Télédétection, 2003, vol. 3, n° 5, p. 419–427
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

LES DIFFÉRENTES SIGNATURES DES FRACTURES DE SOCLE CRISTALLIN EN ZONE SAHÉLO-SOUDANIENNE DU BURKINA FASO (BASSIN VERSANT DE BIDI, PROVINCE DU YATENGA)

YOUSSOUF KOUSSOUBÉ*, ALAIN NINDAOUA SAVADOGO et SAMUEL NAKOLENDOUSSÉ.

Laboratoire d'hydrogéologie, Unité de formation et de recherche en sciences de la vie et de la Terre
Université de Ouagadougou, B.P. 7021, Ouagadougou, Burkina Faso.
Téléphone : (226) 30 70 20 ; télécopieur : (226) 30 72 42

Courriel (*) : youssouf.koussoube@univ-ouaga.bf

(soumis le 30 août 2002 ; révisé le 28 octobre 2002 ; accepté le 13 février 2003)

Dans la zone sahélo-soudanienne de Bidi, l'utilisation des données de télédétection et le recalage par des données de terrain ont permis de caractériser les fractures. Des images HRV (XS) de SPOT en formats analogique et numérique ainsi que des photographies aériennes panchromatiques utilisées ont offert une bonne identification et une classification des linéaments. La réalité de terrain de ces linéaments a été faite à partir de mesures géophysiques (électrique, électromagnétique) et d'observations sur le terrain (géologie, hydrogéologie, géomorphologie et botanique). Cette méthodologie de travail a permis de différencier trois grands types de fractures enfouies sous des matériaux d'altérations diverses, épais de 10 m à plus de 50 m. Les fractures signalées par des alignements de végétation (type A) sont les plus nombreuses dans le massif granitique syntectonique de Bidi couvrant 80 % de la surface du bassin ; certaines espèces végétales hydrophiles ainsi que des édifices de termitières épigées soulignent bien ces fractures ouvertes. Les fractures signalées par des contrastes de tonalité et de texture (type B) correspondent à des failles avec des paliers nets de résistivité apparente. Les fractures signalées par des corniches rectilignes de témoins de cuirasses latéritiques (type C) correspondent à des failles tardives qui ont imposé leur direction à ces zones d'altération privilégiée. En matière d'hydrogéologie de socle cristallin, les chances de succès des campagnes de prospection de forages d'eau sont plus grandes lorsqu'on s'adressera préférentiellement par ordre, aux linéaments de type B, de type A et de type C.

Mots-clefs : Télédétection ; SPOT ; linéaments ; fractures ; socle cristallin ; forages ; géophysique ; hydrogéologie ; Burkina Faso.

DIFFERENT FRACTURES FEATURES IN THE SAHELO-SOUDANIAN AND CRYSTALLINE BASEMENT OF BURKINA FASO (BIDI BASIN, YATENGA PROVINCE)

In the Sahelo-Soudanian and crystalline basement of Bidi, the use of remote sensing data and the ground truth by field data has permitted to characterise fractures. SPOT HRV-XS images in analog and digital formats and aerial panchromatic photographs give a sharp identification of lineaments.
The ground truthing of those lineaments was using by geophysical devices (electric, electromagnetic) and by observations including geology, hydrogeology, geomorphology and geobotany). This work methodology has permitted to detect and differentiate three types of fractures embedded under diverse surface materials 10 to 50 m thick. Type A fractures, distinguished by alignments of vegetation are more numerous in the syn-tectonic granit of Bidi covering 80 % of the basin area. Some xerophytes absorbent species and termitaria underline those fractures well. Type B fractures distinguished by tone and texture contrasts correspond to faults with well-defined clean resistivity profiles. Type C fractures distinguished by rectilinear ledges of lateritic iron crust features (regoliths) correspond to recent faults, which have imposed those weathering zones. With respect to ground water search in crystalline rocks, boreholes are more successful in association with lineaments of type B than A and C.

Keywords : remote sensing ; SPOT ; lineament ; fractures ; crystalline basement ; drilling ; geophysics ; hydrogeology ; Burkina Faso.

1. INTRODUCTION

En hydrogéologie et en géologie minière du socle cristallin, il paraît important de trouver les signatures permettant de cartographier rapidement les structures de déformations majeures (failles, structures filoniennes, contacts géologiques, zones de cisaillement) qui sont enfouies sous les altérations superficielles du sol. En hydrogéologie notamment, des études récentes ont montré des débits importants dans des zones de failles et de filons ainsi qu'au niveau des contacts géologiques (Du Berger *et al.* 1996, Koussoubé *et al.* 2000). La détection rapide de ces structures dans les zones cristallines à l'aide de leurs signatures par diverses méthodes d'approche, trouve donc son importance. C'est pourquoi, nous nous sommes fixés comme objectif de reconnaître ces fractures dans la zone granitique du bassin de Bidi, situé au nord du Burkina Faso (figure 1).

* Correspondant principal

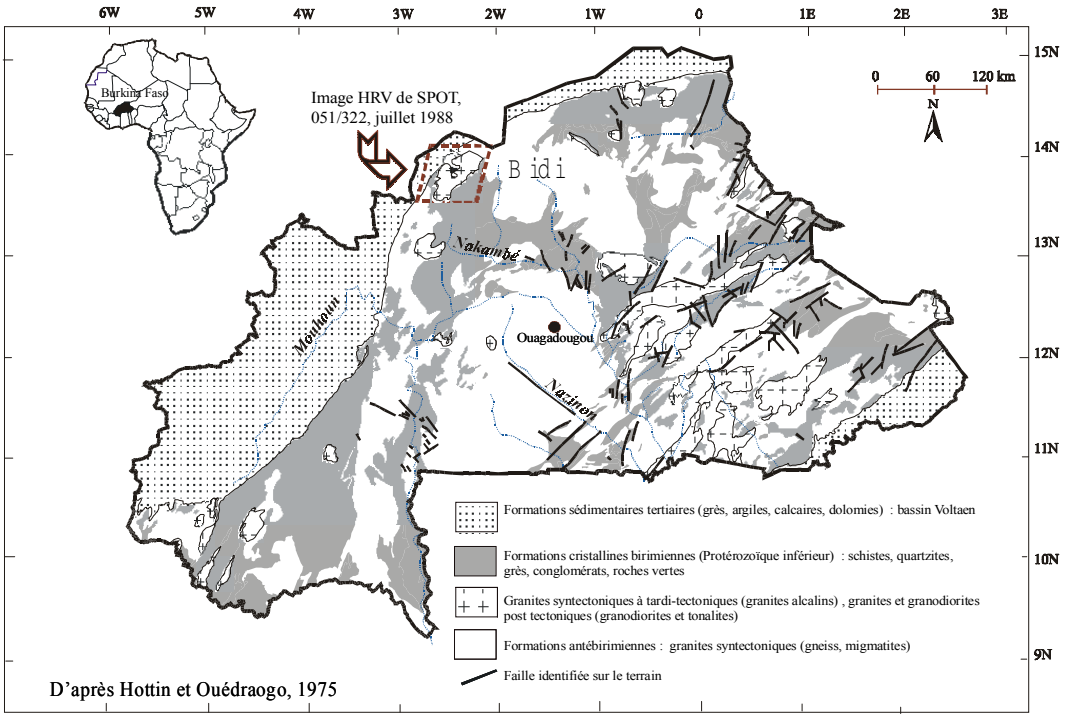


FIGURE 1 Carte géologique simplifiée du Burkina Faso et localisation de la zone d'étude. *Simplified geological map of Burkina Faso showing the location of the studied area.*

2. CONTEXTE PHYSIQUE DE L'ÉTUDE

Le bassin de Bidi couvre une superficie de 157 km^2 (figure 2). Le climat est de type sahélo-soudanien selon la définition de Aubréville (1949). Les formations meubles sont constituées par des produits d'altération de sable hydro-éolien, d'épandage gravillonnaire, de cuirasse latéritique et d'altérites argileuses (saprolite, argiles tachetées indurées) dont l'épaisseur peut dépasser 50 m. Le substratum rocheux est formé de roches cristallines dont les aires de répartition sont de 91 % pour le granite syntectonique (2,1 milliards d'années, d'après Boher *et al.*,1992), de 8 % pour l'unité volcano-sédimentaire (gabbros, schistes, etc.) et seulement 1 % pour les volcanites basiques (figure 2). La végétation est de type steppe arbustive et arborée sur les interfluves et de type forêt-galerie dans les bas-fonds. Le relief est peu contrasté avec des altitudes variant entre 280 et 360 m. Les buttes latéritiques en plateau, en croupe ou en pseudo-cuesta, forment l'essentiel du relief.

3. MÉTHODOLOGIE

Une interprétation visuelle des images aéroportée et spatiale (figures 3 et 4) a permis de distinguer trois types linéamentaires : *1)* les alignements de végétation (type A) correspondant à des alignements d'arbres et de hautes herbes bien visibles sur les photographies aériennes (mission 84066B de décembre 1984 à l'échelle du 1 : 50 000 dont la prise de vue eut lieu entre 8 h 00 et 9 h 30 avec des lignes de vol est-ouest) et les compositions colorées d'images satellitaires HRV (XS) de SPOT (image 051/322, juillet 1988) ; *2)* les contrastes de tonalité et de texture (type B) représentant les plages sombres contrastant avec des plages plus claires ; *3)* les alignements de corniches de témoins de cuirasse latéritique (type C).

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la vérification de terrain des trois types de linéaments : examen des états de surface du sol (géologie, géomorphologie, microstructures sur affleurement rocheux, faune et flore du sol notamment les termitières en cheminées et les espèces végétales hydrophiles), prospection géophysique par des profils électromagnétiques (Apex MaxMin en bobines horizontales, avec une séparation des bobines de 100 m). Ces profils électromagnétiques de dégrossissage des zones conductrices, sont couplés aux profils électriques (méthodes des résistivités) suivant le dispositif de Schlumberger ; les pas de mesures de 10 m permettent de repérer les principales fractures). Ces résultats ont été exprimés sous forme de cartes et de courbes.

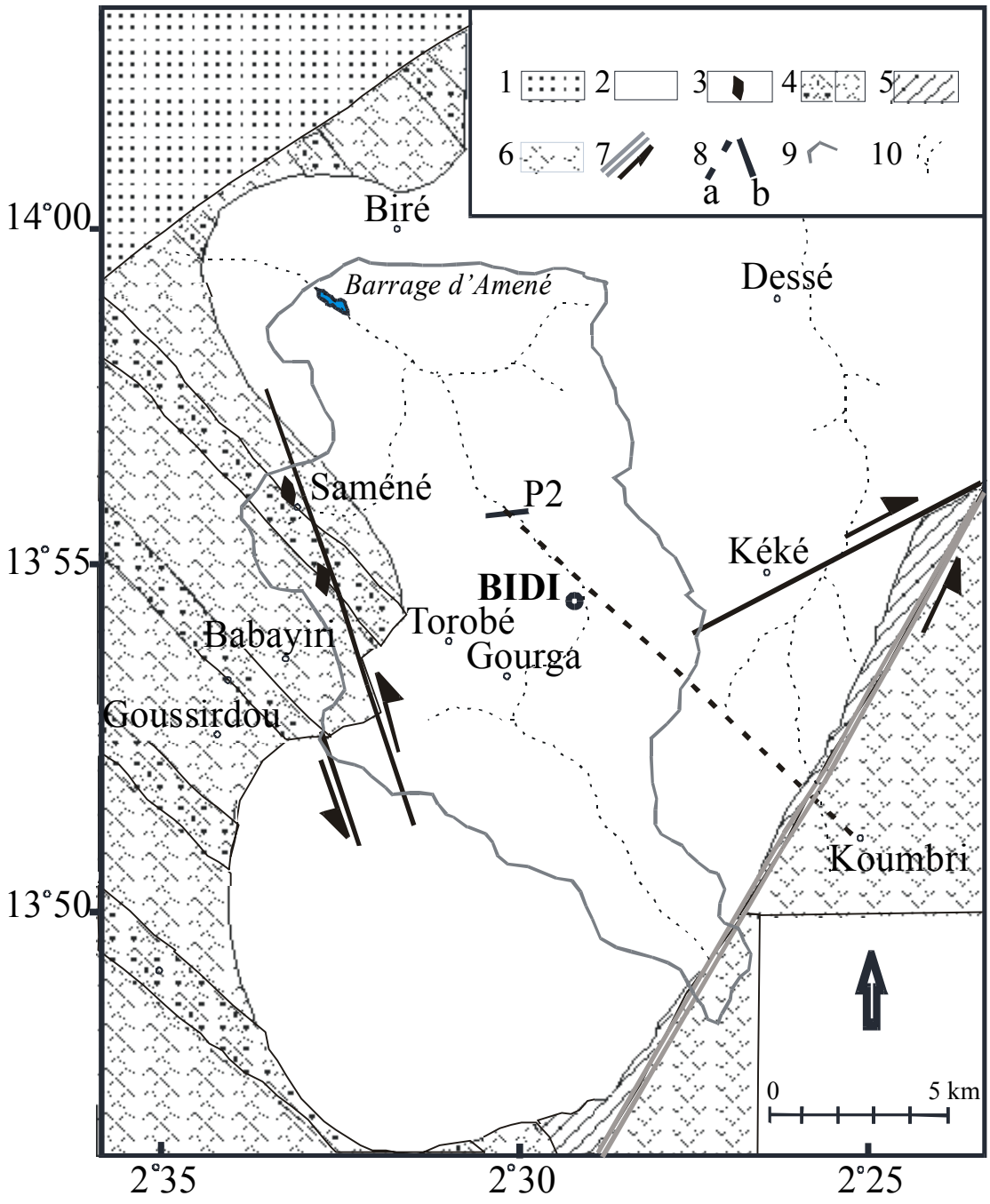


FIGURE 2 Carte géologique de la région de Bidi. *Geological map of Bidi area.*

Légende : *1)* grès et argiles sableuses du Continental terminal ; *2)* granitoïdes du massif de Bidi ; *3)* gabbros (unité volcano-sédimentaire) ; *4)* série de roches volcaniques et sédimentaires acides ou basiques à neutres ; *5)* schistes versicolores (unité volcanique) ; *6)* basalte et andésite (unité volcanique) ; *7)* faille transcurrente de Koumbri ; *8)* zone de cisaillement observée (8a) et zone de cisaillement central de Bidi (8b) ; *9)* contour du bassin versant de Bidi ; *10)* réseau hydrographique ; P2) situation du profil géophysique d'Ouest en Est.
D'après Koussoubé, 1996.

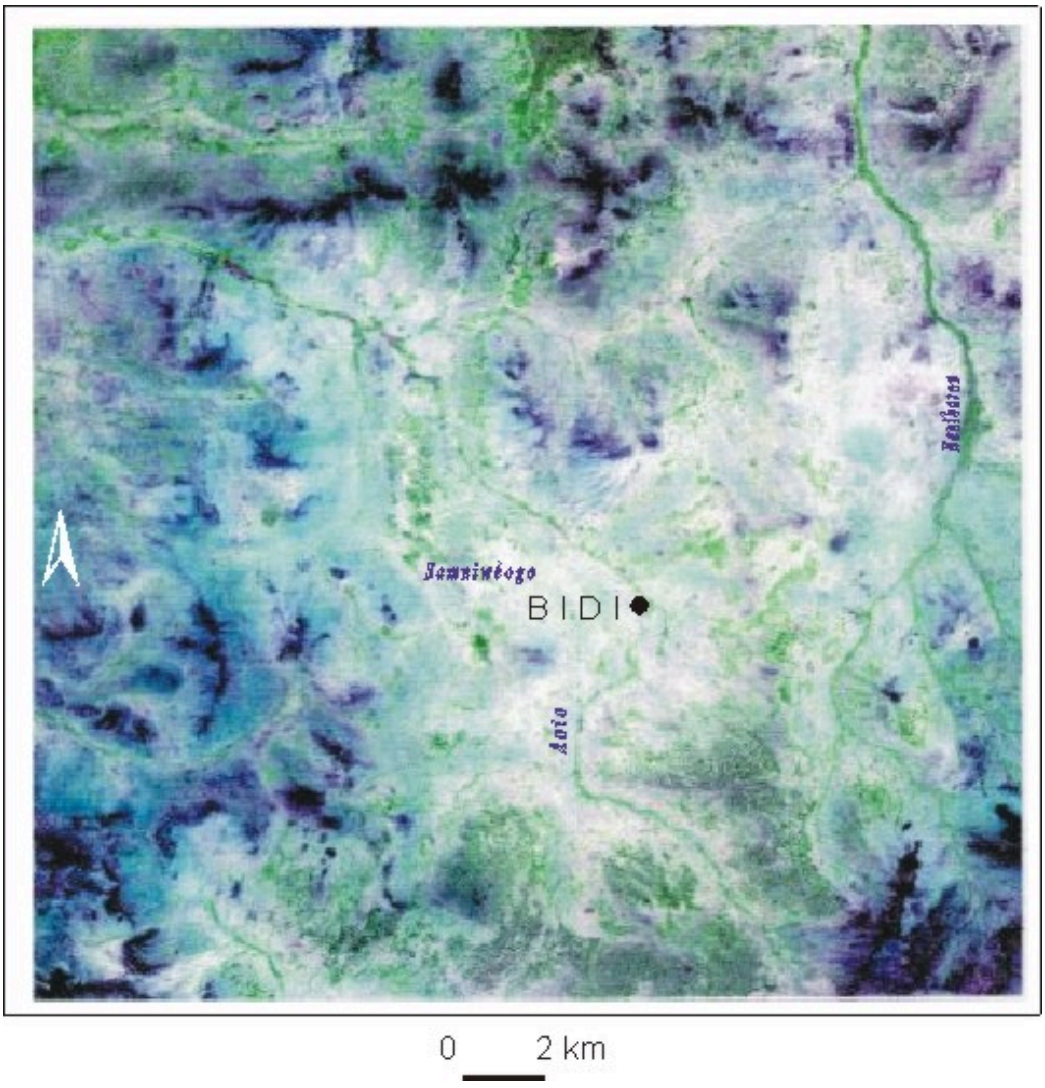


FIGURE 3 Image satellitaire HRV (XS) de SPOT de la région de Bidi (image 051/322, juillet 1988). Composition colorée RGB-132, étalement linéaire de contraste. *The SPOT HRV (XS) image of Bidi area. RGB-132 colored composition with linear stretch.*

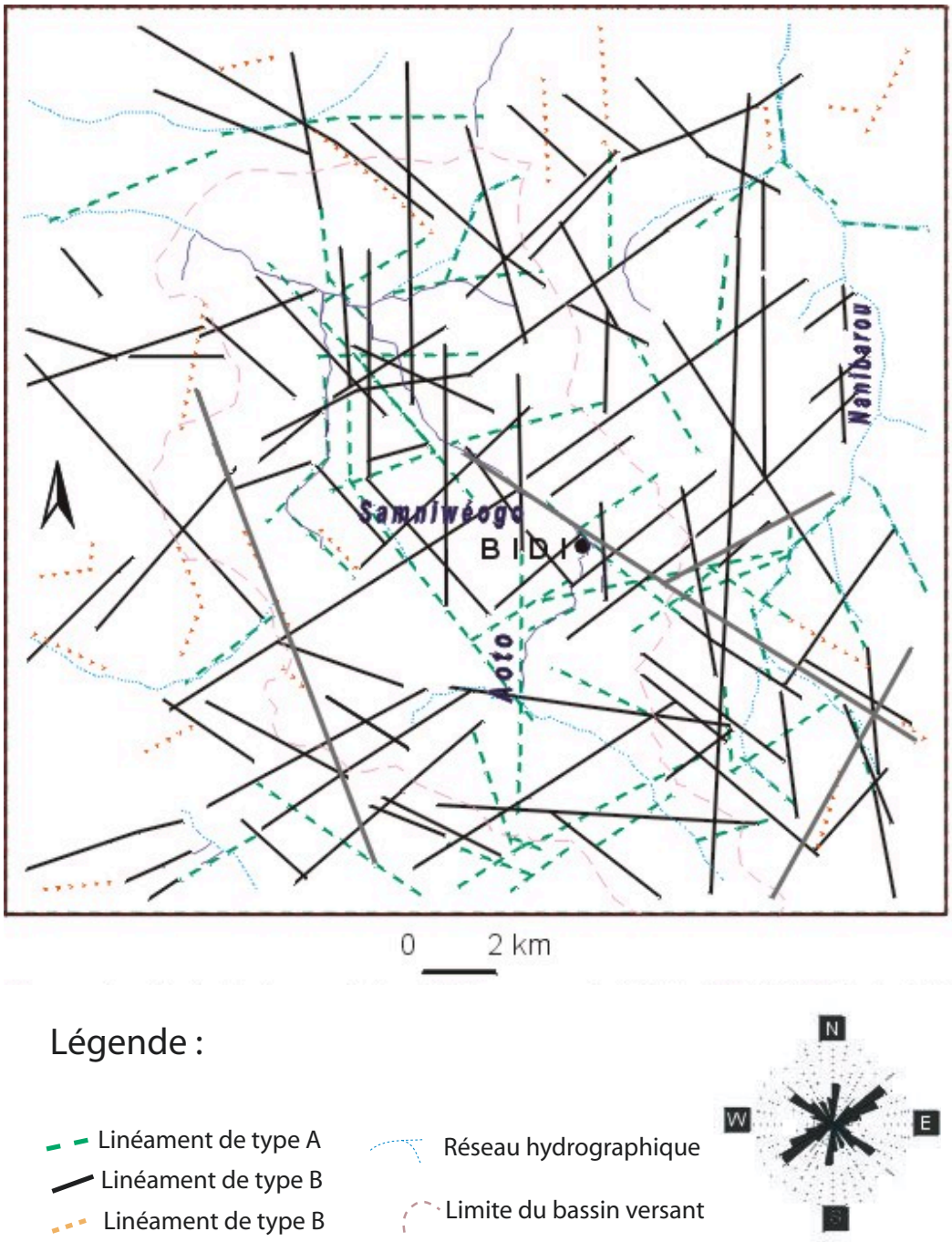


FIGURE 4 Carte linéamentaire de l'image HRV de SPOT de la région de Bidi (image 051/322, juillet 1988). *Lineaments map of the Bidi area from the SPOT HRV image.*

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1. États de surface du sol et linéaments

Les linéaments de type A représentent plus de 80 % des linéaments identifiés dans le bassin de Bidi, dont le substratum rocheux est essentiellement granitique (figure 2). On distingue, des espèces végétales arborées d'interfluves, parmi lesquelles on peut citer *Parkia biglobosa, Lannea microcarpum* ; des espèces arbustives et sous-arbustives (*Piliostigma reticulatum*, *Diospyros mespiliformis*); des hautes herbes comme *Andropogon guayanus*, qui soulignent bien les zones humides. En plus des espèces végétales, on y distingue également les édifices de termitières en cheminées (*Macrotermes bellicossus*, *Macrotermes subhalinus*) qui soulignent bien la fracturation par des alignements assez remarquables (Savadogo, 1984). Le type linéamentaire B (contraste de la tonalité et de la texture) représente 8 % de l'ensemble des photo-linéaments du bassin de Bidi, avec la nature du substratum rocheux. La plus grande densité de linéaments de type B se rencontre dans la zone à substratum volcanique et volcano-sédimentaire. Les signatures sur le terrain sont très diversifiées : il peut s'agir de contact géologique, de limite d'affleurement ou d'altérations différentielles des sols. Le type linéamentaire C (corniches rectilignes de cuirasse latéritique) ne représente que 1 % des photo-linéaments du bassin de Bidi. Leur prépondérance est remarquable dans les environnements volcaniques et volcano-sédimentaires à nombreux reliefs cuirassés ou carapacés. Très fréquemment, les trois types de linéaments identifiés sont soulignés par des édifices biologiques de termitières épigées (Macrotermes).

4.2. Répondants des linéaments avec les méthodes géophysiques

4.2.1. Type A

Les courbes des traînés électriques montrent des anomalies conductrices de résistivité apparente qui présentent des formes variées correspondant à des linéaments de type A. Par ailleurs, ces alignements de végétation sont aussi soulignés par des paliers de hautes valeurs de résistivité apparente (horst à substratum rocheux sub-affleurant) et des basses valeurs de résistivité apparente (graben à substratum rocheux effondré) : dans ce cas, il s'agit d'un méga-linéament (figure 5).

4.2.2. Type B

Dans certains cas, les failles sont soulignées par un contraste de tonalité marqué par des zones de hautes valeurs de résistivité apparente passant à des zones de basses valeurs. La carte de résistivité apparente de la figure 6 illustre bien un cas de ces zones de failles qui sont bien conformes aux linéaments de la photo-interprétation (Sama 1989, Koussoubé, 1996).

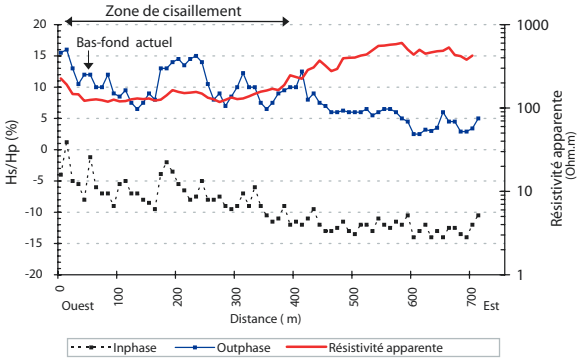


FIGURE 5 Signatures de la zone de cisaillement central de Bidi par les méthodes géophysiques électromagnétique et électrique. La localisation du profil géophysique est représenté sur la figure 2. *Features of the central shear-zone of Bidi shown by electrical and electromagnetic methods. The location of the geophysical profile is on figure 2.*

4.2.3. Type C

Les contacts anormaux entre les granitoïdes et les volcano-sédiments correspondant à des linéaments apparaissent sous forme de contraste de tonalité (type B), d'alignements de cuirasses latéritiques (type C) et de termitières épigées (type A) ; ils sont bien identifiés par la composante imaginaire (*Outphase*) (Koussoubé *et al.*, 2000).

La zone de cisaillement central du bassin de Bidi montre une vaste anomalie conductrice en résistivité apparente, mais avec un sursaut de la composante imaginaire MaxMin dans la zone axiale de la structure (figure 5). Ce couloir de déformation majeure, long de plusieurs kilomètres et d'orientation SE, correspond à une association des types linéamentaires A, B et C (figures 1 et 3).

4.3. Mesures structurales et directions de déformation

Les observations et les mesures faites sur les affleurements rocheux ont permis de mieux comprendre et de relativiser les directions linéamentaires mises en évidence. Deux directions principales de fractures sèches (est-ouest et nord-sud) sont observées sur les affleurements rocheux (figure 3). Ces fractures tardives sont en majorité verticales (Koussoubé, 1996). Mais on observe également des failles décrochantes sénestres ou dextres d'orientations N120°E de moindre fréquence que les fractures sèches. En outre, l'étude structurale de terrain a révélé une faille

transcurrente sénestre N50°E passant près de Koumbri (figure 2). Cette structure de déformation d'importance régionale se signale sur l'image satellitaire sous forme d'un contraste de tonalité diffus (figures 3 et 4). Sur les affleurements rocheux, cette structure est marquée par divers éléments pétrographiques : étirement de minéraux de quartz, paragenèse minérale à chlorite + séricite + calcite + quartz, boudinage de quartz faiblement minéralisé en or et panneaux sigmoïdes d'andésite dans le basalte. Des zones de cisaillements identifiées sur le terrain et correspondant à des laminages affectent aussi bien les roches encaissantes volcano-sédimentaires et volcaniques que le massif granitique lui-même. Ces zones sont allongées en couloirs de longueur pluri-kilométrique et de largeur métrique à hecto-métrique suivant trois directions reconnues N65°E, N 165°E et N130°E (figure 2).

5. DISCUSSION

Les photos-linéaments à l'échelle du 1 : 50 000 ne montrent pas les directions des failles décrochantes tardives (failles en relais, faille transcurrente) qui sont pourtant bien observées sur le terrain, malgré l'échelle assez grande des photographies aériennes par rapport à l'image satellitaire (résolution spatiale). Cette lacune des directions N120° à N140°E serait liée en partie à la position du soleil lors de la prise de vue vers 9 h, ce qui ne permet pas de bonnes réflectances des structures au sol orientées SE. Par ailleurs, l'image numérique HRV (XS) présente également une lacune suivant les directions N15 à N30°E (figure 4) ; le satellite SPOT passant vers 10 h sur le site de Bidi, les fractures importantes observables sur le terrain et ayant une direction N120°E sont ainsi masquées.

Le réseau linéamentaire en trois types (alignements de végétation, contraste de tonalité et de texture, corniches de témoins de cuirasse latéritique) établi à partir d'images satellitaires à haute résolution et de photographies aériennes panchromatiques en période sèche de l'année, permet de bien caractériser le réseau linéamentaire du socle cristallin. Ces linéaments montrent la prépondérance des alignements de végétation dans un contexte granitique de milieu sahélo-soudanien. Ces linéaments de type A représentent donc des couloirs où le stock hydrique permet la bonne croissance d'espèces végétales. Mieux, lorsque la structure linéamentaire résulte de l'association des trois types de linéaments (alignements de végétation, contraste de tonalité et de texture, corniches de cuirasse), l'anomalie conductrice est plus importante comme l'ont confirmé les travaux de géologie de terrain et de géophysique (profil 2 réalisé sur le couloir de cisaillement central correspondant à une association de linéaments A, B, et C, figures 3, 4 et 6).

De plus, les travaux de terrain ont permis d'identifier des zones de cisaillements sub-méridiens sénestres et NE-SO dextres ainsi qu'une large zone (plus de 150 m) centrale longeant et prolongeant l'axe majeur du bas-fond de Bidi à la hauteur de Dabéré correspondant à une structure linéamentaire A + B + C. Cette structure centrale contrôlerait les déformations majeures dans le bassin granitique de Bidi.

6. CONCLUSION

Les résultats de l'étude présentée ici ont permis de caractériser et de différencier trois types de fractures.

Les linéaments de type A correspondent à une végétation active et dense qui peut être un indice intéressant de prospection hydrogéologique, surtout en saison sèche. Les linéaments de type contraste de tonalité et/ou de texture sont des failles d'importance hydrogéologique certaine ; Aussi, les directions SE correspondant à celles des filons de pegmatite sont des structures ouvertes à rechercher dans les investigations géophysiques.

Les linéaments de type B, signalés par des contrastes de tonalité ou de texture, sont les expressions de l'ouverture par distension du socle granitique syntectonique de Bidi. Le potentiel hydraulique de ce genre de structures est évident comme le témoigne le seul forage à gros débit de tout le bassin de Bidi (5 m^3/h).

Les fractures de type C correspondent à de corniches rectilignes de témoins de cuirasses latéritiques. Les fractures, filons et failles tardives en ouverture ou en extension peuvent présenter une conductivité hydraulique plus élevée que la roche cristalline initiale. Ces fractures ouvertes s'expriment dans la géomorphologie par le réseau hydrographique et les alignements de corniches de témoins de cuirasses latéritiques. Ces fractures sont nombreuses dans la zone sahélo-soudanienne et constituent des zones de circulation préférentielle d'eau et de fluides minéralisateurs. Des extensions de ce travail doivent se poursuivre dans d'autres contextes géologiques comme dans les roches vertes qui constituent une partie importante des formations birimiennes du Burkina Faso.

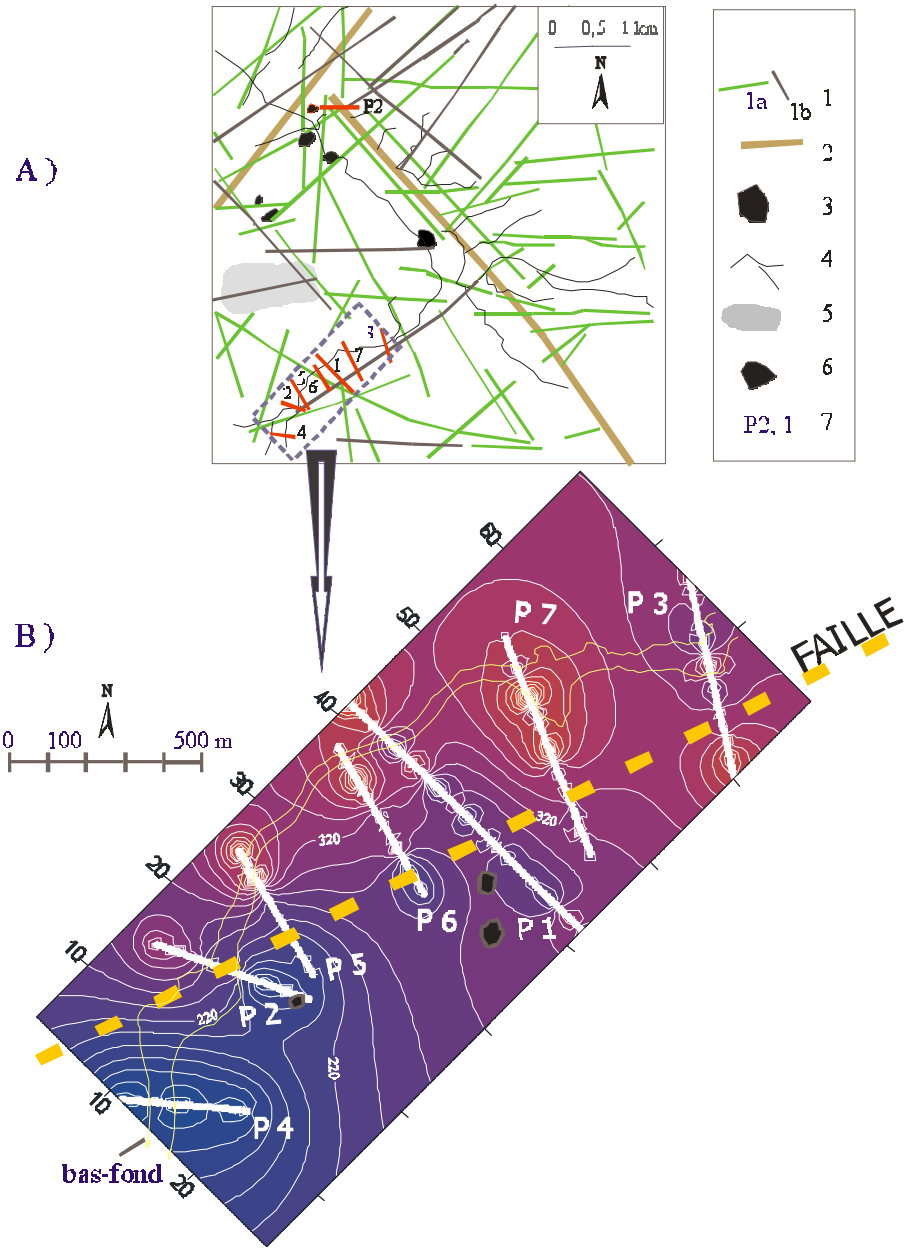


FIGURE 6 Identification par la géophysique électrique d'une fracture de type B.

A) Légende : *1a*. photo-linéaments de type alignements de végétation ; *1b*. photo-linéaments de type contraste de tonalité et de texture ; *2*. linéament satellitaires ; *3*. affleurement de granitoïdes ; *4*. réseau hydrographique ; *5*. bas plateau cuirassé ; *6*. habitations ; *7*. profils géophysiques dans le bassin de Bidi (P2) et dans le bief de Gourga (1 à 7).
B) Légende : P1 à P7 : profils géophysiques
250 courbe d'iso-résistivité apparente (ohm.m) ; Habitations (Gourga).

Fracture of type B shown by geophysical devices (electrical resistivity method)
***A)** Legend : 1a. Lineament of aerial photography expressed by alignments of vegetation; 1b. Lineament expressed by ton and texture contrasts ; 2. Satellite lineament ; 3. Granitic rocks ; 4. Hydrographic path ; 5. Lower regolith plateau ; 6. Habitations ; 7. Geophysical profiles in the basin of Bidi (P2) and in the bief of Gourga (1 to 7).*
***B)** Legend : P1 to P7: Geophysical profiles;*
250 *Isolines of apparent resistivity (ohm.m) ; Habitations.*

Remerciements

Les auteurs remercient l'institut de recherche pour le développement IRD (anciennement appelé ORSTOM) pour la mise à disposition de l'image HRV de SPOT et de crédits financiers importants ayant permis la bonne conduite de cette étude.

Les auteurs remercient également les différents lecteurs du manuscrit pour leur contribution qui ont a permis de rehausser la qualité de l'article.

Références

Aubréville, F. (1949) Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris, 351 p.

Boher, M., Abouchami, W., Michard, A., Albarède, F. and Arndt, N.T. (1992) Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. Journal of Geophysical Research, vol. 97, n° B 1, p. 345-369.

Du Berger, R., Lemieux, G.-H., Rouleau, A., Bégin, R., Savadogo, A.N., Nakolendoussé, S., Koussoubé, Y. et Diallo, S. (1996) Étude des facteurs de productivité des aquifères de socle cristallin du Burkina Faso. Rapport final, Centre d'études des ressources minérales de l'Université du Québec à Chicoutimi et Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou, 70 p.

Hottin, G. et Ouédraogo, O.F. (1975) Notice explicative de la carte géologique à 1 : 1 000 000 de la république de Haute-Volta. Éditions du Bureau de recherches géologiques et minières, Paris Cedex 15, France, 58 p.

Koussoubé, Y. (1996) Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso, cas du bassin versant du bas-fond de Bidi. Thèse de doctorat , Université de Dakar, 210 p.

Koussoubé, Y., Savadogo, A. N., Nakolendoussé, S. et Bazié, P. (2000) Efficience de trois méthodes géophysiques d'investigation latérale dans l'identification de contacts géologiques entre des formations du Protérozoïque inférieur du Burkina Faso. Revue PANGEA n° 33/34, juin/décembre 2000, p. 49-60.

Sama, M. B. (19870) Etude géophysique et hydrogéologique du bas-fond de Gourga, région de Bidi (Ouahigouya). Mémoire de fin d'études, École inter-états des ingénieurs de l'équipement rural (EIER) de Ouagadougou, 50 p. + annexes.

Savadogo, A. N. (1984) Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat d'État, Université Scientifique et médicale de Grenoble, 340 p.