

Article paru dans **Géologues**, revue de l'Union Française des Géologues
numero 127 Décembre 2000

reconstitué par A. Laumondais par reconnaissance de texte à partir du magazine scanné suite à la destruction du texte original en format Word.

45 ans de géophysique pétrolière

Jean Laherrère

"Tout ce qui est simple est faux et tout ce qui est complexe est inutilisable"
Paul Valéry

La sismique est née pendant la première guerre mondiale quand les Allemands repéraient les canons alliés en mesurant leurs ondes (réfractées) dites alors acoustiques; puis ils l'ont appliquée à la recherche pétrolière des dômes de sel en Allemagne (Seismos, 1924) tandis qu'ils développaient aussi la sismique réflexion. Toutes deux ont été exportées aux Etats-Unis. Mais très vite la réflexion, plus précise, a éclipsé la réfraction (sauf en Iran, Sicile et au Sahara). La gravimétrie a, elle aussi, été introduite dans les années 1920 sur les dômes de sel du Texas. La géophysique de puits (logging), qui a débuté dans les années 20 avec les frères Schlumberger et a été développée pendant longtemps par des électroniciens utilisant alors des équations simples, (recettes de cuisine ne satisfaisant pas aux équations de dimensions), est devenue de ce fait un domaine à part dans le monde occidental (contrairement à ce qui se passe chez les Russes), et ne sera pas traité ici.

L'enseignement de la géophysique à l'ENSPM dans les années 50 portait surtout sur la théorie, et les pratiques n'avaient que peu évolué depuis les débuts. La sismique réflexion était surtout sismo unique et trou (dans l'aquifère) unique. Entré chez CFP en 1955 après l'ENSPM j'ai donc vécu une grande partie de l'évolution de la géophysique mondiale. Affecté comme géophysicien au Sahara en 1956 où j'ai eu la chance de participer à la découverte des plus grands champs d'huile et de gaz d'Afrique (Hassi Messaoud et Hassi R'Mell), j'ai connu là la sismique réflexion qui ne pouvait donner d'informations utiles sous les évaporites et la sismique réfraction qui suivait bien l'arrivée du socle en arrivée seconde avec une vitesse de 5 600 m/s, ainsi que la gravimétrie et l'aéromagnétisme. J'ai tenté de mesurer l'anisotropie (Dunoyer, Laherrère, 1959) des terrains sédimentaires avec un modèle issu des premiers CVL (Continuons Velocity Logging, ancêtre du Sonic, où l'on devait pointer soi-même en direct l'arrivée première), en enregistrant à 15 km avec un géophone dans le granite d'Hassi Messaoud des tirs en surface de 4 tonnes. J'ai essayé avec difficulté de caler la sismique avec les premiers films synthétiques (Laherrère, 1961). J'ai vu le passage de l'enregistrement analogique sur films, puis sur bande magnétique (1957), puis l'enregistrement numérique (1964). Le plus grand progrès en réflexion a été le passage au CDP (common depth point) en 1962 où, grâce à l'enregistrement magnétique, l'on a pu ajouter de nombreux trajets d'angles différents sur le même point réflecteur avec un degré de couverture élevé. Du désert du Sahara je suis passé aux déserts d'Australie où j'ai combiné la sismique réflexion et réfraction avec la gravimétrie (Laherrère, Drayton, 1965); puis aux déserts blancs du Grand Nord du Canada et à la recherche des récifs dans les provinces et au Michigan. La direction de la recherche et de l'assistance technique exploration pour Total et mon poste d'administrateur chez CGG m'ont exposé à toute la géophysique mondiale. La présidence de la Commission Exploration du

Comité des Techniciens (UFIP) m'a impliqué dans plusieurs manuels. En retraite depuis 1992, si je ne vois plus de coupes sismiques autrement que dans les articles traitant du sujet, je continue à conduire des réflexions sur les réserves d'hydrocarbures et leurs distributions dans la nature (<http://www.oilcrisis.com/Laherrère>)

Quels témoignages et quels bilans peuvent être portés sur ce demi-siècle de géophysique?

Topographie

Le topographe était un composant essentiel de l'acquisition. Bien localiser le lieu d'enregistrement commençait autrefois dans les régions désertiques sans infrastructure par l'enregistrement d'un "point astro" de base par observation pendant plusieurs jours du passage du soleil et des étoiles. En mer, il fallait installer un système de navigation avec plusieurs stations émettrices. Le GPS a bien révolutionné tout cela. Il y a donc eu un progrès considérable en topographie.

Stockage des données

Le stockage des données est un problème majeur, toujours non résolu. Les films photographiques ou les premiers play-back du système Carter d'enregistrement magnétique analogique étaient d'un stockage encombrant mais plus facile à retrouver que les films magnétiques dont les "lecteurs" ne sont plus disponibles. La retranscription par Total des enregistrements des années 50 à 80 sur CD optique a demandé un travail considérable, nécessitant aussi la retranscription des carnets topographiques, et il est maintenant difficile et trop long de rejouer les anciennes campagnes; il semble que le passé disparaît avec le temps, comme les mémoires, et ne soit plus récupérable.

Bandes magnétiques, disques optiques numériques, cassettes, CD, et tous les outils actuels de stockage, s'altèrent avec le temps et subissent la disparition des lecteurs et logiciels de lecture. Les fabricants poussent à de nouveaux formats d'archivage et au remplacement des anciens, tandis que les utilisateurs sont incapables de s'entendre pour imposer un standard international.

Addition de plusieurs campagnes sismiques

L'addition de plusieurs campagnes différentes est toujours un casse-tête, car il faut caler les topographies, les différences instrumentales et les polarités. La 3D permet, entre autre, d'oublier les diverses campagnes 2D précédentes.

Sources

Dans la course à l'amélioration des données, la source est importante et pratiquement tout a été essayé; à terre: trous profonds, trous nombreux peu profonds (> 100 à l'hectare au Sahara), tirs en surface ou suspendus sur des perches, chutes de poids, Mini Sosie-Sourcile, vibrations (au début par rotation de masses excentrées); et en mer : dynamite (Flexichoc), arc électrique (sparker), vapeur (Vaporchoc), canon à eau, et maintenant surtout à bulles d'air (airgun).

Sismographes

A part l'arrivée d'hydrophones, les sismos ont très peu changé, c'est toujours une bobine suspendue dans un champ magnétique. Mais la transmission au laboratoire, elle, a beaucoup évolué quand les câbles ont été remplacés par des liaisons sans fil. En sismique marine, le

principal progrès a été l'utilisation de multistreamers (jusqu'à 16 ou plus). L'enregistrement des ondes S (sismos sur les trois directions, capteurs coûteux) n'a pas rencontré l'accueil espéré en terrestre, il semble plus prisé, en raison des coûts relatifs, sur les câbles posés au fond des mers (pour la 4D). Il faudrait pouvoir utiliser des sismos plus lourds pour obtenir plus de basses fréquences des sédiments profonds perturbées par le ground roll de surface que l'on sait mal éliminer.

Traitement

C'est là où les progrès ont été spectaculaires et continueront, parallèlement à ceux des ordinateurs.

Corrections de surface ou corrections statiques

Il faut ramener les enregistrements sismiques au niveau de référence du DP (Datum Plane) en corrigeant l'altitude et les hétérogénéités de surface (la fameuse WZ "weathering zone" de CGG pour les Français, les Américains n'utilisant pas ce terme!). Certaines zones présentent des variations de surface importantes qui perturbent les réflexions profondes: le cas des moraines glaciaires au Michigan dans les années 70 a été résolu par la technique de "flattening" d'un horizon supérieur permettant de faire apparaître les récifs siluriens plus profonds. La puissance des ordinateurs permet maintenant de tenir compte de plus en plus de données pour calculer les corrections statiques, mais il faut se méfier des modèles trop compliqués que l'on répugne à modifier. Le premier test d'Ariane 5 a été un échec car le vieux logiciel, mieux connu de l'Ariane 4, avait été utilisé.

Carte en profondeur

L'objectif de la carte temps ramenée à un DP est d'obtenir une carte en temps aussi proche que possible de la carte profondeur. Mais les vitesses varient dans les sédiments profonds et une étude vitesses est obtenue par la courbure des temps d'un réflecteur avec la distance, appliquée au résultat de la couverture. Maintenant l'addition des trajets multiples se fait après migration et conversion en profondeur "prestack depth migration", grâce à un modèle de vitesses et des ordinateurs de plus en plus puissants. Cependant la connaissance des vitesses a encore beaucoup de progrès à faire dans les cas complexes. Il faut rappeler qu'il y a autant de cartes en profondeur que de modèles de vitesses, modèles qui sont, malheureusement souvent encore, conçus sans concertation avec les géologues.

Fréquence

Alors que l'explosion d'une charge donne un Dirac, (spectre très large), les enregistrements sismiques présentent une gamme de fréquence autour de 10 à 100 hertz. Les hautes fréquences sont malheureusement filtrées par le terrain et les basses fréquences ne peuvent être enregistrées par un géophone portable il est donc très difficile de pouvoir augmenter cette gamme. Pour obtenir les hautes fréquences nécessaires à l'interprétation d'un réservoir, les espoirs fondés sur les enregistrements entre puits proches, avec la source et le géophone situés aux alentours d'un réservoir, ont été jusqu'ici décevants. Pourtant une fréquence de 2 000 Hertz peut être atteinte entre deux puits à 100 m.

Amplitude

Les amplitudes sismiques, mesurées par le géophone, montrent des différences considérables entre les arrivées fortes et les arrivées faibles en provenance des horizons recherchés. L'enregistrement analogique nécessitait une atténuation des arrivées fortes et une

amplification des arrivées faibles, ceci était effectué par l'AGC (automatic gain control) qui introduisait des distorsions instrumentales. L'enregistrement numérique peut enregistrer toute la gamme d'amplitudes, mais la visualisation des arrivées demande toujours une manipulation, cette fois mathématique, des données.

Résolution

La recherche de structures est toute relative et les sections temps donnent facilement les fermetures de plus de 10 ms (td), ce qui, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 3 000 m/s, correspond à une fermeture de 15 m, tout en acceptant une précision médiocre sur les profondeurs absolues. Mais l'évaluation de l'épaisseur d'un réservoir dépend de la fréquence de la réflexion. Pour une fréquence de 50 c/s, ayant une longueur d'onde de 20 ms (td), on peut distinguer une épaisseur minimum de 5 ms ($L/4$), soit, pour un sable de 4 000 m/s, une épaisseur de 10 m (les sables fins sont mal vus par la sismique). Pour améliorer la résolution, il faudrait augmenter encore la fréquence, ce qui est très difficile avec les sources et les géophones actuels situés en surface

Bruit

Toute arrivée inexplicée ou indésirable est appelée bruit et est soumise à une élimination par tous les procédés disponibles: filtrage en fréquence (ground roll), filtrage par le CPD pour les vitesses plus lentes (multiples) ou les arrivées plus pentées (diffractions). Malheureusement une partie du soi-disant bruit contient en fait des données utiles que l'on ne sait pas encore extraire ou interpréter.

Multiples

Les multiples s'éliminent facilement si les vitesses des tranches supérieures sont faibles (cas de l'eau) par rapport aux vitesses des horizons recherchés. La plupart des multiples peuvent être actuellement assez bien éliminés, mais ce faisant, on enlève encore des informations utiles.

Diffractions

Tout point singulier acoustiquement, comme une faille recevant une onde sismique, devient source (point brillant) et donne des diffractions gênantes. Elles sont éliminées partiellement dans le traitement, mais elles devraient être mieux étudiées et prises en compte pour retrouver ces points singuliers, notamment dans le tracé des failles.

Sinusoïde

Un contraste d'impédance acoustique (variation du produit vitesse-densité) est transformé par les sédiments en une sinusoïde. On simule cette transformation (convolution) grâce à une ondelette dite de Ricker (Mexican hat chez les Américains, 2^{ème} dérivée de la courbe de Gauss) pour obtenir un film synthétique. La démarche inverse, déconvolution ou inversion, a pour objectif d'obtenir le log d'impédance acoustique à partir d'un enregistrement sismique. Malheureusement le spectre de fréquence des données sismiques est amputé car il manque toujours, et les basses fréquences pour obtenir les vitesses absolues, et les hautes fréquences pour obtenir le détail des sédiments. Malgré tous les efforts, la sinusoïde est toujours là dans les sismiques actuelles.

Ondelette

L'analyse de Fourier (1807) décompose une onde en sinusoïdes simples; Jean Morlet,

géophysicien d'Elf, dans les années 70 s'en est inspiré pour introduire sans succès (trop révolutionnaire) des ondelettes de formes constantes (on les étire ou comprime au contraire de Fourier où l'on varie le nombre d'oscillations dans une fenêtre fixe), pour améliorer la résolution. Ces ondelettes connaissent maintenant du succès dans d'autres domaines (Hubbard, 1997); les astronomes les utilisent aussi pour observer la distribution des galaxies. Au "23rd international conference of mathematical geophysics" il était amusant de voir que les géophysiciens de l'espace qui analysent les données spatiales, comme la topographie de Mars mesurée par un laser, font une convolution avec une ondelette pour obtenir plusieurs tracés sinusoïdaux qu'ils semblent préférer au tracé topographique pourtant clair.

Vitesses

La définition de vitesse est une définition différentielle, et, en pratique, il y a autant de vitesses que de mesures et d'ondes, il y a les ondes P, S, de Rayleigh, de Love, de Stonely et d'autres; heureusement les ondes P sont les plus simples et les plus fortes. La vitesse à appliquer à une carte en temps pour obtenir une carte en profondeur dépend des corrections et du DP, du labo, du pointé et du calibrage, et la correspondance horizon en temps et en profondeur est toujours approximative. Les vitesses sismiques de traitement ont encore peu de réalité physique, ce sont les vitesses d'un modèle (implicite) mais non de la réalité du sous-sol. Les vitesses du Sonic de puits (échelles de fréquences et de distances très différentes: métriques contre kilométriques pour la sismique) sont, elles, assez proche après intégration des carottages sismiques. La vitesse mesurée sur carottes est ponctuelle et seulement indicative. En fait, on ne sait toujours pas bien ce qui cause la vitesse des ondes acoustiques dans les sédiments, les experts en diagraphie ont introduit, il y a plus de 20 ans, la tortuosité (inconnue des géophysiciens de surface) qui dépend des pores et des points de contact des grains du sédiment. Il y a encore beaucoup de chemin pour comprendre ce qu'est la vitesse. Je sais que je ne sais pas.

Déconvolution ou inversion

Comme dit plus haut, la déconvolution est très handicapée par le spectre réduit des fréquences, seul un procédé qui augmentera le spectre pourra améliorer ce problème.

Bright spots, flat spots, amplitude, AVO

L'amplitude d'un réflecteur varie avec l'épaisseur de la couche qui génère la réflexion, sa composition et surtout son fluide. A la fin des années 60, Exxon avait remarqué que les réservoirs à hydrocarbures présentaient des anomalies d'amplitude appelées "bright spots". En 1973 (perspectives glorieuses du premier choc pétrolier), Exxon soumissionnait 1,5 G\$ pour obtenir de nouveaux permis offshore: Mississipi, Alabama, Floride, qui comprenaient de nombreux "bright spots", forés par la suite et résultant en une douzaine de puits secs. L'industrie découvrait alors que la présence de très peu de gaz (Fizz water) suffisait pour donner des "bright spots" (Domenico, 1976). Heureusement la présence d'hydrocarbures commerciaux est souvent aussi associée à des "bright spots" qui sont très utilisés dans le Golfe du Mexique et ailleurs.

Dans les bassins pétroliers, les contacts gaz-huile, huile-eau donnent parfois des "flat spot", qui sont heureusement caractéristiques et rarement confondus avec d'autres réflecteurs.

L'analyse des amplitudes avec l'offset (AVO) est aussi utilisée pour obtenir des informations sur les sédiments et ses fluides. Les DHI (direct hydrocarbons indicators) sont à manipuler avec précautions et nécessitent une calibration à un puits proche.

C'est le phénomène de Fizz water qui explique la fameuse réflexion BSR (Bottom Simulating

Reflector) qui a poussé beaucoup de géologues et géophysiciens à voir des hydrates dans la plupart des sédiments océaniques (Laherrère, 2000). Le BSR est dû à la présence de 1 à 5 % de gaz libre dans les sédiments, juste au-dessous de la zone de stabilité des hydrates (de l'ordre de 500 m sous le fond de la mer). Le BSR était auparavant interprété (il l'est encore par certains) par la présence d'hydrates compacts et plus rapides. Il s'avère qu'il y a des BSR sans hydrates et des hydrates sans BSR.

Calibration aux puits, film synthétique, VSP

Toute interprétation d'études sismiques n'est vraiment valable que lorsque calibrée par un ou des puits. Le calage se fait avec un carottage sismique (mesures des temps entre une source de surface et un géophone dans le puits, ses points calibrant aussi le Sonic). Le log de vitesse-densité est convolué avec une onde moyenne ou variable avec la profondeur pour donner un film synthétique qui devrait ressembler au profil sismique à l'emplacement du puits. Mais si la ressemblance est parfois bonne elle est souvent médiocre. La réalisation de VSP (Vertical Seismic Profile, d'origine Russe), qui devait améliorer le calage, suscitait il y a plus de 20 ans de nombreux espoirs. Le bilan est plutôt négatif car le calage, données de puits (carottes et logs) et enregistrements sismiques, est déficient. On voit dans les articles AAPG, Geophysics, EAEG, MPG et autres, de magnifiques sections sismiques mais très rarement un calage aux puits. La calibration sismique-puits souffre toujours de plusieurs maux: une sismique de peu de résolution, un calage peu satisfaisant car l'origine de la réflexion est complexe et la collaboration géologue-géophysicien, qui doit se concrétiser au puits, laisse encore à désirer.

Sonic

L'outil du géophysicien, le CVL, a été abandonné au profit du Sonic des géologues (porosité). Dans cet outil, le pointé de l'arrivée première se fait au fond du puits en fonction d'un certain seuil, les arrivées secondes étant ignorées. Le Sonic a ainsi fait perdre 20 ans aux géophysiciens pour mieux comprendre les vitesses des formations. Ce n'est qu'avec les sondes EVA (SNPA-Elf 1970), trop compliquées, et du DSI que l'on a un peu progressé dans l'étude des ondes dans les puits. Toutefois ces logs enregistrent toujours des mesures dans des zones endommagées par le forage; cependant le MWD permet d'obtenir des résultats avant invasion.

Ondes S

Les ondes transverses ou S nécessitent, pour les enregistrer, des géophones disposés transversalement. Elles ne sont pas sensibles aux fluides et permettent de les distinguer par comparaison aux ondes longitudinales ou de compression P. La source Marthor a été un échec. Beaucoup d'espoirs avaient été mis sur les ondes S pour aboutir aux fluides et à la lithologie (coefficient de Poisson), mais les progrès sont toujours lents. Cependant elles montrent bien les cheminées de gaz.

Réfraction

Comme déjà mentionné, le champ de Hassi Messaoud (environ 10 Gb) a été découvert grâce à la réfraction, car la réflexion ne montrait, au niveau du réservoir (grès du Cambrien), que des événements médiocres où il était impossible de pointer de façon sûre un horizon en continu.

Je promets un déjeuner dans le meilleur restaurant de Paris à celui qui me fournira une coupe sismique réflexion à travers le champ montrant, sans équivoque et sans l'aide des puits la structure d'Hassi Messaoud.

Après avoir foré un puits dans le volcanisme en offshore Brésil interprété comme des sables par la sismique réflexion, nous avons découvert dans la littérature de vieux profils réfraction

du Lamont, montrant à la profondeur de l'objectif des vitesses élevées peu compatibles avec des sables. Trop tard !

La réfraction a cependant été supplantée par la réflexion qui donne plus de détails dans le sédimentaire mais qui est toujours incapable de dire où se trouve le socle. Avec les longs offsets les arrivées réflexion passent en arrivées réfractées et sont alors éliminées comme indésirables, alors que la vitesse réfractée et l'atténuation donnent des renseignements très importants sur la nature de la couche qui réfracte. En 1965 (Laherrère, Drayton) en Australie dans le désert du Simpson, en plus de la sismique traditionnelle, j'ai fait enregistrer à intervalle régulier des tirs en offset (tir en surface) avec le dispositif géophones réflexion pour obtenir le socle en arrivées réfractées. La coupe de la figure 9 (Laherrère, Drayton, 1965) montre que le réservoir Permien (horizon P) peut être corrélé à travers une faille avec un horizon qui peut être P, Z (socle) ou un multiple. Les tirs en offset montrent sans équivoque que, sur la droite de la section, le réservoir Permien n'existe plus alors que la réflexion seule conduirait à l'interpréter comme étant présent.

Dans les années 70, la sonde Sonobuoy (utilisée par la marine américaine pour suivre les sous-marins ennemis) était utilisée par les pétroliers pour enregistrer des arrivées réfractées en même temps que la source émettait pour les streamers. La demande au CEPM de construire une sonde plus performante a été écartée pour construire le système Myriaseis d'enregistrement sans fil en shallow, montrant bien la répugnance des géophysiciens classiques à s'impliquer dans la réfraction qu'ils connaissent mal.

3D

La 3D est souvent présentée par les économistes comme une nouvelle technologie qui, avec les puits horizontaux, va permettre de multiplier les réserves et découvertes. Même C. Allègre (1996) prévoyait: "*Aujourd'hui on extrait en moyenne 20 % ou 30 % du pétrole. Avec l'imagerie sismique on peut espérer demain extraire 80 % à 90 % d'un gisement*"!!!; l'utilisation de la pelle et la pioche, uniquement, permettrait d'atteindre un tel taux!!! Du moment qu'en 2D on corrigeait l'obliquité dans le plan d'un profil, il était normal d'aller enregistrer latéralement pour corriger l'obliquité réelle en 3D. La 3D a plus de 30 ans. Le passage à la 3D a été plus aisé en exploration que le CDP, car elle est l'extension naturelle de la 2D de détail, et un outil indispensable pour développer les gisements. La première sismique 3D primitive date de 1966 où les Chinois (congrès AAPG San Francisco, 1981) ont montré qu'ils avaient décelé 200 failles sur le champ de Shenli avec une 3D calculée par de nombreux géophysiciens équipés de simples bouliers. Les Américains ont attendu d'avoir des ordinateurs puissants pour faire ce même travail. La première sismique américaine 3D est celle de GSI en 1972 à Bell Lake Field; elle a été précédée par la WLP (Wide Line Profiling) de CGG où l'on enregistrerait sur des profils latéraux. La 3D est plus économique que la 2D lorsque l'intervalle entre lignes devient inférieur à 200 m. La 3D est un "must" en développement, mais pas en exploration. Je ne connais pas de champ géant (> 500 Mb), ou même major (>100 Mb), qui ne se voit pas sur une coupe 2D. Exxon (Greensleeve et al., 1994) reconnaît: "We found that many (3D) surveys added little values to exploration and development activities". L'amélioration spectaculaire en sismique marine provient de la régularité des spacings, de la faible dimension des bins, la grande dimension des études, une topographie performante et un traitement mieux adapté à la géologie locale.

4D

La 4D est une 3D répétée après un certain temps, la 4^{ème} dimension n'est donc pas continue, contrairement aux 3 autres. La "4D" a commencé en France dans les années 70 avec CGG par

une 2D répétitive sur un stockage de gaz de GDF où la variation du contact gaz-eau a pu être ainsi suivie. Aux Etats-Unis, étant donnée la décroissance des découvertes, l'effort est mis sur les anciens champs, 90 % des additions de réserves proviennent de leur réévaluation. C'est aussi et surtout afin de suivre les règles de la Security and Exchange Commission en vue de satisfaire les banquiers, l'estimation des réserves ne prenant en compte que les réserves prouvées, d'où le succès actuel de la 4D aux EU mais aussi en Mer du Nord (installation par BP et Shell d'un dispositif permanent sur les champs).

La 4D du champ d'Eugene Island 330 peut être trouvée sur Internet. Ce champ a eu les honneurs de tous les journaux car la production, après un pic à 15 000 b/d, a décliné à 4 000 b/d pour remonter à 13 000 b/d. En définitive l'interprétation n'est pas évidente, certaines zones ont changé, d'autres pas. L'explication la plus simple est que ce champ, qui a produit par puits en pic 560 b/d/w en 1975, qui a décliné à 110 b/d/w en 1991 pour remonter à 295 b/d/w en 1996 et retomber à 240 b/d/w en 1998, se trouve limité par une grande faille (Red Fault) et la baisse de pression en fin de déplétion s'est rapidement communiquée par la faille à la roche-mère plus profonde qui a ainsi pu réalimenter en partie le champ. Groningen, le plus grand champ de gaz en Europe continentale (100 Tcf), semble lui aussi continuer à être réalimenté à partir de la roche-mère Carbonifère. La 4D a un bel avenir et continuera de progresser, car il faut produire tout ce qui a été découvert, et, comme il ne semble plus possible de pousser davantage l'huile vers le puits, il faut que le puits aille vers les zones peu drainées décelées par la géophysique, ce que font très bien les puits déviés.

Station

L'informatique est comme la langue d'Esopé, la meilleure et la pire des choses. L'avalanche de données de la 3D ne peut être assimilée qu'à travers des stations de travail. Mais on ne trouve souvent que ce que l'on cherche et il faut avoir une certaine idée de la géologie avant de se lancer dans une interprétation sur station. On ne peut tout voir et on ne peut non plus passer huit heures (pardon 7 heures) par jour et pendant 40 ans devant une station. Il faut surtout dialoguer avec les géologues et les producteurs, et la station peut être le lieu idéal pour contrôler les idées échangées par l'équipe, mais elle ne doit surtout pas isoler l'interpréteur et l'empêcher d'avoir et d'échanger des idées.

Interprétation

C'est la stratigraphie séquentielle (sismo-stratigraphie) de Peter Vail qui a fait faire le plus de progrès à l'interprétation, amenant les géologues à regarder les profils sismiques, à les interpréter et à discuter avec les géophysiciens. Le problème est que les géologues font un peu trop confiance à la sismique, car ils connaissent mal ses points faibles (traitement et artefacts).

Petites méthodes

Les petites méthodes, la gravimétrie et l'aéro-magnétisme, ont permis dans le passé de nombreuses découvertes (Hassi Messaoud se voit très bien en aéromagnétisme). La nature n'est jamais une solution unique et quand il y a incertitude, il faut obtenir d'autres données pour avoir le choix, les petites méthodes sont alors bien utiles et les géophysiciens devraient plus souvent sortir de leur ultra-spécialisation.

Géophysique de gisement

Les découvertes devenant de plus en plus petites et moins nombreuses, la géophysique d'exploration subit actuellement une baisse importante d'activité en dehors des offshore profonds, mais celle de gisement a un bel avenir à condition d'augmenter la résolution, ce qui

est toujours difficile.

Conclusions

Le pic des découvertes mondiales date des années 1960 et la production de la plupart des grands champs est en déclin. Les champs qui restent à découvrir sont ceux qui ont été ratés dans le passé, ils sont plus difficiles à déceler: profonds, cachés sous du sel ou sous un chevauchement, stratigraphiques, emplacements hostiles ou fermés, ... Le pétrole qui reste à produire est celui qui se dissimule le mieux et le progrès de la technologie doit compenser l'augmentation de la complexité de ce qui reste à découvrir et à produire.

La géophysique a accompli d'énormes progrès depuis 50 ans, mais peut être moins que ce que l'on pouvait espérer. De nombreux problèmes subsistent car il y a eu peu d'améliorations, par exemple, sur le spectre de fréquence enregistré en ondes P, sur l'utilisation des ondes S et sur la relation sismique-puits. Il faut poursuivre l'intégration des différentes techniques géophysiques (réflexion, réfraction, gravité et magnétisme) et des équipes de traitement et d'interprétation, car la géologie et la diagraphie doivent intervenir impérativement à tous les niveaux y compris le traitement.

Mais heureusement qu'il reste encore et toujours de nombreuses questions à résoudre, c'est pourquoi les métiers de géophysicien et de géologue sont toujours si passionnants.

Et si j'ai oublié ou mal interprété le passé, veuillez m'en excuser, car ma faculté d'oubli s'améliore considérablement avec l'âge.

Références

Allègre C., 1996: Pétrole en trois D. Le Point, 25 Mai, n°1236, P. 49.

Anderson R.N et al., 1994: 4D Seismic Imageing of the Drainage and Migration Pathways of Hydrocarbons" <http://www.Ideo.columbic.edu/GBRN/anderson/4D.article.htm/>

Cooper Ch.,1999: Odd Reservoir Off Louisiana Prods Oil Experts to Seek a Deeper Meaning Something mysterious is going on at Eugene Island 330. Wall Street Journal April 16.

Domenico S.N., 1976: Effect of brine-gas-mixture on velocity in unconsolidated sand reservoir Geophysics 41, P. 882-894.

Dunoyer de Segonzac P., Laherrère 1.,1959: Application of the continuous velocity log to an isotropy measurements in Northern Sahara: results and conséquences. Geoph. Prose. v7 n2, P. 202-217.

Greenslee S.M., Gaskins G.M., Johnson M.G., 1994: 3-D seismic benefits from exploration through development: an Exxon perspective. The leading edge, July, p. 730-734•

Hubbard B.B., 1997: Ondes et ondelettes. Pour la Science, éditions Belin.

Laherrère J., 1961: Utilisation pratique des films synthétiques dans le Sahara Nord. Geoph. Prose. v9 n°1, p.46-59•

Laherrère J., Drayton R.D.,1965: Some geophysical results across the Simpson Désert. The Australian Petroleum Exploration Association Journal, P. 48-58.

Laherrère J., 2000: Oceanic hydrates: more questions than a nswers. Energy Exploration & Exploitation, Spécial issue on hydrates