

AGES

*Appui à la Gestion des Eaux Souterraines dans le
Bassin du Niger*

Carte Géologique
de la région transfrontalière du
Benin, du Niger et du Nigeria

Bassins sédimentaires:
Iullemeden Sud,
Kandi, et Sokoto

Rapport Technique N°5

Hanovre, 2019



Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN)

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe


german
cooperation
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Auteurs : Matthias Heckmann en collaboration avec Kolja Bosch, Moussa Konaté, Adiss Kamal Issifou Fatiou, Ibrahim Aboud Ali et Stefan Broda.

Commandée par : Le Ministère Fédéral de la Coopération Economique et du Développement (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ)

Projet : Appui à la Gestion des Eaux Souterraines dans le Bassin du Niger

BMZ-No.: 2013.2465.6
BGR-No.: 05-2373

Date : Mai 2019

Table des Matières

Table des Matières.....	I
Figures	IV
Tableaux	V
Sigles et abréviations	VI
Résumé.....	1
1 Introduction.....	3
1.1 La coopération technique	3
1.2 Motivation.....	3
1.3 Zone d'étude	4
2 Méthodologie	9
2.1 Harmonisation thématique (légende générale).....	9
2.2 Harmonisation géométrique.....	10
2.3 Carte multi-échelles	10
3 Les cartes géologiques de la zone d'étude	11
3.1 Aperçu.....	11
3.2 Niger.....	12
3.2.1 Greigert (1960) : <i>Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso, 1/500 000</i>	12
3.2.2 Greigert & Pognet (1966) : <i>République du Niger, Carte Géologique</i>	12
3.3 Nigeria.....	14
3.3.1 Nigerian Geological Survey Agency (2011a/c): Geological and Mineral Resources Map series 1/500 000 & Geological Map of Nigeria, 1/1 000 000.....	14
3.3.2 D.O.S. (1965-66): Geological Survey of Nigeria map series 1/250 000	16
3.3.3 Jones (1940): Geological Map of the Sokoto Province	16
3.4 Benin	18
3.4.1 Istituto Ricerche Breda (1989): Carte Géologique. Feuilles : Karimama, Porga, Kandi, et Malanville, 1/200 000, Project F.E.D.....	18
3.4.2 Technoexport (1995) : Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa	19
3.4.3 Konaté (1996): Carte Géologique Générale du Bassin Paléozoïque de Kandi	20
4 Légende générale.....	23
4.1 Le cadre chronostratigraphique.....	23
4.2 Attribution lithologique	27
4.3 Attributs géologiques.....	30
4.3.1 Consolidation/Cimentation.....	30
4.3.2 Fracturation	30
4.3.3 Porosité	31
5 Harmonisation de la carte géologique transfrontalière.....	33
5.1 Prétraitement.....	33
5.1.1 Numérisation	33
5.1.2 Systèmes de coordonnées géographiques	33
5.1.3 Ajustement spatial	33
5.2 Couches de revêtement	35
5.2.1 Couches de revêtement éoliennes quaternaires	35
5.2.2 Vestiges du Continental Terminal	35
5.2.3 Plateaux ferrugineux.....	35
5.3 Géologie solide.....	36
5.3.1 Dépôts alluviaux quaternaires	36

5.3.2	Continental Terminal	38
5.3.3	Groupe Sokoto	41
5.3.4	Continental Hamadien	42
5.3.5	Groupe paléozoïque de Kandi	51
5.3.6	Unités de socle	53
6	Jeu de données accessoires	57
6.1	Structures tectoniques	57
6.2	Ressources minérales	58
6.3	Direction et pendage	58
6.4	Sites fossilifères	61
6.5	Coupes transversales	61
7	Conclusions	67
7.1	Remarques d'ordre général	67
7.2	Déficits et questions non résolues	67
7.2.1	Limites des cartes entre Bénin-Nigéria	67
7.2.2	Qualité des jeux de données disponibles	68
7.2.3	Complexe de base du Continental Terminal vs Continental Hamadien	68
7.2.4	Transition Formation d'Illo—Grès de Nupe	69
7.2.5	Complexe de socle	69
8	Références	71
9	Jeux de données numérisés	75
	Appendix	77
	Géologie du sud du Bassin de l'Iullemeden	79
	Bassin mésozoïque et paléozoïque de Kandi	79
	La Formation de Wéré (Ouéré)	80
	Formation de Kandi	82
	Chronostratigraphie révisée	84
	Continental Intercalaire/Continental Hamadien	84
	Formation de Gundumi	86
	Formation d'Illo	87
	Grès de Nupe	87
	Formation de Sendé (Benin)	88
	Transgression marine du Crétacé Supérieur-Paléocène	89
	Groupe Rima	89
	Groupe Sokoto (Paléocène-Eocène)	90
	Continental Terminal	91
	Continental Terminal I (CT1) : Série Sidérolithique de l'Adar Doutchi	92
	Continental Terminal II (CT2) : Série argilo-sableuse à lignites	93
	Continental Terminal III (CT3) : Les Grès Argileux du Moyen Niger	94
	Complexe de base du Continental Terminal	94
	Continental Terminal au Nigeria : la Formation de Gwandu	95
	Autres cartes de la zone d'étude	97
	Carte Géologique de Reconnaissance 1/500.000 (Pouget 1957)	97
	Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000 (Machens 1966)	97
	Carte Hydrogéologique: Bassin sédimentaire de Kandi, 1/200.000 (Achidi et al. 2012)	97
	Légende Générale	101
	Classification lithologique de l'IHME1500	107

Coupes transversales	115
Application dans QGIS.....	135
Préparation : Topologie (SIG).....	135
Harmonisation Spatiale (SIG)	136
Union de cartes	136
Adaptation manuelle des caractéristiques	136
Harmonisation thématique (Excel, SIG)	137
Légende générale (travail de tableau, par exemple Excel)	137
Joindre la légende générale	137
Harmonisation des couches vectorielles avec des champs identiques.....	138
Jeux de données.....	139
Carte Géologique	139
Données supplémentaires	139
Données topographiques.....	139
Styles QGIS	140

Figures

Fig. 1 :	Pays membres de l'Autorité du Bassin du Niger (ABN).....	4
Fig. 2 :	Zone d'étude et région transfrontalière du Bénin, du Niger et du Nigeria.....	5
Fig. 3 :	Processus d'harmonisation.....	9
Fig. 4 :	La Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso, 1/500 000 (Greigert 1960).....	13
Fig. 5 :	La Carte Géologique de la République du Niger, 1/2 000 000 (Greigert & Pougnet 1966).....	13
Fig. 6 :	Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, Nigeria, 1/500 000 (NGSA 2011a).....	15
Fig. 7 :	Geological Map of Nigeria, 1/1 000 000 (NGSA 2011c).....	15
Fig. 8 :	Série des cartes de la Geological Survey of Nigeria, 1/250.000, Feuille 6, Birnin Kebbi.....	17
Fig. 9 :	Geological Map of the Sokoto Province (Jones 1940).....	17
Fig. 10 :	Carte Géologique—Feuille Malanville, Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c).....	19
Fig. 11 :	Carte de Géologie et des Minéraux utiles, Dunkassa, 1:200 000 (TECHNOEXPORT 1995a).....	21
Fig. 12 :	Carte géologique du bassin paléozoïque de Kandi, 1:400 000, (Konaté 1996).....	22
Fig. 13 :	Niveaux d'agrégation lithologiques, classification lithologique de l'IHME1500 (Duscher et al. 2015).....	29
Fig. 14 :	Ajustement manuel des dépôts alluviaux.....	37
Fig. 15 :	Harmonisation du Continental Terminal 1 & du Complexe de base le long du fleuve Niger.....	40
Fig. 16 :	Coupes transversales NO-SE à travers le bassin de Sokoto (JICA 1990; Fig. 8).....	45
Fig. 17 :	Harmonisation de contenus géométriques et thématiques divergents.....	47
Fig. 18 :	Harmonisation du Bassin de Kandi et de la région frontalière Bénin-Nigeria.....	49
Fig. 19 :	Les jeux de données sur les linéaments montrent des différences dans la densité des linéaments... ..	60
Fig. 20 :	Sites fossilifères et sites fossilifères à l'état de traces.....	62
Fig. 21 :	Informations sur la présence des minéraux et direction & pendage.....	63
Fig. 22 :	Coupes transversales géologiques compilées à partir de différentes sources.....	65
Fig. 23 :	Étendue maximale de l'inlandsis de l'Ordovicien tardif (Konaté et al. 2006).....	79
Fig. 24 :	Dépôt syntectonique de la Formation de Wéré (from Konaté et al. 2003a).....	80
Fig. 25 :	Réactivation postglaciaire de la faille normale de Kandi (Konaté et al. 2006).....	81
Fig. 26 :	Lithostratigraphie de la série sédimentaire paléozoïque du Bassin de Kandi (Konaté et al. 2003a).....	83
Fig. 27 :	Trace fossiles de la formation de Kandi et sa classification chronostratigraphique.....	85
Fig. 28 :	Sites fossilifères cartographiés par Alidou (1987) et Konaté et al (2003a).....	85
Fig. 29 :	Faciés de la Formation Sendé.....	88
Fig. 30 :	Coupes stratigraphique nord-sud le long du Dallol Maouri (FAO 1970).....	92
Fig. 31 :	Continental Terminal 1 & 2: Variation de l'épaisseur le long du Dallol Maouri (FAO 1970).....	93
Fig. 32 :	Coupe du Continental Terminal et Hamadien entre le Dallol Maouri et Gaya (FAO 1970).....	96
Fig. 33 :	Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 500.000 (Pougnet 1957b).....	98
Fig. 34 :	Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000 (Machens 1966).....	99
Fig. 35 :	Carte Hydrogéologique : Bassin sédimentaire de Kandi à l'echelle 1/200.000 (Achidi et al. 2012).....	100
Fig. 36 :	Coupe transversale du Bassin de Kandi Nord (Istituto ricerche Breda & OBEMINES 1989).....	117
Fig. 37 :	Coupe transversale géophysique interprétée du Bassin de Kandi (Bouزيد 1971).....	119
Fig. 38 :	Coupe transversale du Bassin de Kandi Sud, Feuille Dunkassa (Technoexport 1995b).....	121
Fig. 39 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto, Feuille Tangaza (D.O.S. 1966a).....	123
Fig. 40 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto, Feuille Sokoto (D.O.S. 1965a).....	123
Fig. 41 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto, Feuille Shinkafe (D.O.S. 1965b).....	123
Fig. 42 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto, Feuille Birnin Kebbi (D.O.S. 1965c).....	125
Fig. 43 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto, Feuille Gummi (D.O.S. 1966b).....	125
Fig. 44 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto de Anderson & Ogilbee (1973).....	127
Fig. 45 :	Coupe transversale du Bassin de Sokoto (JICA 1990).....	129
Fig. 46 :	Coupes transversales le long du Dallol Maouri, Planche 2 (FAO 1970).....	131
Fig. 47 :	Coupes transversales le long du Dallol Maouri, Planche 3 (FAO 1970).....	133

Tableaux

Tab. 1 :	Cartes géologiques de la zone d'étude.....	11
Tab. 2 :	Aperçu stratigraphique.....	24
Tab. 3 :	Extrait de la légende générale : Agrégation du Continental Hamadien.....	25
Tab. 4 :	Extrait de la légende générale : Agrégation des formations Paléozoïques du Bassin de Kandi.....	26
Tab. 5 :	Aperçu stratigraphique élaboré à l'occasion d'un atelier de l'AIEA (Cotonou, 2014).....	27
Tab. 6 :	Niveaux d'agrégation lithologique de l'IHME1500.....	28
Tab. 7 :	Systèmes de coordonnées géographiques attribués à des cartes géologiques géoréférencées.....	34
Tab. 8 :	Extrait de la légende générale : Agrégation de l'unité : Granites (non différenciés).....	54
Tab. 9 :	Jeux de données accessoires.....	59
Tab. 10 :	Coupes géologiques transversales.....	64
Tab. 11 :	Légende générale et cadre stratigraphique de la carte harmonisée.....	101
Tab. 12 :	Système d'agrégation de la classification lithologique de l'IHME1500.....	107

Sigles et abréviations

ABN	Autorité du Bassin du Niger
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AGES	Appui à l'Autorité du Bassin du Niger pour la Gestion des Eaux souterraines
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe / Institut Fédéral Allemand des Géosciences et des Ressources Naturelles
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung / Ministère Fédéral Allemand de la Coopération Économique et du Développement
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CTc	Continental Terminal – complexe de base
CT1	Continental Terminal 1
CT2	Continental Terminal 2
CT3	Continental Terminal 3
DOS	Directorate of Overseas Surveys
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations / Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FED	Fonds Européen de Développement
GIZ	Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit / Coopération Allemande pour le Développement
GSA	Geological Survey of Nigeria (1919-1984)
GSNA	Geological Survey of Nigeria Agency (1984-2006)
IGN	Institut Géographique National
IHME1500	International Hydrogeological Map of Europe 1/1 500 000 / Carte Hydrogéologique Internationale de l'Europe 1/1 500 000
JICA	Japan International Cooperation Agency
NBA	Niger Basin Authority / Autorité du Bassin du Niger
NGSA	Nigerian Geological Survey Agency (depuis 2006)
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
QGIS	Logiciel à source ouverte de Système d'Information Géographique
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SFN	Structure Focale Nationale
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	United States Geological Survey / Commission Géologique des États-Unis
Vmap0	Vector Map - Level 0 / Carte Vectorielle - Niveau 0

Résumé

L'information géologique de base est un élément fondamental pour les analyses environnementales de niveau élevé requises en matière de gestion des ressources naturelles, de l'évaluation du potentiel et de la vulnérabilité des eaux souterraines, ainsi que de développement régional. Les cartes géologiques disponibles varient en fonction des objectifs pour lesquels elles ont été élaborées et souvent donnent lieu à des interprétations divergentes en ce qui concerne les limites des feuilles de cartes et les frontières des pays. Pour l'Afrique de l'Ouest, il n'existe pas de séries de cartes géologiques transfrontalières complètes tant au niveau local que régional (échelle <1/1 000 000 000).

Dans le cadre du projet de coopération technique « **Appui à la Gestion des Eaux Souterraines dans le Bassin du Niger (AGES)** », l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) et l'Institut Fédéral Allemand de Géosciences et de Ressources Naturelles (BGR) se sont associés pour élaborer une **carte géologique transfrontalière exemplaire** de la zone frontière du Bénin, du Niger et du Nigeria. La zone d'étude comprend la partie sud du bassin sédimentaire de l'Iullemeden (connu localement sous le nom de bassin de Sokoto au Nigeria et de Bassin de Kandi au Bénin), ainsi que les socles adjacents de la ceinture du Dahomey et du bouclier du Nigeria.

Les informations géologiques issues de huit différentes sources cartographiques ont été harmonisées sur les plans thématique et géométrique. Les unités chronostratigraphiques des cartes originales ont été corrélées et le cadre stratigraphique a été résumé dans une légende générale. Les descriptions lithologiques divergentes ont été harmonisées partant du schéma d'agrégation lithologique proposé pour la Carte Hydrogéologique Internationale de l'Europe (IHME1500, Duscher et al. 2015). Le présent rapport décrit le processus d'harmonisation et examine les principales étapes d'agrégation et les décisions de répartition des éléments, et met en exergue les incohérences géologiques non résolues, ce qui nécessite davantage d'effort en matière de cartographie géologique de terrain. Les analyses spatiales ont été réalisées à l'aide du système d'information géographique QGIS librement accessible (QGIS Development Team 2018)

La « **Carte Géologique de la Région Transfrontalière du Bénin, du Niger et du Nigeria** » présente une carte géologique harmonisée sur les plans thématique et géométrique à l'aide d'une chronostratigraphie et d'une lithologie unifiée. La carte fournit des données géologiques de base pour les études environnementales, les analyses hydrogéologiques et la planification régionale. Les cartons montrent d'importantes coupes géologiques, la répartition des linéaments et les classifications lithologiques.

1 Introduction

1.1 La coopération technique

Le projet « *Appui à l'ABN pour la Gestion des Eaux Souterraines* » (AGES) est un projet conjoint de l'organisation internationale **Autorité du Bassin du Niger (ABN)** et l'**Institut Fédéral Allemand des Géosciences et des Ressources Naturelles (BGR)**, ayant pour objectif l'institutionnalisation de la gestion durable des eaux souterraines au niveau régional dans le bassin du Niger.

Le projet de coopération technique s'inscrit dans le cadre du programme de la « Gestion Intégrée des Ressources en Eau de l'ABN », conjointement mis en œuvre avec la *Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)* et l'**Institut Fédéral Allemand des Géosciences et des Ressources Naturelles**, avec le financement du Ministère Fédéral Allemand de la Coopération Économique et du Développement (BMZ PN : 2013.2465.6). Le projet appuie l'Autorité du Bassin du Niger dans les domaines ci-après :

- I. la mise en place de réseaux de suivi des eaux souterraines ;
- II. le développement de stratégies de gestion des eaux souterraines transfrontalières et ;
- III. le renforcement des capacités.

1.2 Motivation

Les stratégies de gestion des eaux souterraines découlent d'une bonne connaissance de l'environnement hydrogéologique représenté par des cartes hydrogéologiques et des modèles (conceptuels) sur, par exemple, la productivité des aquifères, la vulnérabilité des aquifères, les régimes d'écoulement, etc... Cependant, la **compréhension du contexte géologique** est une condition préalable à toute analyse hydrogéologique.

Depuis le début du XXe siècle, les projets de cartographie géologique coloniaux et postcoloniaux en Afrique de l'Ouest fournissent une large gamme de séries de cartes, avec des échelles et un niveau de détails géologiques différents, des dénominations d'unités (litho-)stratigraphiques, un langage et une fiabilité divergents, reflétant l'évolution des connaissances géologiques et le cadre stratigraphique. Les zones frontalières, en particulier, souffrent non seulement d'un manque de couverture, mais présentent également des **interprétations et des dénominations géologiques explicatives divergentes le long des limites des cartes et des frontières nationales**. Il existe de nombreuses cartes panoramiques géologiques suprarégionales et à l'échelle du continent africain à des échelles inférieures à 1/1 000 000 000 qui, par conséquent, ne contiennent pas assez de détail et de précision pour permettre une planification et une gestion tant au niveau local que régional. En vue de répondre aux sollicitations en matière de gestion des eaux souterraines dans les régions transfrontalières du bassin du Niger, il s'avère impératif de disposer de cartes géologiques transfrontalières unifiées et harmonisées.

Le présent rapport décrit de manière exemplaire le processus d'harmonisation de cartes géologiques d'une zone pilote transfrontalière du projet AGES (région transfrontalière du Bénin, du Niger et du Nigeria). La carte géologique transfrontalière harmonisée ainsi élaborée servira de base à l'analyse hydrogéologique à venir et sera utilisée à des fins de planification régionale. Le processus d'harmonisation ainsi décrit peut être considéré comme un modèle pouvant servir d'exemple à de travaux similaires dans le bassin du Niger et au-delà.

Le chapitre 1 présente le projet et la zone d'étude, suivi d'un bref aperçu de la méthodologie présentée au chapitre 2. Le rapport s'appuie sur un ensemble de cartes géologiques du bassin du Niger. Les points forts et les faiblesses identifiés au niveau des huit cartes géologiques adéquates choisies

pour la zone pilote sont examinés au chapitre 3. Le chapitre 4 décrit l'harmonisation thématique des huit cartes originales et l'unification des éléments de légende dans un cadre chronostratigraphique résumé dans une légende générale. Il s'est avéré utile de procéder à une harmonisation géométrique en vue d'adapter le contour des éléments ne pouvant pas être raisonnablement fusionnés selon la légende générale. Le chapitre 5 traite en détail de l'harmonisation géométrique de chaque unité géologique, y compris les raisons qui sous-tendent les décisions individuelles relatives aux contours des unités.

Les données auxiliaires sur les linéaments, les gisements et les pendages, la présence de fossiles et les coupes transversales sont présentées au chapitre 6. Le rapport principal se termine par un bref résumé de la revue des faiblesses du processus d'harmonisation (chapitre 7).

Sont comprise en annexe: un bref aperçu sur le contexte géologique du Bassin de l'ullemmeden sud et du Bassin de Kandi (Annexe I), une sélection de cartes supplémentaires non utilisées dans le cadre de l'harmonisation (Annexe II), la légende générale harmonisée de la carte géologique transfrontalière (Annexe III), le schéma de regroupement lithologique de la Carte Hydrogéologique Internationale de l'Europe (Annexe IV), des coupes horizontales choisies de la zone d'étude (Annexe V), ainsi qu'une brève présentation du déroulement de l'harmonisation au programme SIG de QGIS libre d'accès (Annexe VI).

1.3 Zone d'étude

La zone d'étude est la région frontalière du Bénin, du Niger et du Nigeria (Fig. 1 & Fig. 2). La région a été choisie comme zone pilote n°1 du projet AGES pour les raisons suivantes :

- son caractère transfrontalier impliquant trois des neuf pays membres de l'ABN ;
- l'importance des aquifères sédimentaires des bassins de l'ullemmeden, de Sokoto et de Kandi pour l'approvisionnement en eau potable des populations rurales.

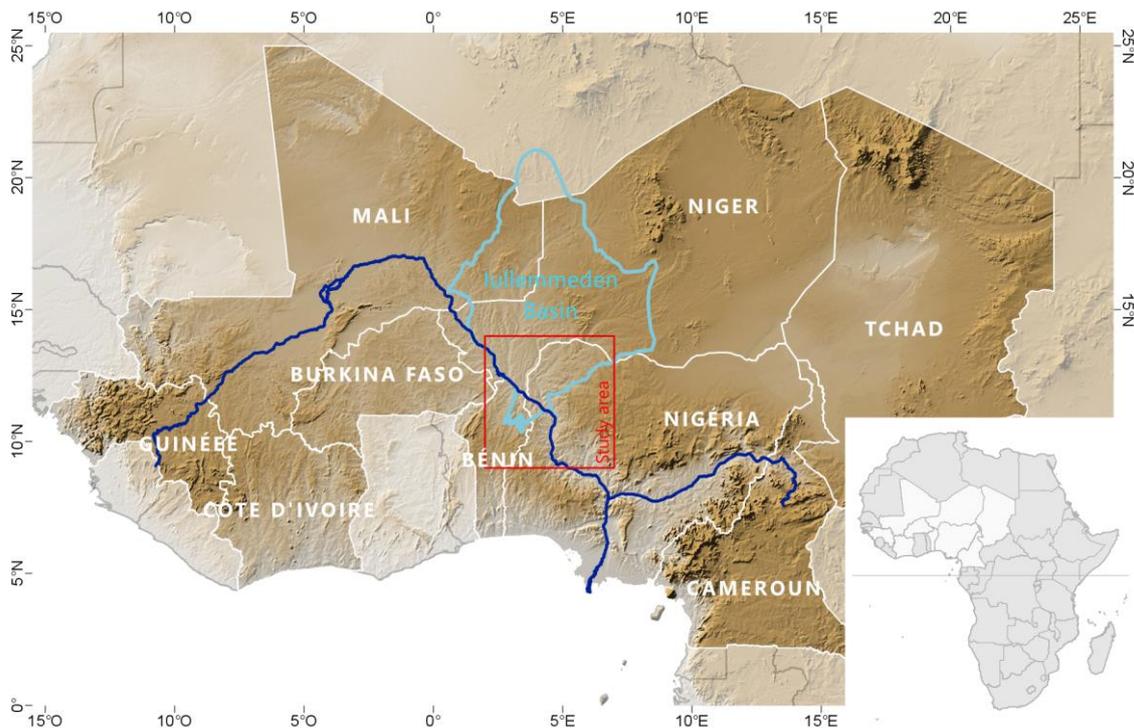


Fig. 1 : Pays membres de l'Autorité du Bassin du Niger (ABN), endroit de la zone d'étude et extension du bassin sédimentaire de l'ullemmeden

Le travail d'harmonisation a concerné la zone comprise entre 3°-5°O et 10°-13°N. Il a surtout été limité par la couverture des cartes et s'est axé principalement sur les unités sédimentaires. La zone d'étude fait partie de la région éco-climatique et biogéographique soudanaise caractérisée par une savane arborée ouverte, humide à sèche. Les précipitations varient de la frontière sèche climatique (1 000 mm)—près de Kandi—à la frontière sèche agronomique (500 mm)—près de Sokoto. Hormis le fleuve



Fig. 2 : Zone d'étude et région transfrontalière du Bénin, du Niger et du Nigeria

Niger, les rivières les plus importantes sont les affluents pérennes de la rive droite que sont le Mekrou, l'Alibori et le Sota (Bénin) et l'intermittent Shodu (également Choudou ou Ouara) au Bénin/Nigeria ; sur la rive gauche, le fleuve pérenne de Sokoto (Gulbin Kebbi) avec ses affluents Rima, Gawon Gulbi (Gaminda), Zamfara et Gulbin Ka au Nigeria. Il n'existe pas de ruissellement régulier dans les systèmes de paléo-drainage du Dallol Maouri et du Dallol Foga au Niger.

Géologiquement, la zone d'étude est située au niveau de la transition entre le socle du Dahomey et le Bassin Mésozoïque de l'Iullemeden. La ceinture du Dahomey (Bénin, Togo et Ghana) est la partie sud de la ceinture transsaharienne (Trans-Saharan Mobile Belt)—une ceinture de plissement et de chevauchement active pendant l'Orogenèse Panafricaine Néoproterozoïque (Bumby & Guiraud 2005; Kröner & Stern 2005). Le terrane granitoïde-gneissique est constitué d'un socle paléoprotérozoïque métamorphique surimprimé, de sédiments océaniques néoprotérozoïques et d'intrusions plutoniques marquant l'ouverture de l'océan et une collision-subduction qui s'ensuit le long du Craton Ouest Africain et du Métacraton du Sahara. Le Bassin de l'Iullemeden est un large bassin continental épérogénique d'affaissement qui s'est développé à partir des sous-bassins précurseurs Paléozoïques de Tim Mersoï/Tamesna et Kandi en un synclinal continental créacé avec une profondeur totale de sédiments pouvant localement aller au-delà de 1000 m. Elle s'est principalement formée pendant le Crétacé lorsque se sont déposés les sédiments continentaux du dénommé « Continental Intercalaire » (Groupes Agadez, Irhazer, et Tegama). Des dépôts marins ont été produits pendant les transgressions globales du Crétacé supérieur (du Cénomaniens tardif à l'Éocène précoce) ; dans la zone d'étude, les sédiments des Groupes Rima et Sokoto se sont formés (Kogbe 1991; Moody 1997). Suite au remonte du manteaux du point chaud du Hoggar tardif de l'Eocène, le schéma de drainage actuel s'est établi au début de l'Oligocène (Chardon et al. 2016). Un soulèvement et une légère inclinaison vers le sud sont responsables de l'érosion des sédiments du Paléozoïque dans le nord du bassin du Tamesna et de l'exposition de sédiments de plus en plus récents vers le sud. Ici, au sud du 16°N, la phase finale de la sédimentation continentale a conduit au dépôt du Continental Terminal. Au cours de l'Oligocène et du Miocène, le socle ouest-africain a connu des phases répétées d'aplanissement et d'érosion pouvant être directement corrélées avec les dépôts correspondants du Continental Terminal (Burke & Gunnell 2008; Beauvais & Chardon 2013). Les vestiges en forme de meseta du Continental Terminal 3 trouvés dans toute la zone d'étude marquent le stade final du dépôt au cours de l'Oligocène tardif, suivi de la stabilité de la surface, de l'altération prolongée et du développement de la Surface Intermédiaire S2 (Chardon et al. 2016).

La stabilité de la surface qui s'en est suivi a permis de conserver la topographie et le réseau hydrographique. La topographie stable actuelle est façonnée par la lente incision du fleuve Niger et de ses affluents nord (le Dallol Maouri, le Dallol Foga et la Rivière Sokoto) dans la plaine sédimentaire plate du Bassin de l'Iullemeden, dont la surface est formée par le Continental Terminal 3. La plaine sédimentaire presque plate du Bassin de l'Iullemeden s'incline d'environ 300 m près de Dogondoutchi à environ 200 m près de Gaya (pente 0,3°). Au Nigeria, les strates créacées affleurantes forment une séquence de cuestas qui cèdent la place à un escarpement naissant dans le bassin de Sokoto, la partie nigérienne du Bassin de l'Iullemeden. Au Bénin, les sédiments paléozoïques du Bassin de Kandi sont exhumés et forment une plaine nivelée interrompue par des vestiges du Continental Hamadien/Continental Terminal 3 formant des buttes ou des plateaux de type meseta avec des escarpements abrupts. Les socles se caractérisent par un relief légèrement plus varié, exprimé sous forme d'ondulations visibles d'une surface d'aplanissement plane. Les altitudes les plus élevées se retrouvent au Bénin avec des altitudes d'environ 400 m dans la région de Kalalé et dans les contreforts du bouclier nigérien présentant des altitudes allant de 300 à 400 m L'altitude de la vallée du Niger, constituant le principal bassin versant, varie de 160 m (au confluent du Dallol Maouri) à 140 m près de Shanga.

Du point de vue hydrogéologique, la région de l'étude comprend le système aquifère à couches multiples du Bassin de l'Iullemeden/Sokoto avec les aquifères économiquement importants des Continental Terminal 1, 2 et 3 se déversant dans le fleuve Niger par le nord et le bassin paléozoïque de Kandi avec l'aquifère semi-consolidé de Wéré (précédemment subsumé sous Les Grès *de Kandi*) se jetant dans le fleuve Niger par le sud.

La zone est peu peuplée avec une densité de population très contrastée de 50 à 100 habitants/km² dans la région de Dosso, au Niger, et dans les Etats de Kebbi et du Niger au Nigeria, mais inférieure à 50 habitants/km² dans le département de l'Alibori au Bénin (Brinkhoff 2018).

2 Méthodologie

Les cartes géologiques peuvent différer à plusieurs niveaux : l'étendue de la couverture, l'échelle, le niveau de détails, la classification et la dénomination des unités (litho-)stratigraphiques, le langage et la fiabilité. L'harmonisation s'avère nécessaire en vue d'obtenir une carte géologique unifiée. Le processus d'harmonisation comporte deux étapes :

- I. l'harmonisation thématique des éléments et des descriptions de la carte ;
→ **légende (litho-, chrono-) stratigraphique** unifiée et cohérente.
- II. l'harmonisation spatiale des éléments cartographiques ;
→ **harmonisation géométrique** des unités entre les cartes et le long des limites des cartes.

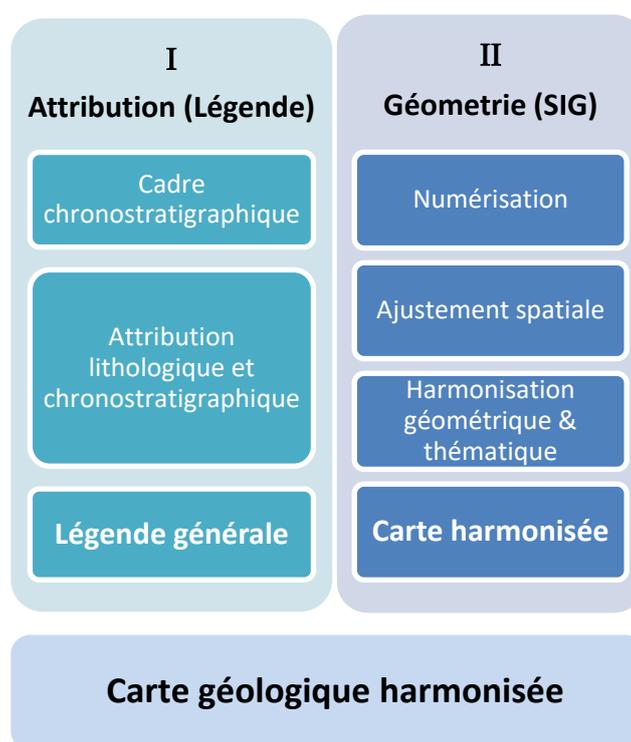


Fig. 3 : Processus d'harmonisation

2.1 Harmonisation thématique (légende générale)

La première étape consiste à créer une légende générale qui définit le nombre et le contenu des éléments de la carte finale. Sur la base des éléments des cartes originales, un cadre chrono- et litho-stratigraphique complet est élaboré en corrélant les unités stratigraphiques identiques et similaires et en leur attribuant une dénomination et une description communes. Les attributs géologiques auxiliaires qui peuvent être directement liés à une unité stratigraphique et lithologique (degré de consolidation, fracturation, etc.) sont attribués en fonction des informations issues à la fois des légendes des cartes originales et des documents auxiliaires. Si nécessaire, les unités chronostratigraphiques sont divisées en faciès lithologiques distincts. Enfin, le cadre stratigraphique est condensé en une légende générale unifiée qui est annexée aux couches SIG des cartes respectives à l'aide des légendes des cartes originales.

2.2 Harmonisation géométrique

La deuxième étape est l'harmonisation de la géométrie de la carte. Le prétraitement comporte la numérisation des cartes analogiques originales, le géo-référencement et la correction topologique. Si nécessaire, les jeux de données numériques sont ajustés sur le plan spatial selon une carte de base topographique généralement acceptée. Pour éviter tout chevauchement en procédant à la fusion des couches SIG en un jeu de données unique, les jeux de données d'origine sont recadrés aux limites respectives de la carte.

La première étape de l'harmonisation géométrique des couches SIG consiste à rattacher la nouvelle légende générale à chaque jeu de données numériques en utilisant les éléments cartographiques originaux comme champs de jonction. Idéalement, la fusion des jeux de données à l'aide de la nouvelle légende générale permet d'obtenir une carte harmonisée. Dans la pratique, les écarts spatiaux entre cartes donnent lieu à une variété de problèmes de limites qui sont abordés au chapitre 5.

La résolution des problèmes relatifs aux limites nécessite des corrections manuelles faisant appel à des connaissances d'expert—idéalement basées sur une expertise en géologie ou guidées par des informations supplémentaires comme la télédétection (caractéristiques topographiques, imagerie satellitaire). Un défi méthodologique est la fusion de cartes qui se chevauchent. Alors que les informations supplémentaires permettent de vérifier la fiabilité de chaque produit cartographique, des décisions doivent être prises quant à quelle nomenclature ou géométrie stratigraphique utiliser.

2.3 Carte multi-échelles

L'harmonisation et l'agrégation géométriques ne modifient ni le niveau de détails ni l'échelle des données d'origine. L'utilisation d'une échelle commune nécessite une mise à l'échelle et une généralisation géométrique orientée vers l'échelle la plus petite. Le plus souvent, cela conduit à une perte disproportionnée de détails et d'informations. Par ailleurs, une carte multi-échelles intègre toutes les informations disponibles au niveau original de détails. Une échelle qui varie sur le plan spatial permet de maintenir le niveau original hétérogène de détails et reflète directement l'état de l'art de la cartographie géologique disponible. Un carton fournit des informations sur la couverture, l'échelle et les sources de données des cartes originales.

3 Les cartes géologiques de la zone d'étude

3.1 Aperçu

Les cartes géologiques pertinentes couvrant la zone d'étude sont énumérées au Tableau 1. Les cartes utilisées pour l'harmonisation sont indiquées en gras et sont décrites en détail dans le tableau ci-dessous.

Tab. 1 : Cartes géologiques de la zone d'étude. Les cartes utilisées pour l'harmonisation sont indiquées en gras.

Cartes géologiques		Études/Notices Explicatives		
Niger	Greigert (1960)	Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso, 1/500 000. BRGM	Greigert (1961)	Notice explicative sur la Feuille Dosso (ND-31-SE)
	Greigert (1961)	Carte Géologique de Reconnaissance du Bassin des lullemeden, échelle 1/1 000 000. BRGM	-	-
	Greigert & Pougnet (1966)	République du Niger. Carte Géologique, 1/2 000 000. BRGM	Greigert & Pougnet (1967)	Notice Explicative sur la Carte Géologique de la République du Niger à l'échelle du 1/2 000 000. BRGM
	Machens, E (1966):	Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000. BRGM	Machens, E (1967):	Notice Explicative sur la Carte Géologique du Niger Occidental à l'échelle du 1/200 000. BRGM
Nigeria	Jones (1940)	Geological Map of Sokoto Province, 1:500 000	Jones, B (1948)	<i>The sedimentary rocks of Sokoto Province. Bulletin of the Geological Survey of Nigeria N° 18</i>
	D.O.S. (1965-66) :	Geological Survey of Nigeria, 1:250 000 Series, Directorate of Overseas Surveys		
		<ul style="list-style-type: none"> • Feuille 1, Tangaza • Feuille 2, Sokoto. • Feuille 3, Shinkafe 	<ul style="list-style-type: none"> • Feuille 6, Birnin Kebbi • Feuille 7, Gummi • Feuille 8, Gusau. 	
	Dessauvague (1974)	Geological Map of Nigeria, The Nigerian Mining, Geological & Metallurgical Society	-	-
	Geological Survey Division (1965)	Geological Map of Nigeria 1964, Directorate of Federal Surveys	-	-
	Geological Survey Division (1974)	Geological Map of Nigeria 1974, Federal Surveys	-	-
	NGSA (2011a)	Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, Nigeria. 1:500 000. Nigerian Geological Survey Agency.	-	-
NGSA (2011b)	Geological Map of Nigeria. 1:1 000 000. Nigerian Geological Survey Agency	-	-	
Benin	Pougnet (1957):	Kandi-E. Carte Géologique de Reconnaissance de l'A.O.F. Feuille N° NC 31-N.O.-E.34. 1:500000	Pougnet (1957):	Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 500.000. Notice explicative sur la Feuille Kandi-Est (N° NC. 31-N.O.-E.34).
	Akibou et al. (1989)	Carte Géologique. 1 :200 000. Projet FED N° 4105-011-13-20, Istituto ricerche Breda & OBEMINES, Italie. <ul style="list-style-type: none"> • Feuille Kandi • Feuille Karimama • Feuille Malanville • Feuille Porga 	Istituto ricerche Breda (1989)	<i>Notice explicative de la Carte Géologique à 1/200.000. Feuilles : Karimama, Porga, Kandi, Malanville. Projet FED N° 4105-011-13-20, Mémoire N°2, Istituto ricerche Breda & OBEMINES, Italie.</i>
	Technoexport (1995)	Carte de Géologie et des Minéraux utiles. Conceil de la Géoscience, Pretoria. 1 :200 000 <ul style="list-style-type: none"> • Dunkassa • Bembèrèkè • Natitingou • Sansanne 	OBEMINES (1995a & b)	Notice Explicative de la Carte Géologique à 1:200 000, Mémoire N°4, Feuilles Sansanné-Mango, Natitingou, Bembèrèkè & Mémoire N°5, Feuille Dunkassa, Office Béninois des Mines, Pretoria.
	Konate (1996)	Carte géologique générale du bassin paléozoïque de Kandi. 1 :400 000, Figure 15.	Konate (1996)	Évolution tectono-sédimentaire du bassin paléozoïque de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). Un témoin de l'extension post-orogénique de la chaîne panafricaine. Figure 15, Dissertation, Université de Bourgogne, Dijon-Niamey.

3.2 Niger

Pour le Niger, la carte de base utilisée pour l'harmonisation géométrique est la *Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso, 1/500 000* de Greigert (1960) très détaillée et de moyenne échelle. Elle est complétée par la carte à grande échelle *République du Niger, Carte Géologique, 1/2 000 000* (Greigert & Pougnet 1966) afin de corriger les écarts et ajouter des détails supplémentaires le long du fleuve Niger et dans certaines parties du Nigeria. Ce qui sépare le plus les deux cartes, c'est la différenciation supplémentaire entre le Continental Terminal 1 et le Continental Terminal-Complexe de base.

3.2.1 Greigert (1960) : *Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso, 1/500 000*

La feuille Dosso (Greigert 1960) fait partie de la série de reconnaissance du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et accompagne la *Notice Explicative sur la Feuille Dosso (ND-31-SE) : Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 1/500 000* (Greigert 1961). La carte (Fig. 4) couvre la partie nigérienne du quadrant ND-31 SE (désignation selon l'Institut Géographique National, IGN) et est dominée par l'affleurement du Continental Terminal 1 et la vallée quaternaire fossilisée du Dallol Maouri (partie inférieure de la vallée du Tadiss). Sur la rive gauche du fleuve Niger, Greigert a parlé de l'élément « Continental Terminal Complexe de base » – décrit comme un conglomérat de galets arrondis (« poudingue ») et de grès grossier—dont la lithologie et la position stratigraphique ne sont pas bien définies (comparer 5.3.2). Sur la rive droite du fleuve Niger, le *Complexe de base* n'est pas différencié et constitue une partie d'un « Continental Terminal indifférencié ». La carte montre en détail les limites des formations et les voies de ruissellement saisonnier.

3.2.2 Greigert & Pougnet (1966) : *République du Niger, Carte Géologique, 1/2 000 000*

La carte d'aperçu complète *République du Niger, Carte Géologique, 1/2 000 000* (Greigert & Pougnet 1966) montre l'état de la géologie de la République du Niger dans son ensemble au milieu des années 70 et est accompagnée d'une *Notice Explicative sur la Carte Géologique de la République du Niger à l'échelle du 1/2 000 000* (Greigert & Pougnet 1967). La carte a apporté des améliorations à la carte de reconnaissance antérieure *Carte Géologique de Reconnaissance du Bassin des Iullemeden, échelle 1/1 000 000* (Greigert 1961a). Le travail régional exhaustif de Greigert a servi de base à la plupart des projets régionaux de cartographie ultérieurs et, en raison de son caractère partiellement transfrontalier, il est particulièrement utile à l'examen de l'étendue des strates géologiques entre le Niger, le Nigeria et le Bénin (Fig. 5).

La carte panoramique à petite échelle (1/1 000 000) a été utilisée pour compléter les zones non couvertes par la *Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso* (Greigert 1960). Une révision majeure par rapport à la précédente carte de reconnaissance est la cartographie du *Continental Terminal 1* à la fois sur les rives droite et gauche du fleuve Niger en remplacement des zones du *Continental Terminal-Complexe de base* (rive gauche) et du *Continental Terminal indifférencié* (rive droite). En raison de l'étroitesse de l'échelle, le *Continental Terminal-Complexe de base* est ici réduit à une vague ligne en pointillés le long de la base de l'escarpement du Continental Terminal.

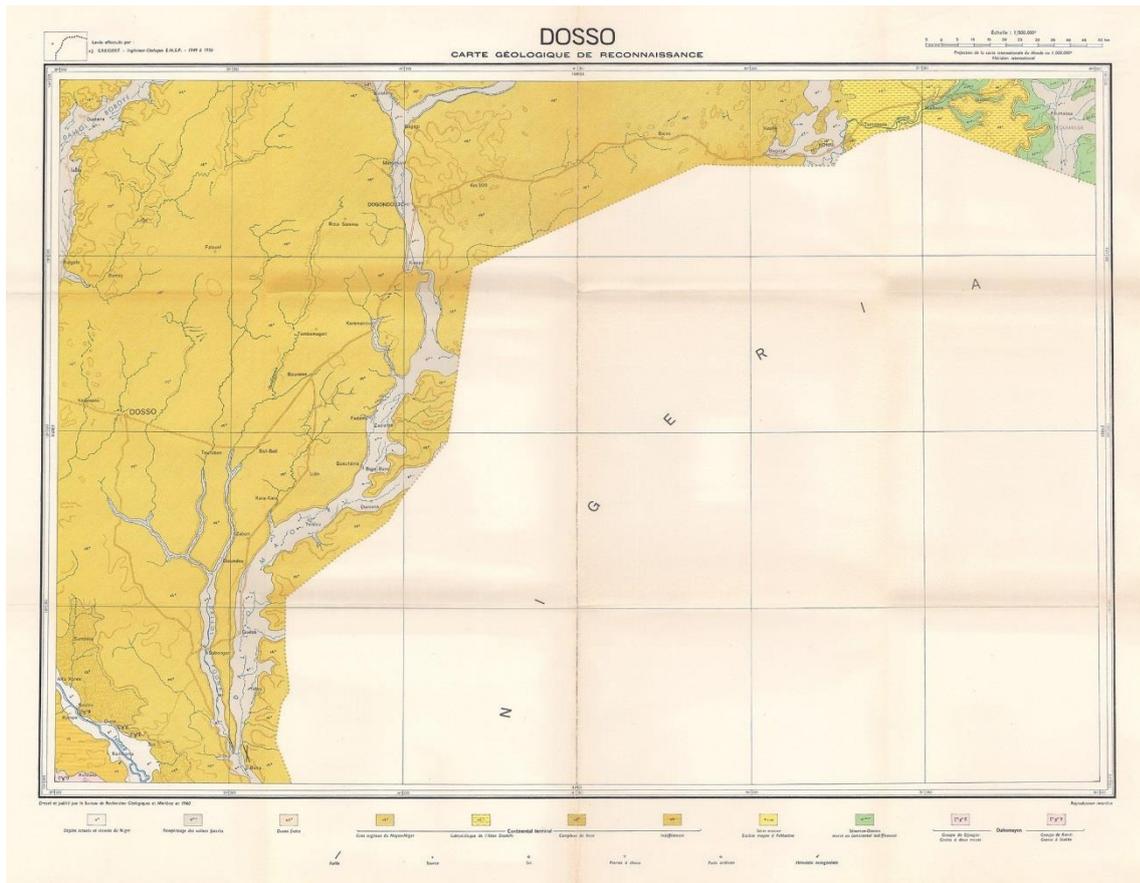


Fig. 4 : La Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso, 1/500 000 (Greigert 1960) a été utilisée comme carte de base pour la partie Nigérienne de l'étude.

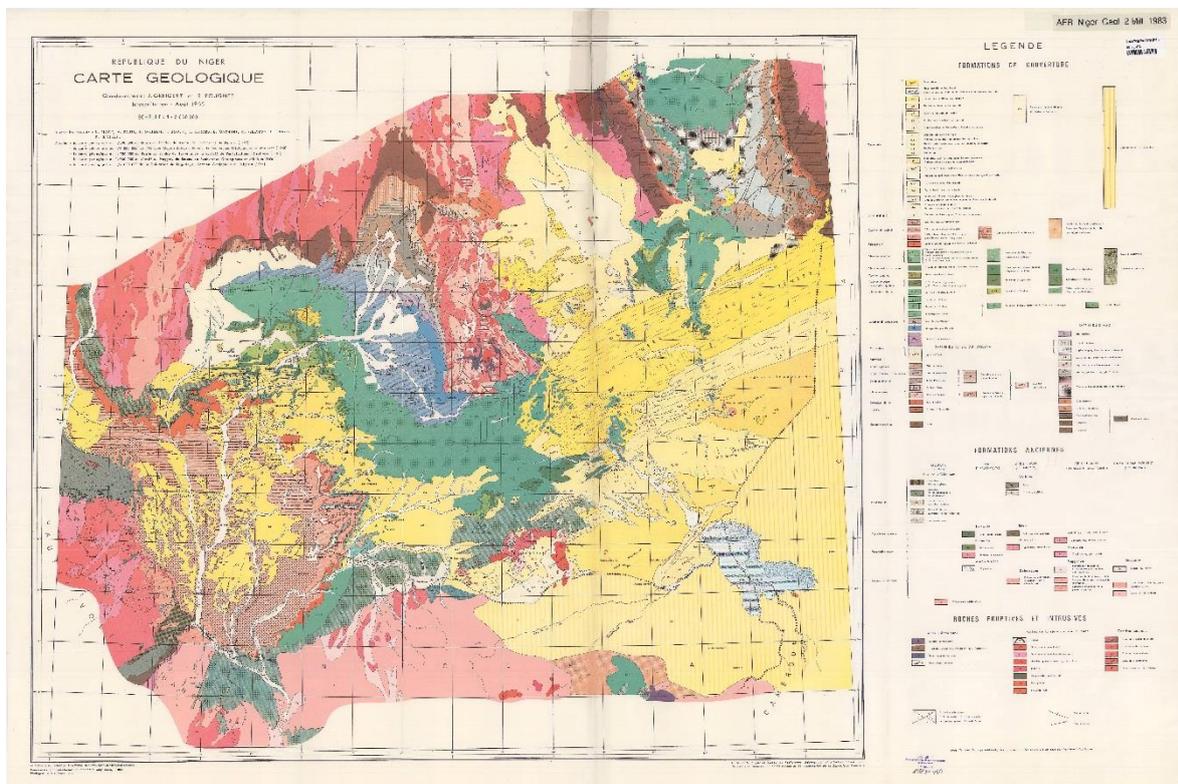


Fig. 5 : La Carte Géologique de la République du Niger, 1/2 000 000 (Greigert & Pognet 1966) fournit un aperçu complet de la géologie du Niger et du Bassin de l'Iullemeden.

3.3 Nigeria

En ce qui concerne le Nigeria, les six cartes de la *Geological Survey of Nigeria maps series 1:250.000* de la Nigerian Geological Survey Agency (GSN) et de la Directorate of Overseas Surveys (DOS) (1965c, 1965a, 1965b, 1966a ; 1966) a principalement servi de base pour le bassin du Sokoto. Malgré son étendue limitée, elle constitue à ce jour la série de cartes géologiques la plus détaillée disponible pour le nord-ouest du Nigeria.

Le reste de la zone d'étude est couvert par deux jeux de données numériques à petite échelle : la *Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, Nigeria* (NGSA 2011a, 1/500.000) et la *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c, 1/2.000.000). Pour les régions situées à l'ouest de la rivière Sokoto, les cartes et les descriptions géologiques de Jones (1948) et de Greigert & Pougnet (1966) ont été jugées plus appropriées. Elles ont été utilisées pour cartographier les affleurements des formations de Gwandu (Continental Terminal), de Kalambaina et d'Ilo, ainsi que les argiles bauxitiques à l'ouest de la rivière Sokoto.

3.3.1 Nigerian Geological Survey Agency (2011a/c): Geological and Mineral Resources Map series 1/500 000 & Geological Map of Nigeria, 1/1 000 000

En 2004, la Geological Survey of Nigeria Agency (GSNA), qui a remplacé le Geological Survey of Nigeria (GSN) et qui est devenue en 2006 la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA), s'est engagée dans un nouveau projet national de cartographie géologique. Il en est résulté une *Geological and Mineral Resources Map series* à l'échelle 1/500 000 pour les 36 États et une *Geological Map of Nigeria* à l'échelle 1/1 000 000 pour l'ensemble du pays – chacune d'elles avec ses propres géométries, mais avec des éléments de légende qui sont principalement similaires. Selon des informations issues du site Web de la Nigerian Geological Survey Agency (<http://ngsa.gov.ng/>), les deux jeux de données sont basés sur une cartographie géologique systématique à l'échelle 1/1 000 000 de la Geological Survey Department avec des contrôles périodiques de terrain (pour l'État de Kebbi en 1971-75 et 1994-95). Les données ont été recueillies État par État et comprennent des données issues des registres de la NGSA, des références des compagnies pétrolières et des publications. Alors qu'une première publication date de 2006, les jeux de données PDF et numériques disponibles datent de 2011. Deux projets ArcGIS et leurs jeux de données géologiques numériques respectifs ont été acquis au printemps 2017 auprès du siège de la Nigerian Geological Survey Agency à Abuja :

- NGSA (2011a): *Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, 1/500 000* ;
- NGSA (2011b): *Geological Map of Nigeria, 1/1 000 000*.

En dépit de la cartographie géologique systématique proclamée, la *Geological and Mineral Resources Map series* à l'échelle imprimée de 1/500 000 et la *Geological Map of Nigeria* couvrant l'ensemble du pays à l'échelle imprimée de 1/1 000 000 montrent des éléments stratigraphiques et/ou cartographiques ambigus et sont moins détaillées et moins cohérentes que les précédentes cartes géologiques. Là où c'est possible, on a préféré les géométries des cartes plus anciennes mais plus fiables.

3.3.2 D.O.S. (1965-66) : Geological Survey of Nigeria map series 1/250 000

La *Geological Survey of Nigeria map series: 1/250 000* a été publiée en 1956-1966 par la Geological Survey of Nigeria (GSN) et la Directorate of Overseas Surveys (D.O.S.). A ce jour, les six cartes développées entre 1958 et 1965 par D.H. Parker, D. Carter, M.N. Fargher et D.C. Turner fournissent la série de cartes géologiques les plus détaillées disponibles pour le nord-ouest du Nigeria : Feuille 1—Tangaza (D.O.S. 1966a), Feuille 2—Sokoto (D.O.S. 1965a), Feuille 3—Shinkafe (D.O.S. 1965b), Feuille 6—Birnin Kebbi (D.O.S. 1965c), Feuille 7—Gommi (D.O.S. 1966b), Feuille 8—Gusau (D.O.S. 1966c). Les quatre cartes analogiques suivantes ont été numérisées :

- Feuille 1 : Tangaza (D.O.S. 1966a) ;
- Feuille 2 : Sokoto (D.O.S. 1965a) ;
- Feuille 6 : Birnin Kebbi (D.O.S. 1965c) ;
- Feuille 7 : Gummi (D.O.S. 1966b).

Imprimées à l'échelle 1/250 000, ces cartes présentent un haut niveau de détail et une très bonne précision en ce qui concerne les caractéristiques topographiques telles que les réseaux hydrographiques et les affleurements des cuirasses ferrugineuses (ferricretes). Fruit d'une approche cartographique intégrée incluant des caractéristiques géologiques, topographiques et hydrologiques, les données de ces cartes constituent les meilleures informations disponibles. De plus, chaque carte fournit une coupe géologique simple. En 1973, l'étude de l'USGS sur *les Aquifers in the Sokoto basin, northwestern Nigeria, with a description of the general hydrogeology of the region* (Anderson & Ogilbee 1973) a utilisé la série de Cartes du Geological Survey of Nigeria comme cartes de base pour leur *Geologic Map of the Sokoto Basin, Northwestern Nigeria*, ainsi que pour leurs études hydrogéologiques respectives. Plus tard, les cartes géologiques nationales qui couvrent ces régions, telles la *Geological Map of Nigeria 1964, 1/2 000 000* (Geological Survey Division, 1965), la *Geological Map of Nigeria, 1/1 000 000* (Dessauvagine 1974) ou la *Geological Map of Nigeria 1974, 1/2 000 000* (Geological Survey Division 1974) se sont inspirées des travaux précurseurs de Parker et collègues. Pour la partie nord-ouest de la zone d'étude, cette série de cartes est préférée à la dernière publication de jeux de données numériques de la Nigerian Geological Survey Agency.

3.3.3 Jones (1940): Geological Map of the Sokoto Province

La *Geological Map of the Sokoto Province* de Jones (Jones 1940) a été publiée en complément du rapport *The Sedimentary rocks of Sokoto Province* (Jones 1948) et fournit la première description exhaustive de la géologie du bassin de Sokoto (Fig. 9). Depuis lors, sa carte et son cadre stratigraphique ont été révisés à plusieurs reprises. Cependant, elle fournit l'unique description détaillée des *Pisolithic and nodular clays* de la Formation d'Illlo. Ici, nous avons adopté le schéma original qu'il a utilisé pour cet important horizon-repère stratigraphique.

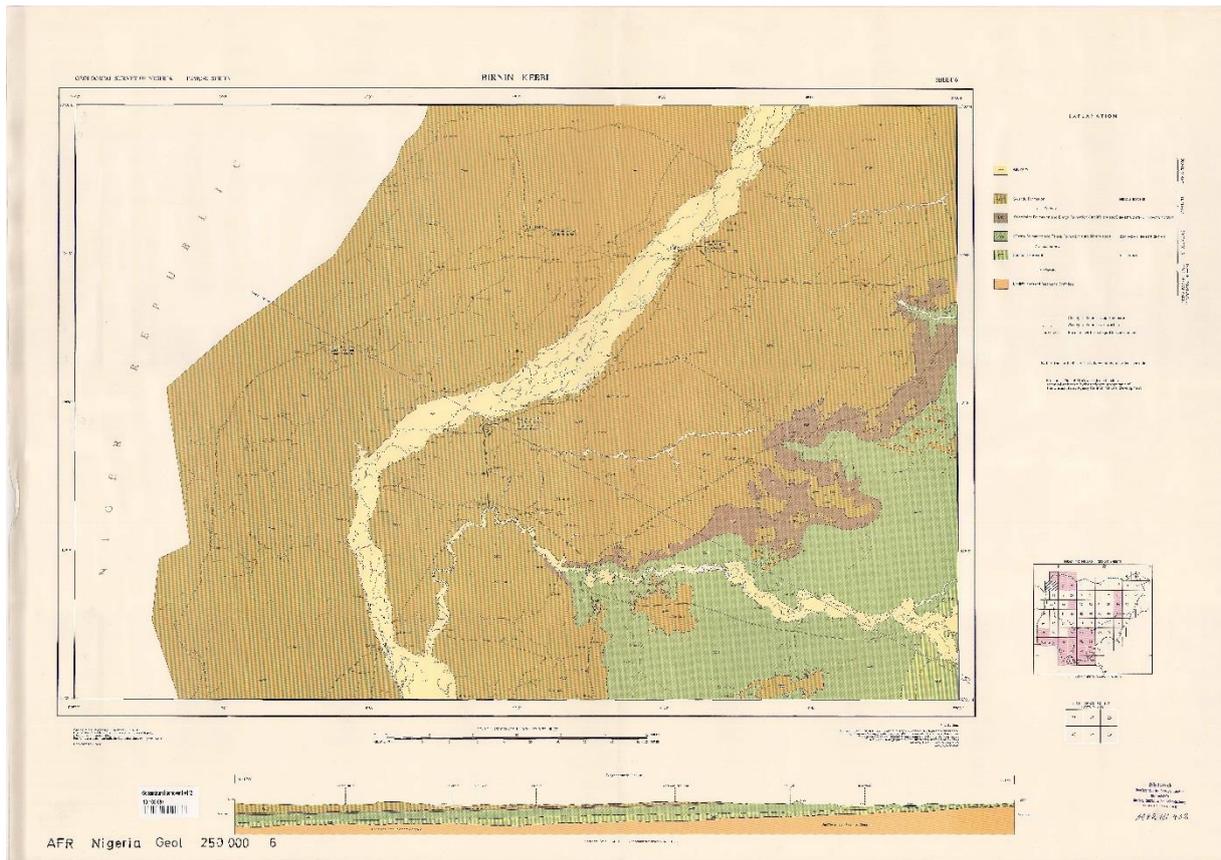


Fig. 8 : Série des cartes de la Geological Survey of Nigeria, 1/250.000, Feuille 6, Birnin Kebbi, publiée par la Directorate of Overseas Surveys (D.O.S. 1965c).

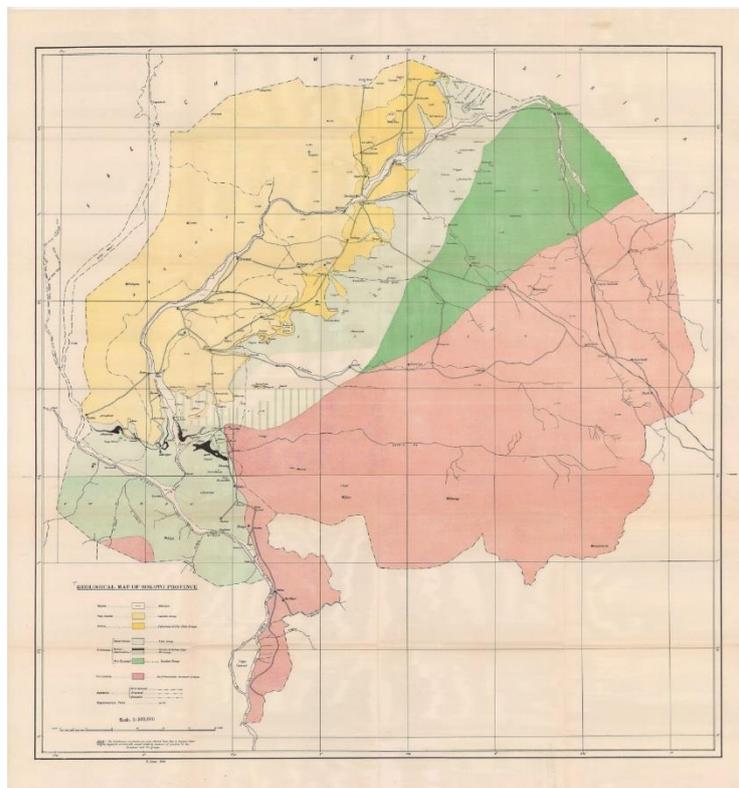


Fig. 9 : Geological Map of the Sokoto Province (Jones 1940), publiée dans The Sedimentary rocks of Sokoto Province (Jones 1948), première étude géologique exhaustive de la zone.

3.4 Benin

Le Bassin de Kandi, au Bénin, est couvert par la série de cartes *Carte Géologique—Feuilles Karimama, Porga, Kandi et Malanville, 1/200 000* (Akibou et al. 1989c, 1989b, 1989a, 1989d) de l'Istituto Ricerche Breda de l'Italie, la série de cartes *Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa, Sansanné-Mango, Natitingou et Bembèrèkè 1/200 000* (Technoexport 1995b, 1995a) de Technoexport de la Russie, ainsi que des travaux géologiques de Alidou (Alidou & Lang 1983, 1983 ; Alidou 1987) et Konaté (Konaté 1996; Konaté et al. 2003a, 2006).

L'approche d'harmonisation s'est inspirée de tous les jeux de données disponibles, mais s'est alignée, en termes de nomenclature et d'interprétation (chrono-) stratigraphique sur les travaux de Konaté et de ses collaborateurs (Konaté 1996; Konaté et al. 2003a, 2006). Afin d'incorporer la plupart des détails de terrain, le contour et l'étendue spéciale des unités géologiques sont principalement issus des séries de cartes détaillées à grande échelle 1/200 000 de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b) and Technoexport (1995b).

3.4.1 Istituto Ricerche Breda (1989) : Carte Géologique. Feuilles : Karimama, Porga, Kandi, et Malanville, 1/200 000, Project F.E.D

La série de cartes *Carte Géologique—Feuilles Karimama, Porga, Kandi et Malanville* de l'Istituto Ricerche Breda constitue, à ce jour, la carte géologique la plus connue du Bassin de Kandi (Akibou et al. 1989c, 1989b, 1989a, 1989d). Les travaux de terrain ont été réalisés entre 1980 et 1982 dans le cadre du projet de la F.E.D. : *Étude de la Cartographie Géologique et Prospection Minière de Reconnaissance au Nord du 11^{ème} parallèle* (4105-011-13-20). Cette série de cartes est accompagnée par la *Notice Explicative de la Carte Géologique à 1/200.000. Feuilles : Karimama, Porga, Kandi et Malanville* (Istituto Ricerche Breda & OBEMINES 1989). Les travaux de l'Istituto Ricerche Breda incorporent, en partie, les résultats des recherches concomitantes en matière de sédimentologie et de datation (Alidou et al. 1986 ; Alidou 1987 ; Seilacher A & Alidou S 1988), mais diffèrent quant à la répartition des dépôts superficiels du Bassin de Kandi. Sur la Feuille Malanville, la géologie de surface dominante est décrite comme étant composée de grès grossier de 30 m d'épaisseur, avec des intercalations de silt et d'argile d'un milieu crétacé de plaines inondables (unité C) – ce qui correspond à la Formation d'Illou au Nigeria (Akibou et al. 1989c).

Dans le Paléozoïque, trois faciès successifs sont différenciés : des dépôts de cônes alluviaux (K1), des dépôts de plaines d'inondation (K2) et des milieux marins et lacustres (K3). L'unité K1 "conglomérats, brèches, grès avec silts et argiles subordonnés" est interprétée comme un milieu de cônes alluviaux avec une texture empâtée de crues éclaires, de coulées de débris et de dépôts de chenaux de cours d'eau et de plaines alluviales. Là où il existe une prédominance de conglomérats et de brèches, il est indiqué une unité distincte K1 (pointillée). L'unité K2 comprend du « grès moyen, silts, argiles » reflétant un milieu de dépôt généralement fluvial similaire à une plaine d'inondation, mais dénote également une transition d'un milieu fluvial à un milieu plus lacustre. L'unité supérieure K3 est composée de « grès fins, silts, argiles » et est décrite comme un milieu marin peu profond avec des caractéristiques de transition entre milieux de plaines inondables, lacustres et deltaïques ("dépôts paraliques").

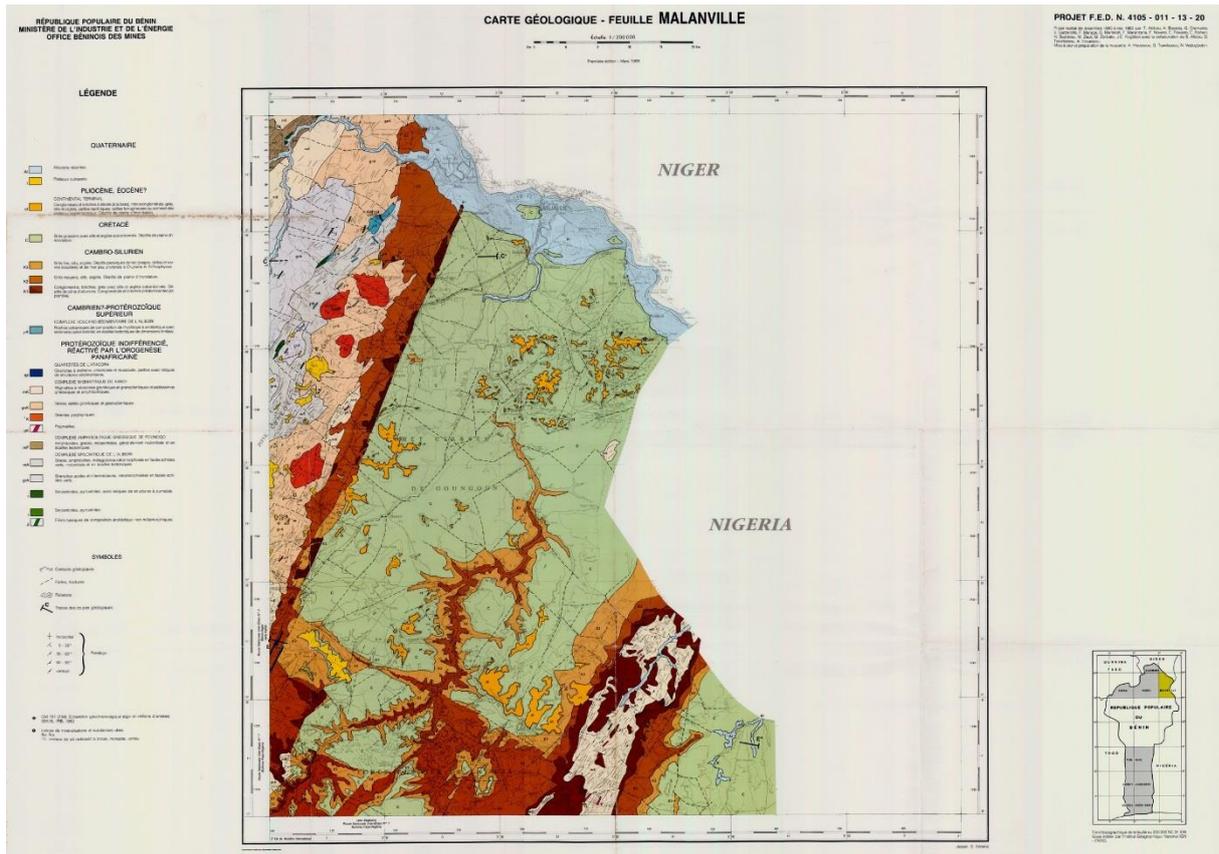


Fig. 10 : Carte Géologique—Feuille Malanville développée en 1989 par l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c).

3.4.2 Technoexport (1995) : Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa, 1/200 000

Les cartes géologiques entre le 10°N et le 11°N ont été élaborées par des géologues de Technoexport de l'Union Soviétique et de l'Office Béninois des Mines (OBEMINES) suite au Contrat n° 55-036/4500 ; 1977-1994—contemporain à la cartographie géologique au nord du 11ème parallèle Nord par l'Istituto Ricerche Breda d'Italie. Les cartes de Sansanné-Mango, Natitingou et Bembèrèkè ont été élaborées entre 1977 et 1980 ; la carte *Carte de Géologie et des Minéraux utiles, Dunkassa, 1:200 000* (Technoexport 1995b) a été élaborée entre 1981-1984. La série de cartes qui en a résulté comprend quatre cartes et a été publiée en 1995 par le Council of Geoscience de l'Afrique du Sud. Les deux rapports qui les accompagnent—Mémoire 4 pour la feuille de Dunkassa (OBEMINES 1995a) et Mémoire 5 pour les cartes adjacentes (OBEMINES 1995b)—sont basés sur des rapports non publiés de Technoexport (1980, 1984).

La série de cartes porte principalement sur le sédiment protérozoïque. Cependant, la feuille de Dunkassa fait ressortir quatre différentes unités de sédiments paléozoïques (épaisseur totale comprise entre 60 et 115 m) dans la partie sud du bassin de Kandi. (Technoexport 1995b).

La formation de Wéré (PZ₁₋₂W)—ou zone marginale—est décrite dans la légende de la carte, en anglais, comme "Gritty sandstones, micropuddingstone, conglomerate". Se présentant généralement comme des buttes témoins subhorizontales dans le sédiment précambrien, la Formation de Wéré passe progressivement dans les grès et les siltites de la Formation de Zougou, au centre du bassin. L'épaisseur maximale est estimée à 60 m.

La Formation de Zougou (PZ₁₋₂Z₁₋₃) comprend trois faciès morphologiquement et géo-chimiquement distincts décrits comme "Sandstone of varying grain sizes, often gritty interlayered with

micropuddingstone" (Zougou 1, PZ₁₋₂Z₁), "Siltstone, less frequently fine-grained sandstone" (Zougou 2, PZ₁₋₂Z₂), et "Siltstone and ferruginous sandstone" (Zougou 3, PZ₁₋₂Z₃). Zougou 1 (15-25 m) est un faciès transitionnel remplaçant latéralement la Formation de Wéré. Il peut, en outre, être divisé en un niveau inférieur de micro conglomérats brun-rougeâtres non triés et rouillés et de grès brun jaunâtre et un niveau supérieur de grès bien trié, de taille moyenne à grossière, à stries croisées avec des lits intercalés de siltites. Les siltites et le grès fins de Zougou 2 (35-50 m) présentent de fines stratifications ondulantes qui correspondent à celles de Zougou 1. Des traces d'*Arthropycus alleghanensis* (*Harlania*) le long de la rivière Sota montrent des sédiments variés dans un milieu marin paléozoïque. Les vestiges de Zougou 3 (observés à 15-20 m, et peut-être jusqu'à 40 m) sont décrits comme des siltites et du grès et limons rouge-brun foncé, ferrugineux, compacts, quartzitiques et micacés.

3.4.3 Konaté (1996) : Carte Géologique Générale du Bassin Paléozoïque de Kandi, 1/400 000,

Basé sur un travail de terrain approfondi sur la litho-stratigraphie et la géologie structurale du Bassin de Kandi, la thèse et les articles associés de Moussa Konaté constituent à jour la source la plus fiable sur la géologie du Bassin de Kandi (Konaté et al. 1994, 2003a, 2003b, 2006; Konaté 1996). S'appuyant sur les travaux antérieurs de Alidou (1987), il a révisé la litho-stratigraphie, mis en évidence le caractère glaciaire du Dévonien supérieur de la Formation de Wéré et étudié l'évolution tectonique. La carte panoramique du Bassin de Kandi à l'échelle 1/400 000 qui en résulte est principalement basée sur la géométrie de la carte de l'Istituto Ricerche Breda et ne se rapporte aux travaux des russes que pour les Feuilles Dunkassa et Bembereke. Sur la base de son travail de terrain, Konaté a affiné et unifié les différentes terminologies existantes proposées par Alidou et ses collaborateurs, ainsi que par les projets de cartographie de BREDA et de Technoexport. Sa nouvelle nomenclature a, dans un premier temps, distingué les dépôts terrestres grossiers de la Formation de Wéré de l'Ordovicien supérieur (Wa/Wb membres) des sédiments plus fins de la Formation de Kandi comprenant des dépôts des transgressions marines de l'Ordovicien supérieur et du Silurien inférieur (Ka/Kb membres). Pour un aperçu plus détaillé de sa classification litho-stratigraphique, cf. chapitre I.I.

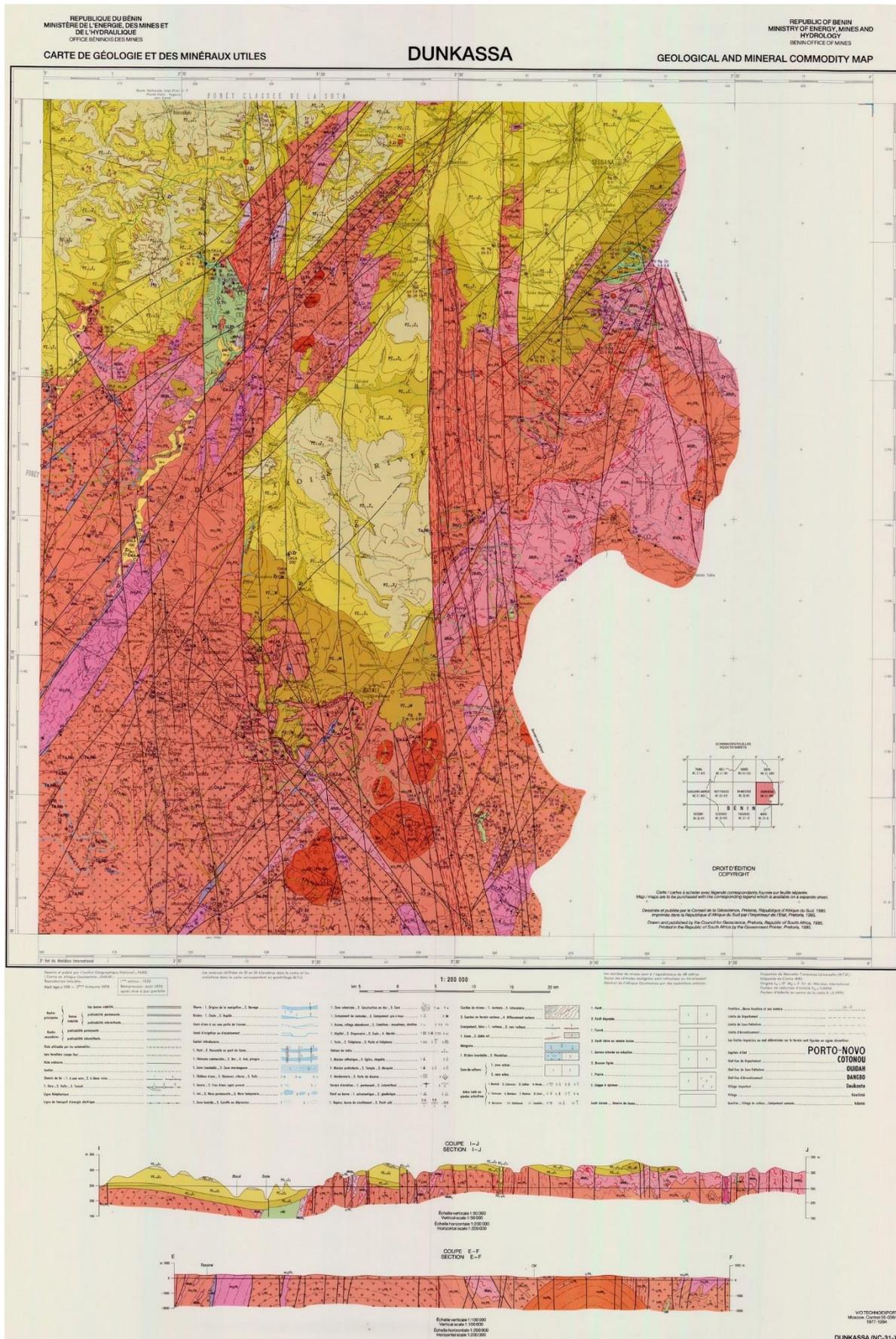


Fig. 11 : Carte de Géologie et des Minéraux utiles, Dunkassa, 1:200 000 (TECHNOEXPORT 1995a).

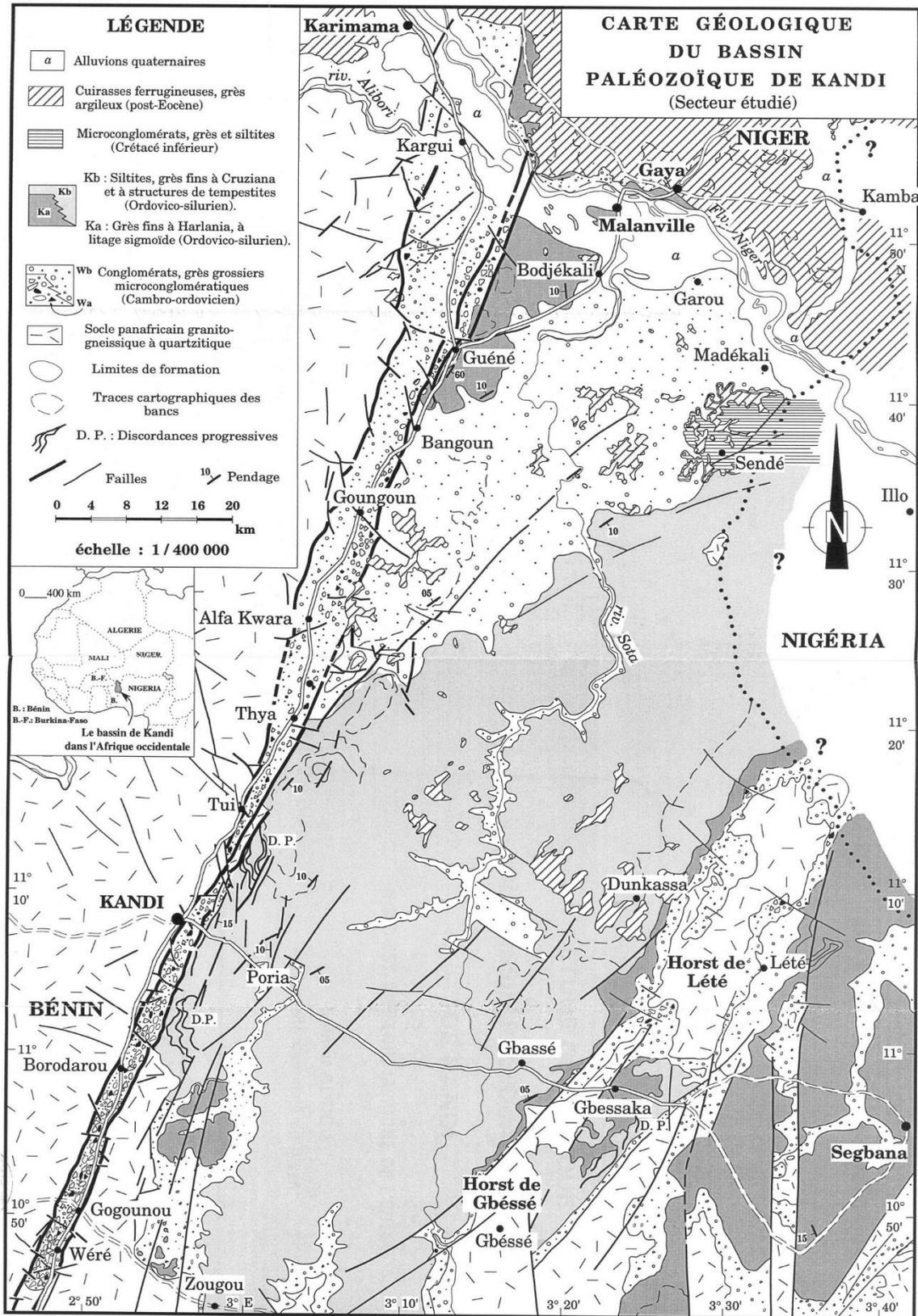


Fig. 12 : Carte géologique du bassin paléozoïque de Kandi, 1:400 000, (Konaté 1996).

4 Légende générale

4.1 Le cadre chronostratigraphique

Le cadre chronostratigraphique s'appuie sur les aperçus stratigraphiques existants pour les bassins de l'Iullemeden, de Sokoto et de Kandi, issus des recherches géologiques du siècle dernier. Au Niger, les premiers travaux de Pognet (1949) ont été résumés par Greigert (1968) dans les ouvrages géologiques et hydrogéologiques—*Les Eaux Souterraines de la République du Niger*—qui ont par la suite alimenté l'*Atlas des Eaux Souterraines du Niger* (Greigert 1978) et qui ont servi de base aux études hydrogéologiques postérieurs du Bassin de l'Iullemeden. Les premières recherches géologiques dans le bassin de Sokoto se sont appuyées sur les travaux de Braeburn et Tattam (1930) et de Tattam (1943), et ont été résumées par Jones (1948). Des décennies plus tard, Kogbe, avec une vision plus transfrontalière, a révisé la stratigraphie des bassins de Sokoto et de l'Iullemeden et a jeté les bases des connaissances actuelles (Kogbe 1981, 1991; Kogbe & Burollet 1990). Des revues couvrant l'ensemble du continent ont été préparées par Lang, Moody et leurs collègues (Lang et al. 1990 ; Moody & Sutcliffe 1991 ; Moody 1997). Pour des fins hydrogéologiques, un résumé a été préparé à l'occasion d'un atelier de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) à Cotonou (tableau 5). Il y a eu aussi d'autres aperçus stratigraphiques comme, par exemple, celui de Moumouni et al (2016), ainsi que ceux figurant dans la littérature grise, des thèses de doctorat et des rapports (FAO 1970; Anderson & Ogilbee 1973; JICA 1990; OSS 2011; ANTEA Group & JMB Consult 2012). Pour le Bassin de Kandi, le cadre stratigraphique développé par Alidou et ses collaborateurs (Alidou & Lang 1983; Alidou 1987; Alidou et al. 1991), et révisé par Konaté (Konaté 1996; Konaté et al. 2003a), a été adopté.

Le cadre stratigraphique unifié se présente sous la forme d'une légende générale annexée pour chaque unité géologique (cf. Annexe III, Tableau 11). Cette légende générale juxtapose les éléments de légende des cartes originales consultées et de la carte harmonisée développée, permettant ainsi une comparaison des codes d'abréviation et des descriptions lithologiques. Reliée à un diagramme chronostratigraphique (Tab. 2), la légende générale synthétise les informations disponibles tant au niveau national qu'à celui de la zone d'étude (cf. aux exemples se rapportant au Continental Hamadien, Tab. 3, et aux Formations Paléozoïques de Wéré/Kandi, Tab. 4). Lors de l'atelier de AGES sur la *Situation Actuelle des Piézomètres et des Cartes Thématiques dans le Bassin du Niger*, tenu en mai 2015 à Niamey, un projet de légende générale a été discuté avec les représentants de l'Autorité du Bassin du Niger, de la *Direction Générale des Ressources en Eau du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement* du Niger, ainsi que des Structures Focales Nationales (SFN) des neuf pays membres de l'Autorité du Bassin du Niger.

Tab. 2 : Aperçu stratigraphique

Chronostratigraphie				Lithostratigraphie					
Éré	Systeme	Série	Étages	Environment		Group	Formation		
				(Kilian, 1931)	Transgressions				
Cénozoïque	Quaternaire	Holocène			terrestre	Dépôts quaternaires	Dépôts éoliens		
		Pléistocène / Holocène					Dépôts fluviales récentes		
							Dépôts alluvial et fluvial anciennes		
	Néogène	Pliocène						Discordance / Hiatus	
		Miocène							
	Paléogène	Oligocène			Continental Terminal	terrestre, par fois lacustre	Continental Terminal	Continental Terminal 3: Grès argileux du Moyen-Niger	
								Discordance / Hiatus	
									Continental Terminal 2: Série argilo-sableuse a lignites
									Continental Terminal 1: Série sidérolithique de l'Adar Douchi
		Eocène inférieur						Continental Terminal 1: Complexe de base (Conglomérats)	
								Discordance / Hiatus	
	Paléocène / Éocène			Série hamadienne	marine	4. & 5. transgressions	Sokoto (Garadawa)	Gamba (Barmou)	
								Schistes papyracés supérieurs	
								Kalambaina (Tamaské)	
	Paléocène						Dange Formation (Kao)		
							Schistes papyracés inférieurs		
		Danien / Montien					Discordance / Hiatus		
Mésozoïque	Crétacé	Crétacé supérieur	Maestrichtien	Série hamadienne	marine	3. & 4. transgressions (Libyceras)	Rima (Majja)	Wurno (Im'Wagar)	
									Upper Sandstones
									Dukamaje (Farin Douchi)
									Mosasaurus shales
								Taloka (Alambanya)	
								Lower Sandstones	
	Crétacé inférieur	Albien	Continental intercalaire	terrestre	1. & 2. trans. (Nigericeras, Niger)	Continental Intercalaire/Hamadien		Discordance / Hiatus	
		Aptien						Sendé / IIIo / Gundumi Formations	
		Barrémien						Nupe Sandstone	
	Jurassique								
Trias									
Permien									
Carbonifère				Série post-tassillienne	transgression marine			Discordance / Hiatus	
Dévonien									
Paléozoïque	Ordovico-silurien			Couverture tassillienne	transgression marine	Grés de Kandi / Zougou	Kandi B		
							Kandi A		
	Cambrien			Continental de base	fluvio-glaciaire (terrestre)	Wéré	Wéré B		
						Wéré A			
							Discordance		
Néoprotérozoïque					Pan-African orogénèse II		Trans-Saharan mobile belt: Dahomeyen, Nigerian shield, Pharusien/Hoggar-Iforas, Quagarta, Anti-Atlas, Rokelides		
Mésoprotérozoïque					Pan-African orogénèse I		Kibaran orogénèse		
Paléoprotérozoïque					Éburnéen orogénèse		Suggarien, Liptakoién, Birimien and Tarkwaién sediments		
Archéen					Cratons		Reguibat Shield, Leo-Man Shield		

Tab. 4 : Extrait de la légende générale : Agrégation des formations Paléozoïques du Bassin de Kandi (Groupes Wéré & Kandi)

Stratigraphie	Konate (1996): Carte géologique du Bassin Paléozoïque de Kandi		Société Istituto Ricerche Breda (1989): Notice Explicative de la Carte Géologique à 1/200.000 Feuilles: Karimama, Porge, Kandi, Malanville		Technoexport (1994) Carte de Géologie et des Minéraux utiles: Dunkassa (NC-31-X), 1:200.000		Lithologie harmonisée								
	Érè	Système	Group	Clé	Formation	Lithologie	Clé	Formation	Lithologie	Formation	Lithologie (fr)	Environment			
Paléozoïque	Ordovico-silurien	Kandi	Kb	K3	Formation Kandi supérieure	Grès fins, silt, argiles. Dépôts parallèles de lac (plages, deltas et varves lacustres) et de mer peu profonde à <i>Cruziana</i> et <i>Arthropycus</i> .	PZ _{1,2} Z ₃	Zougou	Siltstone et grès ferrugineux	Kandi B	Siltites intercalé avec grès fins, argiles; traces à <i>Cruziana</i> ; structures de tempestites; stratification entrecroisée.	upper offshore environment (hummocky cross-stratified sandstones), clay and sand, marine environment			
					Formation Kandi inférieure	Grès moyens, silt, argiles. Dépôts de plaine d'inondation.	PZ _{1,2} Z ₂		Siltstone, plus rarement grès à grain fin; toujours Ka, parfois (centre) Kb	Kandi A	Grès fins o/ou siltstone, argiles, litage sigmoïde ou ondulé; traces à <i>Harilania/Arthropycus</i>	Milieu para-lac (lac, delta & mer peu profonde), shoreface barrier & tidal environment			
			Wéré	Wb		K1	Wéré-Goungoun	Conglomérats, brèches, grès avec silt et argiles subordonnés. Dépôts de cône d'alluvions	PZ _{1,2} Z ₁		Grès à graulométrie variable, souvent graveleux, intercalé de micropoudingue	Wéré B	Grès grossiers à moyens microconglomératiques, litages obliques plans et en auges	Dépôts de plaine d'inondation & dynamique fluvial, braided river sediments	
Wéré	Wa		K1 dots	Wéré-Goungoun	Conglomérats, brèches, grès avec silt et argiles subordonnés. Dépôts de cône d'alluvions. Conglomérats et brèches prédominantes (en pointillé)	PZ _{1,2} W	Wéré	Grès à graulométrie variable, souvent graveleux, intercalé de micropoudingue	Wéré A	Conglomérats, brèches, grès avec silt et argiles subordonnés. Dépôts de cône d'alluvions. Conglomérats et brèches prédominantes (en pointillé)	Dépôts de cône d'alluvions & dépôts glaciaux (tillites), glacioluvial outwash, periglacial sediments				

Tab. 5 : Aperçu stratigraphique élaboré à l'occasion d'un atelier de l'AIEA (Cotonou, 2014)

Age	Algérie		Mali		Niger		Bénin		Nigeria										
	Groupe	Formation	Groupe	Formation	Groupe	Formation	Groupe	Formation	Groupe	Formation									
Quaternaire	Quaternaire	Alluvions de fonds de vallées	Quaternaire	Alluvions, dunes Aquifère	Quaternaire	Alluvions, dunes Aquifère	Quaternaire	Sables fins, Aquifère	Quaternary	Alluvium Aquifère									
Tertiaire	Pliocène Miocène Oligocène Eocène Paléocène	Discordance	Continental Terminal	sablo – gréseux et argileux Aquifère	Continental Terminal CT ₃	Série des grès argileux du Moyen Niger (Aquifère)	Continental Terminal	conglomérats brèches, microconglomérats, grès, silt et argiles Aquifères	Continental Terminal	Kalamaina									
						Aquitard													
					Continental Terminal CT ₂	Série argilo-sableuse à lignite - Aquifère													
						Aquitard													
					Continental Terminal CT ₁	Série Sidérolithique - Aquifère													
Crétacé - Jurassique	Crétacé Supérieur	Discordance	Eocène moyen	schistes		Schistes papyracés supérieurs - Aquitard	Discordance		Sokoto	Kalamaina									
					Paléocène terminal	calcaire et marno – sableux avec niveau phosphaté					Formation de Garadawa -	Calcaires - Aquifère							
					Paléocène inférieur	calcaire - sable					Paléocène marin	Schistes papyracés inférieurs - Aquitard							
					Maëstrichtien - Cénomanién	grès – argileux Aquifère					Grès supérieur	Grès d'Im Wouagar							
					Crétacé Inférieur							Continental intercalaire	Grès quartzitique, micro conglomératique, arkoses, sable, argiles Tégama Aquifère	Sénonien Moyen	Argiles de Douthi Zana - Aquitard	Grès de Kandi	Grès grossiers, silt et argiles, Aquifères	Continental intercalaire / Continental Hamadien	Gundumi & Ilo Aquifère
														Sénonien Moyen (Grès Inférieur)	Silt de Bouza				
														Sénonien inférieur	Argiles du Sénonien Inférieur - Aquitard				
														Turonien	Calcaires blancs				
														Cénomano-turonien	Argiles Sénomano-turonien - Aquitard				
					Trias-Jurassique						Permen Trias Jura	Grès aquifères	Néocomien	Argiles de l'Irhazer	Grès de Tégama			?	
Paléozoïque	Permien			Trias-Jurassique	Grès d'agadez Serie d'Izegouandane														
					Namurien	Serie de Tagora													
					Viseen	Serie de Talack et grès de Farazet													
				Devonien	Grès aquifères	Devonien	Grès d'Amesgueur												
Précambrien	Précambrien	Précambrien	Précambrien	Birimien	Précambrien	Précambrien	Précambrien	Panafricain	Précambrien	Précambrien									

4.2 Attribution lithologique

L'harmonisation des classes lithologiques comprend à la fois la généralisation thématique et sémantique et l'agrégation. Duscher et al. (2015) a proposé un schéma d'agrégation lithologique hiérarchique pour harmoniser les informations lithologiques des 30 feuilles cartographiques de la *Carte Hydrogéologique Internationale de l'Europe 1/1 500 000* (IHME1500). Ce schéma de classification hiérarchique et taxonomique permet une différenciation sur cinq niveaux d'agrégation (cf. Annexe IV, Tab. 12). Le niveau supérieur le plus élevé fait la distinction entre les roches consolidées, non consolidées et hybrides (partiellement consolidées). Les niveaux suivants sont différenciés en fonction de leurs composantes : principales, secondaires et accessoires, séparées par une virgule. Les composantes subordonnées sont reliées par "avec" ("with"); "et" ("and") est utilisé pour séparer la lithologie consolidée et non consolidée au niveau des classes hybrides.

Les descriptions lithologiques disponibles dans les légendes des cartes ont été enrichies par des informations complémentaires tirées de la documentation et classées selon le schéma d'agrégation lithologique de l'IHME1500. La catégorisation au-delà du niveau d'agrégation 3 de l'IHME est ambiguë

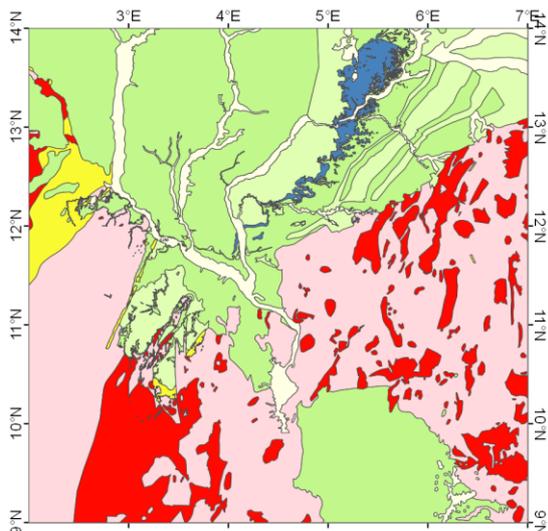
en raison du manque d'informations détaillées et dépend principalement des connaissances et de la décision de l'expert.

L'avantage du système de classification lithologique IHME1500 constitue également son principal inconvénient. Tout en permettant une unification des informations, il conduit à la perte des données spécifiques requises pour la différenciation des strates. Ces informations sont souvent véhiculées à travers une description de faciès souple et des termes géologiques (till vs gravier, argile bauxitique vs argile stratifié). Pour avoir un aperçu de la variation lithologique dans la zone d'étude, le niveau d'agrégation 3 est le plus approprié et il comprend, dans la zone d'étude, 16 classes différentes. Toutefois, à ce niveau, il n'est pas possible d'établir une distinction claire entre les principaux types de sédiments continentaux, d'où l'incapacité de faire une distinction sur la base de la lithologie cartographique entre aquifères et aquitards. Pour les niveaux inférieurs, la subjectivité des experts augmente considérablement, tandis que l'augmentation rapide du nombre de classes complique la présentation sur une carte.

Les cartes de la Fig. 13 montrent la distribution résultante des classes lithologiques pour les niveaux 4, 3 et 2 du système d'agrégation de l'IHME1500.

Tab. 6: Niveaux d'agrégation lithologique de l'IHME1500. Pour chaque niveau d'agrégation, le tableau présente le nombre de classes lithologiques se trouvant dans la zone d'étude comme aussi exemples de dénomination pour chacune des trois classes du niveau d'agrégation N°5

Niveau d'agrégation	N° de classe	Exemples de dénomination de classe		
Niveau 5	3	Non consolidées	Partiellement consolidées	Consolidées
Niveau 4	8	Sédiments grossiers	Roches clastiques et sédiments fins	Roches clastiques
Niveau 3	16	Sable	Grès et sable	Grès
Niveau 2	28	Sable, gravier	Grès et sable, argile	Grès, argilite
Niveau 1	37	Sable, gravier, silt	Sable, argile et grès	Siltite, argilite, grès

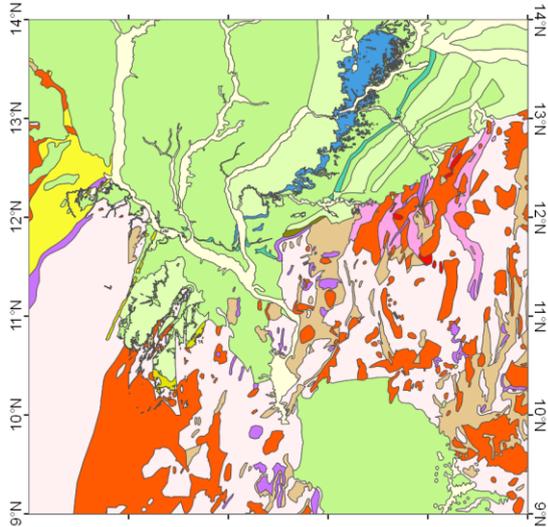


Classes lithologiques:

selon le cinq niveaux d'agrégation lithologiques de l'IHME1500 (Duscher et al., 2015)

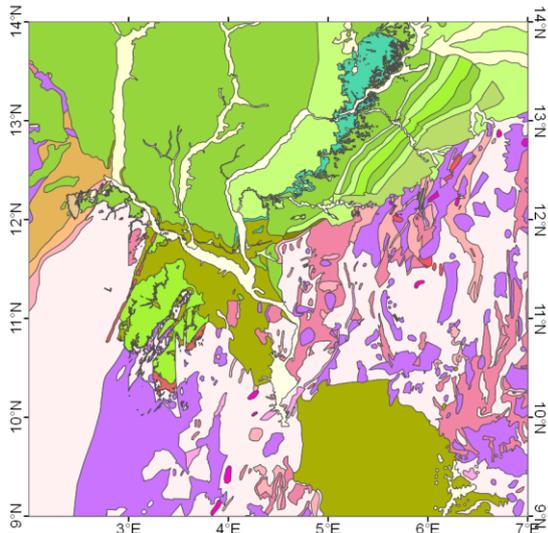
a) Lithologie - IHME niveau 4

- Non consolidé**
 - Coarse sediments
- Partiellement consolidé**
 - Clastic rocks and fine sediments
 - Clastic rocks and coarse sediments
 - Calcareous rocks and fine sediments
- Consolidé**
 - Clastic rocks
 - Metamorphic rocks
 - Magmatic rocks



b) Lithologie - IHME niveau 3

- Non consolidé**
 - Sands
- Partiellement consolidé**
 - Claystones and clays
 - Sandstones and clays
 - Sandstones and sands
 - Conglomerates and sands
 - Limestones and marls
 - Marlstones and clays
- Consolidé**
 - Conglomerates
 - Sandstones
 - Shales
 - Gneisses
 - Phyllites
 - Quartzites
 - Schists
 - Plutonic rocks
 - Volcanic rocks



c) Lithologie - IHME niveau 2

- Non consolidé**
 - Sands, clays
 - Sands, gravels, clays
- Partiellement consolidé**
 - Claystones and clays
 - Sandstones and clays
 - Sandstones and clays, sands
 - Sandstones and sands, clays
 - Sandstones and sands
 - Sandstones, conglomerates and sands, clays
 - Conglomerates, sandstones and sands, gravels
 - Marlstones, sandstones and clays
 - Limestones and marls
- Consolidé**
 - Conglomerates, sandstones
 - Sandstones
 - Sandstones, claystones
 - Shales, sandstones
 - Shales
 - Gneisses, mica schists
 - Phyllites, schists
 - Quartzites
 - Quartzites, sandstones
 - Schists, gneisses
 - Serpentinities
 - Plutonic rocks (acid)
 - Plutonic rocks (basic)
 - Volcanic rocks
 - Volcanic rocks (acid)
 - Volcanic rocks (basic)
 - Volcanic rocks, pyroclastic rocks

Fig. 13 : Niveaux d'agrégation lithologiques 4, 3, et 2 selon le schéma de classification lithologique de l'IHME1500 (Duscher et al. 2015).

4.3 Attributs géologiques

Les attributs géologiques des unités sédimentaires sont fournis à titre de jeux de données numériques auxiliaires. Les informations sont compilées à partir de cartes, de notices explicatives et de documents. Les données disponibles permettent une catégorisation générale des attributs :

- consolidation (non consolidés/partiellement consolidés/consolidés) ;
- porosité (poreux, mixtes, fissurés) ;
- Type d'aquifère (aquifère/aquitard).

Pour les attributs ci-dessus, seules des informations locales ou d'ordre général sont disponibles :

- le milieu de dépôt ;
- l'épaisseur des strates ;
- le potentiel économique ;
- la présence de caractéristiques karstiques ;
- la fracturation et ;
- la cimentation.

4.3.1 Consolidation/Cimentation

Le niveau de consolidation—non consolidés, partiellement consolidés, non consolidés—est requis pour l'agrégation dans le système de classification lithologique IHME1500. La classification en termes de consolidation ou de partielle consolidation est rarement mentionnée de façon explicite dans les légendes des cartes ou les rapports et descriptions lithologiques sont souvent biaisés par les conditions d'affleurement et par l'expertise du géologue praticien. En général, les descriptions d'affleurement et de forage des gisements terrestres font état de matériaux faiblement cimentés, comme le reflète l'utilisation de termes tels que sable ou argile, au lieu de grès ou d'argilite. De manière explicite, la JICA (1990, Tab. 4-1) décrit toutes les formations tertiaires et crétacées de la zone d'étude comme étant « semi-consolidées ».

Les strates géologiques affleurant à l'intérieur de la zone d'étude n'ont jamais été enfouies en profondeur et disparaissent progressivement au fur et à mesure que l'on avance vers les socles du Nigeria et du Bénin. Le Continental Terminal 3 comprend des sédiments déposés avant le début du régime d'érosion actuel et n'a pas été enfoui du tout. Là où il y a eu affleurement et où ils représentent la lithologie de surface actuelle, les strates stratigraphiques sous-jacentes (Continental Terminal 2 & 1, Groupes Sokoto & Rima, et le Continental Hamadien) ne sont couvertes que par un mort-terrain relativement mince et présentement érodé. Par conséquent, la cimentation par l'argile, le fer et, par endroit, la silice constitue les principaux processus de consolidation, tandis que le compactage est plutôt faible en raison du mort-terrain limité.

Les sédiments quaternaires sont classés comme non consolidés. Les dépôts terrestres plus anciens ont été classés comme partiellement consolidés. Les sédiments chimiques d'origine marine Paléocène-Eocène du Groupe Sokoto (marnes, schistes, calcaires) sont classés comme consolidés. Le Groupe Rima, composé de sédiments chimiques/clastiques mixtes, est décrit ici comme étant partiellement consolidé.

4.3.2 Fracturation

Le degré de fracturation est rarement documenté dans les descriptions lithologiques. Des observations sur la fracturation/déformation tectonique sont signalées au niveau du Continental

Terminal 1 ; toutes les strates plus anciennes peuvent présenter de fracturation. L'attribut donne un résumé d'ensemble sur la fracturation et la déformation, mais il n'est ni exhaustif ni représentatif.

4.3.3 Porosité

Le type de porosité est déduit du degré de consolidation et de fracturation. La séquence récente de grès du Continental Terminal—bien qu'elle soit partiellement consolidée et cimentée—est toujours supposée être dominée par un écoulement poreux. En dépit des rapports fréquents d'articulations et de petites failles, les sédiments clastiques et chimiques des Groupes Sokoto et Rima sont classés comme milieux poreux et fissurés mixtes ou, dans le cas du calcaire ou du schiste, comme milieux fissurés. La fracturation devient plus importante dans les sédiments plus anciens (et plus consolidés). Les sédiments clastiques précambriens et le complexe de socle protérozoïque sont classés comme fracturés.

5 Harmonisation de la carte géologique transfrontalière

5.1 Prétraitement

5.1.1 Numérisation

Les Cartes Géologiques ont été numérisées par DGIS Service GmbH, Radeberg, Allemagne. Les données ont été fournies sous forme de shapefiles ESRI géoréférencés, comprenant toutes les informations géologiques pertinentes représentées sur les cartes, à l'exclusion des éléments topographiques.

5.1.2 Systèmes de coordonnées géographiques

Les cartes coloniales manquent généralement d'informations sur le système de coordonnées géographiques utilisé. Au début et au milieu du XXe siècle, on utilisait une multitude de systèmes de coordonnées géographiques, basé chacun sur un ellipsoïde, un point fondamental et des facteurs d'ajustement différents. Un résumé des données géographiques est fourni par Clifford pour le Bénin (Clifford 2003), le Nigeria (Clifford 2009) et le Niger (Clifford 2011). Vous pouvez gratuitement y accéder sur <https://www.asprs.org/asprs-publications/grids-and-datums>. On a assigné aux cartes géoréférencées les systèmes de coordonnées géographiques les plus probables (voir Tab. 7) avant leur re-projection dans le système commun de coordonnées géographiques *World Geodetic System 1984* (WGS84). La marge d'erreur possible d'attribution de système de coordonnées géographiques erroné varie de 80 m à plus de 150 m.

Compte tenu de l'époque de l'élaboration des cartes, le système de référence géographique « Point 58 » a été assumé pour les cartes du Nigeria de Greigert (1960) et de Greigert & Pougnet (1966). Ni la *Geological Survey of Nigeria map series*, ni celle des projets ArcGIS fournie par la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA) ne donne une précision sur le système de coordonnées utilisé—la dernière étant fournie dans un système de coordonnées géographiques non spécifié. Au vu de la date de publication, 1966, la *Geological Survey of Nigeria map series* est très probablement préparée à partir du système de référence géographique de « Minna ». Étant donné qu'il a été spécialement conçu pour les cartes nationales du Nigeria, on suppose qu'il en est de même pour les projets SIG actuels.

La carte du Benin de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b) et celle de Technoexport (1995b) se sont inspirées de la grille de la série de cartes *Carte de l'Afrique de l'Ouest* à l'échelle 1/200 000 de l'Institut Géographique National (IGN) de France basée sur l'ellipsoïde de Clarke 1880. On suppose qu'on a utilisé celle non spécifiée de Clarke 1880 (IGN)—EPSG 4011 pour ces séries de cartes.

5.1.3 Ajustement spatial

Les éléments topographiques tels les cours d'eau, les escarpements, les routes et les endroits représentés sur des cartes scannées correctement géoréférencées montrent souvent des écarts comparativement aux données topographiques actuelles issues des cartes topographiques, du Vector Map Level 0 (vmap0; NIMA (National Imagery and Mapping Agency), 2001) ou de Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org>). L'ajustement spatial du jeu de données raster scannées ou des données vectorisées à une carte de base topographique constitue une approche courante permettant de minimiser les décalages (systématiques) des données thématiques.

Tab. 7 : Systèmes de coordonnées géographiques attribués à des cartes géologiques géoréférencées avant la transformation en WGS84. (EPSG : European Petroleum Survey Group Geodesy)

Carte originale		Systèmes de Coordonnées Géographiques (SCG) attribués					
	Carte	SCG de la Carte	SCG / Point de Référence	Point fondamental	Année	Ellipsoïde	EPSG code
Niger	Greigert, J (1960) : Carte Géologique de Reconnaissance Dosso, 1/500.000. BRGM.	Néant	Point 58	À côté de Dosso 12°52'44.045''N 3°58'37.040'' E	1969 , IGN	Clarke 1880	4620
	Greigert, J & Pougnet, R (1966) : République du Niger. Carte géologique, 1/2 000 000. BRGM.	Néant					
Nigeria	Directorate of Overseas Surveys (1965) : Geological Survey of Nigeria, 1:250,000 Series, Sheet 2 Sokoto, Sheet 3 Shinkafe, Sheet 6 Birnin Kebbi	Néant	Minna 1928	Minna Base 9°38'09.000'' N 6°30'59.000'' E	1928	Clarke 1880	4263
	Directorate of Overseas Surveys (1966) : Geological Survey of Nigeria, 1:250.000 Series, Sheet 1 Tangaza, Sheet 7 Gummi	Néant					
	Nigerian Geological Survey Agency (2011a) : Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, Nigeria. Digital dataset	SCG non spécifié					
	Nigerian Geological Survey Agency (2011b) : Geological Map of Nigeria. Digital dataset	SCG non spécifié					
Benin	Akibou, et al. (1989) : Carte Géologique—Feuille Malanville (NC-31-XXII) & Karimama (ND-31-III/IV., Istituto ricerche Breda & OBEMINES.	Basé sur l'IGN	Clarke 1880 (IGN)	Basé sur la carte de l'IGN NC 31-XXII / ND-31-III/IV	-	Clarke 1880	4011
	Technoexport (1995) : Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa (NC-31-XVI). Conseil de la Géoscience, Pretoria.	Clarke 1880 proj. pas spécifié	Clarke 1880 (IGN)	-	-	Clarke 1880	4011
	Konate, M (1996) : Carte Géologique Générale du Bassin Paléozoïque de Kandi. Figure 15, Université de Bourgogne, Dijon-Niamey.	Néant	WGS 84	géocentrique	1984	WGS 84	4326

Pour la carte lithologique harmonisée ici présentée, il n'y a pas eu d'ajustement spatial exhaustif, et ce pour deux raisons principales :

1. l'absence d'une carte de base généralement acceptée n'a pas permis l'ajustement spatial aux caractéristiques topographiques (absence d'un jeu de données topographiques numériques exhaustif, faible précision et lacunes du VMAP0). Au cours du projet, la qualité et la couverture du jeu de données d'Open Street Map (OSM, openstreetmap.org) ont rapidement progressé. A ce jour, OSM fournit le jeu de données topographiques numériques le plus approprié et qui mérite d'être évalué pour des fins d'ajustement spatial ;
2. les cartes à petite et moyenne échelle (<1/250 000) disponibles sont fortement généralisées. La précision du contour et de l'emplacement des éléments topographiques n'est qu'indicative.

Compte tenu de leur petite échelle et du faible niveau de détail sur la région de l'étude, les cartes de Greigert (1960), de Greigert et Pougnet (1966) et de Konaté (1996) n'ont pas été spatialement ajustées. La série de cartes au 1/200.000 de la Directorate of Overseas Surveys (1965a, 1965c, 1965b, 1966a ; 1966a), la série de cartes de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b), ainsi que la carte de Technoexport (1995b) sont raisonnablement bien géoréférencées et il ne s'est pas avéré nécessaire de procéder à un ajustement spatial.

5.2 Couches de revêtement

Les couches de revêtement sont des unités géologiques superficielles qui sont supposées sèches ou d'importance négligeable en matière d'évaluation hydrogéologique régionale. En raison de leur faible étendue dans l'espace, de leur présence localisée ou de leur épaisseur généralement faible, les couches superficielles n'abritent pas des ressources en eaux souterraines qui leur sont propres. Dans la zone d'étude, on distingue trois types de couches de revêtement : des dépôts de sable éolien quaternaires, des vestiges du Continental Terminal et des cuirasse ferrugineuses ou latéritiques (« ferricretes »).

5.2.1 Couches de revêtement éoliennes quaternaires

Les dunes éoliennes quaternaires sont classées comme couches de revêtement et ne sont pas incluses dans le jeu de données géologiques solides. Les couches de revêtement éoliennes comprennent à la fois les dunes et les terrains de sable (ergs) actifs et anciens couvrant de vastes régions dans la partie nord du Niger et du Nigeria. De vastes étendues de couches de revêtement éoliennes—en particulier l'unité *erg ancien à dunes longitudinales et non-orientées*—sont cartographiées sur les cartes du Niger. (Greigert 1960; Greigert & Pougnet 1966). Au Nigeria, de petites zones de sable éolien (« aeolian sands ») sont représentées sur la série de cartes publiées par la Directorate of Overseas Surveys (1965a, 1965c, 1966a; 1966). En raison de leur présence généralement localisée et de leur manifestation peu profonde, les dépôts superficiels de sable éolien sont considérés comme secs et ne seront pas retenus sur la carte géologique de roches solides. Les zones respectives ont été manuellement attribuées en fonction de la géologie solide environnante : au Niger, principalement, le Continental Terminal 3, au Nigeria, le plus souvent, les affleurements de la série de sédiments crétacés.

5.2.2 Vestiges du Continental Terminal

À la fin du Miocène, une nappe superficielle de sédiments du Continental Terminal couvrait la majeure partie de la zone d'étude s'étendant bien à l'intérieur du Nigeria et dans le Bassin de Kandi au Bénin. De nos jours, ces gisements sont, pour la plupart, érodés. Les vestiges restants se manifestent sous forme de mesas et de buttes, et sont généralement trop petites pour abriter leurs propres aquifères. Les manifestations isolées du Continental Terminal au sud du fleuve Niger au Bénin et au Nigeria sont classées comme couches de revêtement. Le vaste plateau continental contigu au sud de Karimama est supposé être assez grand pour abriter ses propres ressources en eau souterraine.

5.2.3 Plateaux ferrugineux

La couche supérieure des sédiments du Continental Terminal est généralement consolidée par une cuirasse ferrugineuse (« ferricrete ») fortement enrichi en fer incorporant, généralement, des couches oolithiques sédimentaires. Les cuirasses latéritiques, par contre, se manifestent à des endroits topographiques similaires dans les socles. Sur les feuilles *Malanville* et *Kandi*, l'Istituto Ricerche Breda fait la distinction entre le Continental Terminal dans le bassin tectonique de Kandi et les *Plateaux cuirasses* dans les socles. Les cuirasses représentent probablement les étapes de l'Eocène au Pliocène (S2-S4) des paléosurfaces post-africaines intermédiaires (Chardon et al. 2016). Les cuirasses indurés sont d'importantes caractéristiques hydro(-géo)logiques de surface et sont cartographiés comme étant d'indépendantes couches de revêtement.

5.3 Géologie solide

5.3.1 Dépôts alluviaux quaternaires

Les sédiments des vallées alluviales forment souvent des aquifères prolifiques près de la surface du sol et constituent, malgré leur faible profondeur et leur distribution restreinte, d'importants réservoirs d'eau souterraine, en particulier dans les zones désertiques. Les sédiments alluviaux ont été inclus sur la carte lithologique bien que de nombreux paléovallées (exemple des Dallols au Niger) puissent ne pas abriter leurs propres ressources en eau souterraine, mais former la partie supérieure de systèmes aquifères plus étendus alimentés par les eaux souterraines artésiennes du Continental Terminal 1 et du Continental Terminal 2.

Les observations des méandres et des lacs en croissant indiquent un milieu de plaines d'inondation actives. Les unités de géologie solide faisant saillie dans les grandes plaines d'inondation du Niger et de ses affluents ont été adaptées à la main et l'étendue des sédiments alluviaux a été ajustée sur la base de l'imagerie satellitaire Landsat (NASA EOSDIS Land Processes DAAC 2018) et du modèle altimétrique numérique SRTM v3 (NASA Jet Propulsion Laboratory 2013).

Sur la rive gauche du fleuve Niger, au Niger et au Nigeria, on note la présence de paléovallées de plusieurs kilomètres de large. Cependant, les dépôts alluviaux du Dallol Maouri indiqués sur la *Carte Géologique de Reconnaissance : Dosso* (Greigert 1960) ne sont cartographiés ni sur la *Carte Géologique de la République du Niger* (Greigert & Pougnet 1966), ni sur les cartes du Nigeria. Les alluvions tronquées pour les limites des cartes (par exemple les affluents du Dallol Maouri) ont été étendues manuellement au Nigeria, à l'aide de l'imagerie satellitaire et du modèle altimétrique numérique. Au Nigeria, la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA 2011a, 2011c) a cartographié plusieurs éléments alluviaux importants près de Yaldu, Balle et Tangaza qui ne figurant pas sur la *Geological Survey of Nigeria map series* de la Directorate of Overseas Surveys (1965c, 1965a, 1965b, 1966a, 1966). Il est peu probable que ces dépressions peu profondes abritent de vastes sédiments alluviaux et leur étendue a été réduite et ajustée à la main à l'aide du modèle altimétrique numérique (Fig. 14).

Sur la rive droite du fleuve Niger, au Bénin et au Nigeria, les affluents drainent des zones où les précipitations sont plus importantes et plus fiables. Des cours d'eau permanents et saisonniers montrent des canaux définis (mais plus étroits) qui n'ont pas été explicitement cartographiés sur les cartes de Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) et de Konaté (1996). Technoexport (1995b), par contre, a cartographié les sédiments de vallée de façon cohérente. Par conséquent, les vallées et les couches alluviales n'ont pas été cartographiées de façon exhaustive sur toute l'étendue de la zone d'étude. Des sédiments de vallée discontinus peuvent être représentés au sud du 3°N.

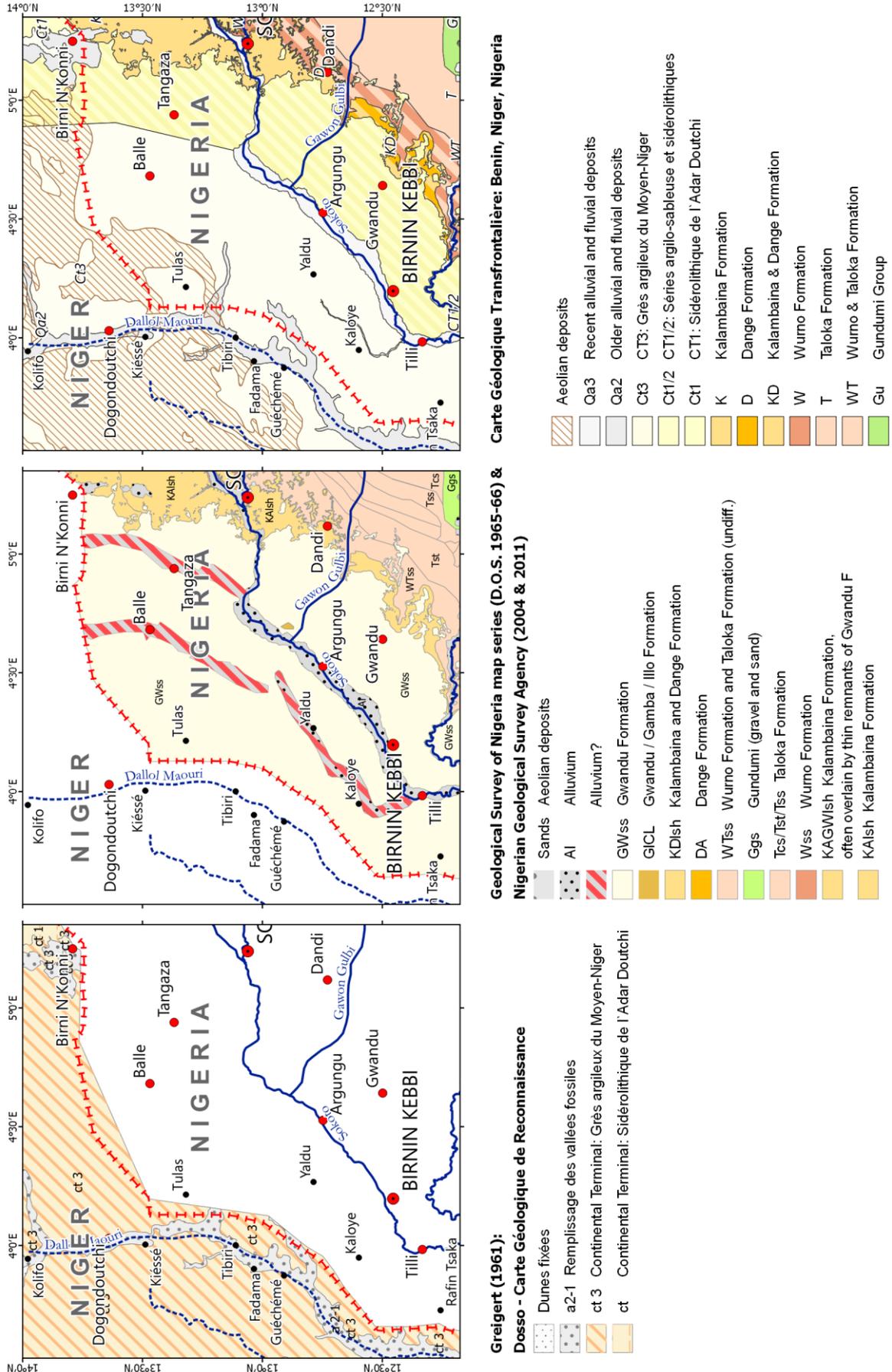


Fig. 14 : Ajustement manuel des dépôts alluviaux le long du Dallol Maouri et près de Birnin Kebbi et Birnin N'Konni. Élimination des unités non pertinentes et/ou non fiables proposées par la NGSA (2011a, 2011b).

5.3.2 Continental Terminal

Continental Terminal 1 et Continental Terminal 2

Les affleurements du Continental Terminal se limitent au Continental Terminal 3, au Continental Terminal 1 et au faciès conglomératique précoce *Complexe de base du Continental Terminal*. La présence en surface du Continental Terminal 2 n'a pas été signalée dans la zone d'étude. Au Niger, on pense que le Continental Terminal 2 disparaît progressivement entre Dioundiou (FAO 1970, p. 19) et Yelou (Guero 2003, p. 42) ; au Nigeria, il n'a pas été cartographié de manière explicite. La FAO a publié plusieurs coupes transversales le long et à travers le Dallol Maouri (cf. Annexe V) et a généralement suggéré un calage du Continental Terminal 2 entre Yelou et Bengou dans la paléovallée du Dallol Maouri inférieur (FAO 1970; Coupe 1, Planche 2). De façon générale, cela est conforme à l'affleurement du Continental Terminal 1 sur les escarpements autour de Bengou. Plus au sud, les coupes transversales de la FAO (1970) indiquent—sur la base de la coupe transversale—des occurrences du CT3, (CT ?), CT1 sur les collines entre Gaya et le Dallol Maouri, en contradiction avec des cartes géologiques disponibles faisant cas du Continental Hamadien.

La triade Continental Terminal 1, 2 et 3, couramment retrouvée au Niger, n'a pas été utilisée pour décrire la formation correspondante de Gwandu au Nigeria. Bien qu'il soit communément accepté que la Formation de Gwandu se subdivise en membre supérieure non consolidée, en membre moyenne d'argile en consolidation et en zone de sable inférieure consolidée (Anderson & Ogilbee 1973 ; JICA 1990), aucune des cartes existantes du Nigeria n'a osé présenter une quelconque subdivision superficielle de la formation de Gwandu au Nigeria (D.O.S. 1965c ; Anderson & Ogilbee 1973 ; Kogbe 1981 ; JICA 1990 ; NGS 2011a, 2011c). D'après les *Hydrogeological Cross Sections for the Sokoto basin* (JICA 1990 ; Fig. 8, Transect C-C'), la rivière Sokoto forme une ligne de partage entre le membre supérieure (CT 3 ?) à l'ouest et le membre moyenne riche en argile (CT 2 ?) à l'est (cf. Fig. 16). On suppose que les affleurements du membre basale se manifestent uniquement le long d'une petite frange recouvrant la Formation de Kalambaina du Groupe Sokoto. La carte harmonisée montre un Continental Terminal 3 (= upper member) continu au Niger et au Nigeria et cartographie les zones à l'est du fleuve Sokoto comme CT 1-2 indifférencié pour refléter l'absence de différenciation spatiale entre le CT 1 et le CT 2 sur le territoire du Nigeria (Fig. 14, Fig. 17). Entre le fleuve Sokoto et le Dallol Maouri, la carte harmonisée suit Greigert & Pognet (1966) qui présente une bande continue du Continental Terminal 1 affleurant sur une frange le long de la rive nord du fleuve Niger et qui se poursuit au Nigeria (Fig. 15).

L'harmonisation géométrique des cartes nationales de la Nigerian Geological Survey Agency (2011c, 2011a) et de Greigert & Pognet (1966) est confrontée à une rupture stratigraphique insatisfaisante des unités du Continental Terminal et de l'Eocène-Paléocène en raison d'interprétations divergentes sur les séries de cartes nationales. Au lieu que ça soit au niveau de la frontière Niger-Nigéria, la rupture a été déplacée vers le fleuve Sokoto, donnant ainsi plus de crédit à la stratigraphie d'affleurements plus intuitive de Greigert & Pognet (1966).

D'autres différences majeures dans l'étendue du Continental Terminal 1 sont observées en dehors de la zone d'étude, le long de la frontière nigéro-nigérienne, près de Birni-N'Konni. Là où Greigert & Pognet (1966) ont cartographié le Continental Terminal 1, les levés de terrain de la Directorate of Overseas Surveys (D.O.S.) indiquent de grandes zones de la formation affleurante de Kalambaina. À ce niveau, la série des cartes détaillée et basée sur le travail de terrain de la Directorate of Overseas Surveys (1965a) est jugée plus fiable que la géométrie probablement déduite proposée par Greigert & Pognet (1966).

Sur la rive droite du fleuve Niger, les sédiments du Continental Terminal n'apparaissent que de façon fragmentaire, à l'exception des grandes zones autour de Kirimama, où des dépôts du Continental

Terminal se forment à l'extérieur du Bassin de Kandi et recouvrent plus ou moins directement le socle, séparés uniquement par de minces couches de sédiments paléozoïques et créacés par endroit. La position stratigraphique n'a pas été examinée en profondeur. Alors que Greigert (1961b), sur sa première carte intitulée *Carte Géologique de la Feuille de Dosso*, n'arrive pas à distinguer les faciès du Continental Terminal, la *Carte Géologique de Reconnaissance du Bassin des Iullemmeden* assimile le Continental Terminal 1 avec la présence généralisée d'un *Complexe de base* (Greigert 1961a). La toute dernière carte « *Carte Géologique : République du Niger* » montre le Continental Terminal 3 (Greigert & Pougnet 1966).

Au sud du Bénin, les fragments du Continental Terminal deviennent de moins en moins fréquents et de moins en moins profonds. Aucune présence du Continental Terminal n'a été signalée au sud de Kandi et de Lété. Aucune subdivision ou corrélation avec le Continental Terminal 1 ou 3 n'a été annoncée pour ces vestiges largement érodés du Continental Terminal au Bénin. Pour la carte harmonisée, les limites du Continental Terminal (indifférencié) au Bénin correspondent avec ceux de la cartographie complète de Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) adoptée plus tard par Konaté (1996).

Complexe de base du Continental Terminal

La toute première carte, « *Carte Géologique de Reconnaissance Dosso* », 1/500.000 (Greigert 1960), fait la distinction entre le *Continental Terminal 1* (CT 1), le *Continental Terminal—Complexe de base* (CT b) et un *Continental Terminal* (CT) indifférencié (non étudié ?) sur la rive droite du fleuve Niger. Sur leur carte intitulée « *République du Niger—Carte Géologique* », 1/2.000.000, Greigert & Pougnet (1966) représentent schématiquement (signature croisée) une étroite bande du *Continental Terminal – Complexe de base* (CT 1 c) le long des contreforts des falaises bordant les rives droite et gauche du fleuve Niger.

En ce qui concerne la partie nigérienne de la carte harmonisée, la différenciation supplémentaire entre le *Continental Terminal 1* (CT 1) et un *Continental Terminal 1—Complexe de base* (CT 1-b), comme suggérée par Greigert & Pougnet (1966), a été adoptée. Les contours ont été ajustés aux limites lithologiques plus détaillées entre CT b et Alluvium, correspondant respectivement au CT b et au CT3, comme indiqué par la précédente carte de Dosso à l'échelle 1/500 000 (Greigert 1960). Les limites entre la plaine d'inondation alluviale et les affleurements rocheux ont été corrigées à partir de données altimétriques numériques et de l'imagerie satellitaire. Au sud du fleuve Niger, le *Continental Terminal 1—Complexe de base* a été omis. Ici, la position stratigraphique peu claire du Continental Terminal indifférencié au sud du fleuve Niger, la non connaissance de l'étendue du Continental Hamadien et l'éventuelle présence locale du *Complexe de base* nécessitent un travail de terrain sur la stratigraphie.

La plus récente carte du Bassin de Kandi (Konaté 1996, Fig. 15) met l'accent sur les sédiments paléozoïques et ne montre que de façon périphérique la rive nord du fleuve Niger. Néanmoins, il fournit une géométrie détaillée du Continental Terminal indifférencié et des affleurements des roches du Paléozoïque. Ceux-ci ont été jugés plus appropriés et ont incorporés au besoin (Fig. 15).

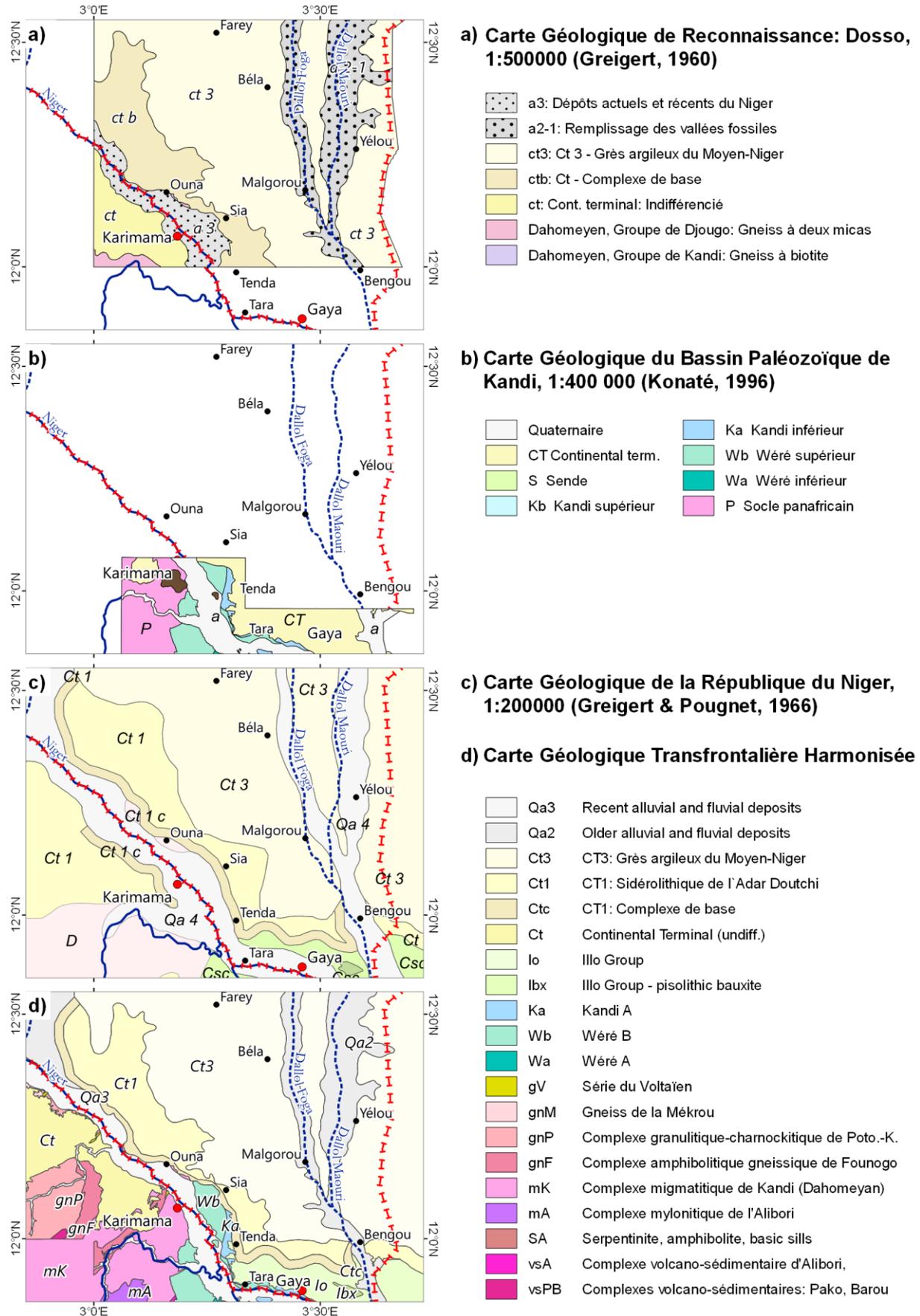


Fig. 15 : Harmonisation du Continental Terminal 1 & du Complexe de base le long du fleuve Niger

5.3.3 Groupe Sokoto (Gamba/Kalambaina/Dange F.) & Groupe Rima (Wurno/Dukamaje/Taloka F.)

Non loin de la rivière Sokoto, la **Paléocène Zone à Operculinoïdes et à Lockhartia haimeï**, Geigert & Pougnet (1966), décrite au Nigeria comme le Groupe Eocène-Paléocène de Sokoto (Formations de Gamba, Kalambaina, Dange), s'étale entre les formations Crétacées d'Illo-Gundumi (le Continental Hamadien au Niger) et le Continental Terminal du Miocène.

Sur les premières cartes de Jones (1948) et la série de cartes de la Nigerian Geological Survey Agency (D.O.S. 1965c), les affleurements du Groupe Sokoto se limitent aux zones se trouvant au nord du fleuve Zamfara. Sur les cartes ultérieures de la Nigerian Geological Survey Agency (1965), Greigert & Pougnet (1966) et Dessauvage (1974), la Formation de Kalambaina (ou *la Paléocène Zone à Operculinoïdes et à Lockhartia haimeï sensu* Geigert & Pougnet (1966) s'étend plus au sud sur la rive droite du fleuve Sokoto près de Dakingari.

Cependant, les récentes compilations de la Nigerian Geological Survey Agency (2011c, 2011a), n'ont pas retenu les géométries des cartes originales. Les informations spatiales de la *Geological Map of Nigeria* et de la *Geological and Mineral Resources Map of Kebbi* présentent des géométries divergentes quant aux unités géologiques et manquent souvent d'éléments de légende et/ou disposent de légendes peu fiables. Par exemple, des différentes descriptions de l'unité G1c1 comme "Sandstones and clays of the Gwandu Formation" sur la *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c) et comme "Shales of the Gamba Formation" sur la *Geological and Mineral Resources Map of Kebbi* (NGSA 2011a) jettent le doute sur l'étendue spatiale et la fiabilité thématique de ladite unité. La première description correspond à la Formation de Gwandu (Gwss), la seconde suggère l'extension du Groupe Sokoto. L'abréviation elle-même suggère, cependant, une unité "Gundumi-Illo clay" et correspondant, peut-être, à l'argile bauxitique cartographiée par Jones (1948). L'emplacement stratigraphiquement incohérent de l'affleurement à l'intérieur du Continental Terminal 3 plutôt qu'à l'intérieur de la Formation d'Illo soulève d'autres questions quant à la fiabilité de l'ensemble des données numériques fournies par la Nigerian Geological Survey Agency.

La **Formation de Kalambaina (K)** s'étend plus au nord de la rivière Sokoto, où elle est partiellement recouverte de minces restes de sédiments de Gwandu. La Formation de Kalambaina (KA) de la Geological Survey of Nigeria (D.O.S. 1965a) correspond à la Formation de Dange/Kalambaina (DKsh) de la *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c). La subdivision originale de la Formation de Kalambaina par la NGSA en une unité de "Limestone and shale"—Dange/Kalambaina, abrégée en DKsh (NGSA 2011c) ou Gmsh (NGSA 2011a) et en un membre de "Sandstone, siltstone", (abrégé DKss ou DKls mais dénommé Formation de Wurno sur la carte d'état de Sokoto (NGSA 2011b)) a été abandonnée en raison du degré élevé d'incertitude et d'incohérences géométriques. Au sud d'Argungu, la Formation de Kalambaina et Dange (KD *sensu* D.O.S.) et sur les deux cartes les Formations de Dange/Kalambaina (DKsh *sensu* NGSA) ne sont pas distinctes.

Entre Dakingari et Jega, la Formation de Kalambaina/Dange (KD) suit la carte *République du Niger : Carte Géologique, 1/2 000 000* de Greigert & Pougnet (1966). La limite directe entre le Continental Terminal et la formation du Continental Hamadien/Illo, telle que suggérée par la Nigerian Geological Survey Agency (2011c, 2011a), a été abandonnée et cette dernière a été considérablement prolongée de Dutsin Gore/Giro au nord au-delà du village de Suru. La présence discontinue de l'unité Gmsh (calcaire et schiste de la formation de Kalambaina/Dange) est conservée sous forme de vestige érosif stratigraphique plus jeune recouvrant le Continental Hamadien et non un sédiment plus ancien conservé en basse position au niveau du Continental Terminal.

La *Geological Survey of Nigeria map series*, développée par la Directorate of Overseas Surveys (1965c, 1965a, 1965b, 1966a ; 1966), ne suggère une division explicite des Formations de **Wurno (W)** et de **Taloka (T)** qu'au nord du fleuve Sokoto. Ici, la frontière Wurno-Taloka de la *Geological Survey of Nigeria*

map series—avec des intercalations locales de la Formation de Dukamaje—a été retenue. Le contour de la Formation de Dukamaje suit la *Geological Survey of Nigeria map series* au lieu de la série beaucoup plus étendue “Limestone of the Dukamaje Formation” —étiquetée Glls de façon erronée— comme le propose la Nigerian Geological Survey Agency.

Au sud du fleuve Sokoto, la *Geological Survey of Nigeria map series* propose une seule unité indifférenciée “Wurno Formation and Taloka Formation” (WT). La zone a été subdivisée en une unité transitoire Formation de Wurno/Taloka (Wss) de grès et un membre supérieur sous-jacent de siltites de la Formation de Taloka (Tst) sur la base des unités proposées par la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA 2011b). Les limites croquis représentées par la Nigerian Geological Survey Agency ont été ajustées pour éviter les incohérences stratigraphiques autour des fréquents vestiges de sédiments plus jeunes (Gwandu, Dange, Kalambaina) cartographiés sur la *Geological Survey of Nigeria map series*. Pour la Formation de Taloka elle-même, la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA 2011c) propose six subdivisions lithologiques. Les deux classes proposées par la *Geological Survey of Nigeria map series*—Formation de Wurno et Formation de Taloka (WT), ainsi qu’une Formation de Taloka indifférenciée (T)—ont été délaissées au profit d’une subdivision lithostratigraphique apparemment plus détaillée de la formation de Taloka interprétée comme faciès lithologique. Les informations qui sous-tendent une telle subdivision de la Formation de Taloka sur la base de faciès—mais qui peuvent également amener à créer une confusion probable au niveau des couches géologiques—sont fournies par *Hydrogeological Cross Sections for the Sokoto basin* (JICA 1990 ; Fig. 8, Transect C-C') qui indique un “Basal Clay bed of the Rima Group” recouvrant la Formation de Gundumi pour les régions au nord de la rivière Zamfara.

5.3.4 Continental Hamadien (Formations de Gundumi/Illo/Sendé)

Le Continental Hamadien, connu au Bénin sous le nom de Formation de Sendé, est subdivisé au Nigeria en **Formation de Gundumi** au nord et en **Formation d’Illo** au sud. Le jeu de données de la *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c) distingue trois faciès de la Formation de Gundumi : “Glcg—Pebbles and grits”, “Glgss—Gravel and sands”, “Glss—Clay, grit and pebbles”, représentant approximativement un grès conglomératique plus bas et un mélange supérieur de gravier et de sable; la troisième unité étant une unité locale indifférenciée à l’est de Libba. La présence d’une deuxième strate conglomératique (Glcg) au-dessus de la Formation de Gundumi, telle que suggérée par la *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c), n’est reflétée ni sur la *Geological and Mineral Resource map of Kebbi State* (NGSA 2011a), ni dans les documents de géologie.

Une seule unité Glls décrite comme “Limestone of the Dukamaje Formation” est calée entre les affleurements des deux faciès de la Formation de Gundumi (Glss & Glpg), la Formation de Taloka et la Formation de Gundumi (Tst & Glpg), respectivement. Ceci jette un doute du point de vue lithographique et stratigraphique, car il n’a pas été fait cas d’élément calcaire de la Formation continentale de Gundumi. La petite zone entre Libba et Gummi a été éliminée et associée aux zones voisines du faciès gréseux de la Formation de Gundumi (Glss).

L’étendue spatiale de l’important horizon-repère stratigraphique ***Pisolitic and nodular bauxitic clay***, qui se manifeste comme un membre moyen de la Formation d’Illo, suit le travail de terrain original de Jones (1948). La JICA (1990) a cartographié les affleurements de “white bauxitic clay” de la Formation de Kalambaina, tandis que la NGSA (2011c, 2011a) a cartographié ces zones comme “Wss—Sandstones, clays and shale of the Dukamaje and Wurno Formation” (NGSA 2011c) ou comme “Sandstones, siltstones of the Wurno/Taloka Formation” (NGSA 2011a). Les attributions sont erronées car les Formations de Kalambaina, de Dukamaje et en partie de Wurno sont des dépôts calcaires et sont stratigraphiquement et sédimentologiquement incompatibles avec les rapports de terrain faisant cas d’un gisement bauxitique à dominante kaolinique.

À l'est de la rivière Sokoto, non loin de Tungan-Malashi et Koko, la forme des affleurements, cartographiés comme “Wss—Sandstones and clay of the Gwandu Formation” (NGSA 2011c) ou “Sandstones, Siltstones of the Wurno/Taloka Formation” (NGSA 2011a), ressemble allusivement à l'unité Pisolitic and Nodular Clays de Jones (1948), mais elle se trouve loin de l'emplacement original. En l'absence d'explications qui accompagnent les unités géologiques, les dénominations incohérentes et les géométries douteuses des jeux de données numériques indiquent probablement une confusion entre les unités et les éléments de légendes, ce qui jette davantage de doute sur la fiabilité d'ensemble des compilations récentes.

Au Bénin, la petite étendue de la **Formation de Sendé** est soutenue par les enregistrements spatialement restreints de bois fossilisé du Crétacé limités à la région frontalière du Nigeria (Annexe I.II.IV). De récents travaux de terrain entrepris par Konaté, Issifou Fatiou et l'auteur ont, toutefois, montré que de minces couches de sédiments crétacés de Sendé se développent sur les positions de la crête des buttes recouvertes par un Continental Terminal résistant à l'érosion dans la plupart du nord du Bénin. Pour l'instant, la faible épaisseur du Sendé crétacé justifie sa classification comme potentielle—mais non cartographiée—couche de recouvrement et son omission sur la carte de roches solides ici présentée.

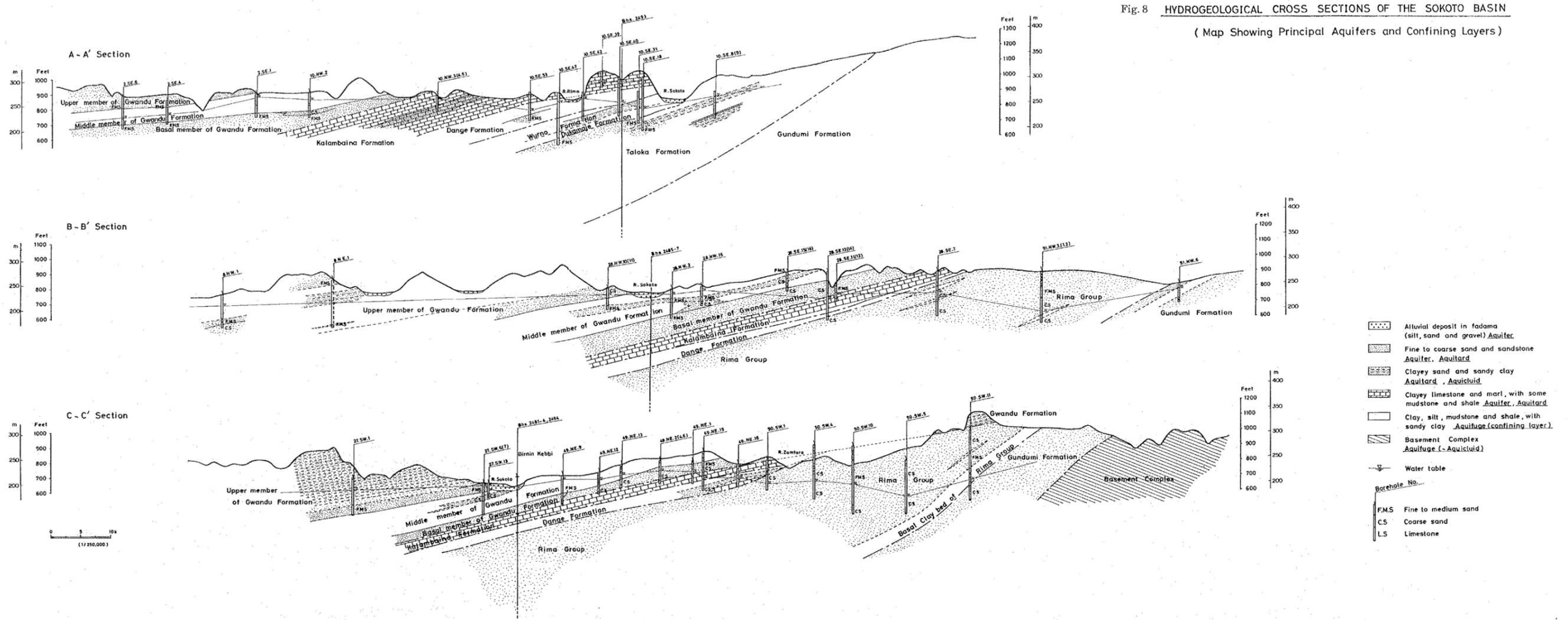


Fig. 16 : Coupes transversales NO-SE à travers le bassin de Sokoto (JICA 1990; Fig. 8).

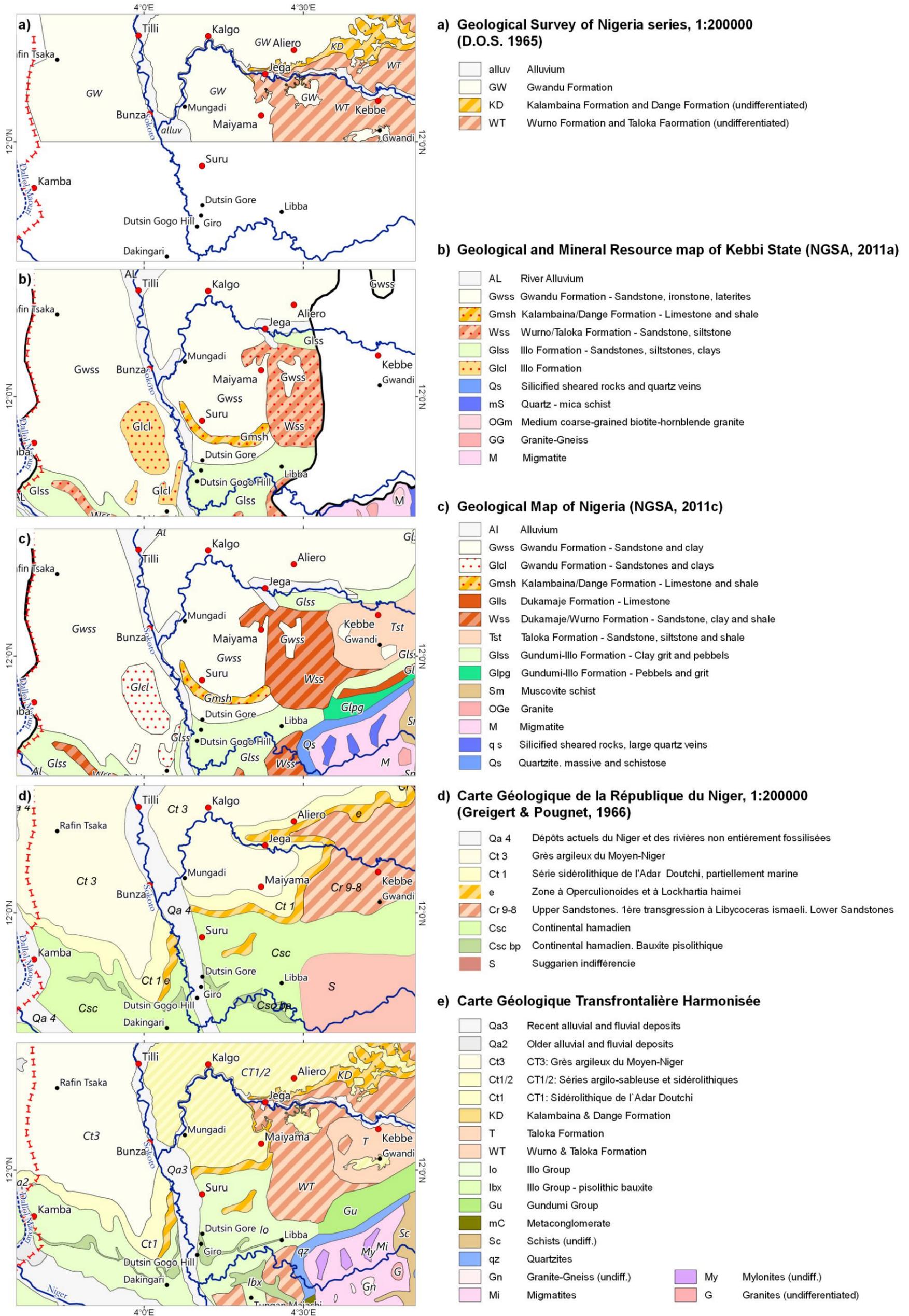


Fig. 17: Harmonisation de contenus géométriques et thématiques divergents des cartes pour les strates Eocène-Paléocène (Groupe Sokoto & Rima) et Crétacé (Formation d'Ilo-Gundumi).

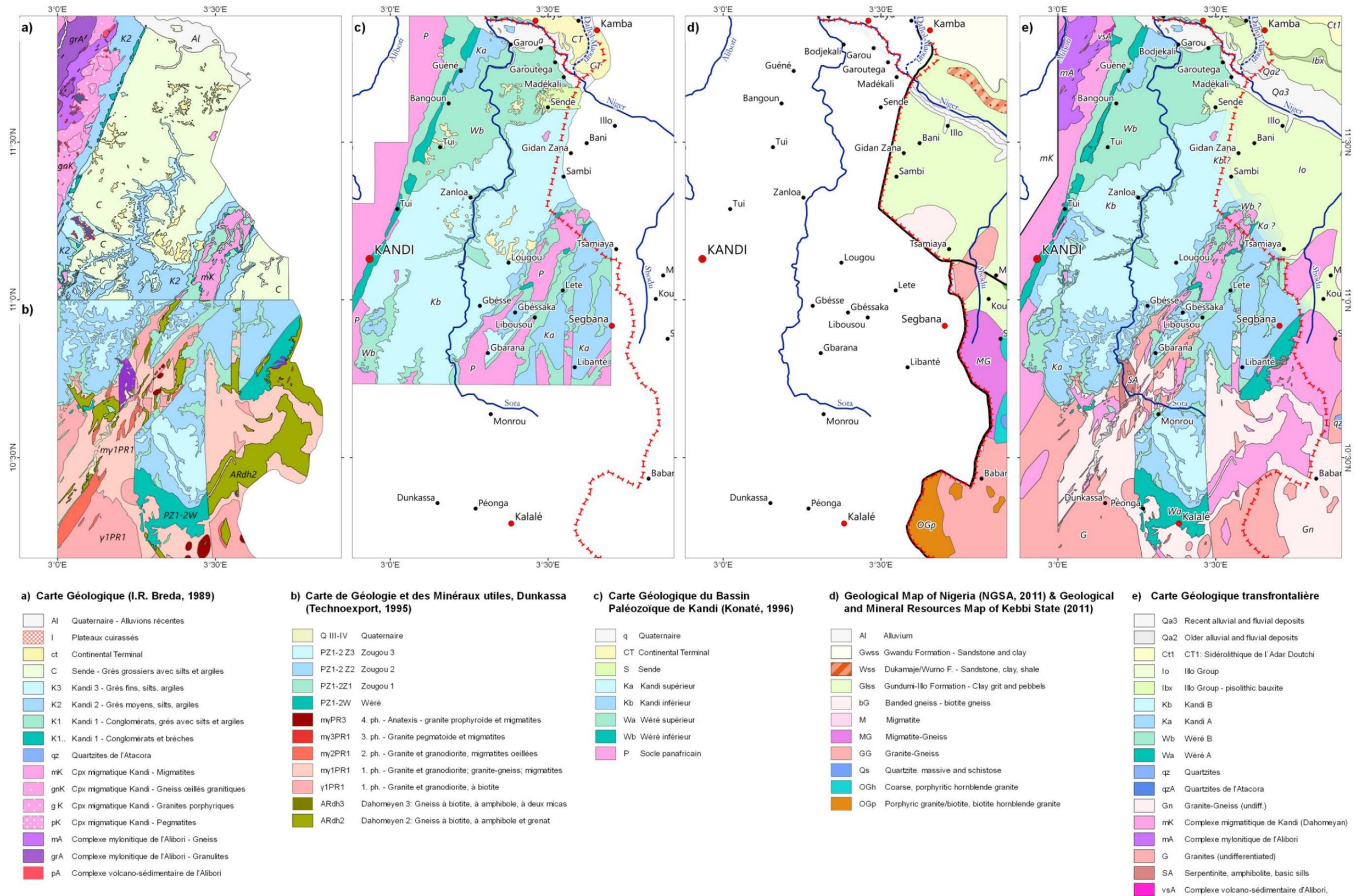


Fig. 18 : Harmonisation du Bassin de Kandi et de la région frontalière Bénin-Nigeria. La transition entre les Formations paléozoïques de Wéré et de Kandi et le Crétacé Sendé le long de la frontière internationale du Bénin et du Nigeria n'a jamais été cartographiée et n'a été indiquée qu'à titre indicatif.

5.3.5 Groupe paléozoïque de Kandi

Formation Wéré

Membre Wéré A (Wa)

Le **membre de Wéré A** est une brèche polymictique mal triée avec des blocs dans une matrice de grès massif à grains grossiers interprétée comme une dérive glaciaire et des sédiments glacio-fluviaux. Le membre de Wéré A correspond à le *membre Wa* de Konaté (1996), les unités K1 (en pointillés) et K1 de l'Istituto Ricerche Breda (seulement les unités K1 le long de la faille de Kandi !), et la *Formation de Wére (PZ₁₋₂W)* de Technoexport (1995b). K1 (en pointillés) est décrit comme « conglomérats, brèches, grès avec silts et argiles subordonnés. Dépôts de cône d'alluvions. Conglomérats et brèches prédominants (en pointillés) » correspond très bien à l'étendue dule membre *Wa sensu* Konaté (1996).

Sur la Feuille Dunkassa de la série de cartes de Technoexport, la formation de Wéré (*PZ1-2W*) est définie comme "Gritty sandstones, micropudingstones, conglomerate" et correspond plutôt au membre fluviale *Wb*. Les sédiments indiscutables de Wéré A le long de la faille de Kandi à Goungoun présentés sur la feuille de carte adjacente de Bembèrèkè (Technoexport 1995a) ont, cependant, conduit à la classification de l'unité *PZ₁₋₂W* comme membre Wéré A.

D'après Technoexport (1995b), des sédiments *PZ₁₋₂W* sont également présents dans les grabens des secteurs de Segbana (Segbana/Lété/Libanté) et de Kalalé (Kalalé/Péonga/Monrou). L'occurrence distante et disjointe remet en cause, à ces endroits, la classification de *PZ₁₋₂W* comme Wéré A –en particulier si l'on suit les descriptions de Konaté du membre *Wa* comme faciès périglaciaire de marge de bassin déposé le long de la faille de Kandi, au point le plus profond du demi-graben de Kandi, et remplissant des paléovallées limitées des failles pendant la phase initiale de la décalage. Alidou & Lang (1983), d'autre part, décrivent un profil de 125 m de profondeur près de Kalalé comme « conglomérats indurés » (20 m plus bas) et « des grès et des siltites micacées et ferrugineuses avec des stratifications entrecroisées » près de Kalalé qui pourraient supporter une disjonction de sédiments de Wéré A. La répartition, tel que suggérée ici, requiert une investigation plus approfondie.

Membre Wéré B (Wb)

Le membre Wéré B est décrite comme une formation de grès grossiers riches en granules, présentant des couches croisées en creux, souvent en séquences finement ascendantes. Le membre Wéré B peut être interprété comme un faciès de Wéré déposé dans un milieu périglaciaire à cours d'eau anastomosés. Le membre Wéré B correspond au membre *Wb* de Konaté (1996) et comprend l'essentiel de l'unité K1 de l'Istituto Ricerche Breda avec des parties de l'unité K2, ainsi que la formation de Zougou 1 (*PZ₁₋₂Z₁*) de Technoexport. Par rapport à la carte de Konaté, les affleurements de Wére B ont été affinés et étendus en fonction de l'extension de l'unité de Breda K1 le long de la rivière Sota. Le horst de Lété a été cartographié de façon homogène par Konaté comme socle, tandis que l'Istituto Ricerche Breda a différencié plusieurs petits vestiges de l'unité K1. En raison de ces preuves apparentes de sédiments sur le terrain, les vestiges ont été inclus et attribués à Wéré B. D'après Konaté (1996), de vastes zones de l'unité K2 à l'ouest de Lété ont été supposées être sous Wéré B.

Les membres Wéré B et Kandi A, cartographiées par Konaté (1996), étaient géométriquement raisonnables et prolongées pour couvrir les zones basses au nord du fleuve Niger (à l'est de Karimama) bien que des méandres pas très anciens et des lacs en boucle indiquent au moins une couche peu profonde de sédiments dans la plaine inondable.

Formation Kandi

Membre Kandi A (Ka)

La **formation de Kandi A** correspond au membre Ka de Konaté (1996). Les siltites à grains fins avec des lamelles rythmiques représentent les faciès de marée du Groupe Kandi. Le membre Kandi A comprend les unités suivantes de l'Istituto Ricerche Breda d'Italie : l'unité crétacée C dans les régions de Bodjékali et Guéné, l'unité K2 à l'est de Kandi, à l'est de Guéné-Laga, et à l'est de Lété et l'unité K3 entre Guéné-Laga et Lougou. Sur les cartes de Technoexport (1995b, 1995a), le membre de Kandi A correspond directement à la formation de Zougou 2 (PZ₁₋₂Z₂). Vers le centre du bassin, le faciès de Kandi A de la façade littorale s'étend au faciès de Kandi B à la façade maritime. Bien que Konaté (1996) ait enregistré plusieurs profils continus de Kandi A à Kandi B dans la région de Poria (Kandi-Tui-Kouta Kroukou), on ne s'attend pas à ce que le centre du bassin présente une séquence continue depuis la façade littorale (Kandi A) vers les milieux maritimes (Kandi B). La carte harmonisée reflète cette notion et suit Konaté (1996), qui a suggéré une transition directe des terres de Wéré B au large de Kandi A dans le centre du bassin. Par conséquent, la séquence de Wéré B à Kandi B, exposée le long de la rivière Sota, n'a pas été subdivisée comme le suggère la séquence des unités K2, K3, à C sur les cartes de l'Istituto Ricerche Breda.

Vers les limites sud-est du bassin, la formation de Kandi A de la carte harmonisée s'étend au-delà des zones suggérées par Konaté (1996) suite à la subdivision plus détaillée de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) et de Technoexport (1995b).

Membre Kandi B (Kb)

Le **membre Kandi B** correspond au membre Kb de Konaté (1996) et comprend des siltites de couleur variable déposés dans un milieu marin, en haute mer. La formation de Kandi B comprend les unités suivantes de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) : l'ensemble de l'unité C du Crétacé, des parties de l'unité K2 (au sud d'une ligne entre Kandi et Lougou, mais sauf les zones du système de faille de Kandi, le long de la rivière Sota et près de Lété où l'unité K2 est attribuée à Wéré B) et l'unité K3 (sauf les zones à l'est de Tui et autour de Lété où elle a la même valeur Ka). Sur les cartes de Technoexport (1995b, 1995a), la formation de Kandi B correspond directement à la formation de Zougou 3 (PZ₁₋₂Z₃).

Les différences les plus évidentes entre les cartes de Konaté (1996) et de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) sont :

- a) la limitation de la formation crétacée de Sendé à une petite zone près de la frontière entre le Bénin et le Niger ;
- b) la division diagonale du centre du bassin à Wéré B et Kandi A ; et
- c) la séquence affleurant le long de la rivière Sota.

La formation crétacée de Sendé, cartographiée dans tout le bassin par l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) a été révisée en faveur d'un bassin paléozoïque comme le montrent Alidou et al (1986) et Konaté (1996) (voir chapitre 5.3.4). Les anciennes strates du Crétacé sont maintenant décrites soit comme membre terrestre Wb (entre Bodjékali et Guéné et à l'est de Lété), soit comme membre Kb supérieure de la formation marine de Kandi (centre du bassin).

La division diagonale entre Wéré B continental au nord-ouest et Kandi B marin au sud, comme le suggère Konaté (1996), est basée sur des conjectures. La formation intermédiaire de Kandi A n'a pas été cartographiée et est omise sur la carte. Son absence apparente s'explique par le changement de faciès latéral entre les deux formations. Plutôt que de représenter une séquence (chrono-) stratigraphique continue, les membres de Kandi A et de Kandi B incarnent deux faciès-composantes

extrêmes reflétant dans le Groupe Kandi le passage d'un milieu à marée littorale à un milieu submergé en haute mer. Les deux formations peuvent (autour de Poria cf. Konaté 1996 ; Konaté et al. 2003a) ou ne peuvent pas (comme on le suppose pour le centre du bassin ?) se produire dans une séquence chronostratigraphique.

Technoexport (1995b) et Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c) ont probablement utilisé des images d'élévation topographique et aériennes pour délimiter les contours des unités. Il en a résulté un niveau de détail élevé, en particulier le long des flancs de la vallée de la rivière Sota et de ses affluents, où le membre Kb homogène est disséquée et l'unité K2 (Wéré B), l'unité K3 (Kandi A ? ou Kandi B) et Zougou 2 (Kandi A) disparaissent. Une telle exposition de l'ensemble de la séquence est raisonnable, compte tenu d'une incision de la rivière Sota d'environ 50 m à 100 m dans les sédiments du Groupe Kandi dont l'épaisseur est estimée à environ 60 m. En supposant que Kandi A et Kandi B soient des variations latérales simultanées représentant un faciès de marge de bassin et de centre de bassin, la subdivision lithologique détaillée, comme le suggère l'Istituto Ricerche Breda pour les unités exposées K2 et K3, n'a pas été intégrée dans la carte harmonisée. Ceci a conduit à une généralisation majeure des unités K2 et K3 à la formation de Kandi A le long de la rivière Sota et au sud de la ligne Kandi-Lougou. Afin d'éviter les problèmes de contours des cartes le long du 11°N entre la série de cartes de Technoexport et celle d'Istituto Ricerche Breda, plusieurs occurrences mineures de la formation de Zougou 3 ont été supprimées et/ou ajustées.

Attribution spatiale

La corrélation des unités entre Konaté et Istituto Ricerche Breda est basée sur les cartes disponibles. Il en résulte non seulement des imprécisions cartographiques mais aussi des différences thématiques comme, par exemple, pour l'unité K2 de l'Istituto Ricerche Breda. Alors que la présence de traces fossiles d'*Harlania* indique la présence d'un milieu marin pour la formation de Kandi (Ka/Kb members, Konaté 1996, p32), la description d'un milieu fluviatile, avec des plaines inondables et des cours d'eau anastomosés pour l'unité K2 par l'Istituto Ricerche Breda, renvoie à un milieu proposé par Konaté pour le membre Wb.

Les cartons détaillés des zones de Kandi et de Tui (Konaté 1996 ; Konaté et al. 2003a) peuvent différer de la carte générale *Carte Géologique Générale du Bassin Paléozoïque de Kandi*. Les cartons détaillés n'ont pas été pris en compte pour l'élaboration de la présente carte.

La *Carte de Géologie et des Minéraux Utiles* élaborée par Technoexport de Russie dans les années 1981-1984 n'a été que partiellement intégrée aux travaux de Konaté. Néanmoins, l'étendue spatiale des formations combinées de Zougou 2 (PZ₁₋₂Z₂) et de Zougou 3 (PZ₁₋₂Z₃) correspond bien au membre Kb. Décrites respectivement sur la carte comme « Siltites et grès ferrugineux » et « Siltites, grès à grains fins moins fréquents », elles concordent bien avec la description de Konaté d'un « faciès siltite à stratification transversale bosselée, strates siltstoneuses interstratifiées avec du grès fin micacé en lits ondulants de plusieurs décimètres à un mètre d'épaisseur ». Cependant, Technoexport et Istituto Ricerche Breda partagent la notion d'une subdivision de la formation de Kandi B dans un gisement supérieur plus fin – « Siltites et grès ferrugineux », respectivement « Grès fins, silts, argile. Dépôts paraliques de lac (plages, deltas et varves lacustres) et de mer peu profonde à *Cruziana* et *Arthropycose* » incluant l'unité crétacée mal cartographiée) — et un dépôt inférieur plus grossier : « Siltites, grès moins souvent à grains fins », respectivement « Grès moyens, silts, argiles. Dépôts de plaine d'inondation ».

5.3.6 Unités de socle

Les unités de socle ont été agrégées selon les descriptions lithographiques et chronostratigraphiques des légendes des cartes originales. Pour le Nigeria, seules des descriptions lithologiques étaient

disponibles. Pour le Bénin, les dénominations chronostratigraphiques régionales ont été, le cas échéant, maintenues. Les termes chronostratigraphiques fournissent des informations complémentaires utiles pour la différenciation au niveau régional. Pour le Niger, la zone d'étude ne comporte pas de socles remarquables.

Les 83 unités différentes de socle ont été regroupées en **26 classes** comprenant à la fois :

- des dénominations purement lithologiques—en particulier les cartes fournies par la Nigerian Geological Survey Agency ;
- des unités chronostratigraphiques régionales disponibles sur les cartes d'Istituto Ricerche Breda et de Technoexport pour le Bénin.

Des unités de socle similaires ont été identifiées et regroupées dans la légende générale avant d'être fusionnées à l'aide des caractéristiques SIG respectives dans le logiciel QGIS. Par exemple, le groupe « Granites non différenciés » comprend six variétés finement différenciées de granite à biotite et de granodiorite mais aussi de petites occurrences de quartz-syénite, diorite et dolérite (voir Tab. 8). Les unités agrégées sont—suivant le nombre de sous-unités—Granites non différenciés (20), *Complexe migmatitique de Kandi* (7), Amphibolite & Serpentinite (7), Biotite en bande (6), Biotite et schiste muscovite (5), Granite-gneiss (4), Migmatite (3), Mylonite (3).

Tab. 8 : Extrait de la légende générale : Agrégation de l'unité : Granites (non différenciés)

Harmonized map	Société Istituto Ricerche Breda: Akibou et al. (1989): Carte Géologique à 1/200.000 Feuilles: Karimama, Porga, Kandi, Malanville		Technoexport (1994) Carte de Géologie et des Minéraux utiles: Dunkassa (NC-31-X), 1:200.000		Greigert (1966): Carte Géologique République du Niger. 1:2.000.000		D.O.S. (1965/6): Geological Survey of Nigeria, 1:200.000 map series		NGSA (2011) Geology and Mineral Resources Map of Nigerian States & Geological Map of Nigeria	
	Abbrev.	Lithology	Abbrev.	Lithology	Abbrev.	Lithology	Abbrev.	Lithology	Abbrev.	Lithology
Granites indifférenciés / Granites (undiff.)	Y	Granites indifférenciés								
			yPR3	Formations palingéno-metasomatiques. Granite prophyroïde et migmatites						
			y3PR1	Troisième phase : Granite pegmatoïde et migmatites						
			pPR1	Troisième phase : Granite pegmatoïde et migmatites ; filons de pegmatite						
			y2PR1	Deuxième phase : Granite et granodiorite grossiers						
			(m)y2PR1	Deuxième phase : Granite et granodiorite grossiers, migmatites ocellées						
			y1PR1	Première phase : Granite et granodiorite à grain moyen et fin, à biotite						
					gs	Granites syntectoniques				
					gpt	Granites postectoniques				
					g	Granites anciens indifférenciés				
							P	Pegmatite, granite and aplite complex (quartz-feldspathic rocks with epidote)	OGp	porphyritic granite / coarse porphyritic biotite and biotite hornblende granite
							Ogh	Biotite- and biotite-hornblende-granite, medium grained	Oge / Ogm	Medium to coarse grained biotite granite
									OGf	Fine-grained biotite granite
									OGh	Coarse, porphyritic hornblende granite
									OGd	Biotite and biotite hornblende granodiorite, quartz diorite
									OGu	Undifferentiated granites and granite gneiss and migmatite
									OSq	Quartz-syenite
							D	Dyke-complex, including dacite, micro-granite and micro-granodiorite	ODh	Diorite
				y1PR1	Formations Palingéno-Metasomatiques. Première phase : Diorites					
									D	Dolérite

Problèmes le long des limites des cartes

Le long de la frontière entre le Bénin et le Nigeria, l'harmonisation thématique et l'adaptation spatiale ont donné lieu à trois unités transfrontalières (Fig. 18) : le *Complexe migmatique de Kandi* (mK), les Granites non différenciés (G) et les Granite-Gneiss (Gn). Suivant la série de cartes de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b), le *Complexe migmatique de Kandi* (mK) affleure en disjonction dans le horst de Lété et les marges ouest (gnK) du bassin paléozoïque de Kandi et correspond à l'unité Archéen-Dahoméen ARdh2 (gneiss à biotite, à biotite et grenat, amphibole et grenat, amphibolite à pyroxène et grenat) de Technoexport (1995b). Au Nigeria, le horst de Lété est cartographié en Gb (banded gneiss—biotite gneiss) et l'extension ouest en MG (Migmatite-granite-gneiss). Ces deux unités du Nigeria, Gb et MG, sont condensées dans le *Complexe béninois migmatique de Kandi*. Le long de la rivière Shodu (Ouara), les cartes du Nigeria proposent un affleurement granite-gneiss (GG) qui s'étend jusqu'au Bénin au nord de Segbana. Cet important affleurement de socle ne figure pas sur les cartes antérieures du Nigeria et ne s'étend pas non plus jusqu'au Bénin. À l'intérieur des structures en horst et graben (Horst de Lété à l'ouest et affleurements de socle sans nom au sud et à l'est), un autre affleurement de socle paléozoïque est raisonnable—bien que sa limite parallèle à la frontière internationale Bénin-Niger soulève des questions quant à la précision de la cartographie sur le terrain. Les formations géologiques le long de la frontière internationale sont au mieux provisoires et requièrent une cartographie de reconnaissance géologique.

Au sud du 11°N, le *Complexe migmatique de Kandi* est limité par les unités GG (Granite-gneiss) et Ogp (granite porphyrique/biotite et granite biotite hornblende). Toutes les deux unités entrent dans la première phase de l'intrusion granite *sensu* de Technoexport (1995b) et ne sont différenciés que par l'apparition de gneiss et de migmatites. De manière spatiale, elles correspondent à l'unité $_{m\gamma_1}PR_1$ (Première phase : Granite-gneiss ; plagiogranite-gneiss ; migmatites) et $_{\gamma_1}PR_1$ (Première phase : Granite et granodiorite à grain moyen et fin, à biotite), respectivement. La première unité $_{m\gamma_1}PR_1$ a été subsumée sous Granite-gneiss (Gn), la seconde sous forme de granites non différenciés (G : Granites non différenciés). Comme une corrélation chronostratigraphique de la bouclier Nigériane va au-delà des limites de la présente carte, les dénominations chronostratigraphiques ont été abandonnées.

Harmonisation des cartes du Benin

Les différenciations détaillées des socles de la série de cartes de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b) et de Technoexport (1995b) ont été généralisées avant l'harmonisation (voir chapitre 4.1 et Annexe III). Les zones situées à l'ouest du Bassin de Kandi n'ont pas été différenciées davantage car les feuilles de *Carte Géologique de Kandi et Bembèrèkè* n'ont pas été numérisées. Le *Complexe migmatique de Kandi* (maintenant cpK) comprend l'unité principale mK (Migmatites à néosomes granitiques et granodioritiques et paléosomes gneissiques et amphibolitiques) et toutes les unités subordonnées telles que gnK (Gneiss œillés granitiques et granodioritiques), K (Granites porphyriques) et pK (Pegmatites). En outre, l'unité cpK a été fusionnée avec les deux unités correspondantes de Technoexport Archéen-Dahoméen 2 (ARdh2 : Gneiss à biotite, à biotite et grenat, amphibole et grenat ; amphibolite à pyroxène et grenat) et ARdh3 (Gneiss à biotite, à biotite et amphibole, à deux micas ; amphibolite).

Le *Complexe mylonitique de l'Alibori* de l'Istituto Ricerche Breda a été conservé comme unité distincte mais n'a pas été différencié en mA (Gneiss, amphibolites, métagabbros retromorphosées en faciès schistes verts ; mylonitisés et en écaillés tectoniques) et grA (Granulites acides et intermédiaires, retromorphosées en faciès schistes verts).

Les roches intrusives protérozoïques de la première phase anatectique ($_{\gamma_1}PR_1$: Première phase : Granite et granodiorite à grain moyen et fin, à biotite ; diorites ($_{\delta}PR_1$)) sont subsumées sous l'unité

générique G (Granites non différenciés). Le faciès métamorphique de la même phase anatectique ($m\gamma_1PR_1$: granite-gneiss ; plagiogranite-gneiss ; migmatites) a été regroupé sous l'unité générique Gn (Granite-Gneiss non différenciés). Les chevauchements thématiques entre les différentes unités granite-gneiss, gneiss et migmatite, notamment le *Complexe migmatique de Kandi*, ne peuvent être exclus.

Une adaptation spatiale a été nécessaire pour harmoniser les contours des unités de socle plus jeunes (Voltaen, Buem & Atakorien), telles que représentées sur la carte de Greigert et Pognet (1966) avec les contours plus détaillés représentés sur les cartes de l'Istituto Ricerche Breda.

6 Jeu de données accessoires

6.1 Structures tectoniques : Linéaments, failles et fractures

Les failles, les fractures et les contacts tectoniques ont été compilés à partir des *Cartes Géologiques* et ont été combinés avec une étude récente de télédétection dans la région de Dosso (Ibrahim et al. 2016). Le jeu de données des linéaments doit être évalué avec prudence, car la densité et la direction des linéaments diffèrent d'un auteur à l'autre, ce qui indique des approches cartographiques et des niveaux de détail différents (Fig. 19).

L'élément tectonique le plus frappant dans la zone d'étude est la faille de Kandi ou "Kandi shear zone", qui fait partie de la zone de cisaillement transcontinentale Sobral (NE du Brésil) - Hoggar (4°50') du néo-protérozoïque (orogénèse panafricaine). Cette importante zone de suture entre les domaines tectoniques ouest africain et du congolais est repérable dans tout le Bénin; plus au nord, elle est couverte sous les sédiments du bassin de l'Iullemeden. Réactivée au Paléozoïque, la faille de Kandi marque la frontière abrupte entre le sédiment néoprotérozoïque et les sédiments paléozoïques du bassin Kandi.

Sur la feuille de Dunkassa, OBEMINES et Technoexport (OBEMINES 1995a) distinguent trois accidents tectoniques principaux (accidents cassants) avec leurs phases de rajeunissement respectives :

- l'Archéen-Protérozoïque précoce (nord-est): limité à la partie sud de la feuille de Dunkassa et n'affectant pas les unités sédimentaires ;
- l'Archéen-Paléozoïque (nord-est): rajeunis au Paléozoïque, ils contribuent à la délimitation des structures horst ;
- Protérozoïque - Paléozoïque (centre et nord-ouest): résulte d'une compression latérale sous-latitudinale pendant l'orogénèse éburnéenne (Protérozoïque) souvent associée à la mylonitisation. Les fractures secondaires (cisaillement) orientées vers le Nord-ouest sont de nature secondaire.

La direction dominante des linéaments des socles sur les cartes de Technoexport au sud du 11°N est principalement S175°E et secondairement N45°E. Technoexport (1995b) a cartographié un réseau dense de *contacts tectoniques* (probablement largement généralisés) (observés/déduit sous forme de : *linéaments observés/déduit*), de *contacts géologiques* (limites des unités géologiques), de fissures (incorporées sous forme de : *Fissures*) et de *lignes structurales*. Les lignes structurales (enregistrées uniquement par Technoexport) et les limites génériques des unités géologiques/contacts géologiques n'ont pas été incorporées dans le jeu de données des *linéaments*.

Le bassin sédimentaire paléozoïque de Kandi et les socles adjacents au nord du 11°N ont été cartographiés par Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b) et Konaté (1996). Tous deux indiquent que la direction principale des linéaments est la même que celles de la faille de Kandi (N20°E) et que la direction secondaire lui est perpendiculaire (S110°E). Des orientations similaires dominent sur les cartes générales de Greigert (1960), Greigert & Pognet (1966), et les cartes du Nigeria (NGSA 2011a, 2011c) pour le socle et dans une moindre mesure pour les bassins sédimentaires du Nigeria et du nord du Niger.

Pour le Continental Terminal, les données d'Ibrahim et al (2016) suggèrent une direction principale NE-SO du linéament (étendue entre 0°E et 60°E)—ce qui correspond probablement à un rajeunissement (Miocène ?) de la direction de la faille de Kandi—et des directions secondaires N90°E, et S150°E.

Les différences frappantes entre les trois jeux de données jettent un sérieux doute quant à l'utilisation indiscriminée des données pour l'analyse (cf. Fig. 19). La différence pourrait, en partie, être liée à

l'évolution du champ de contraintes tectoniques et aux différents ensembles de fractures au niveau du socle Dahoméen, le bassin sédimentaire paléozoïque et les sédiments néogéniques ; mais elle découle plus probablement de différentes approches cartographiques, ce qui reflète une forte subjectivité des auteurs.

L'approche de Technoexport s'est traduite par un réseau dense de linéaments avec un nombre élevé de linéaments et un degré élevé d'abstraction et de généralisation. Le modèle de linéaments qui en résulte diffère de l'approche cartographique plus fragmentaire, donc plus plausible, appliquée par les autres études.

Les données des différentes sources ont été fusionnées et l'on a tenté d'harmoniser les différents jeux de données. Afin d'atténuer la forte différence entre les cartes, plusieurs contacts tectoniques à l'intérieur de la couverture sédimentaire paléozoïque, qui ne sont pas directement liés aux limites des unités, ont été omis pour la carte finale. Les duplicatas ou les caractéristiques indiquant la même caractéristique géologique ont été enlevés manuellement. La préférence a été accordée aux caractéristiques provenant de la même source de données que les données lithologiques sous-jacentes, tout en harmonisant les données des lignes et des polygones. Le nettoyage manuel comprenait des corrections géométriques mineures. Lorsqu'elles sont disponibles, les informations sur les failles et les fractures observées et présumées sont conservées (champ : *certitude*). La *Geological Map of Nigeria* (2011c) fait une distinction entre les failles/fractures majeures et celles qui sont déduits. Par souci de cohérence, les failles/fractures majeures ont été reclassées dans cette catégorie: Linéaments (observés).

Le shapefile *Linéaments* présente quatre types d'éléments structuraux. De ce nombre, seuls les linéaments observés et déduits sont affichés sur la carte finale.

- linéament (observé) ;
- linéament (déduit) ;
- linéament (omis) ;
- fissures.

6.2 Ressources minérales

La présence de ressources minérales majeures est indiquée à la fois sur les cartes de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b), de la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA 2011a, 2011c) et de Greigert (1960). Bien qu'elle porte le nom de *Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State*, la carte de la Nigerian Geological Survey Agency ne représente que les principaux gisements minéraux. Utilisant une approche plus exploratoire, la carte de Technoexport (1995b) rapporte en détail la répartition des occurrences minérales, souvent avec une estimation de leur contenu minéral. Les occurrences minérales sont affichées « telles quelles » à la Fig. 21.

6.3 Direction et pendage

L'orientation des structures géologiques dans l'espace est décrite par l'attitude de la couche géologique exprimée par l'orientation latérale et le pendage de la surface géologique. La direction décrit l'intersection de la couche penchée/inclinée avec le plan horizontal, tandis que le pendage indique l'angle d'inclinaison maximale de la couche. La direction de l'impact est donnée comme l'angle de l'impact vers le nord ; le pendage est l'angle de la couche inclinée par rapport au plan horizontal. Les angles de pendage sont souvent rapportés sous forme de plages et affichés comme tels. Toutes les valeurs rapportées ont été incorporées (Fig. 21).

Déficits de la qualité des données

La qualité et la densité des éléments structuraux reflètent fortement les différentes approches cartographiques et a ainsi limité les possibilités d'harmonisation. Les quatre jeux de données — linéaments, ressources minérales, direction et pendage, et fossiles— sont donnés « tels quels » et ne sont appropriés qu'à des buts généraux se rapportant à la qualité et à la quantité des données. Étant donnée la qualité hétérogène des sources de données, aucune harmonisation n'a été essayée. L'analyse spatiale ne devrait pas être faite sur ces jeux de données.

Tab. 9 : Jeux de données accessoires : Répartition des données originales

	Niger		Benin			Nigeria				
	Greigert (1966)	Greigert (1960)	Ibrahim et al.(2016)	BREDA (1989)	Technoexport (1995)	Konate (1996)	IGIP/GIZ (2012)	NGSA (2011a)	NGSA (2011b)	
Direction & Pendage	-	-	-	24	148	12		-	5	
Faïlles / Fractures - observées	-	3	3274	432	318 111 (Fissures)	285	30	671	42	
- déduites	-	3	-	378	242 76 (Fissures)	234	3	193	42	

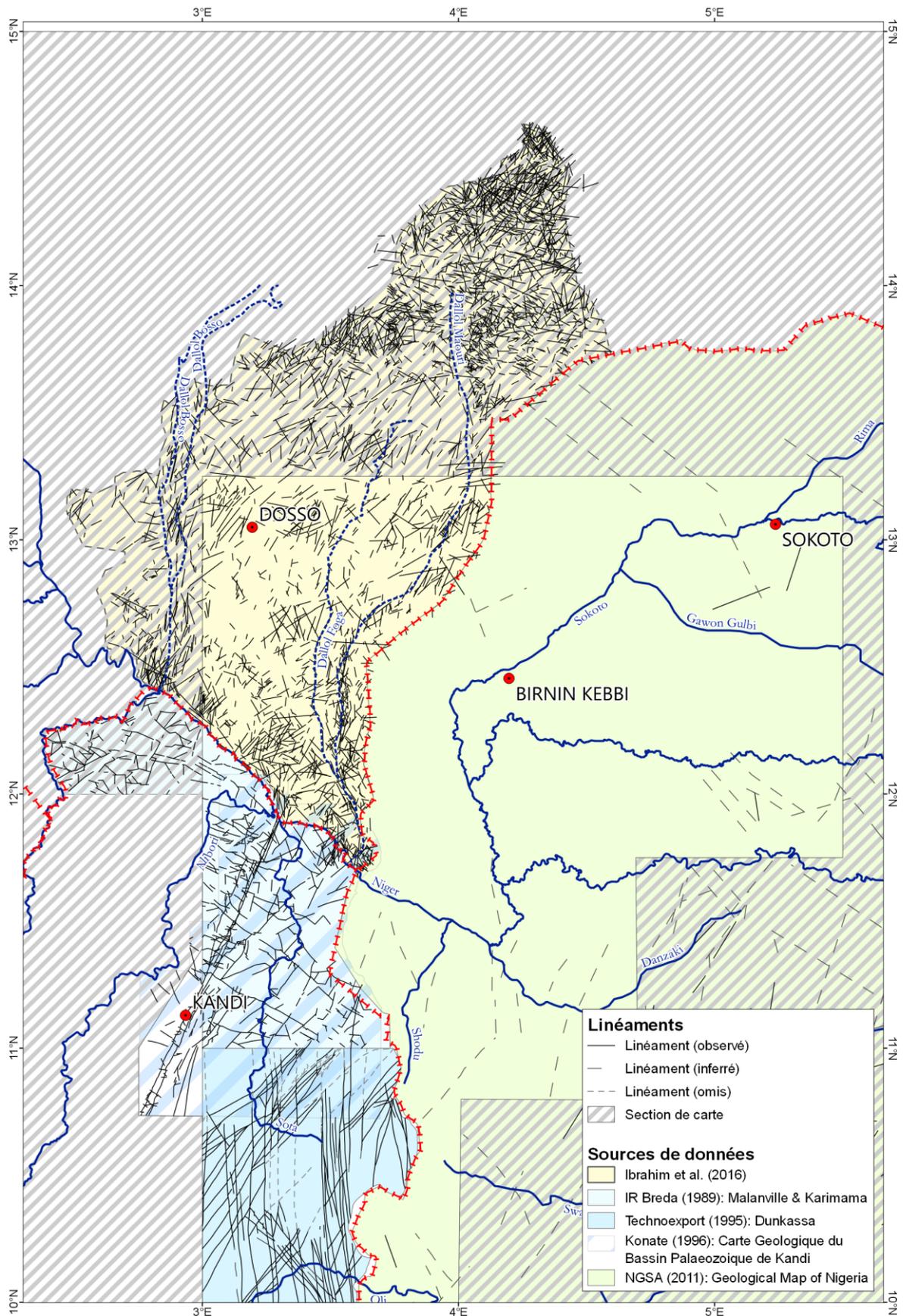


Fig. 19 : Les jeux de données disponibles sur les linéaments montrent des différences dans la densité des linéaments, le niveau de continuité, et la direction des trajectoires, ce qui illustre différentes approches de cartographie.

6.4 Sites fossilifères

La couche de données *Fossiles* a été compilée à partir de trois cartes publiées par : a) Alidou et al (1986) ; b) Alidou (1987) et ; c) Konaté et al (2003a). Toutes ces cartes sont des cartes croquis et, par conséquent, seul l'emplacement approximatif des sites fossilifères peut être indiqué (Fig. 28). Le nombre croissant de sites fossilifères a permis l'évolution de la Carte Géologique du Bassin de Kandi. Alors que Konaté (1996) a cartographié la zone entre Kandi et Poria comme membre Kandi B du Silurien précoce, la détermination des fossiles a permis à Konaté et al (2003a) de faire la distinction entre les sédiments des membres Kandi A et Kandi B à partir des traces du *Cruziana petraea* (Ordovicien tardif, Kandi A) et du *Cruziana acacenciis* (Silurien précoce, Kandi B).

6.5 Coupes transversales

Les coupes transversales ont été compilées à partir de la littérature (Tab. 10 et Fig. 22) et sont rassemblées dans l'Annexe V. La compilation comprend des coupes géologiques généralisées avec des séries de cartes de faiblement détaillées (Geological Survey of Nigeria par D.O.S.) à moyennement détaillées (Istituto Ricerche Breda & Technoexport & JICA), ainsi que des coupes superficielles (Continental Terminal) publiées par la FAO (1970) pour le Dallol Bosso au Niger et des coupes géophysique au Nord Bénin (Bouزيد 1971).

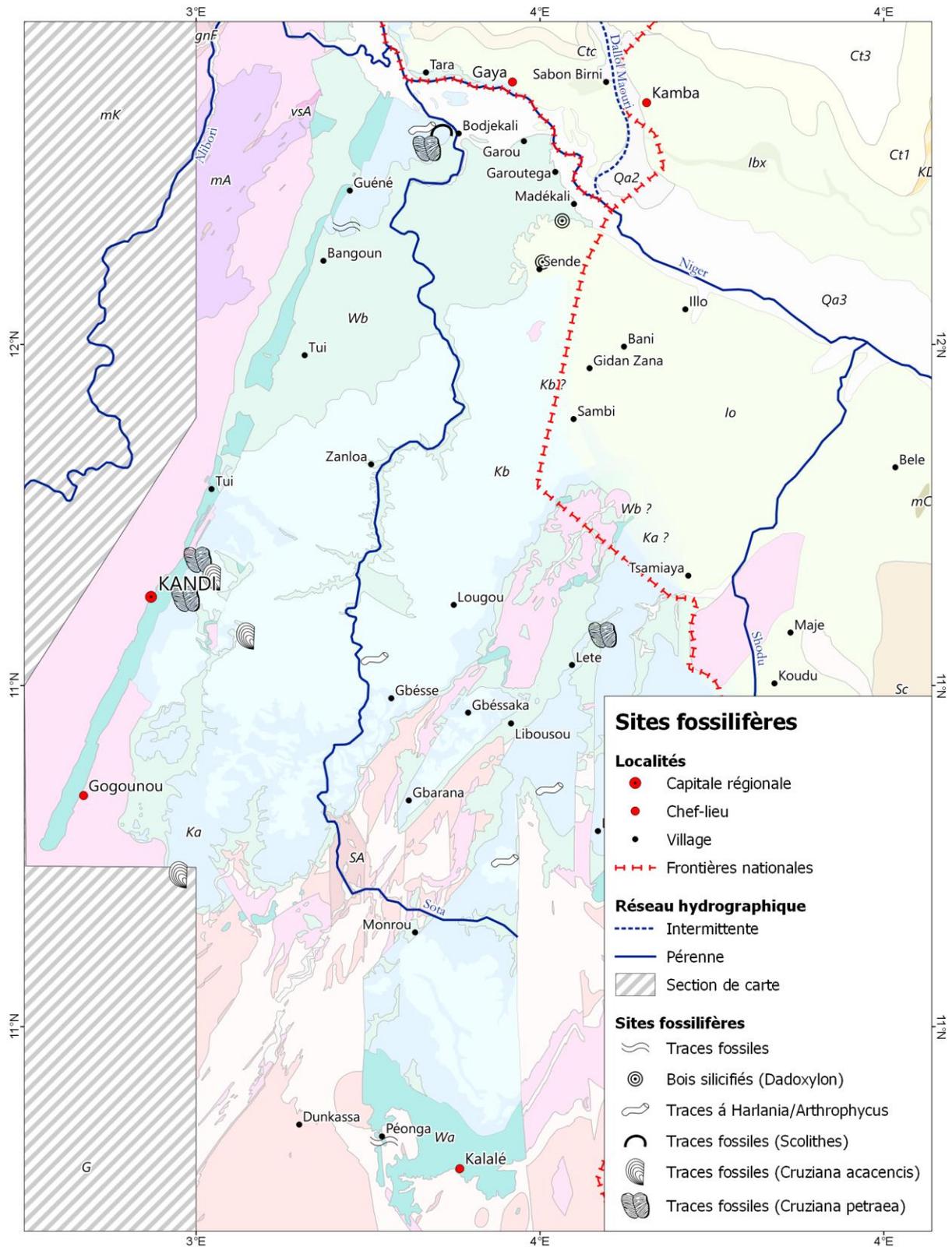


Fig. 20 : Sites fossilifères et sites fossilifères à l'état de traces compilés par Alidou et al (1986), Alidou (1987), et Konaté et al (2003a). Pour des informations géologiques de base, cf. Carte Géologique harmonisée ci-jointe.

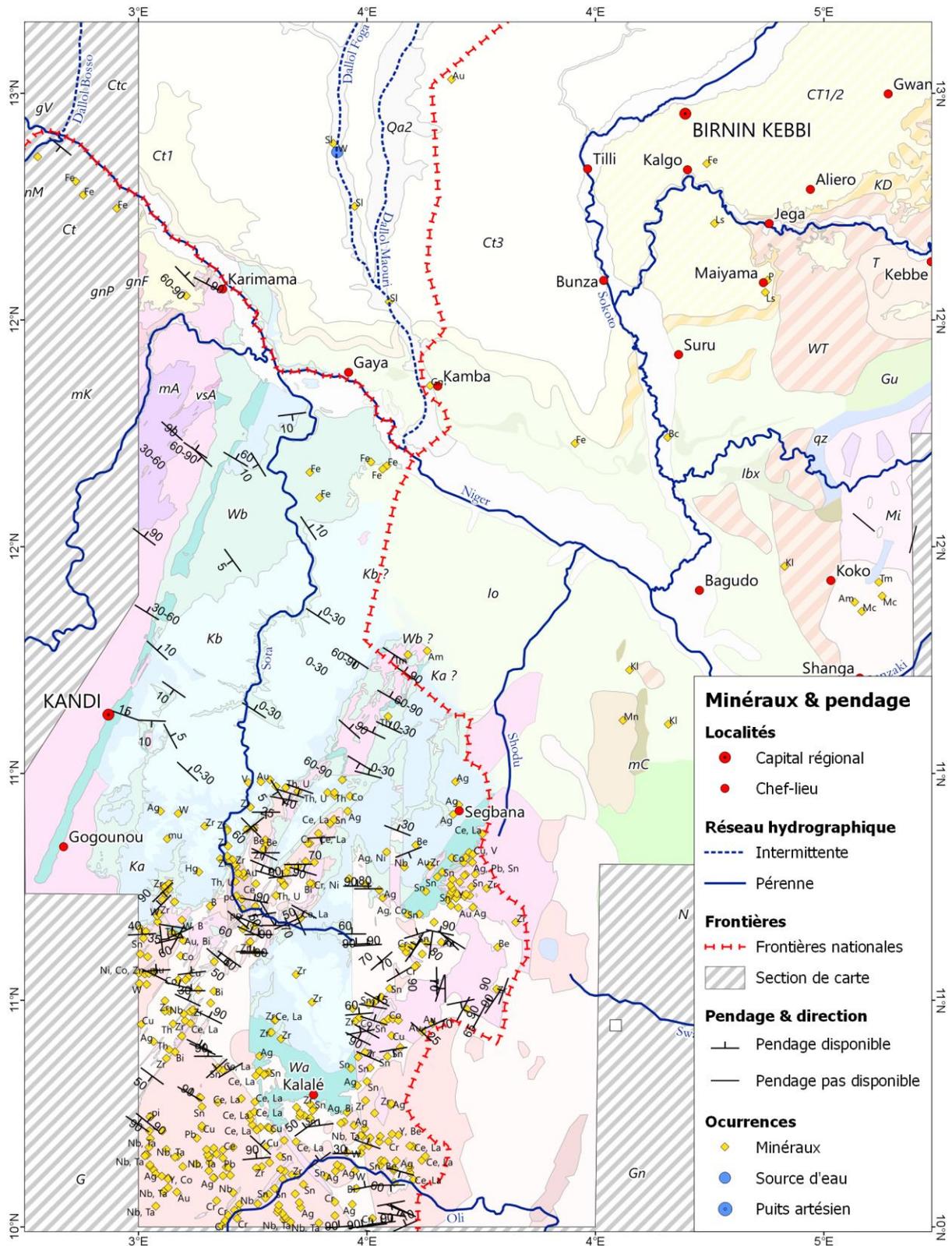


Fig. 21 : Informations sur la présence des minéraux et direction & pendage. Pour les informations géologiques de base, cf. Carte Géologique harmonisée ci-jointe

Tab. 10 : Coupes géologiques transversales : Aperçu et sources

Source	Section	Label
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Fig. 14a	Fig. 14a	Fig. 14a
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Fig. 14b	Fig. 14b	Fig. 14b
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 2, Coupe I	Planche 2, Coupe I	FAO (1970), Planche 2, Coupe I
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 2, Coupe II	Planche 2, Coupe II	FAO (1970), Planche 2, Coupe II
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 2, Coupe III	Planche 2, Coupe III	FAO (1970), Planche 2, Coupe III
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 2, Coupe IV	Planche 2, Coupe IV	IV
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe J	Planche 3, Coupe J	J
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe H	Planche 3, Coupe H	H
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe G	Planche 3, Coupe G	G
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe F	Planche 3, Coupe F	F
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe E	Planche 3, Coupe E	E
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe C	Planche 3, Coupe C	C
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe B	Planche 3, Coupe B	B
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe A	Planche 3, Coupe A	A
FAO (1970) Mise en valeur du Dallol Bosso, Planche N° 3, Coupe longitudinale du Dallol	Planche 3, Coupe Longitudinale Dallol	FAO (1970), Planche 3, Coupe Longitudinale Dallol
DOS-GSN (1965) Geological Survey of Nigeria, Tangaza	-	DOS (1965), Tangaza
DOS-GSN (1965) Geological Survey of Nigeria, Sokoto	-	DOS (1965), Sokoto
DOS-GSN (1965) Geological Survey of Nigeria, Shinkafe	-	DOS (1965), Shinkafe
DOS-GSN (1965) Geological Survey of Nigeria, Birnin Kebbi	-	DOS (1965), Birnin Kebbi
DOS-GSN (1966) Geological Survey of Nigeria, Gummi B-B	B-B'	DOS (1966), Gummi B-B
DOS-GSN (1966) Geological Survey of Nigeria, Gummi A-A	A-A'	DOS (1966), Gummi A-A
DOS-GSN (1965) Geological Survey of Nigeria, Gusau	-	DOS (1965), Gusau
DOS-GSN (1960) Geological Survey of Nigeria, Potiskum	-	DOS (1960), Potiskum
DOS-GSN (1960) Geological Survey of Nigeria, Kuseriki	-	DOS (1960), Kuseriki
DOS-GSN (1960) Geological Survey of Nigeria, Gombe	-	DOS (1960), Gombe
DOS-GSN (1960) Geological Survey of Nigeria, Lau	-	DOS (1960), Lau
Anderson & Ogilbee (1973): Aquifers in the Sokoto basin, northwestern Nigeria, Plate 3	Plate 3	USGS (1973), Planche 3
JICA (1990) The study of groundwater development in Sokoto State, Vol. 1, Fig. 08, B-B'	Vol. 1, Fig. 08, B-B'	JICA (1990), Vol. 1, Fig. 08, B-B'
JICA (1990) The study of groundwater development in Sokoto State, Vol. 1, Fig. 08, A-A'	Vol. 1, Fig. 08, A-A'	JICA (1990), Vol. 1, Fig. 08, A-A'
JICA (1990) The study of groundwater development in Sokoto State, Vol. 1, Fig. 08, C-C'	Vol. 1, Fig. 08, C-C'	JICA (1990), Vol. 1, Fig. 08, C-C'
Bouid (1971) : Développement de l'utilisation des eaux souterraines, Dahomey. Hydrogéologie.	Carte/Planche 3, A	Bouid 3A
Bouid (1971) : Développement de l'Utilisation des Eaux Souterraines, Dahomey. Hydrogéologie.	Carte/Planche 3, B	Bouid 3B
Bouid (1971) : Développement de l'Utilisation des Eaux Souterraines, Dahomey. Hydrogéologie.	Carte/Planche 3, C	Bouid 3C
Bouid (1971) : Développement de l'Utilisation des Eaux Souterraines, Dahomey. Hydrogéologie.	Carte/Planche 3, D	Bouid 3D
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Malanville	Malanville E'-E''	Malanville E'-E''
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Malanville	Malanville C-C'	Malanville C-C'
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Kandi	Kandi E-E'	Breda (1989), Kandi E-E'
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Kandi	Kandi C-C'	Breda (1989), Kandi C-C'
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Karimama	Karimama B-B'	Breda (1989), Karimama B-B'
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Karimama	Karimama A-A'	Breda (1989), Karimama A-A'
Breda (1989) Note explicative de la Carte Géologique à 1/200.000, Porga	Porga D-D'	Breda (1989), Porga D-D'
Technoexport (1995) Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Bembereke	Bembereke, C-D-E	Technoexport (1995), C-D-E
Technoexport (1995) Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa	Dunkassa, E-F	Technoexport (1995), E-F
Technoexport (1995) Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa	Dunkassa, I-J	Technoexport (1995), I-J
Technoexport (1995) Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Natigingou	Natingingou, B-C	Technoexport (1995), B-C
Technoexport (1995) Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Natigingou	Natingingou, G-H	Technoexport (1995), G-H

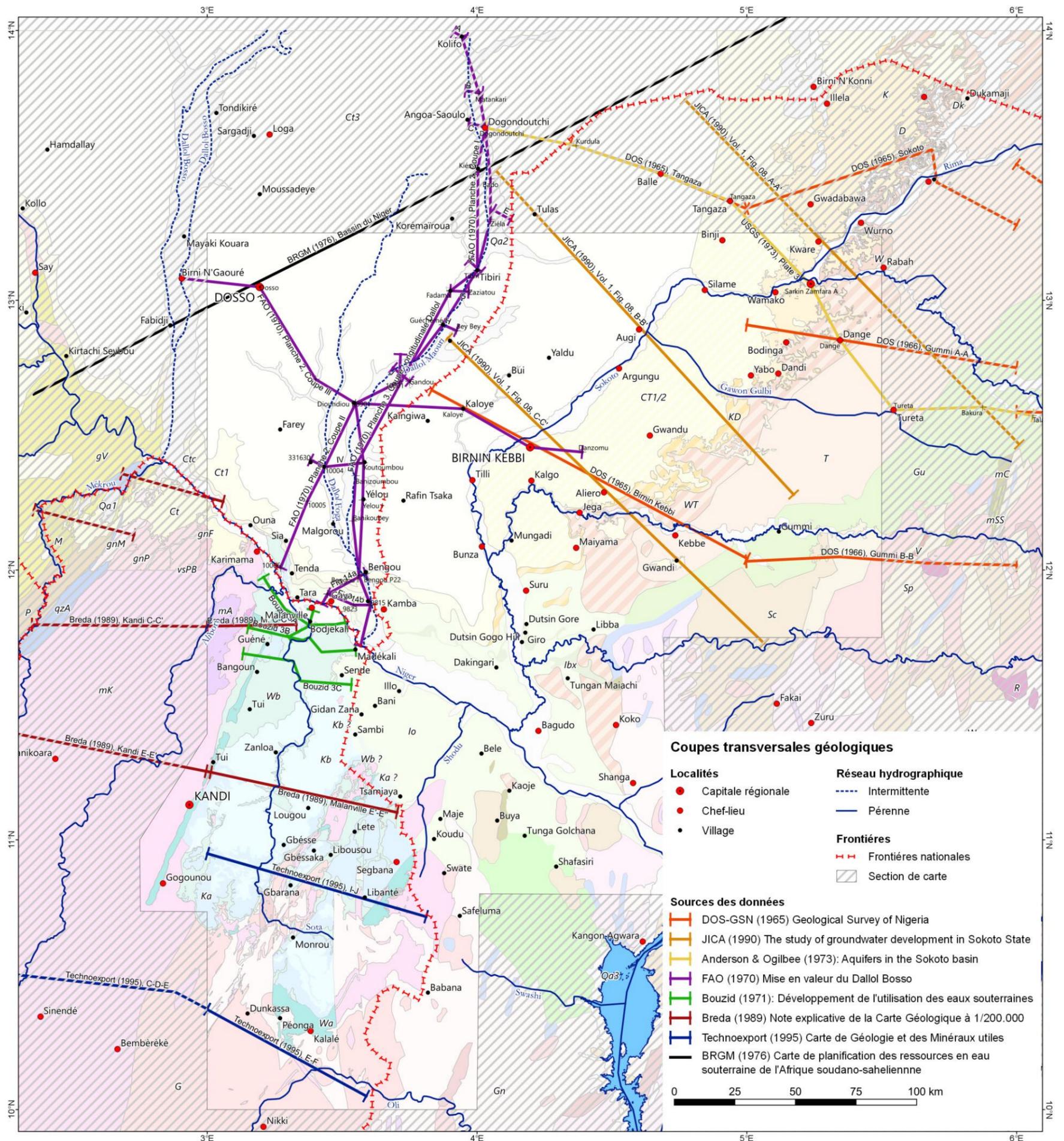


Fig. 22 : Coupes transversales géologiques compilées à partir de différentes sources. Voir Annexe V pour une sélection des coupes transversales. Pour des informations géologiques de base, cf. Carte Géologique harmonisée ci-jointe

7 Conclusions

7.1 Remarques d'ordre général

Les cartes géologiques de la région frontalière du Bénin, du Niger et du Nigeria ont été harmonisées sur les plans thématique et géométrique. La Carte Géologique transfrontalière harmonisée :

- est une carte **multi-échelles** affichant des informations spatiales à différentes échelles en fonction de la couverture des cartes originales ;
- recueille et intègre les informations les plus détaillées disponibles pour chaque région ;
- est une **carte** bidimensionnelle **des roches solides** et présente des informations sur la **couche géologique supérieure affleurante**. Les couches de recouvrement et les dérives sont résumées dans une couche de recouvrement. Pour obtenir des informations sur l'épaisseur des strates, le lecteur est prié de consulter la documentation géologique auxiliaire ;
- met l'accent sur les bassins sédimentaires. La différenciation des unités de socle se limite aux grandes catégories ;
- **met en évidence les problèmes stratigraphiques non résolus** le long des limites des cartes afin de signaler les zones et les sujets de recherche géologique à venir ;
- fournit des **informations spatiales de base** pour des analyses géoscientifiques plus approfondies comme, par exemple, les évaluations hydrogéologiques.

L'harmonisation de huit cartes géologiques de la zone d'étude a mis en exergue :

- l'absence ultérieure de carte géologique transfrontalière à l'échelle 1/1 000.000.000 en Afrique de l'Ouest ;
- des interprétations géologiques divergentes entre les séries de cartes et les auteurs de cartes ;
- la nécessité de travaux géologiques ciblés sur le terrain afin de résoudre les incohérences constatées entre les cartes.

7.2 Déficiences et questions non résolues

7.2.1 Limites des cartes entre Bénin-Nigéria

La lithostratigraphie et chronostratigraphie révisée du Bassin de Kandi suggère que les strates paléozoïques s'étendent du Bénin jusqu'au Nigeria adjacent, tandis que la couverture sédimentaire dans les régions nigérianes de Bagudo, (État de Kebbi) et Borgu (État de Niger) a été supposée appartenir à la formation d'Illo (Jones 1948) ou au Continental Hamadien (Greigert & Pougnet 1966). Négligée par les géologues coloniaux et nigériens, les compagnies minières et les projets de développement (inter)nationaux, la géologie de la rive droite du fleuve Niger dans les États de Kebbi et Borgu a fait l'objet de spéculations sur toutes les cartes géologiques ultérieures. L'extension exacte vers l'est du bassin paléozoïque de Kandi ne peut être délimitée que par une cartographie géologique approfondie sur le terrain. Des aires de transition provisoires ont été délimitées suivant les contours des unités et appuyées par des images satellitaires. Les unités *Ka ?*, *Wb ?* respectives, soulignent le manque d'informations géologiques fiables et requièrent des travaux géologiques détaillés sur le terrain.

7.2.2 Qualité des jeux de données disponibles

Les jeux de données numériques—*Geological and Mineral Resource map of Kebbi State* (NGSA 2011a) et *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c)—fournies par la Nigerian Geological Survey Agency—montrent plusieurs lacunes telles qu'une topologie SIG défectueuse, une simplification importante des caractéristiques, des erreurs techniques et des incohérences thématiques. Les incohérences thématiques se rapportent à l'inadéquation de la légende de la carte et la confusion des codes de légende, la répartition stratigraphique incohérente des unités et les erreurs dans la description des légendes. En particulier, la carte nationale *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c) a dû être manuellement ajustée.

Les jeux de données les moins fiables se trouvent dans la zone située entre les fleuves Niger, Sokoto et Zamfara. En particulier, d'autres travaux géologiques de terrain s'avèrent nécessaires afin d'établir une image cohérente et fiable du milieu géologique. La question la plus pertinente a trait à la délimitation du Continental Hamadien et ses limites avec le Continental Terminal et la formation de Wuruno dans le triangle Jega, Dakingari et Koko. Il existe, en particulier, une contradiction en ce qui concerne les affleurements de la formation Paléocène de Kalambaina interposée et la couche d'argile bauxitique du Continental Hamadien.

En dépit de ces insuffisances, les données officielles de la Nigerian Geological Survey Agency ont enrichi la Carte Géologique transfrontalière par la différenciation des formations de Gundumi et de Taloka dans la partie nord-est du bassin de Sokoto.

7.2.3 Complexe de base du Continental Terminal vs Continental Hamadien

La région située au sud du fleuve Niger a toujours été la zone de transition entre les processus d'érosion du socle et les processus de sédimentation dans les bassins de l'Iullemeden, de Sokoto et de Kandi, et marque la limite sud des dépôts continentaux et marins. Les dépôts terrestres du Continental Hamadien et du Continental Terminal sont considérés comme des couches de recouvrement peu profondes et largement érodées de nos jours. On n'a pas signalé d'affleurements de sédiments marins intermédiaires—reflétant les transgressions marines du Crétacé tardif—à l'est de la rivière Sokoto. L'absence de sections continues fiables enregistrant à la fois le Continental Hamadien et sa transition (ou son arrêt) vers le Continental Terminal a facilité l'attribution contradictoire des mêmes strates à différentes formations géologiques. Le *Continental Terminal—complexe de base* est décrit comme un faciès conglomératique du Continental Terminal mais ressemble fortement aux descriptions du Continental Hamadien (Formation de Sendé/Illo/Gundumi): « A ces poudingues s'ajoutent des grès siliceux à grains de toutes tailles, classés ou non, des arkoses, de l'argile kaolinique bariolée. » (Greigert 1961). Greigert lui-même évoque la possibilité de deux séries différentes.

Localement, les zones cartographiées en tant que *Continental Terminal-complexe de base* ont, par la suite, été révisées et classées comme membre conglomératique de Wéré B (Konaté 1996). C'est le cas, par exemple, de la région de basse altitude près de Tenda en amont de Gaya décrite comme « des poudingues à stratification entrecroisée, à blocs de quartzites ou des quartz laiteux, peu usés pouvant atteindre 10 cm de longueur ... parfois franchement anguleux ... dans un ciment qui est un grès siliceux » (Greigert & Pougnet 1967).

Étant donné : a) leur lithologie similaire ; b) l'absence de séquences marines intermédiaires ; et c) l'absence d'indicateurs stratigraphiques forts, la différenciation entre le Continental Hamadien et le complexe de base du Continental Terminal n'est pas évidente. Le Complexe de base n'est peut-être pas un substrat du Continental Terminal, mais un faciès de marge du Continental Hamadien crétacé. Des travaux lithostratigraphiques approfondis sont nécessaires pour décrire, différencier et

cartographier les deux sédiments continentaux—en tenant également compte des rapports d'un conglomérat basal près de Niamey (Machens 1967).

7.2.4 Transition Formation d'Illo—Grès de Nupe

La transition entre la formation d'Illo du Bassin de l'Iullemeden/Sokoto et Les Grès de Nupe (Grès de Bida) du Bassin de Bida est traitée différemment par les cartographes. Les deux sont des sédiments terrestres du Crétacé. Dessauvage (1974) utilise une seule classe de signature pour l'ensemble du Crétacé en utilisant des étiquettes différentes mais sans délimiter spatialement chaque formation. La *Geological Map of Nigeria* (NGSA 2011c) montre une transition entre Les Grès de Nupe et la Formation d'Illo près du confluent Niger-Sokoto, et la *Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, Nigeria* (NGSA 2011a) classe l'ensemble du Crétacé Supérieur comme Formation d'Illo. La Carte Géologique transfrontalière élaborée montre la formation d'Illo sur les rives droite et gauche du fleuve Niger. La transition vers Les Grès de Nupe est supposée à environ 11°N dans le substrat rocheux étroit entre Tunga Golchana et Shafasiri—étant donné le manque de preuves solides, la limite de l'Etat de Kebbi a été choisie comme limite pratique—une décision arbitraire qui mérite d'être ultérieurement révisée par des recherches de terrain.

7.2.5 Complexe de socle

L'agrégation des unités de socle a suivi les descriptions lithologiques des légendes des cartes. La différenciation en unités (chrono-) stratigraphiques n'était possible que pour le Bénin. Pour le Nigéria, ces informations n'étaient pas disponibles. Pour de plus amples informations sur la géologie des socles, veuillez consulter la littérature correspondante.

8 Références

- Achidi, J-B, Bourguet, L, Elsaesser, R, Legier, A, Paulvé, A & Tribouillard, N (2012): Carte Hydrogéologique: Bassin sédimentaire de Kandi à l'échelle 1/200.000. IGIP/GIZ, Cotonou.
- Akibou, T, Bozzola, A, Cremante, G, Lazzarotto, V, Maraga, F, Martinotti, G, Maranzana, F, Novero, F, Piovano, E, Roman, E, Sadonou, N, Zauli, M, Zerbato, M, Kogblevi, JC, Alidou, S, Tsawlassou, G & Houessou, A (1989a): Carte Géologique - Feuille Kandi (NC-31-XXI). Projet FED N° 4105-011-13-20, Istituto ricerche Breda & OBEMINS, Italie.
- Akibou, T, Bozzola, A, Cremante, G, Lazzarotto, V, Maraga, F, Martinotti, G, Maranzana, F, Novero, F, Piovano, E, Roman, E, Sadonou, N, Zauli, M, Zerbato, M, Kogblevi, JC, Alidou, S, Tsawlassou, G & Houessou, A (1989b): Carte Géologique - Feuille Karimama (ND-31-III/IV). Projet FED N° 4105-011-13-20, Istituto ricerche Breda & OBEMINS, Italie.
- Akibou, T, Bozzola, A, Cremante, G, Lazzarotto, V, Maraga, F, Martinotti, G, Maranzana, F, Novero, F, Piovano, E, Roman, E, Sadonou, N, Zauli, M, Zerbato, M, Kogblevi, JC, Alidou, S, Tsawlassou, G & Houessou, A (1989c): Carte Géologique - Feuille Malanville (NC-31-XXII). Projet FED N° 4105-011-13-20, Istituto ricerche Breda & OBEMINS, Italie.
- Akibou, T, Bozzola, A, Cremante, G, Lazzarotto, V, Maraga, F, Martinotti, G, Maranzana, F, Novero, F, Piovano, E, Roman, E, Sadonou, N, Zauli, M, Zerbato, M, Kogblevi, JC, Alidou, S, Tsawlassou, G & Houessou, A (1989d): Carte Géologique - Feuille Porga (NC-31-XIX/XX). Projet FED N° 4105-011-13-20, Istituto ricerche Breda & OBEMINS, Italie.
- Alidou, S (1987): *Etude géologique du bassin paléo-Mésozoïque de Kandi: Nord-Est du Bénin (Afrique de l'Ouest)*. vol 1978/13, Publication occasionnelle, Centre International pour la Formation et les Échanges Géologiques, Paris.
- Alidou, S & Lang, J (1983): Etude sédimentologique, paléogéographique et stratigraphique du bassin intracratonique paléozoïque-mésozoïque de Kandi (Nord-Est Bénin - Afrique de l'Ouest). *Geologische Rundschau*, vol. 72 pp. 191–206.
- Alidou, S, Lang, J, Bonvalot, J, Roman, E & Seilacher, A (1991): Marine influences in the so-called continental sediments of the Paleozoic-Mesozoic Kandi Basin (Northern Benin - West Africa). *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, vol. 12, no. 1 pp. 55–65.
- Alidou, S, Lang, J & Lemoigne, Y (1979): Bois de structure gymnospermienne provenant des formations du bassin de Kandi ('Continental intercalaire') dans le Nord-Est du Bénin. *7ème Réunion annuelle Sci. Terre* p. 4.
- Alidou, S, Lang, J, Roman, E & Seilacher, A (1986): Elements de datation en faveur d'un age Paléozoïque et Mésozoïque du bassin de Kandi (Nord-Est du Bénin, Afrique de l'Ouest). *Journal of African Earth Sciences (1983)*, vol. 5, no. 4 pp. 339–344.
- Anderson, HR & Ogilbee, W (1973): *Aquifers in the Sokoto basin, northwestern Nigeria, with a description of the general hydrogeology of the region*. USGS Numbered Series, Water Supply Paper N°1757– L, USGS.
- ANTEA Group & JMB Consult (2012): *Rapport de Synthèse Hydrogéologique. Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudèni/Tanzerouft, et du fleuve Niger (GICRESAIT)*. Rapport de Synthèse, Rapport OSS-GICRESAIT N°N° 14, OSS, BAD, FAE p. 86.
- Beauvais, A & Chardon, D (2013): Modes, tempo, and spatial variability of Cenozoic cratonic denudation: The West African example. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 14, no. 5 pp. 1590–1608.
- Bouزيد, M (1971): *Développement de l'utilisation des eaux souterraines, Dahomey. Hydrogéologie*. AGL-SDF/DAH 3, Rapport technique N°1, FAO, Rome p. 88.
- Braeburn, C & Tattam, CM (1930): *A Preliminary Note on the Sedimentary Rocks of Sokoto Province*. vol 13, Bulletin of Nigeria Geological Survey.
- Brinkhoff, T (2018): City Population, <http://www.citypopulation.de>.
- Bumby, AJ & Guiraud, R (2005): The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 43, no. 1–3 pp. 1–12.
- Burke, K & Gunnell, Y (2008): *The African Erosion Surface: A Continental-Scale Synthesis of Geomorphology, Tectonics, and Environmental Change Over the Past 180 Million Years*. Geological Society of America.
- Buser, H (1966): *Paleostructures of Nigeria and adjacent countries*. vol 24, Geotektonische Forschungen, Schweizerbart, Stuttgart.
- Chardon, D, Grimaud, J-L, Rouby, D, Beauvais, A & Christophoul, F (2016): Stabilization of large drainage basins over geological time scales: Cenozoic West Africa, hot spot swell growth, and the Niger River. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 17, no. 3 pp. 1164–1181.
- Clifford, JM (2003): Grids & Datums: Republic of Benin. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* pp. 733–735.
- Clifford, JM (2009): Grids & Datums: Federal Republic of Nigeria. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* pp. 113–116.
- Clifford, JM (2011): Grids & Datums: Republic of Niger. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* pp. 1097–1098.

- Dessauvagie, TFJ (1974): Geological Map of Nigeria. The Nigerian Mining, Geological & Metallurgical Society.
- Directorate of Overseas Surveys (1966): Geological Survey of Nigeria, 1:250.000 Series, Sheet 7, Gummi.
- D.O.S. (1965a): Geological Survey of Nigeria, 1:250.000 Series, Sheet 2, Sokoto. Directorate of Overseas Surveys.
- D.O.S. (1965b): Geological Survey of Nigeria, 1:250,000 Series, Sheet 3, Shinkafe. Directorate of Overseas Surveys.
- D.O.S. (1965c): Geological Survey of Nigeria, 1:250,000 Series, Sheet 6, Birnin Kebbi. Directorate of Overseas Surveys.
- D.O.S. (1966a): Geological Survey of Nigeria, 1:250.000 Series, Sheet 1, Tangaza. Directorate of Overseas Surveys.
- D.O.S. (1966b): Geological Survey of Nigeria, 1:250.000 Series, Sheet 7, Gummi. Directorate of Overseas Surveys.
- D.O.S. (1966c): Geological Survey of Nigeria, 1:250.000 Series, Sheet 8, Gusau. Directorate of Overseas Surveys.
- Duscher, K, Günther, A, Richts, A, Clos, P, Philipp, U & Struckmeier, W (2015): The GIS layers of the 'International Hydrogeological Map of Europe 1:1,500,000' in a vector format. *Hydrogeology Journal*, vol. 23, no. 8 pp. 1867–1875.
- FAO (1970): *Etudes en vue de la mise en valeur du Dallol Maouri. Niger: Les eaux souterraines*. vol 1, Rapport technique, FAO/UNDP, Rome.
- Faure, H (1966): *Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger oriental*. BRGM, Paris.
- Geological Survey Division (1965): Geological Map of Nigeria 1964. Director of Federal Surveys.
- Geological Survey Division (1974): Geological Map of Nigeria 1974. Federal Surveys.
- Greigert, J (1960): Carte Géologique de Reconnaissance: Dosso, 1:500.000. BRGM.
- Greigert, J (1961a): Carte Géologique de Reconnaissance du Bassin des lullemeden, échelle 1/1.000.000. BRGM, Paris.
- Greigert, J (1961b): *Notice explicative sur la Feuille Dosso (ND-31-SE)*. Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 500000, BRGM, Dakar.
- Greigert, J (1968): *Les Eaux Souterraines de la République du Niger*. vol 1 & 2, BRGM / République du Niger, Ministère des Travaux Publics, des Transports, des Mines et de l'Urbanisme, Mines et de l'Hydraulique / BRGM, Niamey.
- Greigert, J (1978): *Atlas des Eaux Souterraines du Niger*. vol Tome 1-État des Connaissances (Mai 1978), BRGM / République du Niger, Ministère des Mines et de l'Hydraulique.
- Greigert, J & Pougnet, R (1966): République du Niger. Carte Géologique, 1/2 000 000. BRGM, Paris.
- Greigert, J & Pougnet, R (1967): *Notice Explicative sur la Carte Géologique de la République du Niger à l'échelle du 1/2 000 000*. BRGM, Paris.
- Guero, A (2003): Etude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure sud-ouest du bassin des lullemeden (Niger) - Approches géochimiques et hydrodynamiques. Dissertation thesis, Université Paris XI, Orsay.
- Hubert, H (1908): *Mission scientifique au Dahomey*. Paris.
- Ibrahim, AA, Moussa, K & Boureima, O (2016): Lineamentary and Structural Cartography of lullemeden Basin in the Dosso Region (South-West of Niger). *International Journal of Science and Research*, vol. 7, no. 4 pp. 1168–1176.
- Istituto ricerca Breda & OBEMINS (1989): *Notice explicative de la Carte Géologique à 1/200.000. Feuilles: Karimama, Porga, Kandi, Malanville*. Projet FED N° 4105-011-13-20, Mémoire N°2, Istituto ricerca Breda & Office béninois des Mines (OBEMINS), Italie.
- JICA (1990): *The Study for Groundwater Development in Sokoto State*. Federal Department of Water Resources & Japan International Cooperation Agency, Tokyo p. vol 1-5.
- Jones, B (1940): Geological Map of Sokoto Province, 1:500.000.
- Jones, B (1948): *The sedimentary rocks of Sokoto Province*. Bulletin of the Geological Survey of Nigeria N°18, Geological Survey of Nigeria, Kaduna.
- Kilian, C (1931): Des principaux complexes continentaux du Sahara. *Comptes Rendus sommaire de la Société Géologique* pp. 109–111.
- Kogbe, CA (1981): Cretaceous and Tertiary of the lullemeden Basin in Nigeria (West Africa). *Cretaceous Research*, vol. 2, no. 2 pp. 129–186.
- Kogbe, CA (1991): Stratigraphy and tectonic history of the lullemeden Basin in West Africa. *South African Journal of Geology*, vol. 94, no. 1 pp. 19–32.
- Kogbe, CA & Burolet, PF (1990): A review of continental sediments in Africa. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, vol. 10, no. 1–2 pp. 1–25.
- Kogbe, CA & Lemoigne, Y (1976): Fossil wood from the Gundumi and Illo Formations ('Continental Intercalaire') of northwestern Nigeria. in *Proceedings. 13th African Micropaleontological Colloquium*, Ile-Ife, Nigeria.

- Konaté, M (1996): Evolution tectono-sédimentaire du bassin paléozoïque de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). Un témoin de l'extension post-orogénique de la chaîne panafricaine. Dissertation thesis, Universités de Bourgogne & Nancy I, Nancy.
- Konaté, M, Guiraud, M, Alidou, S, Clermonte, J, Drouet, J-J & Lang, J (1994): Structuration and sedimentary dynamics of the Palaeozoic half-graben shaped Kandi Basin, Benin, Niger. *Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II: Sciences de la Terre et des Planetes*, vol. 318, no. 4 pp. 535–542.
- Konaté, M, Guiraud, M, Lang, J & Yahaya, M (2003a): Sedimentation in the Kandi extensional basin (Benin and Niger): fluvial and marine deposits related to the Late Ordovician deglaciation in West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 36, no. 3 pp. 185–206.
- Konaté, M, Guiraud, M, Lang, J & Yahaya, M (2003b): Structuration extensive et évolution tectono-sédimentaire du bassin d'âge Ordovicien supérieur-Silurien inférieur de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). *Africa Geoscience Review*, vol. 10, no. 1 & 2 pp. 33–68.
- Konaté, M, Lang, J, Guiraud, M, Yahaya, M, Denis, M & Alidou, S (2006): Un bassin extensif formé pendant la fonte de la calotte glaciaire hirnantiennienne : le bassin ordovico-silurien de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). *Africa Geoscience Review*, vol. Vol. 13, no. No. 2 pp. 157–183.
- Kröner, A & Stern, RJ (2005): Africa: Pan-African Orogeny. in *Encyclopedia of Geology*, Elsevier pp. 1–12.
- Lang, J, Kogbe, C, Alidou, S, Alzouma, K, Dubois, D, Houessou, A & Trichet, J (1986): Le Siderolithique du Tertiaire ouest-africain et le concept de continental terminal. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. II, no. 4 pp. 605–622.
- Lang, J, Kogbe, C, Alidou, S, Alzouma, KA, Bellion, G, Dubois, D, Durand, A, Guiraud, R, Houessou, A, de Klasz, I, Romann, E, Salard-Cheboldaëff, M & Trichet, J (1990): The continental terminal in West Africa. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, vol. 10, no. 1–2 pp. 79–99.
- Machens, E (1966): Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000. BRGM, Paris.
- Machens, E (1967): *Notice Explicative sur la Carte Géologique du Niger Occidental à l'échelle du 1/200.000*. BRGM, Paris.
- Moody, RTJ (1997): The lullemeden Basin (Chapter 5). *Sedimentary Basins of the World*, vol. 3 pp. 89–103.
- Moody, RTJ & Sutcliffe, PJC (1991): The Cretaceous deposits of the lullemeden Basin of Niger, central West Africa. *Cretaceous Research*, vol. 12, no. 2 pp. 137–157.
- Moumouni, A, Hamza, H & Mijinyawa, A (2016): Stratigraphic Review of the Cretaceous Tertiary Deposits of the lullemeden Basin in Niger and Nigeria. *Asian Journal of Applied Sciences*, vol. 4, no. 2.
- Mücke, A (2000): Environmental conditions in the Late Cretaceous African Tethys: conclusions from a microscopic-microchemical study of ooidal ironstones from Egypt, Sudan and Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 30, no. 1 pp. 25–46.
- NASA EOSDIS Land Processes DAAC (2018): Landsat 8 OLI Tier 1. USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (<https://lpdaac.usgs.gov>), accessed 2018, <https://doi.org/10.5066/F7183556>.
- NASA Jet Propulsion Laboratory (2013): NASA Shuttle Radar Topography Mission Global (SRTMGL) 1 arc second. Version 3. 2.5-4.5°N. 10.5-13.5°W. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. doi: 10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003.
- NGSA (2011a): Geological and Mineral Resources Map of Kebbi State, Nigeria.
- NGSA (2011b): Geological and Mineral Resources Map of Sokoto State, Nigeria.
- NGSA (2011c): Geological Map of Nigeria.
- NIMA (National Imagery and Mapping Agency) (2001): Performance Specification Vector Smart Map (VMap) Level 0: MIL-PRF-89039, Amendment 2. <http://earth-info.nga.mil/publications/specs/printed/89039/89039A2.pdf>. Accessed 2018.
- OBEMINES (1995a): *Notice Explicative de la Carte Géologique à 1:200 000, Feuille Dunkassa*. Mémoire N°5, Office béninois des Mines, Pretoria.
- OBEMINES (1995b): *Notice Explicative de la Carte Géologique à 1:200 000, Feuilles Sansanné-Mango, Natitingou, Bembèrèkè*. Mémoire N°4, Office béninois des Mines, Pretoria.
- OSS (2011): *Système Aquifère d'lullemeden: Modèle hydrogéologique*. vol Tome III, Système Aquifère d'lullemeden (Mali - Niger - Nigeria), OSS, UNESCO, GIZ, Tunis.
- Oteze, GE (1971): *The aquifers of the Gwandu Formation*. GSN.
- Pougnat, R (1949): Stratigraphie et identification des formations continentales du Moyen-Niger et du Haut-Dahomey. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. S5-XIX, no. 4–6 pp. 493–498.

- Pougnat, R (1957a): *Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 500.000. Notice explicative sur la Feuille Kandi-Est (N° NC. 31-N.O.-E.34)*. Carte Géologique de Reconnaissance de l'AOF, 1:500000, Direction Fédérale Mines et Géologie, Dakar.
- Pougnat, R (1957b): *Kandi-E. Carte Géologique de Reconnaissance de l'A.O.F. Feuille N° NC 31-N.O.-E.34*. Carte Géologique de Reconnaissance de l'AOF, 1:500000, Direction Fédérale Mines et Géologie de l'A.O.F., Dakar.
- QGIS Development Team (2018): *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. <http://qgis.osgeo.org>.
- Seilacher A & Alidou S (1988): Ordovician and Silurian trace fossils from Northern Benin (W-Africa). *Neues Jahrb Geol Palaeontol Monatsh*, vol. 1988, no. 7 pp. 431–439.
- Tattam, CM (1943): *A Review of Nigerian Stratigraphy*. Research and Educational Development of the Geological Survey of Nigeria.
- Technoexport (1980): *La constitution et les substances utiles de la République Populaire du Bénin entre les 10ème et 11ème parallèles de latitude nord. Rapport Office Béninois des Mines*. Rapport, Office Béninois des Mines., Cotonou-Moscou p. 331.
- Technoexport (1984): *La constitution et les substances utiles de la partie Est de la République Populaire du Bénin, entre les 10ème et 11ème parallèles de latitude nord (Rapport du levé et de prospection géologiques à l'échelle de 1/200 000 effectués en 1981-1984)*. Rapport, Office Béninois des Mines., Cotonou p. 331.
- Technoexport (1995a): *Carte de Géologie et des Minéraux utiles, Bembereke (NC-31-XV)*. Conseil de la Géoscience, Pretoria.
- Technoexport (1995b): *Carte de Géologie et des Minéraux utiles, Dunkassa (NC-31-XVI)*. Conseil de la Géoscience, Pretoria.
- Young, TP (1989): Phanerozoic ironstones: an introduction and review. *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 46, no. 1 pp. ix–xxv.

9 Jeux de données numérisés

Administration : GADM28 (2018), <https://www.gadm.org> (modifié)

DEM : NASA JPL (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 30 arc second. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. DOI: 10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL30.002

Emplacements : OpenStreetMap (2018), www.openstreetmap.org (modifié)

Réseau de cours d'eau : Données internes de l'Autorité du Bassin du Niger(ABN), 2016, modifié

Appendix

Appendix	77
Géologie du sud du Bassin de l'Iullemeden	79
Bassin mésozoïque et paléozoïque de Kandi	79
La Formation de Wéré (Ouéré)	80
Formation de Kandi.....	82
Chronostratigraphie révisée.....	84
Continental Intercalaire/Continental Hamadien	84
Formation de Gundumi.....	86
Formation d'Illou.....	87
Grès de Nupe	87
Formation de Sendé (Benin)	88
Transgression marine du Crétacé Supérieur-Paléocène	89
Groupe Rima	89
Groupe Sokoto (Paléocène-Eocène)	90
Continental Terminal	91
Continental Terminal I (CT1) : Série Sidérolithique de l'Adar Douchi.....	92
Continental Terminal II (CT2) : <i>Série argilo-sableuse à lignites</i>	93
Continental Terminal III (CT3) : <i>Les Grès Argileux du Moyen Niger</i>	94
Complexe de base du Continental Terminal.....	94
Continental Terminal au Nigeria : la Formation de Gwandu	95
Autres cartes de la zone d'étude	97
Carte Géologique de Reconnaissance 1/500.000 (Pouget 1957).....	97
Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000 (<i>Machens 1966</i>)	97
Carte Hydrogéologique: Bassin sédimentaire de Kandi (Achidi et al. 2012).....	97
Légende Générale	101
Classification lithologique de l'IHME1500.....	107
Coupes transversales	115
Application dans QGIS.....	135
Préparation : Topologie (SIG).....	135
Harmonisation Spatiale (SIG)	136
Union de cartes.....	136
Adaptation manuelle des caractéristiques	136
Harmonisation thématique (Excel, SIG).....	137
Légende générale (travail de tableau, par exemple Excel)	137
Joindre la légende générale	137
Harmonisation des couches vectorielles avec des champs identiques.....	138
Jeux de données.....	139
Carte Géologique	139
Données supplémentaires	139
Données topographiques.....	139
Styles QGIS	140

Géologie du sud du Bassin de l'ullemmeden

Les chapitres suivants donnent un bref aperçu de l'histoire géologique de la zone d'étude et décrivent les unités géologiques les plus importantes.

Bassin mésozoïque et paléozoïque de Kandi

La Faille de Kandi est une vieille suture de chevauchement panafricaine entre le craton ouest africain et le craton du Congo (appelée Amguid dans le Hoggar et se prolonge au Brésil comme la faille Sobral). La fin de la glaciation de l'Ordovicien supérieur (Hirnantien), le rebond isostatique et les contraintes d'extension ont pu déclencher la réactivation de la faille de Kandi dans un mouvement normal, entraînant un demi-graben étendu (Fig. 23 & Fig. 25). Orienté N20°E, la faille de Kandi est une caractéristique géologique marquée qui limite fortement le Bassin de Kandi—un demi graben avec plusieurs blocs faillés, à savoir les horsts de Lété, Imina, Ouana, et Poria, séparé pour trois structures mineur de fossé dans la région de Kalalé (Kalalé, Péonga, Monrou), de Segbana (Segbana, Lété, Libanté), et de Gbéssaka. Le Bassin de Kandi s'étend sur environ 160 km du nord au sud et 50-100 km d'est en ouest et couvre une superficie d'environ 9 000 km². On estime que le remblai sédimentaire a une épaisseur maximale d'environ 600 m.

L'étude géologique du Bassin de Kandi a commencé avec la visite d'Hubert entre 1904 et 1906 (Hubert 1908). En 1957, Pognet décrit Les Grès *de Kandi* comme étant des sédiments dominants dans le Bassin de Kandi d'après des rapports provenant des zones autour de Kandi et de Zougou. Le long de la voie fédérale, il différencie davantage les conglomérats autour de Wéré (Ouéré), ainsi que les grès fins à grossiers. S'inspirant de Jones (1948) et Tattam (1943), il a supposé que les sédiments du Bassin de Kandi sont d'un âge crétacé précoce ou peut-être tardif. Bouzid a mené les premières études géophysiques pour évaluer la pertinence des prélèvements d'eau souterraine (Bouzid 1971) et a estimé la profondeur maximale des sédiments à environ 500 mètres. Dans les années 1980 et 1990, deux projets de cartographie, celui de Istituto Ricerche Breda de l'Italie (Akibou et al. 1989c; Istituto Ricerche Breda & OBEMINES 1989) et celui de Technoexport de la Russie (Technoexport 1995b, 1995a) ont fourni les premières cartes du Bassin de Kandi à l'échelle 1/200 000. Les travaux géologiques de terrain d'Alidou (1987) et de Konaté (1996) ont jeté les bases de la lithostratigraphie et de la chronostratigraphie actuelle du Bassin de Kandi. Le résumé présenté ici suit la subdivision proposée par Konaté (1996) et affinée, par après, par Konaté et al (2003a, 2006).

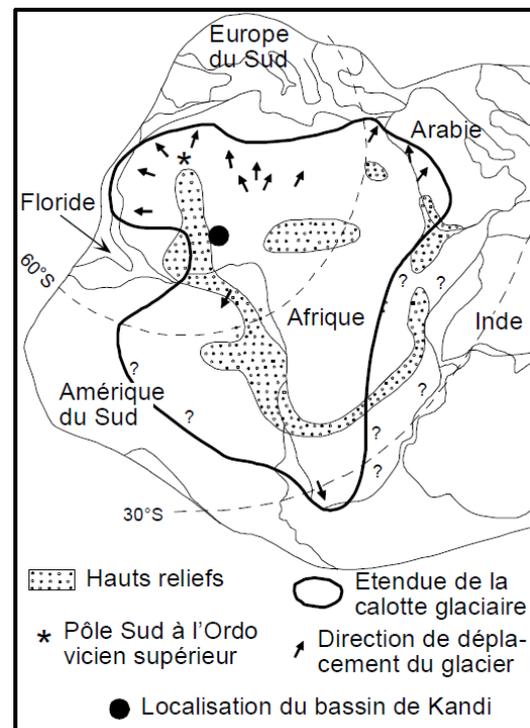


Fig. 23 : Étendue maximale de l'inlandsis de l'Ordovicien tardif (Konaté et al. 2006)

La Formation de Wéré (Ouéré)

La Formation continentale de Wéré (jusqu'à 500 m) comprend une succession de dépôts périglaciaires remaniés. Le **membre Wa** comprend les tills remaniés, les dépôts d'épandage glaciaire et les cônes alluviaux ; le **membre Wb** comprend les sédiments fluvio-glaciaires des cours d'eau en tresses. Le dépôt a eu lieu à la fin de la glaciation de l'Ordovicien supérieur (Hirnantien, 440-460 Ma) qui était centrée sur l'Afrique de l'Ouest et qui est supposée être responsable du deuxième événement d'extinction le plus important de l'histoire de la Terre. La sédimentation syntectonique suggère un rebond isostatique qui a entraîné une réactivation extensionnelle de la faille de Kandi en même temps que la déglaciation et un approfondissement progressif et un remplissage du bassin d'ouest en est, comme en témoignent les sédiments fortement inclinés près de la faille de Kandi et les discordances inclinées dans et entre les composantes lithostratigraphiques (Fig. 25 et Fig. 24). Le dépôt syntectonique dans un milieu glaciaire (Wa) d'abord, puis dans un réseau de cours d'eau en tresses fluvio-glaciaire (Wb) suivi de sédiments de marée à tempête (Ka) et en mer peu profonde (Kb), reflète un seul accident tectonique et les séquence des dépôts correspondants. Une discordance majeure, qui laisse présager le ravinement, indique un hiatus et une érosion prolongés avant la transgression marine dans le Silurien précoce.

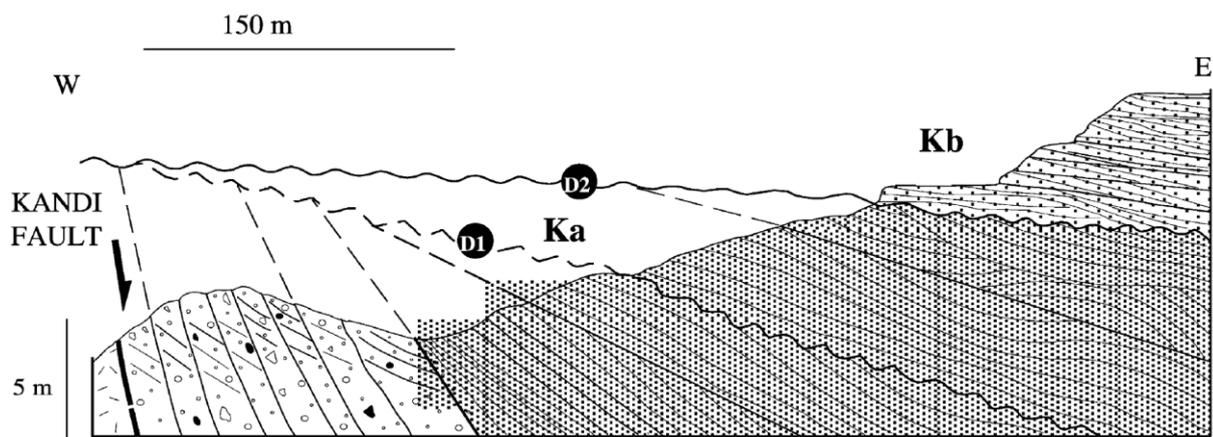
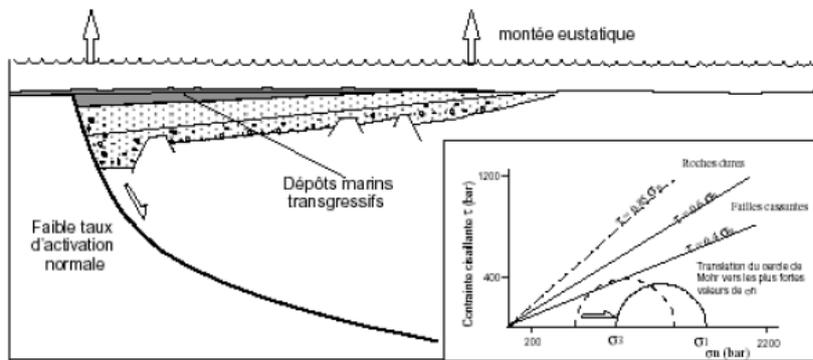


Fig. 24 : Dépôt syntectonique de la Formation de Wéré dans la zone de Tui indiqué par des cônes alluviaux conditionnés par la tectonique. La Formation de Kandi présente des discordances progressives à grande échelle et une déposition généralement post-tectonique (from Konaté et al. 2003a)

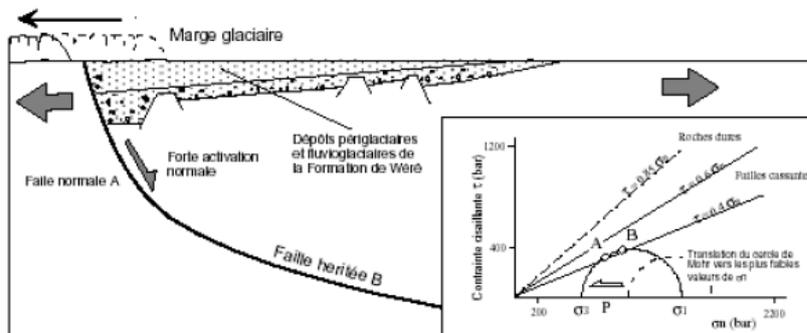
Wéré A (membre Wa)

Le membre Wa (jusqu'à 150 m) est décrite comme étant soit une diamicrite/brèche, soit un grès à grains moyens à grossiers présentant un croisement tabulaire à en creux avec des blocs quartzitiques angulaires et des cailloux facettés (Fig. 26). La brèche polymictique mal triée avec des blocs de taille erratique d'un décimètre dispersés dans un sédiment massif fin ressemble aux blocs de délestage typiques des galeries glaciaires. En 2003, Konaté a affiné son interprétation précédente de la formation clastique de Wéré et a interprété ces brèches/conglomérats supportés par une matrice comme du till glaciaire avec des blocs de délestage se trouvant côte à côte avec des sédiments glacio-fluviaux, des sandurs, de l'argile à blocs et des dépôts en rainures. Les gisements montrent des structures de chenaux à grande échelle et une troncature par érosion. Le membre Wa s'étend sur une étroite bande (<5 km) le long de la faille de Kandi et est interprétée comme des dépôts de dérive glaciaire remplissant une paléovallée limitée par une faille incisée le long de la faille de Kandi—peut-être excavée par la calotte glaciaire de l'Ordovicien et remplie de tills et de dépôts de l'érosion. Vers l'est, le faciès Wa est

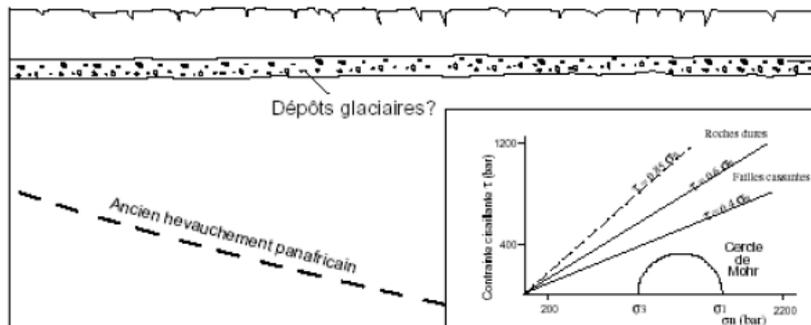
en continuité latéralement avec le faciès Wb. Le membre Wa est un faciès de marge de bassin qui se limite au sud-ouest et qui se change verticalement (Goungoun) et latéralement (centre du bassin) en le membre Wb.



C - Silurien inférieur : Fonte de la calotte glaciaire et transgression glacio-eustatique
Faible taux de formation de failles normales par rééquilibrage isostatique



B - Ordovicien Terminal : retrait glaciaire
Déglaciation favorisant une augmentation de la pression de fluide dans les pores et une augmentation du taux de formation des failles héritées



A - Ordovicien Terminal (Hirnantien) : épisode glaciaire
Inhibition du potentiel de formation de failles crustales sous l'effet d'une épaisse calotte glaciaire

Fig. 25: Réactivation postglaciaire de la faille normale de Kandi en demi-graben après le retrait de la calotte glaciaire Hirnantienne (Konaté et al. 2006)

En dehors du bassin conventionnel de Kandi étudié par Alidou (1987) et Konaté (1996), Technoexport (1995b) a cartographié trois structures de graben plus petites remplies par des gisements de la formation de Wéré (PZ₁₋₂W) : le fossé de Gébessaka—à l'est du horst de Lété/Gbessé, le bassin de Segbana et plus au sud le bassin de Kalalé-Péonga. En raison de sa concordance spatiale biunivoque avec le membre Wéré A le long de la faille de Kandi, et de sa description comme "gritty sandstones, micropudingstones and conglomerates", l'unité PZ₁₋₂W a été considérée comme l'équivalent du membre Wéré A de Konaté et al (2003a).

Wéré B (membre Wb)

La formation de Wéré B (jusqu'à 350 m) se présente sous la forme d'un grès grossier riche en granules ou d'une brèche mal triée et soutenue par une matrice. Le grès est presque sans structure, mais il peut présenter des formes tabulaires et des creux croisés, souvent en séquences ascendantes. Le membre Wéré B est interprétée comme un milieu de cours d'eau anastomosés marqué par un régime d'écoulement irrégulier.

Formation de Kandi

La fonte de la calotte glaciaire hirnantienne et l'élévation eustatique du niveau de la mer à la fin de la glaciation de l'Ordovicien supérieur ont provoqué une transgression marine et l'inondation du Bassin de Kandi par le nord. Cette transgression est illustrée par les 75 m de sédiments de la Formation marine de Kandi. Les grès fins et les siltites à litière sigmoïdale indiquent un environnement de barrière de marée et de littoral pour le membre Ka et les siltites et le grès fins à stratification croisée mamelonnés (« hummocky cross-stratification ») indiquent des dépôts des tempêtes et un milieu proche du large pour le membre Kb. La Formation de Kandi repose sur une discordance majeure caractérisée par des granules arrondis sur les dépôts de grès périglaciaire du membre Wb. Contrairement à la formation de Wéré, les preuves de tectonique synsédimentaire diminuent, en particulier au sein du membre Kb.

Kandi A (membre Ka)

Les dépôts inférieurs du membre Ka (environ 40 m) sont des siltites à grains fins présentant des stratifications rythmiques et des caractéristiques de bioturbation qui se transforment en grès blanc à grains fins à moyens avec une stratification transversale mamelonnés et érosive (« hummocky cross-stratification »). Les gisements d'argile kaolinique et les galets d'argile mous, angulaires à lisses, se trouvent au-dessus des berges. Les structures sédimentaires typiques sont les structures en grappes de marée, la stratification croisée mamelonnés par l'érosion et la stratification croisée à chevrons (« herringbone cross-bedding »), ce qui indique un milieu zone de marnage intertidale sous l'influence des marées. Le membre Ka est observé dans les secteurs nord et sud-est du bassin.

Kandi B (membre Kb)

Le membre Kb (30 m) comprend les sédiments supérieurs plus fins reflétant un milieu marin au large. Les siltites de couleur variable (blanc, jaune au violet) sont intercalés avec des lits ondulés (jusqu'à 1 m) de grès fin micacé. On note la présence d'ichnofossiles de *Cruziana*, d'*Arthropycose (Harlania)*, ainsi que de *Curvolithos* et de *Scolicia*. Les structures sédimentaires typiques sont des creux d'érosion en forme de lentille et une stratification croisée mamelonnés indiquant des dépôts des tempêtes. Avec la texture à grains fins, les sédiments sont interprétés comme reflétant un milieu de haute mer supérieur.

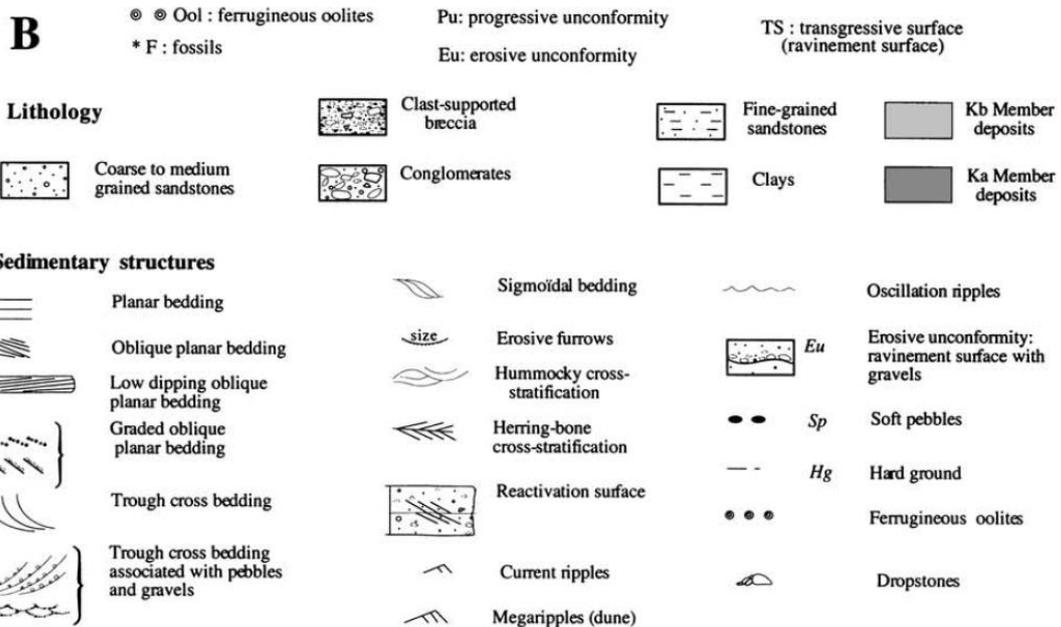
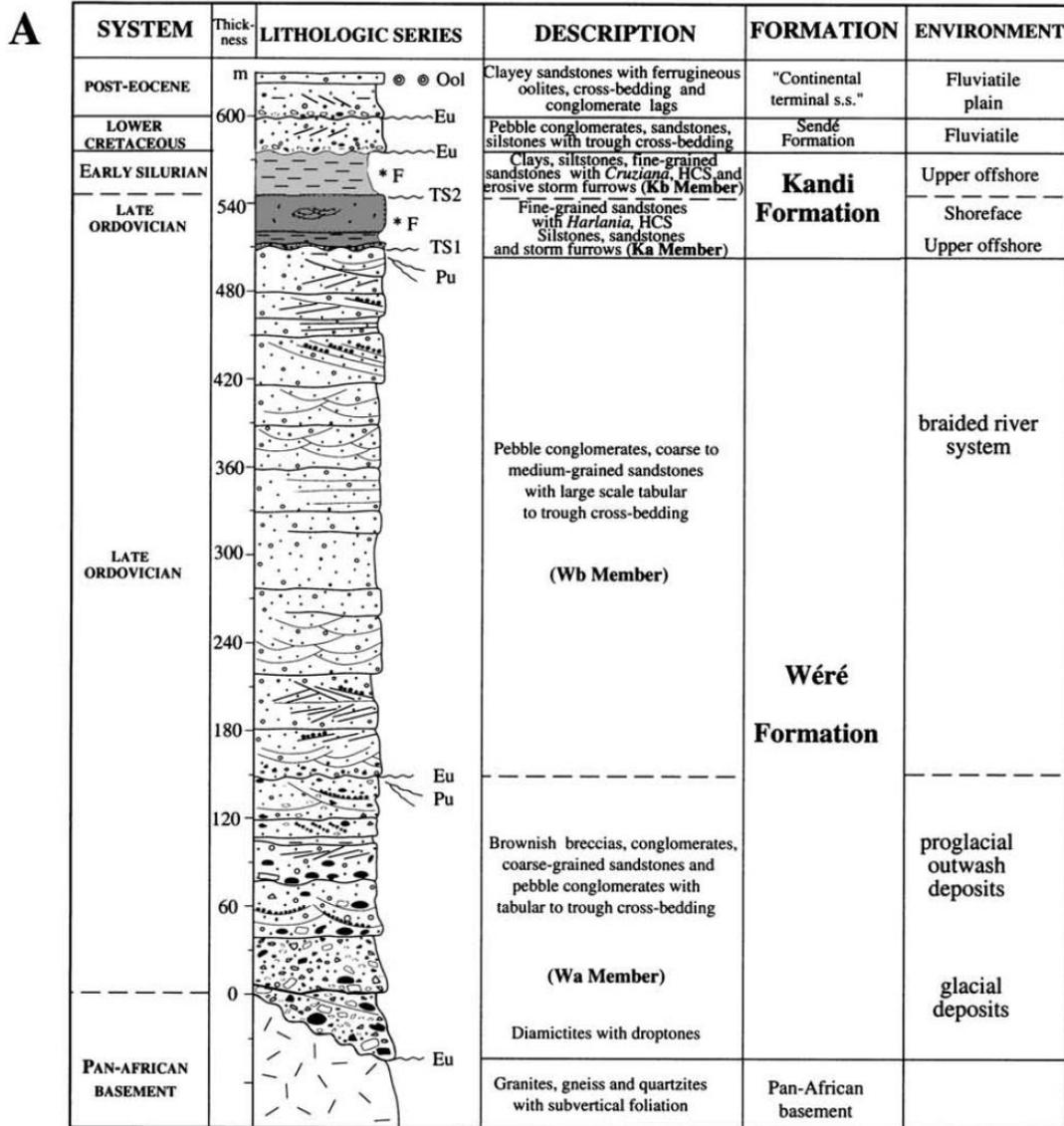


Fig. 26 : Lithostratigraphie de la série sédimentaire paléozoïque du Bassin de Kandi (de Konaté et al. 2003a)

Chronostratigraphie révisée

La datation—absolue ou relative—est fondamentale pour le placement des unités géologiques dans un cadre chronostratigraphique. Jones (1948) et Tattam (1943) supposent que les sédiments du Bassin de Kandi ont été déposés au Crétacé précoce ou peut-être tardif. Alidou (1987) a affiné la lithostratigraphie du Bassin de Kandi et a utilisé des traces de fossiles pour établir la chronostratigraphie paléozoïque-mésozoïque actuelle du Bassin de Kandi (Alidou et al. 1986).

Les traces fossiles ou ichnofossiles sont des empreintes de l'activité biologique passée, comme les terriers, les empreintes de pas et les cavités radiculaires, enregistrées dans les archives géologiques. Des traces de fossiles (ichnofossiles), de *Cruziana (trilobites)* et de vers *Arthropycose (Harlania)*, ainsi que de terriers verticaux non spécifiques du type *Skolithos* sont signalés par les deux membres de Kandi (Fig. 28 & Fig. 27). De petites variations évolutives ont permis à Seilacher et Alidou (1988) non seulement de dater la Formation de Kandi, mais aussi de différencier les terriers de vers linéaires et protrusifs de l'Ordovicien supérieur du membre Kandi A des *Cruciana acacensis* et terriers de vers palmés et retrusifs du Silurien inférieur de Kandi B. La majeure partie des sédiments du Bassin de Kandi s'est ainsi retrouvée dans le Paléozoïque.

Continental Intercalaire/Continental Hamadien

Le terme descriptif « Continental Intercalaire », tel que défini par Kilian (1931), comprend les sédiments continentaux déposés entre la transgression marine carbonifère (Variscan orogénèse, Devon-Trias) et la transgression marine crétacée supérieure (Cénomane tardive-Maastrichtienne). Les transgressions marines du Crétacé ont établi, à plusieurs reprises, une voie maritime transsaharienne allant de la Téthys septentrionale au golfe de Guinée (Kogbe 1981, 1991), mais n'ont pas atteint les zones sud et nord-ouest du Bassin de l'Ullemmeden. Les importants sédiments terrestres du Continental Intercalaire comprennent Les Grès *du Tegama* au nord du Niger, la *Formation du Koutous* au Tchad et Les Grès *de Bima/Nupe* au nord-est et au centre du Nigeria. Les sédiments continentaux déposés en même temps que les transgressions marines du Crétacé supérieur en bordure du bassin sont connus sous le nom de « Continental Hamadien » (Guero 2003).

Dans la zone d'étude, les dépôts terrestres le long des marges du socle sont connus sous le nom de Formation de Sendé au Bénin, de Continental Hamadien au Niger et correspondent, au Nigeria, à la Groupe d'Illo dans le sud et à la Groupe de Gundumi dans le nord du Bassin de Sokoto. Ces sédiments étant généralement non fossilifères ; on a déduit leur âge de leur position stratigraphique. Surplombée par des sédiments marins du Haut-Cénomane (pré-Maastrichtien, pré-Turonien, etc.—selon l'auteur et selon la zone d'étude), on suppose qu'ils sont du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur. Des fragments de bois silicifié ont été trouvés dans des affleurements de la Formation de Sendé dans la partie nord-est du Bassin de Kandi (Alidou et al. 1979 ; Alidou & Lang 1983) et ont été identifiés comme un gymnosperme avec des structures de type *Araucaria*, probablement *Dadoxylon*. Du bois silicifié similaire assigné au *Dadoxylon* a été signalé dans les Formations Illo-Gundumi au Nigeria (Kogbe & Lemoigne 1976, abordé par Kogbe, 1981 ; et Alidou et al. 1986) et la plupart des occurrences du Continental Intercalaire telles que Les Grès *de Tegama* au Niger (Faure 1966).

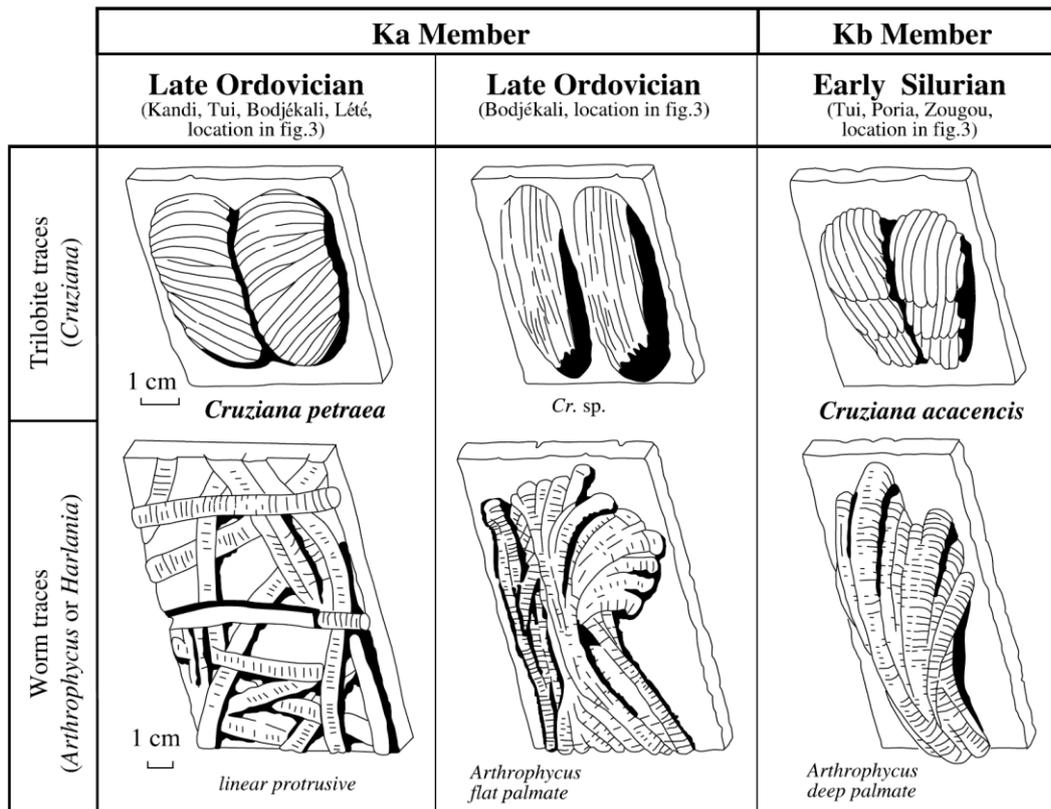


Fig. 27 : Trace fossiles de la formation de Kandi et sa classification chronostratigraphique (Seilacher A & Alidou S 1988 modifié par Konaté et al., 2003)

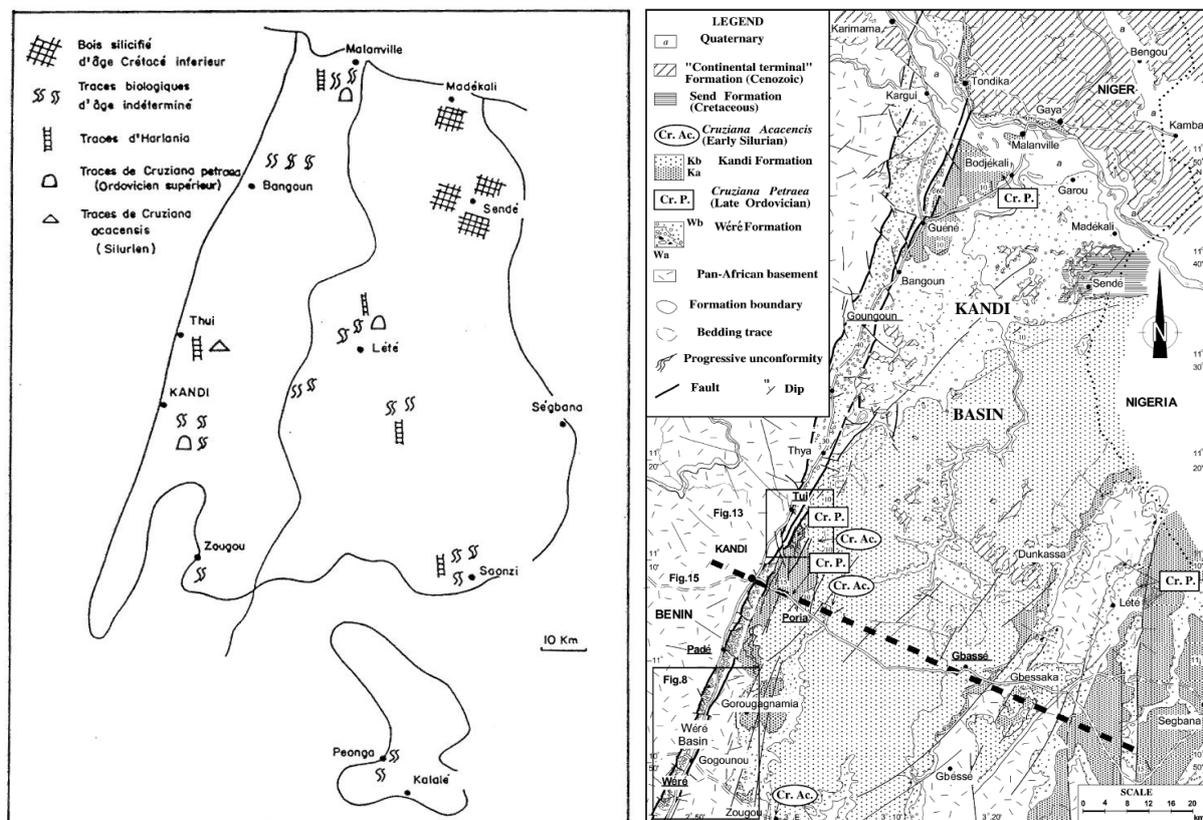


Fig. 28 : Sites fossilifères cartographiés par Alidou (1987) (à gauche) et Konaté et al (2003a) (à droite)

En raison de l'absence d'une datation absolue solide, la chronostratigraphie exacte de la Formation de Sendé/Illo-Gundumi fera l'objet de recherches complémentaires et son attribution au « Continental Intercalaire » ou au « Continental Hamadien » varie selon les auteurs. Le fait que la Formation de Sendé/Illo-Gundumi soit à la base des sédiments marins du Crétacé supérieur au Paléocène et la présence du *Dadoxylon* indiquent un dépôt concomitant avec Les Grès de Tegama et justifient sa classification comme « Continental Intercalaire » (Kogbe & Lemoigne 1976; Alidou et al. 1986; Kogbe & Buroillet 1990). Cependant, le terme Continental Hamadien, a été fréquemment utilisé par les chercheurs travaillant sur les parties nigériennes du Bassin de l'Iullemeden pour désigner les formations de Sendé/Illo-Gundumi (Greigert & Pognet 1967; FAO 1970 et autres; cf. discussion par Guero 2003). Le présent rapport suit cet usage habituel et emploie le terme « Continental Hamadien » sans l'implication d'attribution d'âge absolue.

Du point de vue lithologique, le Continental Intercalaire/Hamadien comprend des dépôts continentaux faiblement fossilifères, déposés dans un milieu fluvial à fluvio-lacustre avec des cours d'eau anastomosés. Il se trouve à l'est et au sud-est en discordance sur le socle précambrien du Nigeria (Formations de Gundumi et d'Illo) où la variation d'épaisseur peut correspondre au remplissage d'anciens canaux fluviaux dans le substratum rocheux. Dans le Bassin de Kandi (Formation de Sendé)—et plus au centre du Bassin de l'Iullemeden — le Continental Intercalaire apparaît au-dessus des sédiments paléozoïques. Décrites de façon séparée à l'origine, les Formations d'Illo et de Gundumi—et par déduction la Formation de Sendé au Bénin—ont été combinées par Jones (1948) et Kogbe (1981)—sur la base de :

- la présence d'un conglomérat basal avec des galets bien arrondis ;
- l'assemblage minéral argileux composé principalement de kaolinite et d'illite ;
- un assemblage similaire de minéraux lourds ;
- des bandes de grès ferruginisé ;
- l'absence de gisement de fer oolithique.

Des grès plus fins et d'autres cailloux plus arrondis indiquent que la Formation d'Illo a été déposée plus loin des roches sources potentielles—que Kogbe (1981) situe dans le complexe du socle nigérian—que la formation de Gundumi. La présence d'argile pisolitique et nodulaire est une autre particularité de la Formation d'Illo.

Sur la *Geological Map of Sokoto Province* de Jones (1948), les deux formations s'étendent dans une zone délimitée par la rivière Zamfara (Gummi) au nord et Libba au sud. Jones explique l'absence des affleurements cartographiés par le paysage à la dérive, point de vue adopté par Anderson & Ogilbee (1973) qui indiquent, par des lignes discontinues, un lien direct entre les gisements des formations Gundumi et Illo. D'un point de vue tectonique, Buser (1966) suggère que la crête du socle de Bussa orienté NNE-SSO entre Jega et Dakingari, était responsable soit d'une lacune initiale, soit de l'enlèvement postérieur de sédiments.

Formation de Gundumi

Les affleurements de la formation de Gundumi sont cartographiés dans une zone triangulaire au nord-ouest du Nigeria. La formation de Gundumi s'abaisse d'environ 4 m par kilomètre et atteint une épaisseur comprise entre 250 et 300 m à la frontière entre le Niger et le Nigeria (Anderson et Ogilbee 1973), environ 250 dans la section type de Dutsin-Dambo (Kogbe 1981), et cesse progressivement au niveau du socle du Nigeria.

La Formation de Gundumi comprend des dépôts fluvio-lacustres continentaux de nature hétérogène qui présentent une forte variation latérale de faciès et de couleurs variées. Elle est décrite par Brynmor Jones comme "clayey grits and clays with basal conglomerate" à lit croisé (Jones 1948) reposant en

discordance sur le socle ou comme une “sequence of interbedded sandstones, arkoses and shales with strong lateral variations” (Buser 1966). A la base de la formation, “a conglomerate of rounded quartz pebbles up to 1½ inches in diameter” est intercalé avec des lits de sable et de gravier “composed chiefly of angular and subangular quartz grains ... as well as rock fragments” (Anderson & Ogilbee 1973). Dans la section type de Dustin Dambo (près de Bukara), cette unité atteint 42 m d'épaisseur. Elle est suivie d'unités plus fines de 52 m d'argile limoneuse compacte, 36 m de grès argileux mal consolidé, 34 m d'argile et 100 m de grès semi-consolidé de grains moyens à grossiers, ferruginisé et recouvert de 23 m de grès ferrugineux très durci (« ironstone »), à lit transversal et ferruginisé (Kogbe 1981). La formation de Gundumi ne présente pas nécessairement une limite distincte par rapport à la Formation sus-jacente de Taloka, mais se distingue des strates plus jeunes par son matériau beaucoup plus grossier et ses lits minces.

Formation d'Illo

Le Formation d'Illo s'est formé dans un milieu sédimentaire fluvio-lacustre continental et représente le prolongement sud-ouest de la formation de Gundumi. Le Formation Illo, du nom du village d'Illo au sud du fleuve Niger, dépasse rarement 40 mètres d'épaisseur (Kogbe 1981) et présente trois membres (Jones 1948) :

- iii Membre de grès supérieur (“Upper Grits”), 7-100 m d'épaisseur ;
- ii Membre pisolitique moyenne (“Pisolitic and Nodular Clays”), 3-10 m d'épaisseur ;
- i Membre de grès inférieure (“Lower Grits”), 10-130 m d'épaisseur.

Les « Upper Grits » sont est du grès blanc, friable, à lits croisés et de granulométrie moyenne à grossière (“grit”) “studded with quartz pebbles”. Les cailloux types sont petits (~0,5 cm), subangulaires et quartzitiques. Dans les grès sont intercalés de l'argile et des grès argileux panachés (blanc, rouge, jaune, violet) ainsi que du grès à grains fins (Jones 1948). Souvent grossiers, friables et mal cimentés, vers le socle de la carrière de Libba, les galets de quartz (sous-)arrondis (jusqu'à 6 cm) sont indurés et cimentés par un agent calcosilicique (Kogbe 1981). De minces bandes de grès consolidé et ferruginisé (« ironstone ») peuvent être partout présentes (Kogbe 1981). Comme dans la Formation Gundumi, on trouve des “mottled clay-grits”.

Les “Upper Grits” sont des grès et des grains grossiers, friables, polychromes, à lit croisé et à couches d'argile subordonnées.

Le membre centrale du Groupe Illo est un horizon indicateur stratigraphique décrit comme “**Pisolitic and Nodular Clays**” (Jones 1948). Les affleurements présentent de l'argile blanche massive à structure crayeuse ou finement granuleuse. L'argile n'est pas plastique et se présente principalement sous forme de pisolites concentriques (~ 5mm) ou de nodules allant de ovales à irréguliers (1 - 15 cm). Jones suppose que l'argile fortement alumineuse est de la bauxite à faible teneur. Kogbe (1981) observe que l'argile pisolitique recouvre généralement l'argile nodulaire et présente un recouvrement latéritique de cuirasse ferrugineuse. Cartographié uniquement au Nigeria, Jones (1948) a mentionné que des observations similaires ont été faites par Hubert (1908) à Gaya.

Grès de Nupe

Les Grès de Nupe ou de Bida est l'équivalent latéral du Continental Hamadien dans le bassin de Bida au Nigeria. Dans la zone d'étude, seules les occurrences les plus fréquentes au nord d'un faciès marginal et résiduel de Grès de Nupe du Bassin de Bida d'une épaisseur inférieure à 30 m peuvent être observées. Un exemple typique est une cuirasse concessionnaire remaniée.

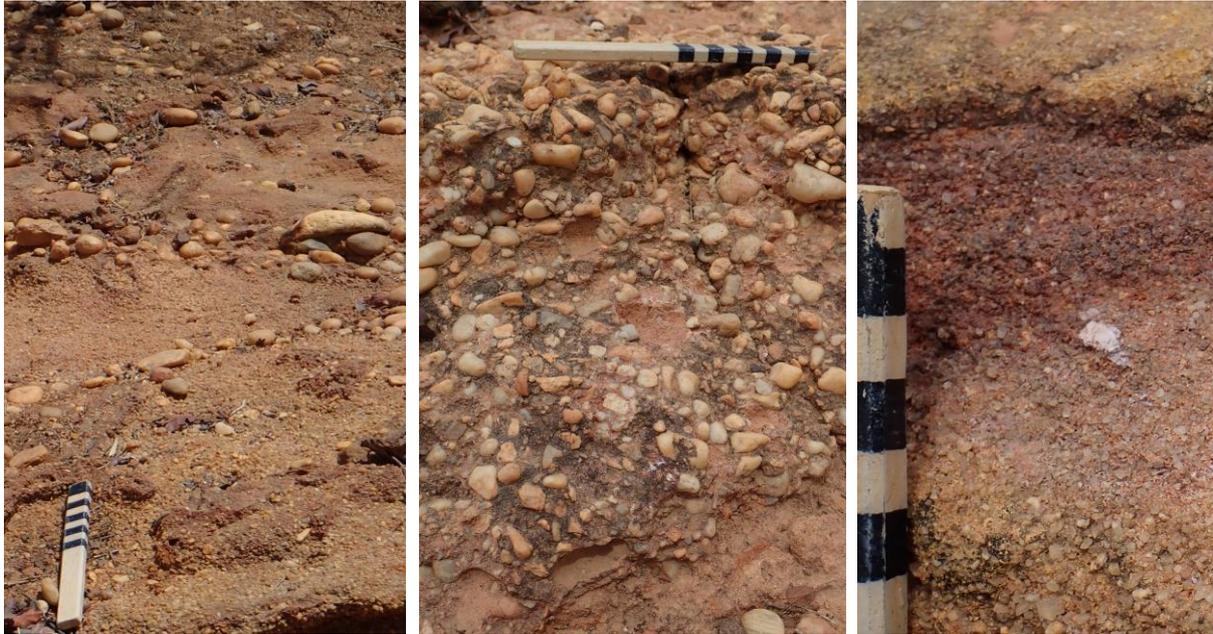


Fig. 29 : Faciès de la Formation Sendé. Galets de quartz arrondis (2-4 cm) supportés par la matrice et formant de minces strates croisées dans un grès à grains fins à grossier caractéristique du milieu sédimentaire continental de la Formation de Sendé. À droite : près de Karimama ; au milieu : à côté du village de Sendé Peul ; à gauche : grès querzitique à grains grossiers à Sendé Peul. Photos prises par de l'auteur

Formation de Sendé (Benin)

La « Formation de Sendé » est l'expression béninoise utilisée pour le prolongement de la Formation d'Illo au Nigeria, qui s'étend au nord-ouest du Bénin, entre Madékali et Sendé, et se présente sous la forme d'une couche de recouvrement peu profonde (20 m) affleurant le long des escarpements des vastes plateaux, souvent recouvert de vestiges encore moins profonds du Continental Terminal. Ailleurs, elle s'affleure sur les pentes des nombreuses buttes en forme de méso où le Continental Terminal, qui résiste encore plus aux intempéries, a préservé les dépôts mal consolidés de son prédécesseur, le Continental Hamadien (Fig. 29). On n'a pas fait cas, au Bénin, d'indices d'un rivage de Paléocène-Éocène et de sédiments marins correspondants comme avancé par Kogbe (1981).

Alidou décrit la lithologie de la Formation de Sendé comme du grès conglomératique peu consolidé, plus ou moins blanchâtre et à matrice argilo-ferrugineuse (Alidou 1987). A la base, un « conglomérat à galets quartzeux roulés de 5 cm de longueur moyenne » localement silicifiés et consolidés, abrite les fragments de bois silicifié diagnostiques du *Dadoxylon*. Au-dessus, repose du grès argilo-calcaire faiblement consolidé. Les couches d'argile kaolinique interstratifiées ont une texture pisolitique, probablement un équivalent rudimentaire "Pisolitic and Nodular Clays" de Jones (1948).

Transgression marine du Crétacé Supérieur-Paléocène

Groupe Rima

Le Groupe Rima s'est déposé sans concordance sur les sédiments terrestres du Crétacé inférieur du Continental Intercalaire. Il correspond à la troisième et quatrième transgression marine dans le Bassin de l'Ullemmeden et à la création de la voie maritime transsaharienne. Les sédiments n'ont pas été datés par des méthodes de datation absolue. Marqué par la présence répandue de *Libyocères*, la plupart des auteurs supposent qu'il est de l'âge Sénonien (Coniacien, Santonien, Campanien, Maastrichtien) et en particulier Maastrichtien. Jones (1948) a subdivisé le Groupe Rima en *Lower Sandstones and Mudstones*, *Mosasaurus Shales* et en *Upper Sandstones and Mudstones*, ce qui correspond aux Formations de Wurno, Dukamaje et Taloka proposées par Parker et ses collègues pour la série de *Geological Map of Nigeria* (D.O.S. 1965a). Le Groupe Rima est caractérisé par la présence de grès et de siltites à grains fins et friables des Formations de Taloka (*Lower Sandstones*) et de Wurno (*Upper Sandstones*) séparés par les schistes organiques et fossiles riches en *Mosasaurus shales*—la Formation de Dukamaje ayant signalé la première transgression avec la présence de *Libyoceras spp.*

Les strates marines sont inclinées. Elles affleurent au Nigeria et plongent vers le centre du bassin avec une épaisseur totale d'environ 300 m à Balle (Anderson & Ogilbee 1973). Au Niger, les séquences marines disparaissent progressivement autour de Bana dans le Dallol Maouri et de Kawara Débé dans le Dallol Foga (FAO 1970).

Formation de Taloka

La Formation de Taloka—les *Lower Sandstones* de Jones (1948)—est du grès blanc, friable et à grains fins avec des siltites et des argilites ou schistes carbonés intercalés (Kogbe 1991). La formation s'étend sur de vastes régions à l'est de Sokoto. Une subdivision est proposée par la Nigerian Geological Survey Agency (NGSA 2011c) et elle fait la distinction entre l'argile basale et le sable (Tcs), l'unité principale de grès (Tss), ainsi que les unités supérieures de siltites (Tst) et de schiste (Tsh). Le sable grossier et graveleux des forages de Sokoto et Dogwandaji indique une transition vers la formation sous-jacente de Gundumi (Anderson et Ogilbee 1973). Dans le nord du bassin de Sokoto, la Formation de Taloka atteint une épaisseur maximale d'environ 120 m.

Formation de Dukamaje

Connue sous le nom de *Mosasaurus Shales* (Jones 1948), la Formation de Dukamaje est une couche peu profonde (6-12 m) qui n'est documentée qu'au nord de Rabah. La formation se compose de schistes argileux gris foncé riches en composés organiques et carbonés, de calcaire en berges et d'argilites (Kogbe 1991). La base montre un lit osseux (*Mosasaurus spp.*) interprété comme l'ancien rivage. Les creusets à crevettes (*Callianassa spp.*) sont courants. La Formation de Dukamaje signale la première transgression caractérisée par l'ammonite maastrichtienne *Libyoceras spp.*

Formation de Wurno

La Formation de Wurno, ou *Upper Sandstones*, est constituée de grès et de siltites à grains fins, pâles et friables, intercalés avec des argilites sableuses (Kogbe 1991). Les caractéristiques sont des niveaux ferrugineux avec des oolithes, des matériaux carbonés, du gypse et du sulfure de fer finement disséminés (pyrite). L'ammonite *Libyoceras spp.* est présente. L'épaisseur de la formation consolidée de Wurno varie de 50 m à Balle à 20 m à Wurno. Elle s'amincit au sud de la rivière Sokoto, où la Formation de Dukamaje est absente et où les Formations de Taloka et Wurno ne peuvent être distinguées.

Groupe Sokoto (Paléocène-Eocène)

Le Groupe Sokoto comprend à la fois le groupe de schistes argileux et le groupe calcaire de Jones (1948) et correspond à la *Série marine: Zone à Operculionoïdes et à Lockhartia haimei sensu* Greigert & Pognet (1967). Déposé pendant le Paléocène et l'Eocène inférieur, le Groupe Sokoto représente la cinquième et dernière transgression marine et présente trois phases : Il s'agit d'un faciès calcaire (Formation de Kalambaina, 35 m) encadré par deux séries de schistes stratifiés gris carbonés (« schistes papyracées »), les Formations de Dange et de Gamba (~10 m d'épaisseur chacune).

Formation de Dange

L'affleurement de la formation de Dange peut être retracé dans le paysage le long de ce qu'on appelle "Dange scarp". Le schiste gris bleuté avec de minces couches de calcaire entrelacées présente des bandes de gypse fibreux et de nodules phosphatiques, ainsi que de nombreux restes fossiles de vertébrés (Kogbe 1991). La Formation de Dange repose en discordance sur le Groupe Rima ; l'érosion à la limite du Crétacé-Tertiaire est indiquée par un gisement conglomératique remanié.

Formation de Kalambaina

La Formation de Kalambaina est du calcaire argilo-calcaire blanc où l'on trouve des schistes, des marnes calcaires et des phosphates ; elle est riche en fossiles d'invertébrés, en foraminifères et en ostracodes. Le calcaire de la Formation de Kalambaina montre des signes de karstification et de solution et—d'après Kogbe (1991)—des zones de fracture. Son épaisseur originale est estimée à environ 20 m. On note qu'elle est de 5 m à Dange, 18 m à Birnin Kebbi, 50 m à Balle, et 4 m à Argungu. Au Niger, Greigert & Pognet (1967) ont distingué une zone inférieure à *Operculionoïdes* et une zone supérieure à *Lockartia-haimi*, correspondant latéralement aux formations de Kalambaina et de Gamba, respectivement (Moody 1997).

Formation de Gamba

La Formation de Gamba est un schiste argileux gris stratifié, fossilifère et phosphatique caractérisé par un lit indicateur de granules phosphatiques et de petits coprolithes. Dans les documents en français, elle est décrite comme « schistes carton jaunes ». En raison de la solution de la formation calcaire de Kalambaina sous-jacente, elle semble souvent pliée ("folded"). D'une épaisseur d'environ 10 m, elle correspond bien à la "gray clay layer" consolidée à la base de la formation de Gwandu/Continental Terminal discutée par Anderson & Ogilbee (1973). Au même emplacement stratigraphique que la formation de Gamba, cette *gray clay layer* a été enregistrée au niveau des forages de Sabla et de Janzomo, alors qu'une couche de lignite et de tourbe a été mentionnée au niveau des forages de Tangaza et Ruawuri, toutes deux recouvrant directement la formation de Kalambaina.

Continental Terminal

Le « Continental Terminal » a été proposé par Kilian (1931) comme la troisième et dernière série continentale détritique ayant suivi la troisième phase de transgressions marines (« Série hamadienne », Crétacé tardif à Paléogène) au Sahara central. Le terme a été utilisé de façon inflationniste pour décrire les sédiments altérés et même les sédiments marins altérés montrant une altération ferralitique et la présence de kaolinite et de concrétions ferrugineuses dans les bassins sahariens et côtiers d'Afrique de l'Ouest. Dans le Bassin de l'ullemmeden, le Continental Terminal *sensu stricto* comprend les sédiments continentaux de l'Éocène au Miocène ayant subi une altération chimique avancée avant—et peut-être après—le dépôt (Lang et al. 1990) souvent appelés « Sidérolithique » (Lang et al. 1986).

Le dernier rebond du mont Hoggar (Éocène tardif au début du Quaternaire) a conduit à la dernière période de dépôt continental du « Continental Terminal » couvrant le centre du synclinal de l'ullemmeden, situé entre les méridiens 3°E et 4°E. Avec une épaisseur totale de 450 m entre Koléfo, Kiché et Dogondoutchi (Greigert 1978), le Continental Terminal représente la moitié de l'épaisseur estimée de 1000 m des sédiments mésozoïques du Bassin de l'ullemmeden (Kogbe 1991).

Du point de vue lithologique, le Continental Terminal se caractérise par des successions alternées de grès ferrugineux, de limons et d'argile souvent panachée. Un indicateur caractéristique qui peut se produire dans l'ensemble du Continental Terminal et qui le différencie des sédiments terrestres antérieurs est la présence de couches ferrugineuses composées de gisement de fer oolithiques ou pisolithiques, en vrac ou très compactes. Ces gisements de fer oolithique se forment dans les milieux peu profonds (salins ?), lacustres ou littoraux (Kogbe 1981; Young 1989; Mücke 2000). Souvent, la présence du fer oolithique est étroitement lié avec l'occurrence répandue de cuirasse ferrugineuse (ferricrete) dans les grès ferrugineux. Dans la série, l'absence d'indicateurs chronostratigraphiques distincts ne permet pas d'attribuer, sans ambiguïté, les diagraphies des affleurements ou des forages à l'une des trois unités.

Se basant sur un décalage d'environ 100 m entre les forages de Koutumbou (IRH n°10007) et de Sabon-Gari (IRH n°10 004), la FAO (1970) déduit une hypothétique décrochement entre le Dallol Foga et le Dallo Maouri dans la direction principale du synclinal de l'ullemmeden et de la faille de Kandi (FAO 1970, p20 & planche 2, coupe IV). Cependant, décrit comme un milieu sédimentaire assez monotone, on ne prévoit pas de grands déplacements tectoniques. Seul le Continental Terminal le plus ancien présente une légère déformation tectonique ductile (Konaté, présentation personnelle). L'absence d'autres indications (de surface et de forage) rend peu probable une tectonique Miocène aussi forte et présuppose une révision des interprétations respectives des données issues des forages.

Traditionnellement, et d'un point de vue hydrogéologique, le Continental Terminal est divisé en trois principales unités lithologiques :

- Continental Terminal 1 – CT1 : *Série sidérolithique de l'Adar Doutchi* ;
- Continental Terminal 2 – CT2 : *Série argilo-sableuse à lignites* ;
- Continental Terminal 3 – CT3 : *Les Grès Argileux du Moyen Niger*.

Contrairement aux membres plus jeunes du Continental Terminal, le *Sidérolithique* a subi une légère déformation tectonique et se caractérise par la présence de nombreux joints orientés du nord vers le sud et de l'est vers l'ouest.

Tableau 15

VARIATIONS DE FACIES ET D'ÉPAISSEUR DU Ct₁ DE KOLEFOU A YELOU

ZONE NORD Koléfou à Ziela		ZONE CENTRE Ziela à Lokoko		ZONE SUD Lokoko à Yélou	
Faciès	Épaisseur	Faciès	Épaisseur	Faciès	Épaisseur
Argile gris-bleu	50 - 60 m	Argile grise avec petites intercalations sableuses	60 - 70 m	Oolithe ferrugineuse	2 - 20 m
Grès tendres et sables fins	40 - 50 m	Sables fins avec intercalations argileuses et passages à lignites	15 - 40 m	Argile sombre au nord, blanche au sud	8 - 24 m
				Grès sableux passant à des sables au sud	15 m

Tableau 16

VARIATIONS DE FACIES ET D'ÉPAISSEUR DU Ct₂

ZONE NORD Koléfou à Kiessé		ZONE CENTRE Kiessé à Guéchémé		ZONE CENTRE SUD Guéchémé à Koutoubou	
Faciès	Épaisseur	Faciès	Épaisseur	Faciès	Épaisseur
Sables avec passages gréseux	20 - 30 m				
Argile bariolée avec passages sableux	20 - 60 m	Alternance d'argiles et de sables	40 - 80 m	Argile bariolée	0 - 30 m
Sables fins, grès tendres, sables et passages de lignite	40 - 75 m				
REMARQUE : Un niveau semble assez constant du nord au sud: les argiles bariolées jaune, brun, vert et surtout violet.					

Fig. 31 : Continental Terminal 1 & 2: Variation de l'épaisseur le long du Dallol Maouri (FAO 1970; Tab. 15 & 16)

Continental Terminal II (CT2) : Série argilo-sableuse à lignites

La Série argilo-sableuse à lignites se caractérise par l'intercalation du sable fin à grossier bien trié et d'argile panachée ou de boue de couleur foncée. La série sablonneuse est souvent surmontée de grès ferrugineux, tandis que l'argile présente des couches oolithiques/pisolithiques ferrugineuses (Guero 2003). Les sédiments, l'argile et les schistes gris à noirs à grains fins du CT2 semblent s'être accumulés dans les bassins locaux. Le bois carbonifié (lignite) et les débris végétaux y sont courants (Greigert (1965).

D'après la FAO (1970, Tab. 16), le Continental Terminal 2 est plus marqué dans la zone nord du Dallol-Maouri (épaisseurs de 80 m à 160 m de Koléfo à Kiéché, Fig. 31), beaucoup moins marqué entre Tibiri/Kiéché et Guéchémé (40-80 m) et il s'efface au sud de Dioundiou (0-30 m entre Guéchémé et Koutoumbou).

Continental Terminal III (CT3) : Les Grès Argileux du Moyen Niger

Les Grès Argileux du Moyen Niger sont une série monotone alternant de grès ferrugineux, de limons et d'argile rouge en vrac et consolidées. Les grès en bancs, leurs parties supérieures sont généralement constituées d'une couche d'oolithes de goethite (Greigert & Pognet 1967). Une particularité des couches d'argile du Continental Terminal 3 est la présence d'un soit disant *faciès termitière* - un réseau de cavités et de structures tubulaires recouvertes et solidifiées d'oxyde de fer—des vestiges fossilisés issus d'activités antérieures des termites. La FAO (1970) décrit des séquences alternées de « grès argileux » et de « grès sableux ». Se basant sur une strate de grès sableux particulièrement bien développée à Kisamou (70 m d'épaisseur), ils signalent un « bassin gréseux » entre Dioundiou et Tibiri qui s'amincit au fur et à mesure que l'on avance vers le nord.

Comme l'ensemble du Continental Terminal, *Les Grès Argileux du Moyen Niger* s'amointrit en allant vers le sud. Autour de Yélou, aucun gisement du Continental Terminal 3 ne se trouve dans la vallée du Dallol Maouri (FAO 1970), alors que de tels gisements continuent à former les monticules et les sommets de collines cuirassées du plateau. Les vestiges du Continental Terminal au sud du fleuve Niger au Bénin indiquent probablement le Continental Terminal 3, mais aucune subdivision n'est proposée dans la littérature disponibles.

Complexe de base du Continental Terminal

Le *Complexe de base du Continental Terminal* est un grès conglomératique à stratification croisée cartographié à la base de l'escarpement du Continental Terminal, le long du fleuve Niger. Il a été décrit dans la région entre Gaya et Ouna (Greigert 1961b)—sur les deux rives du fleuve Niger (cf. *Carte Géologique de Reconnaissance du Bassin de l'Iullemeden* (Greigert 1961a)—mais aussi dans le Dallol Bosso (Greigert & Pognet 1967) et plus au nord près de Boubon sur la route Niamey-Tillabéry (Machens 1967).

Greigert (1961b) décrit des affleurements autour de Gaya où des conglomérats quartzitiques non triés et à stratification croisée (« poudingues ») avec des blocs de quartz pouvant atteindre 10 cm de large se manifestent dans une matrice de grès silicifié, localement ferrugineux, avec des grains angulaires pouvant atteindre 5 mm de taille. Les conglomérats sont accompagnés de grès silicifiés triés et non triés et d'argile kaolinique bigarré. Sur leur carte, Greigert & Pognet (1967) décrivent la présence d'un conglomérat siliceux stratifié croisé/brèche à la base du Continental Terminal 1 près de Gaya et le long du Dallol Bosso. Ils interprètent les gisements comme les vestiges d'une vallée drainée vers le nord provenant du socle Dahoméen, au sud. Pour la région de Niamey, Machens (1967) fait cas d'une couche conglomératique très mince à la base du Continental Terminal, ici directement au-dessus du socle.

Les descriptions disponibles peuvent en fait décrire des dépôts remaniés et/ou un milieu à haute énergie le long d'une discordance érosive entre le socle et le Continental Hamadien du Crétacé avant le dépôt du Continental Terminal. D'autre part—et en particulier dans la région de Gaya—le *Complexe de base du Continental Terminal* peut correspondre à la Formation paléozoïque de Wéré—comme le suggère Konaté (1996) pour la zone entre Sia et Gaya—ou ce faciès conglomératique peut correspondre au Continental Hamadien sous-jacent. Cet argument est soutenu par les coupes de la FAO (1970) indiquant l'élévation et l'affleurement du *Continental Hamadien* dans la région de Gaya

(Fig. 46 & Fig. 47) et jette le doute sur les affleurements du *Continental Hamadien* sous le *Continental Terminal* le long de l'escarpement du Dallol-Maouri (Fig. 32).

Continental Terminal au Nigeria : la Formation de Gwandu

Au Nigeria, la subdivision du Continental Terminal est reflétée par une subdivision tripartite similaire de la formation de Gwandu, bien qu'aucun chercheur n'ait osé directement corréler les unités respectives. Moumouni et al (2016) soutient que la Formation de Gwandu peut être directement corrélée avec le Continental Terminal 3.

Oteze (1971 cité dans JICA, 1990) fait la distinction entre quatre zones de sable ou d'aquifères dans la formation de Gwandu : une zone supérieure 1 non consolidée (*Upper Zone 1*), une zone supérieure 2 consolidée (*Upper Zone 2*), une zone moyenne (*Middle Zone*) et une zone inférieure (*Lower Zone*). Les travaux postérieurs n'ont pris en compte que trois de ces zones. Anderson & Ogilbee (1973) distinguent deux aquifères : un aquifère supérieur non consolidé et un épais aquifère inférieur consolidé (*sandy zone*), séparés par de l'argile consolidée. Les trois strates s'élargissent en allant vers le nord-ouest et, à la frontière du Niger, la couche d'argile a une épaisseur d'environ 75 m (250 pieds), tandis que la *sandy zone* est épaisse d'environ 60 m (200 pieds). Plus important encore, les modifications du faciès sont documentées et montrent une texture de plus en plus fine et des lits d'argile et de lignite abondants dans la partie ouest de la *sandy zone*. Sur la base de ce changement de faciès, la présence de lits de lignite et l'épaisseur similaire des Continental Terminal 1 & 2 respectifs dans la zone de Dogondoutchi (voir Fig. 30 ; Fig. 31), les trois zones peuvent être corrélées en toute confiance avec les Continental Terminal 1, 2 et 3. La JICA (1990) a suivi l'interprétation à trois couches et a distingué un membre supérieure (*Upper Member*), un membre moyenne (*Middle Member*) et un membre basale (*Basal Member*) selon ses trois coupes détaillées d'est-ouest (Fig. 16)—mais ne comporte pas de description géologique détaillée.

Les différentes unités de la Formation de Gwandu n'ont jamais été cartographiées. Seuls Greigert & Pognet (1966) font cas de la présence d'affleurements du Continental Terminal 1 recouvrant la Zone à *Operculinoïdes* et à *Lockhartia haimei* du Paléocène supérieur, connue au Nigeria sous le nom de Groupe Sokoto (Formations de Gamba, Kalambaina, Dange). Anderson & Ogilbee (1973), cependant, décrivent une "conspicuous ridge west of the Sokoto-Illela road" comme étant l'affleurement de la couche d'argile qui se consolide (*Middle Member*) et les *Hydrogeological Cross Sections for the Sokoto basin* (JICA 1990 ; figure 8, coupe C-C') donnent quelques indications générales sur les zones d'affleurement des membre moyenne et basal (c.à.d. Continental Terminal 1 & 2).

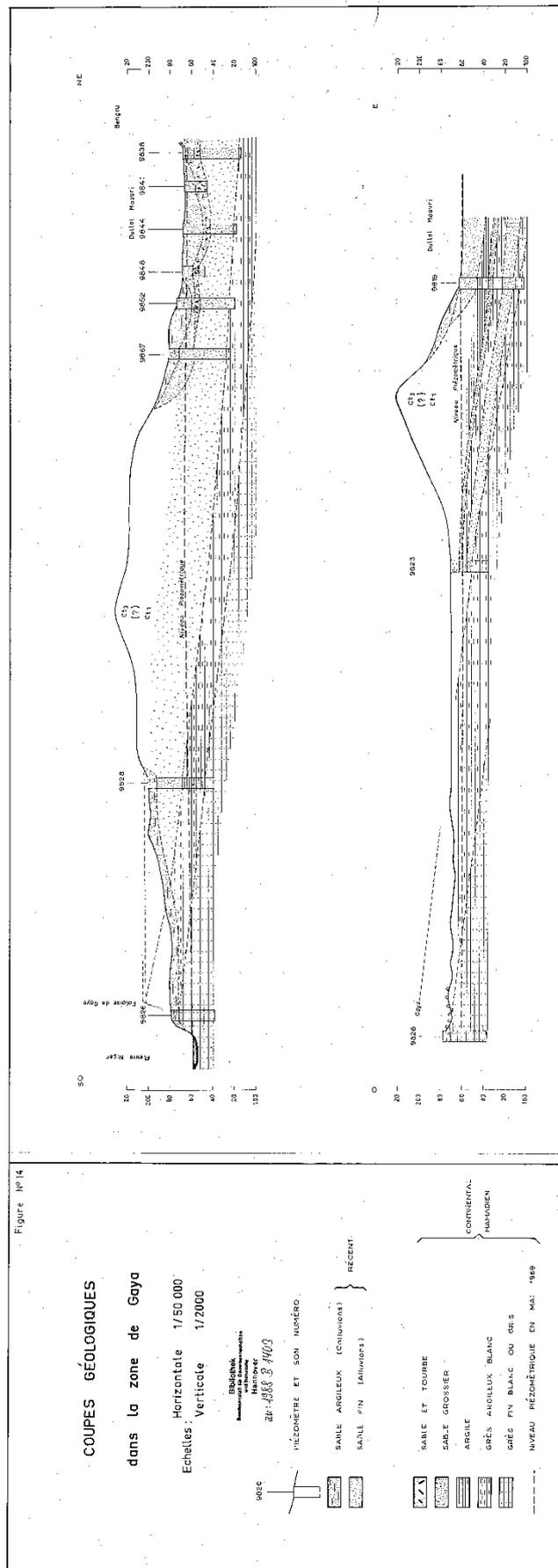


Fig. 32 : Coupe à travers la zone d'affleurement des Continental Terminal 3 & 1, et du Continental Hamadien entre le Dallol Maouri et Gaya (FAO 1970, Fig. 14)

Autres cartes de la zone d'étude

D'autres cartes couvrent des parties de la zone d'étude. Vous avez, ci-dessous, une sélection de cartes qui n'ont pas contribué de façon substantielle à l'élaboration de la Carte Géologique harmonisée :

Carte Géologique de Reconnaissance 1/500.000 (Pougnat 1957)

La *Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle 1/500.000* (Pougnat 1957b) et sa *Notice Explicative sur la Feuille Kandi-Est (N° NC. 31-N.O.-E.34)* (Pougnat 1957a) couvre une partie des socles nigérien et béninois à l'ouest de la Faille de Kandi (Fig. 33).

Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000 (Machens 1966)

Contemporaine à la carte générale du Niger de Greigert, la *Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000* et la *Notice Explicative sur la Carte Géologique du Niger Occidental à l'échelle du 1/200.000* qui l'accompagne a été publiée (Machens 1967). La carte couvre la zone du socle du Liptako jusqu'au fleuve Niger mais est tangente à la zone d'étude et n'est donc pas prise en compte dans le cadre de la présente recherche (Fig. 34).

Carte Hydrogéologique: Bassin sédimentaire de Kandi à l'échelle 1/200.000 (Achidi et al. 2012)

En 2011, l'*Ingénieur-Gesellschaft für internationale Planungsaufgaben mbh* (IGIP) a élaboré, pour le compte de la *Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), une carte hydrogéologique du bassin côtier sédimentaire et du Bassin de Kandi respectif (Achidi et al. 2012, Fig. 35). La *Notice Explicative de la Carte du Bassin sédimentaire de Kandi à l'échelle 1:/200 000* qui l'accompagne donne un bon aperçu des cartes géologiques existantes. La carte hydrogéologique est basée sur les efforts de cartographie de l'Istituto Ricerche Breda (Akibou et al. 1989c, 1989b, 1989a, 1989d) et fait cas d'un aquifère supérieur du Crétacé pour l'ensemble du Bassin de Kandi. S'appuyant sur les travaux d'Alidou (1987) et de Konaté (1996), la présente carte montre un bassin paléozoïque de Kandi et n'intègre pas la géologie de la carte de l'IGIP-GIZ de 2011.

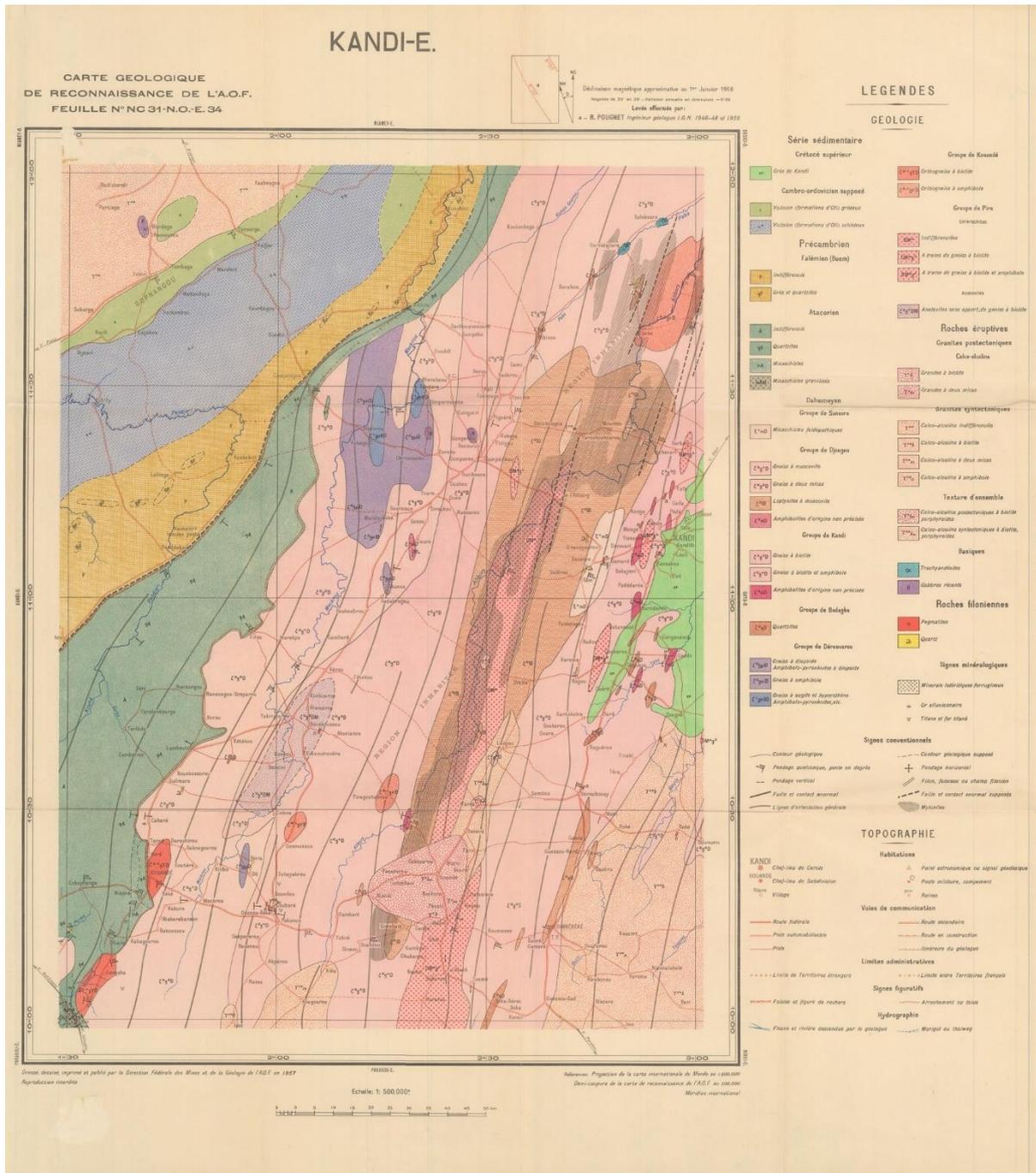


Fig. 33 : Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 500.000 (Pouquet 1957b)

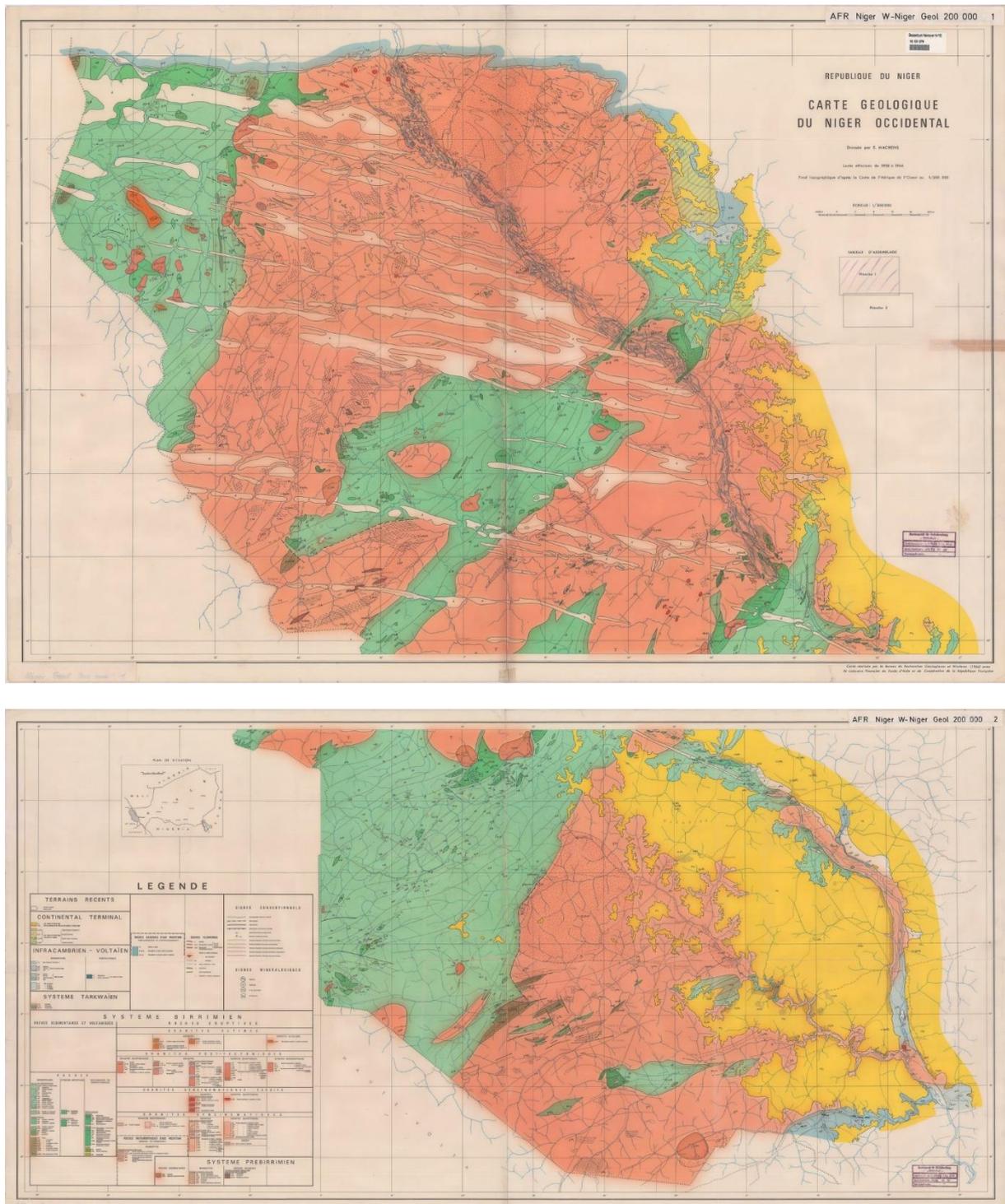


Fig. 34 : Carte Géologique du Niger Occidental 1/200 000, feuille 1 & 2 (Machens 1966)

Légende Générale

Tab. 11 :Légende générale et cadre stratigraphique de la carte harmonisée. Le tableau montre les éléments des légendes originales et la stratigraphie harmonisée correspondante, le code des éléments, la description générale, les attributs géologiques et la lithologie reclassée selon le système d'agrégation de l'IHME1500.

Classification lithologique de l'IHME1500

Tab. 12: Système d'agrégation de la classification lithologique de l'IHME1500 pour les trois niveaux de consolidation : non consolidé, partiellement consolidé et consolidé (extrait de Duscher et al. 2015)

Level 5: Unconsolidated materials

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4	
Gravels, sands	Gravels, sands	Gravels	Coarse sediments	
Valley fillings				
Gravels, sands covered by clays, silts	Gravels, sands, clays			
Gravels, sands, clays				
Sands	Sands	Sands		
Sands (glauconitic)				
Sands, clays	Sands, clays			
Sands, silts, clays				
Sands, gravels	Sands, gravels			
Sands, gravels, boulders, clays, silts				
Sands, gravels covered by clays, silts	Sands, gravels, clays			
Sands, gravels, silts, clays				
Clays	Clays		Clays	Fine sediments
Clays, marls with gypsum				
Clays, boulder clays, silts, sands, gravels	Clays, boulder clays			
Clays, sands	Clays, sands			
Clays, sands, gravels				
Clays, silts, sands	Clays, silts			
Clays, silts, sands, gravels				
Marls, clays	Marls, clays	Marls		
Silts, clays, gravels, boulders	Silts, clays	Silts		
Silts, clays, sands				
Fine sands	Silts, sands			
Fine sands, silts, clays, gravels				
Silts, fine sands				

Level 5: Partially consolidated materials

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4
Limestones and sands	Limestones and sands	Limestones and sands	Calcareous rocks and coarse sediments
Limestones, conglomerates, sandstones, marlstones and sands			
Dolomitic limestones, marlstones, siltstones, sandstones and sands			
Limestones (sandy), sandstones and sands, silts			
Limestones, sandstones and sand, gravel			
Limestones, sandstones and sands, clays			
Limestones, sandstones and sands, clays with gypsum			
Limestones, sandstones and sands, silts, clays			
Marlstones, limestones, sandstones and sands, clays, marls	Marlstones, limestones and sands, clays	Marlstones and sands	Calcareous rocks and fine sediments
Marlstones, sandstones and sands, clays	Marlstones, sandstones and sands, clays		
Clays and dolomitic limestones	Limestones and clays	Limestones and clays	
Gypsum, anhydrite and clays			
Limestones and clays, fine sands			
Clays, marls and limestones	Limestones and clays, marls		
Limestones, conglomerates, sandstones and clays	Limestones, conglomerates and clays		
Clays, sands and dolomitic limestones, marlstones, sandstones	Limestones, marlstones and clays, sands		
Dolomitic limestones, marlstones and clays with gypsum			
Limestones, marlstones and clays, sands, silts with gypsum			
Clays and limestones, sandstones	Limestones, sandstones and clays		
Clays, sands, gravels, marls and limestones, sandstones, conglomerates, pyroclastic rocks			
Limestones, sandstones, conglomerates, ophiolitic series and clays			
Chalkstones and marls	Limestones and marls	Limestones and marls	
Dolomitic limestones and marls			
Limestones and marls			
Marls and limestones			
Dolomitic limestones and marls, clays	Limestones and marls, clays		
Dolomitic limestones and marls, clays with gypsum			
Limestones, ophiolitic series and marls, clays			
Marls, clays and limestones with gypsum and anhydrite			

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4
Limestones, claystones, sandstones, conglomerates and marls, sands	Limestones, claystones and marls	Limestones and marls	Calcareous rocks and fine sediments
Marls and claystones, limestones			
Limestones, calcarenites, sandstones and marls	Limestones, sandstones and marls		
Limestones, sandstones and marls			
Limestones, sandstones, siltstones and marls			
Limestones, shales, sandstones and marls			
Limestones, siltstones, sandstones and marls, clays			
Marls and limestones, sandstones			
Marls, clays, sands and limestones, sandstones			
Clays, sands and marlstones, pyroclastic rocks with gypsum			
Marlstones, sandstones, conglomerates with lignites and clays	Marlstones, sandstones and clays		
Marlstones, sandstones, limestones and clays			
Marlstones, sandstones and marls, clays	Marlstones, sandstones and marls, clays	Marlstones and marls	
Silts, clays, sands, gravels and conglomerates	Conglomerates and sands, silts	Conglomerates and sands	Clastic rocks and coarse sediments
Conglomerates, sandstones, limestones and sands, clays	Conglomerates, sandstones and sands, clays		
Conglomerates (calcareous), sandstones and sands, clays, gravels	Conglomerates, sandstones and sands, gravels		
Conglomerates, sandstones and gravels, sands			
Calcarenites and sands	Sandstones and sands	Sandstones and sands	
Gravels, sands, clays, marls and sandstones, conglomerates, limestones			
Pyroclastic rocks and sands, clays			
Sands and sandstones			
Sandstones, shales and silts			
Sands, clays and sandstones	Sandstones and sands, clays		
Sands, silts, clays and sandstones			
Siltstones, sandstones and sands, clays			
Sands, clays and sandstones, conglomerates	Sandstones, conglomerates and sands, clays		
Sands, clays and sandstones, limestones	Sandstones, limestones and sands, clays		
Sands, clays, marls and sandstones, phosphorites, lignites			

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4	
Clays and claystones, marlstones	Claystones and clays	Claystones and clays	Clastic rocks and fine sediments	
Clays and shales (combustible)				
Clays and claystones, sandstones, conglomerates				
Clays, sands, gravels, marls and claystones, sandstones, conglomerates				
Claystones, sandstones, limestones and clays				
Claystones, sandstones, siltstones and clays				
Conglomerates, sandstones, claystones and clays	Conglomerates, sandstones and clays	Conglomerates and clays		
Conglomerates, limestones, sandstones and marls, clays	Conglomerates, sandstones and clays, marls			
Conglomerates, sandstones and marls, clays				
Conglomerates, sandstones and marls, clays with gypsum				
Clays, silts and sandstones, marlstones	Sandstones and clays	Sandstones and clays		
Sandstones, limestones and clays				
Sandstones, shales (combustible) and clays				
Sandstones, siltstones, conglomerates and clays				
Clays, marls and sandstones				Sandstones and clays, marls
Clays, marls and sandstones, conglomerates				
Clays, marls and sandstones, siltstones, limestones				
Clays, marls and sandstones, siltstones, limestones with gypsum				
Sandstones and clays, marls				
Clays, sands and sandstones	Sandstones and clays, sands			
Clays, sands and sandstones with gypsum				
Clays, sands and siltstones, sandstones				
Clays, sands, gravels and sandstones with gypsum				
Clays, sands, marls and sandstones, shales				
Marls and sandstones			Sandstones and marls	Sandstones and marls
Marls, sands, clays and sandstones	Sandstones and marls, sands			
Marls, clays and sandstones, conglomerates, limestones with gypsum	Sandstones, conglomerates and marls			
Sandstones, shales, conglomerates, limestones and marls				
Marls and sandstones, limestones with gypsum	Sandstones, limestones and marls			
Marls and sandstones, limestones, claystones				

Level 5: Consolidated materials

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4
Limestones	Limestones	Limestones	Calcareous rocks
Dolomitic limestones			
Travertines			
Dolomitic limestones, plutonic rocks			
Gypsum, anhydrite, dolomitic limestones			
Limestones (jointed, karstified)	Limestones (jointed, karstified)		
Dolomitic limestones (jointed, karstified)			
Chalkstones, limestones (jointed, karstified)			
Limestones, marlstones	Limestones, marlstones		
Dolomitic limestones, marlstones, claystones			
Limestones, marlstones, sandstones, conglomerates			
Limestones, marlstones, schists			
Limestones, claystones, sandstones, conglomerates	Limestones, sandstones		
Limestones, sandstones			
Limestones, cherts, sandstones, shales			
Limestones, sandstones, claystones			
Limestones, shales			
Dolomitic limestones, shales, sandstones	Limestones, shales		
Limestones, claystones, shales			
Limestones, shales, sandstones			
Marlstones, claystones with gypsum and salt		Marlstones, claystones	
Marlstones, claystones, shales, phyllites			
Marlstones, sandstones	Marlstones, sandstones		
Conglomerates		Conglomerates	Siliciclastic rocks
Conglomerates, limestones, sandstones, marlstones			
Conglomerates, quartzites, sandstones, shales, dolomitic limestones			
Conglomerates, sandstones, cherts, shales, dolomitic limestones, ophiolitic series			

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4
Sandstones, phyllites, quartzites	Sandstones	Sandstones	Siliciclastic rocks
Sandstones			
Diatomaceous rocks			
Sandstones, claystones	Sandstones, claystones		
Siltstones, claystones, sandstones			
Sandstones, claystones, lignites			
Sandstones, claystones, marlstones, limestones with gypsum	Sandstones, conglomerates		
Sandstones, conglomerates			
Sandstones, conglomerates, shales, quartzites			
Sandstones, conglomerates, claystones, shales, marlstones	Sandstones, limestones		
Sandstones, limestones, shales, lignites			
Sandstones, marlstones	Sandstones, marlstones		
Sandstones, marlstones, limestones, volcanic rocks (basic)			
Sandstones, shales	Sandstones, shales		
Sandstones, shales, limestones			
Sandstones, shales, conglomerates, phyllites, volcanic rocks (basic)			
Sandstones, siltstones, claystones, limestones	Sandstones, siltstones		
Sandstones, siltstones, claystones			
Sandstones, siltstones, claystones with gypsum			
Shales	Shales	Shales	
Shales, limestones	Shales, limestones		
Shales, phyllites, schists, sandstones	Shales, phyllites		
Shales, quartzites, volcanic rocks	Shales, quartzites		
Shales, quartzites, sandstones			
Shales, quartzites, sandstones, phyllites, schists			
Shales, sandstones, limestones	Shales, sandstones		
Shales, sandstones			
Shales, sandstones, conglomerates			
Shales, sandstones, cherts, volcanic rocks			

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4
Plutonic rocks (acid to intermediate)	Plutonic rocks (acid)	Plutonic rocks	Magmatic rocks
Plutonic rocks (acid to intermediate, gneissic)			
Plutonic rocks	Plutonic rocks (basic)	Volcanic rocks	
Plutonic rocks (ultrabasic)			
Plutonic rocks (basic)			
Volcanic rocks (jointed)	Volcanic rocks	Volcanic rocks	
Volcanic rocks			
Volcanic rocks, shales, sandstones, conglomerates, claystones, limestones			
Volcanic rocks, sandstones, shales, dolomitic limestones			
Volcanic rocks (acid)	Volcanic rocks (acid)	Volcanic rocks	
Volcanic rocks (acid to intermediate)			
Volcanic rocks (basic)	Volcanic rocks (basic)	Volcanic rocks	
Volcanic rocks (basic), ophiolitic series			
Volcanic rocks (basic to intermediate)			
Pyroclastic rocks	Volcanic rocks, pyroclastic rocks	Volcanic rocks	
Volcanic rocks, pyroclastic rocks			
Pyroclastic rocks, volcanic rocks, marlstones			
Volcanic rocks (acid), pyroclastic rocks, sandstones, shales			
Gneisses, mica schists, amphibolites	Gneisses, mica schists	Gneisses	Metamorphic rocks
Gneisses, mica schists, migmatites			
Gneisses, plutonic rocks (acid)	Gneisses, plutonic rocks	Marbles	
Marbles	Marbles		
Marbles, schists, quartzites	Marbles, schists	Phyllites	
Phyllites, gneisses, shales, sandstones, volcanic rocks	Phyllites, gneisses		
Phyllites, schists, quartzites	Phyllites, schists	Quartzites	
Quartzites, shales	Quartzites		
Quartzites			
Quartzites, conglomerates, sandstones, shales (jointed)			
Quartzites, conglomerates, phyllites, shales			
Quartzites, sandstones, shales, volcanic rocks			
Quartzites, sandstones, shales, limestones			
Quartzites, sandstones, shales			
Quartzites, sandstones, phyllites	Schists		
Quartzites, sandstones			
Schists, gneisses	Schists, gneisses	Schists	
Serpentinities, ophiolitic series	Serpentinities		

Coupes transversales

Les pages suivantes présentent des coupes géologiques les plus pertinentes de la zone d'étude. Pour une vue d'ensemble complète, cf. Tab. 10.

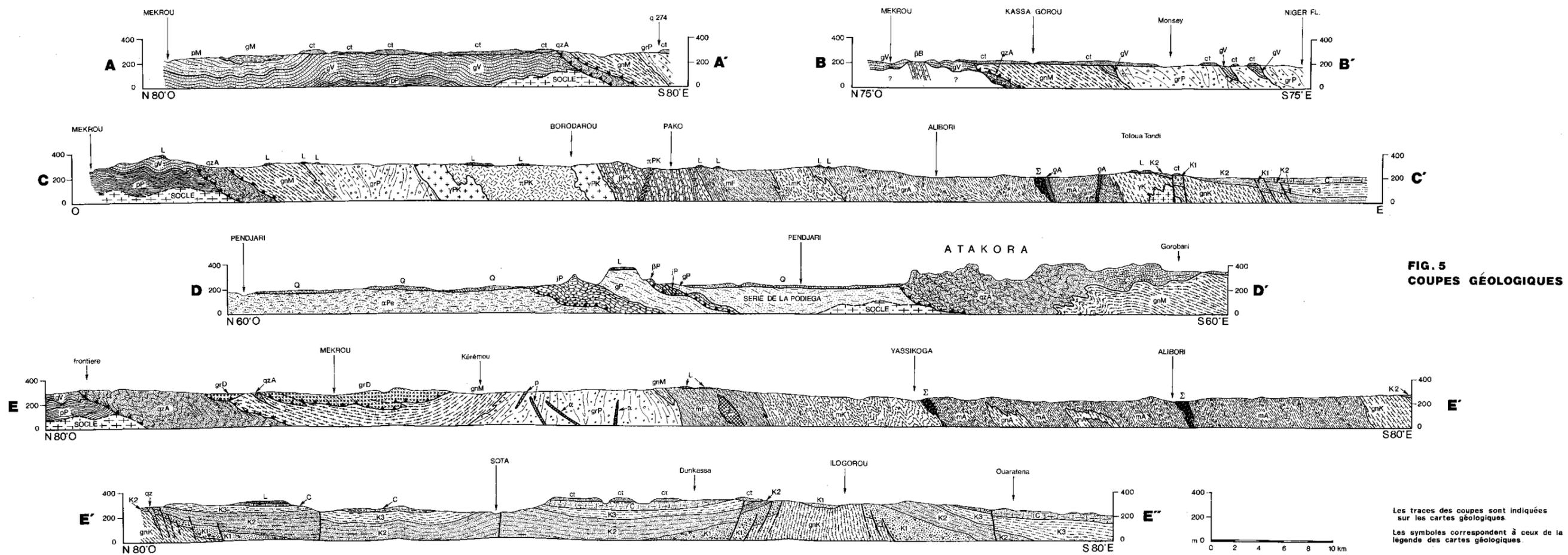


Fig. 36 : Coupe transversale du Bassin de Kandi Nord de la Notice explicative de la Carte Géologique à 1/200.000. Feuilles : Karimama, Porga, Kandi, Malanville (Istituto ricerca Breda & OBEMINES 1989)

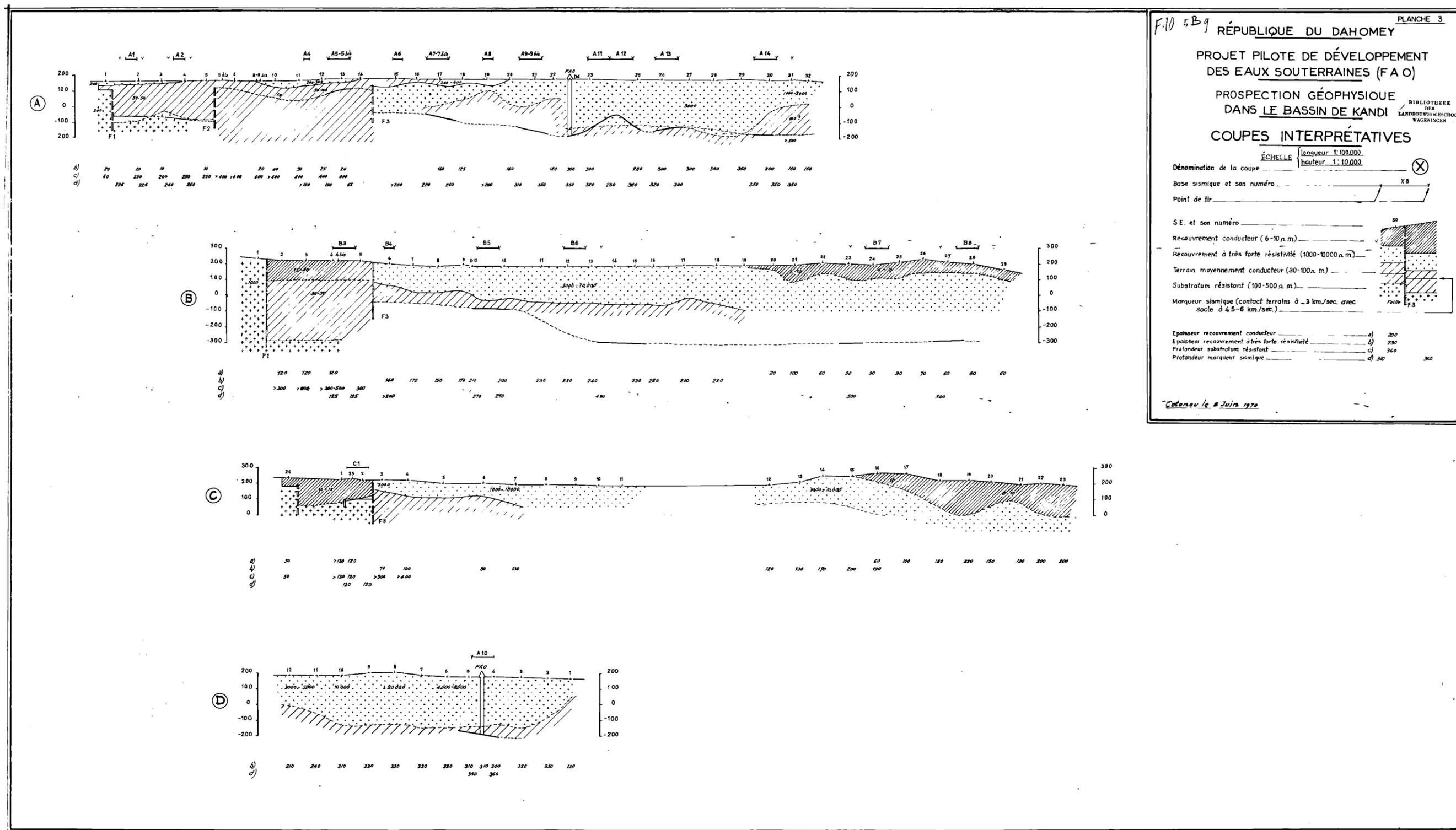


Fig. 37 : Coupe transversale géophysique interprétée du Bassin de Kandi du Projet Pilote de Développement des Eaux Souterraines, FAO (Bouziid 1971)

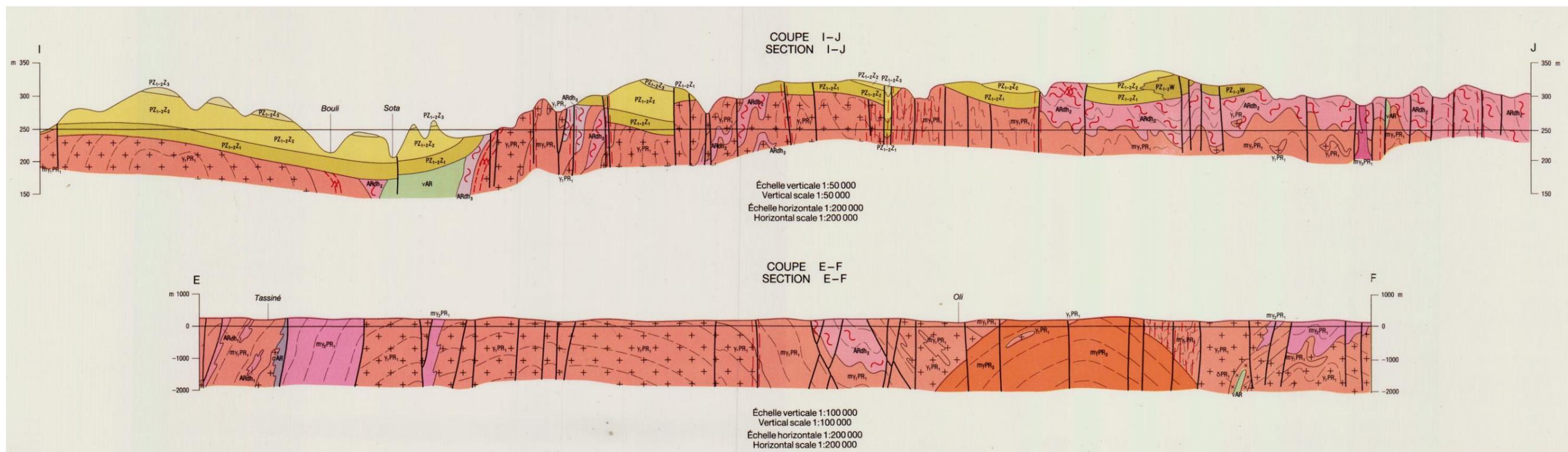


Fig. 38 : Coupe transversale du Bassin de Kandi Sud de la Carte de Géologie et des Minéraux Utiles, Dunkassa, 1:200 000 de (Technoexport 1995b)

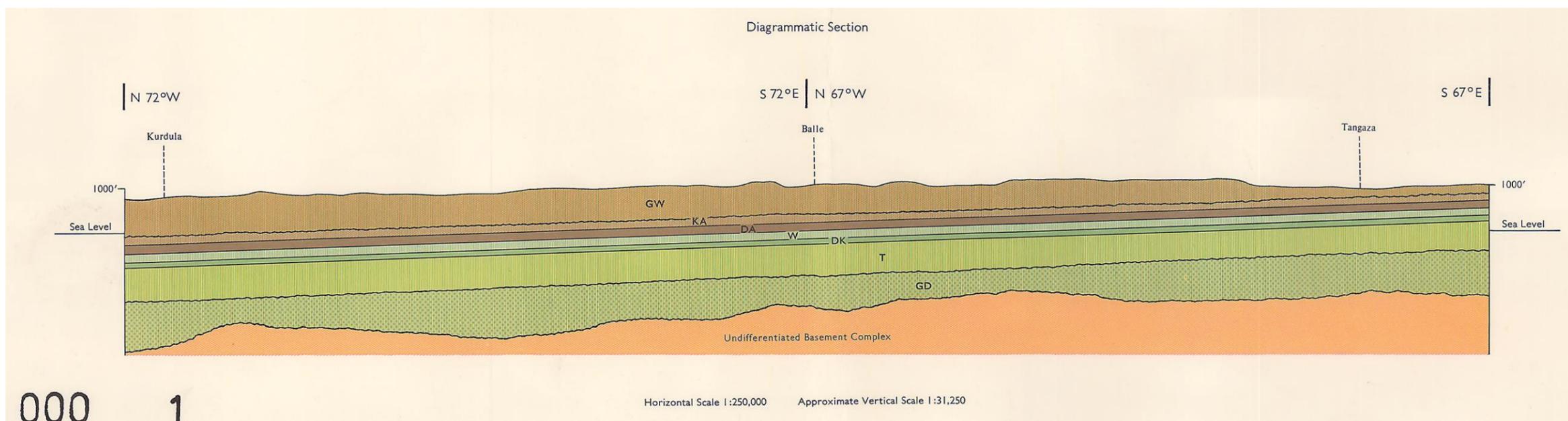


Fig. 39 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto de la Geological Survey of Nigeria map series à 1/250 000 : Feuille 1-Tangaza (D.O.S. 1966a)

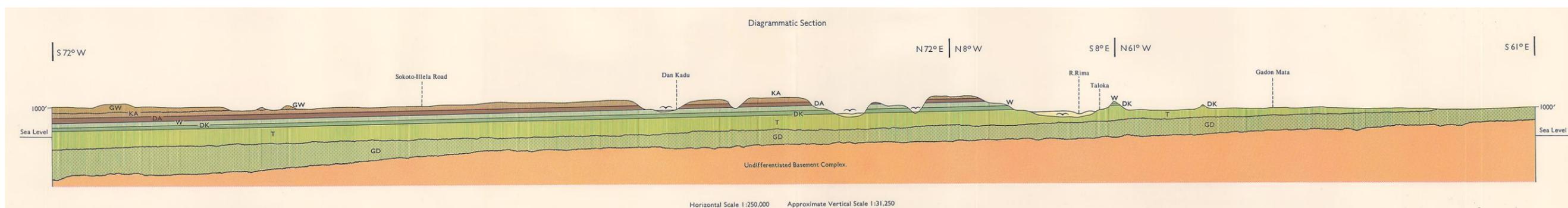


Fig. 40 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto de la Geological Survey of Nigeria map serie à 1/250 000 : Feuille 2-Sokoto (D.O.S. 1965a)

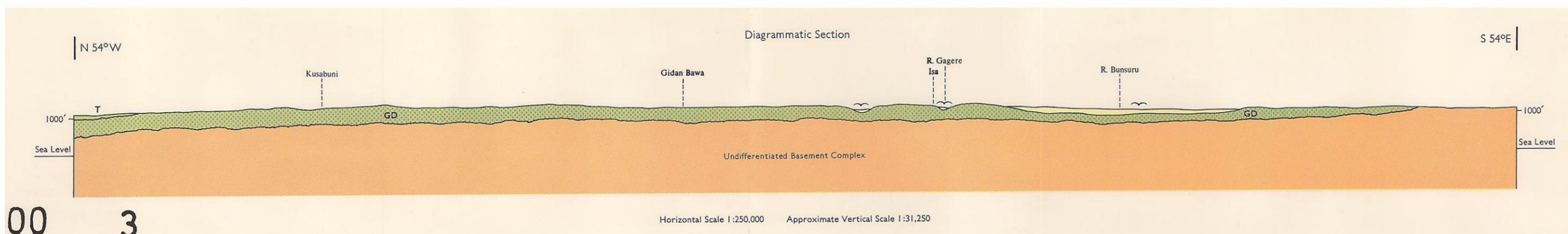


Fig. 41 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto de la série de la Geological Survey of Nigeria map series à 1/250 000 : Feuille 3-Shinkafe (D.O.S. 1965b)

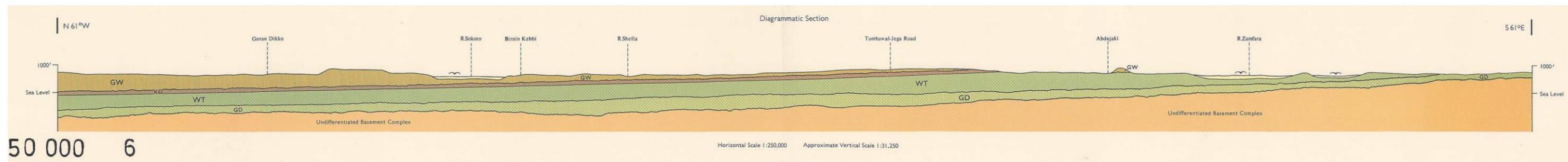


Fig. 42 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto de la série de Geological Map of Nigeria à 1/250 000 : Feuille 6 Birnin Kebbi (D.O.S. 1965c)

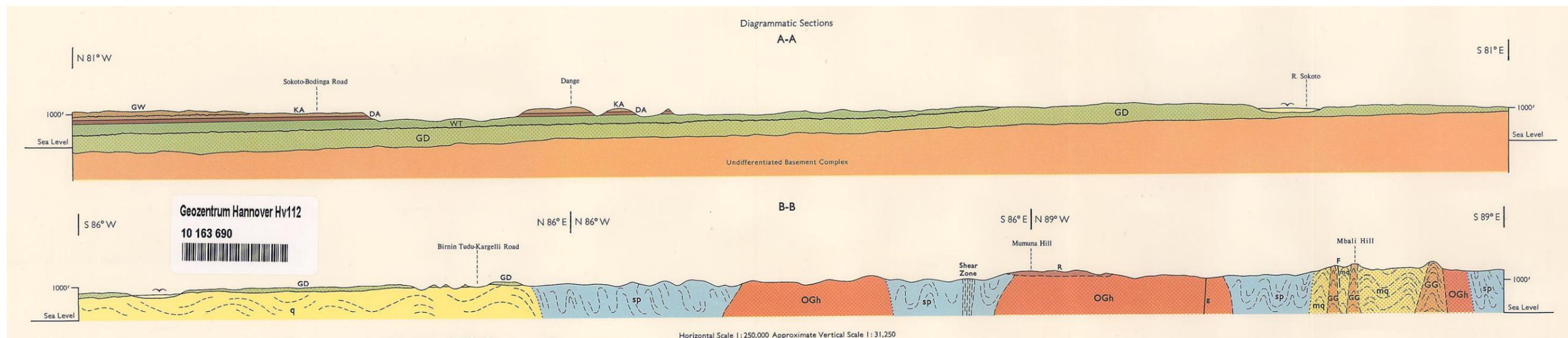


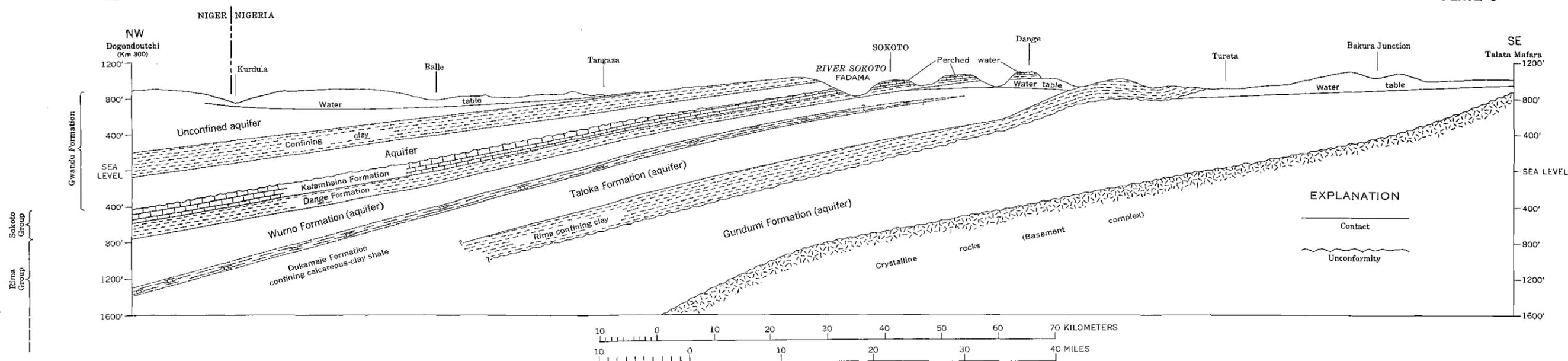
Fig. 43 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto de la Geological Survey of Nigeria map series à 1/250 000 : Feuille 7-Gummi (D.O.S. 1966b)

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR
GEOLOGICAL SURVEY

PREPARED IN COOPERATION WITH THE
GEOLOGICAL SURVEY OF NIGERIA
UNDER THE AUSPICES OF THE
U.S. AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT

Bundesanstalt für Bodenkunde
Nieders. Landesamt für Bodenkunde
Bibliothek
Tauschgang
di 1974 A 1046

WATER-SUPPLY PAPER 1757-L
PLATE 3



**GEOHYDROLOGIC SECTION THROUGH NORTHEASTERN SOKOTO BASIN, NORTHWESTERN NIGERIA,
SHOWING PRINCIPAL AQUIFERS AND CONFINING BEDS**

507-161 O - 73 (in pocket) No. 3

Fig. 44 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto de Anderson & Ogilbee (1973)

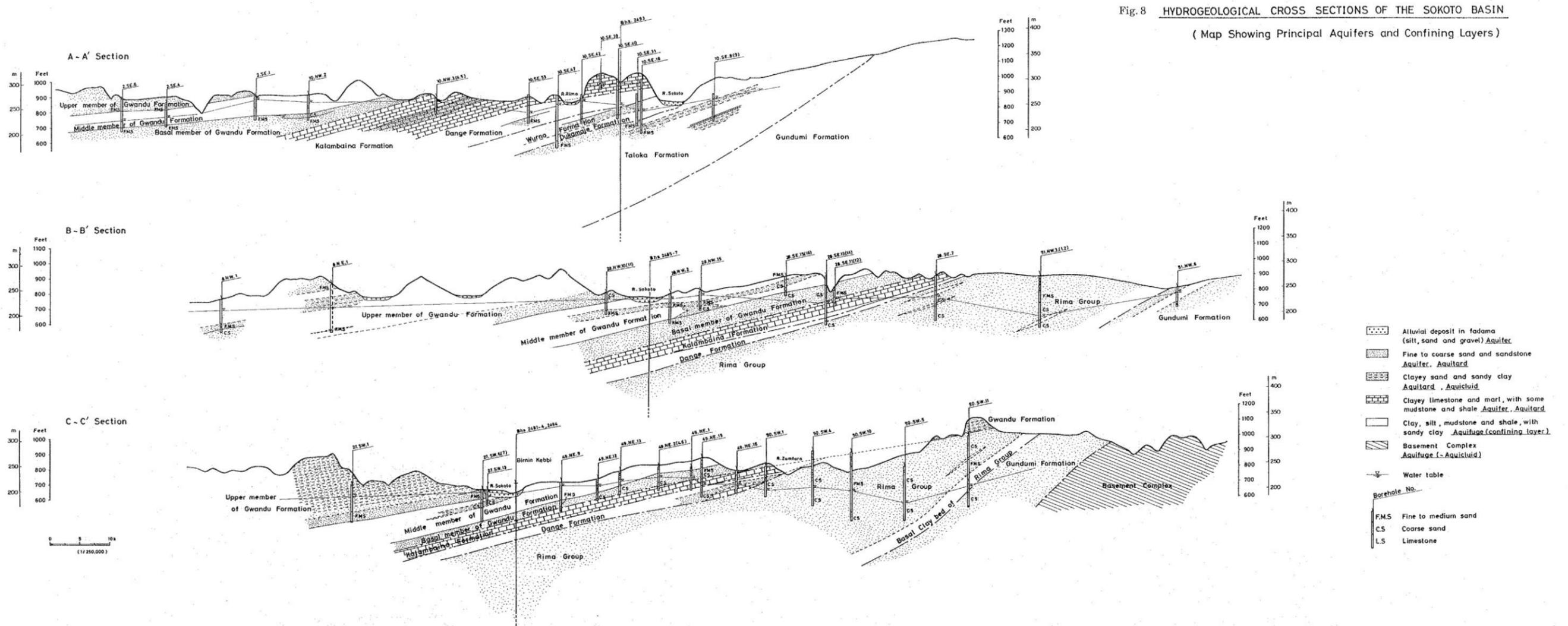


Fig. 45 : Coupe transversale du Bassin de Sokoto élaborée par l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA 1990)

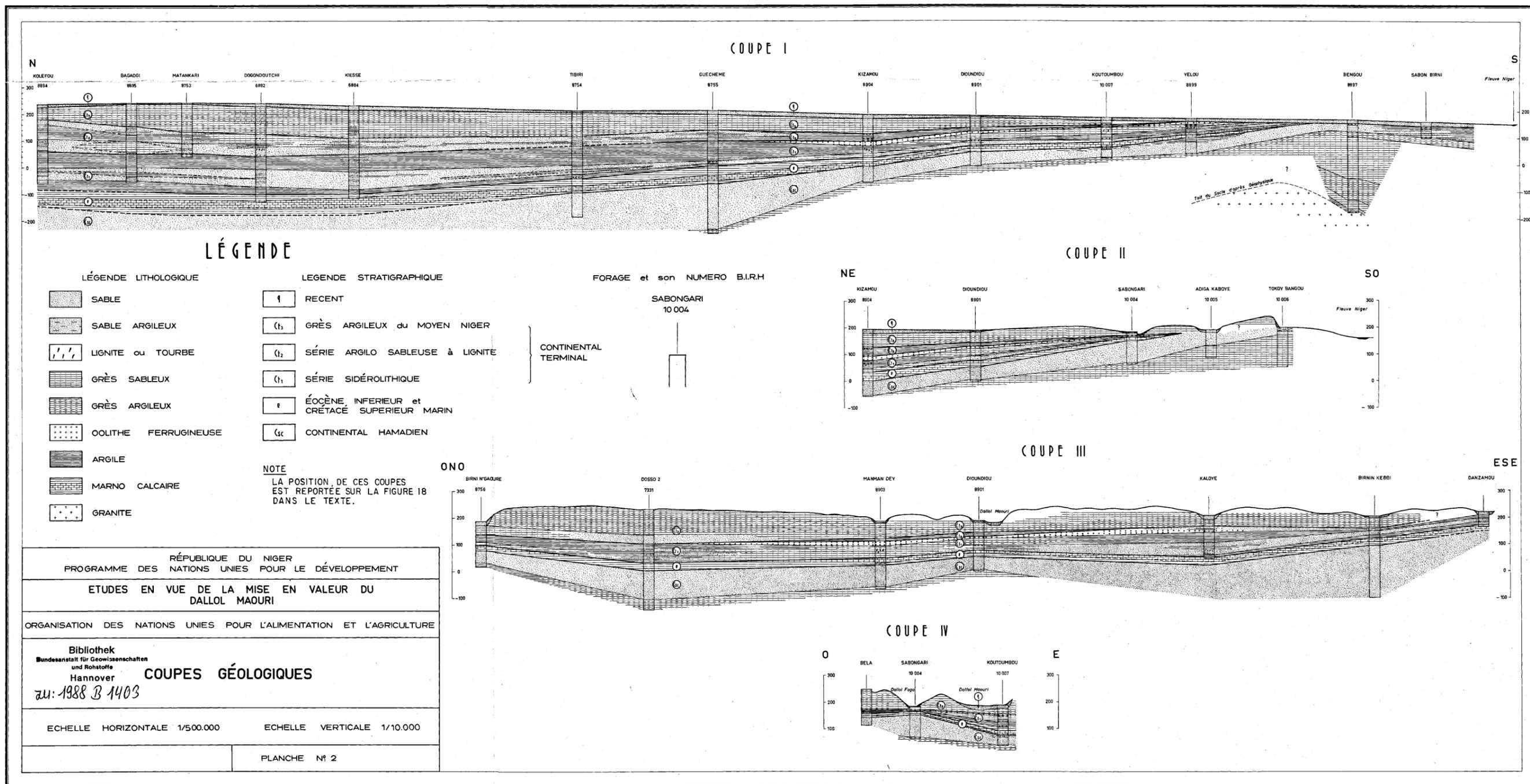


Fig. 46 : Coupes transversales le long du Dallol Maouri, département de Dosso au Niger, Planche 2 du rapport "Études en vue de la mise en valeur du Dallol Maouri, Niger: Les Eaux Souterraines.(FAO 1970).

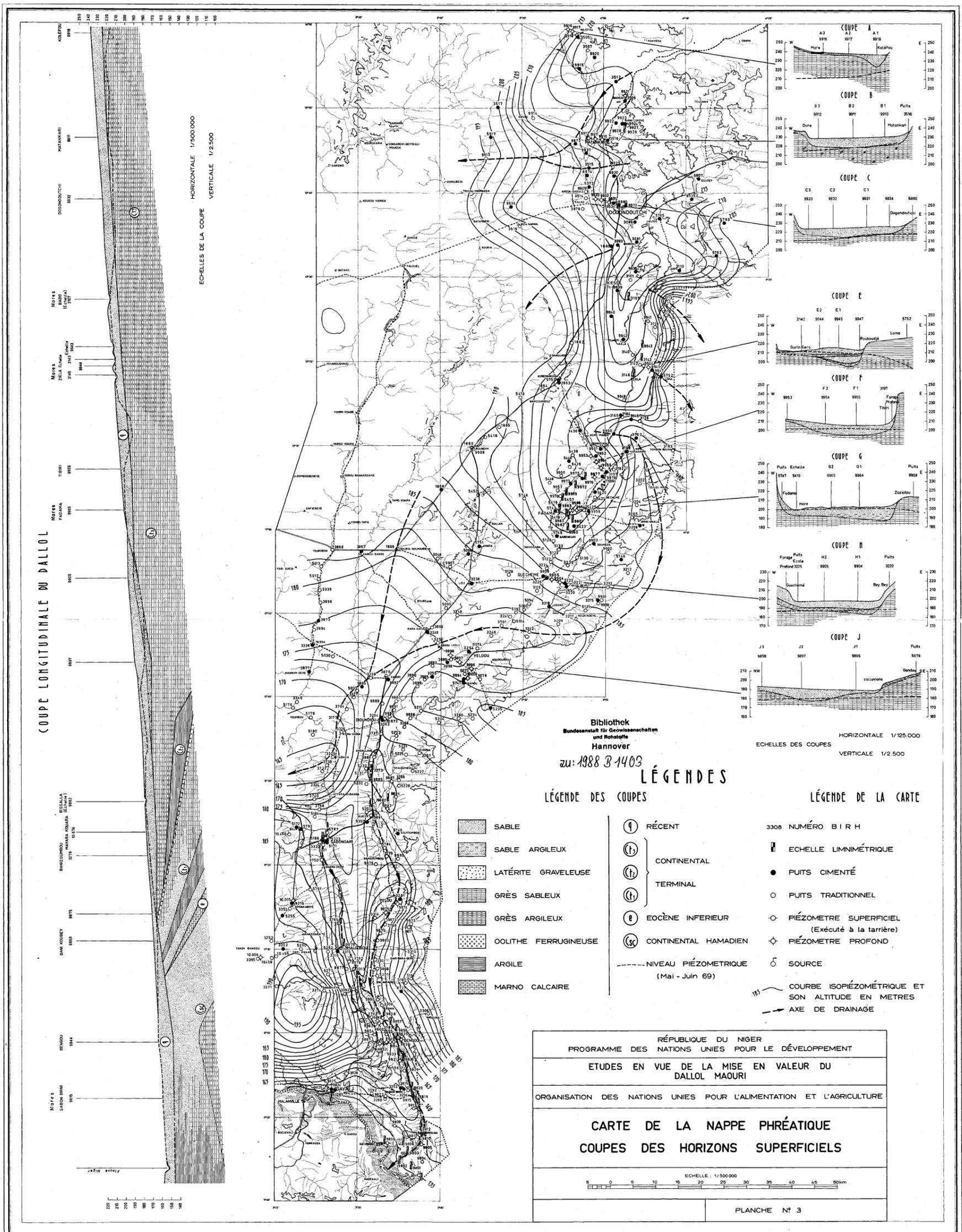


Fig. 47 : Coupes transversales le long du Dallol Maouri, département de Dosso au Niger, Planche 3 du rapport "Études en vue de la mise en valeur du Dallol Maouri, Niger: Les Eaux Souterraines. (FAO 1970)

Application dans QGIS

Ce chapitre est consacré à l'application du flux de travail dans le système d'information géographique de source ouverte QGIS. Les étapes de travail les plus importantes y sont énumérées et expliquées :

Préparation : Topologie (SIG)

Pour un bon fonctionnement des outils de géotraitement, il s'avère nécessaire d'avoir des couches d'entrée topologiquement correctes. Le QGIS fournit plusieurs extensions externes pour vérifier et corriger la topologie géométrique :

- *Vérifier la validité (de la géométrie)*
- *Vérificateur de topologie ;*
- *Vérifier les géométries*
- *Algorithmes de GRASS (v.clean).*

Les corrections topologiques nécessitent souvent un nettoyage à la fois automatique et manuel. L'édition manuelle peut impliquer l'utilisation d'outils QGIS (*Différence, Dissoudre, Intersection*) pour éliminer les défauts topologiques non résolus autrement. Les mèches (petits polygones, produits des processus d'intersection) peuvent être éliminées à l'aide de l'outil QGIS *Élimination des polygones sélectionnés* après sélection du seuil de taille correspondant. Les topologies très incohérentes des entités individuelles peuvent être résolues en éliminant puis en recréant des entités à l'aide de *SAGA GIS Polygon union* (par opposition à l'outil QGIS: *Union*, le outil de SAGA ne duplice pas des unités) et réattribuées en utilisant *Joindre attributs par localisation de centroïdes de polygone*.

Attention :

Des artefacts topologiques peuvent survenir après CHAQUE étape de géotraitement. Une correction topologique à l'aide d'extensions QGIS (voir ci-dessus) ou une correction manuelle est chaque fois nécessaire. Des erreurs topologiques non corrigées peuvent conduire à des résultats de géotraitement erronés.

En particulier, les outils de géotraitement intégrés de QGIS peuvent produire des résultats erronés. Les outils SAGA sont plus solides mais ne conservent pas le codage original (contournement en utilisant le codage de système) comme le font (la plupart ?) des outils QGIS.

Harmonisation Spatiale (SIG)

Union de cartes

Les shapefiles doivent être topologiquement corrects pour effectuer les tâches suivantes !

1. **Créer un polygone schématique** du (plus petit) shapefile à insérer dans le principal (plus grand) jeu de données cartographiques : Utilisez l'outil QGIS : *Regrouper tous les champs* ;
2. **Découper** le contour du plus petit jeu de données du plus grand jeu de données et créer un vide : Outil QGIS *Différence* ou outil *Différence* de SAGA (plus robuste) ;
3. **Associer** le principal jeu de données au jeu de données à insérer à l'aide de l'outil SAGA : *Polygon union* (cet outil a souvent produit de meilleurs résultats que l'outil *Union* de QGIS). Le tableau d'attributs qui en résulte dispose de colonnes séparées pour chacune des formes d'entrée ;

Créer un champ pour le code harmonisé :

4. Créer un nouveau champ dans le tableau d'attributs pour stocker le code harmonisé : *Ajouter Champ* ;
5. Copier les codes harmonisés des champs originaux respectifs dans le nouveau champ unique : *Calculatrice de champ*.

Adaptation manuelle des caractéristiques

Le décalage spatial des éléments le long des marges de la feuille ou entre les cartes peut être corrigé manuellement pour obtenir une carte homogène sans décalage de cartes. Les fonctions d'édition vectorielle de QGIS (*Outil de Nœuds*, *Fusionner les entités*, *Sélectionner les entités*, *Séparer les entités*, *Remodeler les entités*) permettent une édition complète.

1. Assurez-vous d'*Activer Edition Topologique* ;
2. Utilisez *Outil de Nœud* de menu *Edition* pour modifier le contour original de vos éléments ;
3. Utilisez l'outil *Remodeler les entités* de l'extension *Barre d'outils de numérisation avancée* pour créer de nouveaux contours détaillés pour vos éléments.
4. Utilisez l'outil *Couper avec polygone d'une autre couche* (*Cut with polygon from another layer*) de l'extension *Outils de Numérisation (Digitizing tools)* pour a) créer des vides et b) remplir ces vides avec de nouveaux éléments qui combinent les contours de différents jeux de données originaux.

➔ **Couche de base (3467 features)**

Union de zones cartographiques qui se chevauchent

Lorsque vous fusionnez de cartes le long d'une limite de carte commune, l'association d'une légende générale aux deux jeux de données originaux et la dissolution suivant un code commun suffit souvent pour attribuer une nouvelle classification unifiée. Cependant, si des cartes qui se chevauchent doivent être regroupées et recomposées, de nombreux petits polygones seront créés, qui devront être automatiquement ou manuellement attribués et fusionnés aux plus grandes unités.

Si aucun mécanisme d'automatisation n'est possible, l'attribution manuelle du nouveau code s'avère nécessaire. La répétition itérative des étapes d'harmonisation thématique et spatiale peut être nécessaire afin d'obtenir une couche de base finale avec un seul champ (ici : *Code*) montrant les nouveaux codes de la nouvelle carte harmonisée. La couche de base obtenue devrait contenir toutes les données des cartes originales, le nouveau code géologique harmonisé, ainsi que des commentaires sur les étapes d'harmonisation et les décisions des experts.

Harmonisation thématique (Excel, SIG)

Légende générale (travail de tableau, par exemple Excel)

1. **Créer une légende générale** avec des champs pour :
 - a. les codes des cartes originales ;
 - b. le nouveau code commun harmonisé pour chaque unité thématique ;
 - c. les informations sur les thèmes harmonisés/généralisés ;
 - d. les informations complémentaires sur les étapes de l'harmonisation géométrique.
2. **Exporter** la légende générale sous la forme d'un fichier texte délimité (.csv) en les séparant par des points-virgules.
 → **Légende générale**

Joindre la légende générale

Couche de base avec un champ unique

La couche de base topologiquement correcte contient toutes les informations nécessaires pour la nouvelle carte harmonisée. Pour faciliter les étapes suivantes, seul le code de champ harmonisé est nécessaire. Les prochaines étapes sont : La dissolution après le champ de code ; le fractionnement en entités individuelles ; et le fusionnement des tous les polygones voisins appartenant à la même nouvelle unité.

1. **Regrouper/Dissoudre** les éléments en fonction du nouveau champ de code (*QGIS : Regrouper ou SAGA : Polygon dissolve (par attribut) ; plus solide mais avec perte d'encodage*) ;
2. Diviser les **éléments multipartites en éléments monoblocs** (*SAGA Outil De morceaux multiples à morceaux uniques (Multipart to singlepart)*);
3. Les nouveaux polygones peuvent présenter des attributs hérités des cartes originales. **Supprimer** tous les champs de la couche de base à l'exception des champs nécessaires pour associer la légende générale.
 → **Couche de base dissoute**

La couche obtenue a un seul champ avec le nouveau code harmonisé. Sur la base de ce code, nous ajoutons la légende généralisée contenant des informations supplémentaires telles qu'une lithologie harmonisée et classifiée ou des dénominations géologiques généralisées.

Joindre le tableau d'attributs (légende générale) au jeu de données original

1. **Ajouter une couche de texte délimité** : Ajouter la légende générale préparée sous forme de fichier texte délimité (.csv). Cocher la case : *Pas de géométrie* car le tableau d'attributs ne contient pas d'informations spatiales ;
2. **Joindre** la légende générale sous forme de tableau d'attributs (.csv) au shapefile de la couche de base en utilisant un champ commun (Abréviation ; ici : *Code*) et créer un jeu de données avec les codes originaux respectifs et le nouveau code commun.
Click droit dur la couche -> Propriétés de la couche -> Jointures
 Attention : S'assurer que le **codage** de toutes les couches correspond à votre système (*Système*). L'utilisation du codage UTF8 pourrait entraîner la perte d'éléments spéciaux lors de l'utilisation de certains outils de géotraitement (notamment les outils SAGA).
3. **Exporter** sous la forme d'un nouveau shapefile avec le tableau d'attributs annexé (*Enregistrer sous ...*)
 → **Carte Géologique (Couche de base fusionnée avec légende générale) (82 classes)**

Couches thématiques sans limites

Pour créer des couches thématiques sans limites afin d'afficher des attributs (par exemple, lithologie ou formations géologiques), il est nécessaire de dissoudre les éléments en fonction des champs respectifs :

4. **Regrouper/Dissoudre** en utilisant le champ désiré du tableau d'attributs joint pour créer une couche thématique sans limites (QGIS : *Regrouper* ou SAGA : *Polygon dissolve (by attribut)* ; plus solide mais avec perte d'encodage).

En fonction de l'outil, la couche dissoute ne présente qu'un seul champ, d'où la nécessité d'annexer, une fois de plus, le tableau d'attributs. Si la couche obtenue a une géométrie en plusieurs parties, elle devra être convertie en une seule partie (*De morceaux multiples à morceaux uniques*) pour le traitement individuel et l'étiquetage des éléments.

- ➔ **Carte Géologique_Lithologie_IHME3** (16 classes)
- ➔ **Carte Géologique Formations** (51 classes, Code_GL ; 1 236 éléments)

Harmonisation des couches vectorielles avec des champs identiques (jeux de données accessoires)

Des couches/shapefiles avec des champs identiques peuvent être fusionnés directement :

1. **S'assurer** que les champs communs (mêmes noms de champs) de toutes les couches à fusionner sont stockés dans le même **type de données** (double, entier, chaîne, ...). Utiliser l'outil QGIS *Refactoriser les champs* pour modifier les noms des champs et le type de données ;
2. **Fusionner** (outil QGIS : *Fusionner des couches vecteur*) les couches vectorielles (point, ligne, polygone) avec les attributs communs (par exemple, linéaments, minéraux, direction et pendage, ...) ;
3. **Créer un champ commun** pour la légende avec les principaux attributs et classes ;
4. **Archiver** les attributs originaux dans de nouveaux champs en indiquant leur couche source (*Refactoriser les champs, Calculatrice de champ*)

Jeux de données

Carte Géologique

- Formations :** Le shapefile de polygone *Formations* contient 51 unités chronostratigraphiques ;
La carte géologique des solides exclut des dépôts superficiels. Dans le → shapefile *BaseLayer*, deux champs indiquent la géologie originales de roches solides (champ : *Code*) comme aussi la géologie solide attribuée (champ : *Code_GL*). Les couches de recouvrement sont affichées dans un shapefile séparé (→ *Couches de recouvrement*).
- Lithologie :** Le shapefile de polygone *Lithologie* présent les 16 différentes classes lithologiques du troisième niveau du schéma d'agrégation lithologique de l'IHME.
- Couches de Recouvrement :** Le shapefile de polygone *Couches de Recouvrement* comprend toutes les unités qui n'appartiennent pas à la géologie des roches solides, à savoir les gisements éoliens, les gisements peu profonds, des vestiges du Continental Terminal au Bénin, et les plateaux ferricretes latéritiques.
- Couche de base :** Le shapefile de polygone *Couche de Base* comporte toutes les informations de la légende des cartes originales avant leur suppression et leur rattachement à la légende générale. Pour chaque élément, les étapes de traitement et les décisions importantes sont documentées.

Données supplémentaires

- Linéaments :** Le shapefile de ligne *Linéaments* contient des informations sur les linéaments observés et déduits (champ : *Certitude*) et distingue quatre classes (champ : *Type*) : Linéaments (observés), linéaments (déduits), linéaments (omis) et Fissures. Seuls les linéaments observés et déduits sont présentés sur la carte harmonisée.
- Coupes transversales :** Le shapefile de ligne *Coupes Transversales* contient le parcours de 71 coupes transversales de l'Afrique de l'Ouest issues des cartes et de la littérature. Les coupes transversales pertinentes de la zone d'étude sont fournies en annexe.
- Direction et pendage :** S'il existe des attributs de *Direction et Pendage*, ils sont enregistrés dans un shapefile de point.
- Fossiles :** Shapefile de point avec l'emplacement des fossiles et des traces de fossiles, ainsi que les sources de données originales.
- Ressources minérales :** Shapefile de point avec l'emplacement de la présence des minéraux et les sources de données originales et, le cas échéant, une estimation de la quantité.

Données topographiques

- Localités :** Le shapefile de point *Localités* fournit une sélection des localités nécessaires à l'orientation topographique, y compris l'emplacement des sites/forages (hydro-) géologiques importants, ainsi que les emplacements types de formations géologiques.

Frontières Nationales : Le shapefile de ligne *Frontières Nationales* montre les frontières internationales entre le Bénin, le Niger et le Nigeria dérivées de la base de données GADM28 et ajustées au fleuve Niger (<https://gadm.org/>).

Réseau de cours d'eau : Le shapefile de ligne *Réseau de Cours d'Eau* montre les principales voies de drainage dans la zone d'étude, faisant la différence entre les cours d'eau permanents et intermittents. Le shapefile a été ajusté sur la base des données internes l'ABN, les données de Open Street Map (www.openstreetmap.org) et des images satellitaires

Styles QGIS

Les patrons lithologiques proviennent de la Federal Geographic Data Committee (FGDC). Pour un affichage précis du jeu de données numérique, le dossier */USGS_FGDC* contenant les graphiques vectoriels évolutifs (scalable vector graphics, SVG) fournis doit être copié dans le chemin QGIS prédéfini pour les SVG :

QGIS 2.x C:/Users/USERNAME/.qgis2/svg/USGS_FGDC/

QGIS 3.x C:/USERNAME/Application Data/QGIS/QGIS3/profiles/default/svg/USGS_FGDC/