

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Liste des figures

Figure 1: Situation du bassin sédimentaire sénégalais	3
Figure 2: Description des terrains Méso-Cénozoïque du bassin sédimentaire sénégalais (Roger et al., 2009, modifié).....	10
Figure 3: Carte montrant les dépôts des formations phosphatées éocène du bassin sénégalomauritanien (d'après Prian, 1989, modifiée).	11
Figure 4: Situation des sondages géologiques choisis comme site d'étude. Les points noirs représentent les autres sondages géologiques réalisés dans la zone du permis de recherche de COKI.	12
Figure 5: Equipotentiels et des filets de courant pour une source unique	14
Figure 6: Le dispositif Schlumberger utilisé en tomographie électrique.....	18
Figure 7: Déplacement d'ondes P et S.....	19
Figure 8: Déplacement des ondes de surfaces.	19
Figure 9: Représentation du rayon sismique.....	20
Figure 10: Loi de Snell-Descartes.....	20
Figure 11: Schéma de principe de la réfraction totale.	21
Figure 12: Cas d'une bicouche.....	21
Figure 13: Dispositif d'acquisition 24 traces-11 tirs	24
Figure 14: Résultat de l'inversion par RES2DINV : Exemple du KDD030	27
Figure 15: Film sismique : cas du KDD042	28
Figure 16: Dromochroniques déterminées pour le profil KDD057 de sismique réfraction.. ...	28
Figure 17: Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD030	30
Figure 18: Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD042	31
Figure 19: Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD054	32
Figure 20 : Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD057	33
Figure 21: Les modèles interprétés du site KDD042 avec le log du sondage	36
Figure 22: Les modèles interprétés du site KDD054 avec le log du sondage	37
Figure 23: Les modèles interprétés du site KDD057 avec le log du sondage	38
Figure 24: Les modèles interprétés du site KDD030 avec le log du sondage	39

Liste des tableaux

Tableau 1: Les paramètres des quatre sites à étudier	15
Tableau 2: Paramètres géométriques des profils de tomographie électrique	16
Tableau 3: Paramètres d'enregistrement des profils de tomographie électrique	17
Tableau 4: Géométrie et paramètres d'enregistrement des profils de sismique réfraction	24
Tableau 5: Qualité des données et des inversions des profils de tomographie électrique	26
Tableau 6: Correspondance entre les descriptions lithostratigraphiques utilisées dans les relevés de forage et les abréviations utilisées sur les profils géophysiques.	28
Tableau 7: Résumé des conclusions principales.	40

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

C : Clay

CNSI : Challenger Nord Sud International

CS : Clay sand

DGP : Direction de la Gestion et de la planification des ressources en eau

DK : Dakar

DMG : Direction de la Mine et de la Géologie

EW : Est-Ouest

GEO2X : Geophysics for geology

GPS : Global Positioning System

Kg : Kilogramme

LDP : Limestone with Disseminated Phosphate

MT : million de Tonne

NW : Nord-Ouest

P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore

RN3 : Route Nationale n°3

RTK : Real Time Kinematic

S : Sand

SC : Sandy Clay

SCF : Sandy Clay Ferruginous

SCP : Sandy Clay with Phosphate

SCPL : Sandy Clay with Phosphate and Limestone

SE : Sud-Est

SEV : Sondage Electrique Vertical

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS : World Geodetic System

RESUME

Ce document est le résultat des reconnaissances géophysiques effectuées, dans le cadre de la prospection de phosphate de chaux, dans le permis de recherche de COKI, situé dans la région de Louga. Le permis de Coki fait partie du bassin sédimentaire sénégalais qui constitue un segment du bassin sénégal-mauritano-guinéen, vaste bassin côtier de marge continentale passive d'âge Méso-Cénozoïque. Sur quatre sites d'étude où des sondages géologiques ont été réalisés, des mesures conjointes de tomographie électrique (ERT) et de sismique réfraction ont été effectuées du 8 au 11 juin 2019.

Leur application conjointe est indispensable pour juger de la présence du phosphate. L'étude comporte également un rappel du contexte géologique régional ainsi que les bases théoriques de la tomographie électrique et de la sismique réfraction.

L'environnement géologique résumé de la région de Louga est le suivant : un bedrock, également appelé socle, de calcaire d'âge Paléocène surmonté de sable-argileux avec ou sans phosphate d'âges Eocène moyen, pouvant être ou non ferrugineux, et au-dessus, une couche de sable sec d'âge Quaternaire plus ou moins épaisse termine la coupe lithostratigraphique.

L'essai d'interprétation basé sur les profils 2D révèle que la couche minéralisée est conductrice ($\rho < 30 \text{ Ohm.m}$) et relativement rapide ($> 1900 \text{ m/s}$). Les deux méthodes combinées permettent d'estimer la profondeur du recouvrement sableux dans la zone.

Mots clés : Bassin sédimentaire sénégalais, Coki, phosphate de chaux, tomographie électrique, sismique réfraction

ABSTRACT

This document is the result of geophysical reconnaissance carried out, within the framework of the limestone phosphate prospecting, in COKI's prospecting permit, located in the Louga region. The Coki permit is part of the Senegalese sedimentary basin which constitutes a segment of the Senegalese-Mauritania-Guinean Basin, a vast coastal basin of passive continental margin of Meso-Cenozoic age. At four study sites where geological surveys were carried out, joint electric tomography (ERT) and seismic refraction measurements were carried out from June 8 to 11, 2019.

Their joint application is essential to judge the presence of phosphate. The study also includes a reminder of the regional geological context as well as the theoretical bases of ERT and seismic refraction.

The summarized geological environment of the Louga region is as follows: a bedrock, also called basement, of limestone of Paleocene age surmounted by sand-clay with or without phosphate of Middle Eocene age, which may or may not be ferruginous, and above, a layer of dry sand of more or less Quaternary age completes the lithostratigraphic section.

The interpretation test based on the 2D profiles reveals that the mineralized layer is conductive ($\rho < 30 \text{ Ohm.m}$) and relatively fast ($> 1900 \text{ m/s}$). The two methods combined make it possible to estimate the depth of the sandy overburden in the zone.

Keywords: Senegalese sedimentary basin, Coki, lime phosphate, electric tomography, seismic refraction

INTRODUCTION

Le bassin sénégal-mauritanien est un bassin sédimentaire d'âge Méso-Cénozoïque occupant les trois quarts du territoire sénégalais et qui regorge d'un important potentiel en ressources minéralisées tel que le phosphate.

En effet, les nombreux indices de phosphates signalés au Sénégal témoignent d'une sédimentation phosphatée abondante notamment au cours de l'éocène. Ainsi, les gisements de phosphate de chaux de Lam-Lam et de Taïba, découverts respectivement en 1945 et 1948, ont été exploités avec succès (Slansky, 1964). En termes de réalisations, la production totale de phosphate par les sociétés minières telles que ICS, SOMIVA ou encore BMCC, s'élève à 2.5Mt en 2018.

Au Sénégal, la société CNSI (Challenge Nord Sud International) est devenue titulaire du permis de recherche de phosphates de chaux et substances connexes de Coki accordé par arrêté ministériel N° 07102/MIM/DMG du 12 mai 2016. A la suite d'une étude de synthèse bibliographique des travaux antérieurs de recherche de phosphate, d'une première campagne de sondages (26), d'échantillonnages et d'analyses chimiques, une zone d'intérêt fut identifiée. Une deuxième campagne de 50 sondages a été entreprise dans cette zone pour contrôler les indices et informations issues de la synthèse et du traitement des données existantes. L'épaisseur la plus significative recoupée est de 0,71 m avec des teneurs de 12% de P_2O_5 . (Rapport annuel 2017 : Permis de recherche de phosphate de chaux et substances connexes (région de Louga) délivré à CNSI-S.A.S. 40 pages)

C'est dans la même dynamique qu'en juin 2019, CNSI a entamé une étude test menée par GEO2X et l'IST pour l'acquisition de données géophysiques 2D par tomographie électrique et sismique réfraction sur quatre sites d'études où des sondages géologiques ont été effectués.

Les quatre sites d'étude ont été choisis en fonction des critères suivants :

- profondeur du socle calcaire ou bedrock/ épaisseur des sédiments meubles ;
- présence ou non de couche de phosphate ;
- épaisseur de la couche de phosphate.

Les objectifs fixés lors de ces reconnaissances géophysiques sont :

- caractériser la signature géophysique des différentes strates géologiques de la zone et notamment du phosphate ;

- estimer la pertinence de la combinaison des tomographies électriques et de la sismique réfraction dans la prospection des phosphates dans la zone.

Le document est organisé en 3 chapitres.

Un premier chapitre axé sur le contexte géologique régional et une présentation du permis de recherche. Un deuxième chapitre présente les bases théoriques des méthodes utilisées de même que leur mise en œuvre sur les sites d'études. Un troisième chapitre est centré sur les résultats suivis de leurs interprétations.

L'étude se termine par des conclusions et des recommandations.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE PERMIS DE RECHERCHE DE COKI

Le permis de recherche de Coki fait partie du bassin sédimentaire sénégalais qui occupe la plus grande partie du territoire sénégalais. Les terrains anciens, birrimiens à paléozoïques, n'affleurant qu'au Sud-est du pays, à la frontière avec la Guinée et le Mali. Le bassin forme un vaste plateau qui culmine rarement à des altitudes supérieures à 50 m (Roger et al., 2009).

I. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

Le bassin sédimentaire sénégalais constitue un segment du bassin sénégal-mauritano-guinéen, vaste bassin côtier de marge continentale passive (fig. 1), d'âge Méso-Cénozoïque et qui s'étend de la dorsale Reguibat au Nord à la faille guinéenne au Sud. Le bassin sédimentaire sénégalais est limité au Nord par le Fleuve Sénégal, à l'Est et au Sud-est par la chaîne des Mauritanides et au Sud par le bassin de Bové. Ce bassin atteint une largeur maximale d'environ 550 km à la latitude de Dakar (Roger et al., 2009).

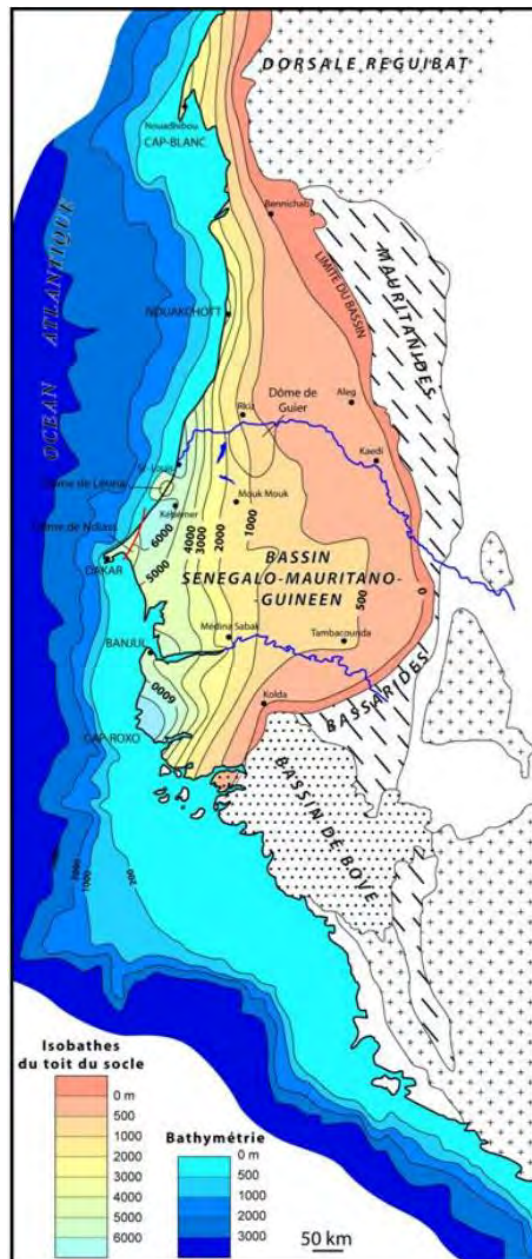


Figure 1 : Situation du bassin sédimentaire sénégalais (Roger et al., 2009)

1. Descriptions des terrains

MESOZOIQUE

CRETACE SUPERIEUR

1.1. Campano-Maastrichtien

c5-6 : Grès et argiles (Groupe de Diass)

A l'échelle du bassin sédimentaire du Sénégal, les terrains les plus anciens à l'affleurement sont attribués au Crétacé supérieur et exposés dans le horst de Diass, où ont été reconnus le Campanien (**Formation de Paki**) (Lappartient et Montellet, 1980 ; Roman et Sornay, 1983 ; Khabib et al., 1990) et le Maastrichtien (**Formation du Cap de Naze**) (Khabib et al., 1990 ; Sow, 1992 ; Sarr, 1995) ; ces deux unités ont été rassemblés à l'échelle de 1/500 000, dans le **Groupe de Diass** (fig.2).

En sondage, à l'échelle du bassin sédimentaire sénégalais, le Campanien est souvent difficile à différencier du Sénonien s.s., voire du Maastrichtien, surtout quand il est gréseux et pauvre en faune. La flexure qui sépare ces deux domaines est centrée sur le méridien 15°30 W (Latil-Brun et Flicoteaux, 1986 ; Latil-Brun et Lucazeau, 1988).

Le Campanien est représenté, dans le secteur occidental du bassin du Sénégal, par des dépôts argileux à intercalations gréseuses, puissants de 200 à 300 m (Castelain, 1965 ; Spengler et al., 1966 ; Bellion et Guiraud, 1984) (fig.).

Vers l'intérieur du bassin, les faciès s'amincissent et deviennent franchement sableux ; ceux-ci sont alors difficilement distinguables à l'intérieur du Sénonien s.s. et même du Maastrichtien gréseux, à cause de leur caractère azoïque (Roger et al., 2009).

Après une phase d'érosion du sommet du Sénonien s.s. (Castelain, 1965) et un nouvel épisode transgressif, on retrouve le même dispositif au **Maastrichtien**, gréseux à l'Est et argileux à l'Ouest. La sédimentation terrigène grossière dépose, à l'Est, une puissante série, dont les termes supérieurs présentent des qualités aquifères les « sables aquifères du Sénégal ». Les faciès les plus occidentaux de la presqu'île du Cap-Vert, sont argilo-silteux et localement très épais (Roger et al., 2009).

A l'affleurement, les grès argileux du Maastrichtien sont connus sur le littoral atlantique, dans les falaises du Cap Rouge avec de grands chenaux tidaux divaguants à fort comportement avulsif, les falaises arénitiques de Toubab Dialaw et dans la falaise du Cap de Naze (Khatib et al., 1990 ; Sow 1992 et 1995, Sarr, 1995) où ils dessinent des séquences granocroissantes progradantes. En complément, dans la petite falaise de la plage de Poponguine, des ammonites

ont été découvertes par Tessier (*Daradicerias gignouxii* et *Sphenodiscus corroyi*) (Tessier, 1954a et 1954).

CENOZOIQUE

PALEOGENE

1.2. Paléocène

Le Paléocène marque le début d'un nouveau cycle, caractérisé par l'arrêt de la sédimentation terrigène et le ralentissement de la subsidence. La transgression paléocène débute précocement sur les marges du bassin, au Danien, pour ensuite s'amplifier et envahir tout le bassin au Thanétien.

Danien

e1 : Calcaires coquilliers gréseux, alternances marno-calcaires à foraminifères planctoniques (Formation de Ndayane)

e1-3 : Marnes et argiles à foraminifères planctoniques et benthiques arénacés (base de la Formation des Madeleines)

Le Danien est mal représenté à l'affleurement, uniquement connu sur le littoral atlantique, dans la région de Ndayane-Poponguine (**Formation de Ndayane**) (fig2). Sur le flanc oriental du dôme de Diass (sondages Thiadiaye, Kissane), la présence de Danien est interprétée par Diop (1996), mais probable. En effet, dans la région de Kaolack, Sarr (1995) décrit la présence, dans le sondage de Mbassis, d'une lumachelle argileuse riche en ostréidés, datée du Danien (P1-P2). Sur son flanc occidental, on retrouve du Danien en base des sondages de Pantior, de Diam Niadio 2, de Kabor 1 et de Retba 1 (Toumarkine et al., 1984 ; Diop, 1996).

Dans la tête de la presqu'île du Cap-Vert, le Paléocène a été recoupé (**Formation des Madeleines**) (fig.2) sur une puissance de 100 m, sous un faciès argileux, sans que le Danien soit formellement identifié par les auteurs, mais qui reste probable, grâce au signalement de la présence de foraminifères index du Danien. (Roger et al., 2009).

Dans la carrière de Poponguine, le Danien (**Formation de Ndayane**) débute par une première séquence à faciès de plate-forme, oocalcarénitiques et très bioclastiques à mollusques, coiffée par des alternances marno-calcaires, à faciès de plate-forme externe (offshore supérieur), bien exprimés dans la falaise sous la Résidence présidentielle (**Formation de Ndayane**). Dans la tête de la presqu'île du Cap-Vert (**Formation des Madeleines**), le passage à des faciès argileux indique que l'environnement marin est encore plus distal, interprété comme offshore inférieur (Roger et al., 2009).

Les dépôts marno-calcaires ont été datés du Danien moyen à supérieur, sur la base de leur contenu en nannoplancton : NP2-NP3 (Toumarkine et al., 1984) et en foraminifères planctoniques : P1d-P2 (Sarr, 1995 ; Sarr et Ly, 1998).

Sélandien-Thanéien

e2-3 Calcaires coquilliers à mollusques (Formation de Poponguine)

e1-3 Marnes et argiles à foraminifères planctoniques et benthiques arénacés (sommet de la Formation des Madeleines et Formation de l'Hôpital)

A l'Ouest et au Sud de la falaise de Thiès, ces dépôts constituent une importante source de calcaire pour ciment et blocs d'enrochement. Dans cette région, ils se présentent à l'affleurement sous deux faciès principaux inféodés à deux régions paléogéographiques distinctes : à l'est, des calcaires coquilliers de plateforme (**Formation de Poponguine**) (fig.2) et, à l'Ouest, des marnes de bassin (sommet de la **Formation des Madeleines** et **Formation de l'Hôpital**) (fig.2). La limite paléogéographique se situe à la retombée Ouest du dôme de Diass.

La Formation de Poponguine, la plus largement représentée, est puissante d'une centaine de mètres dans la région de Thiès, du Sine-Saloum ; elle s'amincit dans le Ferlo et au Sénégal oriental (70 m). Les plus faibles épaisseurs se rencontrent en Haute Casamance et dans le dôme de Guier (30-50 m). Elle se compose de faciès carbonatés, plus ou moins enrichis en terrigène, associés à des marnes et des marnocalcaires.

A l'échelle du bassin, la Formation de Poponguine conserve latéralement son caractère carbonaté prédominant. Elle passe aux marges du bassin, dans la région orientale du fleuve Sénégal, à des dépôts grés-argileux, à lits argileux riches en matière organique (Monciardini, 1966).

Dans l'Ouest de la presqu'île du Cap-Vert, le caractère argilo-marneux des dépôts s'impose (sommet de la **Formation des Madeleines** et **Formation de l'Hôpital**).

1.3. Eocène inférieur

L'Eocène inférieur est marqué par un renouvellement des faciès qui deviennent à dominante argileuse. Cette homogénéisation de la sédimentation traduit une forte poussée transgressive dont les dépôts vont déborder les limites du bassin paléocène.

e4a Argiles à foraminifères planctoniques (Formation de Reubeuss)

e4b Argiles et marnes feuilletées blanches à attapulгите et horizons phosphato-glaucieux silicifiés (Formation de Thiès)

La succession stratigraphique est particulièrement bien exprimée dans la presqu'île du Cap-Vert où la série a fait l'objet de nombreux travaux depuis la synthèse fondatrice de Tessier (1952, 1954a et 1954b) : Lappartient (1970a et b), Elouard et al. (1976), Brancart (1977). Dans ce secteur, la série yprésienne (**Formation de Thiès**) (fig.2), puissante de plus de 120 m, se compose essentiellement d'argiles feuilletées blanches à attapulгите (« papyracées » pour les anciens) entrecoupées d'horizons silicifiés, généralement phosphatés. A son sommet, la Formation de Thiès passe à des dépôts marno-carbonatés à lentilles fossilifères, annonciateurs du Lutétien.

Dans la coupe de Thiès, la série est encadrée par les faciès glauconieux et phosphatés basaux (**Membre de Yène**), datés de la base de l'Yprésien et les marno-calcaires à discocyclines et mollusques du Membre de Ngazobil, datés du sommet de l'Yprésien (Roger et al., 2009d)

Dans la région de Joal, la série s'amincit, en partie du fait de l'érosion de son toit, ne dépassant pas 70 m de puissance (Sarr, 1995). Cet amincissement est encore plus marqué en Casamance à la bordure sud du bassin où la série cumule moins de 50 m de puissance. Dans cette région, les faciès, décrits par Ly (1985) et Ly et Carbonnel (1987), se composent de calcaires argileux à foraminifères planctoniques.

Les faciès argilo-marneux yprésiens affleurent dans la pointe de la presqu'île du Cap-Vert (**Formation de Reubeuss**) (fig.2), où ils ont été étudiés par Castelain (1965), Sarr (1995) et Mbani (2000).

1.4. Eocène moyen

Après le grand épisode d'inondation de l'Yprésien, le Lutétien est marqué par l'installation d'une plate-forme carbonatée à faciès alternants marno-carbonatés, riches en faune marine (discocyclines, oursins et mollusques variés). Ces dépôts sont relayés par des calcaires à nummulites caractéristiques de la fin de l'Eocène moyen (Lutétien supérieur à Bartonien, ancien « Lutétien supérieur » de Tessier).

Lutétien

e5c Alternances de marnes à discocyclines et de calcaires jaunes à mollusques, oursins et algues (Formation de Lam Lam)

Sur la marge occidentale du bassin, la **Formation de Lam Lam** (fig.2) constitue une série marno-carbonatée accessoirement phosphatée, épaisse d'une vingtaine de mètres. Le découpage formationnel de la série basale révisé par Flicoteaux (1974) comprend les « Calcaires et argiles phosphatées de Pallo » coiffés par les « Marnes de Lam Lam ». Ces deux unités ont été rassemblées dans la Formation de Lam Lam.

Lutétien supérieur-Bartonien

e5-6 Calcaires et marnes à nummulites ; phosphatés à l'Ouest (Formation de Taïba)

La multiplication, à partir des années 70, des travaux à connotation litho et biostratigraphique, aiguillonnés par la recherche de phosphates à Lam Lam et Taïba, a fortement enrichi l'état des connaissances de la série sommitale du plateau de Thiès (Brancart et Flicoteaux, 1971 ; Flicoteaux et Tessier, 1971 ; Flicoteaux, 1972, 1974 ; Tessier et al., 1976 ; Flicoteaux, 1980). Au-dessus des « Marnes de Lam Lam », ces travaux ont permis de reconnaître la partie sommitale de l'Eocène moyen et de distinguer au sein du groupe phosphaté à l'origine de la minéralisation économique, une formation phosphatée à gros silex en nodules riches en *Nummulites gizehensis*, coiffée par une seconde formation à silex en plaquettes à daucines et argiles bariolées. Dans ce secteur occidental du bassin ces faciès ont été rassemblés dans la **Formation de Taïba** (Sarr et al., 2008) (fig.2).

1.5. Miocène moyen à supérieur

m Grès bioturbés et argiles sableuses kaoliniques, à terriers et mollusques (Formation du Saloum)

L'appartient (1985), dans sa thèse, a prouvé, notamment sur la présence de faunes marines, le caractère marin des grès rapportés au « Continental terminal » dans la région du Saloum, au nord de la Gambie. Ses travaux ont en outre permis de dater ces niveaux du Burdigalien supérieur et d'élargir fortement le domaine du bassin miocène jusqu'à l'ouest de Kaédi. Malheureusement, son travail de révision n'aboutira pas pour le Continental terminal de la région orientale du fleuve Sénégal (Kaédi, Matam). Pourtant, ces faciès grés-argileux, récemment réévalués (Lahondère et al., 2005 ; Barusseau et al., 2009) ont montré la présence d'une forte bioturbation et de nombreux terriers, ainsi, qu'au sud de Kanel, de petits chenaux à faune marine peu diversifiée (*Ostrea multicostata*, thersités). En conséquence, ces faciès doivent être corrélés avec ceux de la région du Saloum et renommés (**Formation du Saloum**) (fig.2). Dans la région orientale du fleuve Sénégal, ces faciès occupent une place marginale par rapport au bassin miocène, à l'interface entre un milieu marin côtier et une frange laguno-lacustre sous influences continentales.

NEOGENE

1.6. Pliocène

p£ Cuirasse ferrugineuse

Les formations indurées par les oxydes de fer couvrent de larges superficies et témoignent de conditions climatiques humides de mise en place que souligne la présence fréquente de gaines racinaires. Tantôt c'est une cuirasse très compacte, se fragmentant en gros blocs, tantôt un niveau de gravillons ferrugineux légèrement recimentés. Ces revêtements s'étendent sur la majeure partie du Ferlo, au-dessus de la Formation du Saloum ; ils disparaissent uniquement dans les entailles évasées de l'ancien réseau hydrographique où ils ont été érodés. Des chapeaux de cuirasse ferrugineuse coiffent les principales buttes.

Ces latérites sont attribuées au Pliocène sur base d'observations et de datations réalisées à Dakar où la cuirasse s'observe au toit des coulées volcaniques du Cap Manuel dont les plus récentes sont datées de $5,30 \pm 0,30$ Ma et se trouvent recouvertes par les formations volcaniques des Mamelles dont l'une des plus anciennes a été datée à $1,50 \pm 0,10$ Ma (Cantagrel et al., 1978).

QUATERNAIRE

La sédimentation quaternaire qui suit est essentiellement détritique à faciès continentaux, entrecoupée de temps à autre par des dépôts margino-littoraux sur la bordure atlantique et dans les deltas et estuaires du Sénégal, du Sine-Saloum, de la Gambie et de la Casamance.

1.7. Pléistocène

CF1 Colluvions et alluvions indifférenciées

La base du Pléistocène correspond à la formation du haut glacis et des hautes terrasses détritiques alluviales des bassins des fleuves Sénégal et Gambie, à l'Est et au Sud du pays. Ces dépôts sont constitués de galets et de graviers, matériel qui sera par la suite cuirassé au cours d'une période humide.

Le moyen glacis et la moyenne terrasse des fleuves Sénégal et Gambie sont rapportés au Tafarien. Ils comprennent des dépôts graveleux qui ont fourni une industrie préhistorique de l'Acheuléen moyen sur un affluent de la rive droite du Sénégal. Les éléments issus du démantèlement de la cuirasse pliocène ont été accumulés et cimentés lors d'une période humide pour former une cuirasse gravillonnaire. Dans les vallées du Sénégal et de la Gambie, le bas glacis et la basse terrasse renferment une industrie de l'Acheuléen final et du Levalloisien. Ce glacis est rarement cuirassé.

L Calcaires lacustres

Dans les régions de Diourbel, Louga et du Ferlo, l'Eémien présumé comprend des calcaires lacustres formés au cours d'une période très humide. D'autres repères régionaux, notamment en Mauritanie, existent sous forme de grès calcaires à stratification entrecroisée ou de calcaires

très fossilifères qui passent au sommet à des grès fins à débris coquilliers.

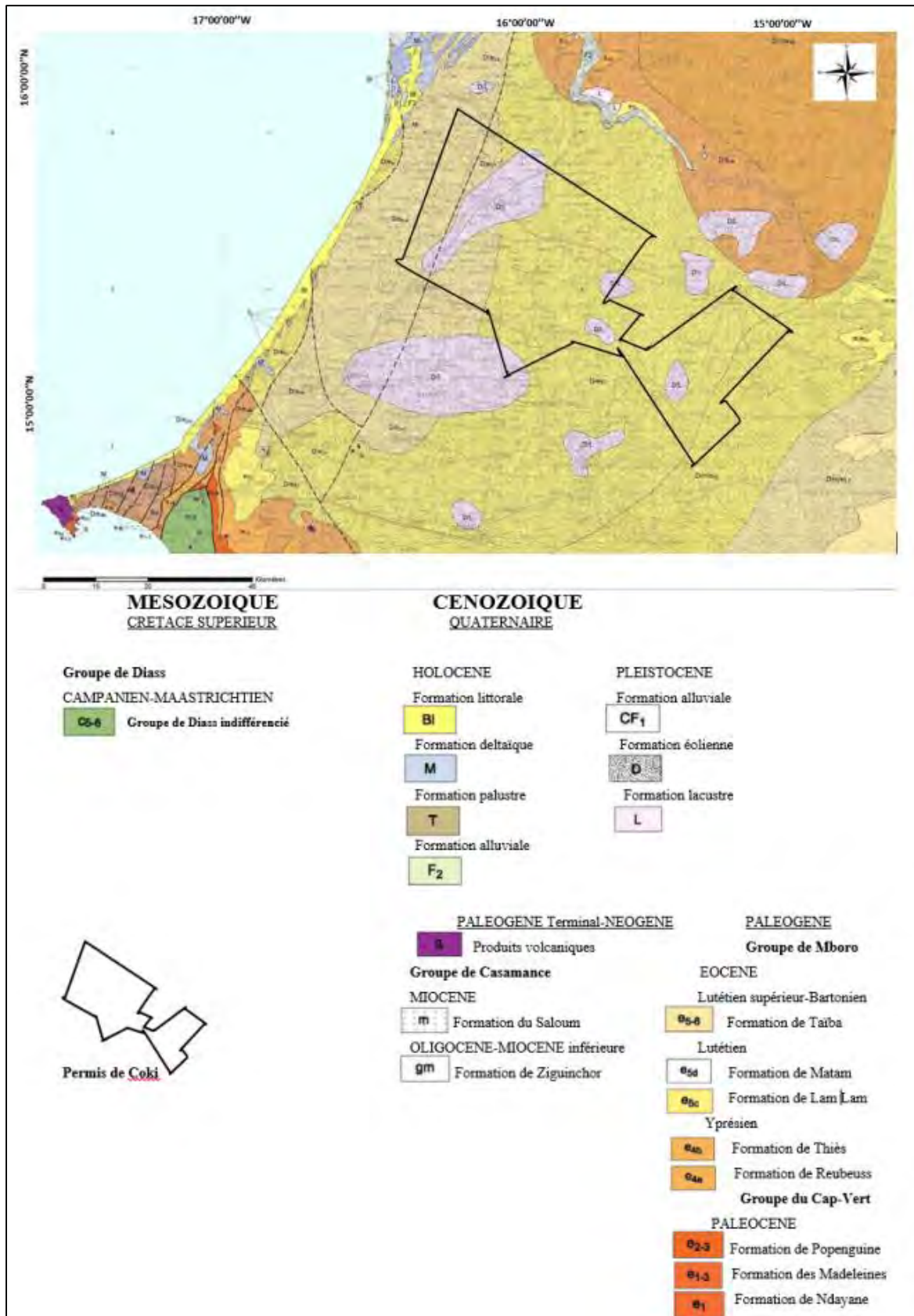


Figure 2 : Description des terrains Méso-Cénozoïque du bassin sédimentaire sénégalais (Roger et al., 2009, modifiée)

A l'Eémien, de nombreuses formations de zone littorale sont connues mais ne sont représentées que par de faibles affleurements qui ne peuvent être cartographiés à l'échelle du 1/500 000. Dans le delta du fleuve Sénégal, il s'agit de grès calcaires homogènes (5 m) associés à des sables très fins à moyens (10 à 12 m) enfouis à une profondeur de 10 à 30 m. A Louga, l'Eémien correspondrait aux sables à passées argilocalcaires alternant avec des calcaires limoneux (6 m) enfouis entre -10 et -30 m.

❖ Géologie de la zone d'étude : âge et étapes de la phosphatogenèse

Le permis de COKI se situerait dans un environnement assimilable à celui du gisement de Taïba – formé au cours de l'Éocène moyen (lutétien supérieur-Bartonien) – mais remanié.

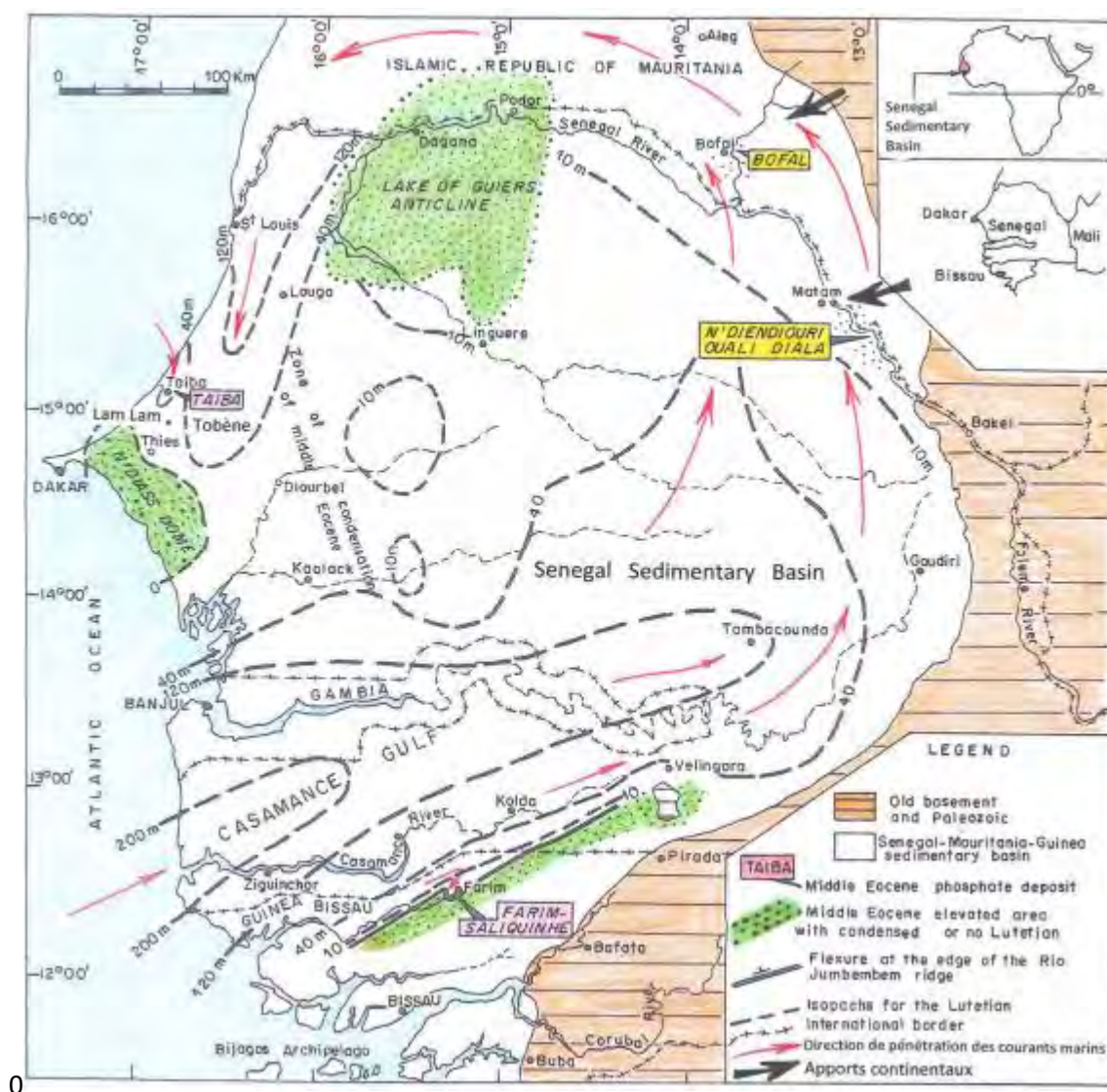


Figure 3 : Carte montrant les dépôts des formations phosphatées éocène du bassin sénégalo-mauritanien (d'après Prian, 1989, modifiée).

Les grains de phosphate présents dans cet environnement, et qui ont été recoupés par certains sondages choisis comme sites d'études (KDD054 et KDD057) (Fig. 3), ont été remaniés et triés par action hydrodynamique, avant de se redéposer dans des pièges morphologiques voisins. Ces concentrations de phosphate ont ensuite progressivement émergé, entraînant une forte altération et une lixiviation par l'eau de pluie qui a provoqué la dissolution complète de la calcite et son remplacement par le phosphate (plus précisément l'épigenèse des tests de calcite fossile par le phosphate). Tout phosphate remobilisé lors de la lixiviation pouvait précipiter sous forme de ciment pour les grains de phosphate. Avec l'émersion continue, l'altération pédogénétique s'est développée avec la précipitation locale de produits ferrugineux dans le ciment.

Cette paléo-altération s'est produite de la fin de l'Éocène jusqu'au début de l'Oligocène (Prian, 2014).

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le Permis de Recherche se situe dans la région de Louga et couvre une superficie de 4 396 Km² (Fig. 5). Le Permis de Recherche est grossièrement limité à l'Ouest par une ligne Guéoul-Sakal, englobe Louga et se poursuit vers l'Est jusqu'aux environs de Linguère. Il est traversé sur toute la partie médiane par la route Louga - Dahra - Linguère. Son accès à partir de Dakar se fait par la RN3 (le tronçon Dakar-Louga) jusqu'à Louga puis par les routes Louga-Linguère et Louga-Keur Momar Sarr qui passent à l'intérieur du permis.

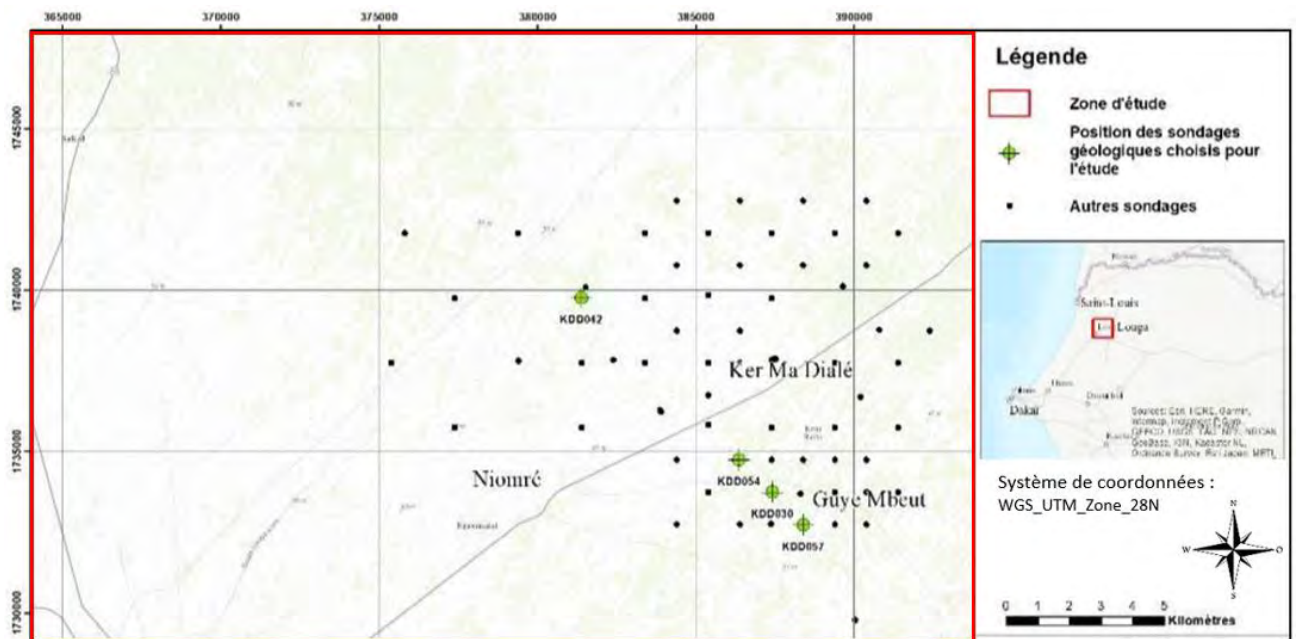


Figure 4 : Situation des sondages géologiques choisis comme site d'étude. Les points noirs représentent les autres sondages géologiques réalisés dans la zone du permis de recherche de COKI.

CHAPITRE II : LES METHODES GEOPHYSIQUES UTILISEES

Sur quatre sites d'études où des sondages géologiques ont été effectués, l'acquisition des données géophysiques 2D s'est faite par tomographie électrique et sismique réfraction. Les bases théoriques des deux méthodes ainsi que les procédures d'acquisitions des données sont présentées dans ce chapitre.

I. LA TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE

La prospection électrique en courant continu constitue une méthode géophysique mise en œuvre par les deux frères Conrad et Marcel Schlumberger en 1927, qui ont eu l'idée de mesurer les propriétés électriques d'un terrain afin de mieux le caractériser. Elle correspond pour l'essentiel à une application directe de la loi d'Ohm. (Wikipédia)

La loi d'Ohm est une loi physique permettant de relier l'intensité du courant électrique traversant un dipôle électrique à la tension à ses bornes. Elle illustre le fait que la différence de potentiel est proportionnelle au courant traversant la résistance et est donnée par la relation $U=R.I$, avec R=résistance du matériau (Ohm), U la tension entre les bornes en Volt (V), et I le courant en Ampère (A).

I.1 Caractéristiques d'un milieu naturel

Un terrain naturel est caractérisé par :

- la matrice qui correspond à la partie solide constituée par les minéraux possédant chacun leurs propriétés physiques propres ;
- la Porosité qui correspond au volume des vides exprimés en % ;
- la Saturation en fluides : eau plus ou moins salée, hydrocarbures, gaz, polluants, gaz, air.

I.2. Notions de résistivité et de conductibilité

Lorsqu'on envoie un courant continu (I) à l'aide d'une électrode ponctuelle A, l'écoulement se fait par des filets rectilignes appelés lignes de courant qui rayonnent autour de l'électrode d'injection. Cette propagation produit par la suite des variations de potentiel dans le sol à cause de sa résistance ohmique occasionnant la création d'équipotentiels perpendiculaires aux lignes de courant et qui sont captées par les électrodes (Figure 4).

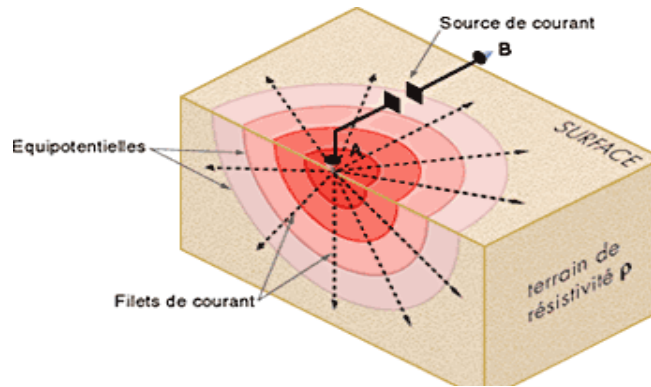


Figure 5 : Equipotentielles et des filets de courant pour une source unique

I.2.1. Notion de résistivité ρ

La résistivité ρ d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique. La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol (www-ig.unil.ch).

$$\rho = R \frac{\text{Section}}{\text{Longueur}} \text{ qui s'exprime en Ohm.m}$$

I.2.2. Notion de conductibilité électrique des roches

Dans un conducteur, le courant électrique peut s'écouler selon deux modes distincts :

- **La conductibilité solide** : le passage du courant se fait par déplacement d'électrons. On parle de conductibilité électronique ou métallique car c'est une conductibilité analogue à celle des métaux. C'est le cas de certains sulfures (pyrite, galène) , certains oxydes (magnétite, hématite) , ainsi que le graphite, l'or, l'argent, le platine etc.
- **La conductibilité liquide électrolytique** : dans ce cas, ce sont les ions qui transportent des charges sous l'effet du champ électrique et les roches conduisent le courant électrique grâce à l'eau qu'elles contiennent. La résistivité dépendra alors du mode de distribution de l'électrolyte, de sa quantité et de sa qualité c'est-à-dire de la quantité de sels dissous.

$$\sigma = G \frac{\text{Longueur}}{\text{Section}} = \frac{1}{\rho} \text{ qui s'exprime en (Ohm.m)}^{-1} \text{ ou Siemens/m}$$

I.3. Tomographie de résistivité

Une des limitations des sondages électriques vient du fait qu'ils ne prennent pas en compte les variations latérales de la résistivité du sous-sol. Les méthodes d'imagerie électrique 2D furent

mises au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil. Cette supposition est raisonnable pour beaucoup de corps géologiques allongés et dans ce cas la méthode pourra être appliquée. On suppose que la résistivité ne change pas dans la direction perpendiculaire au profil. Il faudra alors tenter de placer les profils perpendiculairement au corps à étudier ce qui nous permettra également de déterminer les vraies dimensions de ce corps.

I.4. Paramètres d'acquisition

Le tableau 1 montre les sites où ont été effectuées les mesures. L'emplacement des profils a été relevé avec un GPS à main Garmin sans correction RTK. La précision des coordonnées X, Y est acceptable, mais la précision de l'altitude n'est pas assez bonne. Ceci n'a pas impacté le traitement des données, car les sites d'étude sont quasi plats.

Tableau 1: Les paramètres des quatre sites à étudier

Sites	Epaisseur du Recouvrement	Teneurs en P_2O_5 (%)	Epaisseur de phosphate (m)
KDD030	Faible (10,7m)	-	0
KDD042	Importante (26,87m)	-	0
KDD054	Faible (12,87m)	-	0,78
KDD057	Faible (10,60m)	12.02	0,71

En somme nous avons un site sans présence de phosphate avec une profondeur du bedrock de calcaire faible (KDD030) et un site sans présence de phosphate avec une profondeur du bedrock de calcaire assez importante (KDD042). Deux sites où le bedrock est moins profond présentent des couches phosphatées (< 1 m d'épaisseur), KDD054 et KDD057, avec une teneur de 12,02 % en P_2O_5 dans le dernier cité.

Les profils de tomographie électrique ont été enregistrés en utilisant le dispositif de mesure Schlumberger illustré par la figure 5, plus sensible aux structures horizontales. Les géométries d'acquisition sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres géométriques des profils de tomographie électrique

Profils	Nombres d'électrodes	Espacements	Distance théoriques	Distances linéaires	Electrodes actives
KDD030	48	5 m	235 m	235 m	48
KDD042	48	5 m	235 m	235 m	48
KDD054	48	5 m	235 m	235 m	48
KDD057	72	2.5 m	177.5 m	177.5 m	48

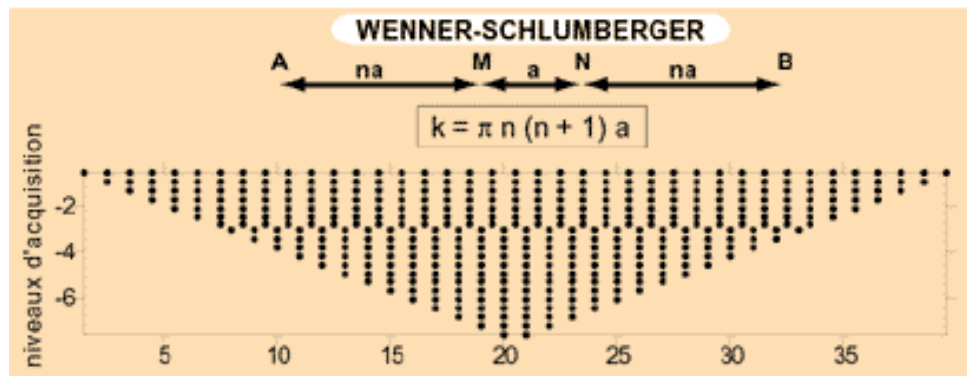


Figure 6 : Le dispositif Schlumberger utilisé en tomographie électrique (www-ig.unil.ch).

1.5. Acquisition

Les tomographies électriques ont été acquises avec un résistivimètre SYSCAL R1 plus 48 switch d'Iris Instruments. Il est constitué d'une unité centrale combinant les fonctions d'injection de courant et de mesure de la différence de potentiel engendrée.

Les électrodes sont reliées à cette unité par le biais de câbles multi électrodes branchés directement au dos de l'appareil. Les électrodes utilisées sont en acier d'un diamètre de 1 cm pour 40 cm de longueur. Elles étaient reliées aux câbles grâce à des connecteurs à pince de type Müller (Annexe 1).

➤ Préparation de la séquence

La séquence de mesure a été préparée à l'aide du logiciel Electre II (Iris Instruments).

L'utilisateur y spécifie différents paramètres :

- le type de câble multi électrode (le nombre de prises d'électrode pour chaque câble) ;
- le nombre d'électrodes ;
- l'espacement inter-électrodes ;

- le dispositif à utiliser (le Wenner- Schlumberger);
- les paramètres de la mesure (nombre de répétitions/stacks, durée d'injection, erreur acceptable, mode de mesure).

➤ Mise en place des électrodes et des câbles

Les électrodes sont plantées le long du profil aux emplacements définis par l'espacement inter-électrodes. Celles-ci doivent être enfoncées suffisamment pour assurer un bon contact avec le sol, en particulier si le sol est électriquement résistant (sol sec par exemple).

Les câbles multi électrodes sont déroulés en positionnant les prises au niveau de chaque électrode, tout en prenant soin d'arranger les longueurs de câble de façon à ce qu'elles ne gênent pas.

➤ Mise en route et lancement de la mesure

Une fois l'installation terminée, une vérification des connexions du dispositif de mesure et des résistances de prise est faite à l'aide d'une fonction du Syscal appelée RS-CHECK. Pour que la mesure puisse être réalisée, une résistance de prise inférieure à 5 KOhm est nécessaire. Le contact électrique entre les électrodes et le terrain était correct, en majorité sous 1.0 k Ohm et entre 1.0 et 3.0 kOhms à quelques positions spécifiques. Toutes les électrodes ont été arrosées à l'eau salée pour garantir ce bon contact.

Tableau 3 : Paramètres d'enregistrement des profils de tomographie électrique

Paramètres	KDD030, KDD042, KDD054	KDD057
Dispositifs	Schlumberger	Schlumberger
Niveaux d'acquisitions	25	25
Profondeurs d'investigation théoriques maximales	40 m	22 m
Nombres de mesures	565	565
Durées d'injection	500 ms	500 ms
Nombres de répétitions / mesures	3, 5 si déviation (q) > 2%	3, 5 si déviation (q) > 2%

Lors d'une mesure, l'appareil sélectionne un quadripôle électrique AMNB, injecte le courant et mesure la différence de potentiel engendrée. Cette procédure est répétée au moins trois fois afin de s'assurer que la valeur mesurée est la même à chaque fois (procédure de stacking). Le Syscal calcule l'écart type Q des mesures et l'affiche à l'écran pour chaque série de stack, ce

qui permet de renseigner sur la qualité des acquisitions. Les paramètres d'enregistrement des profils de tomographie électrique sont figurés dans le tableau 3.

Le nombre de stacks (minimum =3 et maximum =5) et la valeur minimale du paramètre Q (2%) ont été définis sur le terrain lors de la création de la séquence à l'aide du clavier du Syscal. La mesure est répétée autant de fois que le nombre minimal de stack, jusqu'à ce que Q atteigne la valeur fixée ($Q = 2\%$). Si cette valeur n'est pas atteinte, l'appareil réalise des stacks supplémentaires, jusqu'au nombre maximal défini.

Ainsi, une fois la mesure lancée, il est nécessaire de contrôler à l'écran, les valeurs du paramètre Q, afin qu'il reste proche de la valeur fixée lors de la définition de la séquence.

➤ **Fin de la mesure**

Une fois la mesure terminée, il est absolument nécessaire de contrôler la qualité des données. Cela se fait à l'aide d'un ordinateur, et permet de détecter d'éventuels problèmes ayant eu lieu au cours de la mesure (électrode malencontreusement débranchée, problème de transmission). Pour cela, les mesures doivent être transférées de la mémoire du Syscal vers l'ordinateur et vérifiées à l'aide du logiciel PROSYS (Iris Instruments).

II. LA SISMIQUE REFRACTION

La méthode de sismique réfraction est une méthode géophysique qui a été développée pour l'étude du sous-sol à faible profondeur. Elle comprend l'acquisition de données de sismique réfraction, suivie du traitement des données et – pour notre étude – de l'interprétation de la tomographie réalisée. (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

II.1. Principes généraux de la transmission des ondes

II.1.1. Ondes de volumes

La théorie de l'élasticité montre que sous l'effet d'une contrainte (ébranlement) les solides élastiques homogènes et isotropes subissent une déformation correspondant alors à deux types principaux d'ondes pouvant se déplacer soit longitudinalement (ondes de compression ou ondes P, vitesses V_p), soit transversalement (ondes de cisaillement ou ondes S, vitesse V_s). Le déplacement des ondes est illustré par la figure 6.

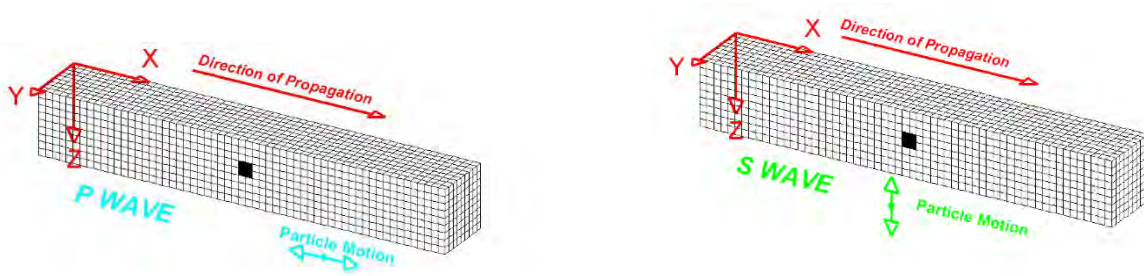


Figure 7 : Déplacement d'ondes P et S. (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

On rappellera que :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Le paramètre ρ étant la densité, les deux coefficients de Lamé λ et μ sont des paramètres caractérisant les propriétés élastiques du matériau mais ne sont pas directement accessibles par mesure expérimentale.

I.1.2. Ondes de surfaces

Dans la réalité, le solide où se propagent les ondes n'est jamais fini. Il existe alors deux autres types d'ondes qualifiées d'ondes de surface (figure 7) :

- Ondes de Rayleigh se déplaçant dans le plan vertical de propagation et possédant à la fois une composante longitudinale et une composante transversale (assimilable à la houle),
- Ondes de love qui n'existent que si le milieu n'est pas homogène mais formés de couches superposées. Le mouvement n'a qu'une composante horizontale. Il faut donc disposer de capteurs horizontaux pour détecter ce type d'ondes.

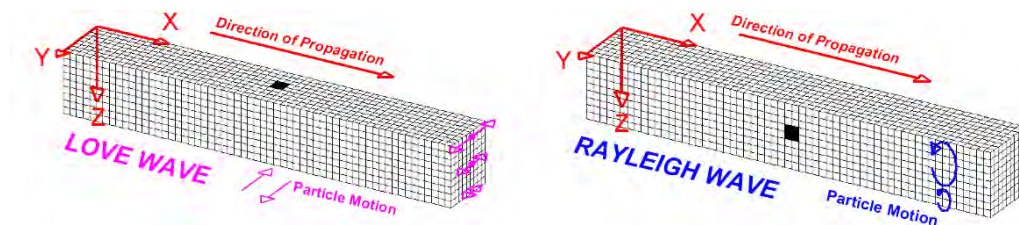


Figure 8 : Déplacement des ondes de surfaces. (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

II.2. Notions de bases

Rappelons sous la forme d'une simple énumération, les notions de base nécessaires à une bonne compréhension des interprétations et des applications de la sismique réfraction.

Les vitesses sismiques étudiées en réfraction sont les vitesses de déplacement de l'onde de compression P qui a la particularité d'être la plus rapide. Cette onde arrivant toujours en premier sur les capteurs est ainsi aisément reconnaissable.

La convention veut qu'on représente ces ondes par les rayons sismiques - qui leur sont orthogonaux - parce qu'ils se propagent en particulier comme des rayons lumineux (Figure 8.).

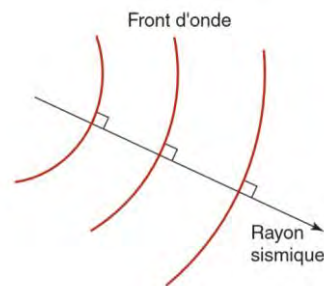


Figure 9 : Représentation du rayon sismique (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

Les rayons sismiques ainsi définis suivent les mêmes lois que les rayons lumineux, en particulier les lois de la réflexion et bien sûr de la réfraction (lois de Descartes) (figure 9).

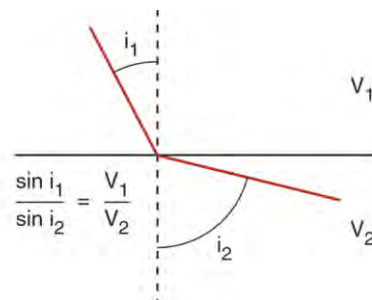


Figure 10 : Loi de Snell-Descartes (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

Une des particularités des lois de l'optique exploitée par la sismique réfraction est **la réfraction totale** qui est liée au fait que les ondes sismiques peuvent se propager horizontalement au toit d'une couche plus rapide, à conditions que les rayons sismiques l'atteignent sous un angle d'incidence égale à l'**angle de réfraction limite** λ , ceci avant de remonter ensuite vers la surface avec le même angle d'émergence. Cette propriété se conçoit plus facilement si l'on considère non plus le rayon rasant, mais le tronçon de front d'onde qui se propage perpendiculairement à la surface de séparation des deux milieux.

Cette dernière propriété est illustrée sur la figure 10 où λ est l'angle de réfraction limite atteint lorsque i_2 est égale à $\pi/2$ et tel que $\sin \lambda = V_1/V_2$.

II.3. Propagation dans les milieux discontinus : Cas d'une bicouche

Calcul de l'équation donnant le temps d'arrivée de la réfractée première en fonction de la distance X entre le point d'émission et le récepteur dans le cas d'une bicouche composée d'une première couche lente de vitesse V_1 et d'épaisseur finie, reposant sur une couche d'épaisseur infinie de vitesse $V_2 > V_1$. Le graphique suivant « temps-distance » est appelé hodochrones ou dromochronique (Figure 11).

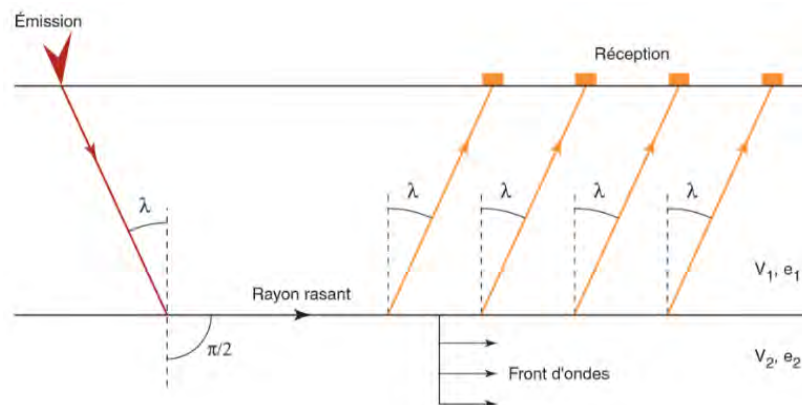


Figure 11 : Schéma de principe de la réfraction totale (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

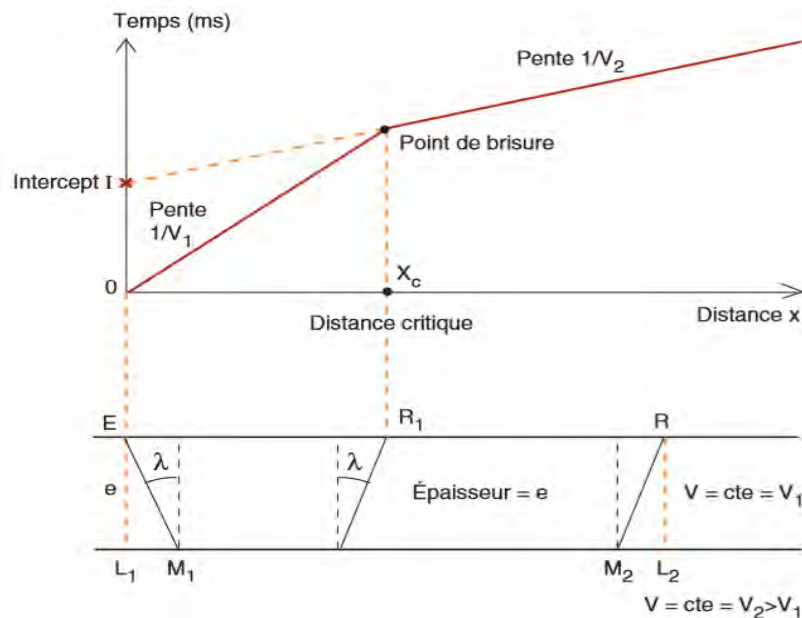


Figure 12: Cas d'une bicouche (GuideTechnique-LCPC-AGAP2)

L'expression $T = \frac{x}{v_2} + \frac{2e}{v_1} \cos \lambda$ est l'équation de la droite de pente $1/v_2$

et d'ordonnée à l'origine, ou intercept, $I = \frac{2e}{v_1} \cos \lambda$.

Sur le graphique « temps-distance », les droite de pentes $1/v_2$ et $1/v_1$ se croisent en un point appelé point de brisure. Pour les réceptions à gauche de ce point de brisure, le temps du trajet direct est inférieure au temps du trajet réfracté et inversement pour les réceptions situées à droite du point de brisure.

➤ **Calcul de l'épaisseur de la couche traversée**

La branche de dromochronique permet de définir les vitesses V_1 et V_2 , inverse des pentes des droites, et par conséquent la valeur de λ , tel que $\sin \lambda = V_1/V_2$. L'intercept I permet alors de calculer l'épaisseur e de la couche.

$$e = \frac{I \cdot V_1}{2 \cdot \cos \lambda}$$

➤ **Définition du délai sismique**

Le délai sismique est par définition égal à la moitié de l'intercept.

Dans le cas présent, le délai du réfracteur V_2 est égal à $(e/V_1) \cos \lambda$. Cette notion de délai sismique est très importante et pourra être étendue à tous les schémas quel que soit le nombre de couches.

II.4. Tomographie par sismique réfraction

La tomographie par sismique réfraction, également connue sous le nom de **tomographie à gradient de vitesse**, utilise comme données les temps de parcours des premières arrivées de l'onde sismique P. Elle fournit des profils bidimensionnels, y compris la profondeur et la distance, qui ont simplifié la caractérisation de volumes relativement importants du sous-sol.

La méthode de tomographie par réfraction sismique est un moyen d'obtenir des informations généralisées sur la subsurface pour la caractérisation géologique d'une grande zone. En effectuant une tomographie par réfraction sismique, la structure du substratum rocheux, la distribution des vitesses et la profondeur des couches sous-jacentes peuvent être obtenues de manière plus détaillée.

Pour ce projet de faible profondeur une masse de 5 kg a été utilisé comme source car elle fournit une énergie suffisante dans cet environnement tout en garantissant un rapport signal / bruit optimal et une profondeur d'investigation correspondant au cahier des charges de l'étude.

Le tableau 4 récapitule la géométrie d'acquisition et les paramètres d'enregistrement des profils de sismique réfraction.

Tableau 4 : Géométrie et paramètres d'enregistrement des profils de sismique réfraction

Paramètre	KDD030, KDD042	KDD054, KDD057
Géophones	24, 4.5 Hz single	24, 4.5 Hz single
Traces actives	24	24
Inter-trace	5 m	2.5 m
Inter-tir / tirs	15 m / 11	10 m / 30 (2 x 15)
Source	Masse 5 kg	Masse 5 kg
Durée d'enregistrement	2 s	2 s
Echantillonnage	0.5 ms	0.5 ms

II.5. Acquisition

Les données sismiques ont été enregistrées sur un système Geode (Geometrics) avec 24 canaux actifs espacés au maximum de 5 mètres. Ce système d'acquisition permet de mesurer et d'enregistrer le signal sismique capté par les géophones. Le matériel d'acquisition est présenté dans l'annexe 2.

➤ Mise en place du dispositif d'acquisition

Le dispositif ci-après schématisé par la figure 12, a été adopté pour les mesures.

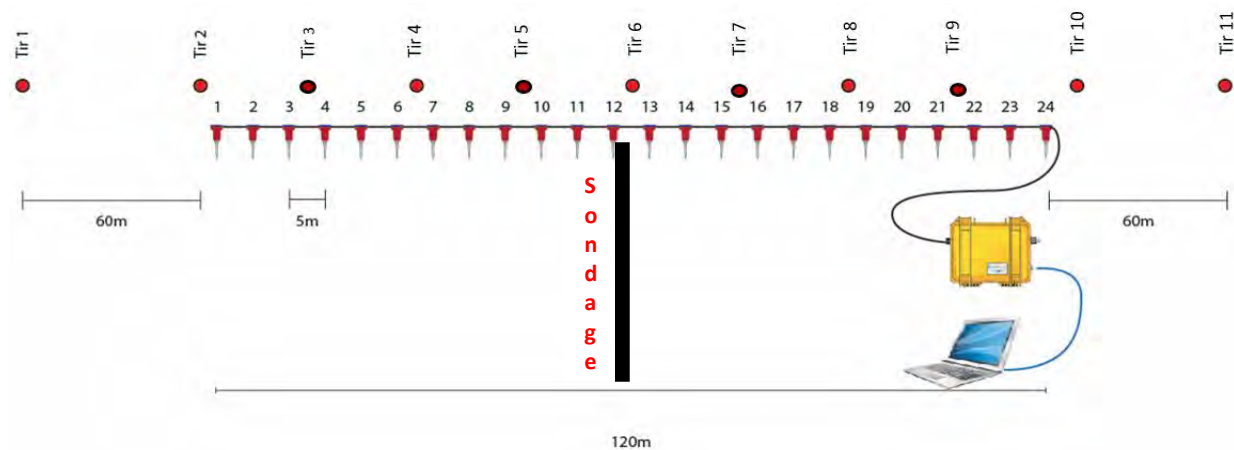


Figure 13 : Dispositif d'acquisition 24 traces-11 tirs

Les géophones sont plantées le long du profil aux emplacements définis par l'espacement inter-géophones.

Les géophones de fréquence 4.5 Hz ont été enterrés pour diminuer au maximum le bruit du vent sur les mesures et sont connectés à la géode par le biais d'une flute sismique branché directement au sismographe. Le panneau ausculté est généralement situé à la verticale du dispositif.

Sur le dispositif d'acquisition 24 traces-11 tirs, les tirs 1 et 11 extérieurs au dispositif sont appelés tirs offset ou tirs lointains. Les tirs « offset » sont implantés à une distance telle que la propagation enregistrée sur la totalité des capteurs du dispositif corresponde à une réfraction totale sur le substratum sismique. Les tirs 2 et 10 sont appelés tirs en bout et le tir 6 : tir au centre. Les tirs restants étant des tirs intermédiaires.

➤ **Lancement de la mesure**

Afin d'effectuer la tomographie par réfraction sismique pendant l'interprétation, un nombre suffisant de tir est exécuté pour obtenir des données sismiques de haute qualité. Il a été nécessaire d'exploiter cette ligne de vingt-quatre capteurs par onze à quinze tirs effectués avec la masse de 5 kg tous les 3 ou 4 géophones, soit tous les 10 ou 15 m en fonction de l'espacement inter-géophone.

Pour les profils mesurés sur les sondages KDD054 et KDD057, la longueur finale de 120 m a été obtenue en réalisant un profil « composite » de deux profils de 60 m et en effectuant 2 fois les tirs que demande un profil de 120 m, une fois pour chaque portion de profil de 60 m déployée (0 – 60 m déployé, 15 tirs effectués de -30 à 150 m, 60 – 120 m déployé, 15 mêmes tirs effectués -30 à 150 m).

L'emplacement des profils a été relevé avec un GPS à main Garmin sans correction RTK. La précision des coordonnées X, Y est acceptable, mais la précision de l'altitude n'est pas assez bonne. Ceci n'a pas impacté le traitement des données, car les sites d'étude sont quasi plats. Si des mesures sont effectuées dans le futur dans des environnements plus vallonnés, il faudra améliorer le relevé de l'altitude, en utilisant un distancemètre laser par exemple. Les coordonnées sont fournies dans le système de coordonnées international UTM WGS 84 zone 28 nord.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATION

Dans ce chapitre, sont décrits les traitements des données acquises respectivement par les méthodes de tomographie de résistivité électrique et de sismique réfraction. Les résultats obtenus notamment les sections sismiques et électriques, sont présentés et une interprétation de ces résultats s'en est suivie.

I. RESULTATS

I.1. Traitement et résultats de la tomographie électrique

Une fois l'acquisition terminée, les données sont transférées du résistivimètre à l'ordinateur par l'intermédiaire du logiciel PROSYS II pour effectuer un contrôle qualité. Un premier tri des données est effectué en fonction des paramètres que sont la déviation Q, l'injection I et la Résistivité ρ .

Les mesures présentant des valeurs aberrantes sur ces paramètres sont éliminées, considérées comme fausses ou non fiables. La géométrie correcte du profil est ensuite assignée aux données. Pour terminer, un deuxième tri des données est effectué pour éliminer visuellement les points incohérents restant, avant de procéder à une inversion par moindres carrés du bloc entier avec le logiciel Res2DInv (Figure 13).

La qualité des données est fluctuante entre les profils, avec plus de mesures éliminées après le traitement pour les profils KDD030 et KDD054. Ceci se ressent au niveau des erreurs résiduelles d'inversion qui sont plus importantes pour ces deux profils (Tableau 5). Néanmoins, les modèles d'inversion sont réalistes.

Profil	Dispositif	Nombre d'itérations / inversion	Erreur résiduelle d'inversion (%)
KDD030	Schlumberger	5	17.6
KDD042	Schlumberger	5	6.8
KDD054	Schlumberger	5	20.6
KDD057	Schlumberger	5	14.1

Tableau 5 : Qualité des données et des inversions des profils de tomographie électrique

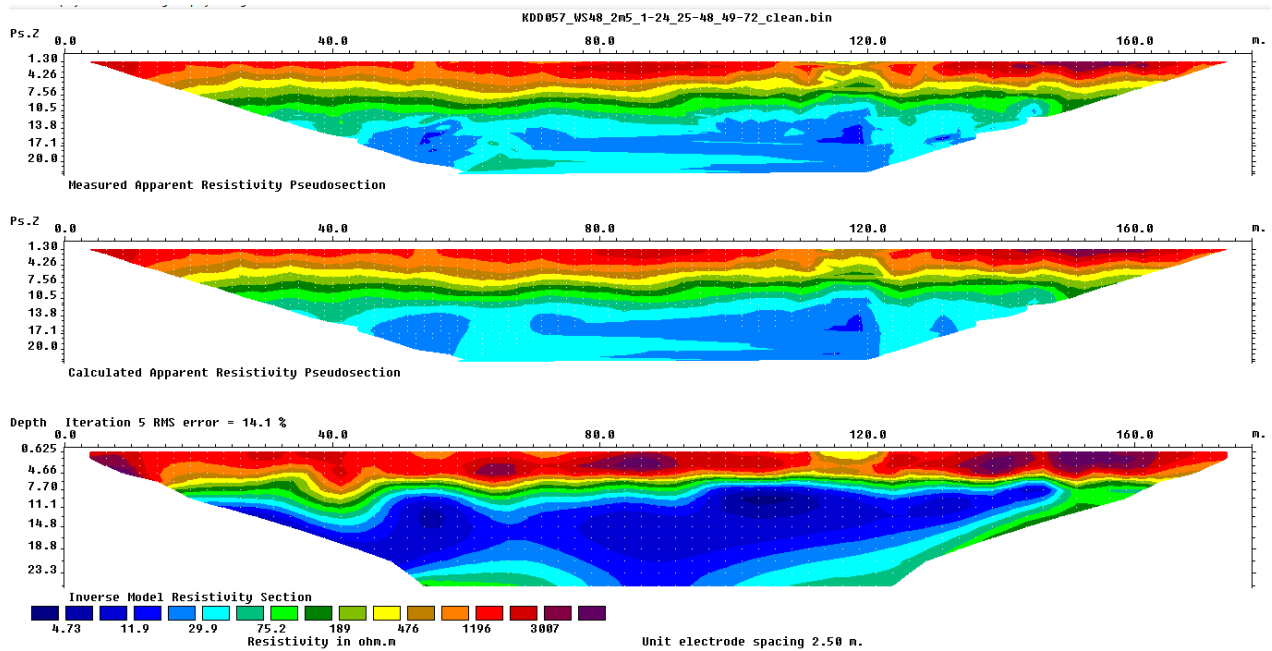


Figure 14 : Résultat de l'inversion par RES2DINV : Exemple du KDD057

I.2. Traitement et résultats de la sismique réfraction

Les données, enregistrées au format SEG2, ont été traitées à l'aide du logiciel Geogiga Seismic Pro (Geogiga Technology Corp.). Le traitement suivant a été appliqué afin de produire les sections présentées dans la suite du présent document :

La première étape a consisté à pointer avec précision les premières arrivées du signal sismique (Fig. 14), en utilisant le programme Winsism, pour chaque tir enregistré afin d'obtenir des dromochroniques (Travel Time Curves) qui est la base de toute l'interprétation. Le fichier dromochronique créé est imprimé afin de vérifier la dromochronique. Les erreurs de pointage qui apparaissent sont alors corrigées en vérifiant les enregistrements de terrains.

Le faible niveau de bruit ambiant et la source adaptée nous ont permis d'enregistrer des données de qualité pour l'objectif fixé. Le pointage des premières arrivées s'est effectué correctement sur chaque tir interne et en bout, légèrement plus difficilement sur les tirs offset. La figure 13 montre un exemple de tir interne effectué sur le profil KDD042. Les traits rouges représentent le pointage de la première arrivée.

La deuxième étape consiste à analyser les dromochroniques générées (figure 15). Ces courbes ont été corrigées et vérifiées pour l'estimation exacte de la vitesse de l'onde P.

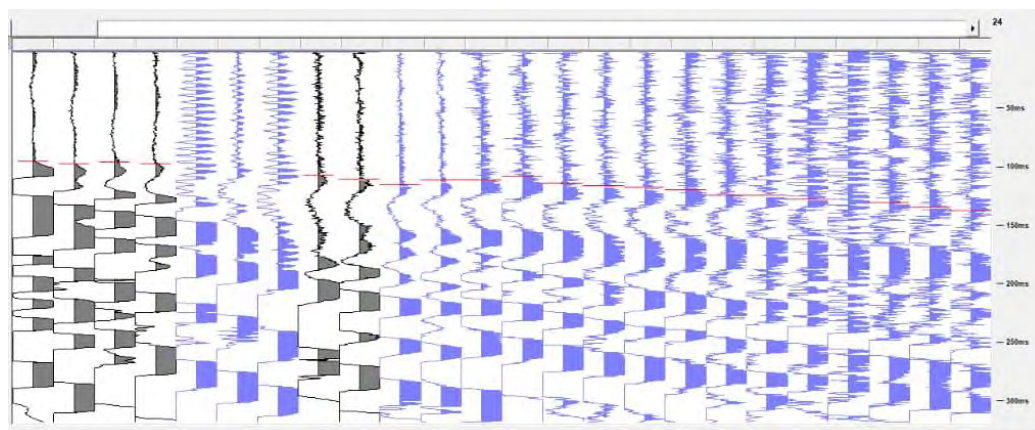


Figure 15 : Film sismique : cas du KDD042

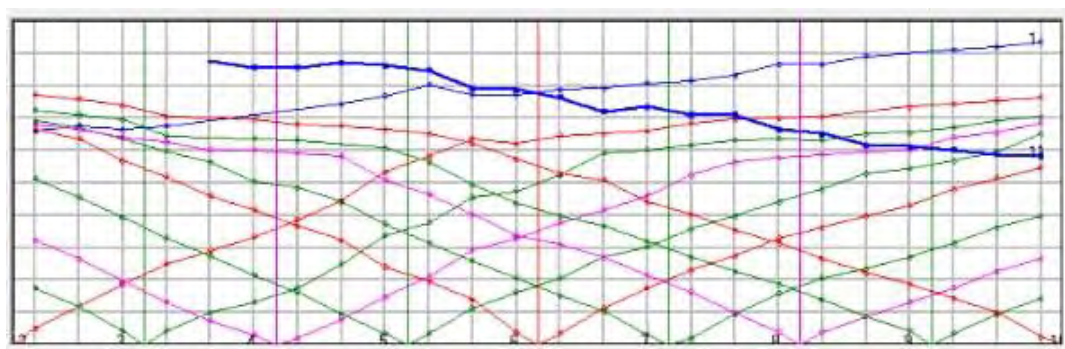


Figure 16 : Dromochroniques déterminées pour le profil KDD057 de sismique réfraction. Deux milieux sont mis en évidence.

Tableau 6: Correspondance entre les descriptions lithostratigraphiques utilisées dans les relevés de forage et les abréviations utilisées sur les profils géophysiques.

Abréviations	Lithologies
S	Sand (Sable)
SCF	Sandy Clayed Ferruginous (Sable argileux ferrugineux)
SCP	Sandy Clayed with Phosphate (Sable argileux phosphaté)
SCPL	Sandy Clayed with Phosphate and Limestone (Sable argileux phosphaté et calcaire)
CS	Clay Sand (Argile sableuse)
L	Limestone (Calcaire)
LDP	Limestone with disseminated Phosphate (Calcaire à phosphate disséminé)

La troisième étape consiste à modéliser les profils à partir de la vitesse sismique observée par une méthode d'inversion tomographique. Cette méthode débute avec un modèle de vitesse initial et trace itérativement les rayons à travers le modèle dans le but de minimiser le RMS error entre les temps de parcours observés et calculés. Après chaque itération, le modèle de

vitesse est mis à jour et les premières arrivées théoriques sont recalculées. Séquentiellement, l'écart entre les premières arrivées observées et calculées devient plus faible.

Ensuite, la création de modèles finaux de vitesse représentées sous forme 2D. Ces modèles ont été convertis en un modèle en couches pour mieux représenter la nature des couches géologiques.

Les modèles tomographiques et les modèles en couche sont présentés, ils sont bien concordants entre eux. Le tableau 6 donne la correspondance entre les descriptions lithostratigraphiques utilisées dans les relevés de forage fournis et les abréviations utilisées sur les profils géophysiques. Les profils bruts de ces modèles sont présentés par les figures 17, 18, 19 et 20. Ils sont exprimés en vitesse onde P (m/s).

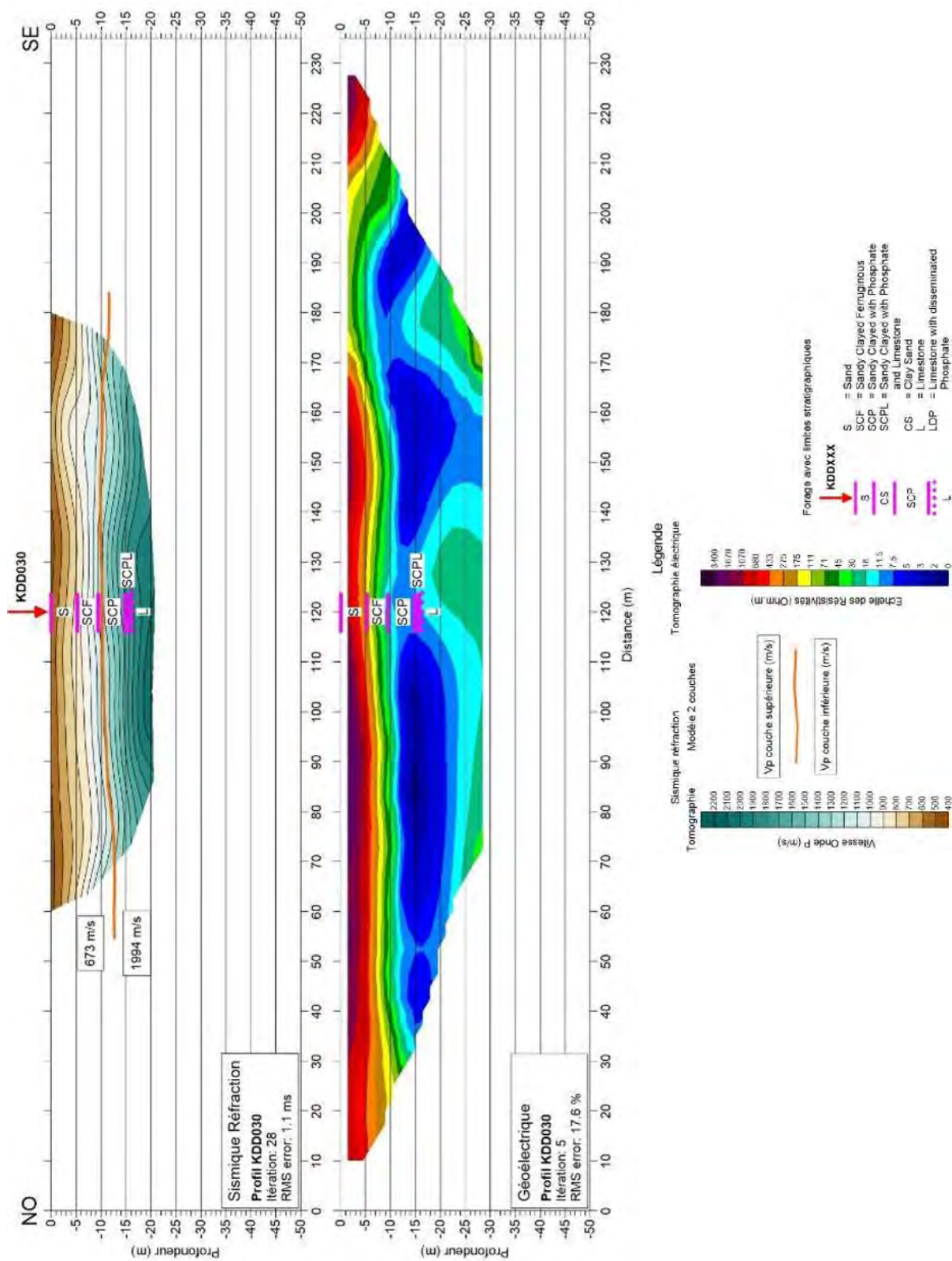


Figure 17 : Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD030

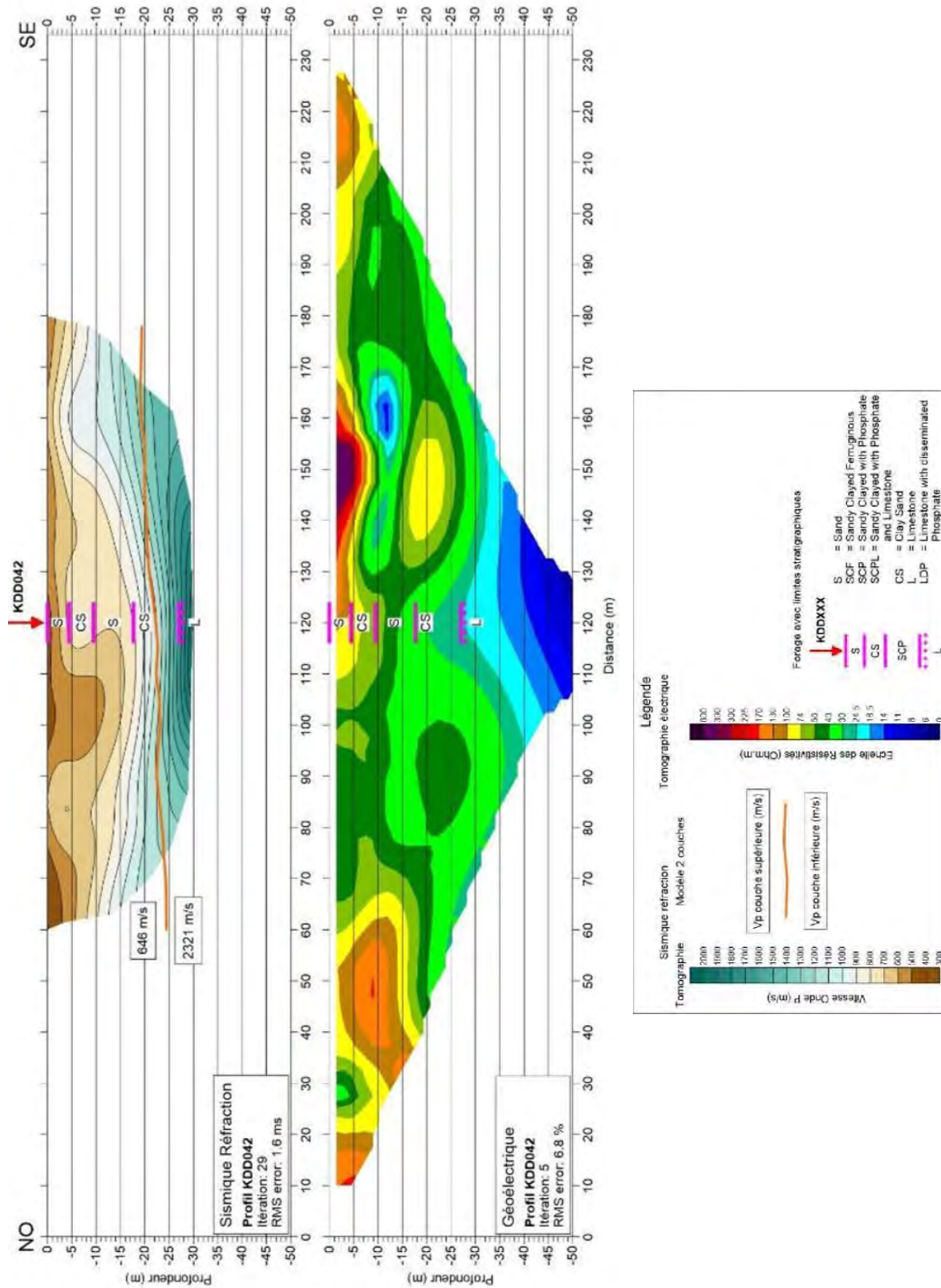
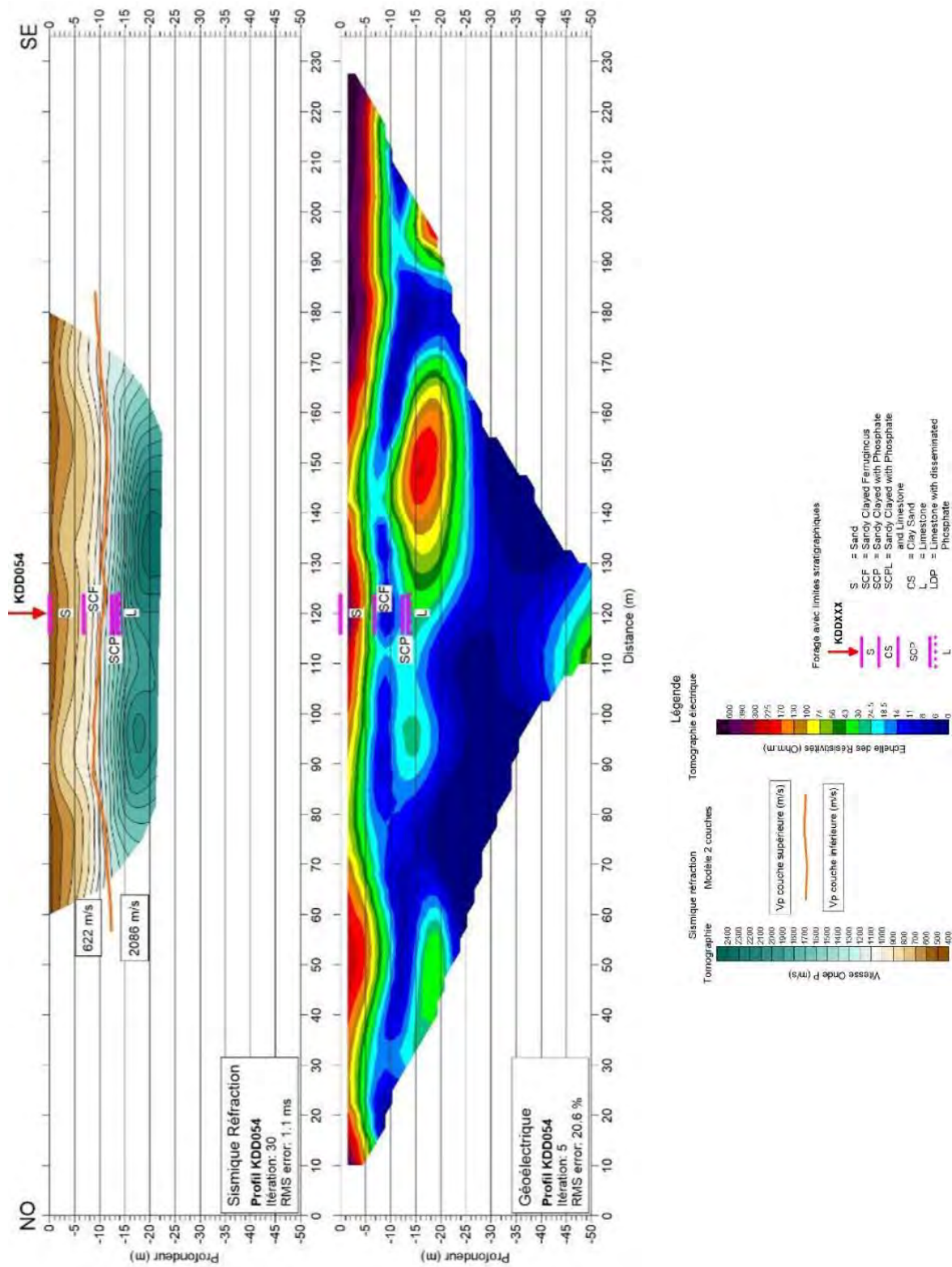


Figure 18 : Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD042



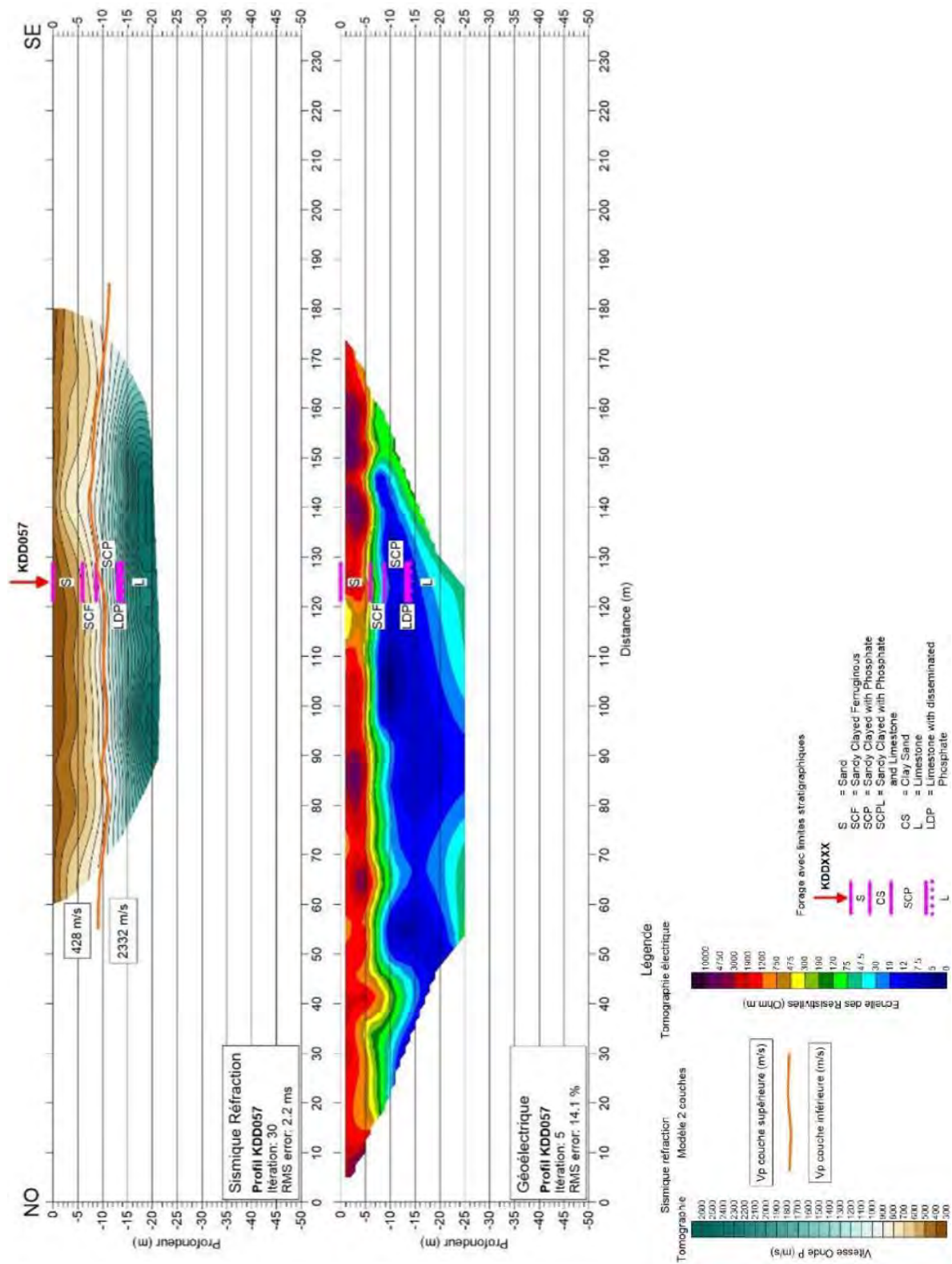


Figure 20 : Profils bruts de la tomographie électrique et sismique du site KDD057

II. INTERPRETATION

L'interprétation est faite sur le modèle de tomographie électrique (Ohm/m) où figure le modèle de sismique réfraction en couche (ligne orange continue, m/s). Sur les profils interprétés (figures 21, 22, 23 et 24), les limites stratigraphiques données par les sondages géologiques (annexe 3) sont figurées à la même échelle verticale à l'aplomb du sondage par des traits roses.

II.1. Interprétions par méthode

II.1.1. La tomographie électrique

La comparaison des données des sondages géologiques et des profils de tomographie électrique permet les interprétations suivantes :

- 1) La couche superficielle de sable sec est toujours la couche la plus résistante relevée sur un site. Sa résistivité s'étend de 75 à 3000 Ohm.m. Son épaisseur est variable d'un site à l'autre, mais également le long d'un profil ;
- 2) La distinction entre les autres formations est plus compliquée, notamment entre SCF et SCP (conf. KDD057), car leurs plages de résistivité respectives se chevauchent. Néanmoins, des caractéristiques électriques spécifiques à chacune peuvent être relevées :
 - ❖ Quand présents, les SCP représentent la couche la plus conductrice. Leur résistivité est inférieure à 30 Ohm.m ;
 - ❖ Les SCF semblent être relativement plus résistants quand les SCP existent.
- 3) Le toit des calcaire (limestone) est très conducteur ($\rho < 30$ Ohm.m), ils peuvent devenir légèrement plus résistants avec la profondeur (KDD042).

Les tomographies électriques n'arrivent pas à déterminer la limite exacte entre SCP et limestone, leur plage de résistivité se chevauchant également. Cependant, le toit des SCP étant très conducteur, comme les limestone ($\rho < 30$ Ohm.m), les tomographies électriques permettent d'estimer si l'épaisseur du remplissage stérile (Sand + SCF) sus-jacent est importante ou pas.

II.1.2. La sismique réfraction

1. Les profils sismiques, autant la tomographie que le modèle en couche montrent un modèle assez simple à deux couches : une couche lente superficielle (< 700 m/s) et une couche plus rapide sous-jacente (> 1900 m/s).
2. En comparant les résultats des profils de sismique réfraction, notamment le modèle en couche, avec les données des sondages géologiques, il s'avère que les ondes se réfractent :
 - soit sur le toit des SCP s'ils existent (KDD057) ;
 - soit au sein ou à la base des SCF (KDD054, KDD030) ;
 - soit dans les CS (KD0042).

Les SCP constituant une première interface pour la méthode de sismique réfraction, cette dernière pourrait servir à déterminer l'**épaisseur de recouvrement stérile**.

La réfraction soit au sein ou à la base des SCF soit dans les CS révèle que la profondeur du bedrock de calcaire ne peut être définie par la sismique réfraction.



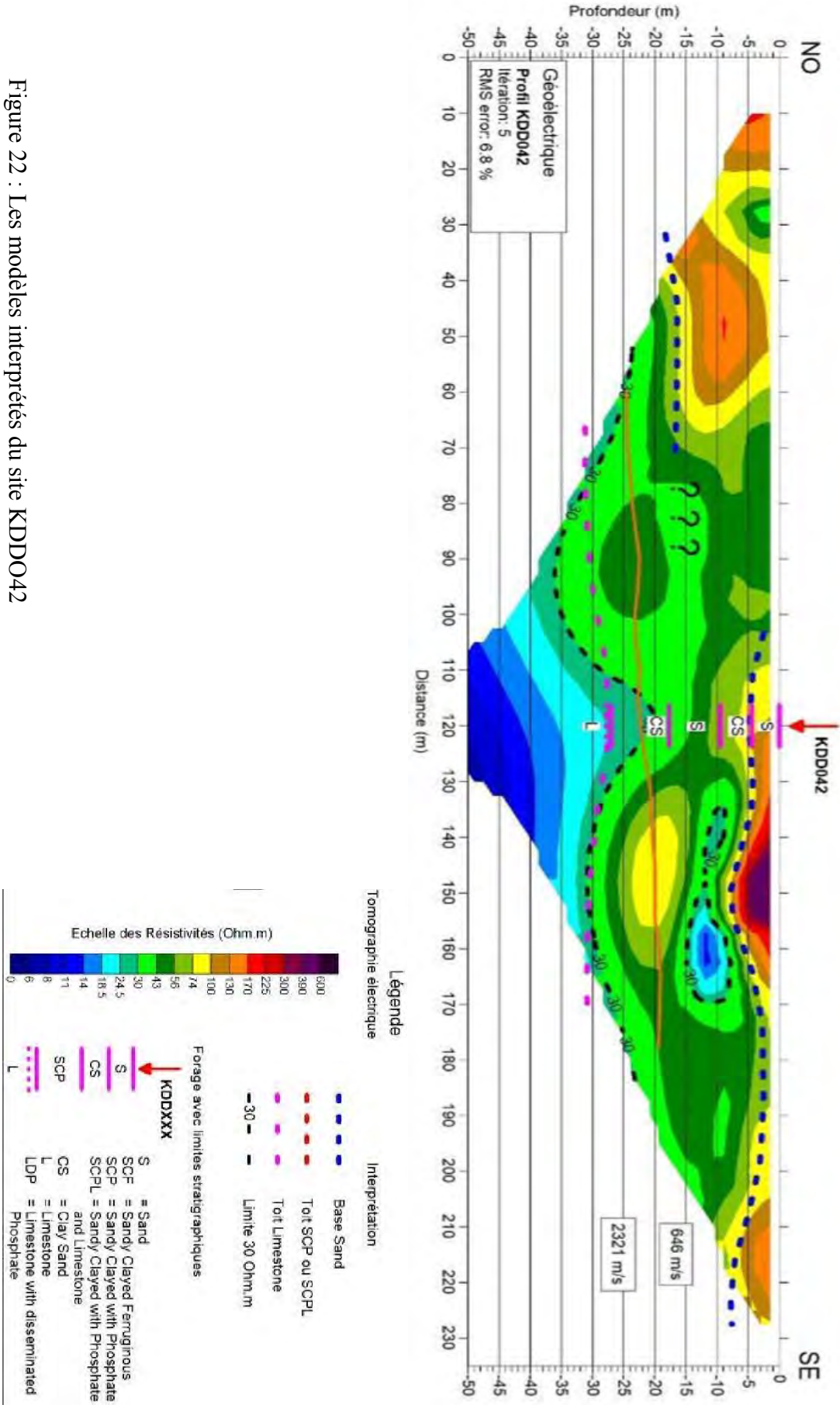
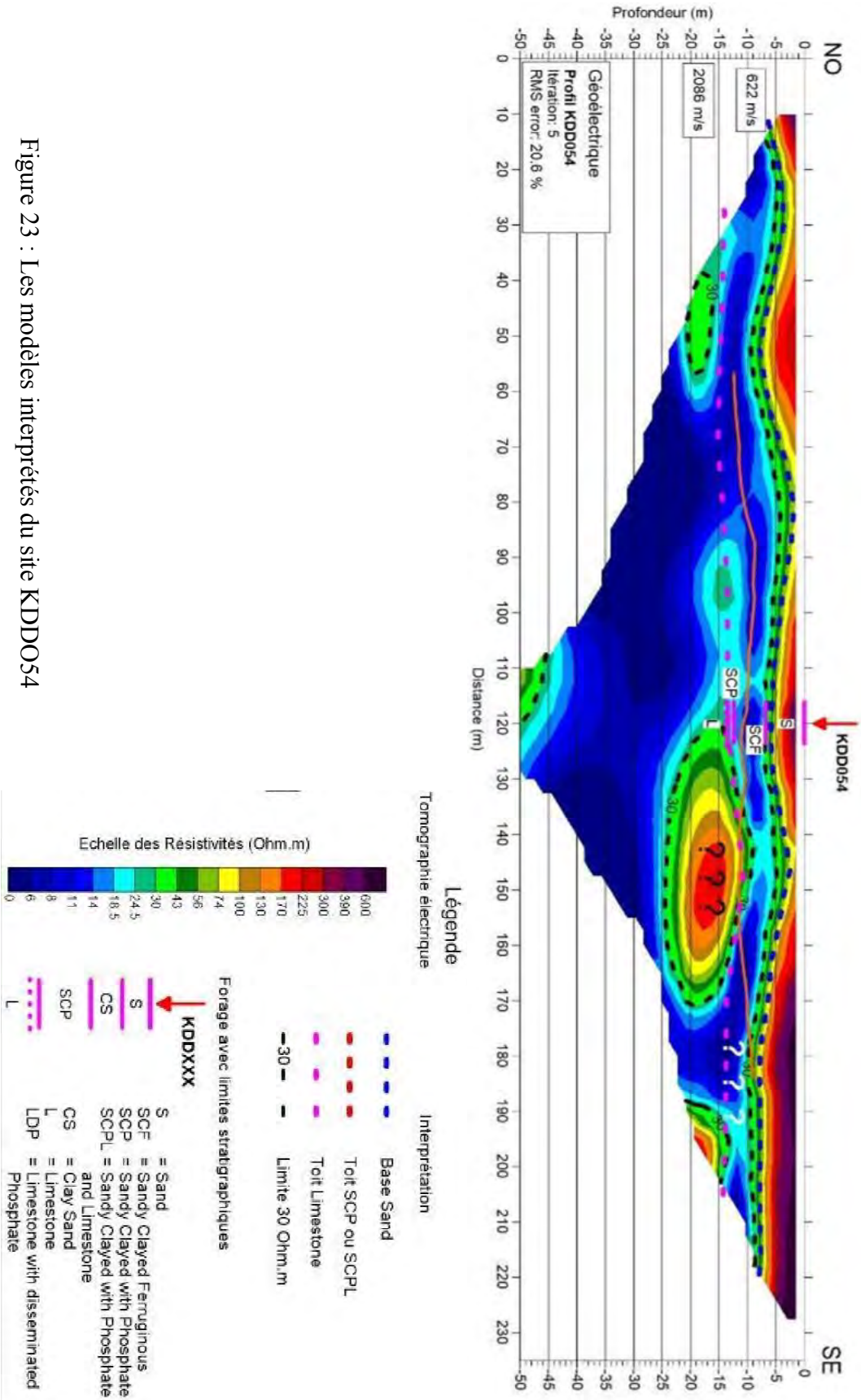


Figure 22 : Les modèles interprétés du site KDD042





II.2. Interprétation conjointe

- ❖ En observant le profil acquis sur le site où une couche de phosphate a été détectée par les sondages géologiques (KDD057 avec 12.02% de P_2O_5), il est intéressant de constater que les ondes P de la sismique se réfractent sur le toit des SCP, ceux-ci ont donc une vitesse rapide comme les limestone, alors que les stériles (SCF et Sand) ont une vitesse lente. Cette limite correspond aussi assez bien pour ce profil à la valeur de résistivité de 30 Ohm.m. Les SCF ont une résistivité supérieure à 30 Ohm.m, alors que pour les SCP elle est inférieure.
- ❖ Pour le site KDD054, la réfraction se fait dans les SCF ou à leur base. Là, la résistivité des SCF est plus basse ($\rho < 30$ Ohm.m) que lorsqu'il y a une couche de phosphate SCP en-dessous.

Il semble donc qu'il y ait une différence de signature géophysique si une couche de phosphate est présente ou non.

En suivant cette analyse, une hypothèse survient sur le profil KDD057.

- KDD057 : la remontée de la couche conductrice entre 90 et 120 m sur l'axe des abscisses alors que la réfraction reste plate pourrait signifier que la couche de phosphate disparaît sur cette portion de profil. Ce qui est possible car la couche est lenticulaire.

Le tableau 7 présente brièvement les principales conclusions de l'étude.

Problématique	Possibilité	Méthode à appliquer
Toit du bedrock	Non	Aucune
Recouvrement sableux (si SCP présent, équivaut à déterminer l'épaisseur de recouvrement stérile)	Estimation possible	Sismique réfraction de préférence
Présence / absence de phosphate	Estimation de présence possible	Combinaison indispensable (Condition : absence d'une couche sismiquement lente et électriquement conductrice)
Epaisseur de Phosphate	Non	Aucune

Tableau 7 : Résumé des conclusions principales.

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

L'application de ces méthodes géophysiques serait un atout dans le cadre de la prospection du phosphate au Sénégal, particulièrement dans le permis de recherche de Coki. En effet, les signatures géophysiques de l'environnement géologique de la zone et notamment des couches de minéralisation des phosphates ont pu être caractérisées, et ce malgré une insuffisance relative des données.

Aucune des deux méthodes utilisées ne distingue univoquement le toit du bedrock de calcaire, par contre toutes deux permettent d'estimer l'épaisseur de recouvrement stérile. Par exemple dans notre zone, estimer si le recouvrement est profond de 10 mètres (KDD030, KDD054, KDD057) ou 25 mètres (KDD042).

Une signature géophysique des SCP semble sortir des mesures géophysiques effectuées. Cette couche est sismiquement relativement rapide (> 1900 m/s) et électriquement conductrice ($\rho < 30$ Ohm.m).

La couche stérile, essentiellement SCF semble toujours être sismiquement lente (< 700 m/s), par contre elle peut être électriquement conductrice ($\rho < 30$ Ohm.m) (KDD054) ou relativement résistante ($\rho > 30$ Ohm.m) (KDD030 et KDD057).

A la suite de cette combinaison des deux méthodes, les déductions suivantes sont émises quant à sa pertinence (Tableau 7) :

- Pour estimer l'épaisseur de recouvrement sableux, l'utilisation d'une seule méthode est possible, l'utilisation des deux serait une assurance supplémentaire. Si une seule méthode doit être mise en œuvre, la sismique réfraction pour sa rapidité devrait être privilégiée.
- Pour estimer la présence ou l'absence de couche de phosphate SCP, la combinaison des deux méthodes semble indispensable. En effet, la réfraction se produit soit dans les SCF (stériles), soit à leur base qui semble correspondre à ce moment-là au toit des SCP. Il n'y a pas de possibilité de distinguer ces deux cas avec la sismique réfraction seulement.
- Par contre, les SCF stériles semblent avoir une signature électrique différente en présence de la couche de phosphate SCP. Si cette dernière existe, les SCF sont relativement résistants ($\rho > 30$ Ohm.m, KDD030 et KDD057), s'il n'y a pas de phosphate, les SCF sont conducteurs (KDD054).

La signature géophysique de l'absence ou de la présence de phosphate semble donc être la présence ou l'absence d'une couche sismiquement lente (< 700 m/s) et électriquement

conductrice ($\rho < 30 \text{ Ohm.m}$). Si une couche lente et conductrice est observée sur les profils, il y a peu de chance de trouver des phosphates en-dessous. Si la couche lente et conductrice n'existe pas, une couche de phosphate sous la limite de la réfraction existe certainement.

Comme il n'est pas possible de définir avec précision le toit du bedrock de calcaire, l'épaisseur de la couche de phosphate devient impossible à estimer par la géophysique. Cependant, cette méthode consistant à combiner les mesures de sismique réfraction et de tomographie électrique peut déjà être appliquée pour prospector d'autres concessions au contexte géologique similaire, notamment pour estimer l'épaisseur de remplissage stérile (le recouvrement sus-jacent).

Tous ces éléments intéressants devront être précisés par d'autres efforts d'exploration car, rappelons-le, ces observations sont basées sur l'étude de 4 sites de la concession de Coki dont un seul détenait une teneur de P_2O_5 analysable avec moins de 1 mètre d'épaisseur. Ces hypothèses pourraient être plus robustes en renforçant leur valeur statistique. Dans cette optique la présente étude fait la recommandation suivante :

Recommandation : L'acquisition de données, toujours avec la combinaison des deux méthodes, dans une zone comme ICS où les épaisseurs et teneurs en phosphate sont très considérables.

En effet, les signatures géophysiques qui seront recueillis, propres aux phosphates, pourraient servir de guide de prospection à la fois pour les zones où les prospections sont en cours, notamment COKI, ou pour de futures zones de prospection de phosphate.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Agence nationale de la statistique et de la démographie-Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Louga (2015). Rapport : situation économique et sociale régionale 2013. 07 pages
2. Agence nationale de la statistique et de la démographie (2018). Rapport : situation économique et sociale du Sénégal en 2015. 16 pages
3. Monciardini M. (avec Pascal M.) (1966) : Recherche de Phosphate – Rapport Complémentaire. Le phosphate de chaux au Sénégal : synthèse des résultats acquis, études paléogéographique et essai prévisionnel. BRGM- DAK-66-A8 et DMG, 37 pages.
4. BPS (Bureau Pédologie du Sénégal) (1993). Rapport : Etude semi détaillée des sols de Louga. 118 pages
5. ROGER J., NOËL B.J., BARUSSEAU J.P., SERRANO O., NEHLIG P., DUVAIL C. (2009a) – Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 61 pages.
6. Dabo B., Diagne E. (GEOTER Sénégal) et R. Sagna (DMG) – Rapport : Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/200 000, feuilles de Saint-Louis - Dagana, Podor - Saldé, Matam – Semmé. 55 pages
7. Prian J.P., (2014) Phosphate deposits of the Senegal-Mauritania-Guinea Basin (West Africa) : A review. 10 pages
8. DIOUF S., (Janvier 1995). Application de la géophysique (électrique et sismique). D.E.A de géologie appliquée mention hydrogéologie. 154 pages
9. Chino A. (1962) : Sédimentation phosphatée au Sénégal. Les phosphates de chaux de la rive gauche du fleuve Sénégal et de la partie Nord orientale de l'anticlinal de Dahra. DAK 62- A19, 32 pages.
10. MAGNIN O., BERTRAND Y., (2005) –Guide sismique réfraction - les Cahiers de l'AGAP n°2. 96 pages
11. NDIAYE A.A. (2018). Rapport annuel : Permis de recherche de phosphate de chaux et substances connexes (région de Louga) délivré à CHALLENGER NORD-SUD INTERNATIONAL-S.A.S. 40 pages

12. NDIAYE A.A., (2016). Rapport de synthèse documentaire et délimitation de zones favorables : Permis de recherche de phosphate de chaux et substances connexes (région de Louga) délivré à CHALLENGER NORD-SUD INTERNATIONAL-S.A.S, 18 pages
13. ACF International (2010). Rapport : Utilisation du syscal dans le cadre de mission de prospection géophysique. 76 pages
14. Slansky M. (1962) : Les problèmes du Phosphate au Sénégal. BRGM, ADK – 62-A9, 46 pages.
15. Dubois J., Diamant M., Cogné J.P. (2011) – Notion de modèle Géophysique, Dunod, page 2.
16. Jenny J., Borreguero M., Burgisser A. (2007) – Interprétation de la sismique réfraction, Geological & Geophysical Software ,27 pages.
17. Fabien-Quellet G. (2012) – Mesures sismiques à faible profondeur : une approche intégrée, Mémoire de Maitrise en Sciences de la Terre, Université Laval. 145 pages

Références web

1. <http://senegal-emergent.com/fr/developpement-de-la-filiere-phosphates-et-fertilisants>
2. <https://www.gexplore.fr/fr/la-sismique-refraction/principe-de-fonctionnement-de-la-sismique-refraction/>
3. <http://physique.unice.fr/sem6/2007-2008/PagesWeb/Sismo/pbinverse.html>
4. <https://docplayer.fr/72203966-Mesures-sismiques-a-faible-profondeur-une-approche-integree.html>
5. www-ig.unil.ch

ANNEXE 1 : MATERIELS UTILISE POUR LA TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE



Résistivimètre



Câble connecteur



Connecteurs de type Müller



Câbles reliés au résistivimètre



Mise en place des électrodes



Syscal connecté à l'ordinateur

Câbles multi-électrodes

Résistivimètre (Syscal)



Electrodes

Connecteurs

ANNEXE 2 : MATERIELS UTILISE POUR LA SISMIQUE REFRACTION



Géode branché à l'ordinateur



GPS



Câble sismique



Tir sismique avec le marteau de 5Kg



Géode et le câble qui se branche à la batterie



ANNEXE 3 : DONNEES DES QUATRE SONDAGES ETUDIES

Les données des sondages géologiques du site étudié

	Recouvrement		Niveau phosphaté	limestone	Teneur de P ₂ O ₅ (%)
	Nature	Epaisseur (m)	Epaisseur (m)	Epaisseur (m)	
	sable à sable argileux	0 - 26,87	26,87 - 26,97	26,97 - 27,87	
KDD042					non analysée

KDD057	sable à sable argileux	0 - 8,5	10,6 - 11,31	11,31 - 14,10	12,02
	sable ferrugineux	8,5 - 10,6			

KDD030	Sable à sable argileux	0 - 9,4	0	15,7 - 16,2	Négligeable
	sable ferrugineux	9,4 - 10,7			
	Sable argileux avec trace de phosphate	10,7 - 15,7			

KDD054	Sable de couleurs variés	0 - 11,39	12,87 - 13,65	13,65 - 13,87	Non analysée
	sable argileux ferrugineux	11,139 - 12,87			

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	i
<i>DEDICACES</i>	ii
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	iii
RESUME	v
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
I. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL.....	3
II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	12
I. LA TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE.....	13
I.1 Caractéristiques d'un milieu naturel	13
I.2. Notions de résistivité et de conductibilité	13
I.3. Tomographie de résistivité.....	14
I.4. Paramètres d'acquisition.....	15
I.5. Acquisition	16
➤ Mise en place des électrodes et des câbles.....	17
II.1. Principes généraux de la transmission des ondes	18
II.2. Notions de bases.....	20
II.3. Propagation dans les milieux discontinus : Cas d'une bicouche	21
II.4. Tomographie par sismique réfraction	23
I. RESULTATS	26
I.1. Traitement et résultats de la tomographie électrique	26
I.2. Traitement et résultats de la sismique réfraction.....	27
II. INTERPRETATION.....	34
II.1. Interprétions par méthode	34
II.2. Interprétation conjointe	40
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	43
ANNEXE 1 : MATERIELS UTILISE POUR LA TOMOGRAPHIE ELECTRIQUE ...	45
ANNEXE 2 : MATERIELS UTILISE POUR LA SISMIQUE REFRACTION.....	46
ANNEXE 3 : DONNEES DES QUATRE SONDAGES ETUDIES	47