INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE

TOTAL

YPFB

ORSTOM

MODÉLISATION PÉTROLIÈRE DES FOOTHILLS BOLIVIENS (NORD ET CENTRE)

Texte

IFP TOTAL YPFB ORSTOM

Réf. IFP : 40419 Réf. Géologie : 29958 N° Projet IFP : B4135048 RB. 10 20 exemplaires Mars 1993

MODELISATION PETROLIERE DES FOOTHILLS BOLIVIENS (Nord et Centre)

P. Baby (1), B. Guillier (1), R. Limachi (2), E. Mendez (2), I. Moretti (3), M. Specht (4).

(1): ORSTOM; (2): YPFB; (3): TOTAL; (4): IFP Revu par B. Colletta (IFP)

RESUME:

Différentes roches mères, dont deux au potentiel relativement intéressant, ont pu être définies: la partie inférieure de la Formation Retama (Dévonien terminal à Carbonifère inférieur) et la Formation Copacabana (Carbonifère supérieur à Permien inférieur).

Deux périodes de génération et d'expulsion d'hydrocarbures sont mises en évidence: - une période anté-déformation andine (anté-26 Ma) qui a commencé dans la plupart des cas au Carbonifère,

- une période syn-déformation andine (post-26 Ma).

Le potentiel pétrolier de chacune de ces régions dépend de la quantité d'hydrocarbures générée ou non durant la première période et de l'importance de l'érosion triasique. On peut différencier quatre zones sur la base de leurs caractéristiques structurales du timing de la maturation.

Cuenca Madre de Dios:

C'est là que la roche mère est la meilleure, plus de 100 mètres d'épaisseur prouvée avec un TOC supérieur à 2% dans la Fm Retama. Le réservoir, du même age que la roche mère, est situé juste au dessus. La maturation est actuelle et seules les parties les plus profondes expulsent. La migration semble se faire sur de longues distances en provenance du nord-ouest (Pérou). La zone est malheureusement peu structurée.

Subandin Nord:

Sont présentes les 3 roches mères du Dévonien, de la Fm Retama et de la Fm Copacabana. Le Dévonien a été mature dès le Carbonifère, mais les deux autres roches mères ne génèrent que durant la déformation andine. L'expulsion est tardive et syn voir post-structuration en particulier dans les zones internes (Pelado, Liquimuni). L'existence d'un réservoir valable n'a encore jamais été démontrée.

Subandin Centre (Boomerang):

Le Paléozoique est épais et les roches mères sont entrées dans la fenêtre à huile dès la fin du Dévonien. L'huile expulsée aura donc été perdue par érosion des structures au Trias. Au Tertiaire, l'enfouissement entraine un passage dans la fenêtre à gaz. Aucune des roches mères ne montrent un excellent potentiel. Une partie de l'huile générée a pu rester non expulsée et migre actuellement en phase gaz après craking secondaire. Les découvertes dans les pièges structuraux de la région sont essentiellement du gaz à condensat, pour espérer trouver de l'huile il faudrait s'orienter vers les pièges stratigraphiques, anté déformation andine, qui auraient pu être préservés.

Subandin Centre (Isiboro):

Là encore la génération est essentiellement anté-déformation andine, de plus les structures sont presque toutes profondément érodées, exception faite de la structure la plus externe, l'anticlinal d'Isiboro.

La zone au potentiel pétrolier le plus intéressant serait donc les foothills du Nord de la Bolivie. C'est là que le timing relatif entre la structuration et l'expulsion des HC est le plus favorable.

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION

I. PRESENTATION DES FOOTHILLS ET DE LA CUENCA MADRE DE DIOS DE BOLIVIE

LES FOOTHILLS

- SUBANDIN NORD
 - Séries sédimentaires
 - Style structural

SUBANDIN CENTRE

- Séries sédimentaires
- Style structural

SUBANDIN SUD

- Séries sédimentaires
- Style structural

LA CUENCA MADRE DE DIOS BOLIVIENNE

- Séries sédimentaires
- Style structural

II. LES ROCHES MERES

FORMATION COPACABANA (Permien)

- Age et paléobathymétrie
- Extension géographique
- Caractéristiques géochimiques

FORMATION RETAMA (Carbonifère)

- Age et paléobathymétrie
- Extension géographique
- Caractéristiques géochimiques

DEVONIEN

- Age et paléobathymétrie
- Extension géographique
- Caractéristiques géochimiques

SILURIEN SUPERIEUR

- Age et paléobathymétrie
- Extension géographique
- Caractéristiques géochimiques

III. LES MODELISATIONS

COUPE PANDO

- Choix des paramètres: <u>Type de matière organique:</u> <u>Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:</u> <u>Discussion:</u>
- Résultats:

COUPE LIQUIMUNI

- Choix des paramètres: <u>Type de matière organique:</u> <u>Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:</u> <u>Timing de la déformation andine:</u> <u>Discussion:</u>
- Résultats:

COUPE ISIBORO

- Choix des paramètres: <u>Type de matière organique:</u> <u>Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:</u>
- <u>Discussion:</u> - **Résultats:**

COUPE BOOMERANG

- Choix des paramètres: <u>Thermicité:</u> <u>Type de matière organique:</u> <u>Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:</u>

- Résultats:

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

Introduction:

Ce rapport présente les résultats d'une modélisation pétrolière réalisée dans la partie centrale et septentrionale des foothills de Bolivie et dans la partie bolivienne du Bassin de Madre de Dios (fig. 1). Ce travail a été effectué dans le cadre d'une convention entre l'ORSTOM et YPFB, et d'une convention entre l'IFP et l'ORSTOM (convention n° 15 438). Il a consisté à:

- construire des coupes équilibrées;

- établir une banque de données géochimiques YPFB à partir des rapports laissés par les compagnies travaillant en Bolivie;

- compléter cette banque de données à partir d'un échantillonnage de terrain et de certains puits;

- effectuer la modélisation géochimique le long de 4 coupes équilibrées à l'aide du logiciel GENEX, .

Les résultats de ces modélisations sont des résultats préliminaires, obtenus avec des données géochimiques encore insuffisantes. Ces modélisations méritent d'être affinées, surtout en ce qui concerne le timing de la déformation durant les 25 derniers millions d'années.

I - PRESENTATION DES FOOTHILLS ET DE LA CUENCA MADRE DE DIOS DE BOLIVIE

LES FOOTHILLS

Les foothills de Bolivie (fig. 1) appelés plus communément le Subandin ont commencé à se structurer à la fin de l'Oligocène (Sempere et al, 1990) et se sont développés au cours du Néogène. Traditionnellement, on distingue le Subandin Nord entre 13° et 16° S, le Subandin Centre entre 16° et 19° S et le Subandin Sud entre 19° et 22° S (fig. 1). La construction de coupes équilibrées (Roeder, 1988; Shaffer, 1988; Baby et al., 1989, 1992a) confirme qu'il existe d'importantes différences structurales entre ces trois zones du Subandin.

SUBANDIN NORD

- Séries sédimentaires (fig. 2):

La série sédimentaire antéorogénique impliquée dans la structuration du Subandin Nord correspond à une série paléozoïque pratiquement continue - de l'Ordovicien au Permien - recouverte en discordance par les grès de la Formation Beu (Jurassique). Vers le NE, on observe une diminution d'épaisseur de l'Ordovicien et un biseautage progressif des séries siluriennes, carbonifères et permiennes. Sur cette série antéorogénique, reposent en discordance les sédiments continentaux d'avant-pays - d'âge Oligocène supérieur à Actuel - contemporains de la structuration des foothills. Ces sédiments tertiaires peuvent atteindre 6500 m d'épaisseur.

- Style structural (fig. 3):

Le Subandin Nord est structuré par d'importants chevauchements dont l'ampleur dépasse toujours la dizaine de kilomètres. Ces chevauchements se branchent sur le décollement principal qui se situe à la base de la série sédimentaire paléozoïque (Ordovicien) et qui se caractérise par une pente régulière de l'ordre de 5°. Les autres décollements impliqués dans certaines structures du Subandin Nord se trouvent à la base du Silurien, du Dévonien ou du Permien. Cette région se caractérise aussi par la présence de larges (jusqu'à 30 km) et profonds (jusqu'à 6500 m) synclinaux tertiaires. Certains d'entre eux correspondent à des bassins piggy-back contemporains de la déformation andine.

SUBANDIN CENTRE

- Séries sédimentaires (fig. 4):

L'épaisseur de la série sédimentaire impliquée dans les chevauchements du Subandin Centre varie du Sud vers le Nord. Dans les parties méridionale et centrale, le matériel antéorogénique impliqué dans les chevauchements correspond à une série pratiquement continue d'âge Ordovicien à Crétacé (Pádula, 1959 ; López, 1974). Sur la bordure septentrionale de la zone du Boomerang (fig. 1), la série paléozoïque est fortement réduite. En effet, on constate à la fois une diminution des épaisseurs sédimentaires et une disparition de la partie supérieure du Paléozoïque sous la discordance angulaire de la base des sédiments jurassiques (Formation Ichoa équivalente de la Formation Beu dans le Subandin Nord). Au Nord de la bordure septentrionale du Boomerang, le Paléozoïque disparaît totalement.

Le Subandin Centre est donc caractérisé par un biseau sédimentaire s'amincissant vers le Nord qui semble correspondre à la bordure septentrionale d'un bassin paléozoïque (Montemurro, 1992). Certains forages montrent que ce biseau paléozoïque repose sur des formations cambriennes ou précambriennes beaucoup plus compétentes. Il est recouvert par 500 m de sédiments mésozoïques et plus de 1650 m de sédiments terrigènes syn-chevauchements d'âge Oligocène supérieur à Actuel.

- Style structural (fig. 5):

Le Subandin Centre est la zone la plus complexe des foothills de Bolivie puisqu'il se situe dans la virgation des Andes centrales (fig. 1) appelée traditionnellement Coude de Santa Cruz. Ce changement d'orientation des structures des foothills de Bolivie est caractérisé par une importante zone de transfert de raccourcissement: la Zone du Boomerang (cf. Baby et al., 1992b). Il s'agit d'une rampe latérale qui coïncide avec un ensemble de petits champs d'hydrocarbures (condensats et gaz) récemment découverts. Cette rampe latérale disparaît à l'ouest sous les chevauchements frontaux d'Isiboro, alors qu'à l'est elle s'amortit brusquement.

Les coupes de la figure 5 montrent que les structures du Subandin Centre appartiennent à un système de chevauchements dont le décollement basal se trouve à l'interface Paléozoïque-Cambrien ou Paléozoïque-Précambrien. Une étude structurale et une approche expérimentale (Baby et al., 1992b) ont permis de montrer le rôle prédominant de la bordure septentrionale du bassin paléozoïque dans la structuration des fronts de chevauchement du Coude de Santa Cruz. C'est l'obliquité de certains tronçons de cette bordure par rapport à la direction générale de raccourcissement andin qui est à l'origine des zones de transfert du Boomerang et du nord d'Isiboro.

SUBANDIN SUD

- Séries sédimentaires (fig. 6):

La série antéorogénique déformée est pratiquement continue depuis le Silurien jusqu'au Mésozoïque. Cette pile sédimentaire se caractérise par une alternance de niveaux gréseux et de niveaux pélitiques siluro-dévoniens continus et relativement profonds, recouverts par plus de 2000 m de grès d'âge Paléozoïque supérieur et Mésozoïque dans lesquels les niveaux pélitiques sont très rares.

Les sédiments terrigènes tertiaires contemporains de la déformation andine - oligocène supérieur à actuelle - sont moins épais que dans le Subandin Nord, ils atteignent rarement les 4000 m d'épaisseur.

- Style structural (fig. 7):

L'alternance de niveaux gréseux et de niveaux pélitiques siluro-dévoniens continus et relativement profonds est favorable à la formation de décollements importants et au développement de duplex. Ainsi le Subandin Sud comprend un niveau de décollement principal à la base du Silurien, et 3 niveaux de décollement dans le Dévonien responsables de la formation de duplex. Les structures caractéristiques de cette partie des foothills sont des plis par propagation de faille et des "passive roof duplex" (Baby et al., 1992a). Il arrive parfois de trouver l'interférence de ces deux types de structures comme dans les Serranias de Aguaragüe et de San Antonio, où un "passive roof duplex" de Dévonien supérieur est déformé et transporté par un plis par propagation de faille de Silurien et de Dévonien inférieur.

Généralement, il s'agit là de la superposition de deux structures productrices: le toit du "passive roof duplex" (Dévonien sup.) produit de l'huile, alors Dévonien inférieur du plis par propagation de faille produit du gaz.

LA CUENCA MADRE DE DIOS BOLIVIENNE

- Séries sédimentaires (fig. 8):

Ce bassin connu uniquement en sismique et par 3 forages présente une série sédimentaire comparable à celle du Subandin Nord (fig. 2) qui repose sur le socle précambrien. La différence réside dans le fait que l'Ordovicien se biseaute progressivement vers le NE (fig. 9) et n'existe plus dans le puits Pando X1 (fig. 8). La série paléozoïque est ici aussi recouverte en discordance par les

grès de la Formation Beu (Jurassique). Cette importante discordance angulaire au niveau du Seuil de Madidi (fig. 9) disparaît progressivement vers le NNE pour réapparaître localement et de façon plus modérée au niveau du puits Pando X1. Le Tertiaire très épais au pied des foothills (5000 m) s'amincit progressivement vers le NE où il n'atteint plus que 2500 m dans la zone du puits Pando X1.

- Style structural (fig. 9):

La Cuenca Madre de Dios bolivienne est limitée au Sud par le Seuil de Madidi scellé par le Jurassique. Elle est déformée localement par quelques petites structures comme celle de Pando, scellées également par le Jurassique. Ces structures correspondraient à des inversions tectoniques d'âge triasique à jurassique de failles normales dévoniennes. La base de la Formation Beu semble en effet sceller progressivement cette déformation. La Faille de Madidi apparaît encore comme une faille normale à faible rejet car ce dernier n'a pas été complètement compensé par l'inversion.

II - LES ROCHES MERES

La banque de données de YPFB (cf. annexe) a permis de localiser les principales roches mères et de cibler notre étude, c'est à dire l'échantillonage et l'emplacement des coupes à modéliser. Les analyses TOTAL-IFP réalisées pour ce travail ont permis de confirmer la présence de ces roches mères et de définir les paramètres cinétiques de deux d'entre elles.

De façon générale, il s'est posé le problème de la qualité des roches mères et de leur épaisseur. La plupart des échantillons sont matures et isolés.

Dans le Subandin et la Cuenca Madre de Dios de Bolivie, du nord au sud, il existe d'importantes variations de faciès qui ont amené les géologues à définir un grand nombre de formations (fig. 2, 4 et 6). La stratigraphie de ces formations géologiques a été révisée et publiée récemment par YPFB (Oller, 1992; cf. annexe). C'est essentiellement ce cadre stratigraphique que nous avons utilisé pour attribuer un âge aux roches mères.

FORMATION COPACABANA

- Age et paléobathymétrie:

La base de cette formation est datée du Stéphanien (295 Ma) et son sommet du Permien inférieur (270 Ma). Il s'agit d'une alternance de marnes, de calcaires et de grès correspondant à des dépôts de plateforme marine (paléobathymétrie: 50 m).

- Extension géographique (fig. 10):

La répartition de cette formation est limitée à la Cuenca Madre de Dios, à la zone interne du Subandin Nord et à une petite partie du Subandin Centre. Quand elle n'est pas érodée, la Formation Copacabana peut dépasser 800 m d'épaisseur.

- Caractéristiques géochimiques:

Les analyses Rock-Eval TOTAL-IFP des échantillons de la coupe Liquimuni et du puits LQM-X1 (cf. annexe) ont confirmé les qualités roche mère de cette formation. Les valeurs de TOC connues jusqu'à maintenant dans les niveaux marneux et calcaires de cette formation (analyses 103-105-108-109, données YPFB en annexe) atteignent 6,3 %. L'index d'hydrogène maximum sur les échantillons est de 440. Un échantillonage de surface a été fait le long de la coupe Liquimuni, un très bon niveau a été relevé avec un TOC de 9%, correspondant à un banc d'une dizaine de mètres. Aucun log géochimique complet ne nous permet de connaître l'épaisseur réelle de cette roche mère, le seul puits traversant le Permien (Liquimuni) ayant été foré sur un flanc vertical. Une valeur moyenne

de TOC entre 1,5 et 2 % parait réaliste.

Une analyse OPTKIN d'un échantillon de la coupe Liquimuni (cf. annexe) a permis de définir les paramètres cinétiques de cette roche mère. Elle montre une maturation assez précoce.

FORMATION RETAMA (Toregua)

- Age et paléobathymétrie:

La roche mère correspond aux niveaux argileux de la partie inférieure de la Formation Retama, connue aussi sous le nom de Formation Toregua (fig. 2). Il s'agit d'une formation silicoclastique de plateforme marine (paléobathymétrie: 100 m). L'âge de sa base est mal défini car elle n'est marquée par aucune discontinuité sédimentaire. D'après les travaux de la Convention YPFB-ORSTOM, la partie inférieure de la Formation Retama (Toregua) pourrait s'étaler du Famennien supérieur (360 Ma) au Viséen (327 Ma). Cette formation présente une alternance de niveaux argileux roches mères et de niveaux gréseux réservoirs ou drains éventuels. La série est marine à forte teneur alguaire.

- Extension géographique (fig. 11):

La partie inférieure de la Formation Retama (Toregua) est limitée à la Cuenca Madre de Dios, à la zone interne du Subandin Nord et à une petite partie du Subandin Centre. Son épaisseur est d'environ 500 m. Ses caractéristiques roche mère sont prouvées sur le puits Pando-X1 et dans le secteur du Chaparé, à partir des données de terrain.

- Caractéristiques géochimiques:

C'est dans le puits Pando-X1 (fig. 8) que les analyses géochimiques ont donné les meilleurs résultats et montré l'intérêt de cette roche mère (cf. annexe). La formation Retama a un bon potentiel (TOC > 2%) sur une centaine de mètres entre 1400 et 1500 m et un potentiel moyen sur l'ensemble des passées argileuses.

La connaissance des paramètres cinétiques est toujours un point crucial de la modélisation. A Pando se pose le problème de l'état de maturité de la roche mère vu que les différents indiquateurs semblent en contradiction. L'index d'hydrogène atteind 660 se qui laisse à supposer que la roche mère serait immature alors que le Tmax de 445 pourrait faire croire à une roche mature. Cet antagonisme avait déjà été noté par le BEICIP (Mme Ducreux) lors d'analyses sur les roches mères algériennes du Paléozoique. Un Tmax de cet ordre ne serait donc pas représentatif d'une maturité élevée. Une analyse OPTKIN a été faite (cf annexe). Elle montre une maturité assez tardive. L'influence d'une éventuelle erreur due à l'analyse d'un échantillon déjà partiellement mature, avec un excellent IH initial, a été testée. L'erreur faite, compte tenu du flux de chaleur retenu, ne dépasse pas 200m.

Il semble que ces niveaux de roche mère existent aussi dans le Subandin nord (analyses 8-15-16-YPFB et éch-B32-TOTAL-IFP) et dans la partie nord du Subandin Centre (analyse 3 - Chapare -TOTAL-IFP) mais le nombre d'échantillons analysés est très faible.

DEVONIEN

- Age et paléobathymétrie:

La série sédimentaire roche mère dévonienne correspond à des sédiments silicoclastiques de plateforme marine dont la paléobathymétrie peut varier entre 100 et 200 m. Cette série s'étend du Lochkovien (410 Ma) au Famennien inférieur (360 Ma).

- Extension géographique (fig. 12):

La série dévonienne est présente dans tout le Subandin et la Cuenca Madre de Dios. Du sud vers le nord, elle devient plus pélitique, ce qui implique probablement une augmentation d'épaisseur des niveaux de roche mère. L'épaisseur totale du Dévonien peut atteindre 3000 m.

- Caractéristiques géochimiques:

Bien que présentant les mêmes caractéristiques sédimentaires et les conditions de dépôt que la partie inférieure de la Formation Retama, le Dévonien a apparemment de qualités roche mère médiocre (TOC =0.5 à 1%, voir par exemple le log du puits Santa Rosa), sauf dans sa partie supérieure qui pourrait correspondre à la base de la Formation Retama. Mais les données ne sont pas assez nombreuses pour que l'on puisse tirer des conclusions définitives. La maturité des échantillons nous empèche d'estimer le potentiel initial des roches mères. Nos échantillons, tous partiellement matures, n'ont pas permis d'effectuer d'analyse OPTKIN.

Au Sud de la Bolivie (puits Bermejo-44), le Dévovien inférieur a été reconnu roche mère (TOC=2,1% et S2=5kg/t) et localement les qualités roche-mère peuvent même être excellentes (TOC=5% et S2=8kg/t, puits SKW-5).

La série étant marine, le Type II de GENEX sera utilisé par défaut dans la modélisation.

<u>SILURIEN_SUPERIEUR</u>

- Age et paléobathymétrie:

Il s'agit aussi d'une série silico-clastique de plateforme marine (paléobathymétrie: 100 m), qui s'étale du Wenlockien (428 Ma) au Pridolien (410 Ma).

- Extension géographique(fig. 13):

Le Silurien supérieur est présent dans le Subandin Sud, le Subandin Centre et une petite partie de la zone interne du Subandin Nord. Il est très argileux dans le Subandin Sud où il peut constituer une importante roche mère. Son épaisseur augmente du nord vers le sud où il peut atteindre 1500 m.

- Caractéristiques géochimiques:

Bien que le Silurien soit réputé riche en matière organique, les quelques analyses géochimiques en notre possession ne montrent pas d'excellents résultats. Elles sont trop peu nombreuses pour permettre de conclure.

III LES MODELISATIONS

Hypothèses:

Les niveaux de roche mère des Formations Copacabana et Retama sont présents uniquement dans la Cuenca Madre de Dios, le Subandin Nord et le nord du Subandin Centre. Dans le Dévonien et le Silurien, nos rares échantillons (cf. annexe) n'ont pas permis de retrouver les niveaux roche mère qui sont présents dans le Subandin Sud. Pour ces raisons, les modélisations ont porté en 92 sur les parties nord et centre du Subandin, et sur la Cuenca Madre de Dios bolivienne.

En ce qui concerne les âges des séries sédimentaires, des surfaces d'érosion et des hiatus sédimentaires, nous avons utilisé le nouveau cadre stratigraphique adopté par YPFB (Oller, 1992; cf. annexe).

L'étude a consisté à modéliser à l'aide du logiciel GENEX des puits réels et fictifs d'une même coupe, suffisamment nombreux pour permettre d'avoir une idée en 2 dimensions de la position des fenêtres de génération et d'expulsion d'hydrocarbures. Dans ce rapport, un TR = 10% définit le début de la fenêtre à huile. Le seuil d'expulsion a été fixé à 15% dans GENEX, cette valeur est relativement basse et représente un minimum. De l'açon générale, le potentiel initial des roches mères étant faible, l'expulsion est tardive et le cracking secondaire de l'huile non expulsée doit être important.

Thermicité:

En l'absence de données de thermicité, nous avons imposé un flux de chaleur de 55 mw/m2, ce qui correspond à une valeur moyenne pour un bassin de foreland. Les quelques données disponibles plus au sud (Boomerang) indiquent un gradient relativement faible compatible avec cette valeur. Les variations du flux au cours de l'histoire géologique sont inconnues mais rien n'indique de phase d'extension, c'est à dire de variation notable du flux de chaleur, depuis le Dévonien.

Comme il a déjà été noté, les datations des séries continentales intra-tertiaires sont approximatives et les données géochimiques sont encore partielles (manque de données thermiques et méconnaissance des paramètres cinétiques); les résultats, en particulier en ce qui concerne l'expulsion, sont à considérer comme qualitatifs.

Toutes les données des puits réels et fictifs rentrés dans GENEX, ainsi que les résultats le leurs modélisations sont réunis dans l'annexe de ce rapport.

COUPE PANDO (fig. 14)

Cette coupe basée sur un montage de lignes sismiques et un calage au puits (Fig 1) est actuellement la mieux contrainte de la Cuenca Madre de Dios bolivienne. Les résultats de la modélisation ont été calibrés par les données du puits Pando X1 (cf. annexe) qui sont les seules accessibles sur cette région. Afin de modéliser l'ensemble de la coupe, 3 puits fictifs ont été créés.

- Choix des paramètres:

Type de matière organique:

Les différents types de matière organique utilisés sont :

- Carbonifère sup/Permien infèrieur: Type Copacabana défini sur la coupe Liquimuni (cf. OPTKIN en annexe), TOC = 1.5%, IH = 500;

- Carbonifère infèrieur: Type Retama défini dans le puits Pando X1 (cf. OPTKIN en annexe), TOC = 2%, IH= 667;

- Dévonien: le Type II (marin), valeur par défaut dans GENEX a été utilisé, TOC = 0.5%, IH= 627.

Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:

Les foothills et la partie orientale de la Bolivie sont caractérisés par deux surfaces d'érosion, et deux importants hiatus sédimentaires. Une troisième phase d'érosion quaternaire de 300 m a été supposée car la formation Charqui (Miocène terminal) est absente.

La première érosion, très spectaculaire (cf. fig. 14) mais encore peu étudiée, semble s'être produite entre 245 et 200 Ma. L'épaisseur de sédiments érodés (Permien) varie considérablement du nord vers le sud et est parfois difficile à estimer. Cette première érosion augmente vers le sud pour atteindre environ 2000 m dans Madidi 3 situé sur l'alto Madidi où le Permien, le Carbonifère et une partie du Dévonien ont été érodés.

La deuxième érosion s'est produite alors que les premiers chevauchements andins se développaient. Cette surface d'érosion beaucoup moins spectaculaire - on estime ici à 100 m l'épaisseur de sédiments (Crétacé) érodés - est datée à 26 Ma (Sempere et al., 1990). Elle influence très peu la modélisation, mais marque le début d'une subsidence rapide du bassin d'avant-pays andin.

Les deux importants hiatus sédimentaires ont eu lieu, l'un durant tout le Crétacé inférieur et l'autre durant tout le Paléocène.

- Discussion

Dans le cas de Pando-X1, deux modélisations (Pando 1 et Pando 2, cf. annexe) ont été effectuées en faisant varier l'épaisseur de Permien érodé: valeur minimale de 600 m dans Pando 1; valeur maximale (surestimée) de 1500 m dans Pando 2. Les deux modélisation sont compatibles avec les données au niveau de Pando qui se présente comme un point haut à l'extérieur de la kitchen. La série paléozoique

Ċ,

est mieux préservée à l'ouest, du fait de l'érosion différentielle triasique. L'étude optique a confirmée la non maturitée de la formation Copacabana, la réflectance est de l'ordre de 0.5 à 1340 m (Rapport TOTAL, 1993).

- Résultats:

Dans la modélisation de cette coupe, seule la partie la plus profonde du bassin est entrée dans la fenêtre à huile (fig. 14). La zone haute où se trouve le puits Pando-X1 est restée immature. Cette génération s'est faite en deux fois. On peut différencier une génération qui a commencé au début du Trias et cessé lors de la première phase d'érosion, et une génération contemporaine de la déformation andine (Miocène moyen à actuel) due à l'enfouissement dans le foreland andin.

La faible richesse des roches mère implique une expulsion tardive voir une non expulsion avant l'entrée dans la fenêtre à gaz.

Au niveau de la coupe de Pando, l'expulsion des hydrocarbures commencerait à peine dans la zone la plus profonde. Par conséquent, la présence d'huile dans le puits Pando-X1 peut être expliquée par une migration longue distance à travers les bancs gréseux du Retama qui constituent aussi le réservoir. A l'W et au NW (Pérou), la Cuenca Madre de Dios est plus profonde, et c'est de là que viendraient les HC.

COUPE LIQUIMUNI (fig. 15)

Le Subandin Nord est sous exploré, seuls 3 puits y ont été forés, le dernier d'entre eux -Liquimuni X1 - est situé sur la coupe choisie. Le reste de la modélisation, a été basée sur l'étude de puits fictifs créés le long de la coupe. Un second puits en cours de forage a pour objectif la structure sousjacente. En position externe, un puits a été foré sur le trend de Boya mais à 200 km de cette coupe. Aucun réservoir n'a été rencontré. De façon générale, l'existence d'un réservoir de qualité (à part le Crétacé qui est souvent affleurant) reste problématique dans le subandin nord.

Les résultats de cette modélisation sont peu contraints car ils n'ont pu être testés qu'en un seul endroit - dans la Serania El Pelado (cf. puits fictif Pelado en annexe), à partir d'une analyse Rock-Eval dans la Formation Copacabana.

- Choix des paramètres:

Type de matière organique:

La stratigraphie et la lithologie étant très semblables à celles de La Cuenca Madre de Dios (fig. 2 et 8), les différents types de matière organique utilisés sont les mêmes que dans la coupe

précédente:

- Type Copacabana défini sur la coupe Liquimuni (cf. OPTKIN en annexe);

- Type Retama défini dans le puits Pando X1 (cf. OPTKIN en annexe);

- Type II de GENEX que nous avons attribué au Dévonien.

Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:

On retrouve ici les deux importantes discordances régionales de 245 Ma et 26 Ma, ainsi que les hiatus sédimentaires du Crétacé inférieur et du Paléocène.

L'érosion de 245 Ma est moins importante que dans le Pando et diminue du NE vers le SW; elle est au maximum de 800 m.

L'érosion 26 Ma a été estimée à 100 m.

Dans les profonds synclinaux tertiaires de part et d'autre de l'anticlinal Liquimuni (fig. 15), la sismique montre la présence de deux discordances progressives intra-Miocène, qui n'ont jamais pu être datées et qui impliquent d'importantes variations d'épaisseurs. Pour la modélisation, nous leur avons attribué les âges de 23 Ma et 14 Ma qui resteront à vérifier. Ces discordances passent à des surfaces de concordance au centre du synclinal situé à l'est de l'anticlinal Liquimuni où nous avons choisi de modéliser un puits fictif (Liquimuni 1).

Timing de la déformation andine:

Sur cette coupe (fig. 15), les importantes variations d'épaisseur du Tertiaire (de 0 à 6000 m) ont été contrôlées par les chevauchements andins. Ces variations sont surtout marquées dans les deux bassins piggy-back qui limitent l'anticlinal Liquimuni. Ces deux bassins se sont développés en arrière de chevauchements (Liquimuni et El Pelado) qui ont commencé à fonctionner dès la fin de l'Oligocène, avec sans doute des arrêts et des reprises de la déformation au cours du Miocène. Les "phases de déformation" d'âge tertiaire sont mal datées mais nous avons dû estimer leur âge (23 et 14 Ma) pour la modélisation dans GENEX. La géométrie de ces chevauchements montre qu'ils ont rejoué tardivement, provoquant ainsi l'érosion de la partie supérieure des anticlinaux. Nous avons daté cette dernière érosion à 5 Ma.

Les chevauchements plus orientaux semblent avoir fonctionné essentiellement après 10 Ma.

- Résultats:

Ici encore, il apparait deux périodes de génération d'hydrocarbures. La première (antédéformation andine) a eu lieu dans la zone où le Dévonien est le plus épais (zone interne, cf. fig. 15B) et a commencé à la fin du Carbonifère. Elle n'a affecté que les roches mères dévoniennes. La deuxième période de génération, syn-déformation andine, a commencé au début du Miocène (23 Ma) et a affecté toutes les roches mères (fig. 15A et B). Elle est due à l'importante surcharge des sédiments continentaux tertiaires qui se sont déposés pendant le fonctionnement des chevauchements andins. La figure 15B montre l'importance relative des roches mères ayant générées au Paléozoique et de celles générant actuellement.

Contrairement à la coupe précédente (fig. 14), nous avons dans le Subandin Nord une importante expulsion d'hydrocarbures qui s'est produite durant la déformation andine. Cette expulsion est essentiellement liée à l'enfouissement donc à la mise en place des chevauchement, s'est produite en deux fois - environ à 23 Ma et à 14 Ma - dans la zone la plus interne (cf. puits fictif Liquimuni 1 en annexe) et en une fois - à 14 Ma - au niveau du chevauchement le plus frontal (cf. puits fictif Eva-Eva en annexe).

Deux domaines peuvent être définis:

- dans les zones internes, l'enfouissement, la maturation et donc l'expulsion sont syntectoniques. La forte maturation est limitée aux zones ayant subi un enfouissement tertiaire important, i.e. sous les dépôts centre des bassins piggy-backs. En revanche, la maturité des séries paléozoique est faible dans les structures anticlinales. C'est par exemple le cas au niveau de l'anticlinal El Pelado où les analyses Rock-Eval (cf. annexe) ont montré que la Formation Copacabana était immature. Elle n'a donc jamais été profondément enfouie sous le Tertiaire.

- dans les zones externes où se sont déposés jusqu'à 4500 mètres de Nèogène avant toute structuration, la vitesse de sédimentation au Miocène étant très forte, le gradient thermique a chuté à cette époque (phénomène de blanketing). La maturation n'a été atteinte que très récemment après un lent réchauffement des sédiments. Ainsi, si l'enfouissement est anté-déformation, la maturation elle, est syn à post-structuration.

COUPE ISIBORO (fig. 16)

Cette coupe ne présente qu'une seule structure intéressante, l'anticlinal frontal d'Isiboro. Toutes les autres structures chevauchantes sont profondémént érodées à cause de l'important taux de raccourcissement qui caractérise cette région.

Les rares données géochimiques de cette zone n'ont pas permis de caler les résultats de cette modélisation.

- Choix des paramètres:

Type de matière organique:

Contrairement aux deux coupes précédentes, celle-ci ne présente pas la Formation Copacabana, mais comprend par contre une nouvelle formation continentale d'âge crétacé supérieur (Formation Flora, environ 80 m). Cette coupe se caractérise aussi par un important biseau sédimentaire paléozoïque dans sa partie interne. La stratigraphie et la lithologie ont donc varié. Les différents types de matière organique utilisés sont: - Type I de GENEX que nous avons attribué à la Formation Flora;

- Type Retama (cf. OPTKIN-Pando X1 en annexe) que nous avons attribué à la base du Carbonifère et à tout le Dévonien supérieur;

- Type II de GENEX que nous avons attribué au Dévonien inférieur et au Silurien supérieur.

Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:

Seule la discordance régionale de 245 Ma apparaît de façon significative. L'épaisseur de sédiments érodés augmente du SW vers le NE pour atteindre une valeur maximale de 700 m. La discordance Oligocène n'est pratiquement pas érosive puisque la Formation Flora (crétacé sup.) est ici présente.

On trouve ici aussi les hiatus sédimentaires du Crétacé inférieur et du Paléocène.

- Résultats:

Ils sont résumés sur la fig. 16 où sont représentés l'état actuel de la coupe Isiboro et son état restitué avant la déformation andine.

Sur la coupe restitué à la fin du mésozoïque, on a figuré les formations qui ont commencé à générer et à expulser avant le début de la déformation andine (26 Ma). Cette première génération a commencé dès le Dévonien et a affecté pratiquement tout le biseau paléozoïque. Quant à l'expulsion, elle ne s'est produite qu'à la base du biseau paléozoïque.

La deuxième génération (post-26 Ma) est représentée dans l'état actuel, elle a commencé il y a environ 20 Ma. Elle a affecté toute la coupe sauf la lame chevauchante de l'Anticlinal Isiboro. Les expulsions post-26 Ma se sont produites en deux fois - à15 Ma et à 10 Ma - essentiellement dans le biseau paléozoïque.

Le problème est de savoir comment était structurée cette coupe lors de l'expulsion. Pour que l'Anticlinal Isiboro ait la possibilité de contenir des hydrocarbures, il faudrait une propagation "out of sequence" des chevauchements, avec un développement anté-expulsion de Isiboro et un développement post-expulsion des chevauchements plus internes. Il n'existe pas actuellement d'arguments pour vérifier cette hypothèse, mais elle nous paraît peu probable étant donné la propagation de chevauchement piggy-back qui caractérise le Subandin Nord.

COUPE BOOMERANG (fig. 19)

Cette coupe est située dans la zone des principaux champs d'hydrocarbures de Bolivie; la zone de transfert du Boomerang (cf. Baby et al., 1992b). Elle est bien contrainte par la sismique et par les puits de Santa Rosa-X2 (fig. 17) et de San Juan-X2 (fig. 18), dont les analyses géochimiques ont permis de tester les résultats de la modélisation. Trois puits fictifs ont été créés pour compléter cette modélisation.

Type de matière organique:

La zone du Boomerang est constituée par un prisme sédimentaire paléozoïque décollé à sa base (cf. Présentation des foothills, cf. Chap. I). Dans ce prisme sédimentaire, les Formations Copacabana et Retama n'existent plus. Nous avons choisi d'utiliser pour cette modélisation les types de matière organique suivants:

- Type Retama (cf. OPTKIN-Pando X1 cn annexe) que nous avons attribué au Dévonien supérieur et moyen;

- Type II de GENEX pour le Dévonien inférieur et le Silurien supérieur.

Surfaces d'érosion et hiatus sédimentaires:

L'érosion 26 Ma a enlevé en moyenne 300 m de Crétacé supérieur comme le montrent les données de puits. L'érosion 245 Ma est ici très forte surtout sur la bordure du prisme sédimentaire (fig.4) où elle a enlevé au moins 2300 m de sédiments paléozoïques (puits Santa Rosa-X2, fig. 17). Les hiatus sédimentaires du Crétacé inférieur et du Paléocène sont toujours présents.

Résultats:

Les fenêtres de génération et d'expulsion d'hydrocarbures sont représentées sur l'état reconstitué avant 26 Ma et sur l'état actuel. Sur l'état reconstitué, on voit qu'avant 26 Ma pratiquement tout le Silurien supérieur et le Dévonien inférieur avaient commencé à générer et à expulser. La génération a commencé au début du Carbonifère et l'expulsion à la fin du Carbonifère. Aucune structure de cet âge n'est connue, le seul thème d'exploration que l'on puisse retenir est celui des pièges stratigraphiques (chenaux carbonifères, biseaux sédimentaires).

Après 26 Ma (cf. état actuel), le Dévonien supérieur a généré et expulsé, mais seulement dans la partie la plus enfouie de la Zone du Boomerang (San Juan-X2).

Le fait que la zone du Boomerang produise essentiellement du gaz et du condensat est probablement lié à la mauvaise qualité de la roche-mère dévonienne (TOC< 1%). L'huile n'a pas été expulsée et le cracking secondaire conduit à un fort potentiel en gaz lors de l'enfouissement sous les séries d'avant pays. On retrouve ici le même problème que sous le forland andin plus au Sud, en Argentine; le fort potentiel en gaz du Rio Chico s'explique par la médiocre qualitée des roches mères.

CONCLUSIONS

Les analyses géochimiques montrent qu'il existe dans les foothills et la Cuenca Madre de Dios de Bolivie trois formations pouvant contenir des niveaux de roche mère:

- les Formations Retama (Dévonien terminal - Carbonifère inf.) et Copacabana (Carbonifère sup. -Permien inf.) caractéristiques du nord de la Bolivie, dont les niveaux de roche mère ont été définis dans cette étude;

- la série dévonienne (Lochkovien-410 Ma à Famennien inférieur-360 Ma) présente dans tout les foothills et la Cuenca Madre de Dios, dont les niveaux de roche mère sont mal définis;

- le Silurien supérieur dont les niveaux de roche mère sont encore hypothétiques.

Les résultats des 4 modélisations mettent en évidence deux périodes de génération et d'expulsion d'hydrocarbures.

La première période de maturation-expulsion, qui a commencé au Dévonien ou au Carbonifère, est associée à l'approfondissement du bassin paléozoïque. Les hydrocarbures expulsés avant le Trias ont pu s'accumuler dans des pièges stratigraphiques (thème des chenaux carbonifères - encore non prouvé) mais, faute de structure, la majorité de ces hydrocarbures a probablement été perdue. En outre, dans la zone externe des foothills, l'érosion triasique (245 Ma) a enlevé jusqu'à 2000 m de Paléozoique et donc probablement une bonne partie des accumulations précoces d'hydrocarbures.

La deuxième période de maturation-migration est due à l'enfouissement du bassin paléozoïque sous les sédiments continentaux tertiaires du foreland et des bassins piggy-back andins. En régle générale, le Dévonien est mature dès la fin du Carbonifère, il n'a plus dans cette deuxième période de maturation qu'un potentiel à gaz. En revanche le Permien ne génére que pendant la phase andine et confère donc à la partie interne du Sub-Andin nord un potentiel à huile.

La coupe Pando est caractérisée par des structures de petite taille correspondant à des inversions tectoniques d'âge mésozoïque. La modélisation montre que sur cette coupe l'enfouissement des roches mères n'a pas été sulfisant pour leur permettre de rentrer dans la fenêtre d'expulsion. La structure Pando aurait donc été alimentée au Tertiaire, par la migration longue distance d'hydrocarbures expulsés dans la partie nord occidentale - plus profonde - de la Cuenca Madre de Dios.

La coupe Liquimuni montre que l'expulsion des hydrocarbures s'est faite au Tertiaire alors que certaines structures internes actuellement de grande amplitude (Liquimuni, El Pelado) étaient probablement en cours de développement. La modélisation de cette coupe mérite d'être affinée à partir de nouvelles analyses géochimiques et d'une meilleure connaissance des relations tectoniquesédimentation cénozoïques.

Sur la coupe Isiboro, seule la structure frontale (Anticlinal Isiboro) pourrait présenter un intérêt. En effet, toutes les structures plus internes sont profondement érodées.

La comparaison de la coupe d'Isiboro avec celle du Boomerang montre cependant que l'aire de drainage de la structure frontale est beaucoup plus faible sur la première coupe que sur la seconde: il semble ainsi difficile d'alimenter l'anticlinal d'Isiboro si les 2 ou 3 chevauchements plus internes ne sont pas out-of-sequence.

Dans la coupe du Boomerang, la modélisation montre des résultats cohérents avec la présence des champs d'hydrocarbures connus jusqu'à maintenant. En effet, ces derniers sont concentrés sur les structures frontales du Boomerang. Celles-ci semblent s'être développées dès le début de la structuration de la zone du Boomerang et avant l'expulsion tertiaire des hydrocarbures.

Les données géochimiques de la partie méridionale des foothills ont paru insuffisantes pour tenter une modélisation. C'est une zone relativement bien explorée, par rapport au reste des foothills, et mieux connue stratigra-phiquement et structuralement. L'inconnue reste la définition des roches mères réputées dévoniennes, et peut être siluriennes. Un échantillonage programmé pour le mois d'Avril 93 devrait nous permettre d' effectuer la modélisation du subandin sud au cours de l'année 93.

REFERENCES

- Baby, P., G. Hérail, J.M. López, O. López, J. Oller, J. Pareja, T. Sempere, et D. Tufiño, Structure de la Zone Subandine de Bolivie: influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements, C. R. Acad. Sci. Paris, ser. 2, 309, 1717-1722, 1989.
- Baby, P., G. Hérail, R. Salinas, and T. Sempere, Geometric and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced from cross section balancing: example from the foreland thrust system of the southern bolivian subandean zone, *Tectonics*, vol. 11, n° 3, 523-536, 1992a.
- Baby, P., J. Oller, et G. Montemurro, La zone de transfert du Boomerang (Bolivie): interprétation et approche expérimentale, Rapport IFP, Convention ORSTOM-IFP, 43 p., 12 fig., 17 planches, 1992 b.
- Montemurro G., Desarrollo de Facies Sedimentarias del Silurico-Devonico en el Sector Boomerang-Subandino Centro, Bolivia, Conferencia Internacional Cuencas Fanerozoicas del Gondwana Suroccidental, Santa Cruz (Bolivie), 12-16 août. 1992.
- López, J.M., Correlación estratigrafica longitudinal de la Faja Subandina entre las fronteras del Peru y Argentina, *Rep 1906*, Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos, Santa Cruz, 1974.
- Oller, J., Nouveau Cadre Chronostratigraphique de Bolivie, document YPFB, 1992.
- Padula, E.L., Valoración de las discordancias en las Sierras Subandinas, Bol. Tec. YPFB, T1, 7-28, 1959.
- Roeder, D., Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia). *Tectonics*, 5:23-39, 1988.
- Sempere, T., G. Hérail, J. Oller and M.G. Bonhomme, Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia, *Geology*, 18, 946-949, 1990.
- -Sheffels, B.M., Structural constraints on crustal shortening in the Bolivian Andes. Unpublished Ph. D., M.I.T., Cambridge, 170pp

LISTE DES_FIGURES

- FIG. 1- Carte tectonique de Bolivie avec localisation des foothills.
- FIG. 2- Colonne lithostratigraphique du Subandin Nord.
- FIG. 3- Coupe équilibrée à travers le Subandin Nord (Liquimuni).
- FIG. 4- Stratigraphie et lithologie du Subandin Centre; correlations stratigraphiques entre la zone méridionale et la zone septentrionale du Boomerang.
- FIG. 5- Coupes équilibrées à travers le Subandin Centre (Boomerang, Isiboro).
- FIG. 6- Colonne lithostratigraphique du Subandin Sud.
- FIG. 7- Coupe équilibrées à travers le Subandin Sud (Villamontes).
- FIG. 8- Colonne lithostratigraphique du puits Pando-X1.
- FIG. 9- Coupe structurale à travers la Cuenca Madre de Dios.
- FIG. 10- Carte de répartition de la Formation Copacabana (Carb. sup- Permien inf).
- FIG. 11- Carte de répartition de la Formation Retama (Dev. terminal Carbo. inf.).
- FIG. 12- Carte de répartition du Dévonien.
- FIG. 13- Carte de répartition du Silurien supérieur.
- FIG. 14- Modélisation de la maturation des roches mères le long de la Coupe Pando.
- FIG. 15- Modélisation de la maturation des roches mères le long de la Coupe Liquimuni.
- FIG. 16- Modélisation de la maturation des roches mères le long de la Coupe Isiboro.
- FIG. 17- Colonne lithostratigraphique puits Santa Rosa.
- FIG. 18- Colonne lithostratigraphique puits San Juan.
- FIG. 19- Modélisation de la maturation des roches mères le long de la Coupe Boomerang.



ECHELLE - 1:8 000 000

PROVINCES GEOLOGIQUES

Altiplano Occidental
Altiplano Oriental
Cordillera Oriental
Interandin
Subandin (FOOTHILLS)
Avant-pays andin
Bouclier Brésilien

AGE		FORMATION	THICKNESS		ROCK		
AGE		FURMATION	m	LITHOLOGY	SOURCE	RESERV.	SEAL
TERTIARY	PLIOC.	TUTUMO	> 500				
		CHARQUI	>2500				
		QUENDEQUE	> 1500				
	UPPER OLIG.	BALA	> 200				
SU	MAAS-	FLORA	> 80				
CRETACEO	JPPER	BEU LOWER	> 200				222
~	UP.	BOPI	200				
IF. PEANIA	MO STEF.	COPACABANA (NUBE)	> 600				
CARBON	TOURN - VISEAN	RETAMA KAKA TOREGUA	> 500		_		
IIAN	UP.	TOMACHI	> 350				
DEVON	LOWER M	TEQUEJE	> 750				
SIL.	UP.		> 100		=		222) 2722
ORDOVICIAN	CARADOCIAN	TARENE	400				
		ENADERE	> 400	6			

GENERALIZED STRATIGRAPHIC COLUMN NORTHERN SUBANDEAN

FIG. 2

•







COUPE LIQUIMUNI (Subandin Nord)

FIG. 3

NE

SEDIMENTARY WEDGE OF THE BOOMERANG AREA





AGE			THICKNESS m.		ROCK			
		FORMATION		LITHOLOGY	SOURCE	RESERV.	SEAL	
TERTIARY	MIOCENO	EMBOROZU		> 1000				
		GUANDACAY		>1500				
		TARIQUIA		> 1000				
		YECUA		300	G			\square
	UPPER OLIG.		PETACA	200	67-0-7-00-0			
TRIAS JURAS.	LOWER	-	ICHOA	500				
		URI	CASTELLON	600				
		TAC	TAPECUA	300				
S.	>'	BAS	ALTO ENTRE RIOS	> 50				
(RIA	ΓO		IPAGUAZU	260				77
٦.	UP.		VITIACUA	180	G			
PERN	LOW.		CANGAPI	250				
-	LOW. UPPER.		SAN TELMO	20	STITUTE S			
CARBONIFEROUS			ESCARPMENT	> 500	متعققه			
			TAIGUATI	200	6			
			CHORRO	> 300				
			TARIJA	> 800				
			ITACUAMI	100				
			TUPAMBI	> 200	-Hadadar			
)			ITACUA	200				
	UPPER		IQUIRI	> 400				
DEVONIAN	MID.		LOS MONOS	600	G			
	LOWER	ŀ	UAMAMPAMPA	> 600	G annual C			
		ICLA SANTA ROSA		600	G			
				600				
SILURIAN	UPPER	TARABUCO KIRUSILLAS		> 600	6	=		
				> 700	G			
	LOW.	CANCANIRI		> 50				
ORD.	LOW.	CIENEGUILLAS ISCAYACHI		> 800	G			
САМВЯ.	UP.	SAM	A/TOROHUAYCO/CAMACHO	> 200	M M M			
BB	щ		SAN CRISTOBAL		+++++			
PRECAN	UPPI		+ BASAMENT		++++++			

GENERALIZED STRATIGRAPHIC COLUMN SOUTHERN SUBANDEAN







COUPE VILLAMONTES (SUBANDIN SUD)

PANDO X1



FIG. 8.

COUPE PANDO A TRAVERS LA CUENCA MADRE DE DIOS







Altiplano Occidental Altiplano Oriental Cordillera Oriental Interandin Subandin (FOOTHILLS) Avant-pays andin Bouclier Brésilien



FORMATION COPACABANA (Carbonifère sup.-Permien inf.)

FIG. 10:

CARTE DE REPARTITION DE LA FORMATION COPACABANA DANS LES FOOTHILLS ET L'AVANT-PAYS





Altiplano Occidental Altiplano Oriental Cordillera Oriental Interandin Subandin (FOOTHILLS) Avant-pays andin Bouclier Brésilien



FORMATION RETAMA (Dévonien terminal-Carbonifère inf.)

FIG. 11:

CARTE DE REPARTITION DE LA FORMATION RETAMA DANS LES FOOTHILLS ET L'AVANT-PAYS



Altiplano Occidental Altiplano Oriental Cordillera Oriental Interandin Subandin (FOOTHILLS) Avant-pays andin Bouclier Brésilien



FIG. 12: CARTE DE REPARTITION DU DEVONIEN DANS LES FOOTHILLS ET L'AVANT-PAYS



Altiplano Occidental Altiplano Oriental Cordillera Oriental Interandin Subandin (FOOTH/LLS) Avant-pays andin Bouclier Brésilien



FIG. 13:

CARTE DE REPARTITION DU SILURIEN SUPERIEUR DANS LES FOOTHILLS ET L'AVANT-PAYS

MODELISATION COUPE PANDO



Madidi 2 = puits fictifs Madidi 3





Fenêtre de génération d'huile.

Fenêtre de génération d'huile + gaz

Fenêtre de génération de gaz.



FIG. 15 A

MODELISATION COUPE LIQUIMUNI (Subandin Nord)







Fenêtre de génération d'hydrocarbures post-26 Ma. Fenêtre de génération d'hydrocarbures

anté-26 Ma.



FIG. 15 B MODELISATION COUPE LIQUIMUNI (Subandin Nord)















Pré - Oligocène

MODELISATION COUPE BOOMERANG

INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE

BP 311 92506 Rueil-Malmaison Cedex - France Tél. : national (1) 47 49 02 14 international 33 (1) 47 49 02 14 Télex : IFP 634202 F Télécopieur : 33 (1) 47 52 70 00