

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 Iullemeden, Niger Central

Karimou LAOUALI IDI* et Moussa KONATE

Université Abdou Moumouni, Faculté des sciences et techniques, Département de géologie, Laboratoire des eaux souterraines et des géoressources, BP 10662, Niamey, Niger

* Correspondance, courriel : karimidi85@gmail.com

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse du réseau de fractures affectant les formations méso-cénozoïques de la partie sud du bassin des Iullemeden (Niger central). L'objectif visé consiste à cartographier puis à mener une analyse statistique du réseau de fractures et de les confronter aux données de terrains. Dans cette optique, la méthodologie mise en œuvre est basée sur l'utilisation des techniques de la télédétection, de la microtectonique soutenue par l'approche rétrotectonique. L'analyse linéamentaire réalisée à partir des images Landsat 8 couvrant la période allant du 23 octobre 2016 au 18 mars 2017 a permis de mettre en évidence un réseau dense de 1025 linéaments à l'échelle de la région. Après validation de la carte du réseau de fractures, deux directions principales de fractures ont été identifiées : $N0^{\circ}-N10^{\circ}$ et $N90^{\circ}-N100^{\circ}$, dans les proportions similaires de 11 % chacune. La distribution des orientations en longueurs cumulées de ces fractures donne respectivement les proportions de 9 % et 6 %. Ces deux directions principales suggèrent que les fractures résultent de plusieurs phases de fracturation. Dans la zone d'étude, l'analyse structurale sur le terrain a permis de mettre en évidence trois familles de fractures F1, F2 et F3 reliées respectivement à trois (3) phases de déformations D1, D2 et D3. La phase extensive D1, d'âge maastrichtien, est caractérisée par un allongement $N0^{\circ}$. Elle est associée à une subsidence généralisée concomitante à la transgression à *Libyceras* et *Laffiteina*. La deuxième phase compressive D2, datée du Paléocène, est marquée par un raccourcissement $N140^{\circ}$. La troisième phase compressive D3 à raccourcissement $N55^{\circ}$ d'âge Yprésien ainsi que la deuxième phase D2 ont été attribuées aux contre-coups de la collision Europe-Afrique.

Mots-clés : *bassin des Iullemeden, extraction de réseaux de fractures, approche rétrotectonique, analyse linéamentaire.*

Abstract

Extraction of fracture networks in sedimentary terrain by remote sensing techniques integrating statistical and structural analysis : case of meso-cenozoic formations in the Iullemeden basin, Central Niger

This study focusses on the analysis of the fracture networks affecting the meso-cenozoic formations of the southern part of the Iullemeden basin (central Niger). The aim of this study is to map and to conduct a statistical analysis of the fracture networks and to compare them with the field data. For this reason, the methodology implemented is based on the use of remote sensing techniques, microtectonics supported by retrotectonic approach. The lineamentary analysis carried out using Landsat 8 images covering the period from October 23, 2016 to March 18, 2017 has highlighted a dense network of 1025 lineaments across the study region. After

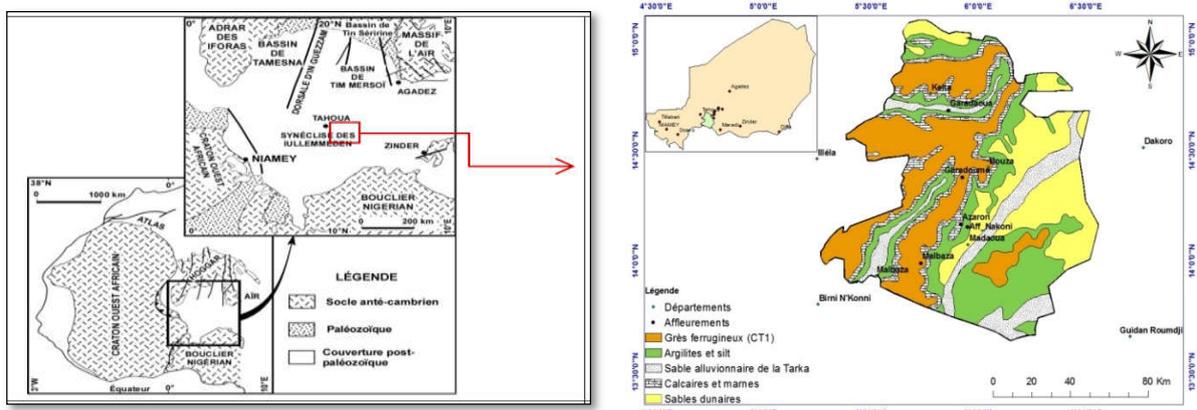
validation of the fracture networks map, two main fracture directions were identified : $N0^{\circ}$ - $N10^{\circ}$ and $N90^{\circ}$ - $N100^{\circ}$, in similar proportions of 11 % each. The distribution of orientations in cumulative lengths of these fractures gives respectively the proportions of 9 % and 6 %. These two main directions suggest that the fractures result from several fracturing phases. In the study area, the structural analysis revealed three populations of fractures F1, F2 and F3 respectively connected to three (3) phases of deformations D1, D2 and D3. The extensive phase D1, which is Maastrichtian in age, is characterized by a lengthening $N0^{\circ}$. It is associated with a generalized subsidence concomitant with *Libyceras* and *Laffiteina* transgression. The second compressive phase D2, attributed to the Paleocene, is marked by a $N140^{\circ}$ trending shortening corresponding to the repercussion of the Europe-Africa collision, as well as the third compressive phase D3 $N55^{\circ}$ of Ypresian age.

Keywords : *lullemmeden bassin, Extraction of fracture networks, retrotectonic approach, lineamentary analysis.*

1. Introduction

Le réseau de fractures d'une région donnée est formé de différentes familles de fractures qui s'entrecroisent. La caractérisation de ce réseau passe par un levé détaillé de la géométrie des fractures et par l'identification des familles dominantes et de leur orientation principale [8]. Dans les zones exposées, la caractérisation de ce système peut se faire par l'analyse des images Landsat ou des prises de vue photographique des structures observées sur le terrain. Au Niger, la majorité des travaux sur la fracturation ont été réalisés dans des zones de socle pour des études hydrogéologiques [2, 3, 5, 31, 35]. Récemment, des études sur la fracturation ont été réalisées dans le bassin de Tim Mersoï [4] et dans le bassin des lullemmeden [1]. Tout comme les précédentes, ces dernières études ont une portée hydrogéologique. Concernant notre zone d'étude qui est la partie sud de bassin des lullemmeden (région de Tahoua, centre-sud Niger), aucune étude sur la fracturation n'a été entreprise. Pour pallier ces insuffisances, une approche pluridisciplinaire intégrant les techniques de télédétection, de l'analyse structurale ainsi que de l'analyse sédimentologique des faciès, a été mise en œuvre. L'objectif de cette étude consiste à cartographier les linéaments de la partie sud du bassin des lullemmeden, à valider le réseau de fractures en utilisant les techniques de télédétection, à caler chronologiquement à partir des observations de terrain les fractures principales et à déterminer la succession dans le temps des principales phases de déformations.

1-1. Contexte géologique régional



A) Situation géographique de la partie sud de la synclise des lullemmeden [23]

B) Carte de la zone d'étude [13]

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude dans la synclise des lullemmeden

Le bassin des lullemeden est caractérisé par un remplissage essentiellement détritique, discordant sur le socle précambrien (**Figure 1**). La zone d'étude est située dans l'Ader Doutchi, qui correspond à vaste plateau gréseux d'environ 10.000 Km². La profondeur maximale du bassin est de l'ordre de 1000 m [33]. L'altitude régionale varie de 700 au Nord à 400 m au Sud. Le vaste plateau gréseux est entaillé par des profondes vallées : les Maggia [15]. La mise en évidence de nombreux repères paléontologiques et surfaces de discontinuité, permettent de conclure que le remplissage de ce bassin s'est réalisé en plusieurs cycles du Crétacé supérieur au Paléogène [12, 20].

La zone d'étude est marquée par trois épisodes de transgression Crétacé supérieur-Paléocène-Yprésien, pendant lesquelles se sont déposées des séries sédimentaires argileuses, gréseuses et calcaires [9, 10, 20] (**Figure 2**). Les trois épisodes de transgressions ayant affectées la région sont :

- La transgression à *Neolobites* et à *Nigericeras* du Cénomanién supérieur (**Figure 2, T1**) à Turonien inférieur (**Figure 2, T2**);
- La transgression à *Libycoceras* du Maastrichtien supérieur et sommital (**Figure 2, T3 et T4**);
- Et enfin celle du Paléocène-Yprésien (**Figure 5, T5**) [6, 12, 14, 20, 25].

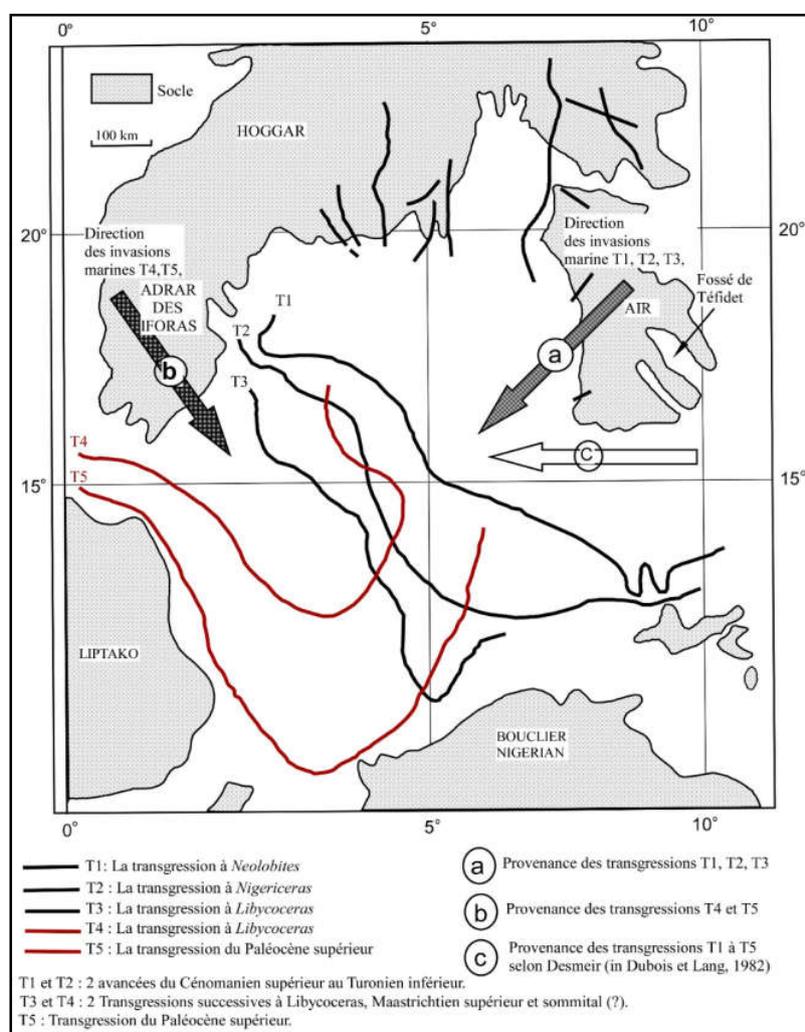


Figure 2 : Extension des transgressions marines du Crétacé supérieur au Tertiaire dans le bassin des lullemeden [12, 14, 19]

1-2. Lithostratigraphie de la zone d'étude

La colonne lithostratigraphique du bassin comporte cinq (5) formations [27, 32] :

- Trois (3) formations attribuées au Crétacé supérieur marquent la base de la colonne. Il s'agit des formations d'In Wagar, de Farin Doutchi, et d'Ibohman. Ces trois formations sont essentiellement détritiques terrigènes. Elles sont constituées de sables, de silts et d'argiles. Des bancs d'oolithes ferrugineux apparaissent sous forme de lentilles interstratifiées (*Figure 3*).
- La partie médiane de la colonne est représentée par la formation Paléocène-Yprésienne de Garadaoua, constituée de calcaires plus ou moins marneux, encadrés par des schistes papyracés.
- Le sommet de la colonne correspond à la formation de l'Ader Doutchi d'âge éocène moyen à supérieur [18, 22], riche en matériaux ferrugineux (grès, silts, ooides). Cette formation est désignée sous le terme Continental Terminal (CT1) de [14].

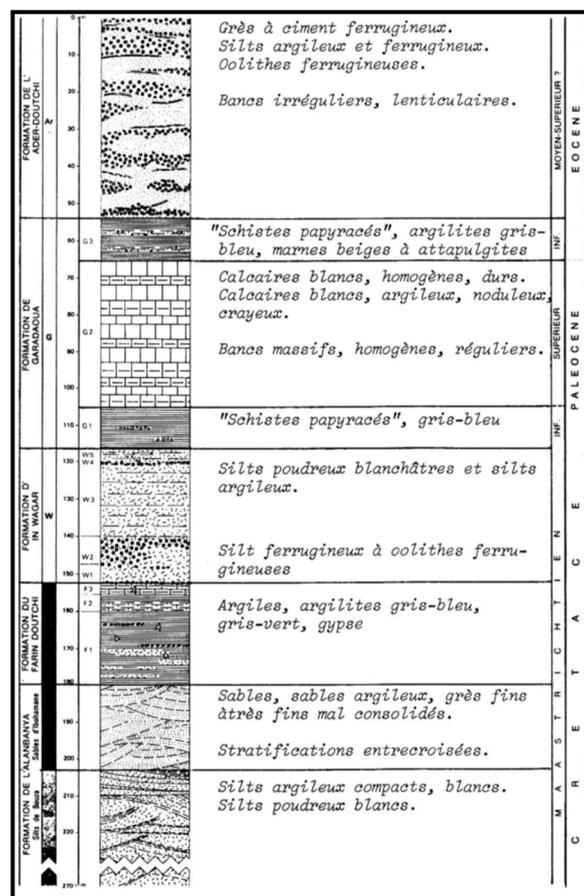


Figure 3 : Coupe lithostratigraphique de l'Ader Doutchi [27, 32]

2. Matériel et approche méthodologique

Deux méthodes sont habituellement utilisées pour l'extraction des linéaments :

- ❖ L'une automatique, basée sur un algorithme mathématique [24, 38] ;
- ❖ L'autre manuelle fondée sur l'observation visuelle par photo-interprétation [2, 21, 37, 41]. Cette extraction manuelle consiste à tracer les segments correspondant aux discontinuités et aux

variations des contrastes sur les images traitées. Ces discontinuités correspondent au réseau hydrographique, aux ruptures de pente et aux structures géologiques (fractures, schistosités, traces des bancs).

Dans ce travail, c'est la méthode manuelle qui a été utilisée. Elle comprend les quatre étapes suivantes :

- ✓ Le prétraitement et traitement des images satellites;
- ✓ L'extraction des linéaments à partir d'images traitées;
- ✓ La validation de la carte des linéaments obtenus ;
- ✓ La validation de la carte de fractures obtenues.

La mise en œuvre de l'ensemble des investigations est résumée par l'organigramme de la **Figure 4**.

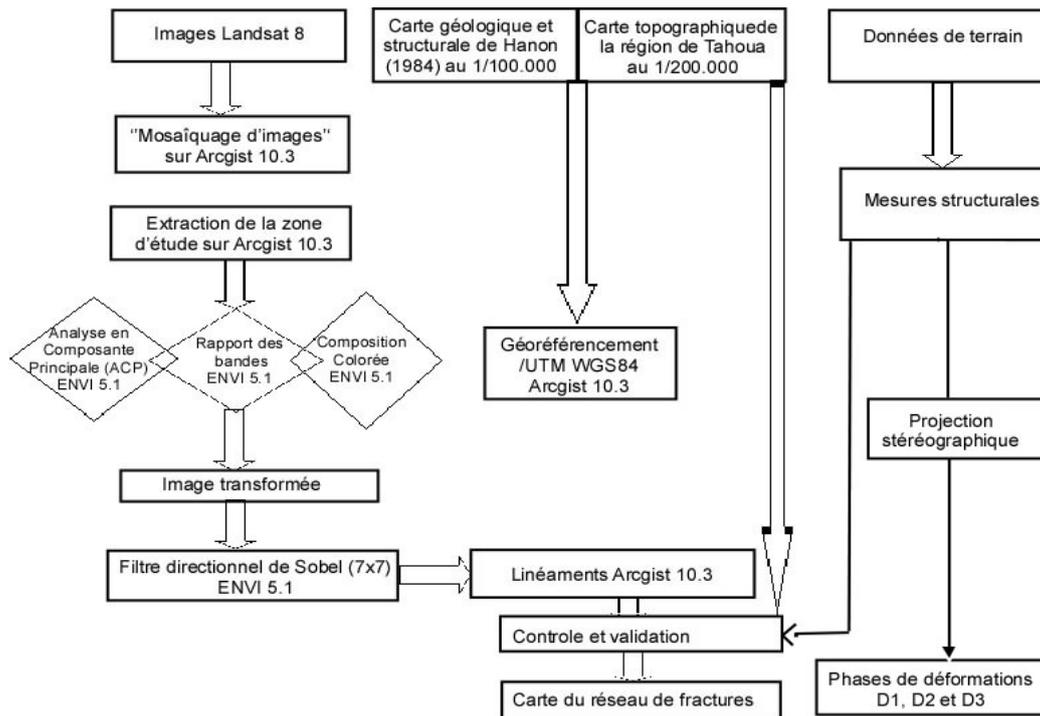


Figure 4 : Organigramme de l'approche méthodologique

3. Résultats et discussion

Les déformations observables dans la partie sud du bassin des Lullemeden ont été interprétées par [25] comme étant l'expression des rejeux d'accidents de socle. L'existence des structures de déformation cassantes (fractures et failles) et souples (plis) ou mixtes (flexures-failles) a été révélée pour la première fois par [25]. Il faut noter qu'aucune précision n'a été apportée concernant la succession chronologique des différents épisodes de déformation. La démarche mise en œuvre a abouti d'une part à la réalisation de la carte linéamentaire puis celle de réseau de fractures, et d'autre part au calage chronologique des épisodes de déformation ayant affecté la zone d'étude par l'application des méthodes de la rétrotectonique.

3-1. Assemblage d'images satellites "Mosaïcking" et délimitation "Extract" de la zone d'étude

Lorsque l'étendue de la zone à cartographier dépasse le champ d'une photographie aérienne ou d'une image de télédétection, il est nécessaire d'avoir recours au "mosaïquage" (opération d'assemblage automatique d'images satellites). Les images assemblées correspondent à des scènes dont la résolution est de 30m. Après

"mosaïquage" (*Figure 5, Image 3*), l'image résultante ayant une meilleure dynamique n'a pas fait l'objet d'opération de prétraitement (corrections radiométriques et géométriques). A partir de l'image mosaïquée nous avons extrait l'image correspondant à notre zone d'étude (*Figure 5, Image 4*).

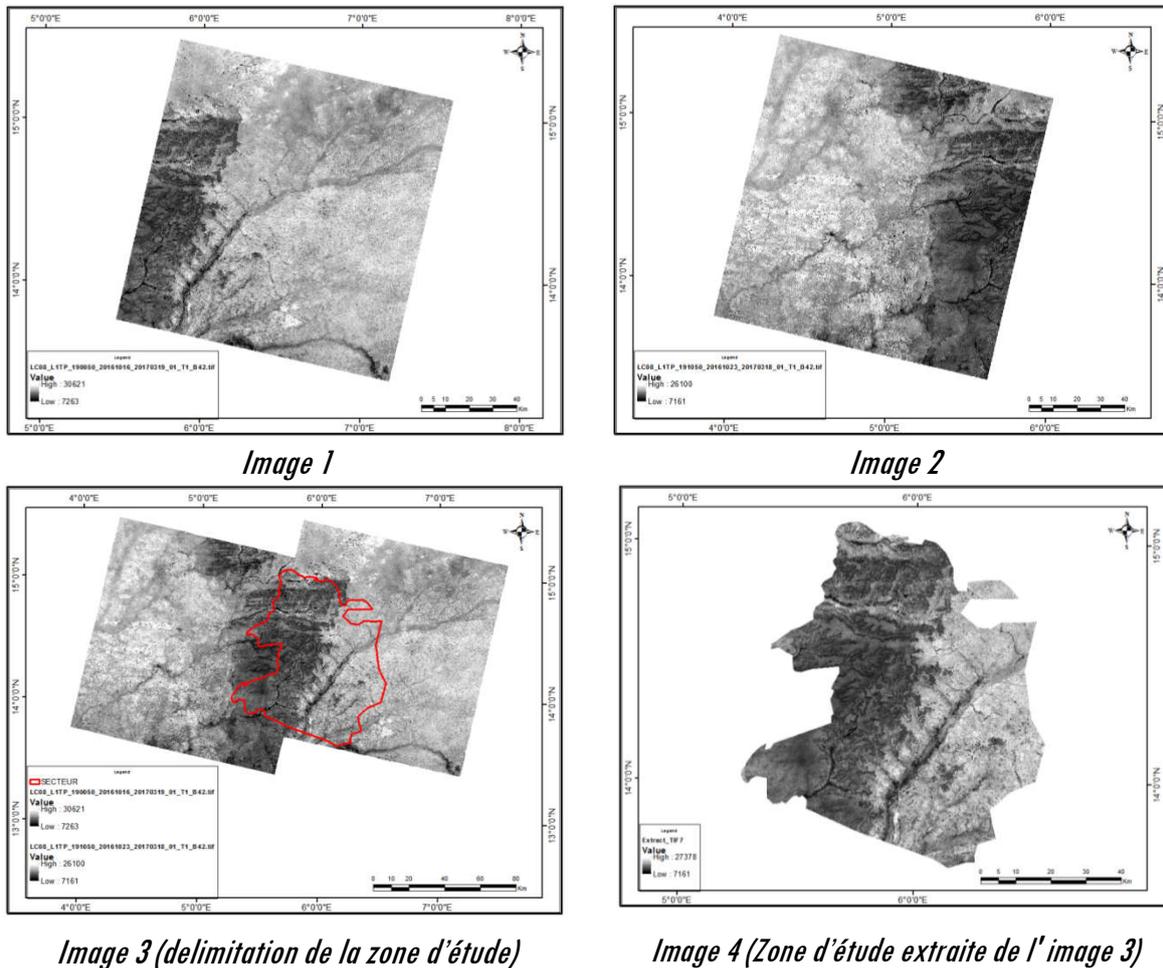


Figure 5 : Différentes étapes allant du mosaïquage à l'extraction de l'image de la zone d'étude

3-2. Cartographie des linéaments

La cartographie des structures linéamentaires a été réalisée manuellement. Un total de 1025 linéaments de différentes directions a été identifié. Ils représentent plusieurs objets de la surface terrestre : le réseau hydrographique, les lignes topographiques et diverses structures géologiques telles que les fractures et les failles (*Figure 6*).

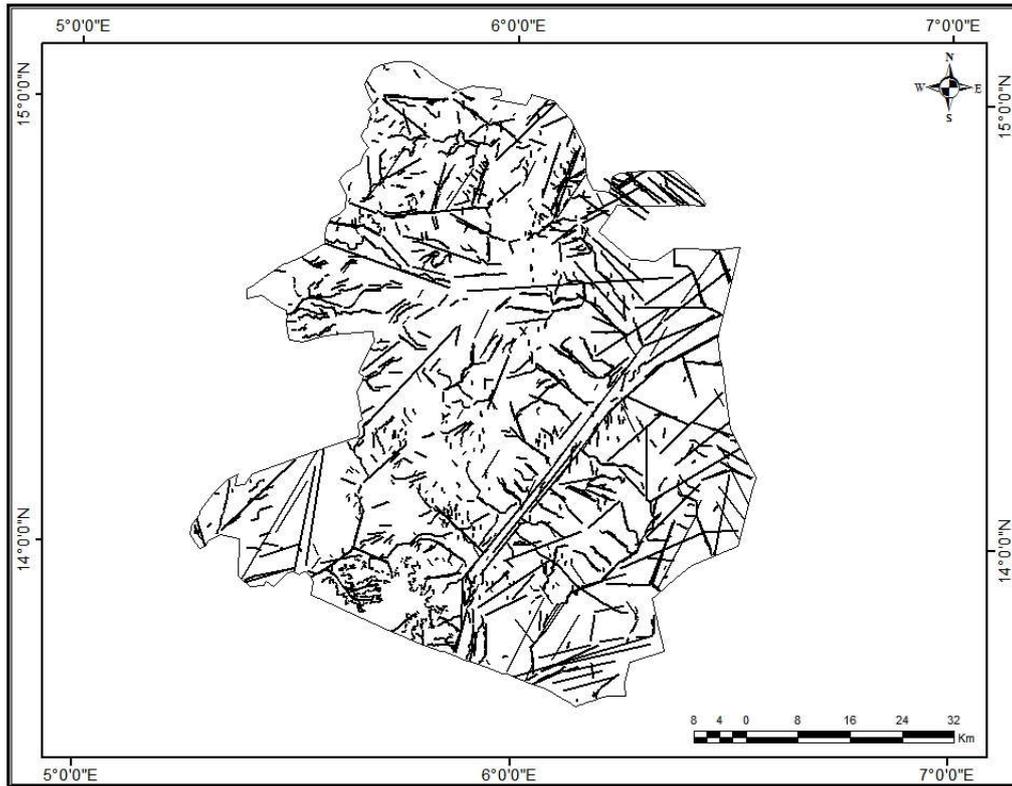
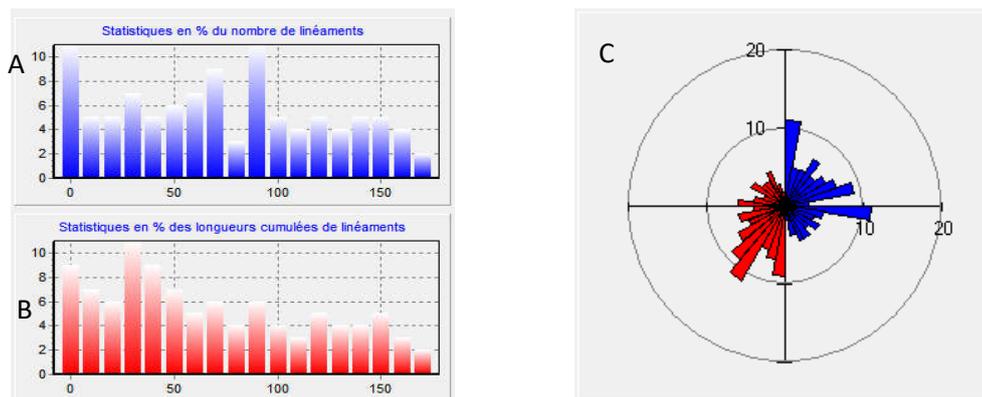


Figure 6 : Carte des linéaments obtenus à partir des images Landsat 8

La cartographie structurale nécessite l'usage des filtres directionnels tel que le filtre de Sobel (**Figure 4**). L'application de ce filtre à la bande 4 de Landsat 8 a permis d'obtenir les quatre directions linéamentaires suivantes: N-S, E-O, NE-SO et NO-SE. Les linéaments répertoriés dans ce travail ont été exprimés soit en nombre ou en longueur cumulée en fonction de leur distribution. Cette distribution a fait l'objet d'une analyse statistique sous forme de rosace directionnelle ou d'histogramme (**Figures 7**).



Histogramme directionnel des linéaments de la zone d'étude

Rosace directionnelle des linéaments de la zone d'étude

Figure 7 : Répartition des principales directions des linéaments de la zone d'étude

L'analyse de ces résultats obtenus a permis de réaliser des observations concernant le champ de fracturation global :

- ❖ En fonction des fréquences en nombre de linéaments (*Figures 7A et 7C*), Deux pics directionnels de linéaments ont été mis en évidence. Les plus remarquables sont observés pour les familles de directions $N0^{\circ}$ à $N10^{\circ}$ et $N90^{\circ}$ à $N100^{\circ}$ avec les proportions de 11 % chacune qui représentent les grandes directions.
- ❖ D'autres directions de moindre importance ou secondaires apparaissent également. Ce sont les directions $N30^{\circ}$ à $N40^{\circ}$, $N50^{\circ}$ à $N60^{\circ}$, $N60^{\circ}$ à $N70^{\circ}$, $N70^{\circ}$ à $N80^{\circ}$ avec des proportions allant de 6 à 9 %. Des directions accessoires correspondant à un plus large spectre présentant un pourcentage en nombre allant de 2 à 5 %.
- ❖ En fonction de l'orientation des linéaments en longueurs cumulées (*Figures 7B et 7C*), la même tendance apparaît. Trois familles de linéaments peuvent être distinguées. La première famille présente les directions $N0^{\circ}$ - $N10^{\circ}$, $N70^{\circ}$ - $N80^{\circ}$ et $N90^{\circ}$ - $N100^{\circ}$ avec un pourcentage de 7 à 11 %, la seconde famille comprenant les directions $N30^{\circ}$ - $N40^{\circ}$, $N50^{\circ}$ - $N60^{\circ}$ et $N60^{\circ}$ - $N70^{\circ}$ avec un pourcentage de 4 à 6 % et enfin la troisième famille présentant une diversité de directions avec un pourcentage de 2 à 3 %.

3-3. Extraction des fractures

L'extraction du réseau de fractures à partir de la carte linéamentaire est basée sur deux méthodes de validation essentielles : l'une à partir des travaux antérieurs et l'autre tributaire des données de terrain.

3-3-1. Validation des fractures à partir des travaux antérieurs

Au cours de cette étape de validation, la carte linéamentaire est superposée à la carte topographique de la région. Les linéaments ayant une origine autre que tectonique sont supprimés (objets ou structures d'origine anthropique). En accord avec [30] nous avons considéré que tout tracé rectiligne d'un cours d'eau correspond à une fracture. Nous avons constaté que la plupart des linéaments coïncident avec le réseau hydrographique (*Figure 8*). Deux directions de fractures ont été identifiées: NE-SO et NO-SE. Ces deux directions sont cohérentes avec les directions d'écoulement. Ce qui dénote la concordance entre le tracé du réseau hydrographique et celui des accidents. Cette observation a été mise en évidence dans plusieurs régions en zone de socle : dans le Liptako nigérien [5], dans la région de Zinder [36], dans le Massif de l'Air [2]. Cette concordance entre les fractures et le réseau hydrographique permet de valider la carte des fractures.

3-3-2. Validation des fractures à partir des observations de terrain

La carte linéamentaire (*Figure 7*) obtenue à partir de la compilation des données satellitaires (images Landsat), de la cartographie numérique (SIG) a été confrontée aux observations de terrain. Les linéaments qui coïncident avec les directions d'accidents mesurées sur le terrain sont considérés comme étant des fractures [28]. Un total de 635 fractures a été ainsi validé (*Figure 8*).

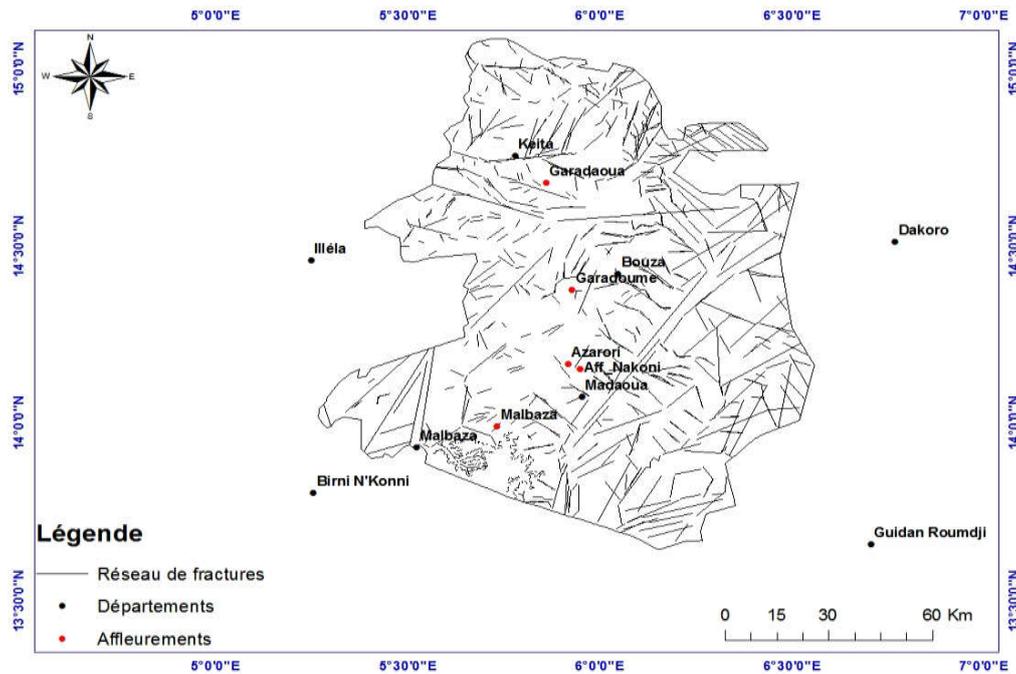


Figure 8 : Carte synthétique des fractures obtenues à partir de la carte linéamentaire

La carte de fractures élaborée à partir de la carte de linéaments montre que la fracturation s'organise selon trois directions principales: E-O, NO-SE et NE-SO. La direction globalement E-O correspond à des fractures de premières générations notées F1 (**Figure 10, A1**). Il s'agit des fractures d'orientation $N70^{\circ}$ à $N90^{\circ}$ qui affectent les terrains maastrichtiens dans le secteur de Nakoni (Figure 8). Selon [25], ces fractures proviendraient de la réactivation d'anciens accidents du socle. La direction NO-SE est représentée par des fractures ou des failles (F2) qui affectent les terrains maastrichtiens et paléocènes (**Figure 10, A1 et B1**). Ces fractures F2 se reconnaissent sur le terrain par leur disposition quasi-parallèle et leur pendage régulier entre 40° et 50° vers le sud-est. D'après la bibliographie le système de fracture NO-SE dans les dépôts maastrichtiens a été à la base de la compression fini-crétacée $N130^{\circ}$ [33]. Dans le fossé crétacé de Téfidet au Niger, le système de fractures NO-SE aurait une composante normale décrochante au Crétacé supérieur dans un double contexte lié d'une part à l'ouverture de l'Atlantique Sud [43 - 45, 50] et d'autre part à la collision Afrique-Europe [42, 45 - 49]. Dans notre secteur d'étude, le fait que ce système d'accident ait joué plutôt en normal au cours de cette même période maastrichtienne, montre que les effets de l'ouverture de l'Atlantique Sud auraient été plus enregistrés. La formation du système de fracture NE-SO, représenté par les fractures de la troisième génération F3 (**Figure 10, A1, B1 et C1**), pourrait être associé au même contexte précédemment évoqué, celui de la collision Afrique-Europe.

3-3-3. Analyse de la distribution directionnelle des fractures

La distribution des fractures peut être exprimée soit en nombre soit en longueurs cumulées, selon la distribution des directions principales de ces fractures. Sa représentation peut se faire sous forme de roses directionnelles (**Figure 9**). Cette distribution des directions principales a fait l'objet d'une analyse statistique qui a porté sur deux catégories de données :

- ❖ Le nombre de fractures suivant une direction donnée ;
- ❖ Le poids (longueur cumulée de fractures dans une direction donnée).

Cinq grandes familles ou systèmes de fractures appartenant aux trois directions principales cis mentionnées ont été distinguées :

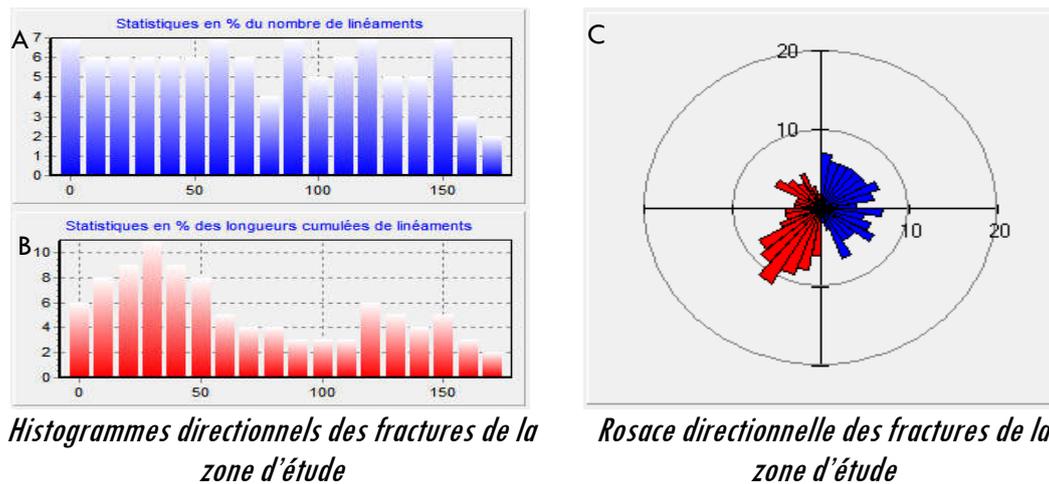


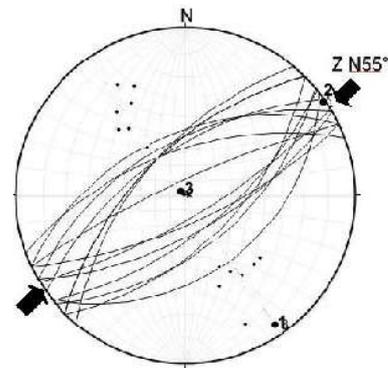
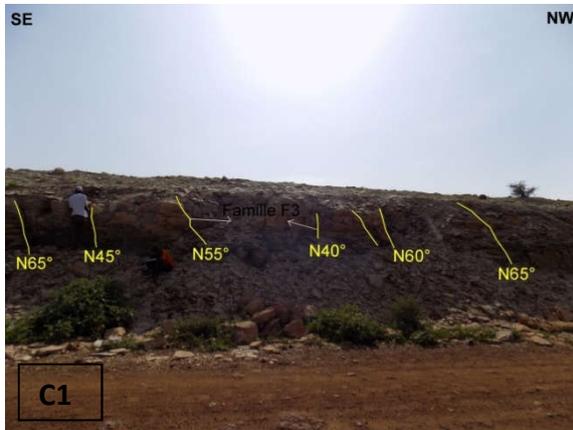
Figure 9 : Répartition des principales directions de la zone d'étude

- ❖ La famille de fractures subméridiennes $N0^{\circ}$ à $N10^{\circ}$, dont la direction principale est représentée par la faille d'Arlit, et les méga-cisaillements subméridiens [33, 40]. Certains de ces accidents subméridiens, comme le linéament $4^{\circ}50''$ traverse le bassin des Iullemeden sans affecter les séries tertiaires. Ce linéament majeur est relayé au sud par la faille de Kandi qui a joué en cisaillement senestre pendant la phase de compressive du Crétacé supérieur [33, 39]. Cette famille, représente 7 % du nombre total de fractures (**Figure 9**). Cependant, en pourcentage de longueur cumulée, cette famille ne représente que 6 %.
- ❖ Le système de fractures $N60^{\circ}$ - $N70^{\circ}$, correspondant au faisceau de Tin Adrar dans la partie Nord du bassin, représentent 7 % des fractures. Il correspond à des fractures moins prédominantes en longueur cumulée avec un pourcentage de 5 % (**Figure 9**).
- ❖ La famille $N90^{\circ}$ - $N100^{\circ}$ a un pourcentage de 7 % (**Figure 9**). Elle représente seulement 3 % des fractures en poids. Cette direction appartient aux quatre familles de fractures conjuguées deux à deux: $N60^{\circ}$ à 90° , $N110^{\circ}$ à $N140^{\circ}$ E, $N170^{\circ}$ E à $N0^{\circ}$ et $N10^{\circ}$ à $N30^{\circ}$ E mise en évidence par [7].
- ❖ La famille $N120^{\circ}$ - $N130^{\circ}$ a un pourcentage de 7 % en nombre de fractures et ne représente que 6 % en poids. La plupart de ces fractures correspondent à des décrochements dextres [4, 29].
- ❖ Le système de fractures $N150^{\circ}$ - $N160^{\circ}$ représente 7 % en nombre de fractures et 5 % en poids.

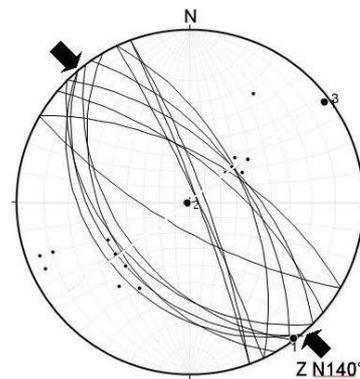
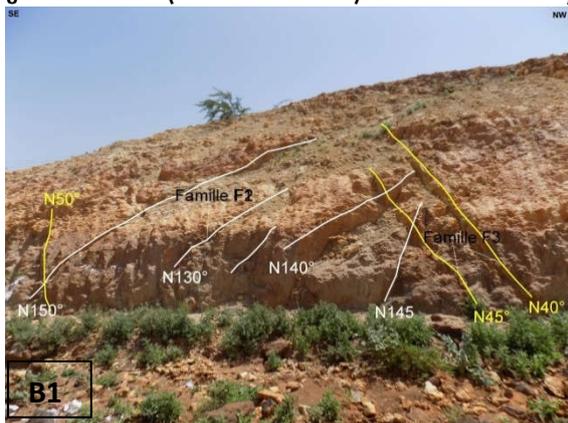
3-4. Calage chronologique des différentes familles de fractures

L'observation des relations géométriques (recouvrements) entre les fractures de différentes directions a permis d'établir une chronologie relative. Sur la base, d'une part des relations de recouvrements géométriques et, d'autre part l'application de la méthode dite de rétrotectonique, il a été possible de calibrer chronologiquement les épisodes de fracturation successifs. Ainsi, trois générations successives de fractures ont été distinguées (F1, F2 et F3). Dans la zone d'étude, lorsque l'on considère les trois formations affleurantes d'âge maastrichtien, paléocène et yprésien (**Figure 10**). Les terrains maastrichtiens, qui représentent qui sont les plus anciens, ont enregistré toutes les déformations cassantes affectant la zone d'étude (F1, F2 et F3), alors que les terrains paléocène n'ont enregistré que les déformations syn- et post-Paléocène (F2 et F3). Les formations yprésiennes plus récentes n'ont enregistré que le dernier épisode de fracturation (F3). La première génération de fracture F1 présente une direction comprise entre $N80^{\circ}$ à $N110^{\circ}$. Les fractures de seconde génération F2 ont une orientation comprise entre $N120^{\circ}$ et $N170^{\circ}$ tandis que la troisième génération F3 regroupe des fractures d'orientation $N40^{\circ}$ à $N70^{\circ}$. Les données de terrain ont été principalement collectées

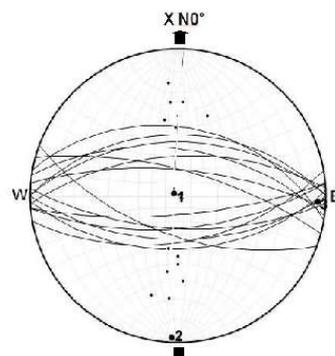
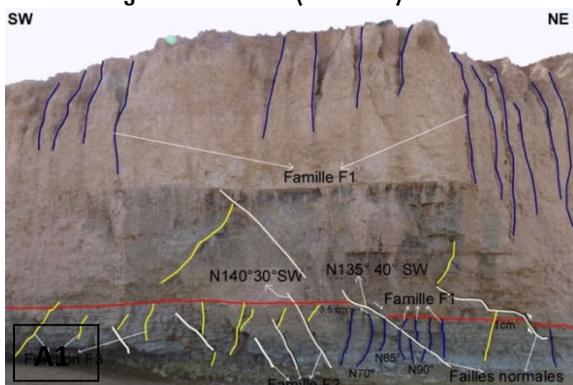
au niveau de trois sites retenus pour leur qualité d'affleurement et pour leur accessibilité. Près de 150 plans de microfractures, toutes catégories confondues, ont été mesurés. Pour chaque famille de fractures (F1, F2 et F3) les plans sélectionnés ont été ensuite projetés sur le diagramme stéréographique de Schmidt [34]. Cette approche a permis de déterminer la succession dans le temps des différentes phases ou épisodes d'extension et de raccourcissement.



Phase D3 : Compression NE-SW : exemple du site de Garadaoua (Yprésien). C1 : Fractures de troisième génération F3 (en affleurement). C2 : Direction moyenne de raccourcissement N55°



Phase D2 : Compression NW-SE : exemple du site de Garadaoua (Paléocène supérieur). B1 : Fractures de deuxième générations F2 (en blanc). B2 : Direction moyenne de raccourcissement N140°



Phase D1 : Extension N-S: exemple du site de Nakoni (Maastrichtien). A1 : Fractures de première génération F1(en maron). A2 : Direction moyenne d'extension N0°

Figure10 : Chronologie des principaux épisodes de déformations

3-5. Les phases tectoniques

Au Crétacé supérieur, le golfe mésogéen existant déjà à l'Est de l'Air pénètre dans le Niger occidental, d'où une série de cycle sédimentaires ou alternent des épisodes franchement marins (calcaires et marnes plus ou moins gréseuses à faunes mésogéennes de mers chaudes épicontinentales) et de dépôts subcontinentaux (argilites et grès riches en végétaux et en restes de vertébrés). Deux transgressions sont à l'origine de la mise en place des sédiments couvrant la zone d'étude. Il s'agit de la transgression à *Libycoceras* et *Laffiteina* du Maastrichtien supérieur [26] correspondant à la formation d'In Wagar (Upper sandstones and Mudstones ou Wurno formation) et la transgression à *Ranikothalia* et *Lockhartia* du Paléocène-Yprésien correspondant à la formation de Garadaoua avec la série argileuse inférieure (Danje formation), la série calcaire à *Linthia sudanensis* (Kalambajna formation) et la série argileuse supérieure à attapulgitite (Gamba formation) [26]. Trois phases de déformation notées D1, D2 et D3 ont été déterminées dans les trois formations méso-cénozoïques étudiées. La phase D1, d'âge maastrichtien, est à l'origine de la mise en place de la première génération de fractures F1. La phase D2 est responsable de la deuxième génération de fractures F2 d'âge paléocène et la phase D3 associée à la troisième génération de fractures F3 d'âge yprésien.

3-5-1. Phase de déformation Maastrichtienne (D1)

Les principales structures tectoniques rencontrées dans la zone d'étude sont des fractures (F1) et des joints de cisaillements (F2) (**Figure 10, A1 et A2**). Les dépôts maastrichtiens sont fortement affectés par des fractures F1 conjuguées subverticales d'orientation $N80^{\circ}$ à $N110^{\circ}$ reliées à la déformation D1 extensive N-S. Du point de vu paléogéographique, ces dépôts ont été reliés à la transgression à *Libycoceras* et *Laffiteina* du Maastrichtien supérieur et sommital. Selon [40], cette transgression a envahi une partie du continent ouest-africain du Maastrichtien à l'éocène inférieur et moyen. Dans le contexte structural régional, en accord avec [40], on peut relier cette phase d'extension à des rejeux distensifs, en liaison avec l'ouverture de l'Atlantique central.

3-5-2. Phase de déformation Paléocène (D2)

La phase distensive maastrichtienne est suivie d'une phase compressive Paléocène. Cette phase affecte les formations argilo-calcaire déposées par les transgressions maastrichtienne et paléocène-Yprésienne [26]. Elle est associée à la formation de joints de cisaillement à composante inverse (F2) ayant les orientations et les pendages suivants: ($N140^{\circ}, 30^{\circ}SW$), ($N135^{\circ}, 40^{\circ}SW$) et ($N135^{\circ}, 37^{\circ}SW$). Ces joints s'observent surtout dans les dépôts maastrichtiens. Dans les dépôts calcaires d'âge paléocène, la famille F2 est surtout représentée par des fractures. La direction moyenne de compression Z de cette phase D2 est $N140^{\circ}$ (**Figure 10, A1 et A2**). Cette direction de raccourcissement ($N140^{\circ}$) est comparable à la phase de compression fini-crétacé $N130^{\circ}$ mise en évidence par [33] dans le bassin de Tim Mersoï. Dans le bassin de Taoudeni, par contre la direction de raccourcissement $N140^{\circ}$ a été attribuée à un épisode tectonique intra-éocène [40]. Dans le bassin des lullemeden cet épisode tectonique intra-éocène est très discret [40].

3-5-3. Phase de déformation yprésienne (D3)

La phase D3 a été identifiée dans les dépôts marneux d'âges yprésien appartenant à la transgression paléocène-yprésienne. Dans les dépôts paléocènes et maastrichtiens sous-jacents, les fractures de la famille F3 recoupent celles des familles F1 et F2 (**Figure 10, C1 et C2**). La phase D3 est également marquée par une déformation compressive avec une direction moyenne de raccourcissement $N55^{\circ}$. Cette déformation compressive est comparable à celle de direction de raccourcissement $N30^{\circ}$ mise en évidence par [40] dans la région de Nema-Nara au Mali (bassin de Taoudeni). En effet, dans cette région il a trouvé deux directions de raccourcissement suborthogonales: l'une plus ancienne $N140^{\circ}$ (présumée Paléocène) et l'autre plus récente $N30^{\circ}$ vraisemblablement yprésienne.

4. Conclusion

L'analyse structurale des formations d'âge crétacé à éocène de la région de Tahoua met en évidence trois phases tectoniques D1, D2 et D3. L'approche rétrotectonique a permis de calibrer chronologiquement ces trois phases tectoniques. La première phase extensive maastrichtienne, caractérisée par un allongement $N0^\circ$, est associée à une subsidence généralisée concomitante de la transgression majeure à *Libycoceras et Laffiteina*. La seconde phase paléocène à raccourcissement $N140^\circ$, comme la troisième phase de compression yprésienne $N55^\circ$, correspond aux contre-coups de la collision Europe-Afrique, tout.

Référence

- [1] - A. I. ABDOU, M. KONATE, B. OUSMANE, Lineamentary and Structural Cartography of Iullemeden Bassin in the Dosso Region (South-West of Niger). *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Vol 7. (2018) 9 p.
- [2] - A. ILLIAS, Apport des images ETM+ et du modèle numérique de terrain (MNT) à la cartographie des fractures en région montagneuse : secteur de Timia (Massif de l'Air, Nord du Niger). *European Scientific Journal*/Vol.14, No.9 ISSN: 1857 - 7881, (2018) 19 p.
- [3] - A. M. S BABAYE, Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). Thèse de Doct., Univ. Liège, (2012) 244 p.
- [4] - B. ABDOU BOKO, Influence du système de drainage sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin de Tim Mersoï, Nord Niger. *Afrique science* 13(4) (2017) 261 - 274
- [5] - B. OUSMANE, Étude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi, Zinder-Est). Thèse Univ. Niamey, (1988) 175 p.
- [6] - C. KILIAN, Des principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. géol. Fr., 109-111(1931)
- [7] - C. VALSARDIEU, Etude géologique et paléogéographique du Bassin de Tim Mersoï : Région d'Agadès (République du Niger). Thèse Université de Nice, (1971) 514 pages
- [8] - D. KIRKWOOD, Analyse structurale de terrain polyphasé, GLG-10341, (2006)
- [9] - G. MILLOT, Géologie des argiles, Masson et Cie éd., (1964) 499 p.
- [10] - H. ERHART, "Biostasie" et "Rhexistasie". Esquisse d'une théorie sur le rôle de la pédogenèse en tant que phénomène géologique. C.R. Acad. Sc. Paris, FR., 241, (1955) pp 1218 - 1220
- [11] - H. RADIER, Contribution à l'étude géologique du Soudan oriental (A.O.F.). Bulletin du service géologique et de prospection minière, n°26, Dakar, 1959 (1957)
- [12] - I. MIKO, Dynamique sédimentaire des formations détritiques et ligneuses du continental terminal dans les Bassin des Iullemeden (Niger). Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université de Niamey et de Dijon, (1999) 328 p.
- [13] - J. GREIGERT et R. POUUNET, Essai de description des formations géologiques de la république du Niger. Publication Direction des Mines et de la Géologie, Niger, n°3, (1967) 273 p.
- [14] - J. GREIGERT, Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). BRGM ed., Paris, France, (1966a) 229 p.
- [15] - J. GREIGERT et G. MARTIN, Etude pour le développement de socles hydrogéologiques de l'Ouest nigérien. Troisième campagne. Implantation de puits par sondages à la tarière mécanique et par géophysique. Rapport BRGM 77, (1977) 143 p.
- [16] - J. GREIGERT, Introduction à la connaissance hydrogéologique du Niger: deuxième partie, Structure des dépôts crétacés et tertiaires du bassin occidental du Niger. Dakar, Sénégal, (1957)

- [17] - J. GREIGERT et R. POUQUET, Carte géologique de la République du Niger au 1: 2 000 BRGM ed. Paris, France (1965)
- [18] - J. LANG, C. KOGBE, S. ALIDOU, K. ALZOUMA, O. DUBOIS, A. HOUËSSOU, J. TRICHET, sidérolithique du Tertiaire ouest-africain et le concept de Continental terminal. *Bull. Soc. géol. France*, t. II, n°4, (1986) p. 605 - 622
- [19] - J. LANG et C. KOGBE, Upper Cretaceous and Paleogene marine fluctuations in the sub-Saharan intracratonic lullemeden basin. *Africa Geoscience Review*, 1 (2/3), (1994) 1 - 5
- [20] - K. ALZOUMA, Etude pétrologie de la série sédimentaire tertiaire du bassin de Malbaza (Niger). Thèse spécialité. Univ. Orléans-Niamey, (1982) 159 p.
- [21] - K. F. KOUAME, M. J. PENVEN, B. H. KOUADIO, M. H. SALEY, & C. C. GRONAYES, Contribution des images d'aster de terra et D'un modèle numérique d'altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, vol. 6, n°2, (2006) pp 103 - 121
- [22] - L. BOUDOURESQUE, D. DUBOIS, J. LANG & J. TRICHET, 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 soc géol Fr.* (7)24, (1982) pp 685 - 695
- [23] - L. I. WRIGHT, M. BRANCHET et I. ALISSO, Notice explicative de la carte géologique du bassin houillier d'Anou Araren / Solomi. Ministère des Mines et de l'Énergie, Niger, (1993) 20 pages
- [24] - L. Q. HUNG, O. BATELAAN, F. SMEDT, Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study : Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology* Edited by Manfred Ehlers, Ulrich Michel, Proc. of SPIE Vol., (2005) pp 5983- 59830
- [25] - M. DIKOUMA, Fluctuations du niveau marin au Maastrichtien et au paléocène dans le bassin intracratonique des lullemeden (Ader-Doutchi, Niger). Thèse Doctorat. Univ. Dijon-Niamey, (1990) p 272
- [26] - M. DIKOUMA, J. LANG AND A. PASCAL, Transgressions Maastrichtiennes et paléogènes dans le bassin des lullemeden (Niger). Centre des sciences de la Terre et URA CNRS 157, 6 Bd. Gabriel, F-21000 Dijon, France, (1993) pp 105 - 124
- [27] - M. HANON, Cartes géologiques au 1/100.000 de l'Ader Doutchi (26 feuilles). *Niamey, Rép. du Niger, Min. des Mines* (1984) 26 p.
- [28] - M. RAZACK, Application de méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse Doct. Es Sci. ; Univ. Languedoc, (1984) 384 p.
- [29] - O. GERBEAUD, Evolution Structurale du Bassin de Tim Mersoï : Déformations de la couverture sédimentaire, Relations avec la Localisation des gisements uranifères du secteur d'Arlit. Thèse Université de Paris Sud, (2006) 261 p.
- [30] - P. GIOAN, 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, (1985) pp 299 - 310
- [31] - P. GIRARD, Techniques isotopiques (¹⁵N, ¹⁸O) appliquées à l'étude des Nappes des altérites et du socle fracturé de l'ouest africain. Étude de cas: l'Ouest du Niger. Thèse univ. Québec à Montréal, (1993) 141 p.
- [32] - P. SCHOENEICH & I. BOUZOU, Glissement de terrain dans l'Ader Doutchi (Niger). *Wurzb. Geogr. Arb.* (1988) pp 149 - 165
- [33] - R. GUIRAUD, O. BOUREÏMA et J. P. ROBERT, Mise en évidence de déformations traduisant un raccourcissement dans le Mésozoïque de la périphérie de l'Aïr (Niger). *Comptes-Rendus Académie des Sciences*, Paris, t. 292, série II, (1981) p 753 - 756
- [34] - R. ALLMENDINGER, Stereonet10, version 10.0. <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html> (2017)
- [35] - S. CORGNE, R. MAGAGI, M. YERGEAU & D. SYLLA, An integrated approach to hydro-geological lineament mapping of a semiarid region of West Africa using Radarsat-1 and GIS. *Remote Sensing of Environment*, (2010) pp 1863 - 1875

- [36] - S. KARIMOUNE, A. OZER, M. ERPICUM, Les modèles éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. Ed. AUPELF-UREF, (1990) pp 145- 161
- [37] - T. A. M. YOUAN, T. LASM, J. P. JOURDA, K. F. KOUAME & M. RAZACK, Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Revue télédétection*, vol.8, n°2, (2008) pp 119 - 135
- [38] - T. R. GHAZI, Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS. *International journal of enhanced research in science technology & engineering*. vol. 2 issue 2, feb. ISSN NO: (2013) pp 2319 - 7463
- [39] - Y. J. C. BELLION, Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudeni, lullemeden, Tchad). *Publ. CIFEG*, (1989) 302 p.
- [40] - Y. J. C. BELLION, Histoire Géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, lullemeden, Tchad). Thèse d'état Es Science Univ. Avignon et des Pays de Vaucluse, (1987) 296 p.
- [41] - Y. KOUSSOUBE, Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas fond de Bidi (province du Yatenga). Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Univ. Cheikh Anta Diop, (1996) 210 p.
- [42] - M. KONATE, Y. AHMED et M. HAROUNA, Structural evolution of the Tefidet trough (East Air, Niger) in relation with the WestAfrican Cretaceous and Paleogene rifting and compression episodes, *Comptes rendus - Geoscience* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.11.009>
- [43] - M. GUIRAUD, Mécanisme de formation du bassin sur décrochements multiples de la Haute-Benoué (Nigeria) : faciès et géométrie des corps sédimentaires, microtectonique et déformations synsedimentaires. HDR Thesis. USTL, Montpellier, France, (1990) 444 p.
- [44] - R. GUIRAUD, J. C. MAURIN, Early Cretaceous rifts of West and Central Africa : an overview. *Tectonophysics* 213, (1992)153e168
- [45] - Y. L. AHMED, M. KONATE, M. HAROUNA, Tectono-magmatic reactivation of Tefidet Cretaceous trough during Cenozoic (Air, Niger). *Bull. Soc. geol. France* 187 (2), 3e10 (2016)
- [46] - J. P. LIEGEOIS, A. BENHALLOU, A. AZZOUNI-SEKKAL, R. YAHIAOUI, B. BONIN, The Hoggar swell and volcanism : reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. In: Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C., Anderson, D.L. (Eds.), *Plates, Plumes and Paradigms*, vol. 388. Geological Society of America Special Paper, (2005) pp. 379e400
- [47] - M. WILSON, R. GUIRAUD, Magmatism and rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to recent times. *Tectonophysics* 213 (1992), 203e225
- [48] - P. A. ZIEGLER, Geological Atlas of Western and Central Europe. *Geology of the USSR*, second ed. Shell International Petroleum Maatschappij, The Hague Netherlands. (1990) 239 p.
- [49] - R. GUIRAUD, Y. BELLION, J. BENKHELIL, C. MOREAU. Post-Hercynian tectonics in Northern and Western Africa. *Geol. J.* 22 (1987), 433e466
- [50] - J. YE, D. CHARDON, D. ROUBY, F. GUILLOCHEAU, M. DALL'ASTA, J.-N. FERRY and O. BROUCKE, Paleogeographic and structural evolution of northwestern Africa and its Atlantic margins since the early Mesozoic : *Geosphere*, vol. 13, no 4, (2017). doi:10.1130/GES01426.1