

Analyse linéaire et structurale des déformations affectant les formations d'âge paléocène à miocène de la partie sud du sous-bassin de l'Ader Doutchi

[Lineament and structural analysis of deformations affecting the Paleocene-Miocene Formations in the southern part of the Ader Doutchi sub-basin]

Aminou A. Maâzou¹, Assoumane Tsayabou², Habsatou Ousmane¹, Aguede Komi¹, and Moussa Konaté¹

¹Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Laboratoire de Géologie, Équipe Bassins et Géoressources, Niamey, Niger

²Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, Département de la Gestion des Ressources Naturelles, Laboratoire de Cartographie et Classification des Sols, Niamey, Niger

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The present study focuses on the analysis of lineaments affecting Paleocene-Miocene formations in the Ader Doutchi sub-basin (Tahoua region, lullemeden basin, central Niger). The main objective of this study is to carry out a geostatistical analysis of the different lineamentary structures affecting the Bouza and Keita regions. The methodological approach adopted is based on the use of remote sensing techniques and GIS tools to analyze LandSat 8 images and to compare them with field data. This methodological approach facilitated the identification of five primary fracture families, characterized by orientations ranging from N0° to N40°, N40° to N80°, N90° to N130°, N130° to N150°, and N160° to N170°.

KEYWORDS: Niger, lullemeden Basin, Tahoua, Ader Doutchi, Dinosaur, SIG, Fractures.

RESUME: La présente étude porte sur l'analyse de linéaments affectant les formations d'âge paléocène à miocène du sous-bassin de l'Ader Doutchi (région de Tahoua, bassin des lullemeden, Niger central). L'objectif principal de ce travail est d'effectuer une analyse géostatistique des différentes structures linéamentaires affectant les régions de Bouza et de Keita. La méthodologie utilisée est basée sur l'utilisation de techniques de télédétection et d'outils SIG pour analyser les images Landsat 8 et les confronter aux données de terrain. Cette approche a permis de répertorier cinq principales familles de fractures dont les directions sont comprises entre N0° et N40°, N40° et N80°, N90° et N130°, N130° et N150°, ainsi que N160° et N170°.

MOTS-CLEFS: Niger, Bassin des lullemeden, Tahoua, Ader Doutchi, Dinosaur, SIG, Fractures.

1 INTRODUCTION

Les premières études concernant l'analyse des déformations affectant les dépôts de l'Ader Doutchi ont été réalisées par Maâzou (2018) et Laouali-Idi et Konaté (2019). L'objectif de cette étude est de déterminer les directions des structures linéamentaires du sous-bassin de l'Ader Doutchi, à partir d'images LandSat 8. L'analyse des images satellites, associée au Système d'Information Géographique (SIG) et aux mesures structurales de terrain, a permis d'établir la carte linéaire et structurale du sous-bassin de l'Ader Doutchi. La confrontation des résultats obtenus à ceux des études antérieures réalisées dans le bassin des lullemeden a permis de distinguer les différents types de structures tectoniques linéaires affectant les formations d'âge paléocène à miocène.

| AGE | NIGERIA | | | | NIGER | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------------|---|---|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------|
| | REABURN et TATTAM (1930) | JONES (1948) | PARKER (1964) | GREIGERT (1966) | HANON (1984) | DIKOUMA, LANG et PASCAL (1993) | | |
| POST - PALEOCENE | Gwandu series | Gwandu series | Gwandu Formation | Grès argileux du Moyen Niger Ct ³ | Formation de Birni N'Konni | Formation de Birni N'Konni | Ct. sensus structo | GROUPE DES DALLOLS |
| | | | | Série argilo-sableuse à lignite Ct ² | Formation de l'Ader - Doutchi | Formation de l'Ader - Doutchi | | |
| PALEOCENE | Calcareous group | Calcareous group | Gamba Formation Kalambaina Formation | Série argileuse (Schistes papyracés) T VII | Formation G3 de G2 | Membre de Barmou Membre de Tamaské | GROUPE DES MAJMAS | Formations étudiées |
| | Clay - shale group | Clay - shale group | Dange Formation | Série calcaire T VI | Garadaoua G1 | Membre de Kao | | |
| MAASTRICHTIEN | Sandstone group | Rima series | Wurno Formation | Série argileuse (Schistes papyracés) T V | Formation à W5 | Formation IW2 d'In wagar IW1 | | |
| | | Upper sandstones and mudstones | Dukamaje Formation | Upper sandstones and mudstones T IV | d'In wagar W2 | Formation du Farin FD3 | | |
| | | Mosasaurus shales | Takola Formation | Mosasaurus shales T III | Formation du Farin F3 F2 F1 | Formation du Farin FD2 | | |
| | | Lower sandstones and mudstones | | Lower sandstones and mudstones T I | Formation de Kalambanya | Formation de Kalambanya | | |

N.B. Les épaisseurs des unités lithostratigraphiques n'ont pas été respectées, Ct. : Continental terminal.

Fig. 2. Comparaison des séries maastrichtiennes et paléogènes du bassin des lullemeden (au Niger) avec celles du Nigéria

3 CADRE STRUCTURAL ET PALÉOGÉOGRAPHIQUE

3.1 CADRE PALÉOGÉOGRAPHIQUE

Le bassin des lullemeden, d'une superficie d'environ 525 000 km², s'étend du Nord au Sud sur une longueur 1 000 km et d'Est en Ouest sur une largeur de 980 km (Dikouma, 1990). Sa superficie est répartie entre l'Algérie (107 000 km²), le Bénin (10 000 km²), le Mali (31 000 km²), le Niger (317 000 km²) et le Nigéria (60 000 km²). Le bassin des lullemeden correspond à un domaine de sédimentation intracratonique (Bertrand-Sarfati et al., 1977) affecté par des mouvements épirogéniques (Faure, 1966) qui auraient favorisé une migration des aires de dépôts vers le Sud-Ouest pendant le Mésozoïque et le Paléogène (Fig. 3).

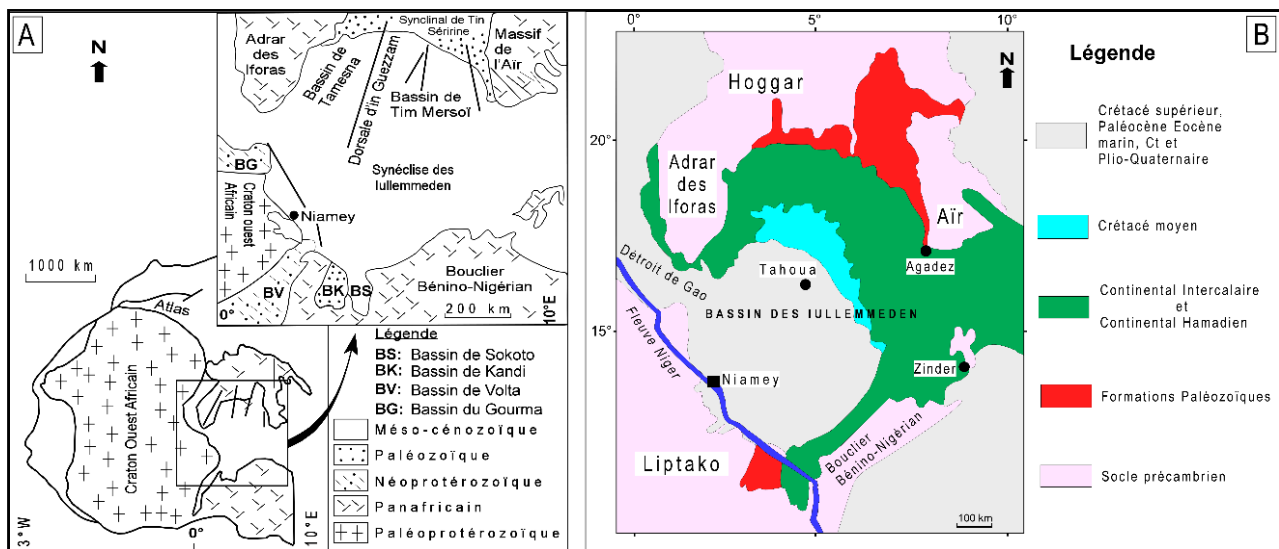


Fig. 3. Contexte géologique du bassin des lullemeden: A- Situation du bassin des lullemeden en Afrique de l'Ouest (Wright et al., 1993); B- Principaux ensembles géologiques du bassin des lullemeden (Greigert, 1966; Dikouma, 1990)

L'évolution géodynamique du bassin des lullemeden est caractérisée par des épisodes tectoniques d'une part et des périodes de transgressions marines d'autre part (Dikouma, 1990). Greigert (1966) et Boudouresque et *al.* (1982) définissent au Niger cinq transgressions marines au Crétacé supérieur et au Tertiaire (Fig. 4). Reymont et Dingle (1987) définissent cinq transgressions Tectono-eustatiques à l'échelle de l'Afrique pour la même période. Ces cycles transgressifs, corrélables selon les auteurs avec les cycles eustatiques globaux de Vail et *al.* (1977), ont eu lieu de l'Albien moyen à l'Albien supérieur, au Cénomano-turonien, du Turonien supérieur au Coniacien, au Campano-maastrichtien et du Maastrichtien terminal au Paléocène supérieur Boudouresque et *al.* (1982). Les trois premières transgressions (T1 à T3) proviendraient selon Greigert (1966) du Nord-Est par-dessus l'actuel massif de l'Aïr. Les deux dernières (T4 et T5) envahiraient le bassin par le Nord-Ouest en passant par le Sud de l'Adrar des Iforas (Fig. 4). Pour Faure (1966), Petters (1977), Kogbe (1979), Bellion (1987), seules les deux premières transgressions (T1 et T2) proviendraient de l'Est. Les trois dernières arriveraient du Nord-Ouest. Radier (1959) n'exclut pas la voie occidentale pour les transgressions cénomano-turonniennes. Collignon et LeFranc (1974 a et b) optent prudemment pour la voie occidentale en n'excluent pas totalement la voie orientale; la liaison entre la Téthys se ferait par le Tanézrouft et le détroit soudanais (Fig. 4). Desmier (in Dubois et Lang, 1984) pense à une venue par l'Est (seuil du Damergou) (Fig. 4). Dikouma et *al.* (1993) considèrent la position de la mer avant la transgression T1 de Greigert (1966), comme étant la première transgression dans le bassin des lullemeden. Ces auteurs définissent ainsi six transgressions (Fig. 4).

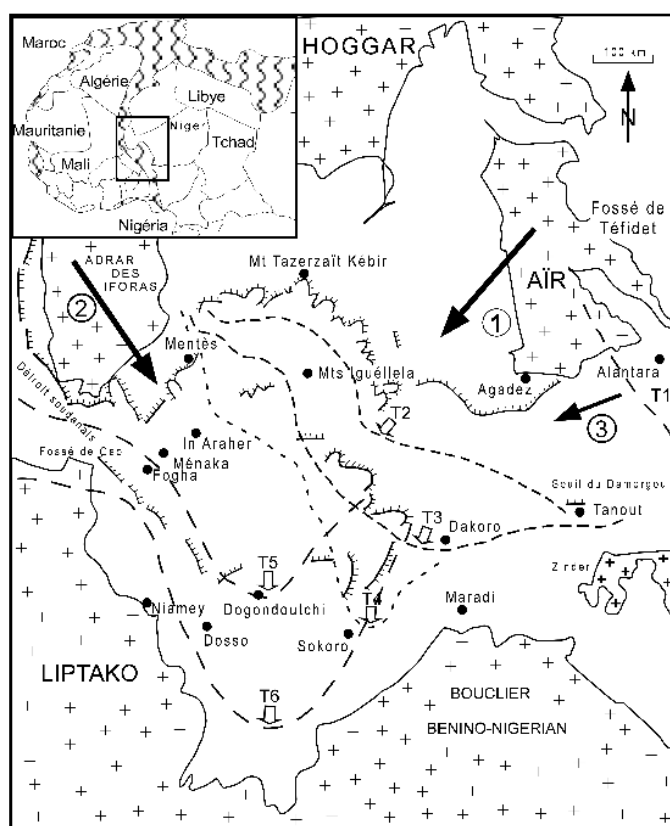


Fig. 4. Extension des transgressions crétaées et tertiaires dans le bassin des lullemeden (Greigert, 1966 et Dikouma et *al.*, 1993, modifiée): T1- Mer avant la transgression à *Neolobites* et *Nigericeras*; T2 et T3- Transgressions à *Neolobites* et *Nigericeras* avec deux avancées du Cénomaniens supérieur à Turonien inférieur (Mathey et *al.*, 1991; Courville et *al.*, 1991); La transgression à *Coilopoceras inflatum* du Turonien supérieur à Coniacien (?) n'a pas été reportée; T4 et T5- Transgressions successives (deux fluctuations d'une seule transgression) à *Libycoceras* – Maastrichtien (supérieur ?); T6- Transgression du Paléocène supérieur. (1) Provenance des transgressions cénomano-turonniennes T2 et T3; (2) Provenance des transgressions maastrichtiennes T4 et T5; (3) Provenance des transgressions T1 à T6 selon Desmier (in Dubois et Lang, 1984, modifiée)

Le schéma paléogéographique de Greigert (1966) est aujourd'hui abandonné au profit de celui de Petters (1978), Kogbe (1979), Bellion (1987), Reymont et Dingle (1987) (Fig. 5). Greigert (1966) envisage les transgressions sous forme d'avancées de mers étalées sur de grandes surfaces continentales planes. Selon d'autres auteurs, les transgressions atteignent au contraire le bassin des lullemeden sous forme de chenaux maritimes étroits, situés au droit des fossés tectoniques ou des gouttières topographiques et s'étalant ensuite pour former des mers intérieures dès que la topographie le permet (Fig. 5).

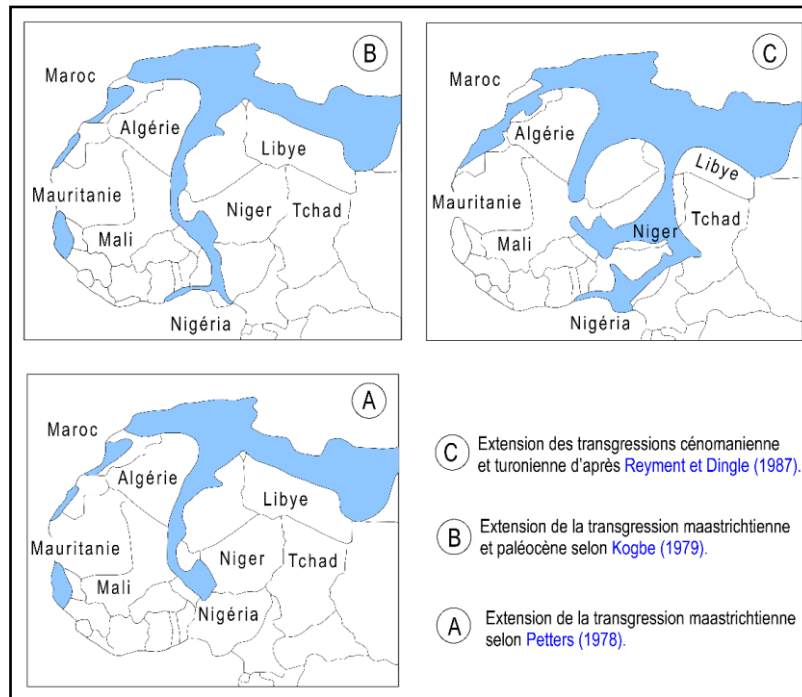


Fig. 5. Schémas paléogéographiques de l'Afrique nord-occidentale au Crétacé supérieur et au Tertiaire (Dikouma, 1990)

3.2 CADRE STRUCTURAL

Les accidents qui affectent le bassin des lullemeden sont d'une part des failles et d'autre part des déformations souples ou mixtes (plis, flexures, flexures-failles) (Dikouma, 1990). L'un des traits structuraux dominants du bassin des lullemeden est la présence d'accidents de socle de grande envergure affectant la couverture sédimentaire (Dikouma, 1990) (Fig. 6). Les rejeux de ces accidents de socle sont à l'origine d'un compartimentage du bassin en horst et grabens, mis en évidence par les études géophysiques (Valsardieu, 1970; Dubois, 1979; Bellion, 1987; Guiraud *et al.*, 1987).

Les épisodes tectoniques affectant les séries sédimentaires du bassin des lullemeden sont mal connus et mal datés (Dikouma, 1990). Bellion (1987) cite les épisodes suivants du Crétacé supérieur au Tertiaire:

- L'épisode intra-Sénonien qui se traduirait dans le Damergou et le Koutous par une discordance entre les formations continentales; il serait à l'origine plus au Sud, dans le bassin de Sokoto au Nigéria, de la discordance du "Rima group" sur les formations sous-jacentes;
- L'épisode fini à post-Maastrichtien qui entrainerait la lacune du Paléocène inférieur observée au Nigéria;
- L'épisode intra-Éocène qui se traduirait par la discordance du Continental terminal et qui serait à l'origine du retrait définitif de la mer après la transgression du Tertiaire.

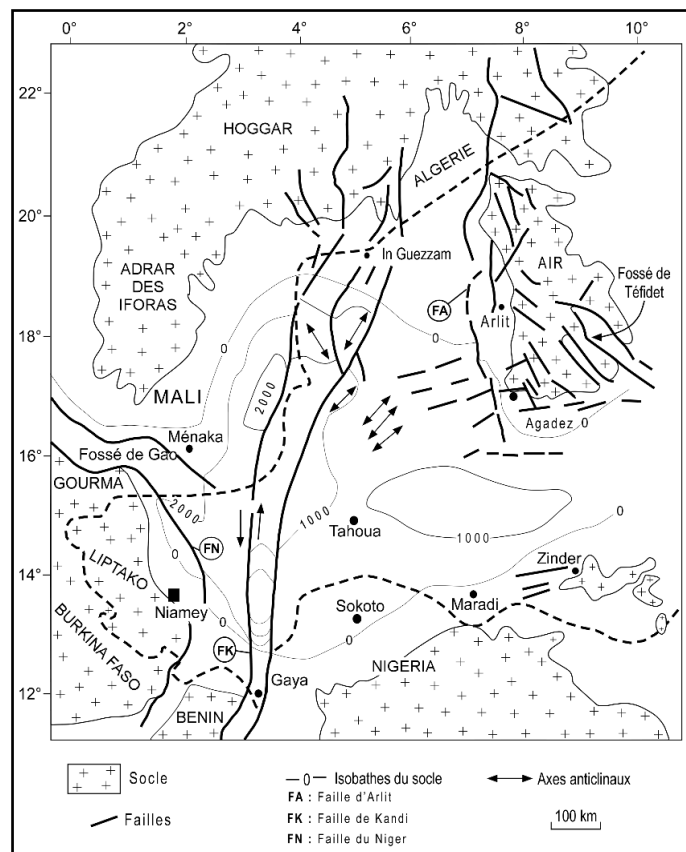


Fig. 6. Carte structurale du bassin des lullemeden (Dubois, 1979; Bellion, 1987; modifiée)

4 MÉTHODOLOGIE

L'analyse statistique des linéaments consiste à étudier les lois de distribution des longueurs de ces derniers. L'analyse géostatistique, quant à elle, se concentre sur l'étude du variogramme de la densité de fracturations. Cette analyse s'appuie sur la théorie des variables régionalisées et vise à résoudre les problèmes par l'analyse des données spatiales.

4.1 TRAITEMENT ET EXTRACTION DES LINÉAMENTS

Les différents traitements effectués, à savoir application des filtres de Sobel et l'amélioration du contraste, ont permis de réaliser une cartographie manuelle des structures linéaires des régions de Bouza et de Keita (Fig. 7). Le traitement automatique des linéaments par le logiciel LinWin a permis d'obtenir la carte linéaire de la zone d'étude. La quantification de ces linéaments a révélé un total de 6 768 linéaments (Fig. 7). Il convient de noter que ces linéaments ne prétendent pas à l'exhaustivité.

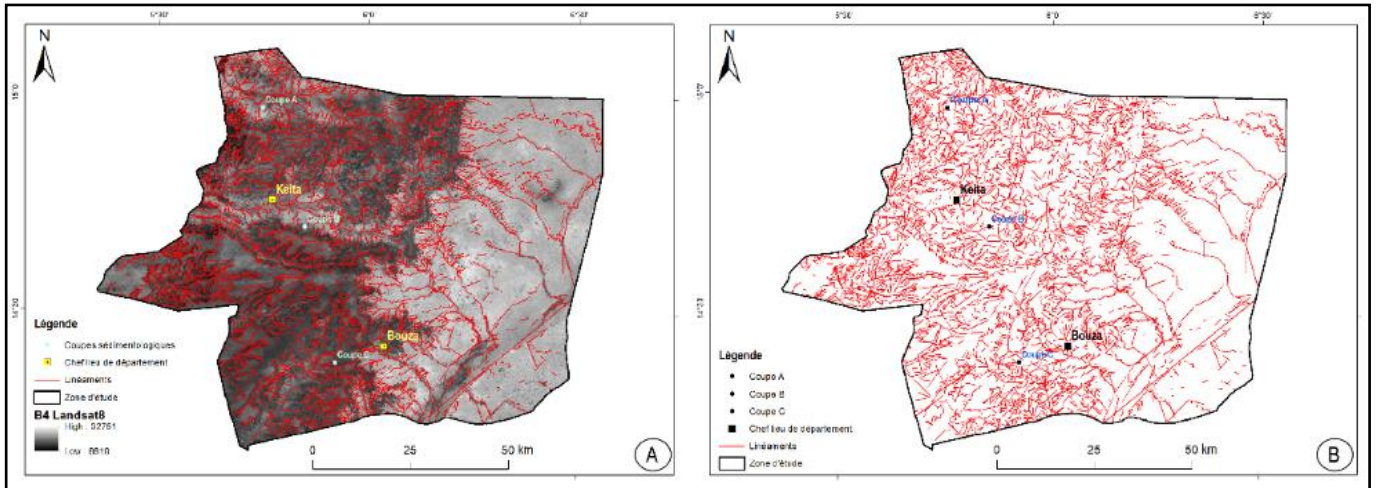


Fig. 7. Enregistrement des linéaments dans la zone d'étude: A- Dessins des linéaments sur l'image Landsat; B - Différents linéaments après enregistrements

4.2 MAILLAGE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Un maillage composé de quatre colonnes et deux lignes, soit un total de huit mailles (Fig. 8), a été élaboré afin d'identifier les directions majeures au sein de chaque maille (Fig. 16).

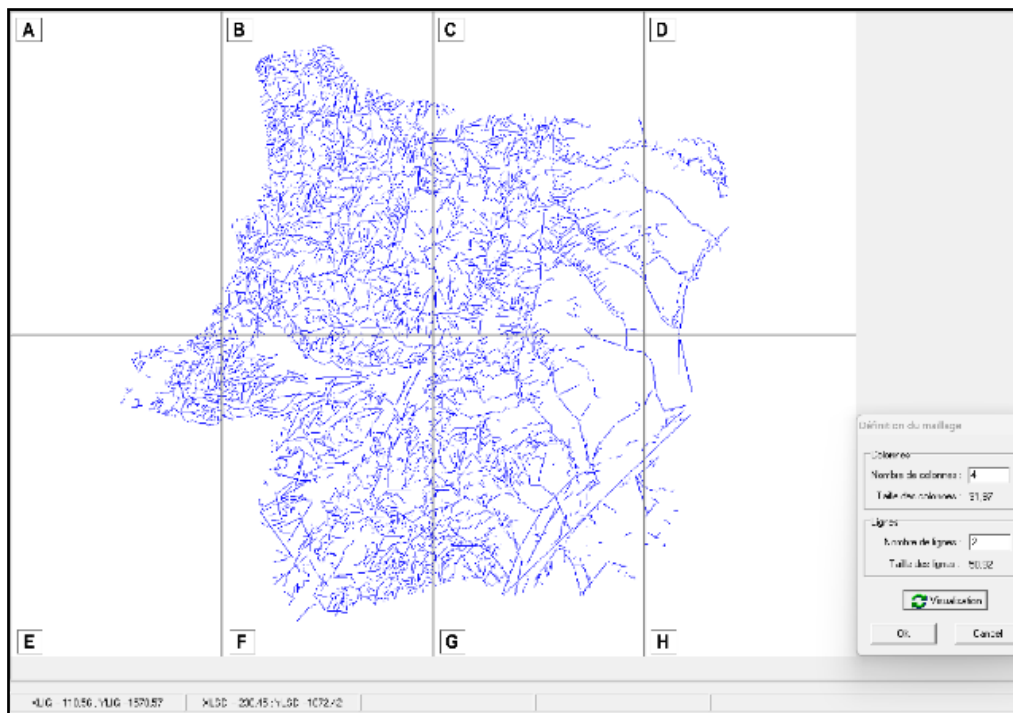


Fig. 8. Définition du maillage (4x2) de la carte linéamentaire de la zone d'étude

La méthodologie mise en œuvre au cours de cette étude est résumée dans la figure 9.

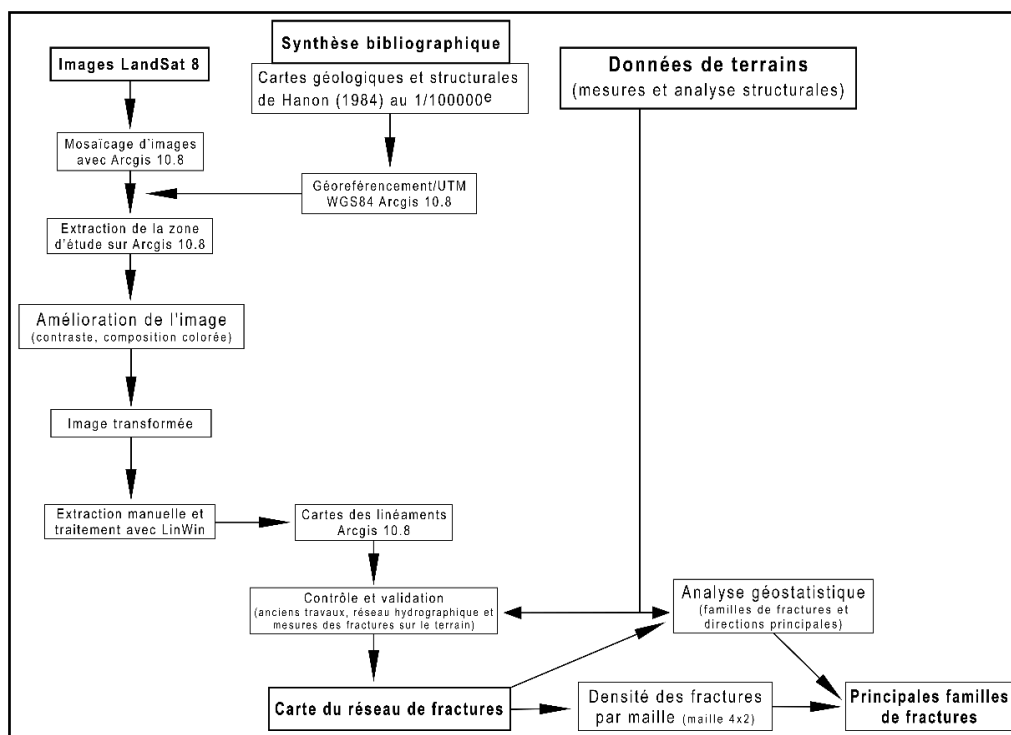


Fig. 9. Organigramme de l'approche méthodologique

5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1 CARTE LINÉAMENTAIRE

Une analyse approfondie de la région de Bouza et de Keita, réalisée avec l'utilisation de LinWin, a révélé un total de 6393 fractures de longueur variable au sein de la carte de linéaments tectoniques (**Fig. 10**). Ces fractures sont orientées suivant divers directions (**Fig. 10**). Il convient de noter que la carte du réseau de fractures, bien que pertinente, ne prétend pas à l'exhaustivité. Néanmoins, elle est représentative des fractures des régions de Bouza et de Keita, et par conséquent du sous-bassin de l'Ader Doutchi. Les réseaux de fractures ainsi obtenus ont été utilisés pour les analyses statistiques et géostatistiques.

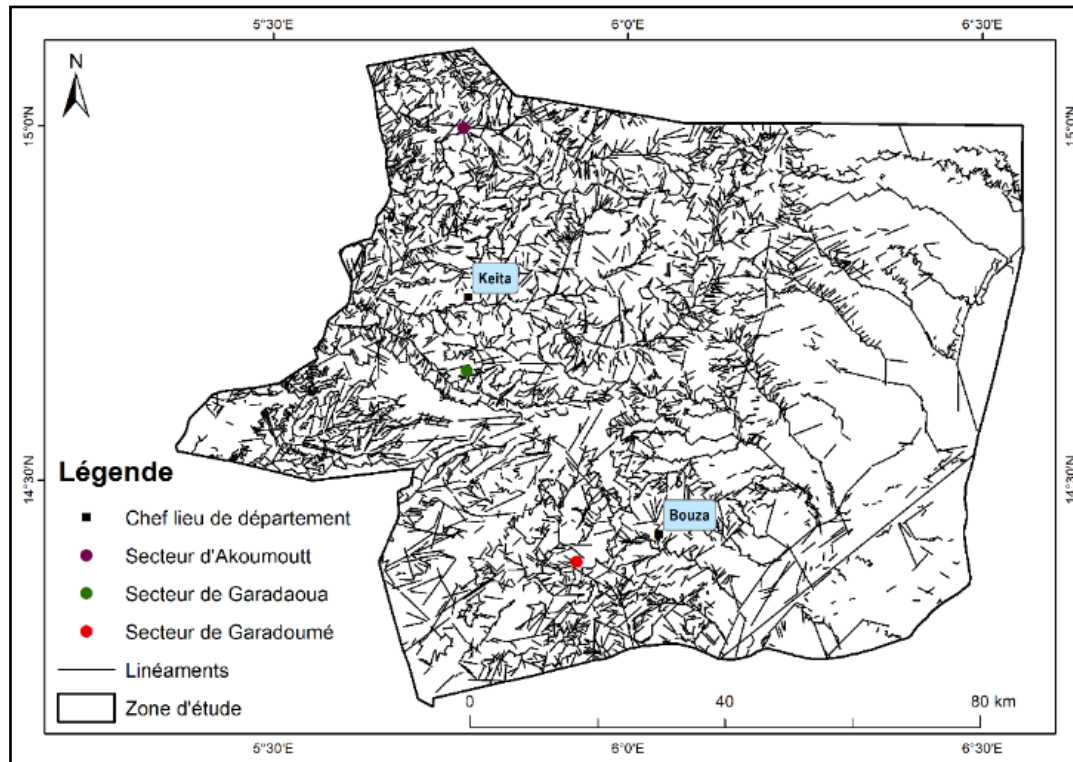


Fig. 10. Carte linéamentaire des régions de Bouza et de Keita (sous-bassin de l'Ader Doutchi)

5.2 CONTROLE ET VALIDATION DU RESEAU DE FRACTURES

Le traitement automatique avec le logiciel LinWin a permis d'éliminer les structures linéaires d'origine anthropique. En effet, les linéaments validés au cours de cette étude présentent des longueurs s'échelonnant de 147 à 40 134 mètres, ce qui contredit les résultats antérieurs de Kouamé (1999) et d'Assoma (2005). En effet, d'après Kouamé (1999) et Assoma (2005), la longueur minimale de linéaments cartographiables sur une image satellitaire est comprise entre 200 et 300 mètres.

5.2.1 VALIDATION À PARTIR DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

D'après les travaux de Schroeder (1981), cité par Gioan (1985), le réseau hydrographique est un indicateur fiable pour le contrôle et la validation de linéaments. Schroeder (1981) a supposé que toute ligne droite morphologique, qu'elle soit celle d'un cours d'eau ou de tout autre facteur topographique, correspond à un linéament d'origine inconnue, ou à une fracture, si elle est suffisamment longue et apparente. Les résultats de la superposition de la carte linéamentaire des régions de Bouza et de Keita au réseau hydrographique des mêmes localités montrent une cohérence entre les levés linéamentaires et le réseau hydrographique (Fig. 11). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Ousmane (1988), Karimoune et al. (1990), Biémi (1992), Abdou Boko (2018), Abdou Ali et al. (2018) et Abdou Ali (2018). Ces auteurs signalent en effet une concordance entre le comportement du réseau hydrographique et les accidents majeurs relevés sur les images satellitaires.

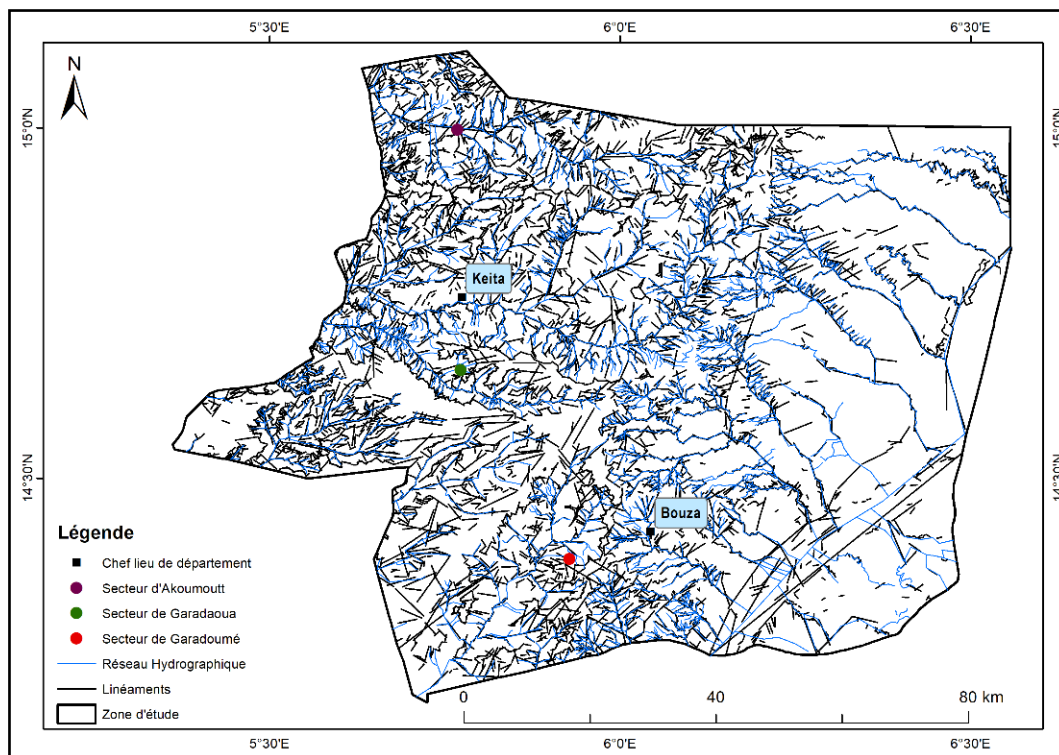


Fig. 11. Carte de la zone d'étude montrant la superposition du réseau hydrographique et des linéaments

5.2.2 VALIDATION À PARTIR DES TRAVAUX ANTERIEURS

Les fractures de directions $N0^{\circ}$ à $N30^{\circ}$ sont identiques à celles observées dans l'Ader Doutchi par Guiraud et Alidou en 1981. Ces derniers ont mis en évidence dans le sous-bassin de l'Ader Doutchi (Bloc Ader Doutchi), des linéaments kilométriques de directions NE-SO (8°) et NO-SE ($N98^{\circ}$). Par ailleurs, les travaux réalisés dans les secteurs de Garadaoua et de Garadoumé par Maâzou (2018) indiquent la présence, de trois familles de fractures dans l'Ader Doutchi (Fig. 12): F1 ($N120^{\circ}$ à $N170^{\circ}$), F2 ($N40^{\circ}$ à $N70^{\circ}$) et F3 ($N80^{\circ}$ à $N110^{\circ}$).

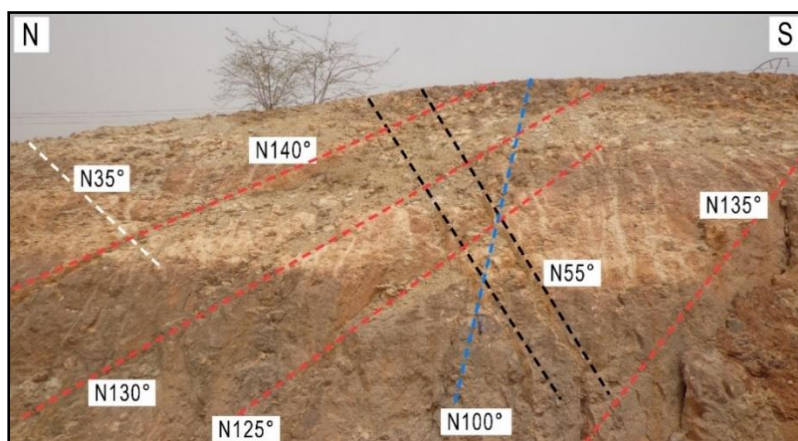


Fig. 12. Différents réseaux de fractures de direction $N35^{\circ}$ à $N55^{\circ}$, $N100^{\circ}$ et $N130^{\circ}$ à $N140^{\circ}$, affectant les bancs et inter-bancs calcaires (membre de Tamaské) d'âge thanétien Maâzou (2018), dans le secteur de Garadaoua

La plupart des directions observées ont été signalées par Laouali-Idi et Konaté (2019) et par Laouali-Idi (2020) avec les directions majeures ($N0^{\circ}$, $N55^{\circ}$ et $N140^{\circ}$) dans l'Ader Doutchi. Laouali-Idi et Konaté (2019) ont mis en évidence la présence de

linéaments d'orientations NW-SE, NE-SW, N-S et W-E dans l'Ader Douthi. Ces directions linéamentaires ont été identifiées dans l'Atlas Tunisien par Ezzine et *al.* (2012).

Par ailleurs, Abdou Ali et *al.* (2018) ont mis en évidence des fractures de directions N0° à N30° dans la région de Dosso, à extrémité ouest du bassin des Iullemmeden. Ces auteurs ont également décrit des fractures de directions majeures NE-SW et NW-SE dans la même région.

Dans les bassins de Tin Mersoï, de Tin Séririne et de l'Irhazer, Valsardieu (1971) a décrit des linéaments d'orientations N60°E à E-W, N110° à N140°E, N170°E à N-S et N10° à N30°E. Dans le même bassin, plusieurs auteurs (Greigert et Pougnet, 1967; Guiraud et Alidou, 1981; Sempéré, 1981; Abdou Boko et *al.*, 2017) ont mis en évidence des systèmes de fractures d'orientations N0° à N10°, N70° à N80° (failles conjuguées de N130° N140°), N30° à N40°, N60° à N70° et N100° à N110°. Selon ses auteurs, ses systèmes de fractures correspondent respectivement à la faille d'In Azaoua-Arlit, au faisceau de Tin Adrar, à la flexure faille de Madaouéla, aux fractures coïncidant avec les principaux chenaux des grès de Guézouman (Gerbeaud, 2006; Abdou Boko et *al.*, 2017). En outre, les linéaments de l'Ader Douthi coïncident avec certaines directions des accidents majeurs, notamment le linéament In-Azaoua-Arlit N0°, le système de failles N30° de Madaouéla (Sempéré, 1981), le faisceau de Tin Adrar de direction N70° à N80° et le système de faille N130° à N140°.

5.2.3 VALIDATION À PARTIR DES TRAVAUX DE TERRAIN

La carte linéamentaire ainsi obtenue a ensuite été confrontée aux observations de terrain. Les linéaments qui coïncident avec les directions de fractures mesurées sur le terrain sont considérés comme étant des fractures (Laouali-Idi, 2020; Razack, 1984). Afin de réaliser les tests de validation des linéaments, 706 mesures de fractures, de failles et de plis ont été effectuées sur le terrain. Le **tableau 1** présente les taux et les nombres de mesures pour les intervalles de 10°. L'analyse de l'histogramme de la **figure 13** révèle une distribution des mesures dans toutes les directions. Les directions linéamentaires obtenues, à l'issue du traitement des images Landsat 8, présentent les mêmes orientations que les mesures réalisées sur le terrain (**Figs. 12 à 15**). L'analyse statistique des données a permis de révéler l'existence de six directions principales: N0° à N40° (24 %), N40° à N80° (24 %), N80° à N110° (12 %), N110° à N150° (32 %) et N150° à N180° (10 %).

Tableau 1. Distribution en pourcentages du nombre de fractures mesurées dans le sous-bassin de l'Ader Douthi Sud

| Direction | % en fonction du nombre | Nombre de fractures |
|--------------|-------------------------|---------------------|
| N0° à 10° | 5 | 35 |
| N10° à 20° | 4 | 25 |
| N20° à 30° | 6 | 43 |
| N30° à 40° | 9 | 63 |
| N40° à 50° | 5 | 34 |
| N50° à 60° | 7 | 48 |
| N60° à 70° | 7 | 52 |
| N70° à 80° | 5 | 33 |
| N80° à 90° | 4 | 26 |
| N90° à 100° | 4 | 30 |
| N100° à 110° | 4 | 28 |
| N110° à 120° | 7 | 48 |
| N120° à 130° | 5 | 37 |
| N130° à 140° | 13 | 90 |
| N140° à 150° | 7 | 50 |
| N150° à 160° | 4 | 27 |
| N160° à 170° | 5 | 32 |
| N170° à 180° | 1 | 5 |
| Total | 100 | 706 |

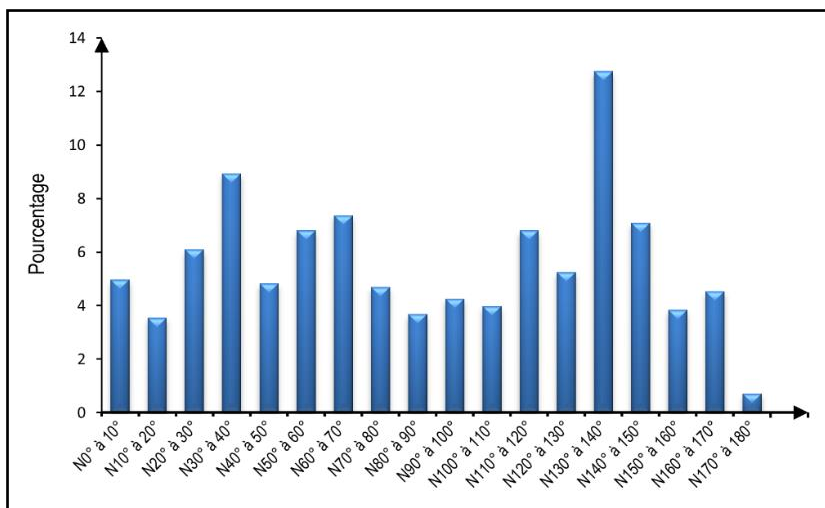


Fig. 13. Histogrammes représentant le nombre de fractures mesurées pour chaque classe directionnelle dans le sous-bassin de l'Ader Doutchi Sud

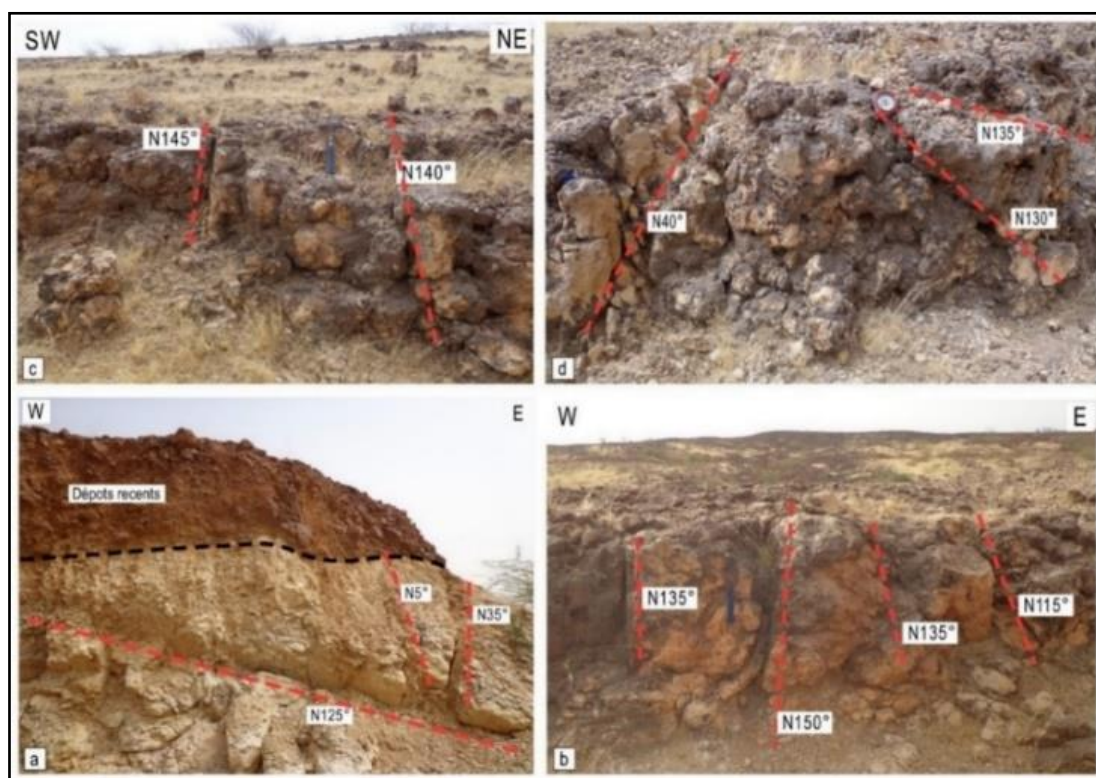


Fig. 14. Différents type directions de fractures observées dans le secteur d'Akoumoutt, dans les calcaires d'âge thanétien du membre de Tamaské: a- N5°, N35° et N125°; b- N115°, N135° et N150°; c- N140° à N145°; et d- N40°, N130° et N135°

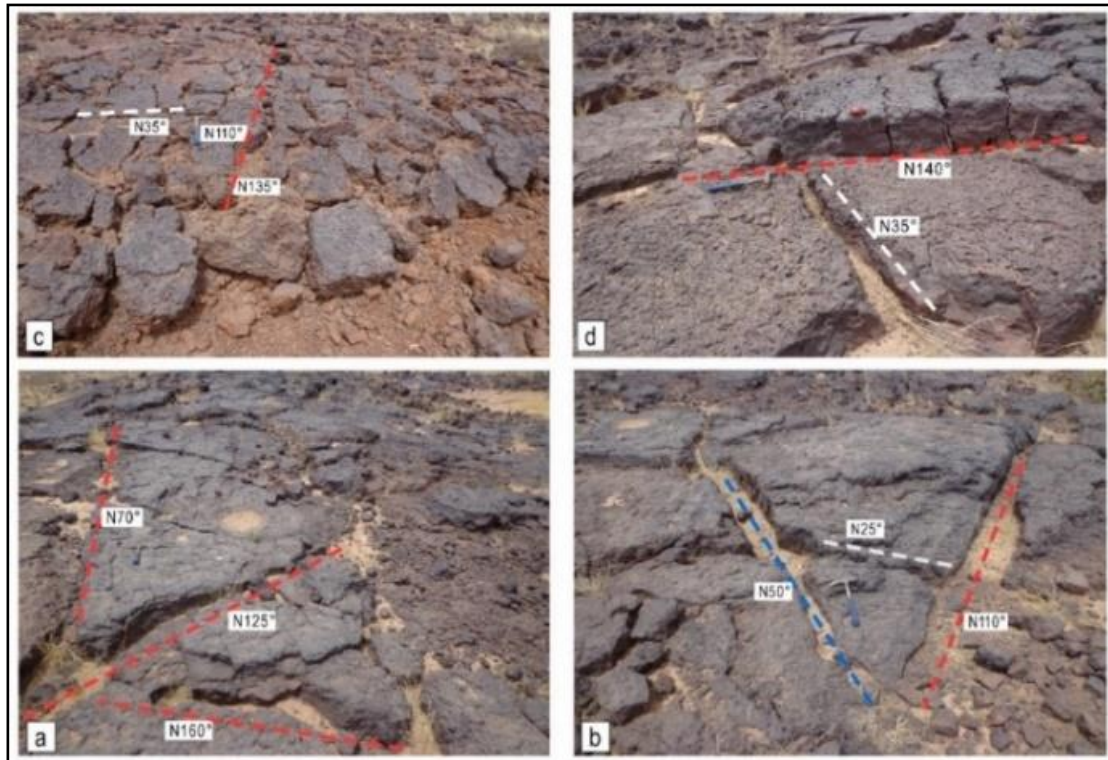


Fig. 15. Affleurements de grès oolithiques ferrugineux au sommet de la formation de l'Ader Doutchi (Ct¹) dans le secteur d'Akoumoutt. Les dépôts ont été affectés par des fractures d'orientations: a- N70°, N125° et N160°; b- N25°, N50° et N110°; c- N35°, N110° et N135°; d- N35° et N140°

5.3 ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES FRACTURES DU SOUS-BASSIN DE L'ADER DOUTCHI

5.3.1 DENSITÉ DES LINÉAMENTS

La densité des linéaments au sein des huit mailles est présentée dans le **tableau 2**. Ce **tableau** présente la densité en fonction du nombre et de la longueur cumulée par maille. En fonction du nombre de linéaments par maille, la densité varie de 32 à 1 989 linéaments par maille, tandis qu'en fonction de la longueur cumulée, elle est de 13 à 1350 linéaments par maille (**Tableau 2**).

En fonction du nombre de linéaments, les mailles B, C, F et G présentent la densité la plus forte (1 124 à 1 989 fractures). La densité est moyenne dans les mailles D et E, avec respectivement 206 et 318 linéaments. Dans les mailles A et H, la densité est faible avec respectivement 32 et 51 linéaments.

En fonction de la longueur cumulée, les mailles B, C, F et G présentent les plus fortes densités (862 à 1 350 fractures). La densité est moyenne dans les mailles D et E avec respectivement 133 et 197 linéaments. Dans les mailles A et H, la densité est faible avec respectivement 13 et 71 linéaments.

Tableau 2. Densité des linéaments dans les 8 mailles en fonction du nombre (Nbr.) et de la longueur (Long.) des linéaments dans les régions de Bouza et de Keita

| Maille | Xcentre Maille (km) | Ycentre Maille (km) | Densité Nbr. | Densité Long. |
|--------|---------------------|---------------------|--------------|---------------|
| A | 127 | 1647 | 32 | 13 |
| B | 159 | 1647 | 1989 | 1350 |
| C | 190 | 1647 | 1224 | 863 |
| D | 222 | 1647 | 206 | 133 |
| E | 127 | 1596 | 318 | 197 |
| F | 159 | 1596 | 1554 | 1176 |
| G | 190 | 1596 | 1124 | 862 |
| H | 222 | 1596 | 51 | 71 |

La figure 16 (a et b) répertorie la densité des linéaments en 10 classes. Cette dernière est fonction de la longueur cumulée (Fig. 16 a) ou du nombre de linéaments (Fig. 16 b). La figure 16 (a et b) présente la densité des linéaments dans chaque maille. La détermination des directions majeures par maille a été réalisée en fonction du nombre et de la longueur des linéaments (Fig. 16). L'utilisation du seuil de 5 % indique la présence de linéaments dans toutes les directions (Fig. 16 c). Les directions majeures par maille sont les suivantes:

- maille A: N10° à N20°, N30° à N40°, N50° à N80°, N90° à N120°, N130° à N150° et N150° à N170°,
- maille B: N0° à N80°, N90° à N120°, N130° à N150° et N160° à N170°,
- maille C: N0° à N20°, N30° à N130° et N140° à N150°,
- maille D: N0° à N40°, N50° à N80°, N80° à N100°, N110° à N130°, N130° à N140° et N150° à N170°,
- maille E: N0° à N40°, N50° à N80°, N90° à N110°, N120° à N130°, N140° à N150° et N160° à N170°,
- maille F: N0° à N80°, N90° à N120° et N140° à N150°,
- maille G: N0° à N20°, N30° à N80°, N90° à N130° et N130° à N150°,
- mailles H: N30° à N80°, N90° à N120° et N160° à N170°.

Le seuillage de 5 % met en évidence 5 directions majeures: N0° à N30°, N50° à N80°, N90° à N130°, N130° à N150° et N160° à N170°.

Pour un seuillage de 10 % (Fig. 16 c), les directions principales par maille sont:

- maille A: N0° à N20°, N30° à N40°, N40° à N50°, N60° à N70° et de N130° à N140°,
- maille B: N0° à N10°,
- maille C: N90° à N100°,
- mailles D et E: N0° à N10° et N90° à N100°,
- maille F: N40° à N50° et N80° à N100°,
- maille G: N0° à N10°, N40° à N60° et N90° à N100°,
- mailles H: N60° à N80°, N90° à N120° et N160° à N180°.

Le seuil de 10% met en évidence 5 directions majeures. Les plus significatives vont de N0° à N20°, de N30° à N60°, de N60° à N80°, de N90° à N130° et N160° à N180° (Fig. 15 a). En fonction de la densité, les fracturations des mailles B, C, F et G sont les plus représentatives des linéaments affectant la zone d'étude (Tableau 2 et Fig. 15 a). Ces mailles indiquent les directions majeures dans le sous-bassin de l'Ader Douthi. Il s'agit des directions N0° à N10°, N50° à N60° et N90° à N100°.

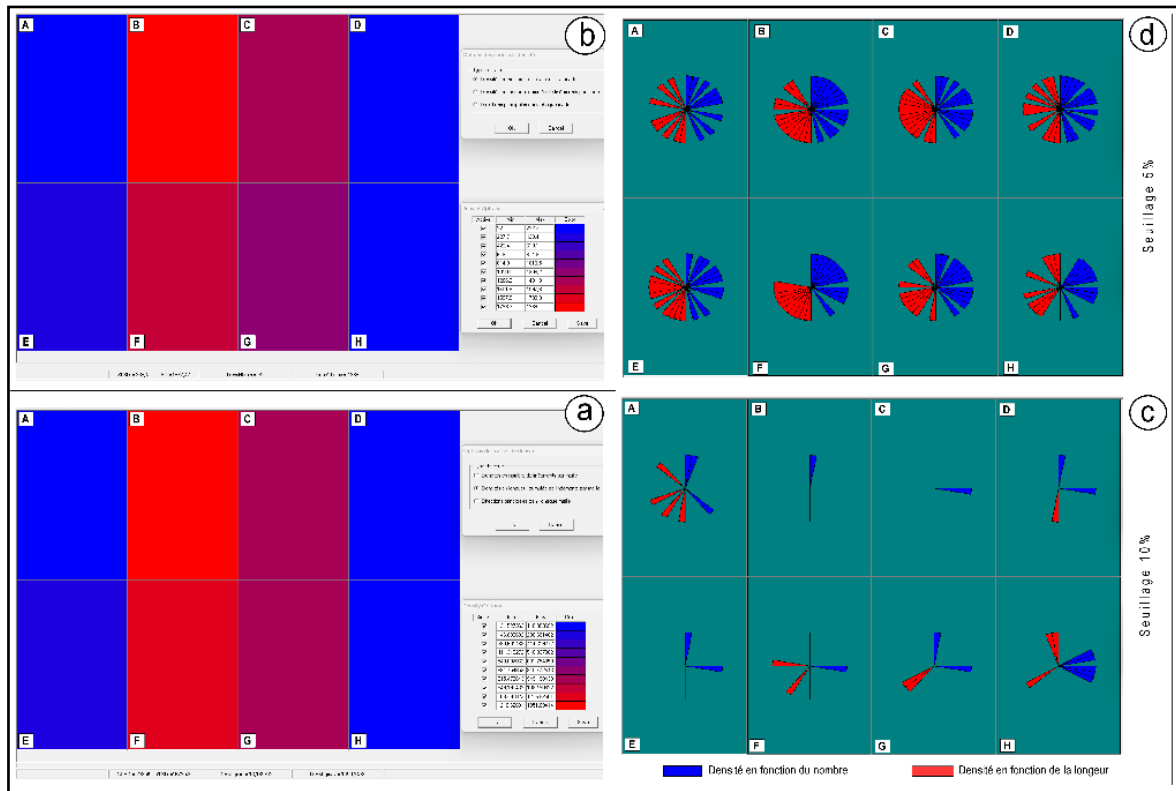


Fig. 16. Densités et directions majeures dans les régions de Bouza et de Keita: a- Densité en fonction de la longueur cumulée de linéaments par maille; b- Densité en fonction du nombre de linéaments par maille; c- Directions principales dans chaque maille pour un seuillage de 10 %; d- Directions principales dans chaque maille pour un seuillage de 5 %

De manière générale, qu’il soit en fonction de la longueur cumulée ou du nombre de linéaments, les mailles B, C, F et G présentent les densités les plus élevées (Fig. 17). Les résultats obtenus indiquent une forte corrélation entre les densités en fonction du nombre et de la longueur cumulée de linéaments (Fig. 18). Cette forte densité est due à la couverture de l’essentiel de ces mailles par la zone d’étude. La faible densité est due à la faible couverture de la maille par la zone d’étude. La faible densité dans les mailles D et H est également influencée par la couverture des dépôts d’âge paléocène à miocène par les dunes sableuses du Quaternaire.

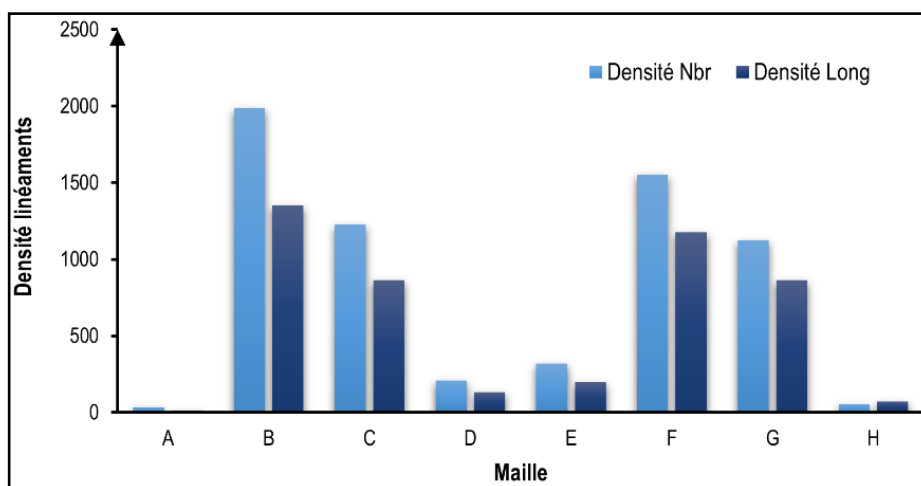


Fig. 17. Histogrammes de densités des linéaments par maille en fonction de la longueur (Long) et du nombre (Nbr) de linéaments par maille

La **figure 17** illustre la corrélation entre la densité en nombre de linéaments par maille et la longueur cumulée de ces derniers. L'équation de la droite caractéristique de ces relations est $y = 0,7104x + 6,117$. Le coefficient de corrélation est $R^2 = 0,9925$. La valeur de 0,9925 du coefficient de corrélation indique que les points de corrélation sont situés à proximité ou sur la droite de régression (**Fig. 17**).

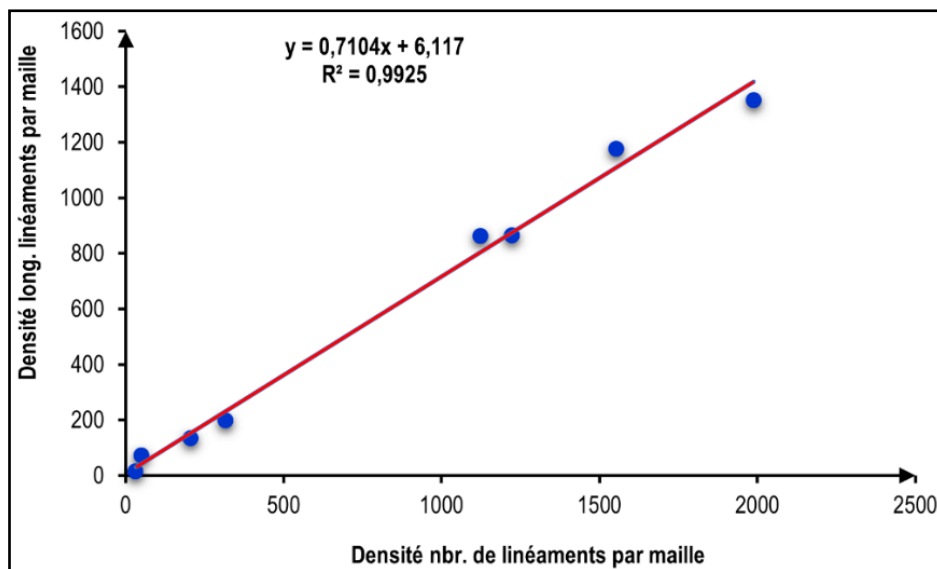


Fig. 18. Corrélation montrant la densité en fonction du nombre (nbr.) de linéaments par maille et la densité de la longueur (long.) de linéaments en fonction de la longueur de linéaments par maille

5.3.2 ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DES LINEAMENTS EN FONCTION DE LA LONGUEUR

Pour mieux apprécier l'organisation des linéaments et déterminer les linéaments les plus significatifs de la zone d'étude, une classification en fonction de leur longueur a été réalisée (**Fig. 19**). À partir de la distribution des directions principales des linéaments obtenus, la densité des linéaments a été exprimée en fonction du nombre ou de la longueur cumulée. La densité des linéaments est présentée sous forme de rosace directionnelle (**Fig. 22**).

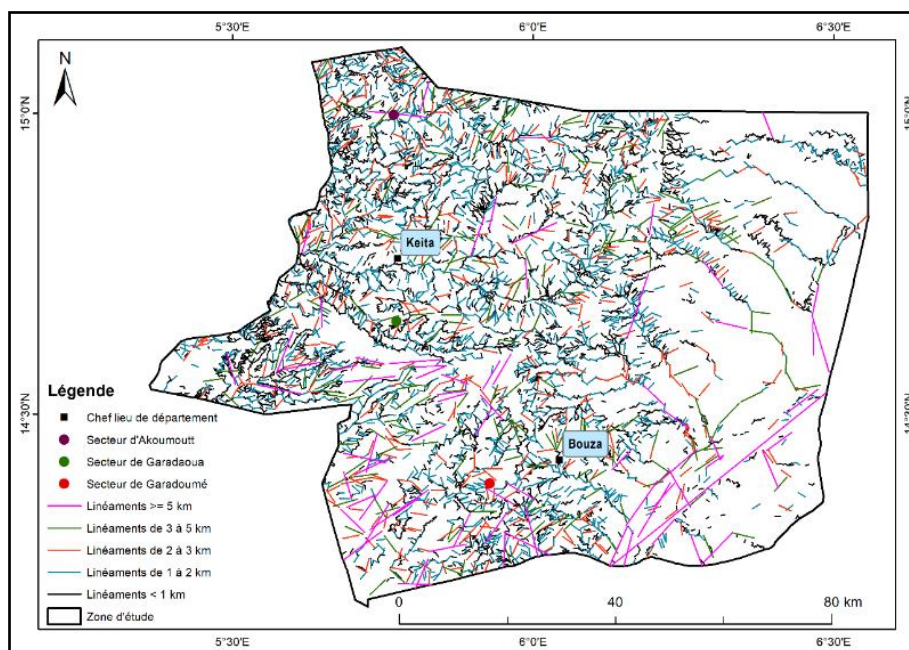


Fig. 19. Classification des linéaments de la zone d'étude en fonction de la longueur

5.4 CLASSIFICATION DES LINEAMENTS EN FONCTION DU NOMBRE ET DE LA LONGUEUR CUMULEE

Les résultats de l'analyse géostatistique de la distribution des différentes directions de linéaments pour des intervalles de 10° sont présentés dans le **tableau 3**. La rosace directionnelle avec un regroupement de 10° est généralement considérée comme la plus appropriée en géologie (**Fig. 22**).

Tableau 3. *Distribution en pourcentage du nombre et de la longueur cumulée des linéaments dans le sous-bassin de l'Ader Doutchi*

| Direction | % en fonction du nombre | Nombre de linéaments | % en fonction de longueur | Nombre de linéaments |
|--------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| N0° à 10° | 10 | 646 | 8 | 517 |
| N10° à 20° | 5 | 323 | 6 | 387 |
| N20° à 30° | 5 | 323 | 6 | 387 |
| N30° à 40° | 6 | 387 | 8 | 517 |
| N40° à 50° | 5 | 323 | 6 | 387 |
| N50° à 60° | 6 | 387 | 8 | 517 |
| N60° à 70° | 7 | 452 | 6 | 387 |
| N70° à 80° | 7 | 452 | 6 | 387 |
| N80° à 90° | 3 | 194 | 5 | 323 |
| N90° à 100° | 10 | 646 | 8 | 517 |
| N100° à 110° | 6 | 387 | 5 | 323 |
| N110° à 120° | 6 | 387 | 4 | 258 |
| N120° à 130° | 4 | 258 | 4 | 258 |
| N130° à 140° | 4 | 258 | 4 | 258 |
| N140° à 150° | 5 | 323 | 5 | 323 |
| N150° à 160° | 4 | 258 | 3 | 194 |
| N160° à 170° | 4 | 258 | 4 | 258 |
| N170° à 180° | 2 | 129 | 3 | 194 |

L'analyse géostatistique des résultats en fonction du nombre de linéaments pour des intervalles de 10° (**Tableau 3 et Fig. 20**) indique des pourcentages en nombre de 10 % pour les linéaments allant de N0° à N10° et ceux de N90° à N100°. Des pourcentages de 7 % ont été enregistrés pour les directions N60° à N70° et N70° à N80°. Les linéaments de N30° à N40°, de N50° à N60°, de N100° à N110° et de N110° à N120° ont présenté des pourcentages en nombre de 6 %. Les linéaments de N10° à N20°, de N20° à N30°, de N40° à N50° et de N140° à N150° ont présenté des pourcentages en nombre de 5 %. Des pourcentages de 4 % ont été enregistrés pour les linéaments de directions allant de N120° à N130°, de N130° à N140°, de N150° à N160° et de N160° à N170°. Les linéaments de directions N80° à N90° et de N170° à N180° ont donné des pourcentages en nombre respectifs de 3 % et de 2 %.

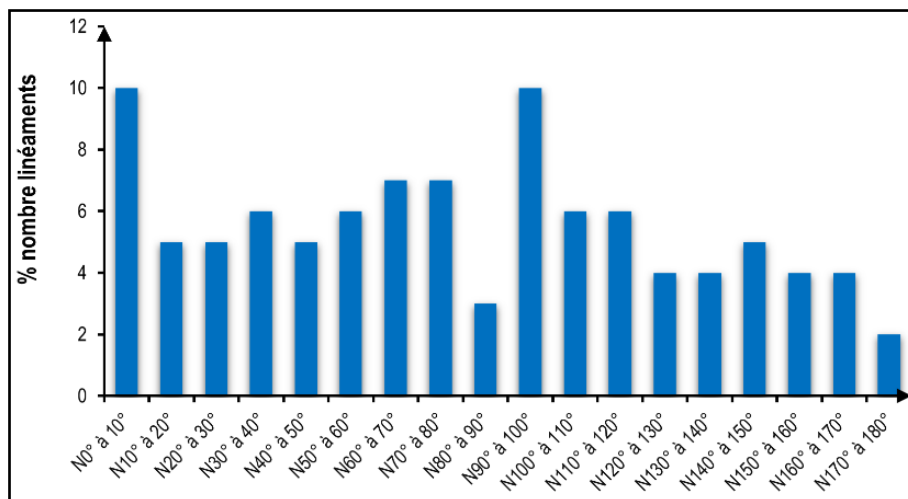


Fig. 20. Histogramme des différentes directions enregistrées dans l'Ader Doutchi Sud en fonction du nombre de linéaments

L'analyse géostatistique des résultats en pourcentage de longueur cumulée pour les fourchettes de 10° (Tableau 3 et Fig. 21) met en évidence des pourcentages en longueur cumulée de 8 % pour les fractures N0° à N10°, N30° à N40°, N50° à N60° et N90° à N100°. Des taux de 6 % ont été obtenus pour les fractures de directions N10° à N20°, N20° à N30°, N40° à N50°, N60° à N70° et N70° à N80°. Les fractures de directions N80° à N90°, N100° à N110° et N140° à N150° ont enregistré des pourcentages en longueur cumulée de 5%. Des pourcentages de 4 % ont été obtenus pour les fractures N110° à N120°, N120° à N130°, N130° à N140° et N160° à N170°. Les fractures N150° à N160° et N170° à N180° ont donné des pourcentages en longueur cumulée de 3 %.

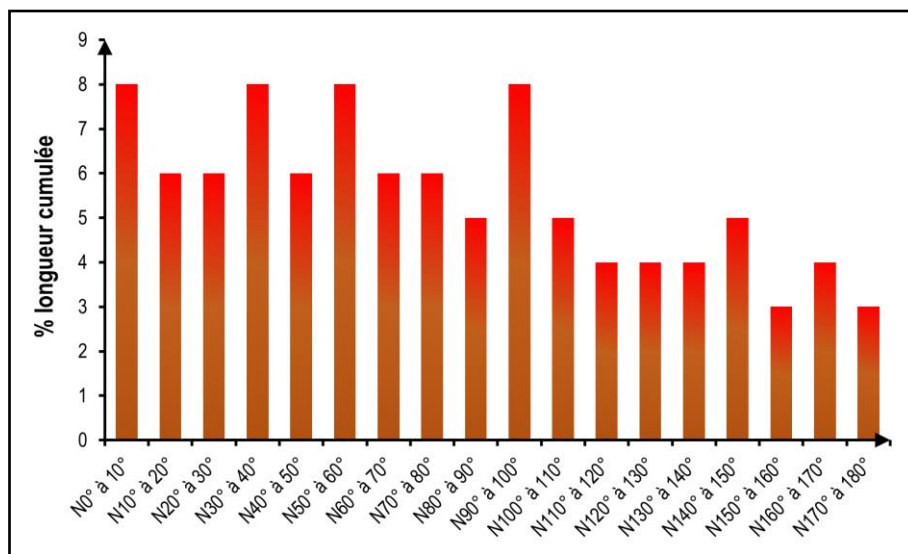


Fig. 21. Histogramme des différentes directions enregistrées dans l'Ader Doutchi Sud en fonction de la longueur cumulée des linéaments

La rosace directionnelle a été utilisée pour identifier les directions principales des linéaments (Fig. 22). Cinq familles de fractures ont été identifiées en fonction du nombre (Fig. 22 a) et de la longueur cumulée (Fig. 22 b) des linéaments affectant la zone d'étude:

- La famille N0° à N40°, elle regroupe 26 % des fractures en nombre et cumule 28 % des linéaments en termes de longueur cumulée;
- La famille N40° à N80° constitue 25 % des fractures en nombre et 26 % des linéaments en longueur cumulée;
- La famille N90° à N130° représente 26 % des fractures en nombre et 21 % en termes de longueur cumulée;

- La famille N160° à N180°, qui regroupe 6 % de fractures et 7 % de longueur et;
- La famille N80° à N90° qui compte 3 % de fractures pour 5 % de longueur cumulée.

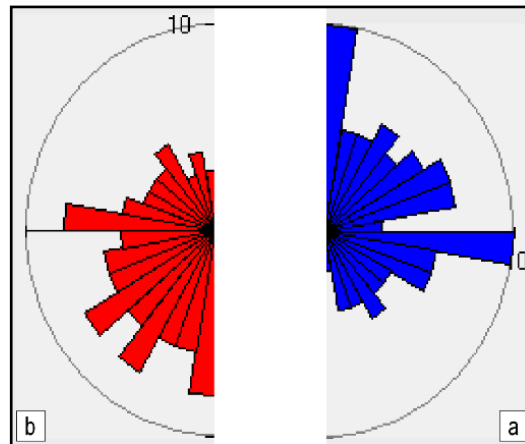


Fig. 22. Rosace directionnelle des linéaments de l'Ader Doutchi Sud pour des écarts angulaires de 10°: a- distribution en fonction du nombre de linéaments; b- distribution de linéaments en fonction de la longueur cumulée

La corrélation entre le nombre de linéaments et leur longueur cumulée est illustrée par la **figure 23**. L'équation de la droite caractéristique de ces relations est $y = 0,6107x + 2,1409$. Le coefficient de corrélation est $R^2 = 0,573$. La valeur de 0,573 du coefficient de corrélation indique une répartition moyenne des points de corrélation situés de part et d'autre de la droite de régression (**Fig. 23**).

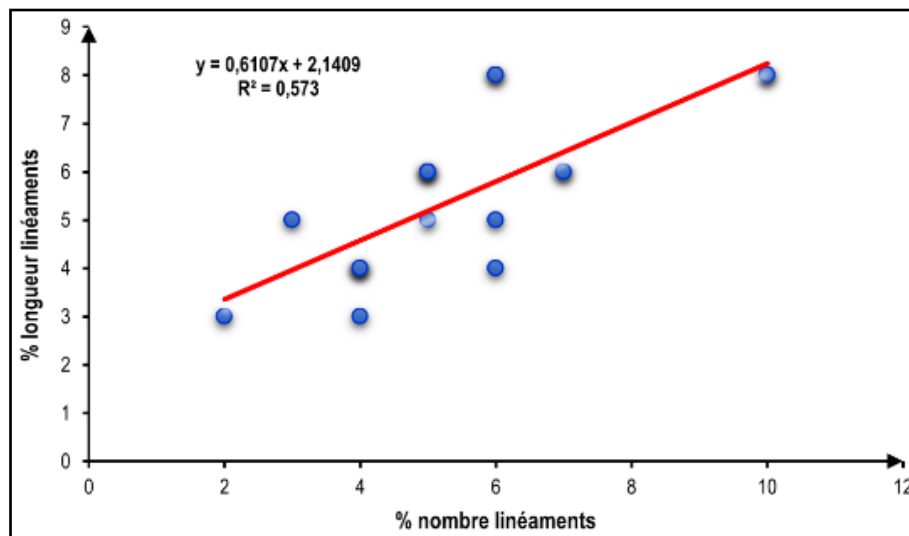


Fig. 23. Corrélation entre le nombre et les longueurs cumulées de linéaments

6 CONCLUSION

La carte linéamentaire ainsi obtenue a été confrontée aux mesures réalisées sur le terrain, puis superposée au réseau hydrographique et à la carte géomorphologique de la zone d'étude. Cette analyse a révélé que les directions des fractures, des failles et des axes de plis mesurés sur le terrain coïncident avec le réseau hydrographique de ce sous-bassin. Cette observation, combinée à l'examen des linéaments, permet de conclure que le sous-bassin de l'Ader Doutchi Sud présente une forte densité de fracturation du sol.

L'analyse structurale et géostatistique des formations d'âge paléogène à miocène du sous-bassin de l'Ader Doutchi Sud met en évidence la présence de cinq principales familles de fractures dont les directions sont comprises entre N0° et N40°, N40° et N80°, N90° et N130°, N130° et N150°, ainsi que N160° et N170°. Les linéaments majeurs identifiés sont liés au rejeu des

accidents panafricains anté-paléogènes, conséquence directe du soulèvement de l'Aïr, ainsi qu'à la tectonique oligo-miocène et quaternaire.

Les travaux entrepris ont conduit à l'élaboration de la carte linéaire et à la mise à jour de la carte géologique des régions de Bouza et de Keita. La cartographie géoréférencée des linéaments tectoniques de ces deux régions se présente comme un instrument majeur pour les études structurales. Les résultats obtenus fournissent un appui à l'analyse des fracturations, un domaine d'intérêt pour les agronomes, les environnementalistes, les géotechniciens, les hydrogéologues, les professionnels de mine et les pétroliers.

REFERENCES

- [1] Abdou Ali I., 2018. Caractérisation des réservoirs aquifères multicouches du bassin des lullemeden dans la région de Dosso (Sud-Ouest Niger): Apports de la télédétection, du SIG, de la géophysique et de l'hydrochimie. Thèse de Doctorat unique, Université Abdou Moumouni de Niamey, 318 p.
- [2] Abdou Ali I., Konaté M. et Ousmane B., 2018. Lineamentary and Structural cartography of lullemeden Basin in the region of Dosso (South-west of Niger). IJSR, ISSN (Online) 2319-7064. Vol. 7, issue 4, 9 p.
- [3] Abdou Boko B., Konaté M., Adamou R. et Abdoulaye A., 2017. Contribution du système de fracturation à la recharge des aquifères du bassin de Tim Mersoï (Nord Niger). REV. CAMES - VOL.05 NUM.01. 2017, ISSN 2424-7235. Science de la vie, de la terre et agronomie.
- [4] Assoma T. V., 2005. Combinaison d'images ROS de RADARSAT 1 et D'ERS-2, et ETM+ de Landsat-7 pour la cartographie des potentialités hydrogéologiques des aquifères de socle fracturé: cas du bassin versant du Koué à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Mém. de DEA Hydrogéologie, Univ. Cocody, 104 p.
- [5] Bellion Y. J. C., 1987. Historique géodynamique Post-Paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, lullemeden, Tchad). Thèse de Doctorat, université d'Avignon et des pays de vaucluse, 302 p.
- [6] Bertrand-Sarfati J., Fabre J. et Pouchkine M. A., 1977. Géodynamique des aires sédimentaires cratoniques: quelques exemples sahariens. *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*, 1,1, pp. 217-231.
- [7] Biémi J., 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aire granitique de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse Doct. ès Sc. Nat. Univ. Abidjan, 479p.
- [8] Boudouresque L., 1980. Contribution de la paléopalynologie à la reconstitution floristique, stratigraphique et paléogéographique de la bordure occidentale du bassin des lullemeden au Crétacé supérieur et au Paléocène (Niger et Mali, Afrique de l'Ouest). *Thèse spécialité*, Univ. Orléans-Niamey, 285 p.
- [9] Boudouresque L., Dubois, D., Lang, J., et Trichet J., 1982. Contribution à la stratigraphie et à la paléogéographie de la bordure occidentale du bassin des lullemeden au Crétacé supérieur et au Cénozoïque (Niger et Mali, Afrique de l'Ouest). *Bull. Géol. Fr (7) 24*, n°4, pp. 685-695.
- [10] Collignon M. et LeFranc J. P., 1974b. Découverte d'une faune du Turonien inférieur élevé à Coilopoceras et Hoplites dans le Nord Tadémaït (Sahara algérien). Son extension probable en Afrique du Nord. *C. R. Acad. Sc., Paris, (D) 278*, pp. 817-821.
- [11] Collignon M. et LeFranc J. P., 1974a. Mise en évidence de la communication saharienne entre Téthys et Atlantique Sud d'après les fossiles cénomaniens du Tadémaït (Sahara algérien). *C. R. Acad. Sc., Paris, (D) 278*, pp. 2257-2261.
- [12] Courville P., Meister C., Lang J., Mathey B., et Thierry J., 1991. Les faunes d'Ammonites du Cénomani supérieur-Turonien moyen basal du Niger et du Nigeria (Afrique de l'Ouest): intérêt pour la zonation, es corrélation en Théthys occidentale et l'hypothèse de la liaison Téthys-Atlantique Sud. *C. R. Acad. Sciences. Paris, 313, série II: pp. 1039-1042.*
- [13] Dikouma M., 1990. Fluctuations du niveau marin au Maestrichtien et au Paléocène dans le bassin intracratonique des lullemeden (Ader-Doutchi). Thèse de Doctorat, universités Dijon-Niamey, 272 p.
- [14] Dikouma M., Lang J. et Pascal A., 1993. Transgression Maestrichtiennes et paléogènes dans le bassin des lullemeden (Niger). *Newsl. Stratigr., 29 (2)*. Berlin. Stuttgart, pp. 105-124.
- [15] Dubois D. et Lang J., 1984. Étude lithostratigraphique et géomorphologique du Continental terminal et du Cénozoïque inférieur dans le bassin des lullemeden (Niger). *Bulletin de l'I.F.A.N.*, t 43, série A, n° 1-2, 42 p.
- [16] Dubois H., 1979. Etude géologique des formations Oolithiques ferrugineuses du bassin des lullemeden (République du Niger). Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Niamey et d'Orléans, 123 p.
- [17] Ezzine I., Zargouni F., Ghanmi M., 2012. Analyse linéaire des images landsat-tm et spot de l'atlas centro-septentrional: cartographie du prolongement sw de l'acatrice de zaghuan. *Télédétection*, 2012, 10 (4), pp.199 211. hal-01948894.

- [18] Faure H., 1966. Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post- Paléozoïques du Niger oriental. Editions du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, publication N°1, 630 p.
- [19] Gerbeaud O., 2006. Évolution structurale de bassin de Tim Mersoï: déformation de la couverture sédimentaire, relation avec la localisation des gisements uranifères du secteur d'Arlit (Niger). Thèse de l'Université de Paris XI Orsay, 270 p.
- [20] Gioan P., 1985. Description et analyse préliminaire des alignements hydrographiques du massif du chaillu et de sa bordure méridionale (République Populaire du Congo). Rév. Géologie dynamique et de géographie physique. Vol. 26, Fasc. N°5, Paris. pp. 299-310.
- [21] Greigert J., 1966. Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des lullemeden (Afrique occidentale). Pub. Direct. Mines et Géol. Niger, 2 et Mém. BRGM, 32, 234 p.
- [22] Greigert J. et Pougnet R., 1967. Essai de description des formations géologiques de la république du Niger. B.R.G.M., n°46, 238 p.
- [23] Guiraud R. et Alidou S., 1981. La faille de Kandi (Bénin), témoin de rejeu fini- crétacé d'un accident majeur à l'échelle de la plaque africaine. C.R. Accad. Sci. Paris, 293, pp. 779-782.
- [24] Guiraud R., Bellion Y., Benkhelil J. et Moreau C., 1987. Post-Herynian tectonics in Northern and Western Africa. In: Bowden, P. Kinnaird J. (Eds), African Geology Reveiw. Geol. J. 22, pp. 433-466.
- [25] Karimoune S., Ozer A., Erpicum M., 1990. Les modèles éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. Ed. AUPELF-UREF, pp. 145-161.
- [26] Kogbe C. A., 1979. Geology of South Eastern (Sokoto) Sector of the lullemeden Basin. – Bull. Depart. Geol. Univ, Zaria, 2, 1, 420 p.
- [27] Kogbe C. A., 1977. Origin and composition of the ferruginous oolites and laterites of North-Western Nigeria. Geologische Rundschau, 67 (2), 12 p.
- [28] Komi A., Maâzou A. A., Bouba H., Kamaye T., and Yacouba A., 2024. Analyse pétrosédimentaire des dépôts maastrichtiens et paléocène-yprésiens de la région de Kao et indices de minéralisations phosphatées (Région Tahoua, Niger Central), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324, Vol. 42 No. 1, Mar. 2024, pp. 35-48.
- [29] Kouamé K. F., 1999. Hydrogéologie des régions de Montagne: apports des données de télédétection et des méthodes statistique et factale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Doct.3ècycle, Univ. Cocody, 215 p.
- [30] Laouali-Idi K., 2020. Etude sédimentologique, paléontologique, paléogéographique et structurale des dépôts d'âge maastrichtien à yprésien du 177 bassin des lullemeden (Niger central). Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey. 172 p.
- [31] Laouali-Idi K., Konate M., 2019. Extraction de réseaux de fractures en milieu sédimentaire par les techniques de la télédétection intégrant une analyse statistique et structurale: cas des formations méso-cénozoïques du bassin des lullemeden, Niger Central. Afrique SCIENCE 15 (5) 39 – 53p.
- [32] Maâzou A. A., 2018. Environnements de dépôts de la formation de Garadaoua d'âge Paléocène-Yprésien, dans les secteurs de Garadaoua et de Garadoumé (Région de Tahoua, Centre-Sud Niger). Mém. Master en Géoressources, N°057/GEOR/2018, Univ. Abdou Moumouni de Niamey, 63 p.
- [33] Maâzou A. A., Kamayé T., Konaté M., Laouali Idi K., Ibrahim Maharou H., Mahaman Manzo N. S., Ousmane H. et Alzouma Amadou D., 2022. Depositional environments of the maastrichtian and paleogene Formations of the Garadaoua and Garadoumé area in the lullemeden basin (Tahoua region, south-central Niger), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324, Vol. 37 No. 3, Oct. 2022, pp. 702–715.
- [34] Mathey B., Lang J., Pierre C. et Alzouma K., 1991. Effets combinés de l'eustatisme et des variations climatiques: l'exemple des premières transgressions du Crétacé supérieur dans le centre de l'Afrique occidentale (Bassin des lullemeden, Niger). – C. R. Acad. Sciences Paris, 312, série II: pp. 523-528.
- [35] Ousmane B., 1988. Etude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahéenne du Niger (Liptako, Sud-Maradi, Zinder-Est). Thèse Doct. Univ. Niamey, 175p.
- [36] Petters S. W., 1978. Maastrichtian-Paleocene foraminiferal from North-West Nigeria and their paleogeography. Acta Paleontologica Polonica, 23, n°2, pp. 131-152.
- [37] Petters S. W., 1977. Ancient seaway across the Sahara. – Nigerian field, 42: pp. 22-30.
- [38] Radier H., 1959. Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental (A.O.F). Thèse Univ. Strasbourg. 452 p.
- [39] Reymont R. A. et Dingle R. V., 1987. Paleogeography of Africa during the cretaceous period. Pal. Pal. Pal. 59, n°1-2, pp. 93-116.
- [40] Sempéré T., 1981. Le contexte sédimentaire du gisement d'uranium d'Arlit (République du Niger). Mémoire Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 374 p.
- [41] Vail P. R., Mitchum R. M., Jr et Thompson S. III., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. A. A. P. G. mem. 26, pp. 83-97.

- [42] Valsardieu C., 1971. Etude géologique et Paléogéographique du Bassin de Tim Mersoï: Région d'Agadès (République du Niger). Thèse Université de Nice, 514 p.
- [43] Wright L. I., Branchet M. et Alisso I., 1993. Notice explicative de la carte géologique du bassin houillier d'Anou Araren / Solomi. Ministère des Mines et de l'Énergie, Niger, 20 p.