

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

PARTIE I: GENERALITES SUR LES PROSPECTS PETROLIFERES

Chapitre 1: GEOLOGIE PETROLIERE

Chapitre 2: TRAVAUX D'EXPLORATION DES PROSPECTS PETROLIFERES

*PARTIE II: PRESENTATION DE LA COMPAGNIE OCCIDENTAL OF MADAGASCAR ET DE
LA ZONE D'ETUDE*

Chapitre 3: PRESENTATION DE LA COMPAGNIE OCCIDENTAL OF MADAGASCAR « OXY »

Chapitre 4: PRESENTATION DU BLOC SAKARAHA

PARTIE III: TRAVAUX ENTREPRIS DANS LA ZONE D'ETUDE

Chapitre 5: HISTORIQUE DU BLOC SAKARAHA

Chapitre 6: TRAVAUX GEOLOGIQUES

Chapitre 7: TRAVAUX GEOPHYSIQUES

Chapitre 8: SYNTHESE DES RESULTATS GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES

Chapitre 9: TRAVAUX DE FORAGE

Chapitre 10: SYNTHESE PETROLIER DU BLOC SAKARAHA

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE et WEBGRAPHIE

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

SPM : Société des Pétroles de Madagascar

OMNIS: Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques

OXY: Occidental of Madagascar

TOC : Total Organic Carbon (quantité de matière organique)

CO₂: Dioxyde de Carbone

2D: Deux dimensions

3D: Trois dimensions

4D : Quatre dimensions

O : Ouest

E : Est

S : Sud

N : Nord

RN: Route Nationale

RS : Route secondaire

BW-1 bis : Puits Bezaha

SW-1 : Puits Saloanivo

AB-1 : Puits Ambalabe

FD-1 : Puits AMPANDRAMITSETAKA ou TANDRANO

LD-1: Puits Lambosina

ME-1: Puits Manera

VHD: Puits Vohidolo

SAK-1 : Puits Sakaraha

ABN : Puits Ambanasa

VHD : Puits Vohibasiasa

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	<i>Coupe d'un gisement d'hydrocarbure.....</i>	3
Figure 2:	<i>Principales étapes de la formation des hydrocarbures et les types d'hydrocarbures générés à partir du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement.....</i>	5
Figure 3:	<i>Migration des hydrocarbures.....</i>	7
Figure 4:	<i>La migration primaire, secondaire et la dysmigration.....</i>	8
Figure 5:	<i>Différents types de pièges à pétrole</i>	11
Figure 6:	<i>Etapes de prospection pétrolière</i>	12
Figure 7:	<i>Prospection géophysique «Onshore».....</i>	14
Figure 8:	<i>Prospection géophysique «offshore ».....</i>	14
Figure 9:	<i>Les forages d'exploration</i>	16
Figure 10:	<i>Localisation du Bloc Sakaraha</i>	22
Figure 11:	<i>Rassemblement des continents dans Gondwana et la première ouverture de l'océan Indien entre l'Est et l'Ouest-Gondwana.....</i>	23
Figure 12:	<i>Localisation des bassins sédimentaires de Madagascar après la phase de rupture dans le Gondwana</i>	24
Figure 13:	<i>Modèle géodynamique du début et fin du rifting Karroo et la dérive du plateau Mésozoïque de Madagascar.....</i>	26
Figure 14:	<i>Stratigraphie du Sub-bassin de Karroo</i>	27
Figure 15:	<i>Subdivision du bloc Sakaraha en 2 sous bassin.....</i>	27
Figure 16:	<i>Dépôt d'affleurement du Karroo dans la zone d'étude</i>	30
Figure 17:	<i>Dépôt d'affleurement du Post-Karroo dans la zone d'étude</i>	31
Figure 18:	<i>Schéma structural de la zone d'étude.....</i>	33
Figure 19:	<i>Localisation des lignes sismiques OM.....</i>	59

<i>Figure 20:</i>	<i>Section sismique OM 84-126.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 21:</i>	<i>Corrélation entre chronostratigraphie et méga séquence de section Vohibasina.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 22:</i>	<i>Synthese structurale du bloc Sakaraha.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 23:</i>	<i>Structure VOHIBASIA.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 24:</i>	<i>Structure LAMBOSINA.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 25:</i>	<i>Structure AMBANASA</i>	<i>70</i>
<i>Figure 26:</i>	<i>Localisation des puits de l'OXY.....</i>	<i>75</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Proposition des nouveaux systèmes pétroliers dans la zone d'étude.....</i>	<i>79</i>
--	-----------

INTRODUCTION

A Madagascar les activités de recherches pétrolières ont démarré dès le début du XXème siècle. Elles commencent aux travaux des opérations effectuées par deux sociétés dont une société américaine (1903-1919) et le Syndicat d'Etudes et de Recherches Pétrolières (S.E.R.P, 1934 -1939). Depuis 1950, plusieurs sociétés étrangères vinrent ouvrir des blocs principalement sur la partie territoriale et le littoral occidentaux de Madagascar. Toutes ces compagnies sont arrivées dans la Grande île, ont osées à s'investir pendant de périodes assez longues, en apportant leurs capacités techniques dans la matière de prospection pétrolière afin d'avoir des idées où pourraient se trouver les réserves de pétrole à Madagascar et éventuellement leur possibilité d'exploitation.

Considérant que l'Etat, propriétaire exclusif des ressources naturelles, détient le monopole des opérations sur l'ensemble du territoire et des zones maritimes couvertes par la souveraineté malgache et qu'aucune société personne morale de nationalité étrangère ne peut exercer des activités dans le domaine minier national si elle n'est associée à une entreprise nationale d'hydrocarbures, d'où l'existence de l'Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques (OMNIS).

L'OMNIS, l'établissement immanquable lorsqu'il est question des activités pétrolières malgaches, a pour rôles majeurs, non seulement le représentant de l'Etat Malgache et qui doit tenir un pourcentage d'intéressement significatif dans l'associé, mais dispose surtout tout le droit de connaître et d'avoir tous les résultats d'opérations de recherche réalisées par les compagnies pétrolières, notamment l'acquisition des documents analytiques de synthèse des travaux géologiques, géophysiques et forages ainsi que les supports physiques à savoir les échantillons de forage, en particulier tous déblais, carottes et fluides provenant de test, et les bandes magnétiques stockant les résultats des travaux sismiques.

L'identification des structures¹ dans un bloc d'une compagnie donnée et l'affirmation d'une possibilité d'exploitation ou non de celles-ci (qui sont des idées propres d'une compagnie à l'autre selon ses capacités de recherche et d'interprétation) définissent l'occupation majeure de cette compagnie. Il se peut que la conclusion générale tirée d'après ses interprétations ne donne pas de signe positif pour un bel avenir d'exploitation.

¹Signifie toutes formes géométriques, de couches géologiques, pièges stratigraphiques ou biseaux où l'on suppose que des réservoirs peuvent être présent et renfermer des hydrocarbures

Pourtant ces résultats formeront toujours des indispensables pour l'OMNIS en leur considérant comme étant des objets d'archive de valeurs pour les éventuelles recherches pétrolières pouvant être menées plus tard. Certainement, on ne peut pas se confier exclusivement à la qualité des analyses et interprétations de ces résultats mais elles ne sont considérées que des données de base pour les travaux d'exploration future.

Des efforts ont été entrepris et se poursuivent de temps en temps afin d'arriver à mieux répertorier et bien gérer ces méga rapports et supports donnés par les compagnies mais ils ne restent pas là. Certes, les compagnies vont vraiment accomplir leurs engagements en donnant tous les résultats qu'ils ont eus durant l'exploration à l'OMNIS, mais le plus essentiel après c'est la capacité de l'OMNIS de synthétiser à sa propre manière tous ces résultats pour l'avenir de l'exploration pétrolière à Madagascar.

C'est dans cet optique que le département GBD de l'OMNIS consent le soutien des stagiaires dont le but est de synthétiser tous les travaux de recherche exécutés par une compagnie pétrolière donnée et également de vérifier la qualité ainsi que de mettre à jour toute les informations relatives à cette compagnie enregistrées dans les bases de données de l'OMNIS. D'où la raison de cet ouvrage en faveur de mémoire de fin d'étude contribuant au même objectif en synthétisant les travaux d'exploration entrepris par la compagnie OCCIDENTAL of MADAGASCAR dénommée « OXY » travaillée dans les années 1981-1986 dans le bloc SAKARAH, Sud-Ouest de Madagascar.

En essayant de mieux appréhender le sujet avec le mot « synthèse » constituant l'idée principale, les points suivants sont espérés comme des bons directifs pour bien saisir tous les travaux d'exploration menés par la compagnie.

Ainsi, cet ouvrage est divisé en trois grandes parties : de notions générales sur les prospects pétrolifères, étant une base fondamentale avant tous travaux d'exploration, occupera la première partie. La deuxième partie parlera de la compagnie en question ainsi que de voir le contexte générale de la zone d'étude. La troisième et dernière partie consiste à la présentation de tous les travaux d'exploration dans le bloc SAKARAH et leurs synthèses afin de faire connaître le système pétrolier de la zone.

PARTIE I:

GENERALITES SUR LES PROSPECTS PETROLIFERES

Effectivement, des notions sur les géologies pétrolières ainsi que des connaissances sur les travaux d'exploration du pétrole s'avèrent indispensables lorsqu'on parle de prospects pétrolifères.

Les différentes étapes de formation du pétrole depuis l'obtention d'une roche mère jusqu'à l'accumulation du pétrole dans une roche réservoir où les hydrocarbures y sont piégés feront l'objet principal de notre premier chapitre « notions sur les géologies pétrolières ».

La seconde chapitre « Travaux d'exploration des prospects pétrolifères » explicite les différentes méthodes d'exploration en commençant par les travaux géologiques, notamment les reconnaissances géologiques sur terrain, la photo-interprétation..., ensuite les travaux géophysiques dont le but c'est d'avoir des idées sur les caractéristiques géométriques et structuraux du sous-sol, et enfin les travaux de forage d'exploration avec lesquels on en déduit si on pourra poursuivre l'étude ou non.

Chapitre 1:

GEOLOGIE PETROLIERE

1. Gisement d'hydrocarbure [1]

Un gisement d'hydrocarbures est une concentration d'hydrocarbures dans le sous-sol susceptible d'être exploitée dans des conditions économiques. Les gisements se caractérisent par des couches capables d'accumuler en quantité suffisante des hydrocarbures et correspondent à des structures géologiques particulières limitées à leur partie supérieure par des couches imperméables qui font obstacle à une migration des hydrocarbures vers le haut. Un gisement peut se trouver à des profondeurs allant de quelques mètres à plus de 6000 mètres et sa superficie va de quelques km² à quelques dizaines de km² et peut plus rarement atteindre quelques centaines de km² et son épaisseur peut varier de quelques mètres à quelques centaines de mètres.

Ces structures sont incluses dans des ensembles géologiques plus vastes dits bassins sédimentaires.

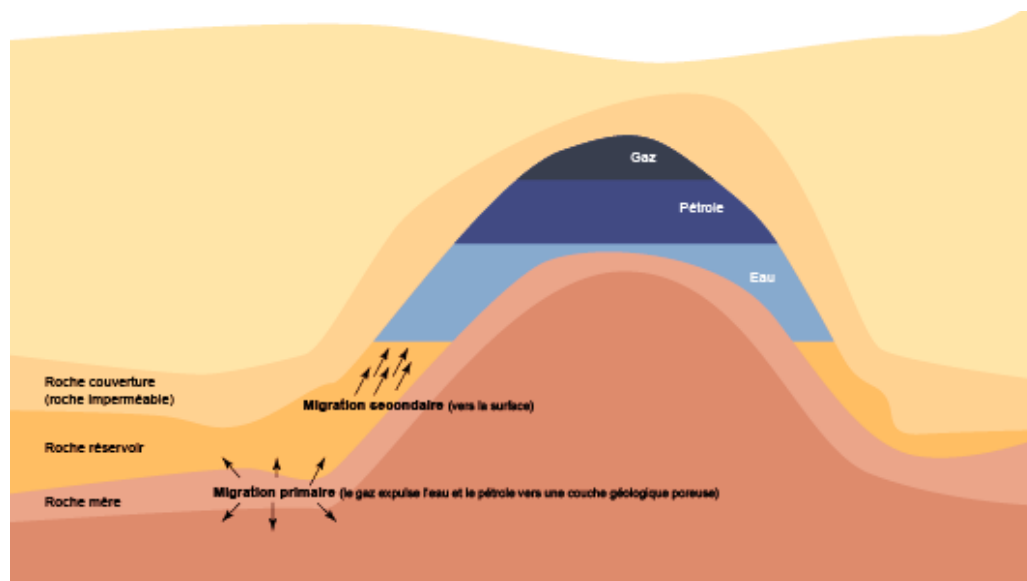


Figure 1: Coupe d'un gisement d'hydrocarbure (©Connaissance des Énergies)

2. Processus de formation des hydrocarbures [1] [2][26]

Les hydrocarbures sont de combustible fossile dont leur formation date d'environ 20 à 350 millions d'années. Ils proviennent de la décomposition des restes de nombreux organismes marins qui se sont déposés et accumulés dans des bassins sédimentaires, au

fond des océans, des lacs et des deltas, y se sont mélangés à la boue et au limon pour former des couches de sédiments riches en matière organique : « le kérogène ».

Cette matière organique est issue d'êtres vivants, essentiellement constituée par le plancton ajouté à des végétaux terrestres apportés par les cours d'eau, surtout dans les zones de delta, et également des micro-organismes. Composée pour l'essentiel de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène, elle forme ce que l'on appelle « la biomasse ». Dans un environnement pauvre en oxygène, cette biomasse peut être détruite par des bactéries mais encore une partie est préservée et se dépose au fond de milieux aquatiques. Cette dernière se mélange ensuite à des matières minérales (particules d'argiles ou sables fins), créant ainsi des boues de sédimentation. Au début de la sédimentation jusqu'à une profondeur d'environ 1 000 mètres sous le plancher océanique, la matière organique contenue dans ces boues de sédimentation subit une transformation sous l'action de bactéries anaérobies (vivant en milieu privé d'oxygène). Elles en extraient l'oxygène et l'azote, aboutissant à la formation de kérogène. Il s'agit d'un composé solide disséminé sous la forme de filets au sein des sédiments, contenant surtout du carbone et de l'hydrogène. Sous l'effet de leurs propres masses, de la tectonique des plaques et à la suite de leur couverture par de nouveaux dépôts, les couches sédimentaires s'enfoncent naturellement dans la croûte terrestre. Au cours de ce phénomène et sous l'effet de la compression due à la forte profondeur au-delà de 1 000 mètres de profondeur sous le plancher océanique, les résidus minéraux des boues de sédimentation se solidifient en une roche relativement imperméable. Appelée « roche-mère », cette formation piège le kérogène.

La roche-mère subit également un enfouissement. Le kérogène est donc soumis à des pressions et des températures géothermiques de plus en plus élevées, augmentant d'environ 3°C tous les 100 mètres. À une température supérieure à 60°C, ce qui correspond à un enfouissement d'environ 1 500 à 2 000 mètres, le kérogène subit un craquage thermique, appelé également « pyrolyse ». Cette transformation chimique élimine l'azote et l'oxygène résiduels pour laisser de l'eau, du CO₂ et des hydrocarbures, molécules exclusivement composées de carbone et d'hydrogène. Le mélange d'hydrocarbures liquides est appelé pétrole brut. Des hydrocarbures sous forme gazeuse (méthane) sont également générés lors de la transformation du kérogène. La proportion de gaz au sein de la roche-mère s'avère

d'autant plus élevée que la durée et la température de transformation du kérogène sont importantes (Figure2).

Le processus de production des hydrocarbures se déroule en trois phases :

- **La diagenèse** au cours de laquelle on remarque la formation de l'eau et du gaz carbonique. Les bactéries méthanogènes y ont été dissoutes afin de donner du méthane biogénique. Ce phénomène se produit dans les premiers mètres de profondeur d'enfouissement de la matière organique c'est-à-dire dans les 1000m.
- **La catagenèse** où l'on assiste en premier à la formation d'huiles dans un intervalle de température comprise entre 60 et 120° et de profondeur inférieure à 3000m. Cet intervalle est nommé « fenêtre à huile »

Puis, viennent les hydrocarbures plus légers qui sont essentiellement composés de gaz dits « gaz humides ».

- **La métagénèse** qui se passe à une plus grande profondeur et à une température plus élevée et au cours de laquelle les grosses molécules d'hydrocarbures précédemment formées vont subir un craquage, en augmentant ainsi la teneur en produits plus légers. Il se forme surtout du méthane qui est du gaz sec

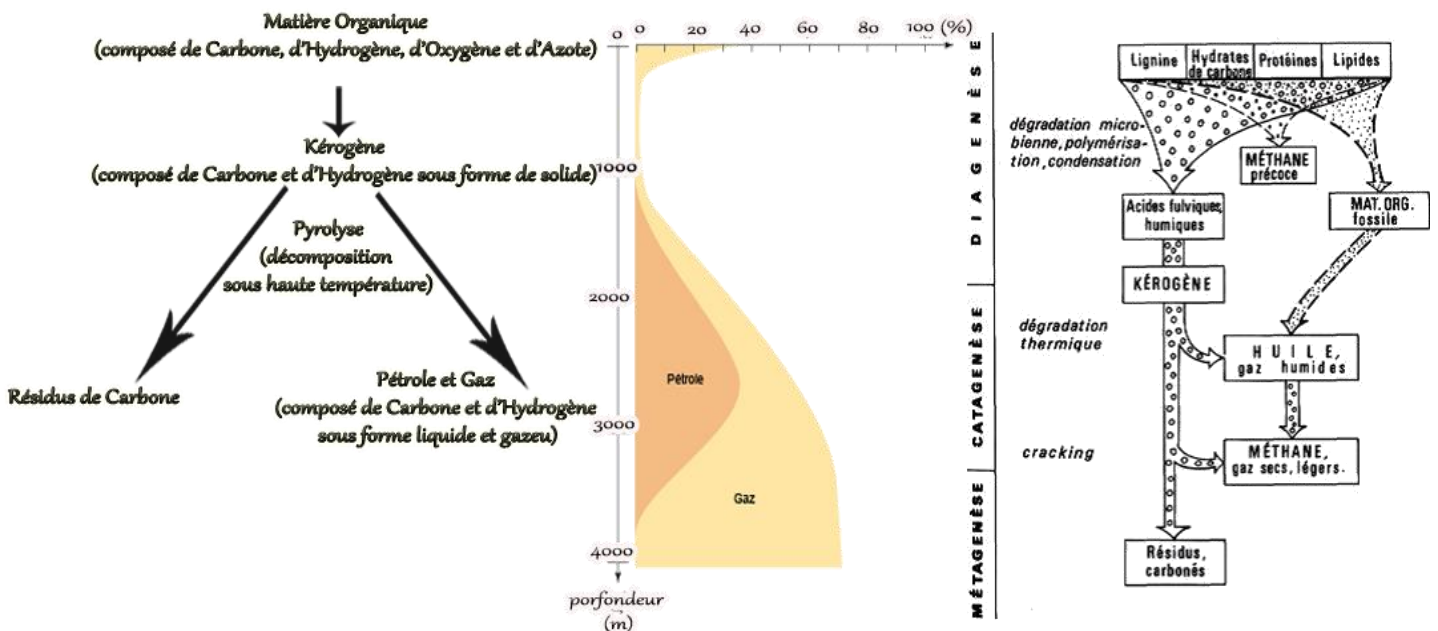


Figure 2: Principales étapes de la formation des hydrocarbures et les types d'hydrocarbures générés à partir du kérogène en fonction de la profondeur d'enfouissement

(Sources : - Tissot et Welte - *Département de géologie de l'université Laval* 1984)

Dans le cas où la roche-mère n'est pas suffisamment enfouie, le kérogène qu'elle contient ne subit pas de pyrolyse. Appelé schiste bitumineux, il s'agit d'un combustible fossile arrêté au stade d'« avant-pétrole » dans le processus de maturation du kérogène.

Par un procédé industriel, les schistes bitumineux peuvent être transformés en pétrole en subissant une pyrolyse (à 500° C pour accélérer la maturation du kérogène).

3. Système pétrolier [1]

La transformation de la matière organique en hydrocarbures s'échelonne sur des dizaines de millions d'années, en passant par la formation d'une substance intermédiaire appelée kérogène qui va être ensuite piégé dans une roche mère. Cette boue sédimentaire enfouie à plusieurs kilomètres de profondeur se transforme après plusieurs étapes en pétrole, eau et gaz. Sous la pression des gaz, le pétrole est expulsé de la roche mère et constitue la migration, jusqu'à ce qu'il se trouve piégé dans des formations géologiques particulières telles qu'une roche réservoir sus-jacent d'une roche couverture imperméable. Cette succession d'étapes ordonnées compose un « système pétrolier », chacune étant indispensable les unes que les autres pour aboutir à un gisement exploitable.

3.1. Roches mères

Ce sont des roches riches en matière organique dans lesquelles cette dernière a pu se conserver et se transformer sans être détruite par des actions oxydantes. La roche-mère se trouve toujours dans un bassin sédimentaire. Elle a, en général, alimenté des roches sédimentaires plus poreuses. Quelques roches ignées ou métamorphiques suffisamment poreuses et proches ont pu recueillir du pétrole.

Comme exemple, les roches-mères associées aux séries argilo-sableuses (argiles, marnes schisteuses, sable ou le grès) sont les argiles et marnes noires à grain fin, tandis que celles des séries carbonatées (calcaires fins, dolomies de teint sombre) sont les assises argileuses ou marneuses.

Simultanément, sous l'effet de la pression, les hydrocarbures formés sont progressivement expulsés de la roche mère malgré leur forte imperméabilité, pour migrer dans des roches à plus forte porosité et perméabilité : c'est la **migration**.

En général, ce mouvement s'effectue vers un milieu poreux et perméable qui en raison même de ces caractéristiques ne constituait pas une roche mère initiale, la matière organique sédimentaire ayant été détruite ou oxydée précocement.

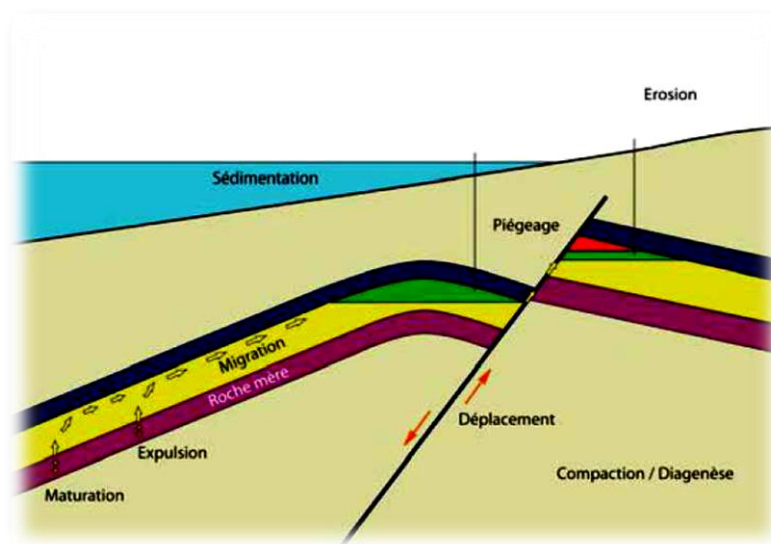


Figure 3: Migration des hydrocarbures

On distingue trois phases de migration :

3.2. La migration primaire

La migration primaire désigne l'expulsion de l'huile et du gaz de la roche mère vers un drain poreux, perméable. En effet, par un mécanisme encore mal élucidé (certainement lié à une augmentation de pression dans la roche-mère au cours de son enfouissement) l'eau, le pétrole et le gaz issus du kérogène peuvent être expulsés de leur formation d'origine.

Avec la perte progressive de la porosité, après l'expulsion massive de l'eau, les hydrocarbures dont la saturation augmente peuvent envahir l'espace poreux puis former un véritable réseau.

La migration primaire s'effectue comme un flot diphasique, eau et hydrocarbures séparément en deux phases distinctes

3.3. La migration secondaire

Cette phase désigne les mécanismes de déplacement des hydrocarbures depuis leur lieu d'expulsion ou roche-mère vers leur lieu d'accumulation dans une roche-réservoir ou magasin qui constitue sous certaines conditions un piège.

L'expulsion à partir de roches à grain fin qui est le cas pour toutes les roches mères vers un réservoir suppose des chemins de migration le long de drains.

Les mécanismes de la migration secondaire se résument comme suit :

Les différents fluides expulsés de la roche tels que l'eau et les constituants pétroliers relativement insolubles plus légers que la roche vont circuler par effet de flottaison en fonction de leur densité en suivant un drain vers la surface.

Les chemins de migration peuvent être variés. Ainsi, les drains peuvent être :

- soit une roche poreuse perméable comme le sable, grès, calcaire grainstone, dont les caractères sont ceux de roches réservoirs,
- soit un système de fractures ouvertes comme les failles et les microfractures,
- soit encore des surfaces de discontinuités ou discordances.

Les distances de migration dépendent de la proximité d'un piège et varient considérablement. Elles peuvent être infimes dans quelques cas rares (cas des schistes bitumineux) ou très modérées, mais on reconnaît aujourd'hui des chemins de migration très longs, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres et dont l'histoire peut être complexe en fonction de l'histoire géologique.

3.4. La migration tertiaire ou dysmigration

L'étanchéité d'un piège ou d'un gisement dépend de l'imperméabilité de sa couverture qui dans les cas favorables empêche le mouvement normalement ascendant du pétrole.

Si l'étanchéité est mauvaise il y a dysmigration : c'est par exemple le cas le long de failles ouvertes qui sont perméables ou à travers des couvertures hétérogènes que les barrières de pression capillaire deviennent inférieures aux forces de flottaison.

La migration tertiaire ou dysmigration est donc la « fuite » des hydrocarbures qui, à partir d'un piège où ils se sont accumulés et concentrés, se déplacent vers la surface du sol ou vers un autre piège, souvent appelé gisement de récupération.

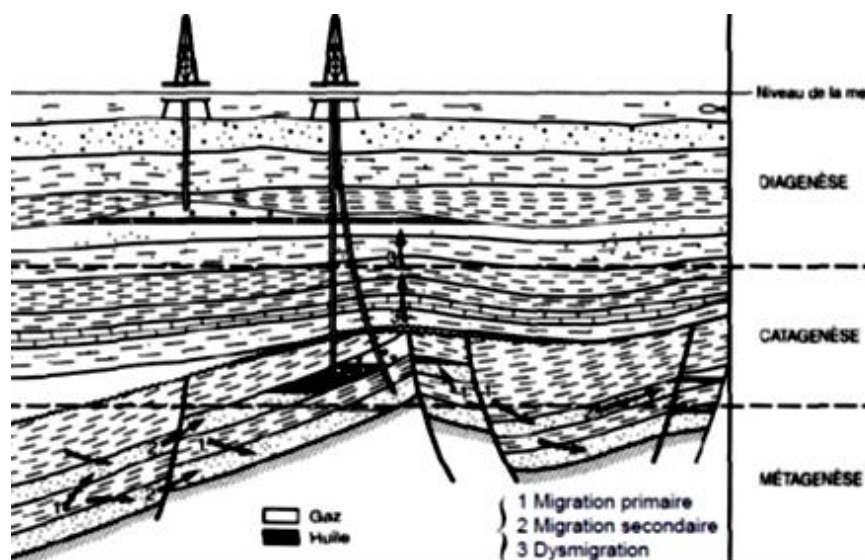


Figure 4: La migration primaire, secondaire et la dysmigration (Source : American Petroleum Institute)

3.5. Présence de roche-réservoir

Les roches réservoirs ou roches magasins, sont des roches poreuses et perméables dans lesquelles l'hydrocarbure pourra se loger.

Celles-ci sont capables de concentrer de grandes quantités d'hydrocarbures, aboutissant à des gisements d'hydrocarbures.

Plus ses deux caractéristiques pétrophysiques seront bonnes, plus le réservoir sera meilleur. Si la roche est fracturée, ses qualités de réservoir sont améliorées.

Les roches réservoirs sont constituées essentiellement par des roches détritiques, formées par l'empilement de petits grains de quartz ou de carbonates, comme les sables et les grès, et par certaines roches carbonatées, calcaires et dolomies. Ces roches correspondent le plus souvent à des milieux de dépôts agités et peu profonds.

Par exemple, pour le cas des séries pétrolifères argilo-sableuses (argiles, marnes schisteuses, sable ou grès), les roches réservoirs associées sont les argiles et le sable et celles des carbonatées (calcaires fins, dolomies de teint sombre) sont le calcaire et la dolomie.

3.6. Roche-couverture

C'est une roche imperméable au-dessus du réservoir qui a pour rôle d'empêcher la fuite de l'hydrocarbure vers la surface. Les roches-couvertures sont à la fois plastiques, imperméables et suffisamment épaisses surtout dans les régions de tectonique violente où il y a risque d'étirement et rupture.

Comme exemple, les roches couvertures associées aux séries argilo-sableuses sont les horizons argileux ou schisteuses, tandis que celles des carbonatées sont les calcaires compacts et horizons d'anhydrite ou de sel.

3.7. Pièges

Un piège, condition indispensable de tout gisement, est une zone où le réservoir, couvert par une couche imperméable, est fermé latéralement par des terrains imperméables ou par une déformation des couches. Il permet l'accumulation d'une quantité d'hydrocarbures exploitable. Un piège rempli d'hydrocarbures peut ne contenir que du pétrole ou du gaz ou les deux à la fois. Pour ce dernier cas, le gaz étant plus léger, se rassemble au sommet du piège.

Il est à remarquer que si seul du pétrole s'y accumule, d'importantes quantités de gaz sont tout de même dissoutes et que les accumulations de gaz seul contiennent toujours une

fraction de liquides légers appelé condensat, d'autant plus qu'il reste toujours un peu d'eau résiduelle collée aux grains de la roche réservoir.

Il existe différents types de pièges classés en trois grandes familles: les pièges stratigraphiques, les pièges structuraux et les pièges mixtes.

3.7.1 Les pièges stratigraphiques

La formation de ce type de piège est due aux variations latérales des caractéristiques de la roche réservoir passante. La roche-réservoir devient imperméable et bloque la migration du pétrole. C'est par exemple le cas des pièges récifaux.

Un autre mode de formation de ce type de piège est quand la couche perméable se termine par un biseau. Citons comme exemple de pièges stratigraphiques un piège à discordance, un piège optique et un paléo récif, lentille sableuse et un piège par variation lithologique.

3.7.2 Les pièges structuraux :

Les pièges structuraux sont formés à la suite d'une déformation des couches sédimentaires réservoirs. Ces déformations sont en général postérieures au dépôt.

Les exemples de pièges structuraux sont :

- les pièges anticlinaux qui sont dus à un mouvement tectonique souple
- les pièges par faille : dus à une tectonique cassante.

Ce type de piège a été créé par des failles ou des fractures mettant en contact une couche-réservoir et un terrain imperméable.

3.7.3 Les Pièges mixtes

Ce sont des pièges qui résultent de la conjonction de facteurs structuraux, lithologiques et stratigraphiques. Un des exemples est celui des pièges liés aux dômes de sel.

La formation de ce type de piège se passe comme suit : au cours des temps, durant leur phase de maturation ou diagenèse, les roches sédimentaires augmentent en densité, ce qui n'est pas le cas pour les roches salines ou sel gemme qui conservent sa densité. Ainsi, ce déséquilibre permet aux roches salines de monter au travers de la colonne stratigraphique et redresse à son contact les couches traversées et créent ainsi des failles.

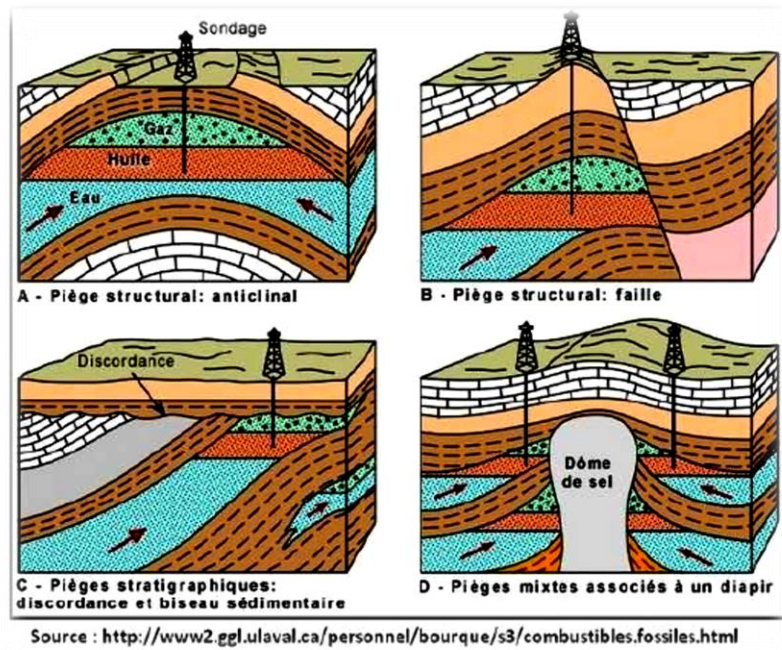


Figure 5: Différents types de pièges à pétrole

Chapitre 2:

TRAVAUX D'EXPLORATION DES PROSPECTS PETROLIFERES

L'objectif de la prospection est de localiser un gisement. L'exploration pétrolière doit en vérifier l'existence et en évaluer l'importance et la qualité grâce à des forages dont l'emplacement est déterminé en associant géologie et géophysique. Elle doit commencer par l'identification d'indices permettant de supposer où se trouve le pétrole et en quelle quantité. Géologue et géophysicien collaborent à cette enquête minutieuse à fort enjeu économique qui commence à la surface de la terre pour descendre vers le sous-sol. En cas de succès, ces phases en amont sont suivies par les phases d'exploitation, de transport et de commercialisation.

Voici un exemple de processus d'exploration pétrolière d'une période environ huit (8) ans



Figure 6: Etapes de prospection pétrolière (Source : OMNIS)

1. Prospection géologique en surface [3][25]

C'est la première étape, qui permet de repérer les zones sédimentaires méritant d'être étudiées (plissements, failles...)

Les caractéristiques géologiques des gisements pétroliers diffèrent en fonction de leur âge (de 5 à 400 millions d'années), de leur profondeur (de 1 à 10 km) et de leur thermique (la formation de l'huile se situant entre 60 et 150 °C).

Pour identifier les régions potentiellement pétrolifères, les géologues s'interrogent sur les points suivants:

- Quelle est la nature des roches ?
- Ont-elles été soumises à des conditions favorables à la création d'hydrocarbures?
- Ces hydrocarbures ont-ils pu migrer et être piégés par des couches imperméables?

Les géologues utilisent des photographies aériennes et des images satellites puis vont sur le terrain examiner les affleurements. Ces derniers peuvent en effet renseigner sur la structure en profondeur. Ensuite l'analyse en laboratoire d'échantillons de roches prélevés permet de déterminer l'âge et la nature des sédiments afin de cerner les zones les plus prometteuses.

Lorsqu'une zone favorable (prospect) est repérée par les géologues depuis la surface, c'est au tour des géophysiciens d'explorer le sous-sol.

Cette étape représente 5 % du budget consacré à la prospection.

2. Géophysique ou l'étude des profondeurs [3][25]

Son objectif : donner le maximum d'informations pour que les forages soient entrepris ensuite avec le maximum de chance de succès. Il s'agit essentiellement d'accumuler des données sismiques riches en informations, grâce à une sorte d'"échographie" du sous-sol ou "sismique réflexion".

La sismique réflexion est la méthode principale des géophysiciens pour repérer des gisements potentiels :

- sur terre (onshore), à partir d'un choc ou de vibrations sonores ébranlant le sol, on détecte par un réseau de géophones les échos réfléchis partiellement par les couches géologiques. On obtient ainsi une échographie 2D de la structure des couches prospectées.

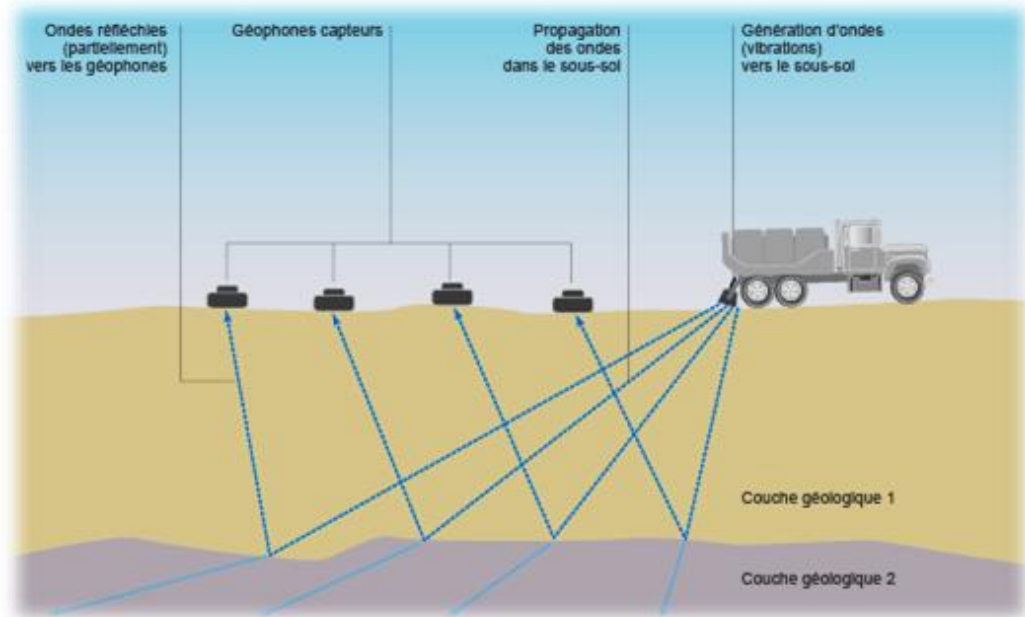


Figure 7: Prospection géophysique «Onshore» (©Connaissance des Énergies)

- En mer (offshore), on produit l'onde sismique par air comprimé à haute pression et on recueille les échos sur des hydrophones flottants (flûtes), la couche d'eau étant considérée comme homogène.

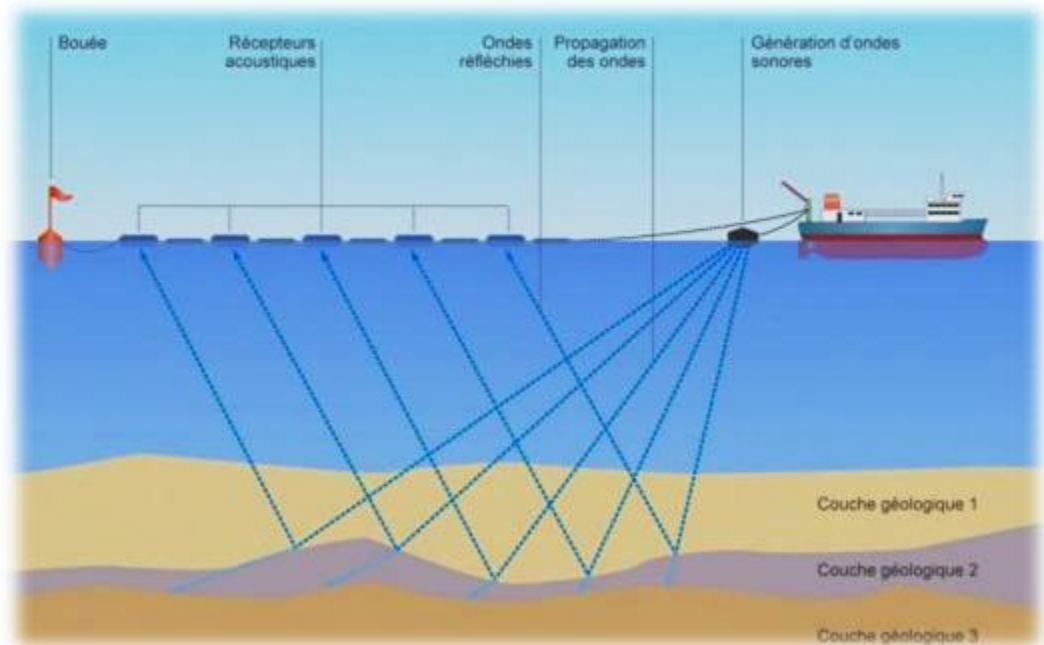


Figure 8: Prospection géophysique «offshore » (©Connaissance des Énergies)

Les signaux recueillis en surface sont traités par de puissants logiciels de calcul qui reconstituent l'image du sous-sol. Les pièges possibles mis en évidence sont classés selon leur probabilité d'existence et leur volume prévisionnel.

Pour passer en sismique 3D, on multiplie les flûtes et les angles de production des ondes sismiques pour permettre de construire des images du sous-sol en volume. Beaucoup plus onéreuse, l'imagerie sismique 3D est aussi beaucoup plus précise et permet de visualiser les volumes des gisements. En intégrant le facteur temps, on peut analyser l'évolution des gisements en cours d'exploitation en 4D.

Cette étape représente 15 % du budget consacré à la prospection.

3. Forages d'exploration. Vérification des hypothèses [3][25]

C'est l'étape du forage d'exploration qui seule permet de certifier la présence d'hydrocarbures et pour définir :

- la qualité de l'effluent du puits (huile saturée de gaz? eau?);
- la perméabilité du réservoir;
- la production potentielle et la quantité d'huile.

Forer consiste à percer l'écorce terrestre pour atteindre les zones pétrolifères, au-delà de deux kilomètres. Pour les gisements conventionnels terrestres, on fore généralement à la verticale mais des forages horizontaux sont pratiqués pour les gisements de grande étendue et de faible épaisseur. En mer, pour des raisons économiques, des forages orientés multiples sont effectués à partir d'une plateforme unique.

Dans un forage vertical classique, la tête de forage est un **trépan** doté de dents en acier très dur, parfois diamanté, mis en rotation rapide par **un train de tiges** creuses reliées à une tour verticale d'une trentaine de mètres de haut dans laquelle sont regroupés la table de rotation et les pompes d'aspiration et d'injection. Au fur et à mesure de la descente du trépan, on visse en surface des tiges supplémentaires. Simultanément, on procède au **tubage externe** du forage par des cylindres creux en acier de diamètre supérieur au trépan que l'on gaine de **ciment**.

Pour débarrasser en permanence le fond du forage des débris de roche arrachés par le trépan, on injecte sous haute pression dans le train de tiges en rotation une **boue fluide** qui traverse le trépan et remonte par le tubage externe en entraînant les débris. Cette boue est filtrée en surface, analysée et réinjectée dans le train de tiges. Au-delà de l'évacuation des

débris, ce fluide équilibre la pression sur les parois du puits, lubrifie et refroidit le trépan et peut empêcher d'éventuelles éruptions.

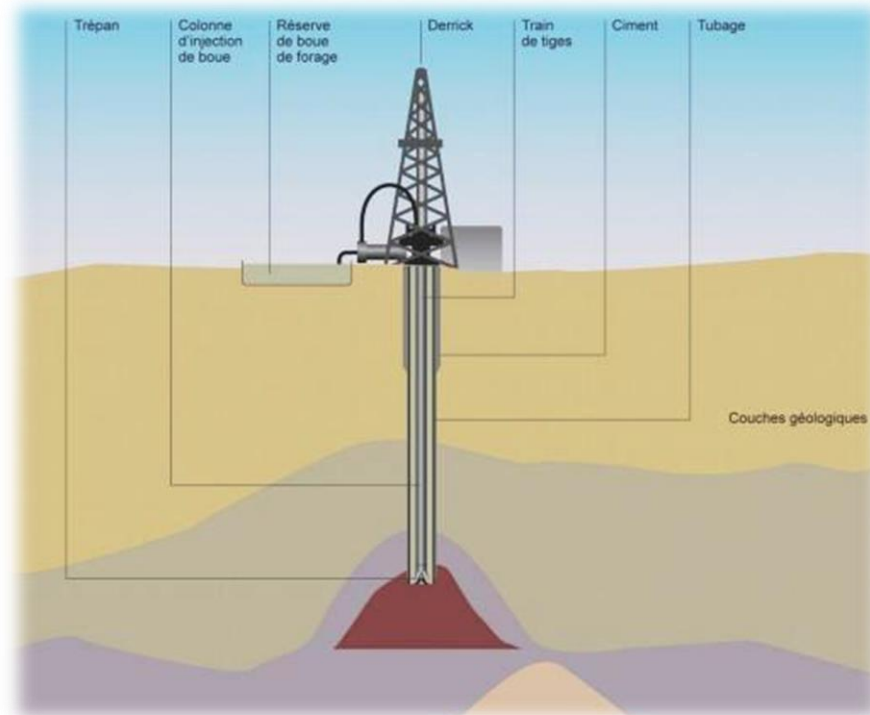


Figure 9: Les forages d'exploration (©Connaissance des Énergies)

La profondeur des trous de forage est habituellement comprise entre 2 000 et 4 000 m et peut atteindre 6 000 m. Lorsque des traces d'hydrocarbures sont détectées dans le fluide remontant en surface, on procède à un carottage avec un trépan spécial qui découpe un cylindre dans la roche. Une fois remontée, cette carotte fournit des informations clés sur la teneur en hydrocarbures de la roche traversée. Si un gisement est atteint, le forage est arrêté. Des explosifs sont descendus pour percer le tubage et laisser le pétrole pénétrer dans le puits et remonter à la surface si la pression est forte. Une tête de puits est alors installée pour mesurer le débit et évaluer la productivité du gisement. En cas de succès, d'autres forages sont réalisés pour en confirmer le potentiel. Puis viennent les multiples études économiques pour en estimer la rentabilité avant une décision de mise en exploitation. Cette étape qui dure de 2 à 6 mois est la plus lourde dans le budget d'exploration : 60 % en moyenne.

Conclusion :

Nous avons pu connaître quelques notions générales sur les prospects pétrolifères ainsi que les travaux d'exploration y correspondant par le biais de la première partie. Bref, les conditions de formation des prospects pétrolifères s'établirent à travers le « système pétrolier » en commençant par la formation de la roche mère puis la migration du pétrole vers une roche réservoir prometteuse jusqu'à ce qu'il rencontre un piège adéquat favorisant l'accumulation suffisante d'hydrocarbures permettant de lui rendre exploitable. Et pour leurs travaux d'exploration, l'étude géologique basée sur l'observation de surface, permettant de repérer les zones sédimentaires méritant d'être étudiées, ainsi que des travaux géophysiques, pour la modélisation des structures et de la stratigraphie du sous-sol, sont indispensables afin d'avoir le maximum de chance de succès pour les forages d'exploration qui leur suivent. Ainsi, en revenant sur le fond de notre étude, tous ceux qui ont été avancés font l'objet d'un repère pour notre objectif défini (cf. Introduction) et dans les parties qui suivent, nous allons aborder la réalité contextuelle de notre étude. La seconde partie de cet ouvrage est donc réservée à la définition des contextes géographiques et géologiques de notre zone d'étude dans son bassin sédimentaire. Des renseignements se rapportant au modèle du contrat signé par la compagnie occidentale avec ses associés feront également l'objet de cette seconde partie.

PARTIE II:
PRESENTATION DE LA COMPAGNIE
OCCIDENTAL OF MADAGASCAR ET
DE LA ZONE D'ETUDE

Chapitre 3:

PRESENTATION DE LA COMPAGNIE OCCIDENTAL OF MADAGASCAR « OXY »

1. OCCIDENTAL OF MADAGASCAR « OXY »[4]

La compagnie OCCIDENTAL of MADAGASCAR dénommée "OXY" est une société de l'Etat Californie, ayant son siège à BAKERSFIELD, 5000 Avenue Stockdale, USA.

Le 09 décembre 1981, l'OXY a signé une convention d'association en participation avec l'AKORAMA (entreprise national d'hydrocarbures à laquelle l'Etat a attribué les titres miniers) pour l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures dans le périmètre minier SAKARAHA dans le cadre du décret n° 81-288 du 26 décembre 1981. Cette convention a pour objet de déterminer les conditions d'établissement et de fonctionnement de l'association constituée entre l'AKORAMA et l'OXY pour les activités d'exploration, d'exploitation et de transport d'hydrocarbures et pour toutes les activités en rapport avec le périmètre SAKARAHA.

Selon ladite convention, les taux d'intéressement des Associés étaient 51% à l'AKORAMA et 49% à l'OXY étant donné que ce dernier prenait le rôle de l'Opérateur.

La période d'exploration s'est fixée sur une durée totale de huit (8) ans durant laquelle l'OXY s'engageait à effectuer ces travaux en tant qu'opérateur et qui est techniquement regroupée par les différentes phases suivantes:

- la première phase consistait aux travaux géologiques et aux travaux sismiques de 1500 km, ayant une durée de trois (3) ans.
- la seconde phase, prévue commencer à la fin de la troisième année pour se terminer à la fin de la période d'exploration, était programmée pour l'exécution de trois (3) forages. Le premier forage devrait commencer avant la fin de la quatrième année d'exploration, la seconde avant la fin de la cinquième année et la dernière avant la fin de la sixième année.

Les associés OXY/OMNIS ont promis à rendre le 25% de leur surface du bloc d'exploration à la fin de la cinquième année et 25 % additionnel de la surface restante à la fin de la sixième année.

Au cours des septième et huitième années de la phase d'exploration, l'OXY devait compléter toutes les opérations de forage en cours et toutes les études géologiques et géophysiques.

Avant le commencement de tous ces travaux, l'OXY devait fournir à l'AKORAMA, dans les trois (3) mois de l'entrée en vigueur de la convention, une lettre de garantie d'une banque de premier ordre ayant un bureau à New York, d'un montant équivalent à son obligation financière minimale de la première phase et le montant de cette garantie s'était réduit tous les trois (3) mois pour que le montant restant soit égal à la partie non dépensée sur l'engagement minimum d'OXY.

Trois (3) mois avant le commencement du forage de chaque puits, l'OXY s'était engagé également à fournir à l'AKORAMA une nouvelle lettre de garantie d'une banque de premier ordre pour un montant correspondant à l'engagement financier de chaque puits.

Selon toujours leur convention, pendant la période d'exploration, l'OXY avançait à l'AKORAMA son pourcentage d'intéressement des charges concernant les travaux d'exploration jusqu'à ce que l'association n'ait pas fait une découverte commerciale (à l'exception les travaux supplémentaire décidés par l'AKORAMA tout seul). Toutefois, au cas où l'association n'a fait aucune découverte commerciale de pétrole brut, l'OXY ne pouvait prétendre au remboursement des avances qu'elle aura consenties à l'AKORAMA.

2. Les avenants de la convention d'association en participation pour le bloc SAKARAHHA [5] [6]

2.1. Avenant n°1

Un avenant n°1 s'est conclu entre l'OMNIS, l'OXY et l'UNIONOIL of MADAGASCAR (UNOCAL) le 26 Juillet 1984. Il s'agissait d'un avenant concluant à l'associé d'être d'accord pour l'octroi à l'UNOCAL de la moitié du pourcentage d'intéressement de l'OXY tout en laissant ce dernier comme toujours l'opérateur soit :

- AKORAMA 51 %
- OXY 24.5 %
- UNOCAL 24.5 %

Selon les obligations citées dans ledit avenant, l'UNOCAL était obligée de s'investir dans le projet jusqu'à ce qu'il trouvait l'équivalent de dépense faite par l'OXY (toute dépense avant le 12 déc. 1983), y inclut l'exécution de l'un des deux forages prévus.

2.2. Avenant n°2

Un autre avenant a été signé le 27 juillet 1984 d'après lequel les associées convenaient d'une extension de périmètre minier. Il s'agissait d'un nouveau périmètre couvrant environ 3500 km² (cf. Figure10)

Chapitre 4:

PRESENTATION DU BLOC SAKARAHHA

1. Cadre géographique [4] [7]

En vertu du titre minier octroyé à l'AKORAMA dans le cadre du décret N° 81-288 publié le 26 décembre 1981, le périmètre minier de l'OXY/OMNIS/UNOCAL, connu sous le nom "bloc SAKARAHHA", était localisé entre les latitudes 20°36' et 20°30' Sud et longitudes 44°15' et 45°33' Est, soit en projection LABORDE $150000\text{m} \leq X \leq 325000\text{m}$, $250000\text{m} \leq Y \leq 600000\text{m}$, ayant une superficie totale environ 25000 km².

Le bloc Sakaraha s'était trouvé donc dans la partie Sud-ouest de Madagascar, incluant dans la province de Tuléar et faisait toucher simultanément deux régions avoisinantes telles que la région de Menabe et celle d'Antsimo Andrefana.

A cette époque, une piste venant de Malaimbady pour Mandronarivo permet de desservir la région du nord Mangoky et sa partie sud était d'un accès facile du fait de l'existence d'une route non bituminée reliant Sakaraha à Beroroha. Les lignes sismiques favorisaient aussi l'accès des zones auparavant impraticable.

Le Mangoky est le fleuve principal de la région. Il a un cours conséquent dans lequel se jettent la Menamaty et la Malio qui arrosent toute la partie sud de la zone étudiée.

Le Mangoky présente un débit notable ainsi que la Malio. Tandis que la Menamaty a un cours permanent en aval au nord du village Marandra. Tous ses affluents secondaires sont à cours temporaire. Ils coulent en moyenne dans le sens sud-nord (cf. Figure 10)

De son contexte morphologique, l'ensemble de la région étudiée est formée par le couloir Sakaménien, d'allongement Nord-Sud constituant une vallée encastrée par le socle cristallin à l'Est et le massif de l'Isalo à l'ouest.

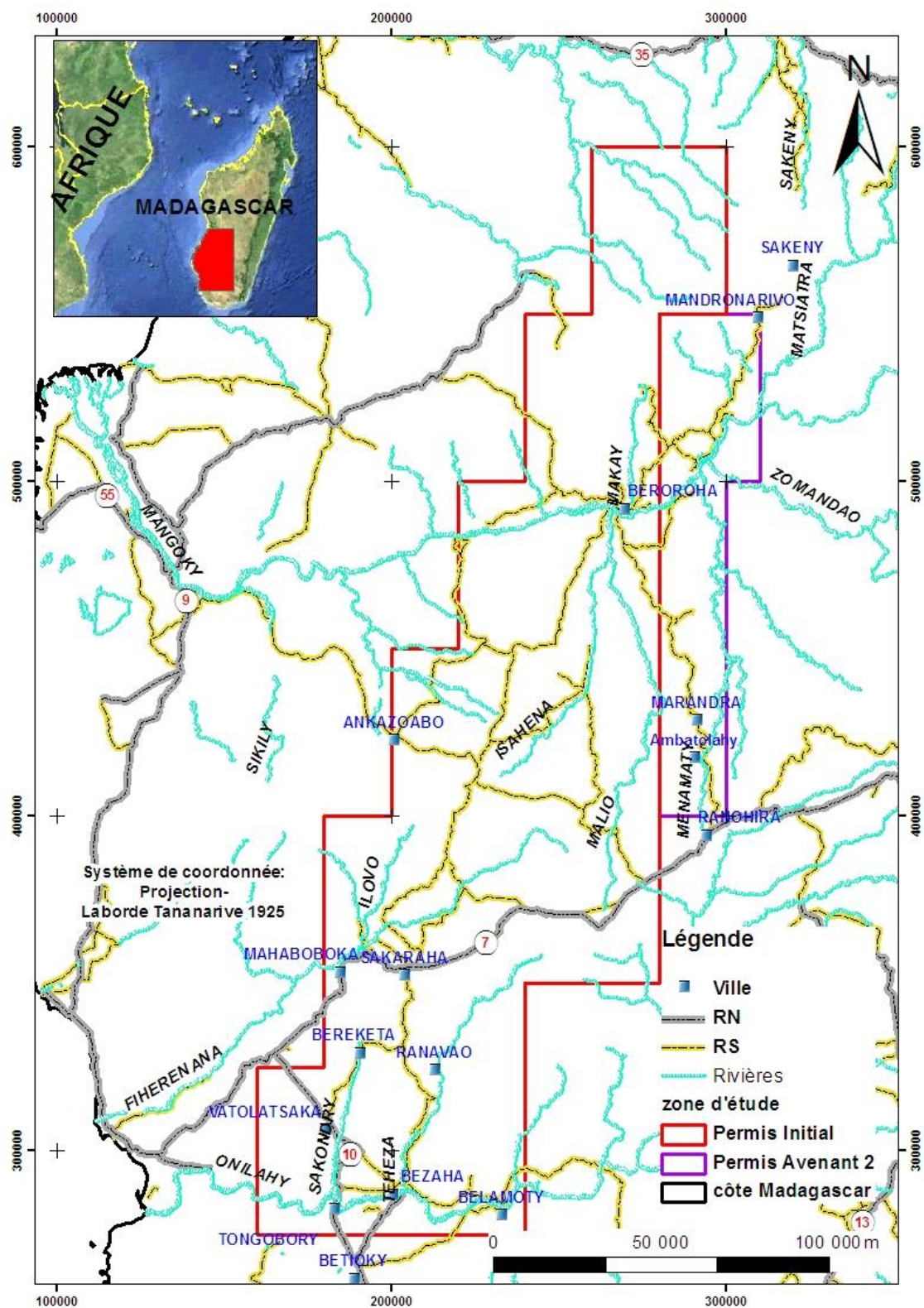


Figure 10: Localisation du Bloc Sakaraha

2. Cadre géologique [1]

2.1. Formation des bassins sédimentaires de Madagascar

Madagascar était à l'origine situé dans le centre de Gondwana, à côté de l'actuel Kenya et Tanzanie, avant le début de la fragmentation continentale, après la reconstruction de la plaque, ont démontré une forme du Rift d'Anza entre Madagascar et Afrique de l'Est reliant le promontoire du sous-sol au Cap Saint-André (Figure11). L'extension de la croûte entre l'Est du Gondwana (Madagascar, l'Inde, l'Antarctique et l'Australie) et le Gondwana occidental (Afrique, l'Arabie et l'Amérique du Sud) a commencé à la fin du Carbonifère. Deux phases bien distinctes ont marqué cette séparation de Madagascar à l'Afrique et à l'Inde dont la phase rifting Karroo et la phase de rupture et de dérive (ou drifting). À la suite de la rupture, trois bassins sédimentaires se sont formés dans l'ouest de Madagascar (Morondava, Majunga, et Ambilobe.(Figure12). Ces bassins contiennent des successions épaisses de sédiments du Mésozoïque et du Cénozoïque, le bassin de Morondava contient également les sédiments Paléozoïque

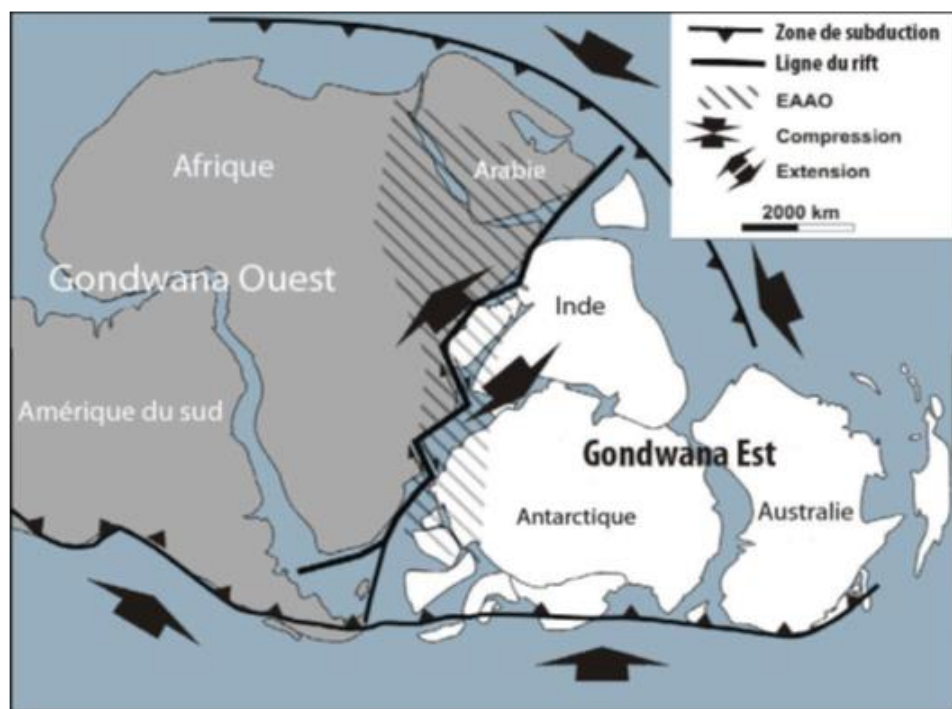


Figure 11: Rassemblement des continents dans Gondwana et la première ouverture de l'océan Indien entre l'Est et l'Ouest-Gondwana. (source : *GEIDER Markus, 2004*)

La figure suivante montre la formation des quatre bassins sédimentaires Madagascar

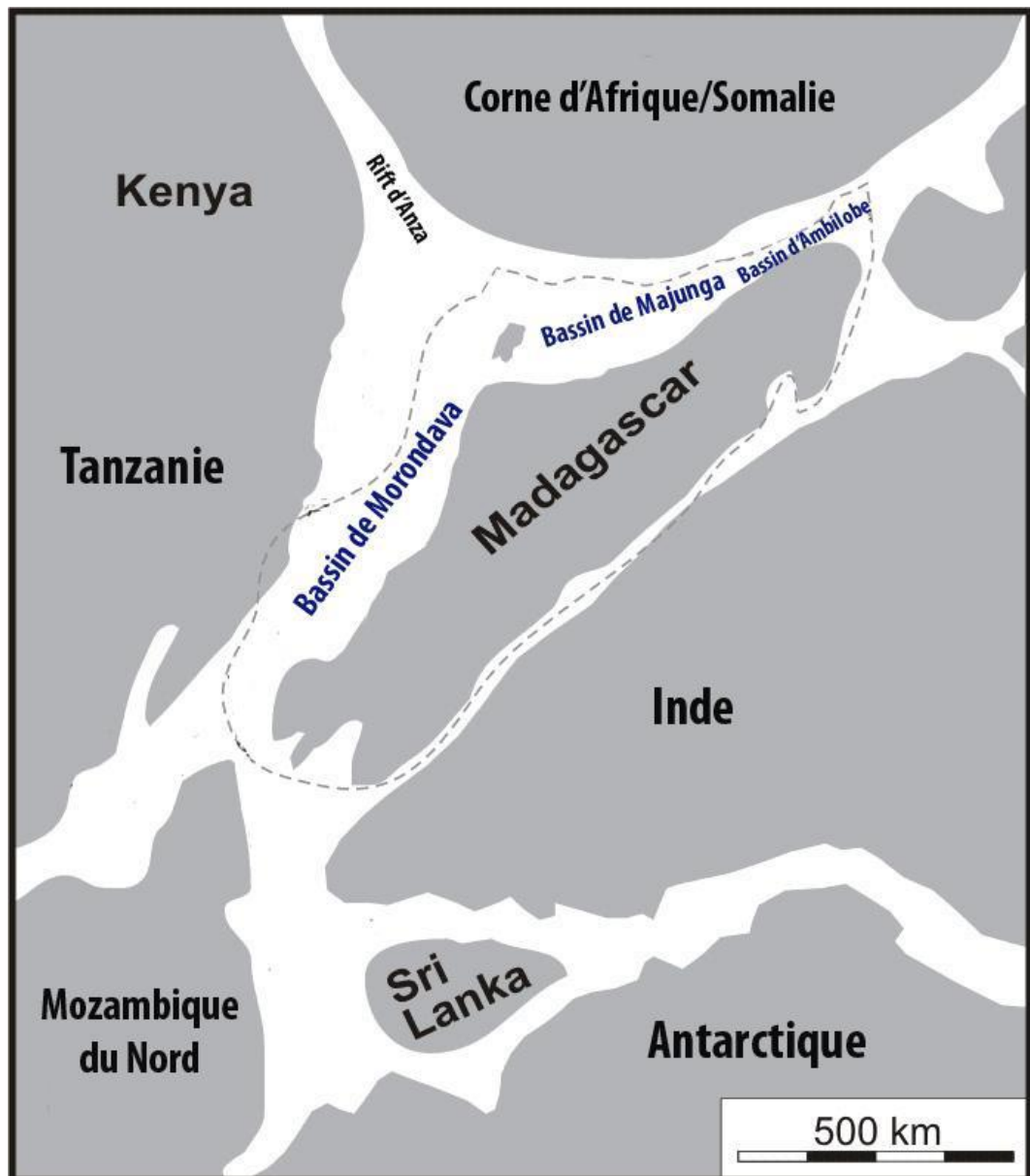


Figure 12: Localisation des bassins sédimentaires de Madagascar après la phase de rupture dans le Gondwana (Source :GEIDER Markus, 2004)

2.1.1 Phase rifting Karroo

Après une longue période d'activité plutonique (Cambrien moyen au Carbonifère), les continents ont subi une forte contrainte qui a conduit à l'extension de la croûte panafricaine (orogénèse et zones de cisaillement). Cette contrainte a formé un prolongement des bassins dans une large zone. De nombreux auteurs rapportent les séquences sédimentaires qui remplissaient ces bassins à la succession complète du bassin de Karroo en Afrique du Sud (Hankel, 1994; Piqué et al, 1999; Wopfner, 1994). En

général, le terme Karroo s'applique aux dépôts du Gondwana qui datent d'avant l'éclatement. Les bassins d'effondrement du Karroo sont principalement formés le long de chaque côté du continent africain, où une rupture continentale a été localisée. Deux phases distinctes de rifting peuvent être reconnues, l'une s'est produite dans le Permo-Trias et l'autre au début du Jurassique. La phase initiale du rifting a échoué dans le Trias moyen.

2.1.2 La Rupture et la dérive (drifting) du continent

La rupture a été affectée à l'Oxfordien-Kimméridgien. Les sédiments du milieu du Jurassique inférieur, qui sont postérieurs à la séquence sédimentaire Karroo ont été classés comme une séquence de transition entre la partie du continent Karroo rifting et l'expansion océanique. Montenat et al. (1996) a incorporé les modèles tectono-sédimentaires et la corrélation des strates du Jurassique moyen du bassin de Morondava à la phase progradation océanique. Ils ont conclu que les strates du Jurassique inférieur sous-jacentes appartiennent au rifting Karroo.

L'expansion océanique pendant le Bajocien et la dérive des continents formaient une marge continentale passive. La transgression marine suivant le Rift a formé une plate-forme côtière le long de la marge du bassin. Le Bathonien de Madagascar se caractérise par des successions de grès épais dans le sud-ouest (Besairie et Collignon, 1972; Luger et al, 1994). Pendant la Callovien un événement transgressif général a donné lieu à un environnement de bassin profond avec une faible profondeur temporaire pendant l'Oxfordien inférieur, comme en témoignent les unités de grès ("grès Oxfordien») qui apparaissent à plusieurs endroits dans le bassin sud de Morondava (Besairie et Collignon, 1972).

2.1.3 Eustatisme durant le jurassique et événement géologique

Au cours du Jurassique, un total de huit épisodes majeurs de l'élévation du niveau des mers sont reconnus au niveau mondial (Hallam, 2001). Concernant le bassin de Morondava quatre cycles transgressifs-régressifs (TR) ont été reconnus. Le premier cycle transgressif-régressif (T-R1) dans le bassin de Morondava couvre la phase syn-rupture avec les schistes et marnes de toarciennes transgressives, suivi par le grès Aalénien régressive. La séquence Bajocien-Bathonien débute par la plate-forme de carbonate avec la formation de Bemaraha et Sakaraha qui recouvre la discordance de rupture et forme la deuxième transgression (T2). Elle est suivie par la deuxième séquence régressive (R2) silicoclastique de Bathonien Moyen avec le Sakanavaka, l'Ankazoabo, le Besabora et la

formations de Mandabe. La troisième séquence de transgression (T3) couvre l'intervalle d'Oxfordien et du début-Callovien avec une séquence d'étagère profonde, peu profonde du Jurassique. T3 est recouverte par les troisièmes séquences régressives (R3) siliciclastiques du grès Oxfordien. La quatrième séquence transgressive (T4) représente une plate-forme profonde d'Oxfordien-Kimmeridgien et est également affecté au Jurassique. La partie supérieure de la transgression (T4) est diachronique tronquée par plusieurs transgressions du crétacé (Luger et al. 1994).

3. Le bassin sédimentaire de Morondava

L'évolution du système du Bassin Karoo dans le sud-ouest de Madagascar peut être considérée comme une première rupture entre l'Est et l'Ouest-Gondwana en Afrique de l'Est. L'évolution du rift dans le bassin d'extension de Morondava a déjà été décrite en termes d'extension orthogonale de la croûte de direction soit E-O ou NO-SE. Des enquêtes approfondies sur le terrain dans les trois régions du Bassin de Morondava, à la suite des interprétations des images satellites Landsat 5 et SPOT, a révélé que l'extension de la croûte dans le Bassin de Morondava et la sédimentation associée des Super séquences du groupe Karoo se sont produites dans trois périodes et régimes cinématiques différentes.

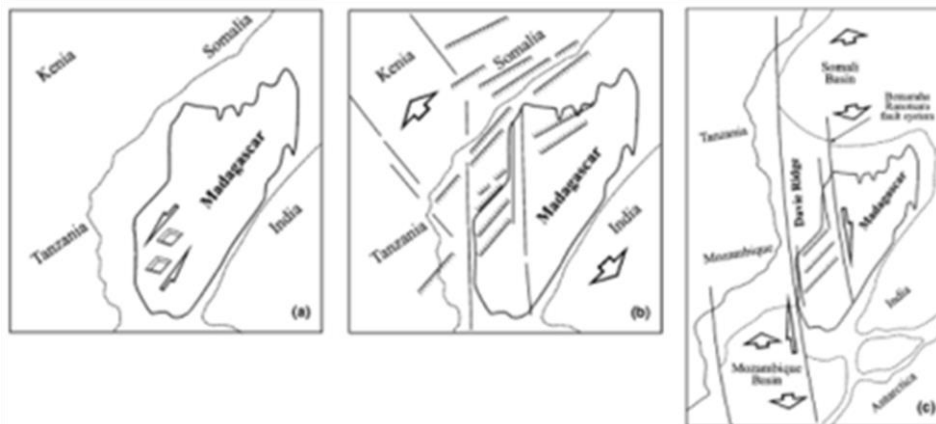


Figure 13: Modèle géodynamique du début (a) et fin (b) du rifting Karroo et la dérive du plateau Mésozoïque (c) de Madagascar

(Source : Montenat et al (1996))

4. Description lithologique du bloc Sakaraha [8] [9] [10]

Le bloc Sakaraha se trouve dans le bassin Sud-Ouest de Morondava. Il est généralement divisé en deux zones distinctes séparées par la faille d'Ilovo (Figure15). A l'est de la faille d'Ilovo s'étend la séquence Permo-Trias du Karroo environ au moins 10,000 m

d'épaisseur, recouverte par la formation Jurassique Moyen tandis que à l'Ouest, la formation Karroo y est probablement encore présente mais recouverte par le dépôt marin Jurassique à Eocène d'au moins 4,000 m d'épaisseur. L'Occidental s'était intéressé sur la zone est de la faille d'Ilovo qui est ici appelé le sous-bassin Karroo. Ce secteur Karroo connu les divisions Sakoa, Sakamena et Isalo. La stratigraphie de ce sous-bassin est décrite par la Figure14

4.1. Le socle :

Le socle occupe une petite partie au Nord-Est de notre zone d'étude. Il est essentiellement composé de basalte, gabbros, limburgites, sakalavites, quartzites, gneiss et de cipolin. Le contact du socle avec les terrains sédimentaires se fait par des failles syn-sédimentaires.

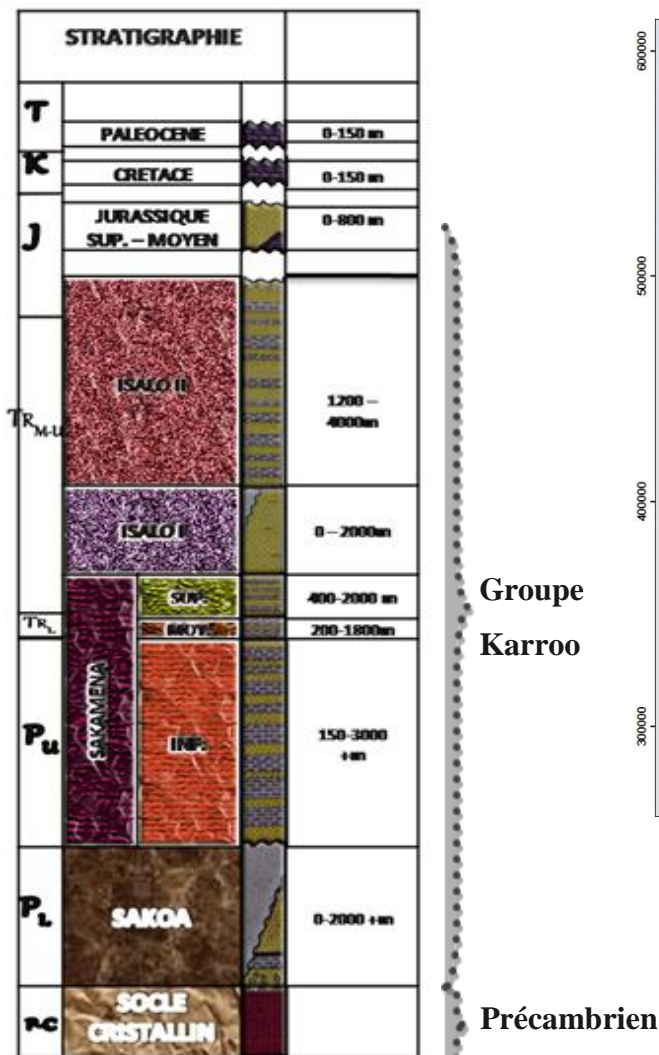


Figure 14: Stratigraphie du Sub-bassin de Karroo (Source : OXY)

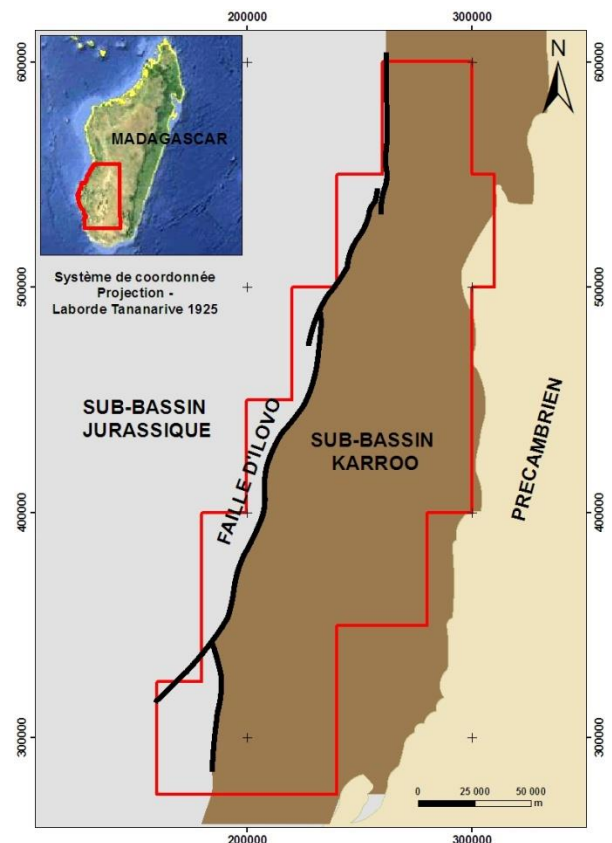


Figure 15: Subdivision du bloc Sakaraha en 2 sous bassin

4.2. Le système Karoo

Le système Karoo s'étend sur la période qui va du Carbonifère supérieur au Jurassique inférieur. Le terme Karoo concerne les formations sédimentaires et intrusives qui se sont déposées ou mises en place en Afrique, dans des bassins intra et péri-continentaux situés au Sud de l'Equateur : le bassin Karoo (Afrique du Sud) le bassin d'Etjo (Botswana), les bassins de Limpopo et du Zambèze (Zimbabwe, Mozambique), le bassin du Congo (Zaire), la vallée de Rovuma (Tanzanie), le bassin de Mombasa (Kenya), les bassins de Morondava et de Majunga (Madagascar). Le régime de dépôt est essentiellement continental.

Il remplit dans le bassin de Morondava la fosse dite du Karoo qui commence un peu au sud de Toliara et qui présente une direction subméridienne parallèle au contact sédiments-socle. Dans notre zone d'étude, il occupe surtout la zone à l'Est de la faille d'Ilovo environ au moins 10000 m d'épaisseur, recouvert par la formation Jurassique Moyen. Il est formé de bas en haut par :

- **Le groupe de la Sakoa (Carbonifère-Permien) :**

Le groupe de la Sakoa occupe une région limitée dans le Sud-Ouest. Il comporte quatre séries dont les calcaires marins de Vohitolia, témoins de la première transgression marine connue lors de l'ouverture du canal de Mozambique.

Le groupe de la Sakoa Supérieur est composé de grès grossiers feldspathiques, d'argile rouges et d'Arkoses de l'ère primaire et de dépôt continental et semi-aride. Tandis que le groupe Sakoa Inférieur composé de grès, conglomérats, pélites schistosées, varves, tillites, charbon et de schiste noire de l'ère primaire. A la base de la série, dans les bassins les plus anciens, le Karoo est représenté par des tillites, témoins d'un épisode glaciaire ; ces tillites sont discordantes sur le socle cristallin. Ce sont des dépôts de dominance continentale, lacustre et périglaciaire.

- **Le groupe Sakamena (Permo-Trias)**

Il est plus répandu et plus épais que le groupe de la Sakoa. Il est divisé en trois termes de formations allant du Permien supérieur au Trias moyen:

- Le terme inférieur est discordant sur la Sakoa et sur le socle. Il a 500 à 3000 m d'épaisseur. Ce sont surtout des grès gris-vert souvent à laminations obliques, et des argilites grises bien litées d'origine continentale.

- Le terme moyen est argileux, lacustre ou laguno-marin avec une épaisseur de 250-300 m. Il est continu sur tout le bassin et est daté du Trias inférieur.
- Le terme supérieur a une épaisseur de 500 m avec prédominance des faciès gréseux et microconglomératiques. Sa partie sommitale est constituée d'argiles bariolées, de siltites et de grès parfois quartzitiques. Ces faciès indiquent des conditions de dépôts continentales ou lagunaires

- **Isalo (Trias-Jurassique moyen)**

Le groupe de l'Isalo occupe une large bande de bassin de Morondava. L'âge de ces formations varie du Trias au Jurassique moyen. La base est de nature continentale avec des incursions marines parfois importantes et de longue durée dans sa partie inférieure.

L'Isalo I est constitué d'arkose grossière microconglomératique blanche ou grise. Les laminations obliques d'échelle métrique et les diaclases silicifiées qui restent en relief caractérisent ce faciès.

L'Isalo II est formé de conglomérats et de grès rougeâtres avec des bois silicifiés. Cette formation est datée du Trias supérieur. La base de cette couche est parfois discordante sur les niveaux inférieurs ou repose directement sur le socle. Razafimbelo (1987) propose de rattacher l'Isalo I à la Sakamena et donne le nom de formation Makay à l'Isalo II. Au sommet ces grès passent latéralement vers l'ouest à des faciès mixtes, récurrents, gréseux, calcaires et marneux à nombreux bois silicifiés. C'est la transgression majeure.

Un Isalo III à faciès mixte est aussi identifié localement au sommet de l'Isalo II. Il est constitué de calcaire blanc avec au-dessus une récurrence de marnes et de calcaire.

4.3. Le Post-Karoo

Le post-Karoo va du Jurassique supérieur au Quaternaire. Le régime de dépôt est essentiellement marin mais il présente des faciès continental, lagunaire avec des apparitions d'intrusions magmatiques liées à la tectonique.

Le Jurassique est surtout marin avec des dépôts continentaux épais. Il débute par une transgression marine observable dans tous les bassins malgaches. Les couches de Crétacé sont marquées par des faciès répétés et alternés de marnes, de grès calcaires et de grès. On peut noter l'existence d'importants épanchements basaltiques au Campanien-Turonien.

. Leur lithologie et leur puissance sont marquées par des variations très rapides tant verticales que latérales. Les faciès, bien développés tant au Nord qu'au Sud de

Madagascar, sont remarquablement constants et peuvent être suivis sur des dizaines de kilomètres.

Le Crétacé supérieur se caractérise par un épanchement de coulées basaltiques. Le Miocène présente peu d'affleurements et se caractérise par des calcarénites. On évalue l'épaisseur de la série post-Karoo à plus de 5000 m vers la côte.

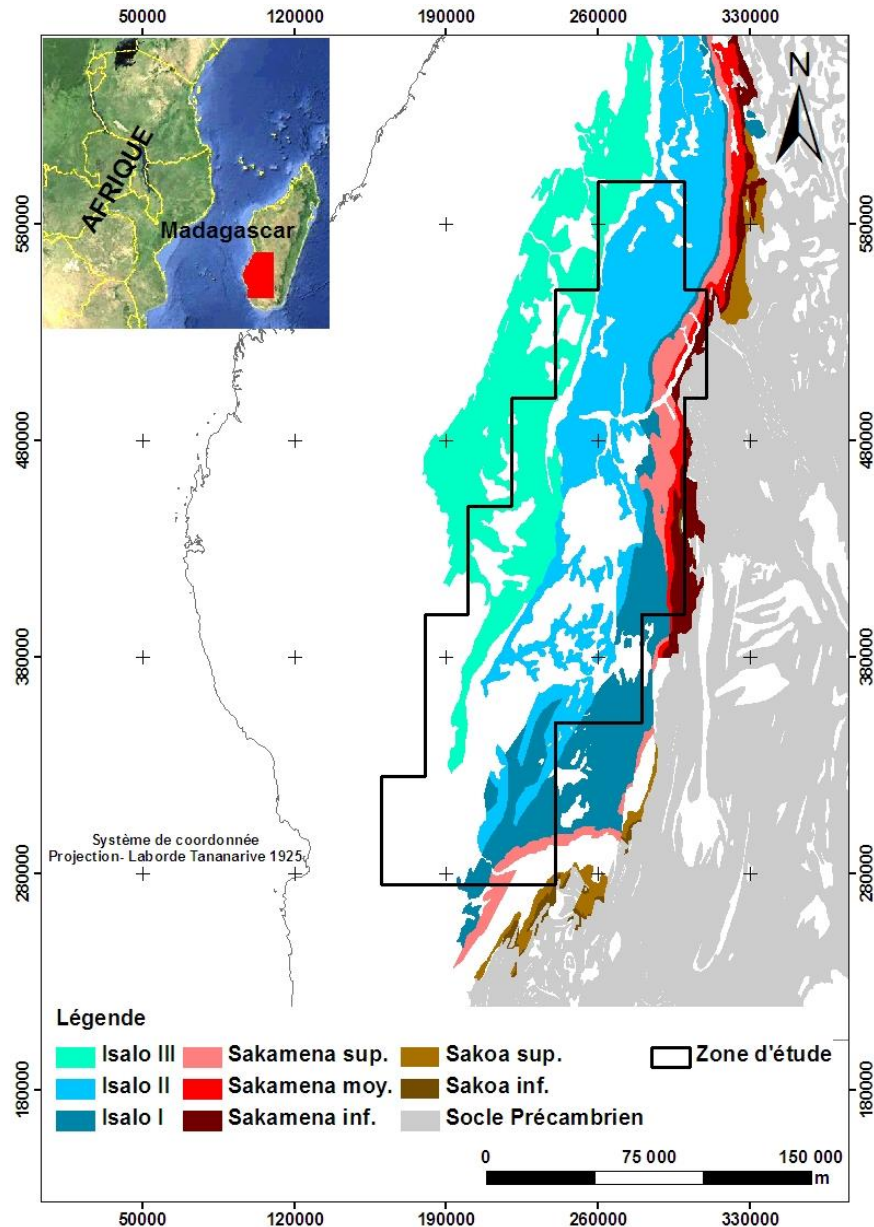


Figure 16: Dépôt d'affleurement du Karroo dans la zone d'étude (Source : BD 500 Geologie FTM)

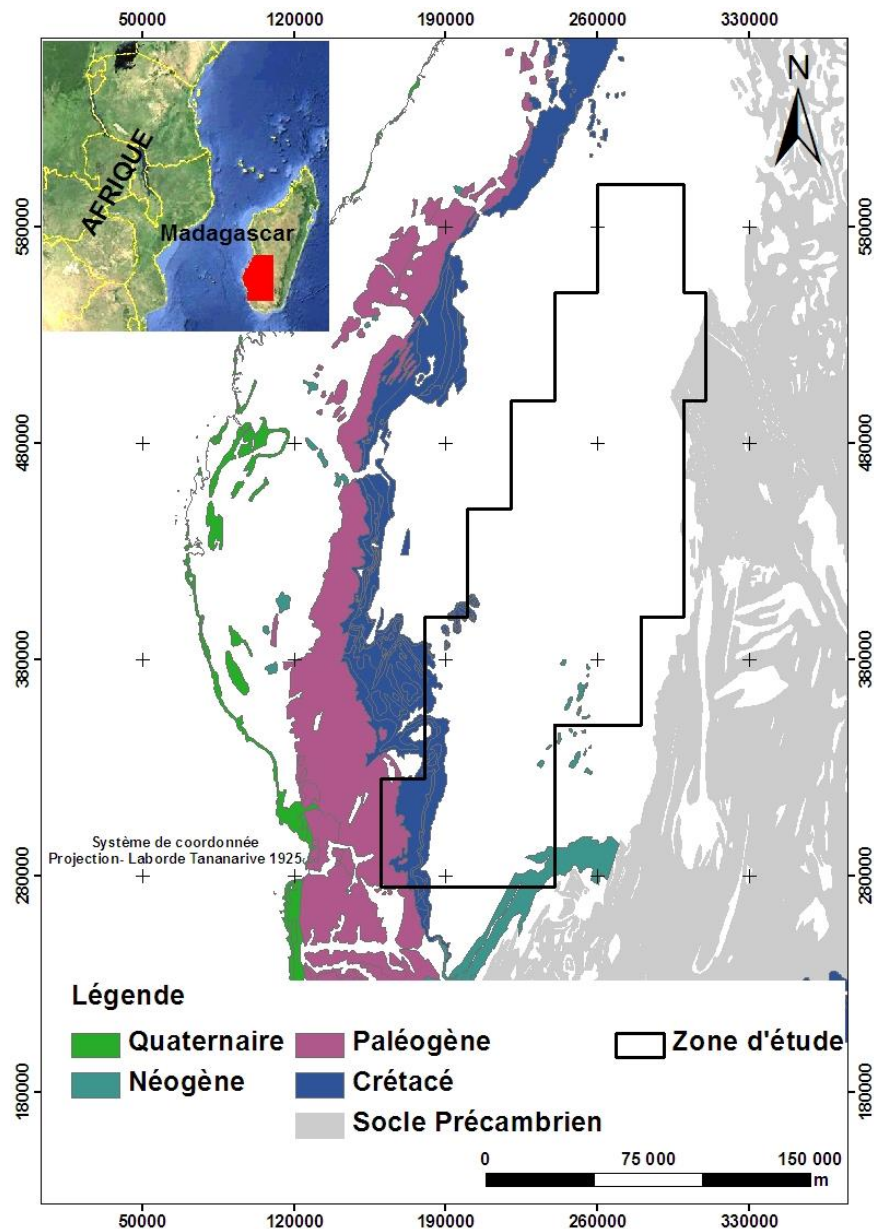


Figure 17: Dépôt d’affleurement du Post-Karoo dans la zone d’étude (*Source : BD 500 Geologie FTM*)

5. Aperçu général de la géologie structurale [8] [11]

Structuralement parlant, le bassin de Morondava est subdivisé en deux parties : un sous-bassin sud avec des failles bordières et un sous-bassin nord avec une direction globale des failles NNO-SSE.

Les principaux accidents ont une direction subméridienne et s’ordonnent préférentiellement selon la direction des deux failles principales qui affectent le socle malgache :

- La faille « côte-Est » orientée NNE-SSO ;

- La faille « Bongolava-Ranotsara » orientée NNO-SSE ;

D'une manière générale, la bordure orientale du bassin de Morondava montre une aggradation progressive des formations Karroo du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est. Le contact avec le socle se fait par des failles syn-sédimentaires. Des coupes effectuées sur la bordure du bassin, ainsi que l'étude de la subsidence des couches (Rajaomazava, 1991) montrent une géométrie en horst et graben reliée à l'effondrement progressif vers l'Ouest du socle et de sa couverture Karroo. On peut penser à une réactivation de ces accidents anciens durant la période du Carbonifère au Jurassique donnant au bassin de Morondava sa forme particulière. Les failles bordières montrent une composante principale verticale sans trace apparente de mouvement transcurrent. Selon Piqué et al (1999), le bassin de Morondava, avant le Jurassique, était un rift avorté.

Pour notre Zone d'étude, les affleurements indiquent un bassin monoclinal assez simple, interrompu par un certain nombre de zones en faille, par rapport à la direction des couches. La tectonique y est compliquée du fait de l'existence de nombreuses failles.

Parmi ces failles, les plus remarquables sont :

- La faille de l'Ilovo, de direction NNE-SSO.
- La faille du Sakondry, de direction NNO-SSE.

La tectonique profonde montre l'existence d'une morphologie accidentée dite Fosse du Karroo. Les majeures structurales principales dans notre zone d'étude sont les fosses du Berenty, les fosses du Vohidolo, le haut Makay, le haut Sakaraha....

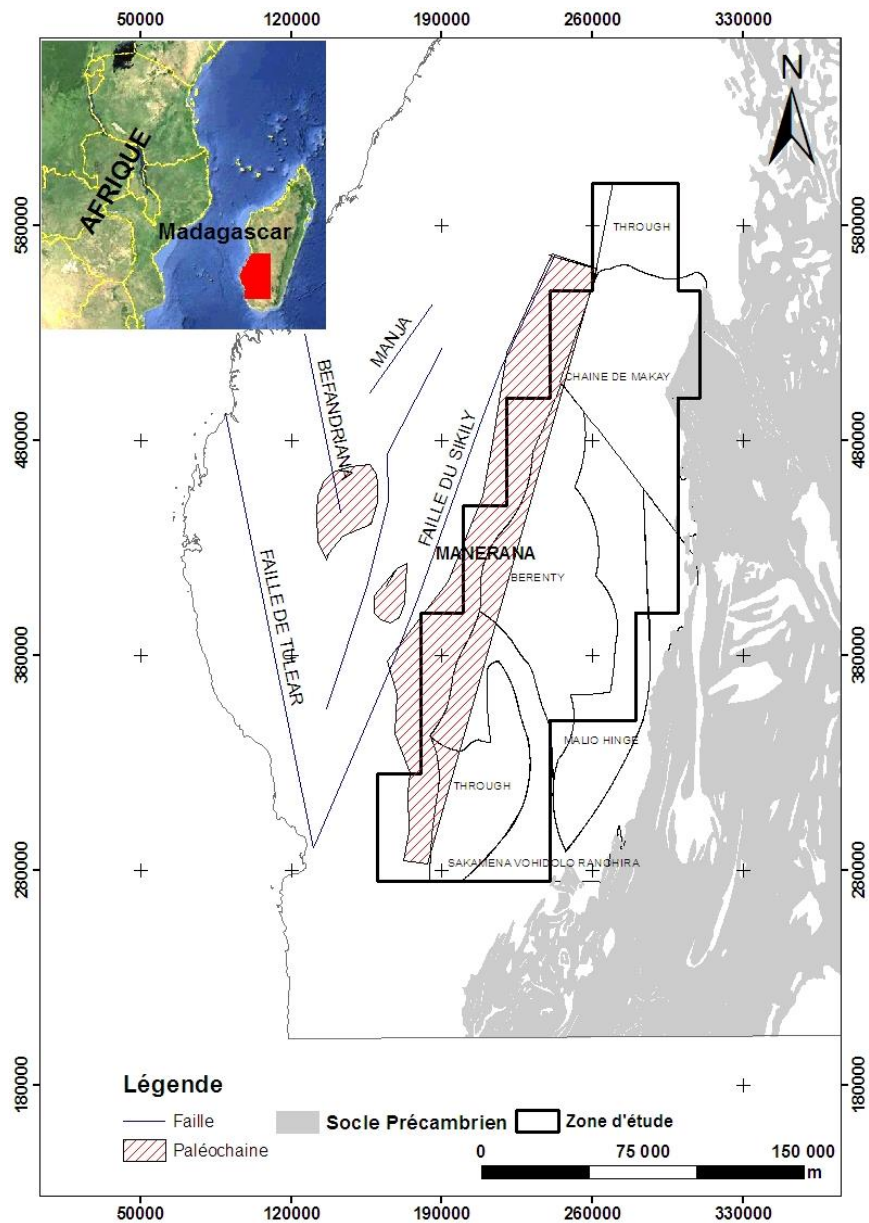


Figure 18: Schéma structural de la zone d'étude (*Source: Besairie H., 1971*)

La « convention d'association en participation » entre l'Occidental of Madagascar et l'OMNIS a été bien menée dans une meilleure condition d'engagement en terme de politique d'exploration pétrolière. Les différentes phases qui ont été définies illustrent bien une cohérence technique en vue d'en saisir le maximum de réussite dans les travaux d'exploration.

Résidant dans le bassin sédimentaire de Morondava et qui occupe principalement dans toute son extension le sub-bassin Karroo, le bloc Sakaraha a été ainsi bien délimité d'une façon judicieuse en espérant qu'il serait un bloc prometteur. Ces brèves qualifications ne valent rien sans études plus poussées, d'où la dernière partie de cet ouvrage qui nous informe sur les divers travaux entrepris dans le bloc Sakaraha que ce soit les travaux antérieurs (SPM et Chevron) ou les travaux entrepris par l'OXY elle-même. Ce sont les travaux géologiques, les prospections géophysiques et surtout l'implantation des puits. Les diverses interprétations de leurs résultats et leur compilation sont cruciales faisant l'objet d'une grande synthèse pour la proposition de structures pétrolières. Des structures pétrolières ont été ainsi proposées par l'OXY avec laquelle elle a bravé la réalisation de deux puits d'exploration. La synthèse de tous ces résultats majorés par les deux récents puits d'exploration nous donne le fruit d'une nouvelle proposition du système pétrolier dans la zone d'étude.

PARTIE III:
TRAVAUX ENTREPRIS DANS LA
ZONE D'ETUDE

Chapitre 5:

HISTORIQUE DU BLOC SAKARAH

1. Introduction

Depuis le début du XXème siècle, il y a eu l'exploration pétrolière intermittente à Madagascar. Les premiers espoirs sont fixés sur les sables bitumineux de Bemolanga et les dépôts d'huile lourde de Tsimiroro dans la partie Nord du bassin de Morondava. On estimait que ces accumulations peuvent renfermer jusqu'à 25 milliards de barils d'hydrocarbures en place. Leurs réservoirs pourraient être le sable de la formation Isalo du groupe Karroo. La roche mère est probablement aussi dans la séquence Karroo.

Auparavant, la synthèse des travaux sismiques et forages réalisés, surtout à partir de 1950, a déduit que c'était cette séquence Karroo qui présentait les meilleurs et les plus nombreuses indices de pétrole dans la grande île et cela a conduit l'Occidental of Madagascar « OXY » à concentrer sa recherche dans la partie Sud-Est du bassin de Morondava où les conditions étaient censés favorables pour trouver des pièges pétroliers.

2. Travaux antérieurs [10] [12]

La zone couverte par la concession Sakaraha a été explorée par la Société des Pétroles de Madagascar (SPM) dans les années 1950 et au début des années 1960 à travers des études géologiques sur terrain, de l'aéromagnétique, de la prospection gravimétrique et des simples prospections sismiques. La SPM a foré quatorze (14) puits sur ou près de la concession Sakaraha. Au début des années 1970, Chevron a tiré douze (12) lignes sismique et effectué trois (3) puits sur ou près de la concession Sakaraha.

2.1. Puits antérieurs

A vrai dire, la SPM avait fait une série de tâtonnement pour l'exploration de la partie sud du Bassin de Morondava y incluse le bloc Sakaraha

Dans sa première phase, l'objectif majeur était le Karroo inférieure, en particulier la Sakamena inférieure. Avec une variation de faciès vers le large, on estimait à une possibilité de formation et d'accumulation d'hydrocarbures dans cette série. De nombreux indices de surface soutenaient cet argument. Le problème de couverture était trouvé dans la Sakamena moyenne et supérieure.

1951: départ au centre du Bassin avec les deux premiers forages BW-1 bis et SW-1. A défaut de l'impuissance de l'appareil (wilson GT-Moyen) de descendre beaucoup plus bas, on s'est rapproché de la bordure du Socle.

1953: quatre forages ont été effectués le long de cette zone dont LW-1, LW-2, AW-1 et AB-1. Aucun de ces forages n'a donné des résultats positifs, malgré la présence des quantités appréciables d'hydrocarbures.

1954: entre-temps, elle effectuait l'exploration détaillée de la partie centrale du bassin, avec l'implantation du forage de Sikily, ayant comme but la reconnaissance du Jurassique. Les résultats inattendus de ce puits ont donné une nouvelle impulsion et orientation de la recherche.

Dans la deuxième phase, les objectifs majeurs devenaient alors: le Crétacé infra-Basaltique et surtout le Jurassique qui sont à la portée de l'appareil. Aussi, on a délaissé un moment l'exploration du Karroo inférieur.

En même temps, on a mis en évidence, par les levés gravimétriques sismiques et magnétiques, qu'il y a une remontée du socle, au-delà de la Fosse-Karroo.

On a coordonné ces deux facteurs, pour la suite des recherches.

1955: outre le forage de la Sikily (SK-1), trois autres puits ont été forés, en premier temps, dans cette partie centrale du bassin, ayant comme objectif le Jurassique et le Crétacé. Ces puits sont: FD-1, LD-1, MG-1.

L'avancement des levés géologiques et géophysiques avait permis de faire une reconnaissance de sondages dans la zone côtière.

En troisième phase, retour sur la zone intérieure du Bassin, en répartissant les travaux de forages sur les deux objectifs majeurs trouvés dans les deux premières phases, avec les deux appareils en mains: 1957-1958: pour Wilson GT- appareil moyen, les objectifs étaient le crétacé et le jurassique, en remontant vers la partie Nord. Cinq puits ont été forés: BJ-1, BRN-1, MAN-1, KAZO-1 et MDB-1.

Pour Idéal-100- Appareil lourd d'une portée de 4000m, l'objectif était celui de la première phase (le Karroo inférieur) en descendant vers le Sud. Quatre puits ont été forés: ME-1, VHD-1, VHD-2 et VHD-2 bis.

1959: la SPM a décidé d'abandonner cette partie sud du Bassin pour aller reprendre les travaux d'exploitation dans la partie nord du Bassin.

2.2. Synthèse succincte des puits dans le bloc Sakaraha

2.2.1 Puits BW-1 bis (Bezaha)

Le premier forage implanté à Bezaha (BW-1 bis) dans la vallée de l'Onilahy, sur un Top "Horst" tellurique, sismique et sondage électrique

Ce puits avait commencé le 9 Août 1951 dans la base de l'Isalo II et terminé le 24 Janvier 1952

Sa raison d'implantation était d'étudier la Sakamena inférieure

Résultats:

La Sakamena inférieure n'était pas atteinte et la profondeur finale était estimée à 2713m dans la Sakamena supérieure. L'Isalo était beaucoup plus épais que prévu

Aucun indice d'hydrocarbures n'a été détecté et tous les réservoirs étaient envahis d'eau douce.

2.2.2 Puits SW-1 (Saloanivo)

Le puits avait commencé le 11 mars 1952 dans la base de Sakamena Moyenne et terminé le 13 décembre 1952

Exploration du "Nose" développé dans la Sakamena Moyenne sur les flancs duquel la sismique montrait d'importants biseaux suggérant l'implantation de ce puits.

On suppose la possibilité d'accumulation pétrolière dans la base de la Sakamena Inférieure, et la croyance de rencontrer des pièges stratigraphiques et de récifs encourageaient également la mise en place de ce puits

Résultats:

L'objectif n'était pas complètement atteint et la profondeur finale touchée par ce puits est de 2650m dans la Sakamena Inférieure.

La Sakamena était beaucoup plus épais que prévu.

On constatait des indices de gaz et d'huile dans Sakamena Inférieure mais les réservoirs étaient très rares.

2.2.3 Puits AB-1 (Ambalabe)

Ce puits est placé au sud du Mangoky, proche de la bordure du Socle, commencé le 29 juin 1955 dans l'Isalo II et terminé le 13 octobre 1955.

L'identification d'un indice actif et de la structure sismique dans la Sakamena inférieure faisait l'objet d'implantation de ce puits

Résultats :

A 1200 m de profondeur, on avait rencontré l'Isalo.

La présence d'une faille dans la Sakamena supérieure entre les profondeurs 1200m à 1725 a été également mentionnée et depuis 1725m jusqu'à 2180m, on pensait toucher directement la Sakamena inférieure et on a resté sur cette profondeur.

Il était noté l'identification d'un indice indéniable (quelques indices d'huiles léger et du gaz en quantité importante) mais l'implantation était mauvaise.

Cet échec fit délaisser le Karoo inférieur pour passer à l'étude du Jurassique et du Karoo Supérieur. La reconnaissance gravimétrique avait alors progressé et mis en évidence une remontée du Socle à l'Ouest de la Fosse Karroo. C'est ainsi que FD 1 a été choisi.

2.2.4 Puits FD-1 (AMPANDRAMITSETAKA ou TANDRANO)

Placé à 20 km au N-E d'Ankazoabo

Implantation: Indication de haut fond gravi et Magnétisme. Structure sismique fermée par des failles à l'Est

- Commencé le 21 Novembre 1955 dans la Série d'Ankazoabo
- Terminé le 27 mars 1956
- Profondeur finale: 2700 m- Lias Supérieur.

Résultats:

Faciès de l'équivalent Karroo très différentes de l'affleurement (Faciès continental pour Isalo-2 et Dogger inférieur en affleurement). Faciès mixte: gréso-calcaire et argile dans le puits.

Réservoirs abondants dans le Dogger, mais remplis d'eau douce.

Ces réservoirs étaient rares au-dessous avec de faibles indices de gaz et de l'eau salée.

Dans la même position générale, en bordure de la Fosse Karroo, à 60 km au Sud de Tanandrano, le forage de Lambosina (LD-1) fut ensuite entrepris dans l'Isalo-2

2.2.5 Puits LD-1 (Lambosina)

Implantation: Sur un gradient gravimétrique avec discordance sismique vers 1650-1800 mètre

Pas de fermeture.

- Commencé le 15 Avril 1956 dans l'Isalo II?
- Terminé le 6 juin 1956.
- Profondeur finale: 2589 mètres-Isalo I (Sakamena?)

Résultats:

Discordance confirmé à 1825m (Isalo 1) plongeant 15°E et au-dessus de l'Isalo II, plongeant 1° ouest.

- Pas de couverture, formations envahies d'eau douce
- Des indices d'asphalte pratiquement connus s'étalaient au-dessus de la discordance entre 1500m et 1825 mètres

Reprenant les résultats de SK-1 qui indiquent un indice important de gaz, le forage suivant fut implanté sensiblement sur le même méridien, à 30 km au Sud-Ouest d'Ankazoabo.

2.2.6 Puits ME-1(Manera)

Implantation: sur une structure gravimétrique très notamment marquée et conformée par la Sismique. L'hypothèse de départ était toujours basée sur la remontée gravimétrique, à l'ouest de la fosse Karroo.

- On pensait à "ridgo" durant la période isalienne où pouvaient exister des dépôts détritiques et récifaux avec, au-dessus, des couvertures (Haut fond possible)
- Commencé le 22 Mai 1957 dans le Crétacé Inférieur Infra-Basaltique
- Terminé le 5 mai 1958
- Profondeur finale: 3911m- Lias Aolénien

Résultats: mise en évidence d'un brusque et gros épaissement de la série de Sakaraha (Jur. Moyen) avec 1500m de calcaire contre un certain affleurement.

- Présence d'une série argilo-schisteux aalénien (équivalent de l'Isalo II) entre 2800 m et le fond.
- Le Dogger calcaire présente des eaux salées à 75g/litre vers 1900m
- A 2930m, des fissures dans le calcaire salénien ont fourni des indices de gaz.
- La série salénienne ne renferme qu'une faible quantité de grès compact, a porosité quasi-nulle et aucun réservoir.
- Haut-fond du socle non comprimé.

2.2.7 Puits VHD-1 (Vohidolo)

Implantation: à 30 km à l'Est de Sakaraha sur une grosse anomalie gravimétrique, coïncidant avec une structure sismique. L'objectif était l'exploration de la Sakamena surtout l'inférieur, avec la possibilité de rencontrer des réservoirs gréseux sous une couverture.

- Commencé le 8 mai 1958 dans l'Isalo II
- Terminé le 10 décembre 1958
- Profondeur finale: 2733 m-socle (Amphibolite)

Résultats:

- Haut fond du Socle confirmé avec "Top" plus haut que prévu.
- Objectif Sakamena (Super) très peu épais et induré jusqu'au socle avec indices d'huile légère

Indices importants { Au-dessus, la sonde avait traversé un Isalo uniformément gréseux avec indices nombreux de bitume sec entre 1000m et 1300m et entre 1700m et 2300m. Il y avait là une épaisseur cumulée de 460 mètres.

Indices importants { Cette épaisseur de 460m, imbibée d'huile, constitue le plus gros indice rencontré dans le Sud du Bassin.

On a déplacé la Sonde alors, à 2.5 km à l'Est de VHD-1

2.2.8 Puits VHD-2 (Vohidolo)

Implantation: rechercher sur le flanc du haut fond du Vohidolo des terrains Intra-Isalo plus épais que VHD-1 et contenant des réservoirs.

- Commencé le 15 Janvier 1959 dans l'Isalo II
- Terminé le 30 Juillet 1959.
- Profondeur finale: 3464m- Isalo II

Résultats:

Objectif non atteint sur instrumentation non résolue.

Les pendages de profondeur s'accroissent de 30° à 50° (2800m) pour se relever lentement à 20° (3200m).

On a repris le problème avec VH-2 bis, forage à mi-chemin de VHD-1 et VHD-2

2.2.9 Puits VHD-2 bis (Vohidolo)

Profondeur finale à 3400mètre-Socle

Résultats:

la Sakamena était à 800m, constituée de grès quartzitiques très compacts avec des lits psammitiques à Esthéria. Des indices de bitume sec ont été rencontrés entre 1900m et 3200m ainsi que d'huile légère au contact du Socle. Toute la série était vraisemblablement envahie d'eau douce.

L'objectif recherché, la Sakamena inférieure gréseuse, n'a pas été atteinte. La faille a mis directement en contact la Sakamena supérieure et le Socle. Cet échec a mis fin les recherches de la SPM dans le Sud du Bassin de Morondava.

2.2.10 Puits SAK-1 (Sakaraha)

Implantation: Le point de forage se trouve environ à 120 km de la côte Ouest vers l'intérieur, à 100km au Nord-Est de Tuléar et à 4 km au Nord-Est de la ville de Sakaraha. Le puits a été foré dans le but de tester une large fermeture trouvée sur trois horizons distincts:

- La discordance Isalo/Sakamena
- La Sakamena "A"
- La Sakamena "B"
 - Commencé le 20 novembre 1973
 - Terminé le 7 avril 1974
 - Profondeur finale: 3813.5m

Résultats:

Manque de couverture et de fermeture suffisante dans l'Isalo

Mauvaise qualité du réservoir de la Sakamena supérieure, due essentiellement à la taille fine de grains et à la présence de kaolin, de silicate et de la calcite dans les interstices. Toutefois, de nombreux indices d'huiles ont été trouvés sur ce puits.

2.3. Conclusions tirées d'après ses résultats de forage

Pour les Côtés positif, on a mis en évidence de 3 horizons stratigraphiques pour la possibilité de formation et d'accumulation d'hydrocarbures.

1. Le Karroo inférieur: La Sakamena Inférieure
2. Le Karroo supérieur: Le Jurassique Moyen
3. Le crétacé Inférieur et Moyen.

Ces horizons ont montré une importante variation latérale de faciès et un épaissement énorme de couche, par rapport aux affleurements.

Ce qui permet de dire que, vers le large, il y avait formation et migration d'hydrocarbures. Nombreux de ces forages ont décelé des indices plus ou moins importants, dans ces horizons mentionnés.

D'Est en Ouest, la formation passe d'un milieu continental vers un milieu marin. La zone de séparation se trouve au niveau de la faille de l'Ilovo, dans la partie Sud du Bassin de Morondava.

Et pour les côtés négatifs, la présence d'eau douce dans les roches magasins exprime l'ouverture du réservoir et la fuite d'hydrocarbure. La question de migration se pose alors "Est-ce que tous les hydrocarbures formés ont subi une migration de manière que tous les pièges forés jusqu'à présent, n'ont pas pu les retenir, même en partie?"

D'autres résultats de forages expliquent déjà cette question, à savoir la découverte de poche de gaz, l'existence d'eau salée dans certains puits, et même des indices d'huile légère. Le problème de la destruction totale d'hydrocarbures, dans le bassin, ne se pose donc pas, quoique certaines interprétations mettent en cause les facteurs de températures. Certes dans certains endroits, proches d'une source volcanique ou d'un mouvement tectonique- (faille), la température est un facteur important pour les hydrocarbures formés aux environs. Il peut y avoir soit une distillation, soit une évaporation totale.

Mais en général, la question qui se pose, actuellement à Madagascar c'est de savoir en quel genre de piège, on a beaucoup plus de chance de trouver une accumulation importante d'hydrocarbures:

- a) Les pièges structuraux classiques: anticlinal, faillé ou non qui pouvait être d'origine volcanique ou tectonique (la presque totalité des puits forés jusqu'à présent).
- b) Les récifs ou les pièges lenticulaires;
- c) Les pièges stratigraphiques, dues à cette variation latérale de faciès importants. Dans ce cas, la recherche est très difficile.

La réponse n'est pas encore donnée avec certitude, mais beaucoup d'experts avancent cette dernière possibilité.

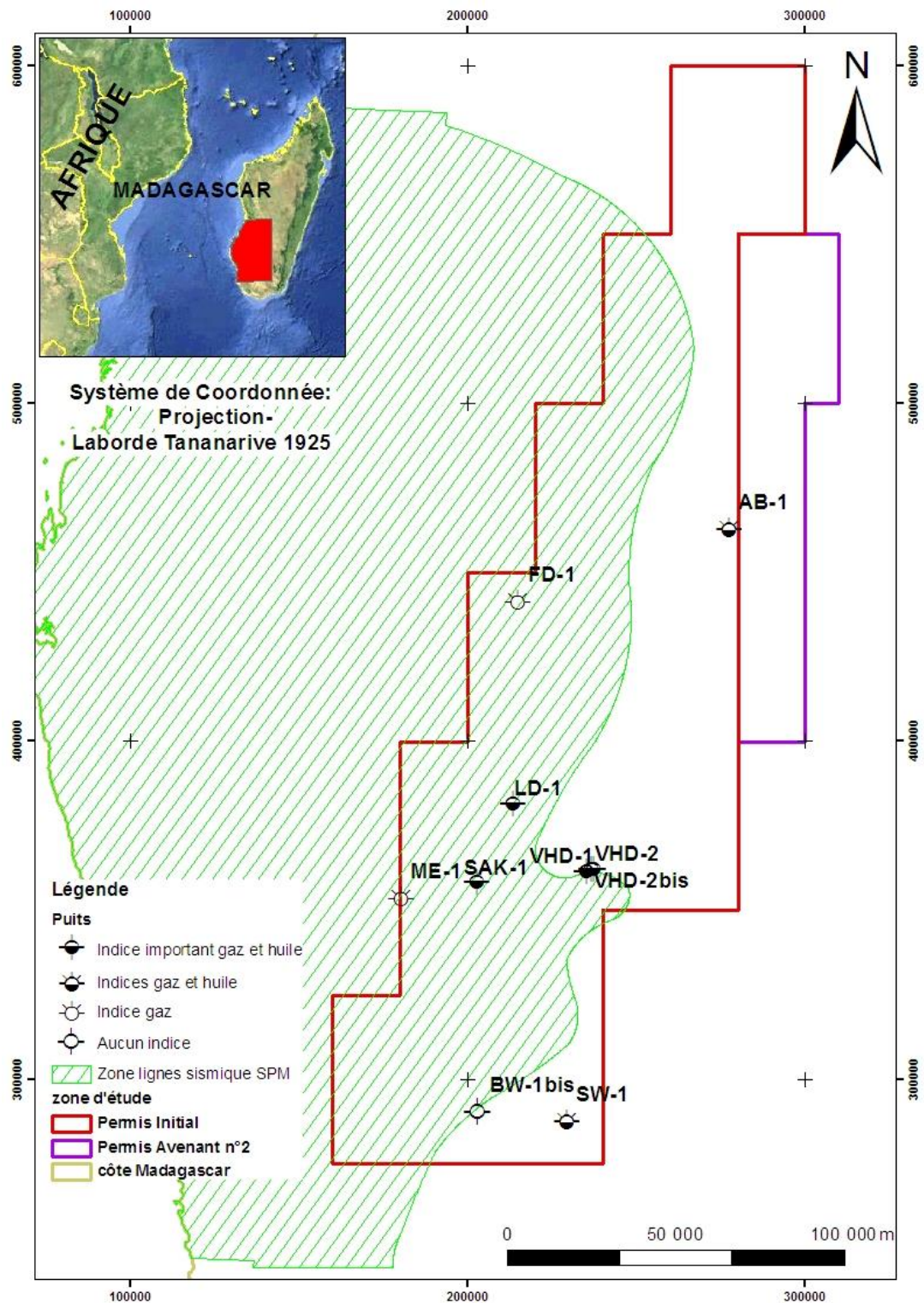


Figure 19: Localisation des anciens puits

A son tour, pour contribuer à la réponse de la problématique posée ci-dessus, la compagnie OXY prenait le relais du SPM en étudiant particulièrement le bloc Sakaraha. Depuis l'acquisition du bloc Sakaraha, Occidental a utilisé plusieurs approches pour évaluer le potentiel pétrolier de la zone. Ceux-ci comprennent:

- la compilation et la réévaluation de toutes les informations géologiques et géophysiques existantes.
- un levé aéromagnétique régional
- les travaux sismiques régionaux
- la photogéologie
- la reconnaissance géologique sur terrain
- l'analyse pétrographique des réservoirs potentiels
- l'évaluation géochimique de la qualité et de la maturité des roches mères
- l'étude palynologique

Chapitre 6:

TRAVAUX GEOLOGIQUES

Bien évidemment, des prospections géologiques, constituant la première phase d'exploration, devaient être menées par les équipes de l'OXY pour leur permettre d'identifier les zones sédimentaires méritant d'être étudiées.

Les méthodes d'approche qu'ils ont utilisé consistent à interpréter les résultats des photographies aériennes et des images satellites accompagnés par des descentes sur terrain où ils ont examiné les affleurements pour se renseigner sur les lithologies des différentes types formations existantes et la structurale. L'analyse au laboratoire des échantillons prélevés a permis de déterminer les caractéristiques de ces formations telles que leurs propriétés physiques (porosité, perméabilité...) leurs âges et leurs natures des sédiments afin de cerner les zones les plus prometteuses. Tous ces résultats ont été ensuite assemblés avec ceux des travaux géophysiques, contribuant ensemble pour la mise en place des puits d'exploration

1. Travaux photo-géologique [11]

Une étude photo-géologique a été menée par Hunting Geology and Geophysics Limited (sous-traitant de l'OXY) dans le bloc Sakaraha et qui s'est prolongée également au-delà de ceci à l'Est et au Sud sur une superficie de 32,500 km². Le travail a été effectué en 1982 et inclus un programme de vérifications sur terrain.

Le secteur du projet s'étend dans le bassin de Morondava datant du Karoo et des récents sédiments.

L'évolution du bassin a été contrôlée par des mouvements des failles intermittentes qui ont affecté l'environnement et le taux des dépôts, et qui ont aussi entraîné des discordances angulaires. Il résulte de la structure en subsurface du bassin qui n'est pas forcément apparente à la surface.

La séquence Karoo du Carbonifère supérieur au Jurassique inférieur comprend les formations groupe Sakoa, groupe Sakamena et groupe Isalo. Celles-ci comportent des couches arénacées/argileuse d'origine continentale, fluvio-deltaïque et marine. A la base, en contact avec le Précambrien, il y a l'unité de tillites (conglomérats glaciaires). Des discordances ont lieu à la frontière inférieure des formations Sakamena et Isalo.

Le Jurassique moyen jusqu'au Santonien comportent une séquence carbonatée, arénacées et d'argile clastique, de roches gypsifères et des fers oolitiques de faciès marins, continentaux et mixte. La base de cette séquence est marquée, au moins localement, par une transgression marine avec la présence d'une discordance angulaire et il y avait également la période de leur réapparition dans le crétacé inférieur. Un épisode volcanique dans le crétacé supérieur a causé une extrusion de laves, intrusion mineure de bouchon et dans le nord-ouest, une invasion majeure de dykes. Ceci a été succédé par une transgression marine de campanian/maastrichtian avec un dépôt de carbonate qui a continué dans le tertiaire inférieur.

Les densités de fracture dépendent de la compétence du substratum rocheux. Les failles sont généralement affaissées à l'ouest mais on remarque aussi des traces indirectes pour les composants du mouvement de décrochement.

Des hautes structures sont visibles à la surface telle que le Horst Vohidolo, le Haut Beseva et le Haut Anaviavy. La structure en surface et la lithologie associée au Haut Beseva peuvent être similaires à ceux enfouis dans le Horst Vohidolo.

Plusieurs structures cachées sont provisoirement déduites par les données de surface. Il s'agit des zones linéaires qui peuvent être associées à des failles et des larges régions pouvant exposer un soulèvement du socle. Ceux-ci, les structures d'Anaviavy et de Vohidolo et de nombreux large anticlinal garantissent beaucoup plus d'attention du point de vue potentielle pétrolière.

2. Investigations sur terrains [8] [9] [13] [14]

Les principaux objectifs de l'investigation étaient d'interpréter les environnements de dépôt des plusieurs unités du groupe Karroo et de déterminer les roches réservoirs et les roches mères potentielles de leurs différentes formations

Les formations Sakoa et Sakamena inférieure ont été interprétées comme des séquences fluvio-deltaïque et lacustres.

Ces deux unités ont des sables de bonnes caractéristiques de réservoir et contiennent assez de schistes et de vases intercalés pour fournir les scellements locaux appropriés.

Les charbons de Sakoa sont des hydrocarbures gazeux matures.

La Sakamena moyenne, qui est transgressive sur la Sakamena inférieure, a été interprétée comme des séquences lacustre et faible deltaïque. Elle a été analysée et promettait des hydrocarbures liquides et gazeux matures. Elle est largement distribuée dans le bassin et pourrait aussi agir comme un scellement régional.

La Sakamena Supérieure est une séquence deltaïque / fluviale / cônes alluviaux. Elle contient des grès qualifiés d'une roche réservoir partout et de scellement adéquat dans la partie basse de la formation.

Les sédiments se sont déposés surtout dans des cônes alluviaux ainsi que dans des environnements de courants anastomosés à méandriformes et de berges.

L'Isalo I est un dépôt des cônes alluviaux qui a de bonnes caractéristiques de réservoir, mais aucuns schistes étanches n'y affleurent. L'Isalo II change de courants anastomosés/cônes alluviaux au Sud et à l'Est en dépôt méandriformes / inondation au Nord. Les faciès au Nord de l'Isalo II contient à la fois des roches réservoirs et des lits étanches.

2.1. Groupe de Sakoa

Le Groupe Sakoa comprend jusqu'à 2000 m du Carbonifère supérieur à tillite Permien moyen, des couches de charbon, et des lits rouges avec un calcaire marin mince sus-jacent d'une série essentiellement continentale.

Le groupe Sakoa a été échantillonné et décrit au voisinage de la mine de charbon Sakoa au sud du bloc Sakaraha. Dix-sept échantillons ont été prélevés. La Sakoa n'a jamais été reconnue dans l'un des puits antérieurs et, par conséquent, aucune carotte n'a été disponible pour l'échantillonnage.

La Sakoa inférieure, ou l'unité tillite, observée sur terrain contient de schiste noir varve très fissile. Ces schistes noirs sont intercalés avec des vases, des argilites, de grès et des vases de chaux. La porosité et la perméabilité d'un échantillon de grès affleuré sont respectivement 11,8% et 1,5 md. La section entière est finement litée et continue sur toute la longueur de l'affleurement d'environ 100 mètres

Les couches de charbon sont assez bien affleurées dans le site de la mine de charbon de Sakoa. Les charbons sont intercalés de grès, de vases et de schistes brun à noir. Les grès sont de grain moyen, bien classé et feldspathique (15-20% feldspath). Ils contiennent beaucoup d'argile en forme de matrice ou ciment et dont la porosité n'est pas visible à l'œil nu. L'analyse de porosité des échantillons affleurés donne une valeur maximale de 15%. Très peu de grains fins (schiste ou argilite) se trouvent intercaler avec les grès. Les grès sont surtout à stratifications croisées. L'ensemble des stratifications croisées sont moyennement épais de 0,5 m.

Les charbons sont aussi interstratifiés avec des vases et des schistes.

Les séries rouges en affleurement se composent de grès de couleur gris-verdâtre à chamois interstratifiés avec des vases argileux de même couleur. Les grès sont à stratification croisée, ayant des grains fin à grossiers, pauvrement classé, angulaire à sous-angulaire et feldspathique (15-20% feldspath). La porosité inter-granulaire n'est pas estimable à l'œil nu. L'analyse au laboratoire des échantillons affleurés donne des porosités jusqu'à 20%.

2.1.1 Environnement de dépôt de la Sakoa

L'ensemble du Groupe Sakoa peut être caractérisé par de séquences lacustre /fluvial. L'apport de détritux est considéré comme étant contrôlé par l'intensité des mouvements des failles au bord du bassin. Les dépôts clastiques augmentent avec le soulèvement des arrière-pays

2.2. Groupe SAKAMENA

Le Permien supérieur à Trias moyen du groupe Sakamena a une épaisseur estimée d'au moins 4000m. L'épaisseur totale de la Sakamena augmente en s'éloignant de la bordure orientale du bassin et paraît, selon les données sismiques et magnétiques, dépasser cette estimation de 50% ou plus dans les parties profondes du bassin. Le Groupe Sakamena est historiquement divisé en trois (3) unités telles que la Sakamena inférieure, Sakamena moyenne et Sakamena supérieure d'après la lithologie. Les enquêtes sur terrain et l'étude des photographies aériennes ont confirmé cette subdivision

2.2.1 Sakamena Inférieure

La Sakamena inférieure repose en discordance sur la Sakoa ou sur le socle cristallin quand cette dernière est absente. A l'est du Massif d'Isalo, près de la ville de Ranohira, la Sakamena inférieure est bien affleurée. Plusieurs affleurements ont été examinés et échantillonnés. Des échantillons de carottes issus de deux (2) puits dans cette zone (LW-1 et LW-2) ont été également recueillis. La Sakamena inférieure, près de Ranohira, se compose des grès vert clair à vert-gris, des argilites et de quelques vases avec rarement de schiste. Les grès représentent 40-60% de la section. Près de la base, un conglomérat à galets avec de limon en matrice de couleur gris-verdâtre est affleuré. Les grès ont des grains de taille variable (très fins à moyens, rarement à grains grossiers).

Ils ont généralement un bon classement. Les lits sont souvent minces (10-50m). De sables épais (jusqu'à 3m) résultant d'une érosion verticale sont également présents, mais pas aussi souvent que des lits minces continus. La stratification croisée est presque toujours présent dans les deux types de dépôts. Les formations Sakamena inférieures sont feldspathiques et

des argiles en matrice / ciment sont souvent présentes. Les valeurs de porosité de 12 échantillons affleurés vont de 15,9% à 32,9%, la moyenne étant de 23,9%.

Leurs valeurs de perméabilités sont plus de 30 md.

Dans des déblais routiers récents, à l'Est de Ranohira, de roches poreuses lentiformes tachées d'hydrocarbures noirs ont été échantillonnées. L'analyse au laboratoire de ces matériaux a révélé des traces de condensation.

De bons affleurements de la Sakamena inférieure ont été observés au Sud du bloc Sakaraha, à l'Est et au Nord-Est de la ville de Betioky le long de la rivière Sakamena. Des affleurements ont été aussi visités près de la ville de Belamoty dans le coin Sud-Est de notre zone. Les échantillons de carottes de cette zone proviennent de 2 puits (SW-1 et AW-1)

Les lithologies de la Sakamena inférieure dans le Sud sont essentiellement les mêmes que l'on voit dans la zone de Ranohira. Les affleurements sont constitués de lits minces, de grains très fins à fins moyennement bien classés, de grès à stratification croisée intercalés avec des argilites et rarement de schistes. Les sables sont feldspathiques et argileux. Une calcite en ciment est présente. Les argilites sont noirs au gris foncés, brun et gris-verdâtre. Des lits de limon apparaissent généralement fissiles en raison de l'intercalation des argiles très fines (<5mm). Des fragments de plantes sont parfois conservés dans des roches argileuses. L'épaisseur moyenne des grès et des lits d'argilite sont 1-3m. Le lit est à la fois massif et à stratification croisée.

2.2.2 Sakamena Moyenne

La Sakamena moyenne a été décrite par Besairie (1972) jusqu'à 300m de schiste très argileux à nodules septarian, de faible grès à stratification croisée et de calcaire rare. La Sakamena moyenne contient des poissons qui ont vécu dans le Trias inférieur (Besairie, 1972)

En raison de la forte teneur en boue de la Sakamena Moyenne, il tend à se produire de talus doux plutôt que des récifs d'affleurement. Néanmoins, trois échantillons ont été prélevés dans la zone Ranohira. En outre, quatre carottes de deux puits près de Ranohira ont été prélevées pour être analysées au laboratoire.

La Sakamena Moyenne au nord de Ranohira se compose de schistes laminés de couleurs gris verdâtre ou de vases, d'argilites et de grès à grains fins. L'érosion verticale est aussi absente. Aucune bioturbation, macro-fossiles, ou signes de composition subaérienne ont été observés.

La Sakamena moyenne a été en plus échantillonnée dans deux (2) localités le long de la rivière Sakamena juste au Sud du bloc Sakaraha. Les deux zones sont séparées d'une distance d'environ 20 km. Les affleurements au Sud sont constitués de schistes gris verdâtre, d'argilites et de grès interstratifiés. Les schistes sont limoneux, finement lités à laminés, fissiles et parfois nodulaires. Les nodules septarian sont calcaireux en forme de disque et sont orientés suivant leurs grands axes parallèles à la literie. Les nodules ont été observés dans un seul horizon de lit. Aucuns macro-fossiles ou des traces de fossiles ont été observés. Les grès interstratifiés constituent 10-50% de la Sakamena moyenne affleurée de 5-10m d'épaisseur. Des lits de grès séparés peuvent atteindre jusqu'à un mètre d'épaisseur mais ne dépassent pas généralement 20 cm. Les tailles des grains varient de très fins à fins, bien classés et à stratification croisée commune dans des lits plus minces.

2.2.3 Sakamena supérieure

Le Trias moyen Sakamena supérieure a été décrit par Radelli (1975) comme composé de grès de 500-600m d'épaisseur et d'argilites alternatifs, dépourvu de fossiles. Besairie (1972) décrit la Sakamena supérieure constituée de grès au sud de la rivière Mangoky avec une teneur en argile croissant vers le sud. Il a donné une épaisseur moyenne d'environ 500m à partir des données d'échantillons en affleurement. Dans le périmètre de l'OXY, la Sakamena supérieure est observée et échantillonnée dans trois zones : au nord de Ranohira, au sud du bloc Sakaraha et le long de la rive au Nord de la rivière Onilahy. Au Nord de Ranohira la Sakamena supérieure est composée de grès intercalés avec des vases ou des schistes silteux. Les lits de grès sont généralement de 12 cm d'épaisseur et souvent à stratification croisée. Les sables sont généralement de grains très fins à fins, micacés, de couleur grises, cimenté de calcites en partie, et constitue le 40-60% de la section partie basse de la Sakamena supérieure. La teneur augmente environ à 90% au près du top de l'unité et le contact avec le sus-jacent grès de l'Isalo I apparaît petit à petit. Sur le terrain, leur contact est généralement invisible à cause des failles.

Le grès le plus haut de la Sakamena supérieure a des grains très fins à fins, propre, bien classés, sub-angulaire à sub-arrondis, généralement cimenté de calcite et largement à stratification croisée avec une série individuelle souvent moins de 10 cm d'épaisseur. Le lit est mince (10-15 cm) et régulier. Les boues argileuses sont intercalées le plus souvent avec des limons que d'argiles. Les boues argileuses dans la partie basse de la Sakamena supérieure ressemblent à celles de la Sakamena moyenne. Les schistes et les argilites sont fissiles, silteux, gris-verdâtre et parfois contiennent des calcaires à nodules septarian. Trois

(3) grès de la Sakamena supérieure de la région Ranohira ont été analysés en porosité et perméabilité. Les porosités et perméabilités de ces trois grès sont respectivement de 27,2% et pas de mesure possible de perméabilité ; 9,9% et 0,06 md ; et 30,4% et pas de mesure possible de perméabilité.

La Sakamena supérieure a été observée et échantillonnée à l'Est de Betioky, juste au sud du bloc Sakaraha. Les grès y sont souvent fines et plus rares à grain moyen, bien classés, propres et contiennent jusqu'à 20% de feldspath. La stratification croisée est commune de couleur gris-verdâtre, généralement de lits de sables fins (10-30cm). Les boues argileuses sont interstratifiées et constituent jusqu'à 70% de la section affleurée près du contact à la Sakamena moyenne, mais la teneur en sable augmente progressivement dans l'unité. Le prélèvement d'échantillon a été difficile en raison de l'altération très profonde. La porosité et la perméabilité des quatre (4) échantillons de grès affleurés sont respectivement en moyenne 24,3% et 575 md.

Des affleurements de la Sakamena supérieure ont été également examinés et échantillonnés le long du côté nord de la rivière Onilahy, sur le flanc nord d'un dôme de socle qui est évident à partir des observations sur terrain et des données géophysiques (gravimétriques). Basé sur l'interprétation de la photo aérienne, la Sakamena moyenne s'amincit manifestement sur ce dôme. Le contact de la Sakamena moyenne avec la Sakamena supérieure est probablement en discordance dans cette partie. La lithologie de la Sakamena supérieure est constituée de grès grossier à galets, rarement conglomératique, mal classés, sus-jacent de schistes silteux gris-verdâtre de la Sakamena moyenne. Le grès est à stratification croisée, feldspathique et contient des concrétions qui révèlent des débris végétaux lorsqu'elles se séparent

En haut de la section, les grès de la Sakamena supérieure sont à grains plus fins, mieux classés et contiennent des boues argileuses et des argilites vert et rouge à violet interstratifiées. Les sables sont à stratification croisée et ont parfois des structures de déformation de sédiments (convolute literie) conservés. Le long de la rivière Onilahy, la couche la plus haute de la Sakamena Supérieure est un lit de 90-100% mince à épais (0,1-1m), grès à stratification croisée de couleur jaune au rouge-brun. Les tailles des grains sont de fin à moyen avec un bon à moyen classement de grains sub-arrondis, et occasionnellement à galets. Le contact avec le sus-jacent grès de l'Isalo I est progressif. La porosité et la perméabilité moyenne des cinq échantillons en affleurement dans cette région sont respectivement 24,8% et 624md. L'échantillon recueilli de la carotte du puits BW-1

bis donne une porosité moyenne de 9,0% et de perméabilité moins d'un md à 2400-2500m de profondeur

2.2.4 L'environnement de dépôt de la Sakamena

Certaines interprétations place la séquence grès / siltite / argilite de la Sakamena Inférieure dans un delta subaquatique ou delta alluvionnaire. Dans cet environnement à faible énergie, les sables pourraient être déposés par l'écoulement de turbidité. En effet, les sables sont couramment à stratification croisée, et classé. L'apport de sédiments est probablement contrôlé par la tectonique.

L'environnement de dépôt de la Sakamena Moyenne est interprété comme lacustre. La période de tectonique calme qui a débuté du milieu à la fin du temps de la Sakamena inférieure poursuivi tout au long du dépôt de la Sakamena moyenne. C'était le moment à subsidence lente, et que la rive du lac transgresse vers l'Est et au Sud-Est, l'eau est devenue plus profonde

Cet approfondissement du lac aurait bloqué les conditions euxiniques plus répandues conduisant à la préservation de la roche source.

Les horizons de la Sakamena Moyenne qui contiennent des fossiles marins sont indicatifs des incursions marines dans le bassin principalement lacustre. La période de la Sakamena supérieure marque un retour à une zone source tectoniquement actif provoquant un delta alluvionnaire/ fluviaux / de cône de déjection fluviale de la Sakamena Moyenne. La Sakamena supérieure est passée d'un delta subaquatique à un delta subaérien. Ces sédiments tardifs sont principalement à stratifications croisés.

2.3. Groupe de l'Isalo

Le Trias moyen au Jurassique inférieur du groupe de l'Isalo, recouvrant le groupe Sakamena, est l'unité la plus récente de la séquence Karroo de Madagascar. L'Isalo est divisé en deux (2) unités telles que l'Isalo I et l'Isalo II d'après la lithologie et la couleur. Le plus ancien Isalo I est de couleur blanc à gris clair et est constituée partout de grès à stratification fortement croisée. Le sus-jacent Isalo II est de couleur brun à rougeâtre, et contient des dépôts de boue et de limon aussi bien que de sable. Besairie (1972) a estimé l'épaisseur de l'Isalo à environ 1000-4000m en affleurement et beaucoup plus épais dans le sous-sol.

2.3.1 Isalo I

L'Isalo I est bien affleurée de la rivière Mangoky au Nord jusqu'à la rivière Onilahy au Sud. La majeure partie de cet affleurement constitue le Massif de l'Isalo, une grande longueur de 150 km, une chaîne de montagne de grès d'Isalo I. Le massif est traversé par la route 7 à environ 25 km à l'Ouest de Ranohira. Dans cette localité l'Isalo I a généralement des centaines de mètres d'épaisseur. Il est presque à 100% de grès à stratification fortement croisée. La série à stratification croisée a 10 cm à 1 m ou plus d'épaisseur, de séries individuelles souvent fines vers le haut et d'érosions verticales très fréquentes. La granulométrie des sables varie de très fine à galet, avec des lentilles à conglomérats étant rarement présent. Son classement est variable, étant modérément bon à médiocre. La stratification croisée est plus fréquente dans les lits à grain grossier. Aucun schiste ou boue argileux ont été observés dans les séquences de lits, mais de fragments de schistes sont parfois présents dans le grès. Le grès contient 70-100% de quartz, et de feldspath occupant le constituant secondaire le plus fréquent.

L'Isalo I affleurant le long de la rivière Onilahy à l'extrémité sud du Massif de l'Isalo est le même grès de quartz à stratification croisée, mal à moyennement bien classés décrit ci-dessus.

À l'ouest du Massif de l'Isalo, juste au sud de la RN 7, les sables de l'Isalo I sont mal classés, de galets à stratification croisée, et des argilites de couleur brun rougeâtre à violet jusqu'à 5m d'épaisseur sont interstratifiés. Les argilites sont énormes, et les sommets sont des surfaces d'érosion, les lits étant recouverts par des dépôts.

2.3.2 Isalo II

Le Trias supérieur au Jurassique inférieur de l'Isalo II est essentiellement une séquence de lits rouges. Besairie (1972) a estimé que l'épaisseur de la Isalo II est comprise entre 100 à 1600 m. Sur terrain, l'Isalo II a été observé et décrit au Nord du fleuve Mangoky près de Beroroha où il est composé de grès à grains fins, modérément bien classés, propres, intercalés avec des limons et de boues laminées. Dans cette localité, l'Isalo II est de couleur gris verdâtre. Dans le Sud, près de Bezaha, l'unité est de grès de couleur rouge, fréquemment à grains grossiers à galets associé avec limon et boue. Les lits ne sont pas toujours bien définis mais les stratifications croisées sont généralement visibles lorsque ces lits sont discernables.

L’affleurement de l’Isalo II entre Sakaraha et le Massif de l’Isalo consiste en grès mal classés à grains grossiers conglomératiques intercalées avec de boues argileuses. Les sables sont très argileux et de couleurs brun-rougeâtre.

2.3.3 Environnement de dépôt de l’Isalo

Les dépôts de l’Isalo I manquent des conglomérats très grossiers habituellement trouvés dans de plusieurs dépôts de cône alluvial proche. Ce faciès est vu dans le Massif de l’Isalo à l’Est et le long de la rivière Onilahy au Sud. Ces deux zones sont très proches du socle cristallin qui entraînait les sédiments. L’Isalo I affleure à l’Ouest du Massif de l’Isalo qui contient quelques argilites épais et représente un environnement de faible énergie loin de la source.

Des indicateurs paléo-courants observés dans le terrain indiquent une direction d’écoulement Nord-Ouest.

Le sus-jacent Isalo II contient des roches argileuses à pourcentage plus élevé que son sous-jacent Isalo I. Ces dépôts représentent une période de tectonique plus calme lorsque l’apport de sédiments a ralenti par rapport au temps de l’Isalo I. Le changement de l’Isalo II au Nord de la rivière Mangoky en sable à grain fin, propre, intercalé avec de limons et d’argiles laminées, est interprété comme un changement de courant anastomosés / cône alluviale au Sud et à l’Est, à méandriiformes. Ce changement peut être dû, en partie, à un ralentissement du taux de soulèvement dans la zone source.

3. Roches mères, roches réservoirs, roches couvertures

Cinq (5) des six (6) formations du système Karroo contiennent des sables qualifiés de roches réservoirs d’après l’analyse de leurs échantillons affleurés et carottes.

Les sables du groupe Sakoa ont des porosités de 10-20% selon les échantillons affleurés et pourraient être ainsi des roches réservoirs. Les argilites de la série rouge seraient des roches de scellements adéquats et les couches à charbons interstratifiés sont des roches mères à hydrocarbure gazeux mature

Quant au groupe Sakamena, les porosités des sables échantillonnés en surface et carottés atteignent respectivement 33% et 24%.

Il est à remarquer que la qualité du réservoir de la Sakamena inférieure diminue avec la profondeur et comme la Sakoa, cette dernière contient des roches argileuses interstratifiées pour le rôle d’une roche couverture. Les schistes de la Sakamena inférieure ont été justifiés des roches mères à hydrocarbures liquides et gazeux matures

Le manque de développement du sable dans la formation Sakamena moyenne déprécie l'existence de sa roche réservoir. Toutefois, les formations qui la constituent indiquent l'existence des roches mères à hydrocarbure liquide à gazeux matures et en raison de sa large extension d'argilites, celles-ci peuvent être considérées comme de bonnes roches de scellement.

La série Sakamena Supérieure contient des sables étendus qualifiés de roches réservoirs. Ses porosités s'élèvent jusqu'à 22% pour les carottes, et jusqu'à 30% d'après les échantillons affleurés. La partie basse de la Sakamena supérieure présente des roches argileuses interstratifiées pouvant assurer l'étanchéité aux fluides.

Pour la formation Isalo I, elle est formée de presque 100% de sable dont les porosités arrivent jusqu'à 23% pour les échantillons de carotte et 30% selon les échantillons affleurés. Le manque de schistes dans ses affleurements suppose l'impossibilité de trouver des hydrocarbures matures dans l'Isalo I.

Les porosités des sables constituant l'Isalo II atteignent jusqu'à 30% selon les échantillons affleurés. La teneur en argile de la formation Isalo II augmente vers le nord et vers l'ouest où elle peut garantir la fonction d'une roche couverture. De la même manière que l'Isalo I, la reconnaissance des roches mères matures dans l'Isalo II est impensable.

Chapitre 7:

TRAVAUX GEOPHYSIQUES

1. Prospections gravimétrique et magnétique [15] [16] [17]

Après les travaux géologiques dont l'objectif était de fournir des interprétations structurales et lithologiques, les apports des travaux géophysiques ont été également sollicités dans la zone d'étude afin de se renseigner sur les comportements en profondeur.

La prospection gravimétrique se repose sur la détermination des signatures des structures géologiques en gravimétrie. Dans la prospection pétrolière, le contraste de densité entre la formation récifale et les roches sédimentaires l'entourant pourrait contribuer à la recherche des structures pièges (dômes de sel, anticlinaux, formations récifales) ou à connaître l'épaisseur des sédiments ou d'un bassin

La prospection magnétique consiste à chercher et à localiser les roches, les formations, les gisements par les anomalies ou variations locales qu'ils produisent dans le champ terrestre. Dans le cadre d'une exploration pétrolière, elle permet d'étudier les bassins sédimentaire à partir des anomalies causées par des structures du socle ou à sa topographie et aide à ce point pour l'identification des pièges structuraux (failles, plis).

Une carte polaire magnétique réduite et une autre filtrée, une carte de Bouguer filtrée et une carte structurale du bloc Sakaraha ont été produites et utilisées conjointement avec les données sismiques pour une meilleure interprétation structurale de la zone d'étude.

Six interprétations sismiques ont été modélisées avant de déterminer si l'horizon le plus profond était conforme avec le sous-sol magnétique.

Les données que l'on a utilisées durant ces études étaient:

- La carte anomalie de Bouger de la SPM (1956 compagnie genres Géophysique)
- cartes d'intensité totale du champ magnétique de l'Aero Service Co, 1982
- synthèse sur l'interprétation stratigraphique. Zone Sakaraha, Chasse 1983
- les résultats des lignes sismiques OM82-01 → OM82-08

1.1. Résultats et observations

La carte d'anomalie Bouguer, filtrée passe-bas et la carte magnétique réduite au pôle ont été interprétées simultanément pour faire sortir les caractéristiques structurales de la zone d'étude.

La carte structurale obtenue montre une faille de direction Nord-Ouest-sud-est dominante caractérisée surtout d'un mouvement décrochant qui lui est associé (Cf. Annexe 3).

Une seconde tendance de direction Nord-Nord-Est au Sud-Sud-Ouest a été aussi remarquée. Cette tendance montre un mouvement plus vertical qu'horizontal. Ces deux tendances semblent changer de sens de temps en temps si elles seront suivies dans toute distance.

Une troisième tendance majeure est vue le long de la côte orientale du bloc Sakaraha, le système de failles marqué approximativement Nord-Sud est associé avec le massif de l'Isalo.

Un grand bassin se trouvant au centre-Est de la zone d'étude, dont des tendances anticlinales sont marqués sur la carte structurale. Dans la plupart des cas, l'axe de l'anomalie de Bouguer est décalé vers l'ouest de l'axe magnétique. Ce déplacement vers l'Ouest reflète la différence entre l'axe de sédimentation (par gravité) et l'axe structural du socle (magnétique). Les axes magnétiques sont décalés vue de la forte amplitude générée par la faille verticale.

Plusieurs caractéristiques intéressantes non mentionnés précédemment ont été aussi observées à la suite de la réduction au pôle des données magnétique et du filtrage passe-haut des deux données.

1.2. Résumé

Ces études des données gravimétriques et magnétiques du bloc Sakaraha ont apporté plusieurs contributions pour la suite des travaux d'exploration. En effet, les orientations des failles ont été généralement définies et qui devraient aider les géophysiciens pour la mise en place des futures lignes sismiques.

En outre, la présence d'un grand bassin a été confirmée dans la partie centre-Est de la zone d'étude. Ce bassin n'était pas bien défini par les données sismiques en raison des problèmes d'acoustiques, lors de l'acquisition des données.

L'évaluation magnétique du modèle du socle suggérée à partir de l'information des données sismiques et vitesses était capitale à connaître si les réflecteurs en profondeur sont conformes avec le socle magnétique.

Il était recommandé que les données gravimétriques doivent être incorporées dans toute éventuelle campagne d'exploration dans la zone Sakaraha. L'intégration des données gravimétriques et magnétiques avec les données sismiques et géologiques peuvent aboutir,

en effet, à des interprétations optimales et de l'évaluation de certaines structures pétrolières dans le bloc.

2. Prospection sismique [18] [19] [20]

L'objectif de la campagne sismique c'est de définir les structures souterraines et/ou les caractéristiques favorables au réservoir. Outre les traces de tirs sismiques rencontrés dans la concession Sakaraha réalisés par la SPM et la Chevron (lignes MR), l'Occidental effectuait pareillement des tirs sismiques, portant le sigle OM avec l'année d'acquisition, pour les reconnaissances en profondeur. Durant la période d'exploration, l'OXY a réussi à tirer 83 lignes sismiques faisant au total 2721 km. Les positions de ces lignes sismiques se sont réparties dans quatre (4) zones telles que la charnière Malio, Lambosina, Vohibasina et le massif du Makay.

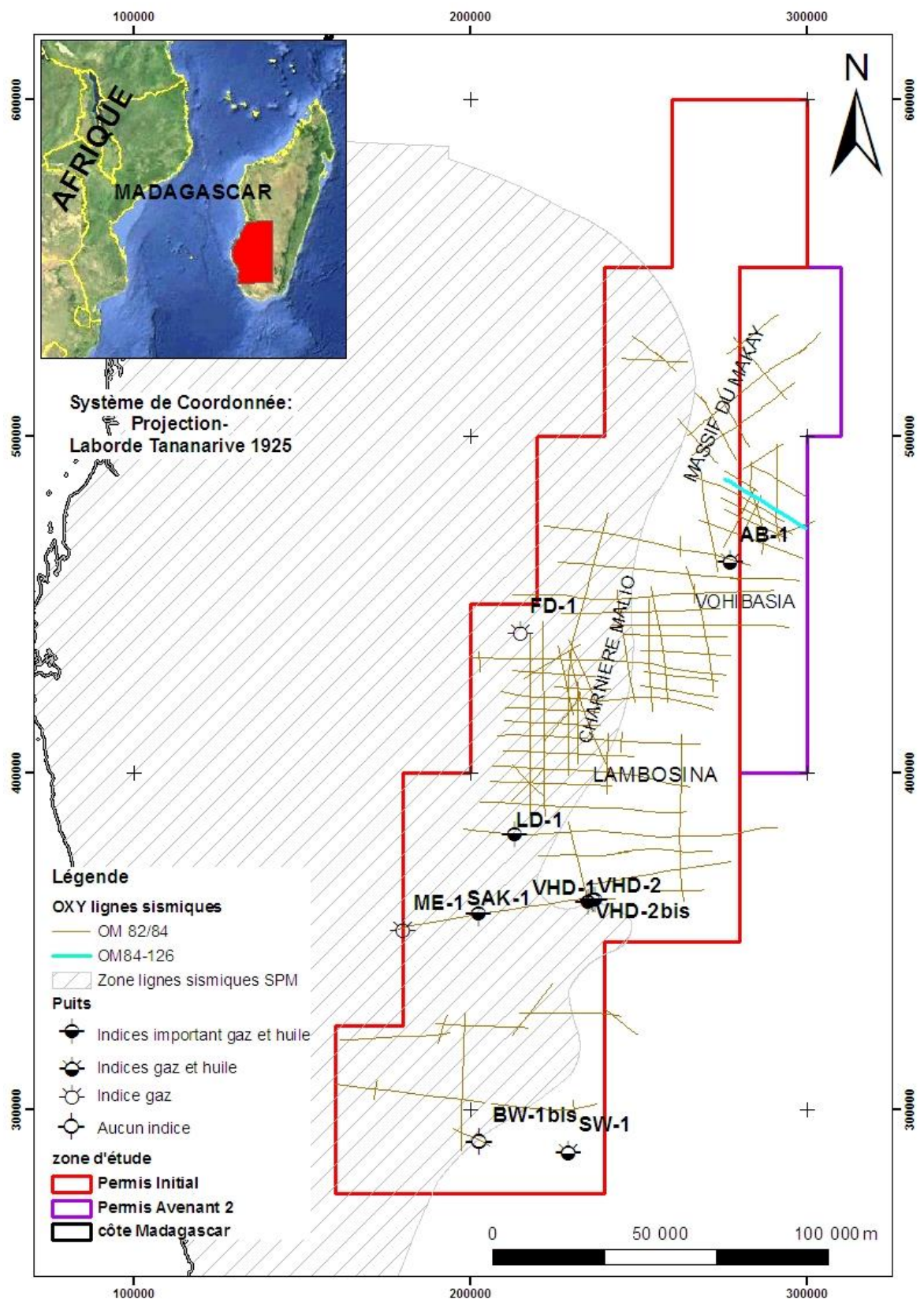


Figure 20: Localisation des lignes sismiques OM

Voici un profil sismique qui est trouvé dans la partie de Vohibasia avec une direction quasiment Ouest-Est (Figure 19, Trait bleu).

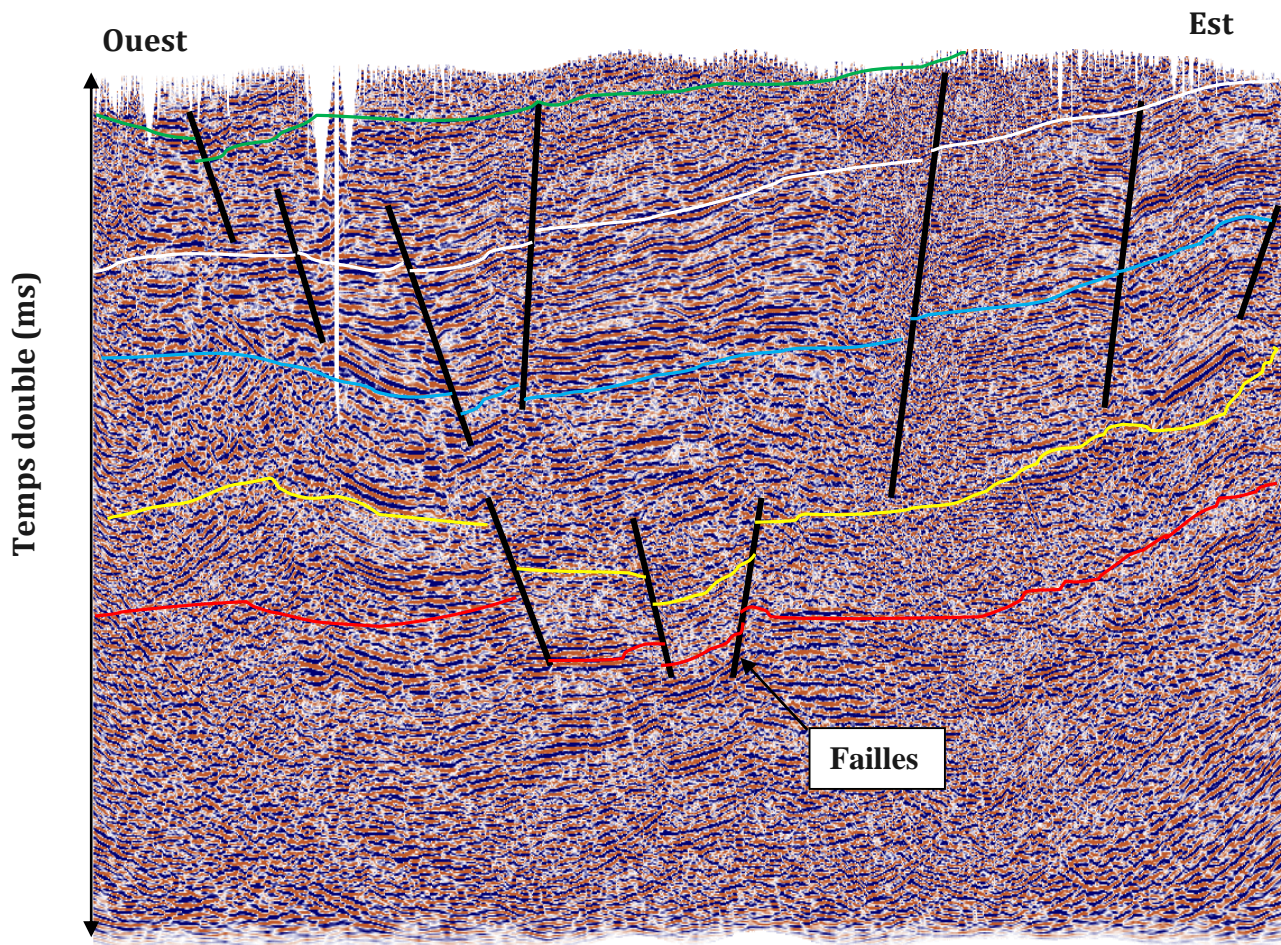


Figure 21: Section sismique OM 84-126 (Secteur Vohibasia)

Cette image sismique représente six méga séquences de bas en haut:

- **Le premier horizon**, trait rouge sur la figure, est caractérisé par un réflecteur discontinue et discordante typique d'un toit du socle. On voit très bien qu'elle a une configuration «Chaotique». La configuration chaotique représente en générale des coulées de magma en profondeur et il n'y a pas encore de dépôt de sédiments, alors on peut tirer facilement que cette méga séquence s'agit du socle.
- **Le second horizon**, trait jaune sur la figure, est un réflecteur discontinu dont il est caractérisé par la variation d'amplitude et de fréquence de l'Ouest en Est :
 - A l'Ouest, la section représente des réflecteurs discontinus de plus ou moins à grande amplitude et à haute fréquence. Elle a une configuration perturbée avec une faible inclinaison orientée vers l'Est.

- Au milieu, elle représente encore des réflecteurs discontinues de plus ou moins à l'amplitude moyenne et à haute fréquence, et ceci avec une configuration perturbée.
- A l'Est, la section a une terminaison inclinée qui épouse la forme du socle.

Cette méga séquence, marquée par sa forme et son épaisseur, s'agit d'un faible apport de sédiments probablement du groupe Karroo; de plus elle a été affectée par des accidents (rifting Karroo d'âge Carbonifère supérieur-Permien au Jurassique inférieur). On peut dire qu'elle s'agit du groupe Karroo dans le groupe Sakoa.

- **Le troisième horizon**, trait coloré en bleu sur la figure, est caractérisé par une surface de réflecteur discontinue à grande amplitude et à haute fréquence. Il est à configuration subparallèle de l'Ouest à l'Est, il a de la forme anticlinale du sédiment sous-jacent (groupe Karroo). C'est peut-être dans le groupe d'Isalo.

- **Le quatrième méga séquence**, coloré en blanc, s'agit d'un important paquet de sédiments probablement du super groupe Karroo et c'est justifier par sa forme et son épaisseur.

Elle est caractérisée par une surface de réflecteur continue à grande amplitude et à haute fréquence :

- La partie Ouest est marquée par la configuration chaotique et une faible inclinaison qui longe vers l'Est.
- La partie centrale est caractérisée par une surface de réflecteur peu continue avec une configuration subparallèle. Elle est inclinée avec une forte pente qui plonge vers l'Ouest.
- A l'Est, elle garde une configuration subparallèle.

Cette méga séquence, d'après sa forme et son épaisseur, s'agit d'un fort apport de sédiments probablement du groupe Karroo (groupe Sakamena).

- **Le cinquième méga séquence** (couleur vert) contient des réflecteurs parallèles, fréquents et à grande amplitude à l'Ouest et qui s'affleure à l'Est. De l'Est en Ouest, on a :

- A l'Ouest, marquée par sa configuration complexe avec une faible inclinaison qui plonge vers l'est.
- Au milieu, il est caractérisé par une surface de réflecteur peu continue avec une configuration subparallèle. Elle est inclinée avec une forte pente vers l'Est.
- A l'Est, elle garde une configuration subparallèle.

On peut l'identifier comme la série Post-Karroo. (Probablement le Jurassique)

-La dernière méga séquence se voit totalement en surface, elle se trouve à l'Ouest et dans la partie centrale du profil, son épaisseur est moins grande. Elle est formée par des réflecteurs à faible amplitude et à basse fréquence, ce qui définit une configuration parallèle. Elle est constituée par une alternance de grès et de calcaire intercalés par une formation basaltique. C'est la série de crétacé.

De ce fait, on a obtenu la relation entre la chronostratigraphie et les méga séquences identifiées dans la section sismique (Figure 21).

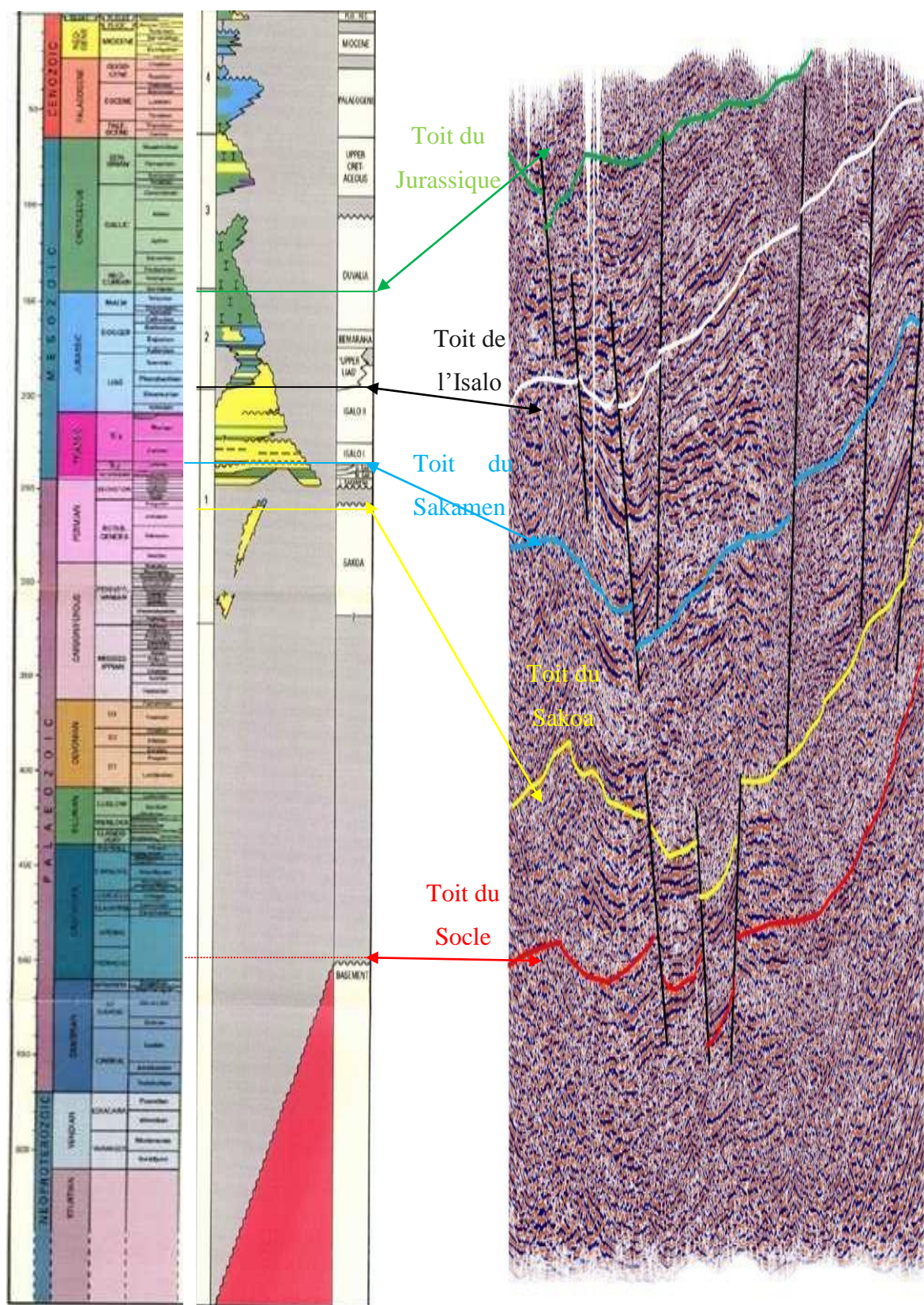


Figure 22: Corrélation entre chronostratigraphie et méga séquence de section Vohibasia

Chapitre 8:

SYNTHESE DES RESULTATS GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES

1. Synthèse géologique et géophysique

Toutes ces différentes méthodes d'explorations citées ci-dessous menées par l'Occidental dans le bloc Sakaraha concordent généralement en un seul objectif : localiser des zones perspectives déduite de la caractérisation de leurs différentes formations si ces dernières constituent les composants indispensables à la formation d'un gisement pétrolier telles que les roches mères, les roches réservoirs et les roches du scellement ainsi que l'identification des types de piège pouvant rencontrer dans la zone d'étude.

Les résultats donnés par les études géologiques valorisés par l'analyse des échantillons (affleurements, carottes) et la palynologie permettent de définir ceux qui seraient les roches mères, les roches réservoirs et les roches du scellement constituant le système pétrolier. Il ressort de ces études qu'en général les formations gréseuses rencontrées dans le groupe Sakoa, la série Sakamena Supérieure et le groupe Isalo promettent une bonne caractéristique de roches réservoirs tandis que les argilites assurent le rôle d'une formation étanche. Les couches à charbons de la Sakoa ainsi que les formations schisteuses de la Sakamena sont considérées comme étant des roches mères à hydrocarbures gazeux ou/et liquides matures.

En ce qui concerne les résultats des travaux géophysiques, leur modélisation conjointe permet d'avoir d'idée sur le modèle du sous-sol dans la zone d'étude. En effet, leurs résultats informent les différentes structures en profondeur telles que les lithostratigraphies et les différents types de pièges d'où l'évaluation de la présence ou non de gisement d'hydrocarbures dans la zone d'étude.

2. Proposition des structures pétrolières (Leads) [10] [20] [21] [22]

Grace à ses différentes méthodes d'approches citées ci-dessus, l'OXY estimait la possibilité d'existence de plusieurs structures pétrolières (leads) dans le bloc Sakaraha. Un sous forme de répartition en trois zones a été adapté pour mieux catégoriser les zones potentielles selon leurs localisations, tous après avoir recours à leurs modélisations géologiques basées principalement sur les interprétations sismiques. Nous connaissons

ainsi la partie Nord mise en valeur par la haute Makay et Vohibasia, la partie centrale marquée par la fosse Berenty et Lambosina et enfin, seulement l'Ambanasa faisant participer la partie Sud.

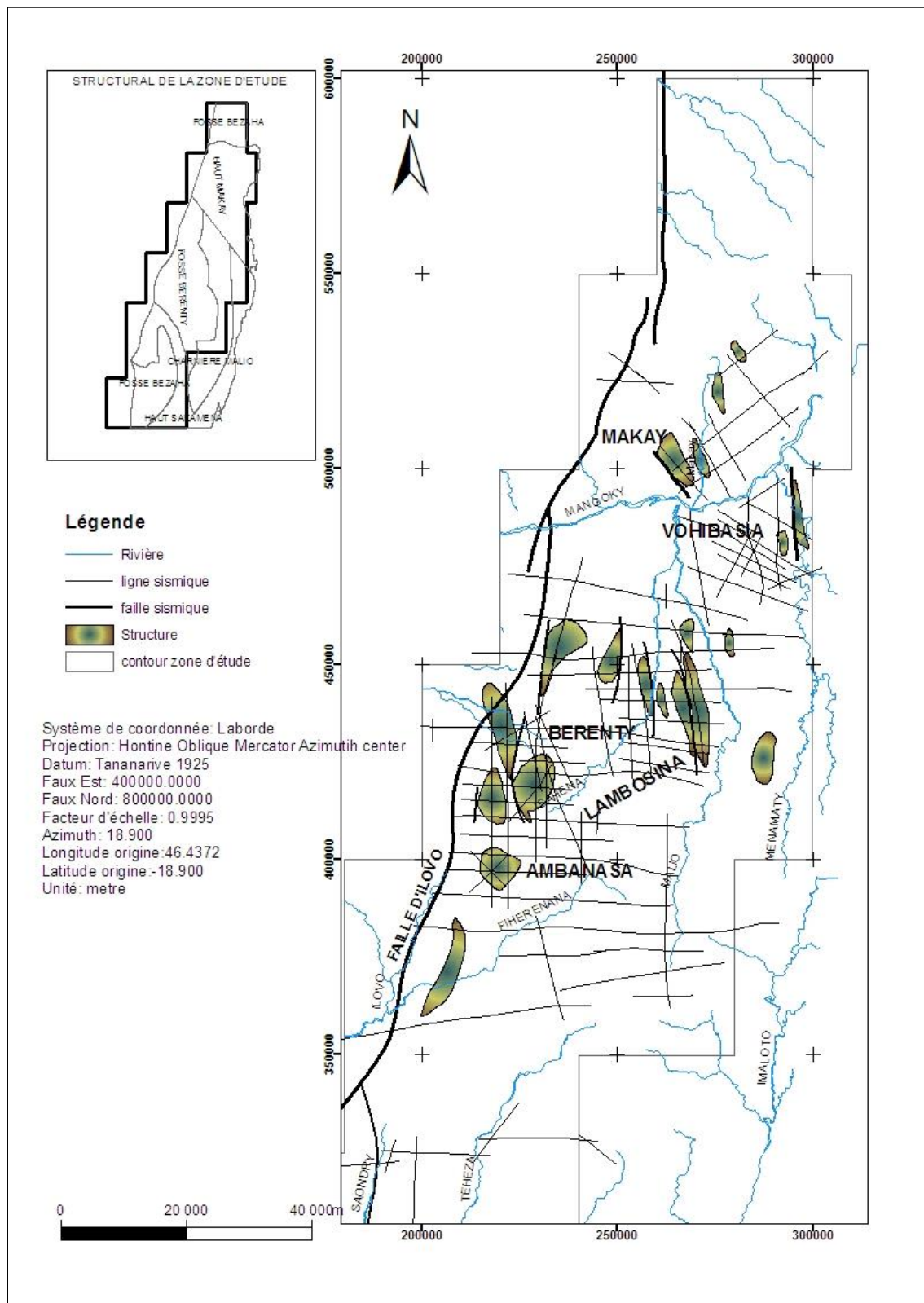


Figure 23: Synthèse structurale du bloc Sakaraha

Quant aux zones qui se situent au nord du bloc Sakaraha, la zone Haute Makay était la plus attrayante où la mise en évidence d'une structure anticlinale avec une fermeture par faille (il s'agit de la faille Vohibasias) peu profonde engendre la proposition d'existence de deux (2) sous zones potentielles.

La première s'agit d'une partie qui se trouve à l'est de la faille Vohibasias dont la fermeture se joue au niveau du socle. L'objectif envisagé était le sable de la Sakamena Inférieure d'après les données des affleurements avoisinants. Cette formation sableuse était supposée recouverte par des schistes assurant le rôle de la roche couverture.

La seconde sous zone potentielle se trouve à l'ouest de la faille Vohibasias qui est du côté affaissé. La fermeture était supposée dans le toit Sakamena et une autre estimée sûre dans le socle.

Des équivalentes structures potentielles sont probablement présentes au Nord de la rivière Mangoky, celles-ci d'après la mise en valeur des tendances structurales de direction nord-ouest associées à Vohibasias (cf. Figure 23).

Dans la partie centrale du bloc Sakaraha, dans la zone Lambosina, l'interprétation des sections sismique y traversant (cf. Figure 24) proposait la mise en évidence d'une structure anticlinale de compensation faillée (faulted rollover anticline) dont la faille était censée de direction Est, rencontrée dans l'horizon pré-Isalo II. Les pièges dans cette zone étaient ont des fermetures bien définie par les interprétations sismiques. Les réservoirs potentiels étaient supposés la Sakamena supérieure où les schistes interstratifiés estimées fournir des roches couvertures.

Dans la fosse Berenty, la présence d'une structure de forme relief anticlinal sous la contrainte d'une tectonique faillée à fermeture affaissée a été signalée. Le phénomène s'étend vers l'est dans la zone de la charnière Malio. Les cibles étaient les sables du groupe Isalo. L'imagerie des faciès sismiques dans cette zone et les données lithologiques des forages antérieures présagent une séquence schisto-sableux fluvial/deltaïque avec une teneur en schiste suffisante pour assurer un scellement adéquat. Dans la partie sud de cette fosse Berenty, le doute s'est posé sur la possibilité d'existence ou non d'une fermeture. Toutefois, la section transversale de la faille de Vohidolo mise en évidence par les lignes sismiques OM 84-101 et OM 84-103 promettaient un pendage à degré suffisant pour assurer une fermeture adéquate.

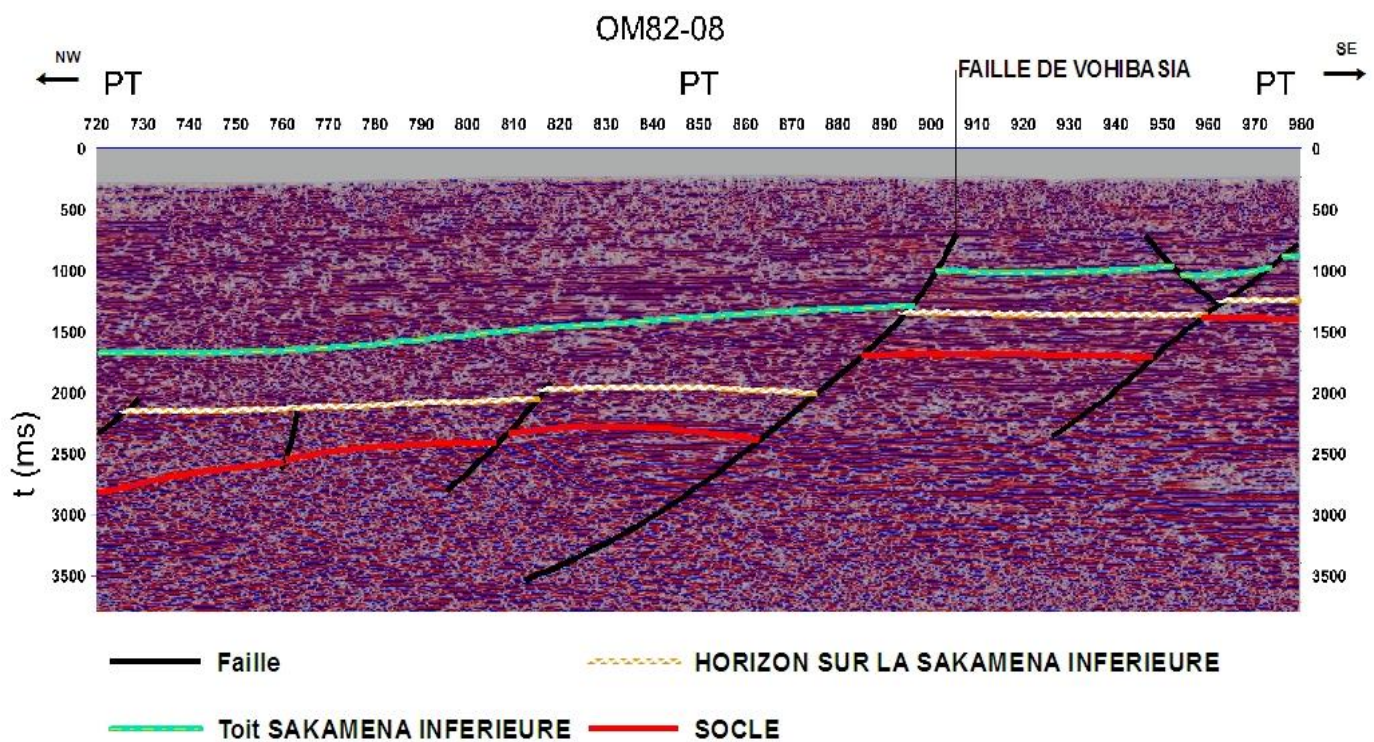
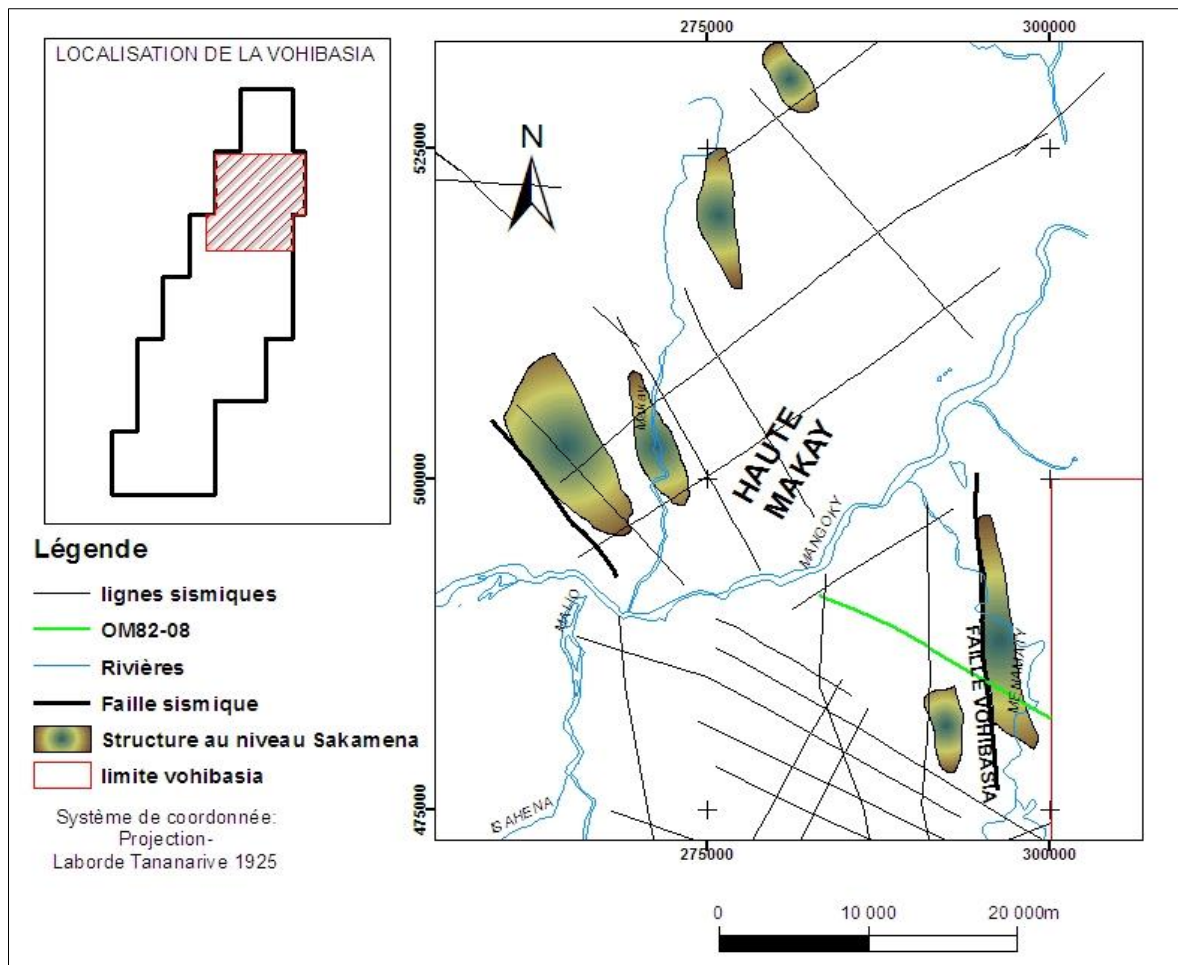


Figure 24: Structure VOHIBASIA

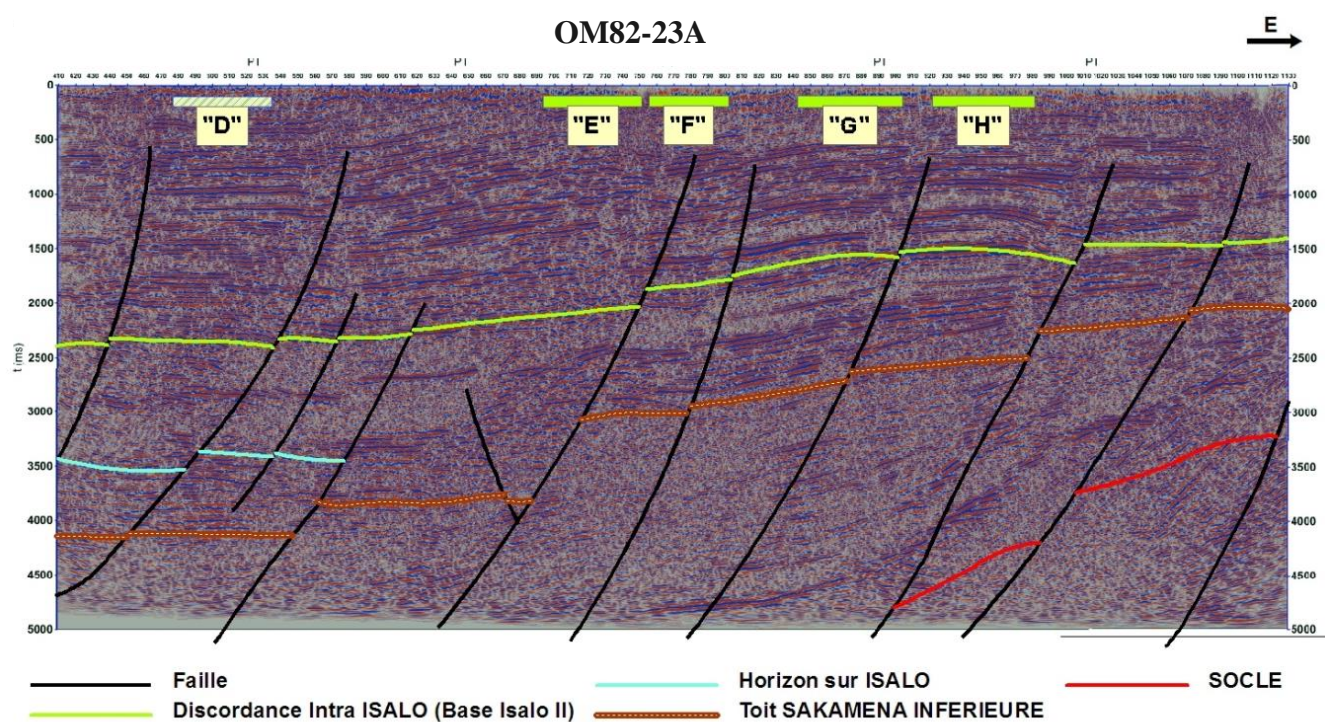
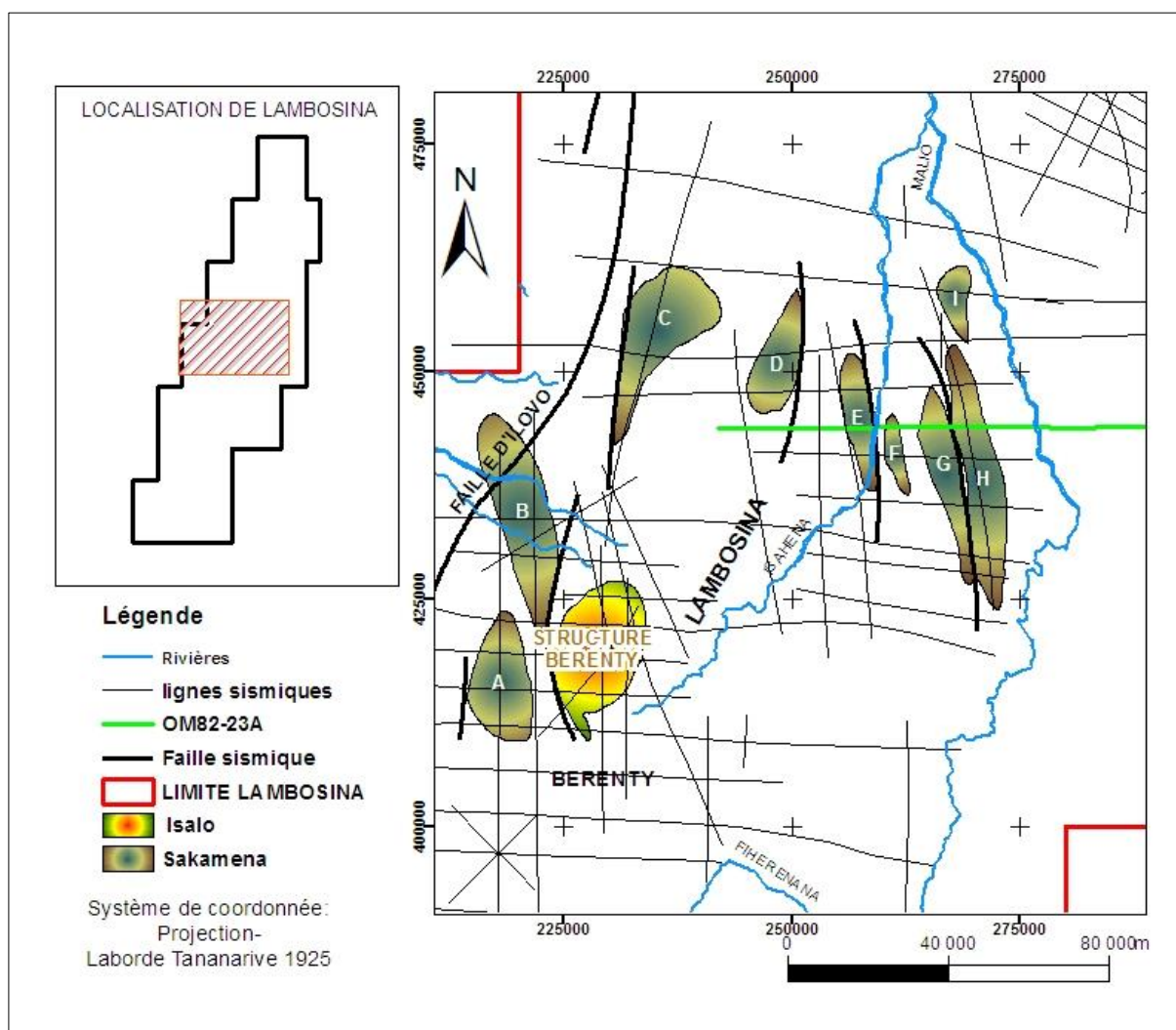
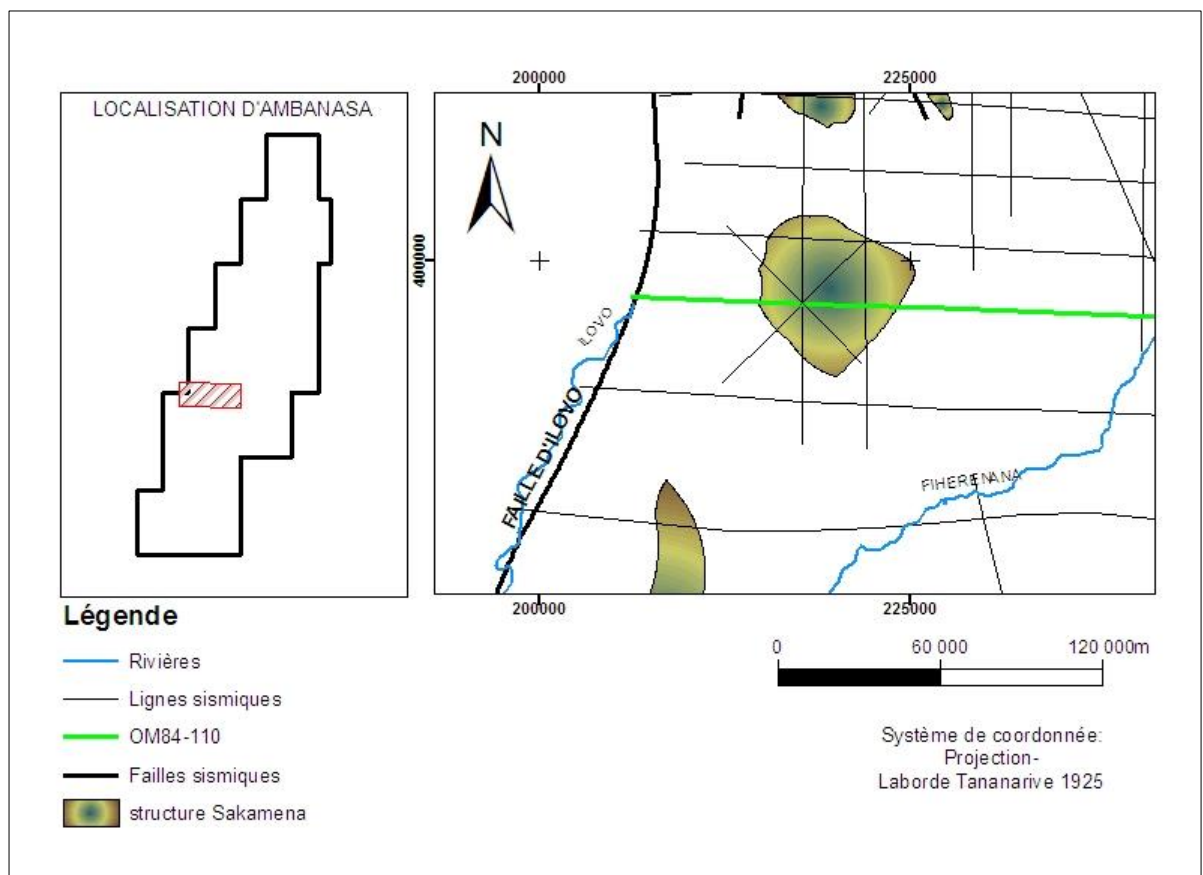


Figure 25: Structure LAMBOSINA

La zone Ambanasa qui se trouve au sud-ouest du bloc Sakaraha était aussi considérée comme une des plus attirantes. L'interprétation géologique du milieu moyennant des résultats de l'interprétation conjointe des sections sismiques et des puits LD-1 et SAK-1 y suggèrent la possibilité d'existence d'une structure à fermeture anticlinale normale intéressante.

Cette structure était supposée fermée à partir du sommet de la Sakamena supérieure jusqu'à la Sakamena inférieure. La Sakamena supérieure constituait le principal objectif où l'on avait pensé qu'il y aurait des successions d'argile et de grès pouvant constituer des pièges naturels.



OM84-110

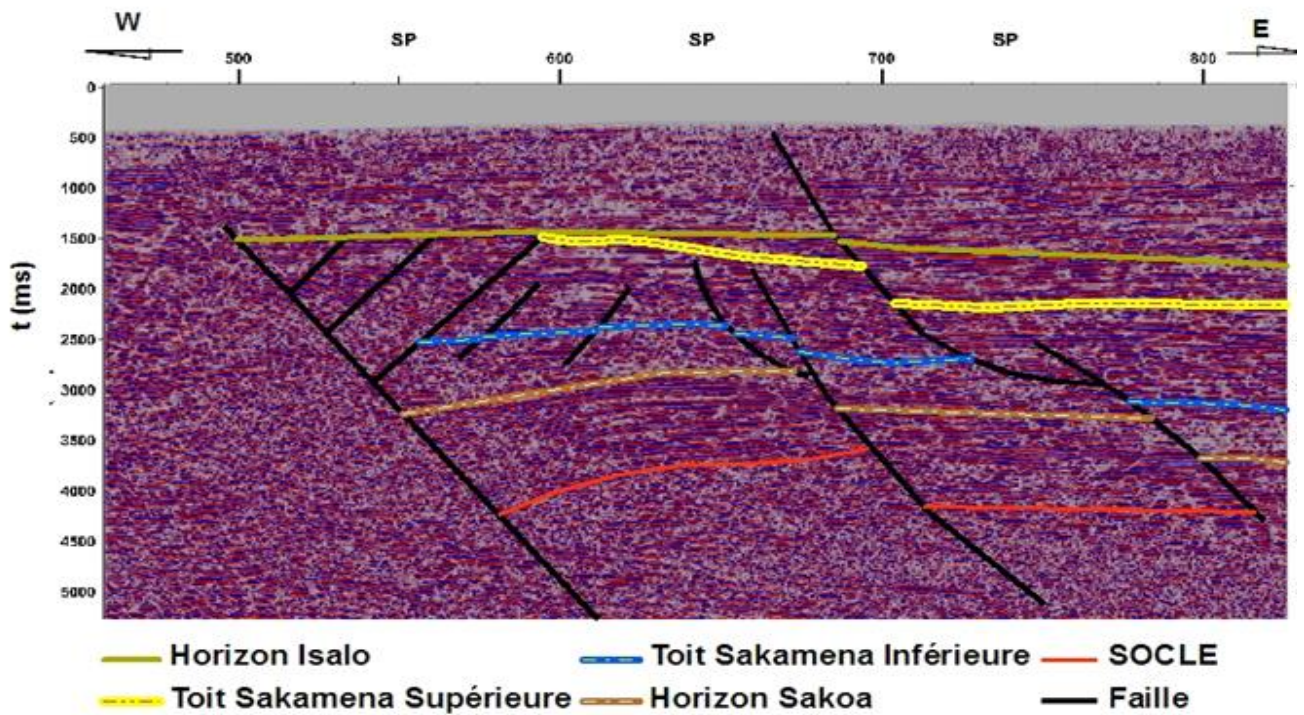


Figure 26: Structure AMBANASA

Chapitre 9:

TRAVAUX DE FORAGE

Les différentes structures proposées précédentes résultent des interprétations des études géologiques et surtout celles des géophysiques particulièrement le sismique. En somme, l'OXY arrivait à définir trois différentes zones potentielles qui sont l'Ambanasa, le Vohibasina et le Lambosina.

Etant donné que seul les puits peuvent déduire si ces structures proposées valent vraiment de l'intéressante, l'OXY avait décidé de réaliser des puits d'exploration dans ces différentes zones espérées potentielles en espérant y trouver des choses intéressantes

- **Ambanasa**

La structure de l'Ambanasa est estimée la plus intéressante. Elle est supposée contenir d'une fermeture naturelle, également affectée par une faille rejet peu important qui ne semble pas atteindre la discordance intra-Isalo

L'objectif est constitué par les sables de la Sakamena au-dessous de la discordance soit à plus de (2525m).

D'un point de vue géochimique et pétrophysique, le profondeur critique devrait se situer aux environs de 3960m, la fenêtre d'huile pourrait être dépassé et où la diagenèse des roches peut réduire la porosité et la perméabilité des réservoirs.

La profondeur projetée est de l'ordre de 5500m si les conditions géologiques le permettent

- **Vohibasina**

Située à l'est de la fosse Karroo, est constituée de deux (2) structures séparées par une faille

Dans la partie haute (Vohibasina est), la Sakamena et peut être le Sakoa sont peu profonds avec le toit de la Sakamena inférieure à quelque 1250 msTD. Le risque de trouver des réservoirs lissivés par les eaux atmosphériques est grand et à cause de cela OXY préfère la partie basse de la structure (Vohibasina Ouest) où la couverture peut être plus importante et où la fermeture est constituée par le socle contre les formations sédimentaires. Le toit de la Sakamena inférieure se situe à environ 1450ms TD

- **Lambosina**

C'est une structure très grande mais très profond avec le toit de la Sakamena 2000' plus profond qu'à Ambanasa. Cette structure ne sera forcée que si les résultats d'Ambanasa sont positifs.

1. Forage AMBANASA-I (ABN-I) [21] [23]

AMBANASA I est le premier puits d'exploration d'OXY dans le bloc SAKARAHA. Ce puits a été implanté sur la ligne sismique OM84-101 au point de tir 609, pour tester la structure à fermeture anticlinale normale mise en évidence par les lignes sismiques OM-82-19, OM-84-101, OM-84-103, OM-84-110, OM-84-130 et OM-84-131. La structure est fermée à partir du sommet de la SAKAMENA SUPERIEURE jusqu'à la SAKAMENA INFERIEURE. Les principaux objectifs se trouvaient dans la SAKAMENA SUPERIEURE où l'on avait estimé qu'il y aurait des successions d'argile et de grès pouvant constituer des pièges naturels.

Géographiquement AMBANASA I se trouve à l'Est-Nord Est de TULEAR à environ 200km de celui-ci et à 60 km au Nord de SAKARAHA en suivant la route reliant cette dernière à ANKAZOABO.

1.1. SYNTHESE DES RESULTATS

Le puits AMBANASA I avait débuté dans le JURASSIQUE MOYEN par une alternance de grès à ciment calcaire et dolomitique, de dolomie, de calcaire, et d'argilite avec quelques niveaux ligniteux. Ensuite celui-ci avait pénétré l'ISALO (740') constitué essentiellement par des grès mal consolidés suivi par les formations SAKAMENIENNES présumées (9330') constituées également de grès mais compacts et cimentés par des ciments siliceux étanches. Aucune couche d'argile ayant une épaisseur suffisante pour constituer une bonne couverture n'était rencontrée. Des indices d'huiles et de gaz allant de C1 à C5 étaient enregistrés, entre 12720'-14070' pour l'huile et à partir de 12580' jusqu'à la profondeur finale pour le gaz. On avait constaté qu'à partir de 1000' la qualité du réservoir avait considérablement diminué, ceci à cause des phénomènes de cimentation secondaires réduisant largement la valeur de la porosité.

Vers 15000', un enregistrement diagraphique « Velocity Check Shot Survey » a été effectué pour recalibrer les interprétations sismiques. L'horizon à vitesse 2,700 présumé comme le sommet de la SAKAMENA MOYENNE a été dépassé (13750') mais aucune

couche argileuse n'était traversée. Comme le prochain horizon sismique (2,900) ne serait rencontré qu'à environ 17000', et considérant les différents faits suivants :

- Diminution de la qualité du réservoir avec la profondeur
- Absence quasi-totale de couches argileuses pouvant constituer une bonne couverture.
- Approche probable de la base de la fenêtre d'huile.
- Interprétation sismique douteuse à partir de 15000' à cause du manque de données pour corrélation, on avait décidé d'arrêter le forage à la profondeur de 15323'

2. FORAGE DE VOHIBASIA (VHB-I) [22] [23]

Au centre Est de son permis, sous l'appellation de VOHIBASIA I, OXY a foré son deuxième puits d'exploration. VOHIBASIA I a été implanté à 198m à l'Est du point de tir 575 sur la ligne sismique OM-84-123 à contre bas Ouest du massif de VOHIBASIA d'où son nom

Une bonne structure d'anticlinal existe à VOHIBASIA ouest avec une fermeture par faille allant de la Sakamena supérieure au socle. Cette structure s'étalerait sur une superficie de 18000 acres environs soit 7200 ha à partir du sommet de la Sakamena inférieure et contiendrait un (1) milliard de barils d'huile si la faille de fermeture serait assez étanche. Ce serait le seul risque de cette structure. Parmi les structures décelées dans le permis c'est la meilleure que l'on pourrait dire après la structure d'AMBANASA

2.1. SYNTHESE DES RESULTATS

Le deuxième puits d'exploration Vohibasa I d'OXY a été foré pour tester la structure anticlinale avec fermeture par faille allant de la Sakamena supérieure au socle.

L'objectif principal serait les grès de la Sakamena inférieure. Cependant d'autres objectifs secondaires existeraient tels que les grès à la base de la Sakamena supérieure, les intercalations gréseuses de la Sakamena moyenne et les grès de la formation Sakoa

Du point de vue lithologique, trois(3) entités prédominent le long du puits foré avec quelques passages ou traces de calcaire. Ce sont les grès de l'Isalo I/ Sakamena supérieure, les argiles schisteuses de la Sakamena moyenne et les formations silteuses de la Sakamena inférieure, ainsi que les grès de la formation Sakoa à la basse. Ces formations lithologiques ont été confirmées par les résultats diagaphiques. Ainsi stratigraphiquement le puits a traversé successivement l'Isalo I, la Sakamena supérieure, la Sakamena inférieure et la Sakoa

Les analyses géochimiques permettent de constater que des couches argileuses de la Sakamena moyenne et les argiles silteuses de la Sakamena inférieure assez riche en matière organique (TOC et S₂ au dessus de la moyenne) constituent des roches mères potentielles déjà matures pour générer de l'huile, d'autant plus qu'elles se trouvent dans la fenêtre d'huile.

Ces couches argileuses puissantes de 1000' environs constituent également de bonnes roches couvertures ainsi que les argiles silteuses très compactes au-dessous d'épaisseur plus de 1730'

Des indices d'huile observées sous forme de taches intergranulaires étaient détectés dans les intervalles 4230'-5880', 6050'-6065' et 6880'-6930'. Ces indices variant de très faibles à moyens présentaient des fluorescences généralement jaune-pâles à jaune-brillantes. Ce sont des huiles résiduelles qui ne pouvaient plus mouvoir.

Des indices continus de gaz allant de C1 à C5 étaient enregistrés à partir de 3650' jusqu'à la profondeur finale. Des pics de gaz étaient détectés présentant deux (2) maximum aux profondeurs 4900' et 8800' de valeurs respectives 22% et 21,7%.

Si des roches-mères potentielles ont été trouvées, par contre aucun réservoir adéquat n'a été rencontré au-dessous de la roche couverture. En effet la lithologie a montré des silts au lieu de grès dont la porosité est tombée à inférieure de 10% et que l'opération de R.F.T. a prouvé l'imperméabilité de la roche.

De par ces résultats le puits a été bouchonné et abandonné comme étant sec

3. SYNTHESE SUR LES FORAGES [21] [22] [23]

Pour le puits AMBANASA I, le problème fondamental déduit est la détérioration du réservoir en descendant en profondeur, ainsi que l'absence de couche d'argile pouvant constituer une bonne couverture.

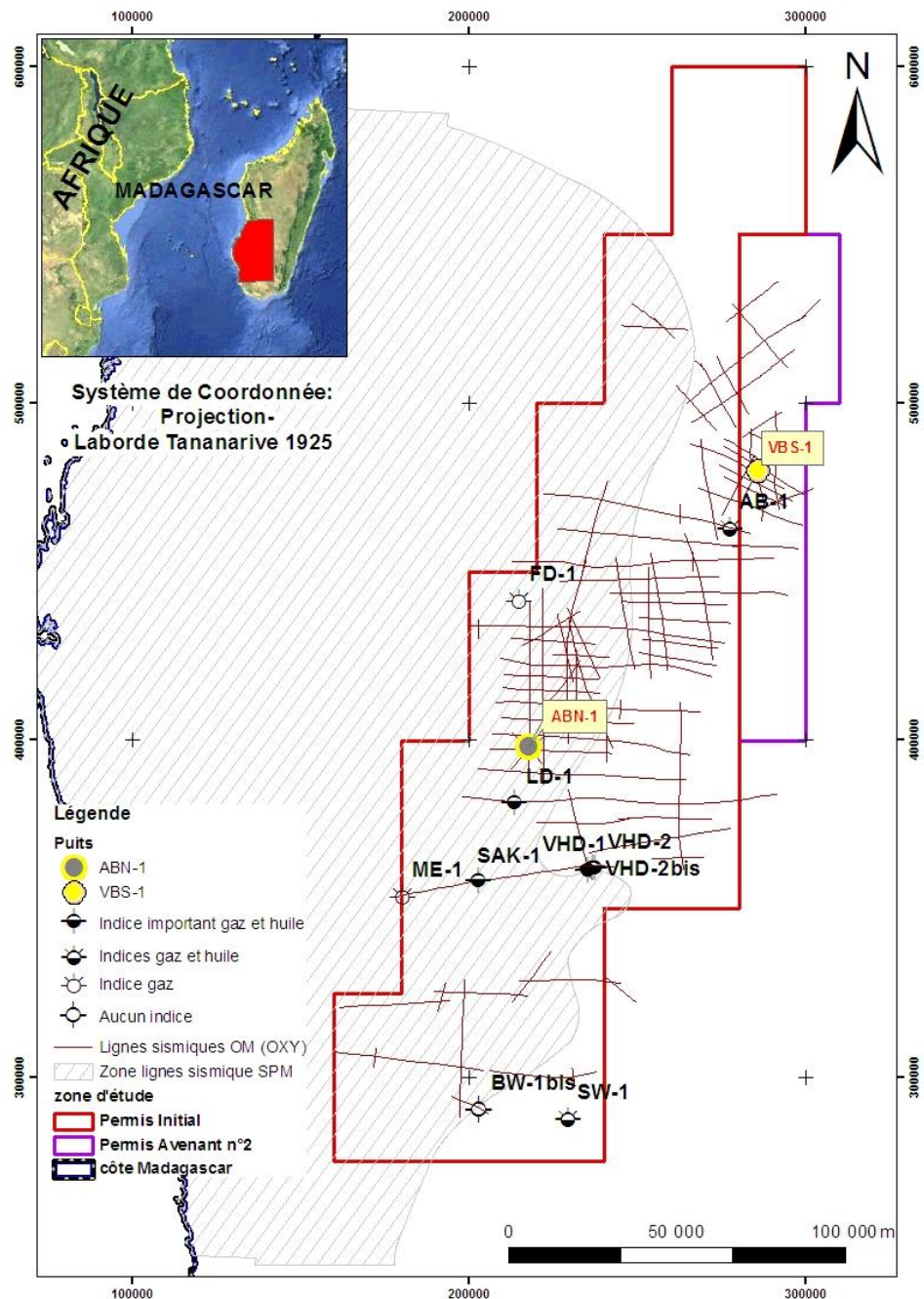
L'existence à AMBANASA I d'une épaisse formation gréseuse au-dessus de la Sakamena moyenne avait également dévalorisé l'objectif Sakamena supérieure qui serait probablement au-delà de la fenêtre d'huile.

Le problème dans cette zone près de LAMBOSINA est donc le problème de couverture/réservoir, car là où le réservoir est bonne, il n'y a aucune couche argileuse pour constituer une couverture, par contre, là où il y a des couches argileuses suffisantes pour constituer une bonne couverture (Sakamena moyenne) le réservoir est déjà totalement détruite par les phénomènes de cimentation secondaire

Quant à Vohibasia I, l'existence d'huile résiduelle dans ce puits indiquerait la passage d'une quantité d'huile primaire qui a migré sous l'effet des tassements des sédiments soit par l'intermédiaire de la faille qui n'était pas encore étanche à l'époque de génération, soit avant le dépôt de la roche couverture.

La RFT a donné des résultats décourageants et a prouvé la mauvaise qualité du réservoir.

Donc malgré la quantité des gaz détectés lors du forage le puits a été bouchonné et abandonné comme étant sec.



Chapitre 10:

SYNTHESE PETROLIER DU BLOC SAKARAH

Les résultats donnés par ces deux puits d'exploration de l'OXY ne nous laissent point nous échapper la soif de connaître les genres de piège où l'on pourrait avoir beaucoup plus de chance de trouver une accumulation importante d'hydrocarbures. Toutefois, toutes les interprétations des résultats des puits réalisés jusqu'à ici semblent converger à l'unique hypothèse que seules les pièges stratigraphiques pourraient satisfaire aux conditions d'existence d'une accumulation d'hydrocarbures intéressante dans notre zone d'étude. En effet, les manques des roches réservoirs ainsi que les roches couvertures rencontrés dans les deux puits récents peuvent être traduites par les variations latérales des faciès importantes.

Malgré cette hypothèse qui nous montre d'une manière informelle que la recherche sera difficile voire impossible, on ne doit pas condamner ce bloc. Les indices intéressants rencontrés dans ces deux récents puits ne doivent pas être négligés et ceux qui nous incitent toujours à avoir la patience d'approfondir les recherches.

Les résultats des puits ABN-1 et VHB-1 accordent une nouvelle perspective de recherche pour trouver des structures intéressantes. Ces puits nous donnent en effet un bon aperçu sur les caractéristiques lithologiques des différentes formations rencontrées et leurs susceptibilités d'être qualifiées ou non dans la formation d'un système pétrolier.

1. Roches couvertures et roches réservoirs

Il se dégage de toutes ces données que les caractéristiques des roches couvertures et réservoirs dans le bloc Sakaraha varient d'une zone à l'autre et que on remarque l'inversement de proportionnalité en terme de qualité entre les deux pour constituer ensemble un bon système pétrolier. En d'autre terme, dans des conditions où l'on rencontre des roches réservoirs abondantes, les roches couvertures ne sont pas bien développées, tandis que dans les régions où l'on touche des roches assez étanches, ce sont les propriétés physiques des roches réservoirs sous-jacentes qui sont médiocres.

Cependant, les argilites rouges-briques dans la formation Isalo pourraient assurer une étanchéité.

Au-dessous de cette formation, des intercalations de schistes dans la Sakamena supérieur et l'Isalo II sont aussi assez épaisses pour être des roches couvertures.

Quant à la Sakamena Moyenne, des argiles schisteuses assez épaisses sont identifiées. De même des argiles silteuses dans la Sakamena Inférieure peuvent constituer aussi des roches couvertures.

Compte tenu de ces dispositions des roches couvertures, les principaux réservoirs potentiels seront les formations gréseuses de la Sakamena inférieure-supérieure et l'Isalo II. L'alternance de grès et d'argilite dans l'Isalo II promet une prédominance de grès donnant une valeur jusqu'à 21% de porosité. Les lithologies de la Sakamena Inférieure et la Sakoa supposent aussi des distinctions silteuses à intercalations gréseuses d'une valeur moyenne supérieure à 10%

2. Roches mères

Nous avons pu constater d'après les résultats des puits que des indices encourageants ont été souvent identifiés pour garantir l'existence des roches mère matures dans notre bassin.

L'analyse des échantillons des pétroles brutes rencontrés dans les puits VHD, LW-1 et ceux dans Bemolanga et Tsimiroro avec les échantillons de surface et les résultats donnés par les deux récents puits suggèrent que les formations Sakamena Moyenne de la série Trias inférieur semblent être des roches matures. De même, les autres formations rencontrées dans VHD-1, LW-1 et SW-1 correspondant à des séries noires schisteuses de la Sakamena Inférieure du Permien supérieur le sont aussi.

Les Charbons de la Sakoa et certaines formations schisteuses échantillonnées sur des affleurements en surface représentent également une roche mère potentielle mais on ne définit pas clairement leur extension en profondeur.

Les puits se trouvant à l'ouest de la faille d'Ilovo ont pu traverser une série schisteuse du Jurassique inférieur épaisse alors que les analyses de plusieurs échantillons de carotte suggèrent que le Jurassique inférieur contient une roche mère excellente.

La formation Sakamena atteint la fenêtre d'huile presque dans tout au fond du bassin. La génération d'huile avait probablement commencé depuis le Trias mais ce sont les générations durant le Jurassique qui sont les plus fréquentes dans le bassin. La principale génération d'huile de la roche mère Jurassique inférieure à l'ouest de la faille d'Ilovo a pris place au cours du crétacé.

Par conséquent, les générations des roches mères du Karroo et Jurassique sont contemporaines et/ou postérieures aux grands événements structuraux dans le bassin.

Il résulte de tous ces points de vue que le tableau ci-dessous avance un modèle de formation d'un système pétrolier dans la zone d'étude.

Tableau 1: Proposition des nouveaux systèmes pétroliers dans la zone d'étude

Possibilité	Série		
	Isalo	Sakamena	Sakoa
roche mère		Formation argilosilteuse (Sakamena Inférieure) TOC: 0,11%à 1,74%	Couches à charbon Schistes noirs et conglomérats (Tillites)
		Formation argilo schisteuse (Sakamena moyenne) TOC: 0,11%à3, 01%	
roche réservoir	Sous-formation gréseuse de grain moyen à conglomératique avec de rares intercalations d'argilite rouge lie de vin (Isalo II) Porosité : 20% Présence des : <ul style="list-style-type: none"> – Discordances – Horsts, – failles listriques 	Formation gréseuse Porosité : 20% Présence des : <ul style="list-style-type: none"> – Discordances – Failles – Anticlinales 	Formation grésosilteuse Porosité : ≥7% Présence des : <ul style="list-style-type: none"> – Failles – Anticlinales – Dôme
roche couverture	Sous-formation argileuse de couleur noir ou brune du Jurassique inférieur (Isalo II)	Couche d'argile schisteuse (Sakamena Moyenne) Couche d'argile silteuse (Sakamena Inférieure)	

Possibilité	Série		
	Isalo	Sakamena	Sakoa
<p>Système pétrolier</p>	<p><u>Roche couverture</u> Sous-formation argileuse de couleur noir ou brune du Jurassique inférieur (Isalo II)</p> <p><u>Roche réservoir</u> Sous-formation gréseuse de grain moyen à conglomératique avec de rares intercalations d'argilite rouge lie de vin (Isalo II)</p> <p><u>Roche mère</u> Formation argiloschisteuse (Sakamena moyenne) Formation argilosilteuse (Sakamena Inférieure)</p>	<p><u>Roche couverture</u> Couche d'argile schisteuse (Sakamena Moyenne) Couche d'argile silteuse (Sakamena Inférieure)</p> <p><u>Roche réservoir</u> Formation gréseuse (Sakamena) Formation grésosilteuse (Sakoa)</p> <p><u>Roche mère</u> Couches à charbon. et Schistes noirs et conglomérats (Tillites)</p>	

CONCLUSION

Ce mémoire nous a permis d'approfondir les notions sur les différentes étapes de la prospection pétrolière. Il ressort de ces études que tous les travaux d'exploration pétrolière depuis les travaux géologiques jusqu'à l'épreuve de puits d'exploration participent à l'affirmation ou l'infirmité d'existence des structures pétrolières.

Les travaux géologiques menés par l'OXY ont permis d'interpréter le système de dépôt des plusieurs unités du groupe Karroo et d'identifier qu'à l'exception de la formation Sakamena moyenne, toutes les formations du système Karroo contiennent des sables qualifiés de roches réservoirs. Les argilites de la série rouge Sakoa et les schistes de la Sakamena sont des roches mères matures tandis que les argilites de l'Isalo avec les formations schisteuses de la Sakamena pourraient assurer le rôle des roches de couverture.

Les études des données gravimétriques et magnétiques du bloc Sakaraha ont permis, non seulement l'identification d'un bassin, mais aussi d'évaluer les orientations des failles afin d'aider les géophysiciens pour la mise en place des lignes sismiques. Les interprétations des travaux sismiques ont conclu la définition des structures souterraines et/ou les caractéristiques favorables aux réservoirs grâce aux différents horizons qu'ils ont pu détecter.

L'OXY arrivait à proposer trois (3) grandes structures qui étaient la Vohibasia, Lambosina et Ambanasa mais les deux (2) puits d'exploration (ABN-I et VHB-I) ont été réalisés. Certes les résultats donnés par ces puits semblent des échecs mais leurs interprétations nous donnent l'opportunité de redéfinir une nouvelle perspective d'exploration dans le bassin en question. Cette étude nous propose que l'aspect du nouveau système pétrolier où la formation argiloschisteuse (Sakamena moyenne), la formation argilosilteuse (Sakamena Inférieure) et les Couches à charbon - Tillites (Sakoa) seraient des roches mères. Sous-formation gréseuse avec de rares intercalations d'argilite rouge lie de vin (Isalo II), la formation gréseuse (Sakamena) et la formation grésosilteuse (Sakoa) pourraient être des bons réservoirs. Sous-formation argileuse du Jurassique inférieur (Isalo II), la couche d'argile schisteuse (Sakamena Moyenne) et la couche d'argile silteuse (Sakamena Inférieure) assurent les rôles d'une roche couverture. Pour le type de piège probable, il est identifié comme des pièges stratigraphiques.

Toutes fois, en considérant comme un nouveau paramètre les résultats des deux puits récents, les réinterprétations de toutes ces données, surtout les interprétations sismiques,

seront recommandées pour une nouvelle optique de prospection pétrolière dans le bloc Sakaraha.

BIBLIOGRAPHIE et WEBOGRAPHIE

- [1] HAINGONIRINA. E, INTERPRETATION DE DONNEES GEOPHYSIQUES DANS L'OUEST DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA ENTRE MANJA ET BELO SUR TSIRIBIHINA, 2013.
- [2] RAHARIVONIMBELO. T.N, « ETUDE STRUCTURALE DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA(entre Manja et l'Onilahy)PAR TELEDETECTION ET INTERPRETATION GEOPHYSIQUE, 2013.
- [3] I. E. Nouvelles, «Les étapes de la prospection pétrolière».
- [4] OMNIS-OXY, «Convention d'Association en participation entre l'OMNIS et l'OCCIDENTAL OF MADAGASCAR,» 1981.
- [5] OMNIS/UNION OIL/ OXY, «Avenant n°1,» 1984.
- [6] OMNIS/UNION OIL/ OXY, «Avenant n°2,» 1984.
- [7] RANDRIANASOLO. I, «RAPPORT DE MISSION GEOLOGIQUE,» 1983.
- [8] HENRY. B, «LA GÉOLOGIE DE MADAGASCAR,» 1946.
- [9] SNODIN Steve, RAKOTOVAO G, BANKS N.L, WORLEY P.L.H «RESULTS OF FIELD WORK AND SAMPLE ANALYSIS OF SAKARAHHA BLOCK,» 1982.
- [10] OCCIDENTAL OF MADAGASCAR, «Exploration, Evaluation OXY,» 1984.
- [11] Hunting Geology and Geophysic Inc., «A photogeological study of the Sakaraha area, Madagascar,» 1982.
- [12] ANDRIANASOLO J A, ANDRIAMIHAOTRA H M, RATSIMANDRESY J, «SYNTHESE SUR LES TRAVAUX DE RECHERCHE PETROLIERE EFFECTUES A MADAGASCAR,» 1975.
- [13] WORLEY P.L.H, BANKS N.L «RESULTS OF FIELD WORK,» 1983.
- [14] VLIERBOON, "Source Rock evaluation of the Sakaraha Block, Morondava Basin, Madagascar," 1982.
- [15] CHOUTEAU M, Gravimétrie GEOPHYSIQUE APPLIQUEE I, Ecole Polytechnique de Montréal, 2002.
- [16] CHOUTEAU M, Magnétisme GEOPHYSIQUE APPLIQUEE I, Ecole Polytechnique de Montréal, 2002.

- [17] HUNTING GEOPHYSIC AND GEOLOGIE INC., «Magnetic and Gravimetric Investigation in the Sakaraha Area Madagascar,» 1983.
- [18] CREW 6803 PRETTY-RAY GEOPHYSICAL DIVISION GEOSOURCE INC. , «FINAL REPORT FOR OXY AND OMNIS,» 1983.
- [19] CREW 6825 PRETTY-RAY GEOPHYSICAL DIVISION GEOSOURCE INC., «FINAL OPERATION REPORT FOR OXY & OMNIS,» 1985.
- [20] HUNTING GEOLOGY AND GEOPHYSIC INC., «A status report of the Sakaraha Permit Madagascar,» 1984.
- [21] RANDRIAMAMPANDRY. Edmond, «RAPPORT GEOLOGIQUE DU PUIT AMBANASA I,» 1986.
- [22] RANAIVOSON. Y. H, «RAPPORT GEOLOGIQUE DU PUIT VOHIBASIA I,» 1986.
- [23] OMNIS/OXY, «PROCES VERBAL DE LA REUNION OCCIDENTAL ET OMNIS,» 1986.
- [24] WORLEY P.L.H, BANKS N.L, «RESULTS OF FIELD WORK in 1983,» 1984.
- [25] Prospection, exploitation gazière et pétrolière comment ça marche.html. [Accès le Novembre 2014].
- [26]Techniques d'exploration pétrolière.html. [Accès Octobre 2014].

ANNEXES

Annexe 1 : ECHELLE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONAL

Eonothème	Erathème	Système	Série	Étage	Age en Ma
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène		
				Supérieur	0,0117
			Pléistocène	"Ionien"	0,126
				Calabrien	0,781
				Gelasien	1,806
		Pliocène		Plaisancien	2,588
				Zancéen	3,600
					5,332
				Messinien	7,246
				Tortonien	11,608
	Néogène	Miocène		Serravalien	13,82
				Langhien	15,97
				Burdigalien	20,43
				Aquitanién	23,03
					28,4 ± 0,1
		Oligocène		Chattien	33,9 ± 0,1
				Rupélien	37,2 ± 0,1
				Priabonien	40,4 ± 0,2
				Bartonién	48,6 ± 0,2
				Lutétien	55,8 ± 0,2
	Paléogène	Éocène		Yprésien	58,7 ± 0,2
				Thanétien	~ 61,1
				Selandien	65,5 ± 0,3
				Danien	70,6 ± 0,6
					83,5 ± 0,7
		Paléocène		Maastrichtien	83,8 ± 0,7
				Campanien	~ 88,6
				Santonien	93,5 ± 0,8
				Coniacien	99,6 ± 0,9
				Turonien	112,0 ± 1,0
Mésozoïque	Crétacé	Supérieur		Albien	125,0 ± 1,0
				Aptien	130,0 ± 1,5
				Barrémien	~ 133,9
				Hauterivién	~ 133,9
				Valanginien	140,2 ± 3,0
		Inférieur		Berriasien	145,5 ± 4,0

Eonothème	Erathème	Système	Série	Étage	Age en Ma
Phanérozoïque	Mésozoïque	Jurassique		Tithonien	145,5 ± 4,0
			Supérieur	Kimmeridgien	150,8 ± 4,0
				Oxfordien	~ 155,6
				Callovien	161,2 ± 4,0
				Bathonien	164,7 ± 4,0
		Moyen		Bajocien	167,7 ± 3,5
				Aalénien	171,6 ± 3,0
					175,6 ± 2,0
				Toarcien	183,0 ± 1,5
				Pliensbachien	189,6 ± 1,5
	Trias	Inférieur		Sinemurien	196,5 ± 1,0
				Hettangien	199,6 ± 0,6
				Rhétien	203,6 ± 1,5
			Supérieur	Norien	216,5 ± 2,0
				Carnien	~ 228,7
		Moyen		Ladinien	237,0 ± 2,0
				Anisien	~ 245,9
				Olenekien	~ 249,5
				Indusien	251,0 ± 0,4
				Changhsingien	253,8 ± 0,7
	Permien	Lopingien		Wuchiapingien	260,4 ± 0,7
				Capitanien	265,8 ± 0,7
				Wordien	268,0 ± 0,7
				Roadien	270,0 ± 0,7
				Kungurien	275,6 ± 0,7
		Cisuralien		Artinskien	284,4 ± 0,7
				Sakmarien	294,6 ± 0,8
				Assélien	299,0 ± 0,8
				Gzhélien	303,4 ± 0,9
				Kasimovien	307,2 ± 1,0
Paléozoïque	Carbonifère	Pennsylvanien	Supérieur	Moscovien	311,7 ± 1,1
				Bashkirien	318,1 ± 1,3
				Serpukhovien	328,3 ± 1,6
			Moyen	Viséen	345,3 ± 2,1
			Inférieur	Tournaisien	359,2 ± 2,5

Eonothème	Erathème	Système	Série	Étage	Age en Ma
Phanérozoïque	Paléozoïque	Dévonien	Supérieur	Famennien	359,2 ± 2,5
				Frasnien	374,5 ± 2,6
				Givétien	385,3 ± 2,6
			Moyen	Eifélien	391,8 ± 2,7
				Emsien	397,5 ± 2,7
		Inférieur		Praguien	407,0 ± 2,8
				Lochkovien	411,2 ± 2,8
					416,0 ± 2,8
				Pridolien	418,7 ± 2,7
				Ludfordien	421,3 ± 2,6
	Silurien	Wenlock		Gorstien	422,9 ± 2,5
				Homerien	426,2 ± 2,4
				Sheinwoodien	428,2 ± 2,3
				Telychien	436,0 ± 1,9
				Aeronien	439,0 ± 1,8
		Llandovery		Rhuddanien	443,7 ± 1,5
				Hirnantien	445,6 ± 1,5
			Supérieur	Katien	455,8 ± 1,6
				Sandbien	460,9 ± 1,6
				Darriwillien	468,1 ± 1,6
	Ordovicien	Moyen		Dapingien	471,8 ± 1,6
				Floien	478,6 ± 1,7
				Tremadocien	488,3 ± 1,7
					~ 492 *
				Furongien	~ 496 *
		Inférieur		Paibien	~ 499
				Guzhangien	~ 503
			Série 3	Drumien	~ 506,5
				Étage 5	~ 510 *
				Étage 4	~ 515 *
Cambrien	Cambrien	Série 2		Étage 3	~ 521 *
				Étage 2	~ 528 *
				Fortunien	542,0 ± 1,0

Eonothème	Erathème	Système	Age en Ma
Précambrien	Protérozoïque	Édiacarien	542
		Neo-protérozoïque	~ 635
		Cryogénien	850
		Tonien	1000
		Mésoproterozoïque	1200
		Sténien	1400
		Ectasien	1600
		Calymmien	1800
		Stathérien	2050
		Orosirien	2300
	Archéen	Rhyacien	2500
		Sidérien	2800
		Néoarchéen	3200
		Mésoarchéen	3600
		Paléoarchéen	4000
		Eoarchéen	~ 4600
	Hadéen		~ 4600

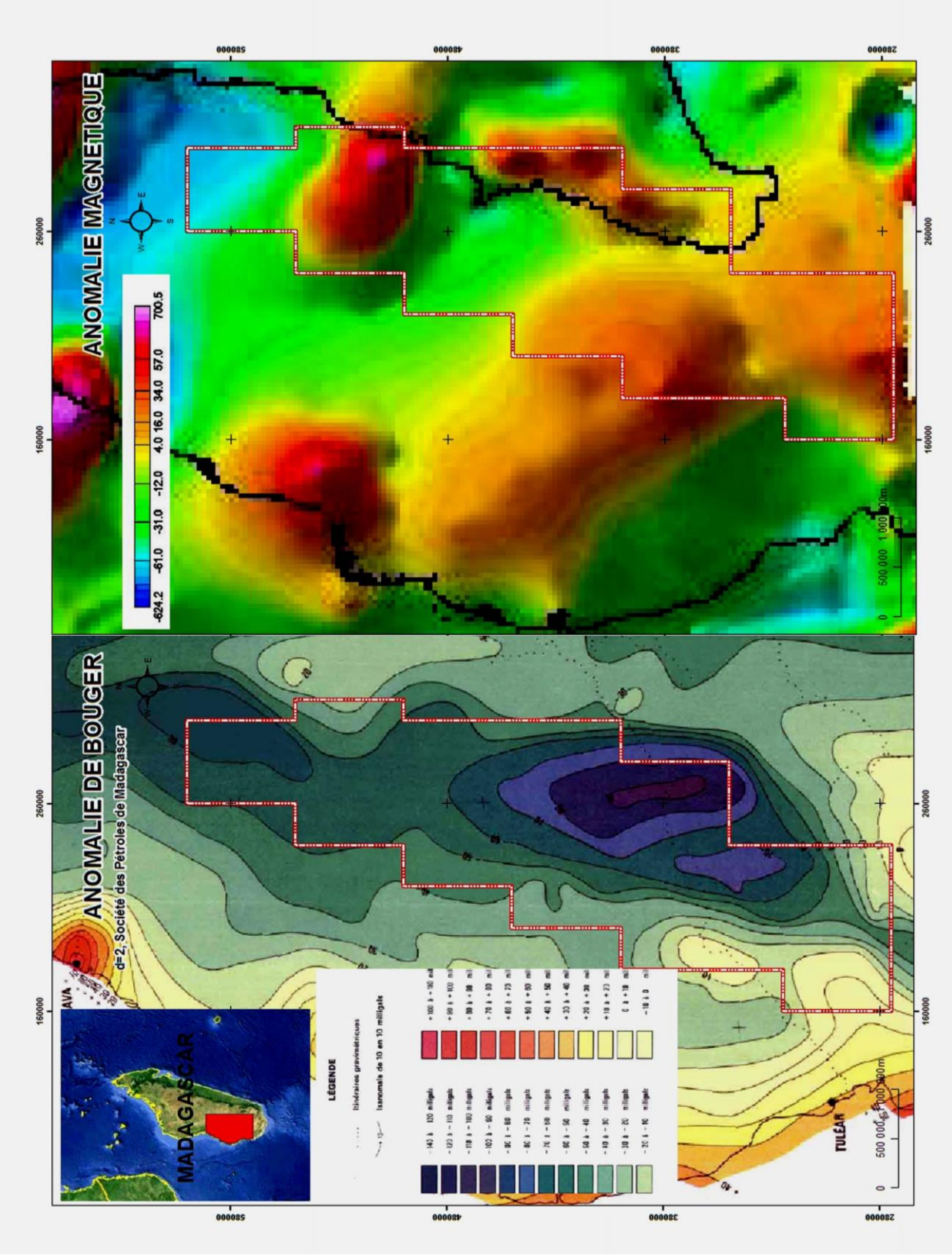
* Le statut du quaternaire n'est, à ce jour pas encore fixé

* Les âges des séries et les étages du Cambrien sont en attente de ratification.

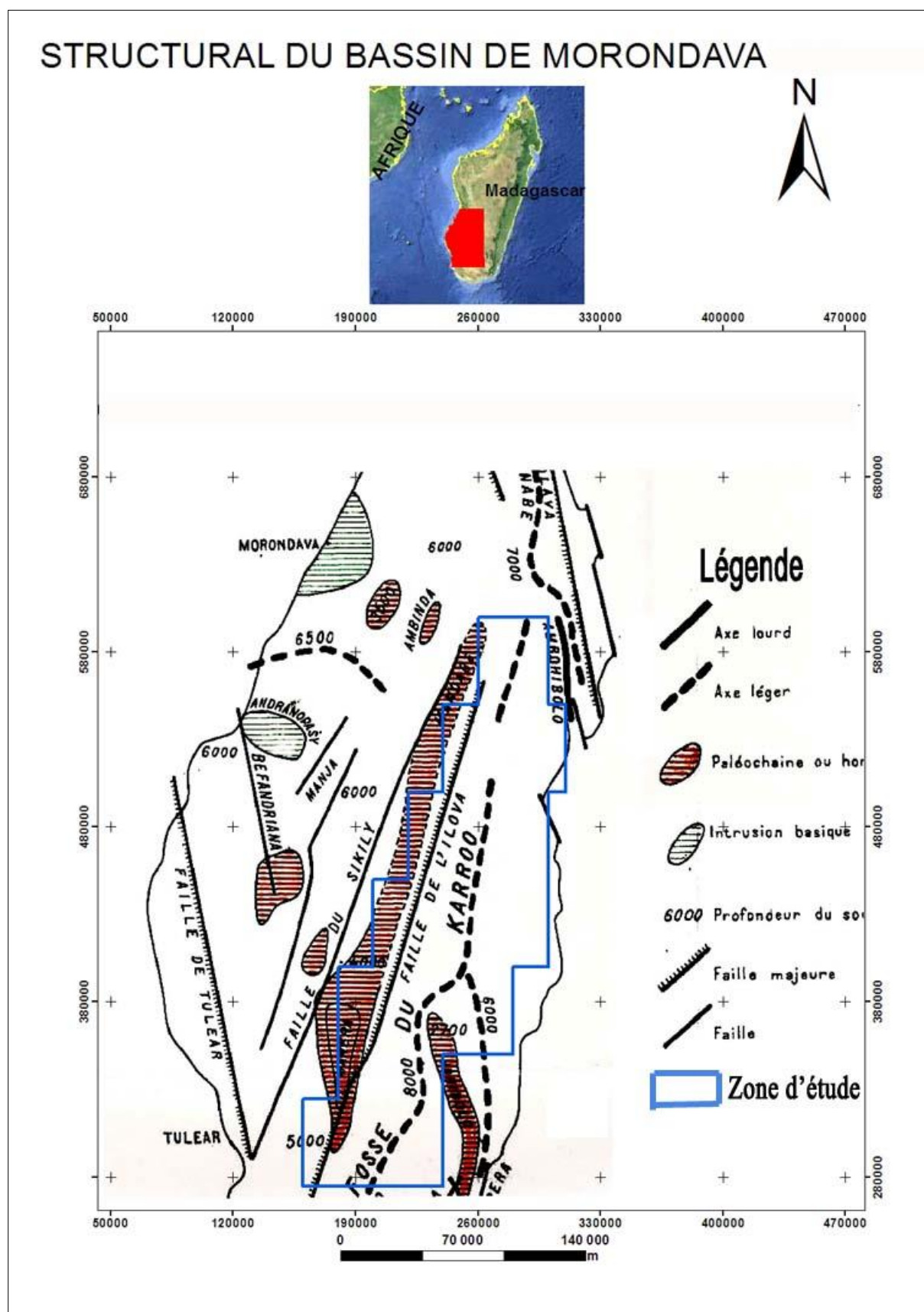
Échelle de février 2008 d'après le travail de la Commission Internationale de Stratigraphie.

International Commission on Stratigraphy.
http://www.stratigraphy.org

Annexe 2 : ANOMALIE DE BOUGUER ET ANOMALIE MAGNETIQUE DU
BASSIN DE MORONDAVA



Annexe 3: STRUCTURAL DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE MORONDAVA



Annexe 4 : BLOCS PETROLIERS

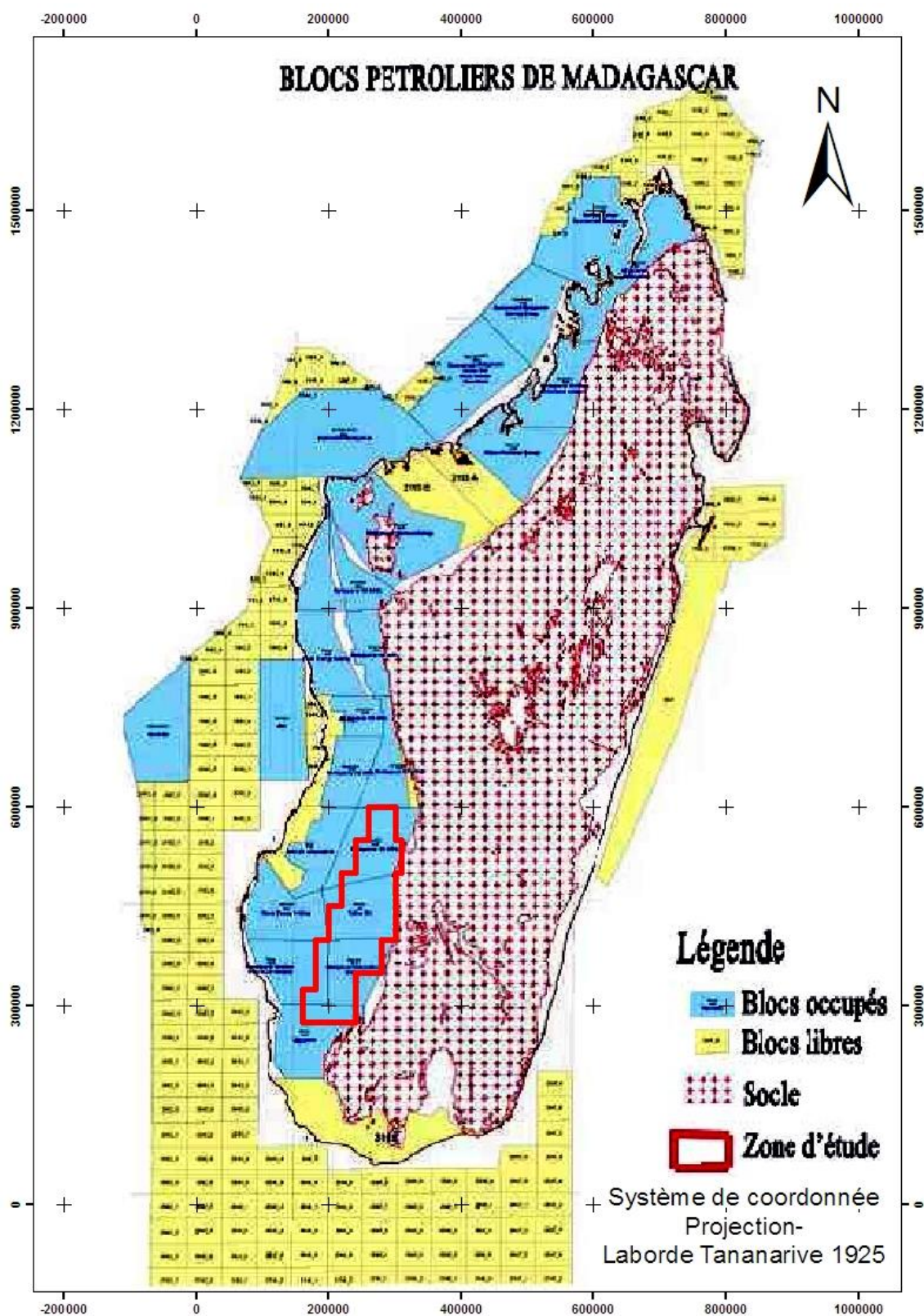


TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	iii
SOMMAIRE	v
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
INTRODUCTION	1
PARTIE I: GENERALITES SUR LES PROSPECTS PETROLIFERES	3
Chapitre 1: GEOLOGIE PETROLIERE	3
1. Gisement d'hydrocarbure	3
2. Processus de formation des hydrocarbures	3
3. Système pétrolier	6
3.1. Roches mères	6
3.2. La migration primaire.....	7
3.3. La migration secondaire.....	7
3.4. La migration tertiaire ou dysmigration	8
3.5. Présence de roche-réservoir	9
3.6. Roche-couverture	9
3.7. Pièges	9
3.7.1 Les pièges stratigraphiques	10
3.7.2 Les pièges structuraux :	10
3.7.3 Les Pièges mixtes	10
Chapitre 2: TRAVAUX D'EXPLORATION DES PROSPECTS PETROLIFERES.....	12
1. Prospection géologique en surface	13
2. Géophysique ou l'étude des profondeurs	13
3. Forages d'exploration. Vérification des hypothèses	15
PARTIE II: PRESENTATION DE LA COMPAGNIE OCCIDENTAL OF MADAGASCAR ET DE LA	
 ZONE D'ETUDE	18
Chapitre 3: PRESENTATION DE LA COMPAGNIE OCCIDENTAL OF MADAGASCAR « OXY » ...	18
1. OCCIDENTAL OF MADAGASCAR « OXY »	18
2. Les avenants de la convention d'association en participation pour le bloc SAKARAHHA	19
2.1. Avenant n°1	19

2.2.	Avenant n°2	20
Chapitre 4:	PRESENTATION DU BLOC SAKARAHHA	21
1.	Cadre géographique.....	21
2.	Cadre géologique	23
2.1.1	Phase rifting Karroo	24
2.1.2	La Rupture et la dérive (drifting) du continent	25
2.1.3	Eustatisme durant le jurassique et évènement géologique	25
3.	Le bassin sédimentaire de Morondava	26
4.	Description lithologique du bloc Sakaraha	26
4.1.	Le socle :.....	27
4.2.	Le système Karoo	28
5.	Aperçu général de la géologie structurale	31
PARTIE III:	TRAVAUX ENTREPRIS DANS LA ZONE D'ETUDE	35
Chapitre 5:	HISTORIQUE DU BLOC SAKARAHHA.....	35
1.	Introduction	35
2.	Travaux antérieurs	35
2.1.	Puits antérieurs.....	35
2.2.	Synthèse succincte des puits dans le bloc Sakaraha	37
2.2.1	Puits Bezaha.....	37
2.2.2	Puits Saloanivo	37
2.2.3	Puits Ambalabe	37
2.2.4	Puits AMPANDRAMITSETAKA ou TANDRANO	38
2.2.5	Puits Lambosina	38
2.2.6	Puits Manera.....	39
2.2.7	Puits Vohidolo.....	39
2.2.8	Puits Vohidolo 2.....	40
2.2.9	Puits Vohidolo 2 bis	40
2.2.10	Puits Sakaraha	41
2.3.	Conclusions tirées d'après ses résultats de forage	41
Chapitre 6:	TRAVAUX GEOLOGIQUES.....	45
1.	Travaux photo-géologique	45
2.	Investigations sur terrains.....	46
2.1.	Groupe de Sakoa.....	47
2.1.1	Environnement de dépôt de la Sakoa.....	48
2.2.	Groupe SAKAMENA.....	48
2.2.1	Sakamena Inférieure.....	48

2.2.2	Sakamena Moyenne	49
2.2.3	Sakamena supérieure	50
2.2.4	L'environnement de dépôt de la Sakamena	52
2.3.	Groupe de l'Isalo	52
2.3.1	Isalo I	53
2.3.2	Isalo II	53
2.3.3	Environnement de dépôt de l'Isalo	54
3.	Roches mères, roches réservoirs, roches couvertures	54
Chapitre 7:	TRAVAUX GEOPHYSIQUES	56
1.	Prospections gravimétrique et magnétique	56
1.1.	Résultats et observations	56
1.2.	Résumé	57
2.	Prospection sismique	58
Chapitre 8:	SYNTHESE DES RESULTATS GEOLOGIQUES ET GEOPHYSIQUES.....	64
1.	Synthese geologique et geophysique	64
2.	Proposition des structures pétrolières (Leads)	64
Chapitre 9:	TRAVAUX DE FORAGE.....	71
1.	Forage AMBANASA-I	72
1.1.	SYNTHESE DES RESULTATS	72
2.	FORAGE DE VOHIBASIA	73
2.1.	SYNTHESE DES RESULTATS	73
3.	SYNTHESE SUR LES FORAGES	74
Chapitre 10:	SYNTHESE PETROLIER DU BLOC SAKARAHHA	76
1.	Roches couvertures et roches réservoirs	76
2.	Roches mères	77
CONCLUSION.....		81
BIBLIOGRAPHIE et WEBOGRAPHIE		I
ANNEXES.....		III
TABLE DES MATIERES		VII