

Nouvelles données lithologiques et structurales du secteur de Nindangou dans le prolongement Est de la ceinture de Goren (Burkina Faso-Afrique de l'Ouest)

New lithological and structural data from the Nindangou area in the eastern portion of the Goren belt (Burkina Faso-West Africa)

Rashid Ali Isdine DAO, Hermann ILBOUDO* & Séta NABA

Université Joseph KI-ZERBO, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire Géosciences et Environnement (LaGE), UFR-SVT, 03 BP 7021, Burkina Faso *(hermannilboudo@gmail.com).

Résumé. La région de l'Est du Burkina Faso incluant le secteur de Nindangou a bénéficié d'une couverture cartographique au lendemain des indépendances afin de promouvoir la géologie et identifier des secteurs favorables à la recherche des substances minérales utiles. Cependant, la majorité des cartes géologiques se limitent à la spatialisation des ensembles lithologiques sans porter d'intérêt aux relations structurales et lithostratigraphiques. Notre étude qui se base sur de nouvelles données multi-sources renforcées par des investigations de terrain vise à attribuer une nouvelle identité cartographique à Nindangou.

L'interprétation d'imagerie satellitaire décèle quatre familles de linéaments, dont deux directions principales (N130° et N44°). Par ailleurs, l'interprétation du signal analytique magnétique révèle des formations basiques et ultrabasiques porteuses d'une aimantation rémanente à l'ouest du secteur et des dykes supposés doléritiques de directions NW-SE et NE-SW. En somme, l'environnement de Nindangou comporte des roches basiques-ultrabasiques (10%) composées de pyroxénites et d'orthoamphibolites basaltiques antérieures à toutes les formations lithologiques locales, suivies des granitoïdes (granites (40%), granodiorites (45%)), et enfin des formations tardi-magmatiques (5%) comprenant des dykes microdioritiques et doléritiques, des veines de quartz et des filons de pegmatite. La zone cartographiée est traversée par des couloirs de déformation affectant profondément les microdiorites suivant la direction NE-SW. A noter enfin que la région d'étude est marquée par une schistosité N60°, des fractures N138° et des veines de quartz N45° et N90°.

Mots clés : Nindangou, Paléoproterozoïque, Cartographie, Imagerie géophysique, Imagerie satellitaire, Déformation.

Abstract. The eastern portion of Burkina Faso, including the Nindangou area, was covered by mapping after independence in order to promote geology and identify favorable sites for useful mineral resources. However, the majority of geological maps are limited to the spatialization of lithological units without paying attention to structural and lithostratigraphic relationships. Our study, based on new multi-source data, reinforced by field investigations, aims to attribute a new cartographic identity to Nindangou. Remote Sensing study reveals four families of lineaments, including two main directions (N130° and N44°). In addition, the interpretation of the magnetic analytical signal reveals basic and ultrabasic formations carrying a remanent magnetization to the west of the sector and supposed dolerite dykes from NW-SE and NE-SW directions. In sum, the Nindangou geology environment comprises mafic and ultramafic rocks (10%), composed of pyroxenites and orthoamphibolite basaltes anterior to local lithologies, followed by granitoids made up of granites (40%); granodiorites (45%), and finally late-magmatic formations (5%) including microdioritic and doleritic dykes, quartz veins and pegmatite veins. The mapped area is crossed by deformation corridors, deeply affecting the microdiorites following the NE-SW direction. Finally, note that the study region is marked by N60° schistosity, N138° fractures and N45° and N90° quartz veins.

Keywords: Nindangou, Paleoproterozoic, Mapping, Geophysical imagery, Remote sensing, Deformation..

Abridged English version

The present study follows the methodology below:

- use of satellite imagery implying the ENVI software, the processing of the Landsat 8 OLI satellite image of the Nindangou area was carried out in order to strengthen lineament analysis;
- interpretation of aeromagnetic data to discriminate rocks regarding their magnetic susceptibility using Geosoft's OASIS MONTAJ software;
- field investigations.

Directional filters at 45° and 90° were applied to Landsat 8 OLI satellite image of the sector over 3x3 matrix, followed by image enhancement (Fig. 2A-2B). Using ArcGIS software, the lineaments were digitized (Fig. 2C-2D) and four (04) directions families were highlighted with two (02) main

directions. (i) N120°-N145° direction and (ii) N30°- N50° direction.

Based on the total magnetic field, magnetic anomalies are observed in the western, southwestern and eastern parts (Fig. 3A) and are related to basic-ultrabasic rocks. The second derivative analytical signal (Fig. 3B) provides a better coverage of mafic and ultramafic units, which are mostly located in west. Dolerite dikes strike WNW-ESE (Fig. 3B).

Based on field examination, lithologies are made up of granites with both porphyritic texture implying large feldspar crystals (Fig. 4A) and banded ± foliated granites, (Fig. 4B); granodiorites finely banded and contain numerous mafic xenoliths (Fig. 4C); The associated pyroxenites crops out near the granite (Fig. 4F); microdiorites are strongly distorted (Fig. 4E); post magmatic events develop pegmatite and quartz veins within the granites (Fig. 4B-4D), mainly along N45° and N135° directions.

In addition, deformations are schistosity and fractures. The first affected microdiorite (Fig. 5C) strikes N60° (Fig. 6E). The second strikes NNW-SSE (N138°) (Fig. 6C) steeply dipping. Quartz veins comprise quartz ± feldspar ± tourmaline (Fig. 6D). The combined collected data allowed drawing a new revised geological map (Fig. 6B).

Use of aeromagnetic data allowed rocks discrimination. The strong magnetic anomalies are explained by the considerable presence of ferromagnesian minerals within the rocks concerned (García *et al.* 2007, Randrianasolo, 2009), and verified in the field. Lineament analysis by remote sensing allowed us to make a structural analysis which was confirmed by the field data.

Our work reveals a fairly varied lithology at this observation scale, compared to the studies of Castaing *et al.* (2003), Kagoné *et al.* (2003), which showed a monotonous lithology. The facies evolve chronologically: (i) from the mafic-

ultramafic pile, including basaltic ortho-amphibolites and pyroxenites; (ii) granodiorites and porphyritic granodiorites, which are the most dominant and are located in the North and in the Center evolving towards the West of the study area; (iii) granites in the Center and evolving in the South; (iv) a set of post magmatic formations, including quartz veins, pegmatite veins and finally doleritic and dioritic dykes. The geological section produced (Figs. 7–8) strengthens our interpretation.

The chronological relationship between the post magmatic vein formations and the granites of the Nindangou sector presents an analogy with other chronologies established in other areas of Burkina Faso (Naba 1999, Kagambèga 2005, Ilboudo 2005, Ilboudo *et al.* 2018). Using the same approach, Ouattara & Koffi (2014) identified thirteen granitic facies in lithologic entities, initially assumed to be homogeneous in Côte d'Ivoire by Delor *et al.* (1992). The fault spotted by Kagoné *et al.* (2003) at the Center of the sector could be a sinistral strike-slip by analyzing the analytical signal.

INTRODUCTION

La cartographie géologique aux moyens de données diverses constitue un enjeu majeur pour la recherche et la promotion du potentiel géologique. Dans cette dynamique, les méthodes cartographiques mises en œuvre au cours des campagnes d'exploration successives et de recherches géologiques par les services géologiques nationaux et internationaux, couplées à l'approche académique ont connu une évolution sans précédent à différentes échelles (Delfour & Jeambrun 1970, Trinquard 1971, Hottin & Ouédraogo 1976, Castaing *et al.* 2003, Kagoné *et al.* 2003, Sawadogo 2017, Giovenazzo *et al.* 2018). Certes, l'emploi des données géophysiques aéroportées (Jessell *et al.* 2018, Baratoux *et al.* 2021, Giraud *et al.* 2021) et d'imageries satellitaires (García *et al.* 2007, Randrianasolo 2009) offre des facilités d'interprétation, mais elles ne sauraient se substituer entièrement aux investigations de terrain (Napon 1988, Naba 2007, Lompo 2010, Baratoux *et al.* 2011, Augustin *et al.* 2017, Fontaine *et al.* 2017, Ilboudo *et al.* 2017, Ilboudo *et al.* 2018).

L'accessibilité et l'intérêt, jadis portés aux ceintures de roches vertes, justifient l'inégalité et le taux de couverture cartographique assez disparate. De nombreuses cartes géologiques se limitent à la spatialisation des ensembles lithologiques sans porter d'intérêt aux relations structurales et chronostratigraphiques. A l'instar d'autres régions du Burkina, la région de l'Est a bénéficié d'une couverture cartographique au lendemain des indépendances afin de promouvoir la géologie et identifier des secteurs favorables à la recherche des substances minérales utiles. Par la suite, des campagnes de routines se sont succédées. Dans un contexte d'insécurité grandissante, afin d'enrichir la base de données cartographiques, notre étude se propose d'offrir une nouvelle identité cartographique au secteur de Nindangou par l'emploi de données multi-sources. De cette manière, nous avons essayé d'aboutir à des résultats qui pourraient relancer l'exploration minière dans cette partie dans un contexte plus sécurisé.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

La configuration géologique du Burkina Faso est largement marquée par des formations du socle Paléoprotérozoïque composées essentiellement (75%) des granitoïdes pluri-générationnels séparés par de puissantes séries volcaniques et volcano-sédimentaires sous forme de ceintures (Bonhomme 1962, Hottin & Ouédraogo 1976, Bessoles, 1977, Liégeois

et al. 1991, Castaing *et al.* 2003, Kagoné *et al.* 2003, Grenholm 2014). Les formations sédimentaires ont une importance marginale et sont datées du Néoprotérozoïque à Cambro-ordovicien de nature grés-carbonatée et associant des sédiments plus récents sous forme de complexes fluvio-lacustres. Plusieurs études intéressantes ont été entreprises dans les formations du socle notamment dans les ceintures, au regard de leur potentiel avéré en ressources minérales (Napon 1988, Lompo 2010, Baratoux *et al.* 2011, Augustin & Gaboury 2017, Fontaine *et al.* 2017, Ilboudo *et al.* 2017, Ilboudo *et al.* 2018). Le secteur de Nindangou intègre le domaine Baoulé-Mossi de la dorsale de Léo (Fig. 1A), composé de formations plutoniques et volcano-sédimentaires et plutoniques métamorphisées à l'Eburnéen (Fig. 1B) (Kagoné *et al.* 2003, Castaing *et al.* 2003). Les premières se composent de (i) granodiorites, tonalites et diorites quartzifères à amphibole et biotite plus ou moins rubanées et foliées datées à 2164 ± 5 Ma et 2162 ± 6 Ma par la méthode Pb-Pb par évaporation du plomb sur zircons (Kagoné *et al.* 2003), (ii) granites et tonalites à biotite sous forme de massifs circonscrits au sud de Nindangou, datés à 2009 ± 29 Ma par la méthode Pb-Pb (Kagoné *et al.* 2003), et (iii) granites leucocrates mylonitiques datés à 1988 ± 28 Ma par la méthode K-Ar (Kagoné *et al.* 2003). Les secondes sont des orthoamphibolites basaltiques, parfois en alternance avec des leptynites et d'un cumulat ultrabasique pyroxénique qui présente un débit massif (Castaing *et al.* 2003).

METHODOLOGIE

- (i) **L'étude par imagerie satellitaire.** A l'aide du logiciel ENVI, le traitement de l'image satellitaire Landsat 8 OLI du secteur de Nindangou a été effectué en vue de faire une analyse linéamentaire. Le traitement consiste en une application de filtres directionnels sur la bande 7, un rehaussement d'image et à la digitalisation des linéaments observés à l'aide du logiciel ArcGIS (version 10.5).
- (ii) **L'interprétation des données aéromagnétiques disponibles.** Les données aéromagnétiques issues du Projet d'Appui au Développement du Secteur Minier (PADSEM) en 2015 ont été interprétées afin de faire une discrimination des roches en fonction de leur susceptibilité magnétique à l'aide du logiciel OASIS MONTAJ de GEOSOFT. Ce qui a permis d'établir la carte du Champ Magnétique Total (TMI) et la carte du Signal Analytique (SA) sur laquelle un rehaussement de ton de l'image en noir et blanc met en relief les structures et les anomalies.

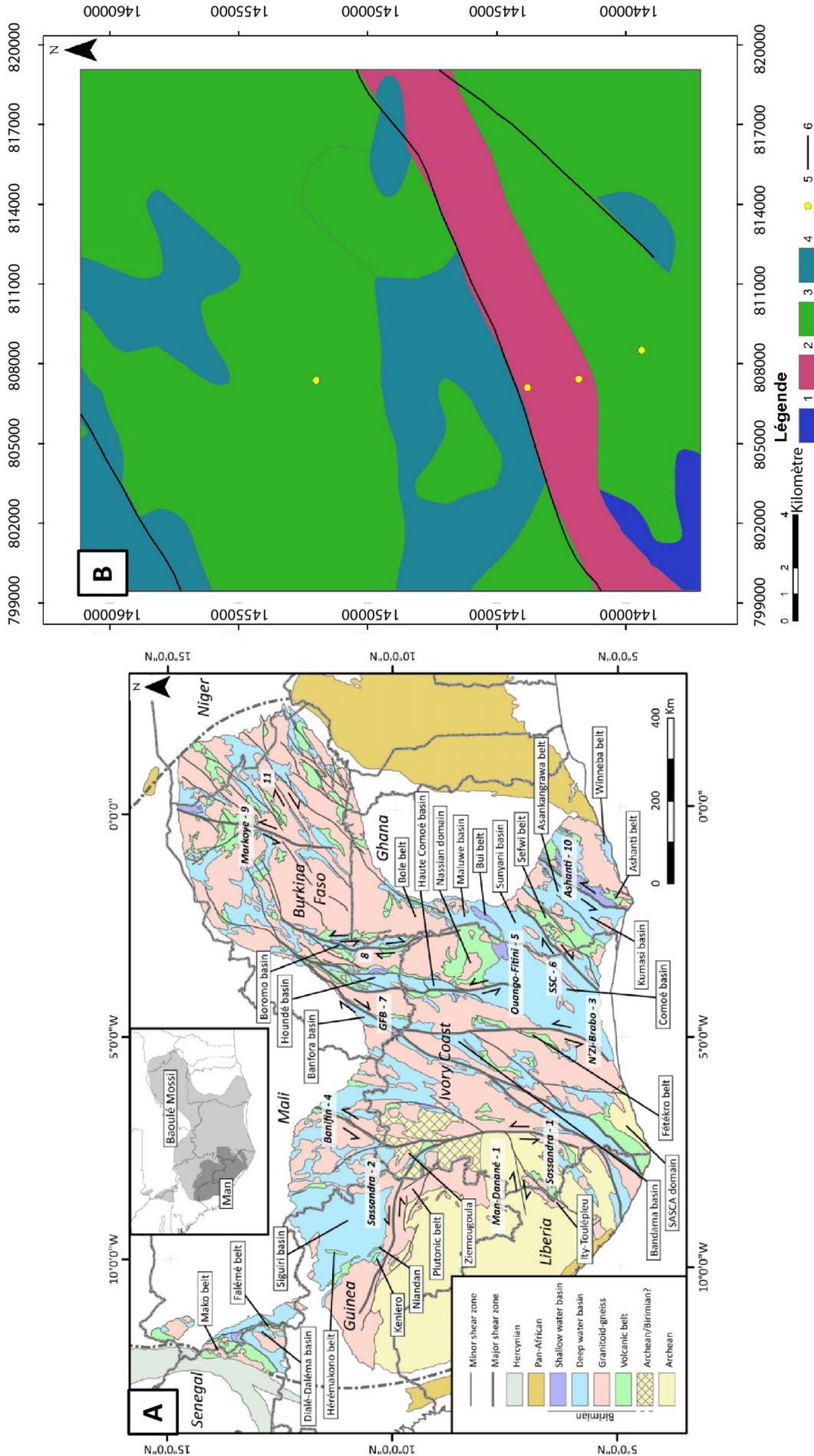


Figure 1. A. Carte géologique synthétique de la dorsale de Leo (d'après Grenholm 2014.), Zone d'étude (encadré en rouge). B. Carte géologique simplifiée du secteur de Nindangou à 1/200000e (Kagoné et al. 2003) : 1) Basalte, 2) Granite, 3) Tonalite, 4) Ultrabasite, 5) Points d'observation et de prélèvement d'échantillon de roche, 6) Faille.
 Figure 1. A. Synthetic geological map of the Leo Ridge (from Grenholm 2014.), Study area (framed in red). B. Simplified geological map of the Nindangou area at 1/200,000th (Kagoné et al. 2003) : 1) Basalt, 2) Granite, 3) Tonalite, 4) Ultrabasite, 5) Observation points and sampling points of rock, 6) Fault.

- (iii) **Les investigations de terrain.** En collaboration avec la société minière IAMGOLD ESSAKANE, un levé de terrain a été réalisé en vue de vérifier sur le terrain les résultats des différents traitements de données précédents. Les affleurements ont été décrits à l'échelle macroscopique avec un total de 46 sites d'observations et renforcés par une étude détaillée des lames minces au microscope.
- (iv) **L'élaboration d'une carte géologique révisée.** Le support utilisé pour corréliser les données et élaborer une carte géologique révisée du secteur est la carte établie par Kagoné *et al.* (2003) au 1/200000e. Les sites d'observations ont été positionnés. En cas d'absence d'affleurement, les données du signal analytique, deuxième dérivée ont été utilisées pour faire une analogie lithologique afin de mieux cerner les structures de déformation et la direction des dykes d'envergure locale. Enfin, l'analyse linéaire a permis de donner une direction des structures de déformation.

RESULTATS

Les données d'imagerie satellitaire

Des filtres directionnels à 45° et 90° ont été appliqués sur une image satellitaire Landsat 8 OLI du secteur d'étude suivant une matrice de 3x3 suivis d'un rehaussement d'image (Fig. 2A-2B). A l'aide du logiciel ArcGIS (version 10.5), les linéaments observés ont été digitalisés (Fig. 2C). Cette carte linéaire montre une densité considérable de linéaments. A l'issue de la digitalisation des linéaments, une analyse linéaire montre quatre familles de directions (Fig. 2D), dont deux directions principales. Par ordre de fréquence et d'importance décroissante les principales familles de directions sont : (i) une famille avec une direction entre N120° et N145° (direction moyenne : N130°) ; (ii) une famille avec une direction entre N30° et N50° (direction moyenne : N44°).

Les données aéromagnétiques

La carte du champ magnétique total indique que les plus fortes anomalies sont observées dans les parties Ouest, Sud-Ouest et Est (Fig. 3A).

Ces fortes anomalies magnétiques sont probablement associées à des roches basiques et ultrabasiques. En outre, une anomalie négative de courte longueur, localisée dans le Sud-Est est clairement bien visible sur la carte magnétique. Leur orientation coïncide avec la direction des dykes de dolérites et de diorites.

La carte du signal analytique deuxième dérivée fournit une meilleure délimitation des formations magnétiques porteuses d'une aimantation rémanente. La majorité des roches magnétiques se situe dans l'Ouest, le Sud et le Sud-Est du secteur (Fig. 3B). La plupart des dykes supposés doléritiques et dioritiques sont nettement cartographiés et mis en exergue dans la carte du signal analytique ; ces derniers présentent des anomalies linéaires très nettes et faciles à reconnaître avec des directions NW-SE et NE-SW (Fig. 3B). Nous avons pu également établir la carte du signal analytique ombragé à 90°. Cela permet de rehausser le ton de l'image en noir et blanc pour mettre en relief les structures et les anomalies régionales (Fig. 3C).

Les travaux de terrain

Des lames minces ont été confectionnées dans les échantillons des différentes unités pétrographiques et ont fait l'objet d'observations détaillées au microscope polarisant. Les micrographies n'ont pas été présentées pour une raison

de taille de l'article, mais les minéraux sont exprimés en proportion volumique.

Données lithologiques

- **Les granites** sont subleucocrates à mésocrates et se présentent sous forme de dalles d'extension décamétrique, métrique voir plurimétrique et le plus souvent sous forme de massifs isolés. La texture est grenue caractéristique avec un assemblage minéralogique comprenant du quartz (35%), des feldspaths potassiques représentés par le microcline (20%), du plagioclase (An_{15}) (25%) et de la biotite (20%) partiellement chloritisée. Les plagioclases subissent une légère altération en mica blanc. Deux faciès ont été distingués : (i) des granites à texture grenue porphyroïde avec des phénocristaux de feldspath (1 à 5 cm), de quartz et de micas (Fig. 4A) ; (ii) des granites rubanés et foliés, hétérogènes de couleur grise, avec une structure gneissique. Ces unités sont caractérisées par une alternance de bandes sombres micacées et de bandes claires à dominance quartzo-feldspathiques suivant une direction moyenne N60° (Fig. 4B). On pourrait les assimiler à des gneiss car le détail microscopique met en évidence une foliation métamorphique exprimée par les biotites flexueuses + quartz recristallisé qui moulent par endroits les assemblages porphyroblastiques quartzo-feldspathiques. Cependant, ils ne présentent aucun contact net perceptible sur le terrain avec les premiers.

- **Les granodiorites** forment des affleurements dispersés à ras le sol. La texture est grenue et la structure équante, parfois finement rubanée. La roche contient des xénolites aux contours anguleux de roches basiques et ultrabasiques de taille variable allant du centimètre au mètre (Fig. 4C). On note une forte altération météoritique de ces unités donnant une coloration rouge-ocre à la roche. Les détails microscopiques confirment une association commune de types quartz-plagioclase-biotite-amphibole. Le quartz (30%) est xénomorphe et régulièrement associé au microcline (10%), et plagioclase (An_{20}) (35%) zoné. C'est un zonage compositionnel.

La biotite (20%) et de la hornblende (05%) sont les composantes ferromagnésiennes. Elles s'altèrent partiellement en chlorite et épidote outre mesure. Sphène et allanite sont des phases accessoires.

- **Les pyroxénites** sont des roches ultrabasiques, généralement de couleur noirâtre avec plus de 80% de pyroxène qui affleurent en pointements à proximité des massifs granitiques (Fig. 4F). Les détails au microscope montrent une association de clinopyroxène et d'olivine.

- **Les microdiorites** sont mésocrates et affleurent généralement à ras le sol ou sous forme de monticule fortement déformées et constituent les meilleurs marqueurs de la déformation de la zone (Fig. 4E). Ces roches sont constituées de quartz (10%), plagioclases (An_{35}) (40%), amphiboles (30%) et biotite (20%). Tous ces minéraux présentent des altérations discrètes traduites par une épidotisation et une chloritisation des espèces ferromagnésiennes, tandis qu'une saussuritisation est exprimée au sein des plagioclases. Localement, la texture s'apparente à une texture doléritique.

- **Les filons de pegmatite** de couleur rosée sont observés au sein des granites (Fig. 4B-4D). Orientés N135° et N60°, ils renferment des feldspaths potassiques (50%), du quartz (20%) et du plagioclase (30%).

- **Les veines de quartz** s'observent dans les granites et les granodiorites et font des centaines de mètres avec des puissances variables pouvant atteindre quatre mètres. Elles sont le plus souvent orientées N45° et N135°.

Analyse structurale

La zone cartographiée est affectée par des déformations intenses. Celles-ci sont bien exprimées dans les microdiorites, orientées principalement NE-SW. Les principales structures observées sont la schistosité, les fractures sèches, et les diaclases remplies de quartz (veines de quartz).

- **La schistosité** est développée au sein des diorites (Fig. 5C) avec une direction N60° (Fig. 6E) et un pendage vers le SE ou le NW. Cette fluctuation du sens de pendage de la schistosité pourrait s'expliquer par la présence de microplissements observés dans la zone d'une part (Fig. 5B) et d'autre part de la verticalité (90°) initiale des structures à certains niveaux qui pourraient basculer sous l'effet d'une quelconque contrainte.

- **Les fractures** sont tardives et orientées suivant la direction NNW-SSE (N138°). Elles sont matérialisées sur une rosace directionnelle (Fig. 6C) avec un pendage vertical. Elles affectent l'ensemble des lithologies citées ci-dessus. Les observations de terrain montrent que certaines familles de fractures sont des décrochements dextres (Fig. 5D), marqués par des décalages des xénolites et des filons quartzo-feldspathiques de pegmatite encaissés dans les granodiorites.

- **Les veines de quartz** renferment parfois des traces de feldspath et de tourmaline. Les mesures réalisées sur les veines font ressortir plusieurs tendances directionnelles. Une direction NE-SW et E-W qui est matérialisée sur une rosace directionnelle (Fig. 6D). Les veines se présentent à l'affleurement sous forme de monticule et sont encaissées principalement dans les granites et les granodiorites précédemment décrits (Fig. 5A).

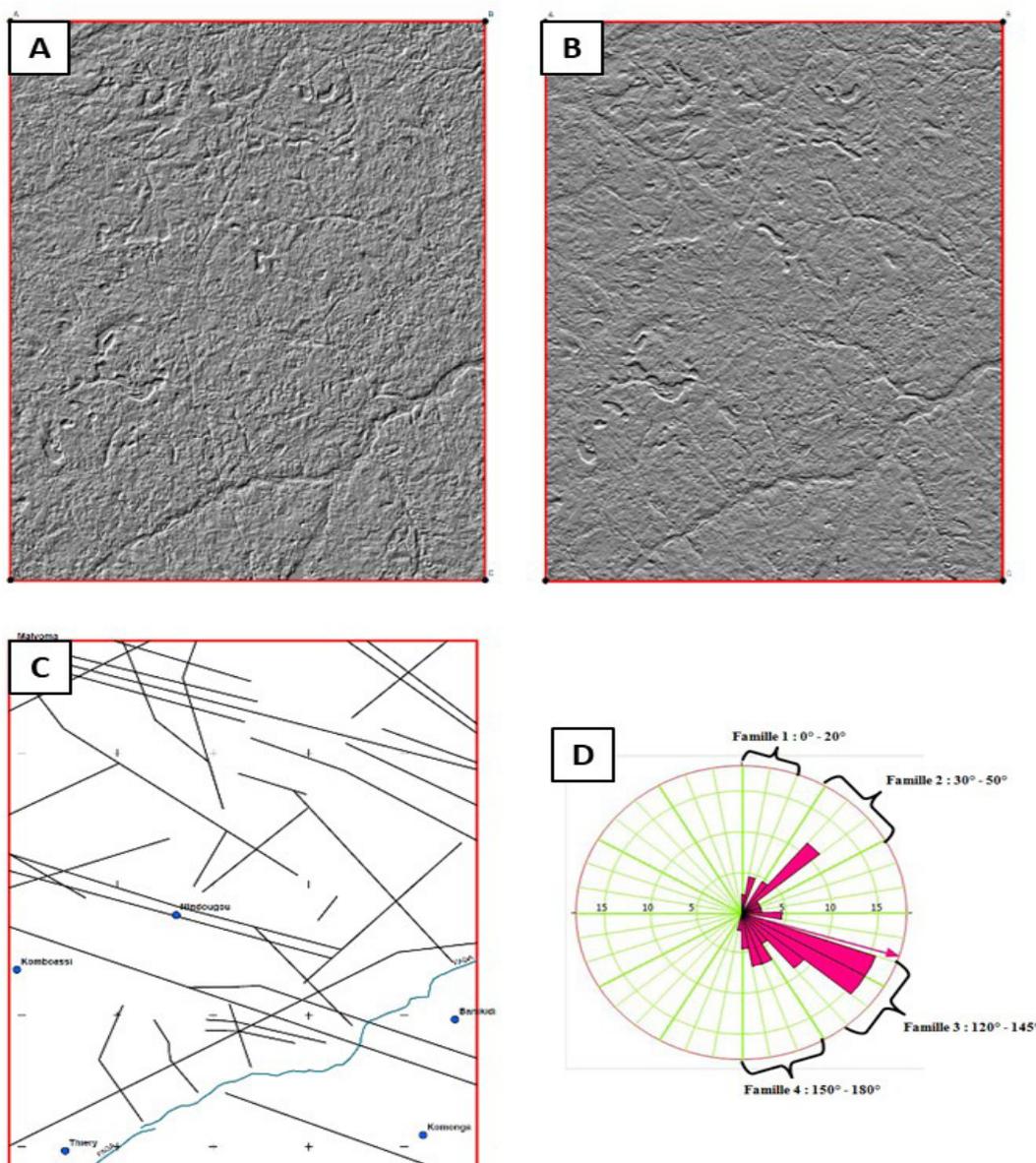


Figure 2. A. Filtrage directionnel à 45°, matrice 3x3. B. Filtrage directionnel à 90°, matrice 3x3. C. Carte linéamentaire du secteur. D. Rosace des principales directions des linéaments.

Figure 2. A. Directional filtering at 45°, 3x3 matrix. B. 90° directional filtering, 3x3 matrix. C. Linear map of the area. D. Rosette of the principal directions of the lineaments.

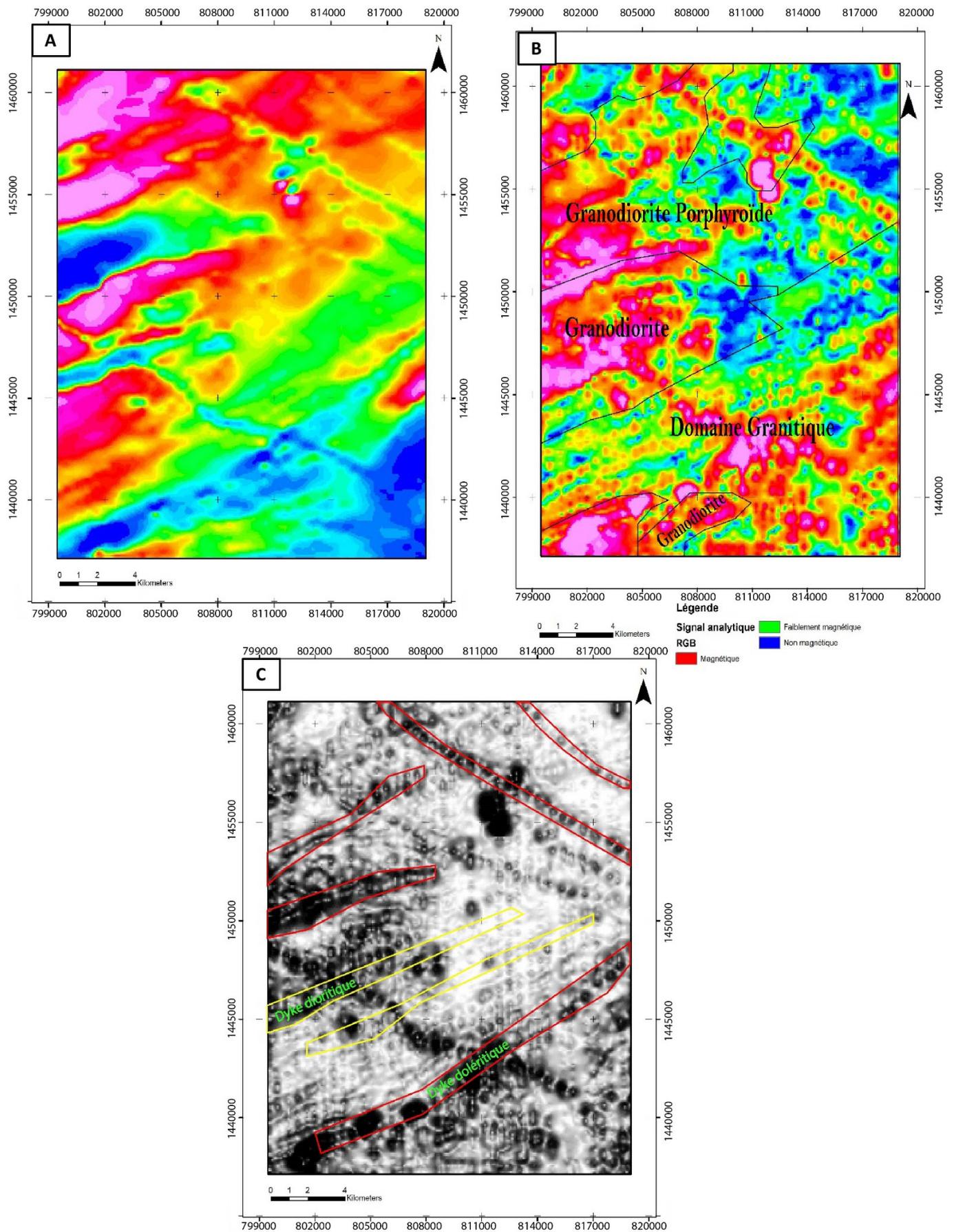


Figure 3. A. TMI. B. Signal analytique. C. Signal analytique ombragé à 90°.
 Figure 3. A. TMI. B. Analytical signal. C. Shaded analytical signal at 90°.

Le traitement des données selon notre démarche méthodologique nous a permis de proposer une carte géologique actualisée de Nindangou (Fig. 6A-B).

DISCUSSION

L'utilisation des données aéromagnétiques a permis de distinguer un certain nombre de faciès pétrographiques au sein du secteur d'étude. Ainsi, les fortes anomalies magnétiques s'expliquent par la présence considérable de minéraux ferromagnésiens au sein des lithologies concernées (García *et al.* 2007, Randrianasolo 2009). Cela a été vérifié sur le terrain. Cette méthode a été récemment utilisée pour l'analyse et l'interprétation géologiques des données magnétiques au sol du secteur d'Achemmach dans le Centre du Maroc (Mezougane *et al.* 2019).

Pour l'utilisation de la télédétection, l'extraction des linéaments nous a permis de faire une analyse structurale qui a été confirmée par les données de terrain. Plusieurs auteurs (Yao *et al.* 2012, Hammad 2016, Koné *et al.* 2019) sont unanimes sur le fait que les linéaments extraits doivent être confirmés par une investigation de terrain. L'association des travaux de terrain et des traitements d'images diverses

offrent ainsi une nouvelle identité cartographique au secteur de Nindangou à cette échelle d'observation.

Si les travaux de Castaing *et al.* (2003) et de Kagoné *et al.* (2003) montrent une lithologie assez monotone, nos travaux révèlent, bien au contraire, une lithologie assez variée à cette échelle d'observation. Les principales unités lithologiques du secteur sont : (i) série de roches basiques-ultrabasiques comprenant des orthoamphibolites basaltiques et des pyroxénites ; (ii) granodiorites et granodiorites porphyroïdes qui sont les plus dominantes et sont localisées au Nord et au Centre évoluant vers l'Ouest ; (iii) granites et les termes gneissiques au Centre et évoluant sur le Sud ; (iv) ensemble de formations tardi-magmatiques comprenant des veines de quartz, des filons de pegmatite et enfin des dykes doléritiques et dioritiques. Ces dykes sont très bien matérialisés sur la carte aéromagnétique (signal analytique) par des anomalies linéaires et aussi sur la carte linéamentaire. La coupe géologique des figures 7-8 renforce notre interprétation. Les rares données géochimiques sur des granites semblables (Kagoné *et al.* 2003) révèle leur richesse en alumine ($Al_2O_3 = 16-16,35\%$), leur caractère métalumineux à faiblement peralumineux (A/

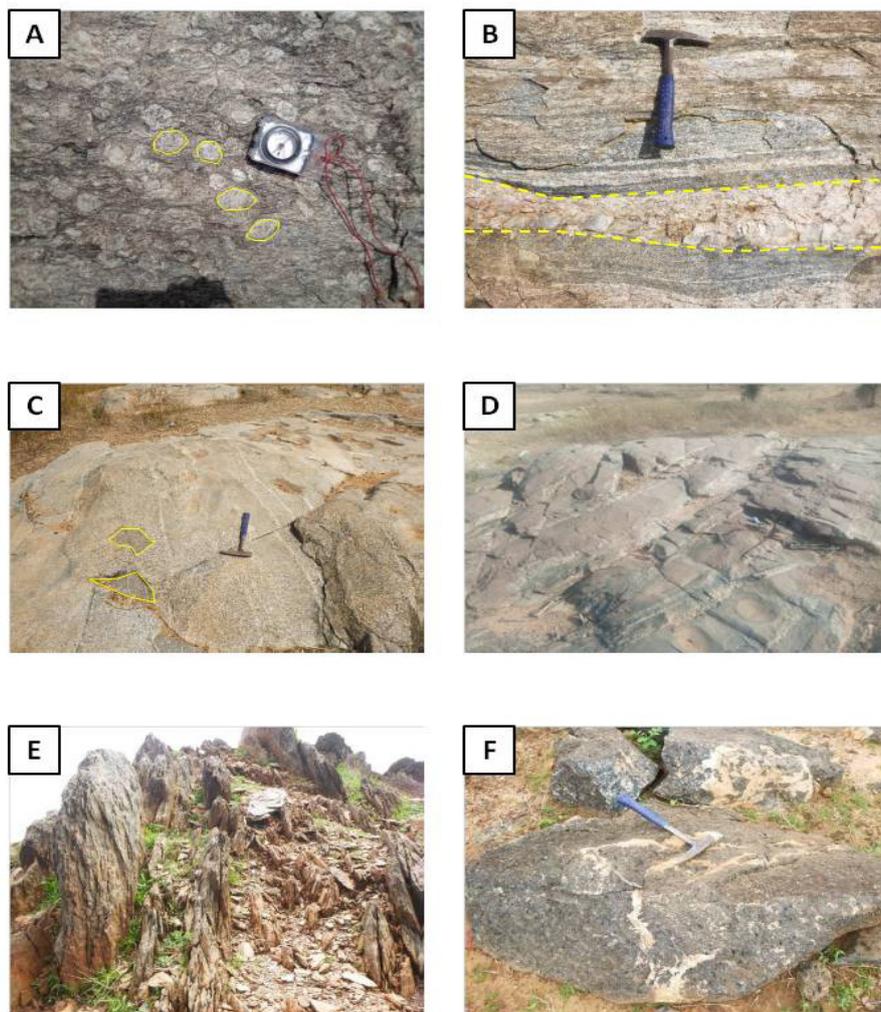


Figure 4. Principales lithologies de Nindangou. A. Granite à texture grenue porphyroïde. B. Granite rubané à injection de filon de pegmatite. C. Granodiorite contenant des enclaves au contour anguleux. D. Affleurement de granite déformé avec injection de filons de pegmatite. E. Affleurement de microdiorite déformée. F. Bloc de pyroxénite.

Figure 4. Main lithologies of Nindangou. A. Rainy porphyritic textured granite. B. Banded granite with pegmatite vein injection. C. Granodiorite containing angular xenoliths. D. Deformed granite outcrop with pegmatite vein injection. E. Distorted microdiorite outcrop. F. Pyroxenite block.

CNK = 0,97-1,03), et faiblement à modérément potassique ($K_2O = 0,74-2,56\%$). Ce sont des roches calco-alcalines.

De l'ensemble des données recueillies et des analyses et interprétations qui en découlent, nous pouvons proposer la chronologie de mise en place des faciès du secteur de Nindangou comme suit :

- (i) mise en place de la série de roches basiques-ultrabasiques avec à la base des orthoamphibolites basaltiques et ensuite des pyroxénites dont l'assemblage minéral et la texture ont été bien préservés ;
- (ii) mise en place des granodiorites et granodiorites porphyroïdes contenant des xénolites issues des roches basiques-ultrabasiques qui recoupent les pyroxénites. La présence des xénolites dans les granodiorites prouve de ce fait l'antériorité des roches basiques-ultrabasiques par rapport aux autres lithologies, comme défendu largement argumentée au Burkina Faso dans le secteur de Tenkodogo (Naba *et al.* 2004) et ailleurs (Didier & Barbarin 1991);
- (iii) mise en place des granites (02 faciès) qui recoupent les granodiorites, les pyroxénites et les orthoamphibolites basaltiques. Le caractère migmatitique ou gneissique observé sur un des faciès de « granite rubanée gris » suggère un ancien granite en voie de mobilisation (fusion) suite vraisemblablement à un métamorphisme régional de haut degré. La forte schistosité, la présence d'orthoamphibolite et de gneiss seraient des indicateurs d'un métamorphisme de haut degré;
- (iv) mise en place concomitante des filons de pegmatite et des veines de quartz qui recoupent les granites et les granodiorites et parfois les pyroxénites pour les veines de quartz ;
- (v) mise en place des dykes dioritiques qui recoupent les granodiorites et aussi constituant la limite du contact granites-granodiorites ;
- (vi) mise en place des dykes doléritiques qui recoupent toutes les lithologies sauf les orthoamphibolites basaltiques.

La relation chronologique entre les formations filoniennes tardi-magmatiques et les granites du secteur de Nindangou présente une analogie avec d'autres chronologies établies dans d'autres secteurs du Burkina Faso (Naba 1999, Kagambèga 2005, Ilboudo 2005, Ilboudo *et al.* 2018). Ouattara & Koffi (2014) ont identifié treize faciès granitiques dans la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire dans des entités lithologiques initialement supposées homogènes par Delor *et al.* (1992) en utilisant la même approche.

En outre, la faille repérée par Kagoné *et al.* (2003) au Centre du secteur pourrait être un décrochement sénestre par l'analyse du signal analytique, qui se traduit par le décalage d'une anomalie magnétique linéaire supposée être un dyke doléritique, mais aussi le décalage des pyroxénites situées dans l'Est du secteur.

CONCLUSION

La présente étude apporte la preuve quant à l'hétérogénéité pétrographique et structurale du secteur de Nindangou. L'étude par imagerie satellitaire a permis d'effectuer une analyse linéaire du secteur de Nindangou, tandis que le traitement des données de géophysique aéroportée a permis une discrimination des lithologies composant le secteur. La validation des différentes interprétations par une investigation de terrain a contribué à l'amélioration de la connaissance géologique de la zone d'étude. Ainsi, la géologie de la région de Nindangou se résume comme suit : (i) une suite de roches basiques-ultrabasiques composée d'orthoamphibolites basaltiques et de pyroxénites ; (ii) des granodiorites et des granodiorites porphyroïdes ; (iii) des granites avec des tendances gneissiques ; (iv) des formations tardi-magmatiques, tels que les veines de quartz et des filons de pegmatite, ainsi que des dykes doléritiques et dioritiques. Le mode d'association lithologique met en évidence des témoins d'une empreinte métamorphique de haut degré (faciès amphibolite). En outre, une chronologie de mise en place de ces différentes unités lithologiques permet de comprendre l'histoire litho stratigraphique et structurale de l'ensemble de cette zone d'étude.

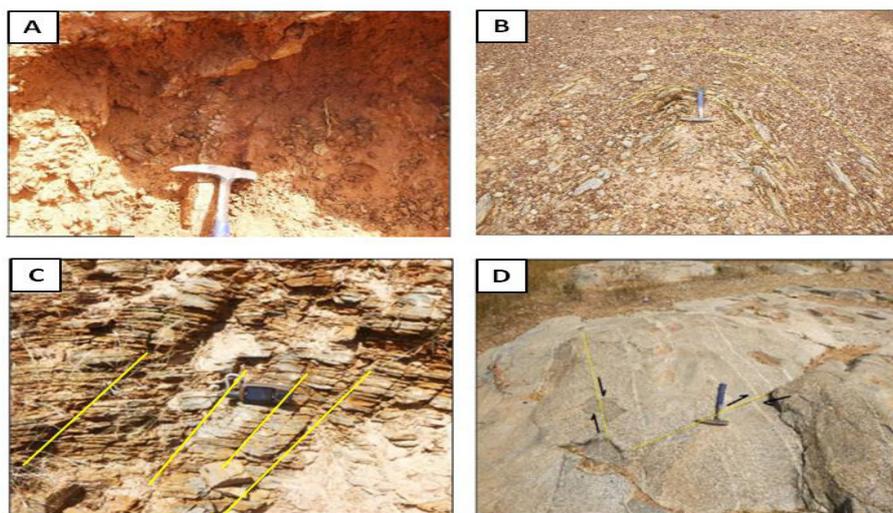


Figure 5. A. Veine de quartz injectée dans une granodiorite déformée. B. Microplis dans une microdiorite déformée. C. Microdiorite schistosée et fracturée. D. Mise en évidence d'un Décrochement dextre qui affecte les enclaves mafiques et des filons de pegmatites par une fracture dans une granodiorite.

Figure 5. A. Quartz vein injected in deformed granodiorite. B. Microfolds in a deformed microdiorite. C. Schistose and fractured microdiorite. D. Demonstration of a dextral strike-slip that affects mafic xenoliths and pegmatite veins through a fracture in a granodiorite.

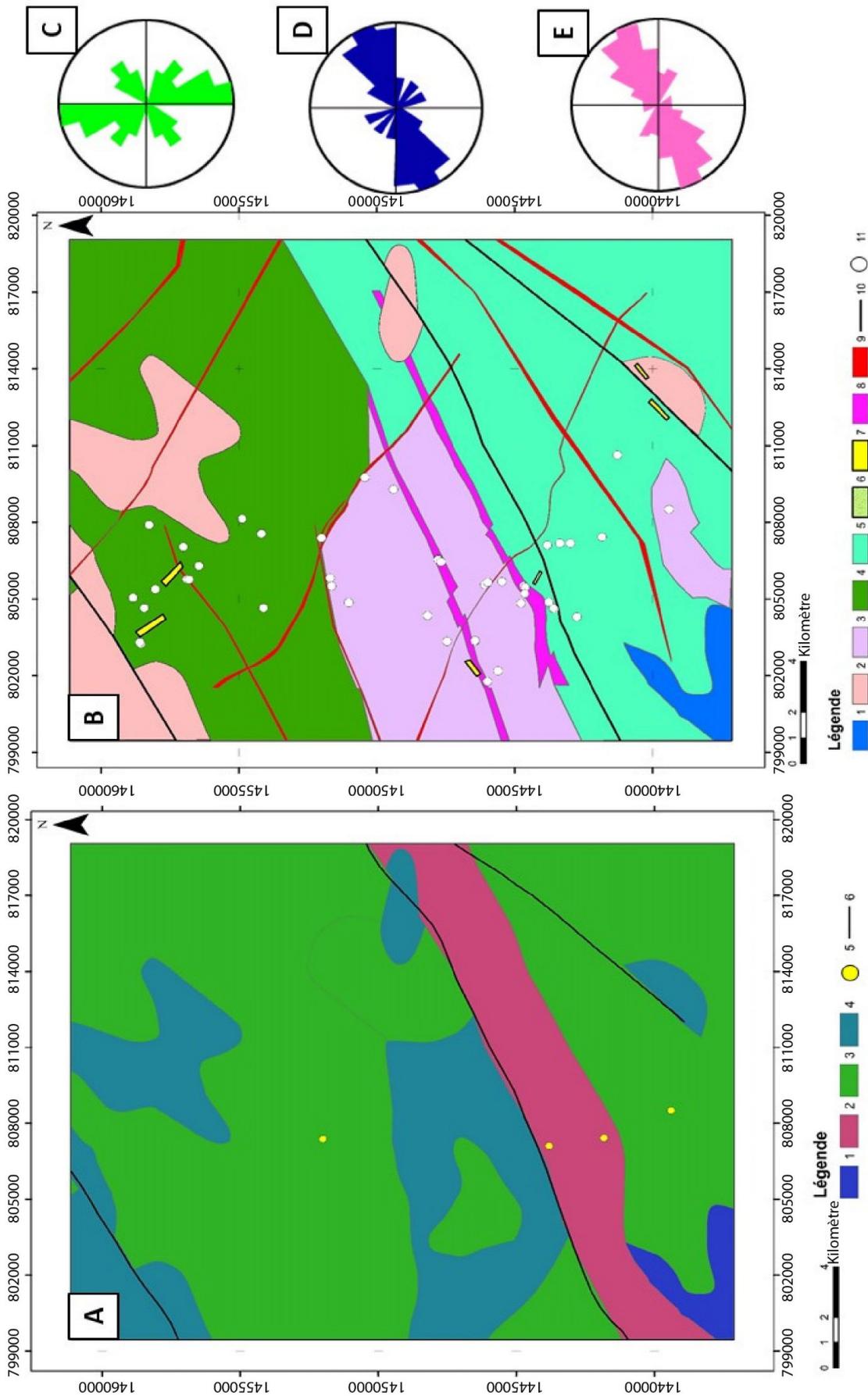


Figure 6. A. Carte géologique du secteur de Nindangou à 1/200000e (Kagoné *et al.* 2003). Même légende que celle de la Figure 1B. B. Carte géologique révisée du secteur de Nindangou d'après les données collectées dans le cadre de cette étude. 1) Orthoamphibolite basaltique, 2) Pyroxénite, 3) Granodiorite, 4) Granodiorite porphyroïde, 5) Granite, 6) Pegmatite, 7) Quartz, 8) Dyke doléritique, 9) Dyke doléritique, 10) Faille décrochante sénestre, 11) Points d'observation. C. Rosaces directionnelles des fractures observées sur l'ensemble des lithologies. D. Rosaces directionnelles des veines de quartz dans les granodiorites et les diorites. E. Rosaces directionnelles de la schistosité dans les diorites.

Figure 6. A. Geological map of the Nindangou area at 1/200,000 (Kagoné *et al.* 2003). Same legend as that of Figure 1B. B. Revised geological map of the Nindangou area based on data collected during this study. 1) Basaltic orthoamphibolite, 2) Pyroxenite, 3) Granodiorite, 4) Porphyritic granodiorite, 5) Granite, 6) Pegmatite, 7) Quartz, 8) Doleritic dike, 9) Doleritic dike, 10) Sinistral strike-slip fault, 11) Observation Points. C. Directional rosettes of fractures observed on all lithologies. D. Directional rosettes of quartz veins in the granodiorites and diorites. E. Directional rosettes of schistosity in diorite.

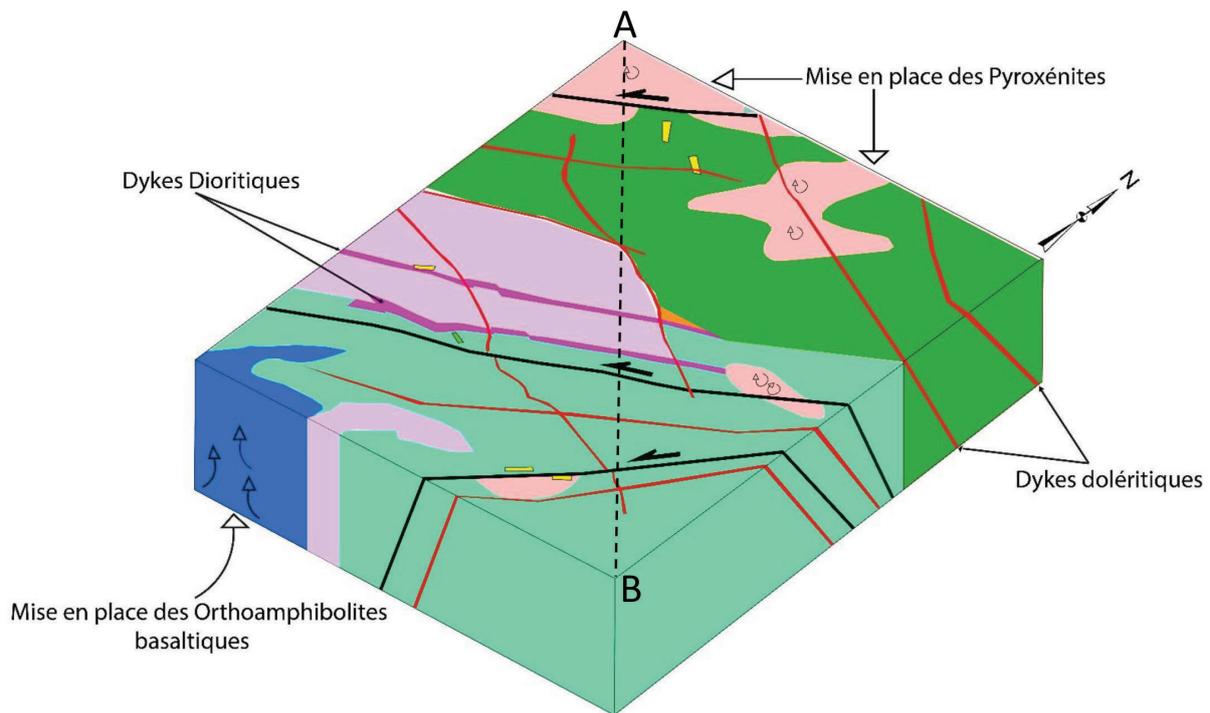


Figure 7. Vue tridimensionnelle du secteur de Nindangou. Les sites d'observation ont été volontairement omis. Même légende que celle de la figure 6B.

Figure 7. Three-dimensional view of Nindangou area. Observation sites have been deliberately omitted. Same legend as thzt of Fig.6B.

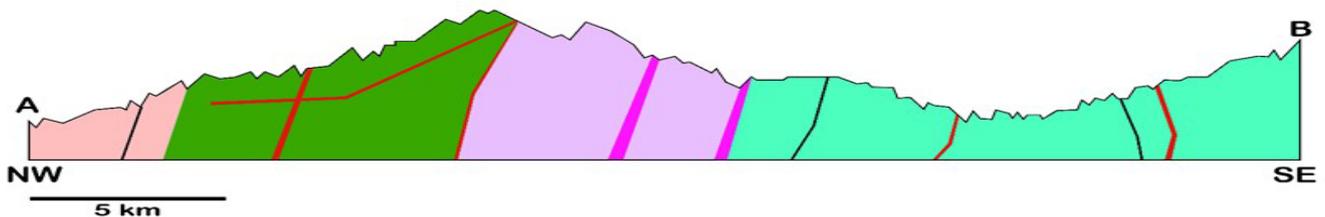


Figure 8. Coupe géologique AB du secteur de Nindangou. Même légende que celle de la figure 6B.

Figure 8. AB geological section of the Nindangou area. Same legend as thet of Figure 6B.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les rapporteurs de l'article (Dr Gblé Ouattara de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro et Dr. Iz-Eddine El Amrani El Hassani de l'Institut Scientifique, Université Mohamed V de Rabat) pour leur évaluation pertinente. Ce travail a bénéficié de l'appui de la Compagnie TANGA Minerals et du Bureau d'études TEGECO Sarl. Les auteurs s'inclinent devant la mémoire des forces de défenses et de sécurité et des familles endeuillées dans un contexte d'insécurité sans précédent rendant difficile l'accès à la zone d'étude.

REFERENCES

- Augustin J. & Gaboury D. 2017. Paleoproterozoic plume-related basaltic rocks in the Mana gold district in western Burkina Faso, West Africa: Implications for exploration and the source of gold in orogenic deposits. *Journal of African Earth Sciences*, 129, 17–30.
- Baratoux D., Fall M., Meslin P.Y. *et al.* 2021. The Impact of Measurement Scale on the Univariate Statistics of K, Th, and U in the Earth Crust. *Earth and Space Science*, 8(9), e2021EA001786.
- Baratoux L., Metelka V., Naba S. *et al.* 2011. Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the eburnean orogeny. *Precambrian research*, 191, 18–45.
- Bessoles B. 1977. Géologie de l'Afrique : le craton Ouest Africain. *Mémoire du Bureau de Recherche Géologique et Minière*, n°8, 403 p.
- Bonhomme M. 1962. Contribution à l'étude géochronologique de la plate-forme de l'Ouest africain. *Annales de la Faculté des Sciences, Université Clermont-Ferrand*, n°5, 62 p.
- Castaing C., Bila M., Milési J.P. *et al.* 2003. Notice Explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1000 000, 3ème Edition, 148 p.
- Delfour J. & Jeambrun J. 1970. Notice explicative de la carte géologique de l'Oudalan au 1/200 000. Direction de Géologie et Mines, Haute Volta, Bureau de Recherche Géologique et Minière, Paris.
- Delor C., Yao B.D., Taste J.-P. *et al.* 1992. Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000e, feuille d'Abidjan, 1ère édition.

- Ministère des mines et de l'énergie, Direction de la géologie (Abidjan-Côte d'Ivoire), mémoire n°3.
- Didier J-P. & Barbarin B. 1991, Enclaves and Granite Petrology. *Developments in petrology*, 13, 625 p.
- Fontain, A., Eglinger E., Ada K. *et al.* 2017. Geology of the world class Kiaka polyphase gold deposit, West African Craton, Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, 126, 96–122.
- García A., Chiappini M., Blanco-Montenegro I. *et al.* 2007. High resolution aeromagnetic anomaly map of Tenerife, Canary Islands. *Annales of Geophysics*, 50(5), 689–697.
- Giovenazzo D., Ouédraogo C. *et al.* 2018. Notice explicative de la carte géologique 1/200000 Banfora-Kong. Effigis Bumiger, 117 p.
- Giraud J., Seillé H., Lindsay M.D. *et al.* 2021. Utilisation of probabilistic MT inversions to constrain magnetic data inversion : proof-of-concept and field application. *Solid Earth Discussions*, 1–33.
- Grenholm M. 2014. *The Birimian event in the Baoulé Mossi domain (West African Craton) regional and global context*. PhD Thesis, Lund University, 116 p.
- Hammad N. 2016. Cartographie des linéaments géologiques en domaine aride par extraction semi-automatique à partir d'images satellitaires : Exemple à la région d'El Kseïbat (Sahara algérien). *Estudios Geológicos*, 72(1), e049.
- Hottin G. & Ouédraogo O.F. 1976. Notice explicative de la carte géologique à 1/1 000 000 de la République de Haute Volta. Direction de Géologie et Mines, Haute Volta, Bureau de Recherche Géologique et Minière.
- Ilboudo G. 2005. *Phases filoniennes tardi-magmatiques dans les granitoïdes de la zone de Bagré (Sud du Burkina Faso)*. *Chronologie de mise en place*. D.E.A, Université Ouagadougou, Burkina Faso, 73 p.
- Ilboudo H., Lompo M., Wenmenga U. *et al.* 2017. Evidence of a Volcanogenic Massive Sulfide (Zn-Pb-Cu-Ag) district within the Tiébélé Birimian (Paleoproterozoic) Greenstone Belts, Southern Burkina Faso (West - Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 129, 792–813.
- Ilboudo H., Sawadogo S., Kagambèga N. *et al.* 2018. Géologie et chronologie de mise en place des formations paléoproterozoïques de la région du Tougoury, ceinture métallogénique de Bouroum (Centre-Nord Burkina Faso - Afrique de l'Ouest). *Journal des Sciences*, 11 p.
- Jessell M.W., Ogarko V., Lindsay M. *et al.* 2018. Multidimensional Topology Transforms. *Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG) Extended Abstracts*, 1, 1–5.
- Kagambèga N. 2005. *Typologie des granitoïdes paléoproterozoïques du Burkina : cas des granitoïdes de Pô*. Thèse de 3ème cycle, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal, 200 p.
- Kagone O., Koala F., Napon S. *et al.* 2003. Equipe de projet SYSMIN (Coordination C. Castaing, BRGM). Notice explicative de la carte géologique du Burkina Faso à 1/200000e, Feuille de Pissila. 50 p.
- Kone A., Maïga H.B., Bouare M.L. *et al.* 2019. Extraction et cartographie des unités lithologiques à partir des images satellitaires par les classifications (supervisée et non supervisée) : cas de Bamako et ses environs, sud-ouest du Mali. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 34, 163–177.
- Liégeois J.P., Claessens W., Camara D. *et al.* 1991. Short lived Eburnian orogeny in southern Mali. Geology, tectonics, U-Pb and Rb-Sr geochronology. *Precambrian Research*, 50, 111–139.
- Lompo M. 2010. Paleoproterozoic structural evolution of the Man-Leo Shield (West Africa). Key structures for vertical to transcurrent tectonics. *Journal of Africa Earth Sciences*, 58, 19–36.
- Mezougane H., Aissa M., Moussaid A. *et al.* 2019. Analyse et interprétation des données magnétiques au sol du secteur NNE d'Achemmach (Maroc central). *European Scientific Journal*, 30, 439–463.
- Naba S. 1999. *Structure et Mode de Mise en Place de Plutons Granitiques Emboîtés : Exemple de l'Alignement Plutonique Paléoproterozoïque de Tenkodogo-Yamba dans l'Est du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal, 213 p.
- Naba S. 2007. *Propriétés magnétiques et caractères structuraux des granites du Burkina Faso oriental (Craton Ouest Africain, 2,2–2,0 Ga) : implications géodynamiques*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse, France, 175 p.
- Naba S., Lompo M., Debat P. *et al.* 2004. Structure and emplacement model for late-orogenic Paleoproterozoic granitoids: the Tenkodogo-Yamba elongate pluton (Eastern Burkina Faso). *Journal of African Earth Sciences*, 38, 41–57.
- Napon S. 1988. *Le gisement d'amas sulfuré (Zn-Ag) de Perkoa dans la province du Sangyé (Burkina Faso, Afrique de l'Ouest) : Cartographie, étude pétrographique, géochimique et métallogénique*. Thèse de Doctorat, Université Franche-Comté, France, 309 p.
- Ouattara G. & Koffi B.G. 2014. Typologie des granitoïdes de la région de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire -Afrique de l'Ouest) : Structurologie et Relations Génétiques. *Afrique Science* 10(2), 258–276.
- Randrianasolo E.B. 2009. *Nouvelles méthodes de cartographie sur le socle protérozoïque du sud de Madagascar. Nature et géométrie de la croûte continentale d'un domaine orogénique en convergence, implications économiques*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 307 p.
- Sawadogo S. 2017. *Les plutons granitiques de la ceinture de Djibo au Nord du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest) : mécanismes de mise en place et implications dans l'évolution géodynamique de la ceinture*. Thèse de Doctorat, Université Ouaga I Professeur Joseph Ki-Zerbo, 235 p.
- Trinquard R. 1971. Carte géologique au 1/200 000 Tenkodogo (BRGM Ed.) et notice explicative, Direction de Géologie et Mines, Haute Volta, Bureau de Recherche Géologique et Minière, 37 p.
- Yao T., Olivier F., Oga M. *et al.* 2012. Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. *Téledétection, Editions des Archives Contemporaines / Editions scientifiques GB / Gordon and Breach Scientific Publishers*, 10(4), pp.161–178.

Manuscrit reçu le 05/04/2022

Version révisée acceptée le 15/11/2022

Version finale reçue le 25/11/2022

Mise en ligne le 28/11/2022