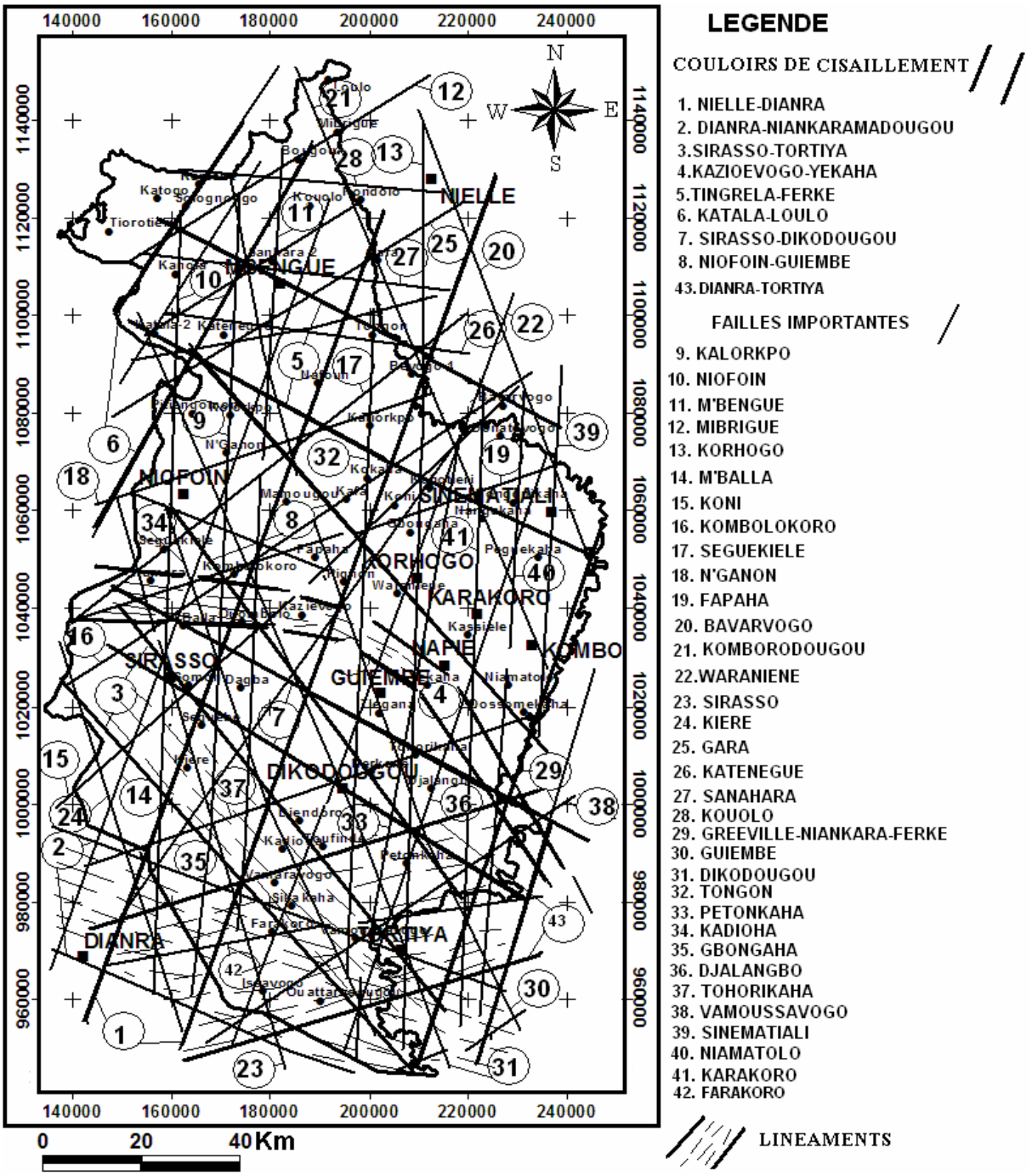
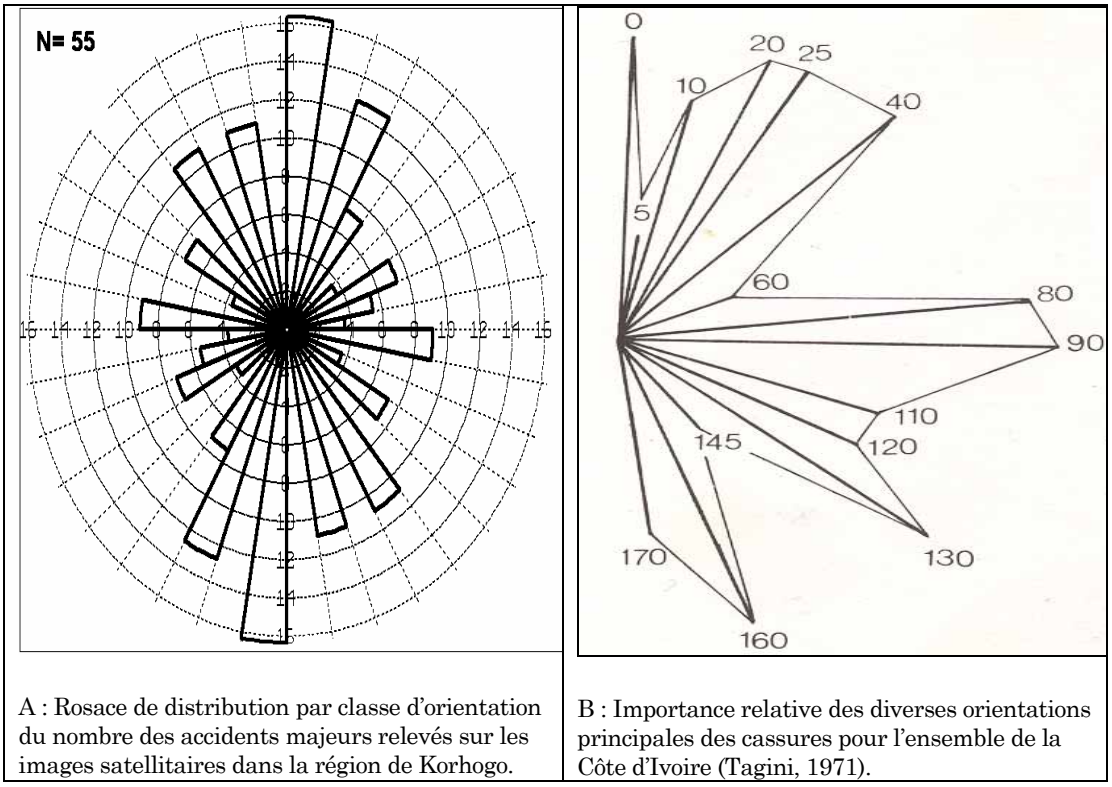


FIGURE 13 : Carte des accidents majeurs du département de Korhogo établie à l'aide de traitements spécifiques des images ETM+ et interprétées à l'intérieur du SIG. *Map of the major fractures of the Korhogo department established using specific processing of the ETM+ images and interpreted within a GIS.*

En comparant la rosace des accidents majeurs de Korhogo aux orientations principales des cassures pour l'ensemble de la Côte d'Ivoire (figure 14), on constate que toutes les orientations existantes au niveau de la Côte d'Ivoire (N170-190 ; N30-40 ; N120-130 ; N140-160 et N90-110) ont été relevées sur la carte des accidents majeurs de Korhogo.



A : Rosace de distribution par classe d'orientation du nombre des accidents majeurs relevés sur les images satellitaires dans la région de Korhogo.

B : Importance relative des diverses orientations principales des cassures pour l'ensemble de la Côte d'Ivoire (Tagini, 1971).

FIGURE 14 : Diagrammes de répartition de l'orientation des fractures dans la zone d'étude (A) et des accidents principaux de la Côte d'Ivoire (B). *Distribution diagrams of fracture directions in the study area (A) and principal accidents of Côte d'Ivoire (B).*

Pour valider la présence de ces accidents mis en évidence sur les images satellitaires, ces derniers ont été comparés aux différents accidents d'origine tectonique ou magnétique déjà cartographiés sur les cartes géologiques au 1 : 200 000 de Korhogo et de Katiola (Anonyme, 1995 ; Delor *et al*., 1995) et sur la carte au 1 : 500 000 des indices de minéralisation de la Société de développement minier (SODEMI) de la Côte d'Ivoire. L'analyse de la carte de la figure 15 révèle la différence de densité entre les accidents relevés dans cette étude avec ceux des travaux précédents. Ce résultat s'explique par la méthode de traitement numérique utilisée qui permet de mieux identifier les accidents, facilitant ainsi leur cartographie. Certains accidents comme ceux de Koni (15), de Kombolokoro (16), de Séguekiélé (17), de Waraniéné (22), de Fapaha (19), de Gara (25) et de Greenville-Niakaramadougou-Ferkéssédougou (29) sont soulignés par des accidents tectoniques et magnétiques.

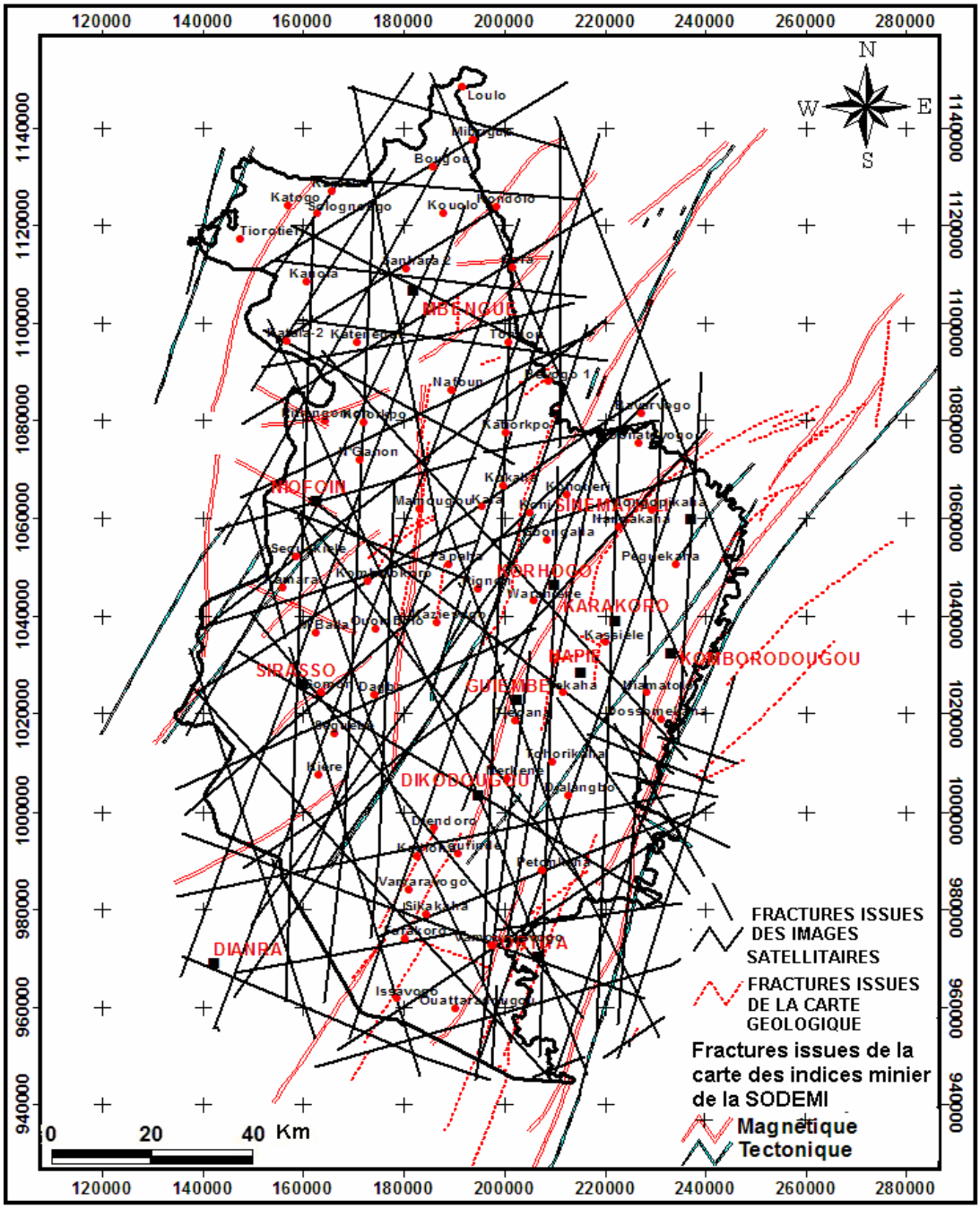


FIGURE 15 : Relation entre les accidents majeurs relevés sur les images satellitaires et les fractures provenant des cartes géologiques et de la carte des indices miniers de la SODEMI. *Relation between the major accidents highlighted by satellite images and the fractures from the geological maps and the chart of the mining indices of the SODEMI.*

5. CONCLUSION

Les images ETM+, principales données dans cette étude, ont servi à cartographier les unités géologiques et les accidents majeures du département de Korhogo. De ce fait, les traitements spécifiques qui sont les plus indiqués pour la cartographie géologique et structurale ont été utilisés. Les résultats des investigations ont mis en évidence les différentes unités géologiques, notamment les limites du sillon volcanosédimentaire de Boundiali, le granite circonscrit de Korhogo (faciès de type B), qui est différent du massif granitique plus basique de Dikodougou (faciès de type A) de la région. L'analyse lithologique a montré que l'identification des contacts géologiques des grandes formations est possible à partir des images TM et ETM+ (Savané et Biémi, 1999 ; Kouamé *et al.*, 1999 ; Gronayes *et al.*, 2003).

Sur le plan structural, la carte des accidents majeurs de la région a été réalisée. Un lien étroit a été établi entre les directions de ces fractures et

celles des régions voisines, à savoir celles de Boundiali et de Ferkessedougou, et surtout par rapport aux directions principales de la Côte d'Ivoire.

Des travaux en cours basés sur l'utilisation des images radar nous donneront des informations détaillées sur les formations géologiques et structurales de département de Korhogo.

Remerciements

Les auteurs remercient la Coopération française et l'UNESCO / PHI (Bureau de Nairobi) pour le financement de ce projet de recherche.

Références

Anonyme (1995) Carte géologique provisoire de la Côte d'Ivoire à 1 : 200 000, feuille de Korhogo. Ministère des Mines et de l'Énergie, Direction de la Géologie, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Arnould, M. (1961) Étude géologique des migmatiques et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale. Bulletin de la direction de la géologie et de la prospection minière n° 1, Direction de la géologie et de la prospection minière, Abidjan, 175 p.

Biémi, J. (1992) Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsaheliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université nationale d'Abidjan, Abidjan, 493 p.

Biémi, J., Gwyn, Q. H. J.,Deslandes, S. et Jourda, J. P. (1991) Géologie et réseaux de linéaments régionaux du bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire) : cartographie à l'aide des données Landsat TM et du champ magnétique total. in Télédétection et gestion des ressources, Vol. VII, P. Gagnon (réd.). Comptes-rendus du 7e Congrès de L'AQT, 23-25 octobre 1991, Montréal, L'Association Québécoise de Télédétection, p. 135-145.

Bonn, F. (réd.) (1996) Précis de télédétection. Vol. 2 : Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Sainte Foy, 633 p.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Vol. 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF-UREF, 485 p.

Chavez, P. S. (1984) Digital processing techniques for image mapping with Landsat TM and SPOT simulator data. Proceedings of the 18th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1-5 October, Paris, p. 101-116.

Chavez, P. S. and Kwarteng, A. Y. (1989) Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal components analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, n° 3, p. 339-348.

Coulibaly, S. (1978) Le paysan sénoufo. Les Nouvelles Éditions Africaines, Abidjan-Dakar, 47 p.

Davis, P. A., Berlin, G. L. and Chavez, P. S. (1987) Discrimination of altered basaltic rocks in the Southwestern United States by analysis of landsat thematic mapper data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, n° 1, p. 45-55.

Delor, C., Yao, B. D., Adou, M., Kohou, P., Doumbia, S., Pouclet, A., Vidal, M., Siméon, Y., Deroin, J. P., Leduc, L. et Diaby, I. (1995) Carte géologique provisoire de la Côte d'Ivoire à 1 : 200 000, feuille de Katiola. Ministère des Mines et de l'Énergie, Direction de la Géologie, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Deroin, J.-P., Chorowicz, J., Deroin, T., Dutartre, P., Scanvic, J.-Y. and Simonin, A. (1990) The landscape unit approach applied to geology on SPOT images in temperate climate zones using a test-area in the Cévennes (Massif Central, France). International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 45, p. 382-403.

Gronayes, C. C., Pothin, K. B., Kouamé, K. F. et Brou, K. B. (2003) Identification des couloirs de cisaillement à partir de l'imagerie TM de Landsat : application à l'Archéen de Bloléquin (Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 3, no 2-3-4, p. 217-226.

Jourda, J. P. (2005) Méthodologies d'application des techniques de télédétection et des système d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale. Cas de la zone test de Korhogo (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 402 p.

Jourda, J. P., Saley, M. B., Djagoua, E. V., Kouamé, K. J., Biémi, J. et Razack, M. (2005) Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. Télédétection, vol. 5, n° 4, p. 339-357.

Kouamé, K. F., Gioan, P., Biémi, J. et Kouadio, A. (1999) Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires : exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, vol. 1, no 2, p. 139-156.

Lemoine, S. (1982) Le décrochement ductile de Brobo, un linéament éburnéen majeur, son rôle possible dans l'orogénèse éburnéenne en Côte d'Ivoire. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. 295, série II, p. 601-606.

Lemoine, S. (1988) Évolution géologique de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur. Possibilité d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso : Similitudes et différences ; les linéaments de Greenville-Ferkessedougou et Grand Cess-Niakaramandougou. Thèse de doctorat d'état, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 334 p.

Ouattara, G. (1998) Structure des batholites de Ferkessedougou (Secteur de Zuénoula. Côte d'Ivoire) Implications sur l'interprétation de la géodynamique du paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest à 2,1 Ga. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléans, 291 p.

Pothin, K. K. (1988) Pétrographie et géochimie des formations précambriennes de la région d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Typologie du volcanisme birrimien. Tendances évolutives du Magmatisme Eburnéen. Géochimie de l'Uranium et du Thorium dans les granitoïdes. Thèse de doctorat, Université d'Abidjan, Abidjan, 329 p.

Savané, I. et Biémi, J. (1999) Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odiénné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, no 1, p. 47-64.

Scanvic, J. Y. (1983) Télédétection aérospatiale et informations géologiques. Éditions du BRGM, Manuels et Méthodes, n° 24, 284 p.

SEDES (1965) Région de Korhogo : étude de développement socio-économique. Société d'études pour le développement économique et social, Paris, 263 p.

SODEMI (2000) Carte des indices de minéralisation au 1 : 500 000, Société de développement minier, Abidjan.

Tagini, B. (1971) Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. Thèse de doctorat, Université de Lausanne, Lausanne, 302 p.

Vidal, M. (1983) Sur la tectogénèse des formations birrimiennes du « Triangle de Kakpin », Haute Comoé. Annales de l'Université d'Abidjan, série C, t. XIX, p. 205-212.

Vidal, M. et Guibert, Ph. (1984) Un nouveau décrochement ductile nord-sud dans le Birrimien d'Afrique de l'Ouest : le couloir cisaillant sénestre de Wango-Fittini (Côte d'Ivoire). Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. 299, série II, n° 15, p. 1085-1090.

Williams Jr., R. S. (1983) Geological applications. Chapter 31. In Colwell, R. N. (réd.) Manual of Remote Sensing, 2e édition, American Society of Photogrammetry, vol. 2, p. 1667-2100.

Yacé, I. (1976) Le volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de Fétékro en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université d'Abidjan, Abidjan, 373 p.

Yobou, R. (1993) Pétrologie des granitoïdes du Protérozoïque inférieur du Centre-Nord de la Côte d'Ivoire (Ferkéssédougou-Marabadiassa). Évolution magmatique et contexte géodynamique.Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, Paris, 294 p.