60 ans de géophysique à l'ORSTOM-IRD

en Afrique

En 4 chapitres :
magnétisme,
sismologie,
gravimétrie,
méthodes électriques et EM,

suivis d'une conclusion intitulée :
regards sur le passé et le présent

par Yves Albouy

Résumé

En 1952 l'ORSTOM commence la construction des observatoires magnétiques et sismologiques de Bangui (RCA) et de Mbour (Sénégal).

En magnétisme l'étude des variations séculaires de champ géomagnétique met en évidence une accélération du déplacement de l'équateur magnétique dans les régions proches de l'océan Atlantique. Le phénomène de l'électrojet équatorial est étudié dès les années 1970 et à nouveau par une équipe multidisciplinaire dans les années 1990, équipe qui améliore les connaissances sur la physique de l'ionosphère. Quant à l'anomalie magnétique dite de Bangui, elle semble être la somme de deux anomalies distinctes.

En sismologie, des réseaux de stations temporaires sont mis en place après le séisme de Koumbia en Guinée (1983), après les éruptions du Mont Cameroun, en 2000 et après le séisme de Boumerdes en Algérie (2003) ; les résultats intéressent soit la séismicité de ces régions soit la modélisation des structures lithosphériques (Adamaoua, Garoua).

Les études magnétiques et sismologiques en Afrique sont moins nombreuses actuellement, l'observatoire de Bangui a été fermé, celui de Mbour fonctionne toujours et a été modernisé (GEOSCOPE et CTBTO).

Les campagnes gravimétriques, commencées en 1952, se sont poursuivies jusqu'aux années 1990, dans tous les pays francophones d'Afrique noire, en Sierra Leone, en Algérie (dans le Tanezrouft) et à Madagascar. L'interprétation des données a permis d'établir des modèles lithosphériques sur les contacts craton-zone mobile, sutures de collision (Sierra Leone), et sur les bombements lithosphériques (Adamaoua). Les observations satellitaires remplacent maintenant les campagnes de terrain.

Les méthodes électriques sont souvent utilisées pour la reconnaissance hydrogéologique, elles sont complétées par les méthodes électromagnétiques magnéto-telluriques (MT) et TDEM (Time Domain Electro-Magnetic) et, depuis les années 2000, par la RMP (Résonance Magnétique des Protons). Dans les années 1960, des sondages électriques en grandes longueurs de ligne étaient menés au Tchad pour l'étude des bassins sédimentaires, des sondages électriques étaient réalisés sur des objectifs plus superficiels dans les régions côtières ou sur les formations de socle du Sénégal. Suite au développement des techniques de mesure : dispositifs multi-électrodes en électrique et nouveaux instruments électro-magnétiques, beaucoup de terrains nouveaux sont explorés dans les années 1990 : Cameroun, Madagascar, Tunisie, Burkina, Cap Vert, île de la Réunion.

Actuellement le groupe hydrogéophysique, très actif dans l'enseignement, mène un important programme de recherches au Bénin. En Afrique, c'est le seul programme géophysique en croissance.

Enfin, nous célébrons la mémoire de trois orstomiens disparus : Yvonne Crenn, Ousseini Fambitakoye et Claude Villeneuve.

Abstract

In 1952, ORSTOM started the building of magnetic and sismological observatories, at Bangui (RCA) and Mbour (Senegal).

The study of secular variations of the magnetic field evidenced an accelerated movement of the magnetic equator in coastal areas. Equatorial electrojet is studied in 1969 and 1970, by ORSTOM people, and again in 1992 and 1993, by an international team : knowledge of the physics of the ionosphere are significantly improved. Magnetic Bangui anomaly would be the sum of two distinct anomalies.

Networks of temporary seismic stations were set up in three different regions : near Kumbia (Guinea), after the 1983 earthquake, near Mont Cameroun after eruptions occurred in 2000, near Boumerdes (Algeria), after the 2003 earthquake. The results concerned either the seismicity of these regions or the modeling of lithospheric structures (Adamawa, Garoua).

Now research activities in magnetism and seismology are fewer. Bangui obervatory is off, Mbour observatory was upgraded : digital acquisition and new sensors (INTERMAGNET, GEOSCOPE, CTBTO).

Gravity survey have started in 1952 and lasted until the late 1980 in francophone countries of subsaharian Africa, in Sierra Leone, in Algeria (Tanezrouft) and in Madagacar. The interpretation of gravity data enabled the modelling of deep structures explained by collision suture (Sierra Leone) between craton and mobile zone, or on uplifs like Adamawa whose negative anomalie is due to a thicker crust. Now remote sensing replaces gravity surveys.

Electrical methods are often applied to hydrogeology; Electromagnetic techniques include MT (magnetotelluric), TDEM (Time Domain Electro-Magnetic) and since the years 2000, MRS (Magnetic Resonance Sounding). During the sixties, sedimentary basins of Chad were investigated by electrical soundings using very long lines; other soundings were made with shorter lines in coastal areas or basement areas in Senegal. Following improvements in measurement techniques like ERT (Electrical Resistivity Tomography) and new EM instruments, many new experiments are set up during the 1990 years : Cameroun, Madagascar, Tunisie, Burkina, Cap Vert, île de la Réunion.

Now the team named “hydrogéophysique” is involved in teaching at university (Cotonou, Benin) and in a major research program applied to water resources in basement areas.

Finally I celebrate the memory of three deceased colleagues : Yvonne Crenn, Ousseini Fambitakoye et Claude Villeneuve.

Mots-clés

Magnétisme ; anomalie ; variations séculaires ; électrojet équatorial ; ionosphère ; paléomagnétisme.

Sismologie ; séisme ; séismicité ; faille ; tectonique ; mécanisme au foyer ; effet de site ; croûte.

Gravimétrie ; gravité ; anomalie de Bouguer ; craton ; zone mobile ; collision ; suture.

Electrique ; E.M., électromagnétisme ; M.T., Magnétotellurique ; T.D.E.M., Electromagnétisme en Domaine Temporel ; R.M.P., Résonance Magnétique des Protons ; résistivité ; conductivité ; polarisation spontanée ; polarisation provoquée ; tomographie électrique ; porosité ; teneur en eau ; aquifère.

Keywords

Magnetism, ; anomaly ; secular variations ; equatorial electrojet ; ionosphere ; paleomagnétism.

Sismology ; earthquake ; seismicity ; fault ; tectonic ; focal mecanism ; site effect ; crust.

Gravimetry ; gravity ; Bouguer anomaly ; craton ; mobile zone ; collision ; suture.

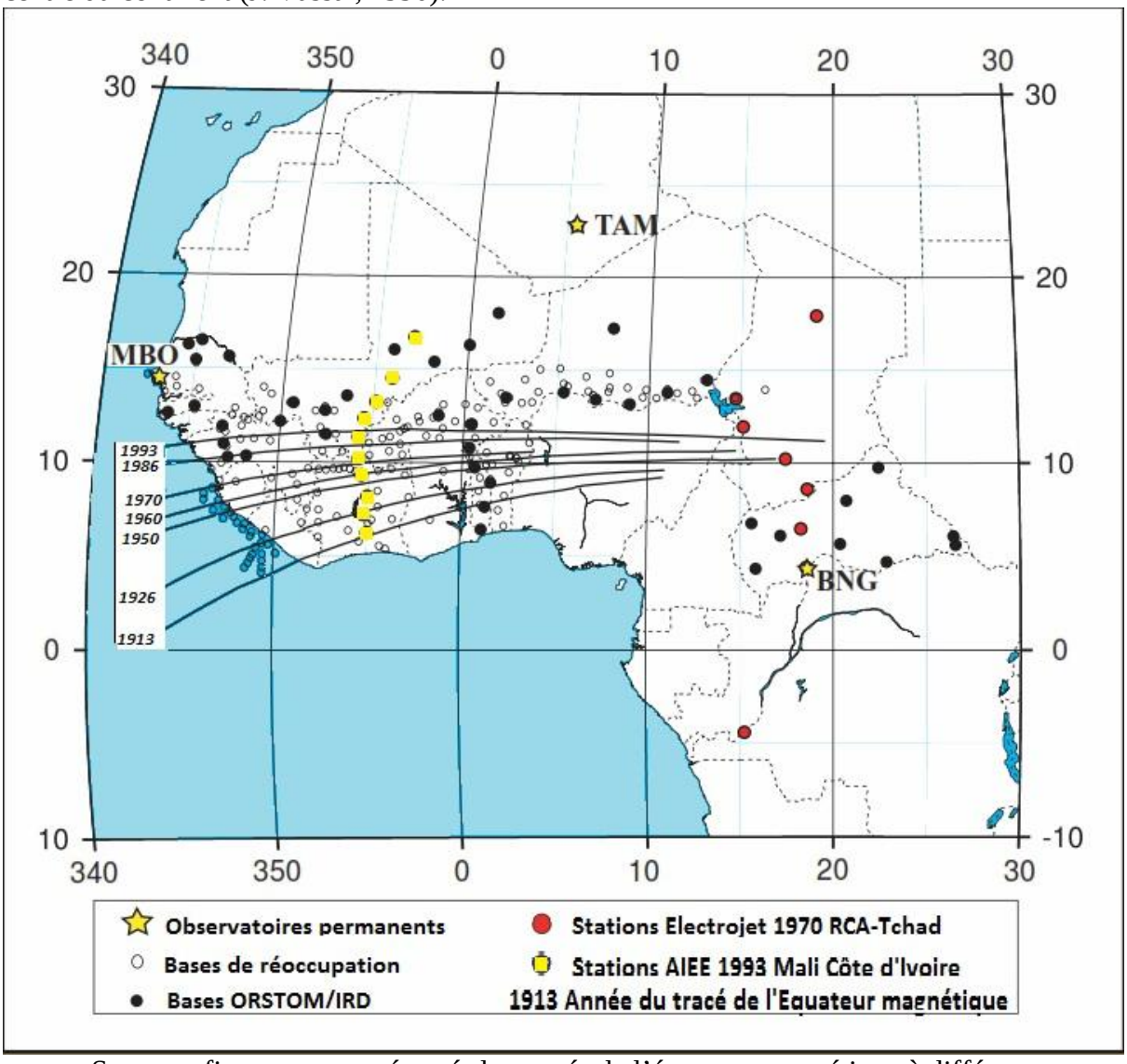
Electrical ; E.M., électromagnetism ; M.T., Magnetotelluric ; T.D.E.M., Time Domain Électromagnetism ; R.M.S., Resonance Magnetic Sounding ; resistivity ; conductivity ; spontaneous polarization ; induced polarization ; E.R.T., Electrical Resistivity Tomography ; porosity ; water content ; aquifer.

Magnétisme

C’est à partir de 1952 que sont édifiés les observatoires de Mbour (Sénégal) et de Bangui (RCA). Les capteurs sismiques et magnétiques sont abrités dans des caves construites à cet effet. Françoise Duclaux, Yvonne Crenn, Raymond Godivier et Lucien Le Donche sont les principaux initiateurs de ces constructions.

Les variations des trois composantes du champ magnétique enregistrées quotidiennement sur papier photo ; chaque semaine sont déterminées les valeurs absolues des déclinaison, inclinaison, composante Nord et composante verticale.

Sur le terrain des stations, dites de réoccupation, sont mises en place généralement au voisinage des aéroports, où sont mesurés périodiquement, environ tous les deux ans, les composantes du champ terrestre. Jacques Vassal démontre que la dérive de l’équateur magnétique entre 1913 et 1986 est beaucoup plus rapide sur la bordure ouest que dans le centre du continent (J. Vassal, 1990).



Sur cette figure sont représentés les tracés de l’équateur magnétique à différentes périodes, les diverses stations de réoccupation et les stations d’enregistrements des deux campagnes « électrojet » entre 1969 et 1971 puis en 1993 et 1994.

Campagnes « électrojet »

L'électrojet équatorial est principalement étudié par Ousseini Fambitakoye au début des années 1970, qui décrit dans sa thèse le renforcement du champ magnétique, en fonction de l'heure du jour et de la latitude, qu'il relie aux courants circulant dans la couche E de l'ionosphère (O. Fambitakoye, 1974).

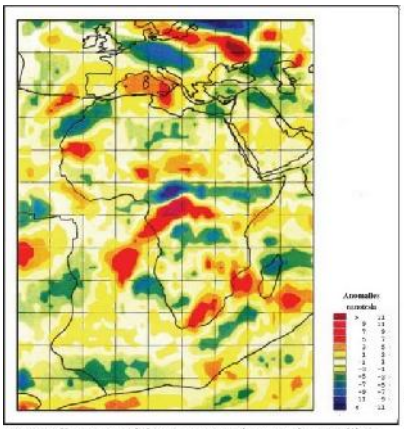
L'AIEE (Année Internationale de l'Electrojet Equatorial) s'étend de 1993 à 1994. Dix stations enregistrent en permanence les variations des champs magnétique (selon les composantes NS, EW et Z) et tellurique (composantes NS, EW). Trente et un scientifiques de treize laboratoires différents, pas seulement Français mais aussi Sénégalais et Ivoiriens. Les connaissances sur les caractéristiques physiques de l'atmosphère ont été nettement améliorées notamment à propos de la vitesse des électrons dans le jet et sur la modélisation du jet lui-même (C. Amory-Mazaudier et al., 2005) et des différences considérables sont mises en évidence dans les estimations des résistivités en magnétotellurique suivant qu'elles sont mesurées la nuit, sans électrojet, ou le jour, avec électrojet (J. Vassal et al., 1998).

Paléomagnétisme

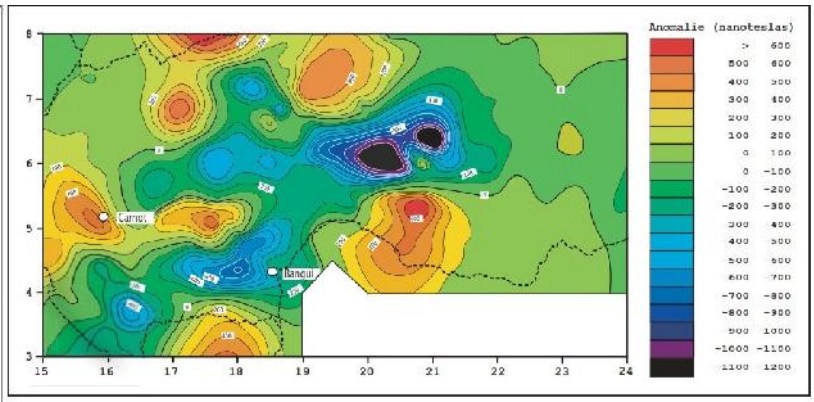
Les études paléomagnétiques appliquées aux basaltes crétacés de Madagascar, ont permis à Roger Andriamirado de montrer, dans sa thèse, que la grande île était beaucoup plus éloignée de l'Afrique, il y a quatre-vingt millions d'années, qu'elle ne l'est aujourd'hui (R. Andriamirado, 1971).

Cartographie magnétique

L'anomalie magnétique de Bangui, si elle est bien la plus importante du monde, n'est pas unique, comme pouvait le laisser croire le satellite MAGSAT, elle est partagée en deux anomalies, l'une sur l'unité archéenne du centre de la RCA et l'autre sur la chaîne de Bogoin-Ouassa située plus à l'Est. Elles sont corrélées à deux anomalies gravimétriques comme le souligne David Boukeke dans sa thèse (1994), d'où proviennent les figures suivantes.



Anomalies magnétiques mesurées par le satellite Magsat



Anomalies magnétiques du champ total mesurées au sol en RCA

Magnétisme en Afrique : évolution, perspectives

Au cours du temps les instruments des observatoires ont beaucoup changé, aussi bien pour les mesures absolues que pour les enregistrements des variations. Les variomètres ne sont plus à aimant, ce sont des flux-gate, plus sensibles et plus fiables, les enregistrements sont numériques, actuellement au rythme d'un point par seconde. L'I.R.D. fait partie d'INTERMAGNET, qui regroupe les l'I.P.G. de Paris et l'E.O.S.T. de Strasbourg. Mais, le magnétisme ne se développe plus à l'I.R.D., aucun magnéticien n'a été recruté, l'observatoire de Bangui a fermé et, pour cause d'insécurité et d'absence de personnel, les stations réoccupables ne sont plus visitées. C'est la fin d'une discipline, même si les observations magnétiques continuent à Mbour, aucun programme scientifique de l'I.R.D. n'utilise les données qui y sont mesurées.

Bibliographie : articles

(Les noms des orstomiens-irdiens, titulaires ou stagiaires, sont en gras. La plupart des textes cités sont téléchargeables sur la base horizon du portail documentaire de l'I.R.D.)

AMORY MAZAUDIER C., KOBEA A., VILA P., ACHY SEKA A., BLANC E., BOKA K., BOUVET J., CECILE J. F., COHEN Y., CURTO J. J., **DUKHAN** M., DOUMOUYA V., **FAMBITAKOYE** O., FARGES T., GOUTELARD C., GUISSO E., HANBABA R., HOUNGNINOU E., KONE E., LASSUDRIE DUCHESNE P., LATHUILLERE C., LEROUX Y., MENVIELLE M., OBROU E., PETITDIDIER M., OGUNADE S. O., ONWUMECHILI C. A., REES D., SAMBOU E., SOW M., **VASSAL** J. , 2005 - On equatorial geophysics studies: a review on the IGRGEA results during the last decade. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 67 (4), p. 301-313.

VASSAL J. , 1990 - The drift of geomagnetic Equator in West Africa from 1913 to 1986. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 42, p. 951-958.

VASSAL J., MENVIELLE M., COHEN Y., **DUKHAN** M., DOUMOUYA V., BOKA K., **FAMBITAKOYE** O. , 1998 - A study of transient variations in the Earth's electromagnetic field at equatorial electrojet latitudes in Western Africa (Mali and the Ivory Coast). In: The international equatorial electrojet year : special issue. *Annales Geophysicae*, 16 (6), p. 677-697.

Bibliographie : thèses

Andriamirado R., 1971 - Recherches paléomagnétiques sur Madagascar : résultats et interprétations dans le cadre de la dislocation de la partie orientale du Gondwana. Strasbourg : Université Louis Pasteur, 1971, 307 p. multigr. Th. Sci. Phys., 1971/06/29.

Fambitakoye O., 1974 - Etude des effets magnétiques de l'électrojet équatorial : Université de Paris 6, 287 p. multigr. Th. Sci. Phys. : Phys. : Paris 6 : Paris : 1974/06/28.

Boukeke D., 1994 -Structures crustales d'Afrique centrale déduites des anomalies gravimétriques et magnétiques : le domaine précambrien de la République Centrafricaine et du Sud Cameroun. Orsay : Université Paris Sud, 274 p. multigr. Th. Géophys., Université Paris Sud : Orsay, 1994/05/24.

Sismologie

Observatoires

Les caves sismiques sont construites au début des années 1950 à Mbour et Bangui. Pour son très faible bruit de fond, l'observatoire de Bangui est l'un des meilleurs observatoires du monde. Les enregistrements des divers sismographes, courtes ou longues périodes, se font sous forme analogique, sur papier photo. En 1985, une station large bande du réseau GEOSCOPE, développé par l'IPG de Paris, est installée à MBOUR, en 1987, BANGUI accueille une autre station GEOSCOPE, qui fonctionnera jusqu'en 2001. Les enregistrements de ces stations, qui couvrent aussi bien les courtes que les longues périodes, sont numérisés localement et transmis, en temps différé à l'IPG. Depuis 2006, une station CTBTO (Comprehensive nuclear Test Ban Treaty Organization) est installée à Babate à 75 km à l'est de Mbour, son objectif est la surveillance des essais nucléaires, les données de cette station sont transmises en temps réel à Vienne, siège de l'organisation.

Séismicité : Guinée, Cameroun, Algérie

Le 22 décembre 1983, un séisme destructeur, (plus de 300 morts), survient en Guinée Conakry, dans une zone considérée comme sismiquement calme. Il se situe à Koumbia, dans la partie terminale Sud de la chaîne des Mauritanides, sur la bordure Est du bassin de Bowé.

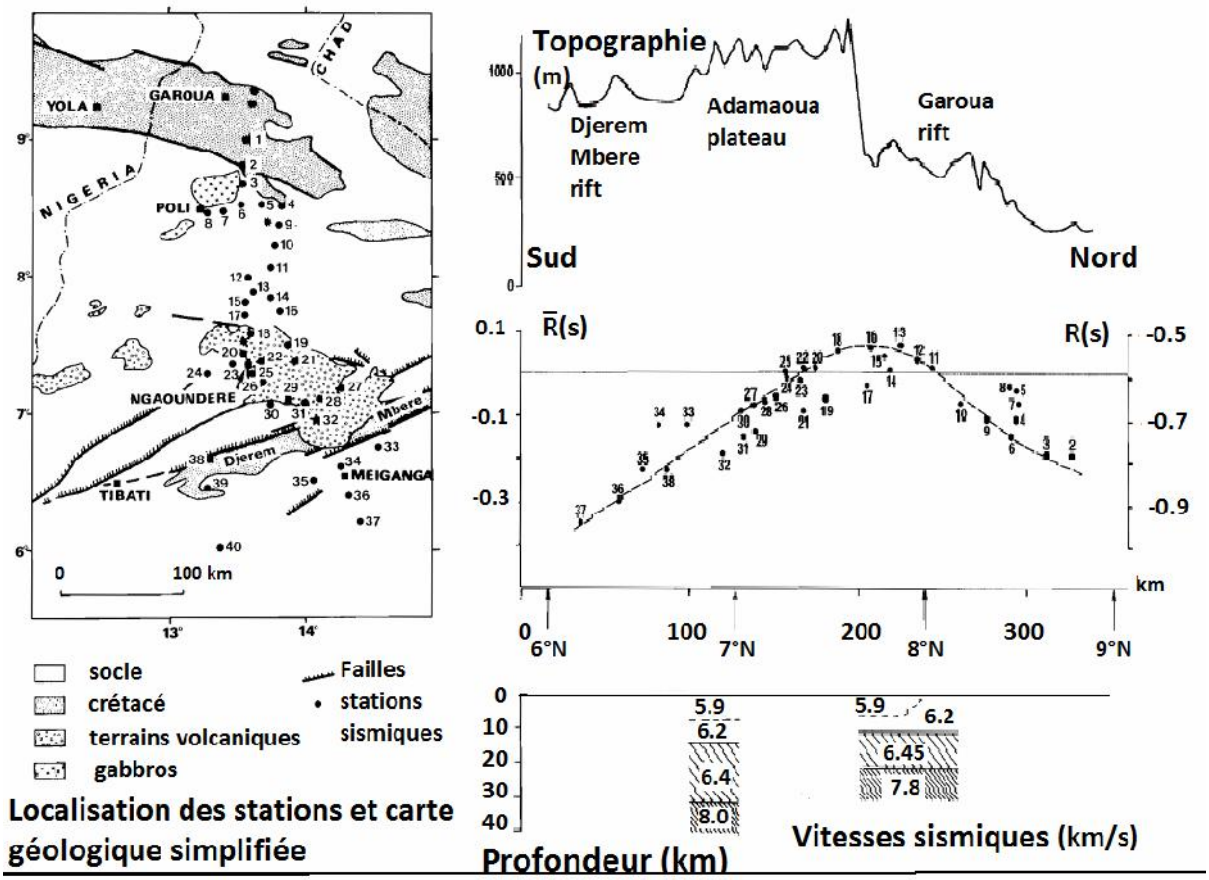
Deux équipes de sismologues, l'une marocaine, l'autre française, avec l'aide de géologues tectoniciens, installent un réseau de stations temporaires et étudient les répliques. Des lignes de fissures sont observées en surface, les plus nombreuses dans les azimuts N 100 à N120, avec des ouvertures de plusieurs décimètres. Les mécanismes au foyer calculés et les observations de terrain correspondent à une faille normale dextre décrochante (C. Dorbath et al., 1984).

Au Cameroun, un réseau de stations temporaires mis en place pour la surveillance du volcan du Mont Cameroun met en évidence un accroissement significatif de la séismicité au voisinage du volcan six semaines avant l'éruption de l'an 2000 : le nombre de séismes enregistrés y est six fois plus important qu'en période calme (B. Ateba et al., 2009).

En Algérie, après le séisme de Boumerdes du 21 mai 2003, de nombreux travaux ont été menés par des scientifiques Algériens et Français pour étudier particulièrement les différentes réponses spectrales des bruits de fond sismiques : ainsi sur des distances de quelques centaines de mètres les pics de fréquence cinq Hz varient d'un facteur deux d'un site sur sol compact par rapport au site sur sol mou (N. Laouami et al., 2006), ce qui confirme l'importance de la prise en compte de l'effet de site dans l'évaluation du risque sismique.

Etudes structurales

Ces études, qui se pratiquent à l'aide de réseaux de stations temporaires, ont pour objectif de modéliser la lithosphère. Ce type d'études est largement présenté dans les thèses de P. Mourgues (1983) et de Catherine et Louis Dorbath (1984). La figure qui suit illustre les résultats obtenus sur un profil Nord-Sud au Cameroun, (C. Dorbath et al., 1986), et notamment la considérable variation d'épaisseur crustale entre le massif de l'Adamaoua et le fossé de Garoua.



R̄ Résidus relatifs moyens et R résidus absolus calibrés (échelle de droite) sur une section Sud Nord du réseau. Topographie et structure crustale interprétée

Perspectives d'évolution

Ce n'est que très récemment qu'une géophysicienne de l'I.R.D. a été affectée en Afrique, il s'agit de Cécile Cornou qui travaille sur le risque sismique en Egypte. Des collaborations ont pu et pourront se mettre en place lors d'événements sismologiques ou volcaniques importants entre des équipes d'Afrique et de l'I.R.D. mais l'Afrique n'est pas un terrain d'avenir pour les activités « irdiennes » dans le domaine de la sismologie si on la compare avec le continent Sud-américain, ou l'archipel du Vanuatu, véritables laboratoires sismologiques.

Bibliographie : articles

ATEBA B., **DORBATH** C., **DORBATH** L., NTEPE N., FROGNEUX M., AKA F. T., HELL J. V., DELMOND J. C., MANGUELLE D. , 2009 - Eruptive and earthquake activities related to the 2000 eruption of Mount Cameroon volcano (West Africa). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179 (3-4), p. 206-216.

DORBATH C., **DORBATH** L., FAIRHEAD F.D., STUART G.W., 1986 - A teleseismic delay time study across the Central African shear zone in the Adamawa region of Cameroon, West Africa. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 86 (3), p. 751-766.

DORBATH C., **DORBATH** L., GAULON R., GEORGE T., **MOURGUES** P., RAMDANI M., ROBINEAU B., TADILI B., 1984 - Seismotectonics of the Guinean earthquake of December 22, 1983. *Geophysical Research Letters*, 11 (10), p. 971-974.

LAOUAMI N., SLIMANI A., BOUHADAD Y., **CHATELAIN** J.-L., NOUR A., 2006 - Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake : consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (11), p. 991-1003.

Bibliographie : thèses

DORBATH C., **DORBATH** L., 1984 - Approche sismologique de la structure de la lithosphère en Afrique de l'Ouest. Paris : Institut de Physique du Globe, 307 p. Th.: sci. Paris 6.

MOURGUES P., 1983 - Etude par les ondes P de la structure du manteau supérieur de l'Afrique centrale : un cas de bouclier affecté par un rift intraplaque. Strasbourg : Université Louis Pasteur, 278 p. multigr. Th. Sci. : Louis Pasteur : Strasbourg.

Gravimétrie

Historique

A la fin des années 1940, Françoise Duclaux veut engager les géophysiciens dans la prospection gravimétrique. Elle est responsable de la formation des élèves. Elle commence par la constitution d'un réseau gravimétrique de référence pour l'Afrique, Madagascar, la Réunion, l'île Maurice. Au cours de deux campagnes en 1951 et 52, 293 stations sont mesurées avec un soin extrême, par celui qui est sans doute le meilleur opérateur de l'époque : J. Martin, des expéditions polaires françaises.

C'est Yvonne Crenn qui y lance véritablement les travaux de prospection. Elle recrute et forme les premiers techniciens gravimétriciens qu'elle engage dans la gravimétrie de reconnaissance de l'Afrique de l'Ouest : Sénégal, Mauritanie, Mali, Niger, Guinée, Burkina, Niger, Cote d'Ivoire, Togo, Bénin. Les gravimétriciens, chercheurs ou techniciens, se nomment : François Jamet, Jean-Claude Villeneuve, François Missègue, Lucien Mollard, Yves Pierre, Bruno Jeanson, Albert Colonge, Roger Foy, Meheust, Marc Darbon, Julien Rechenmann, Gaston Olory-Togbé, Mamadou Coulibaly, Claude Blot, Paul Boefard, Guy Gaboriaud, Maïga Taher.

En RCA, au Tchad, au Congo, au Cameroun ou au Gabon, Pierre Maillard, René Dumas, Guy-Jacques Dubois, Michel Chauvin, Roger Frin, Mitaine, Jean-Claude Lachaud, Pierre Louis lèvent l'essentiel des cartes gravimétriques durant les années 1960.

A Madagascar Louis Cattala, chercheur C.N.R.S entre 1946 et 57, puis ORSTOM entre 1958 et 63, établit un réseau de base puis mesure neuf cent points gravimétriques.

A la fin des années 60, F. Missègue, J. Rechenmann et J.C. Villeneuve complètent la carte gravimétrique de Madagascar.

Au début des années 70, Amar Bourmatte, J. Rechenmann et J.C. Villeneuve établissent, au cours de deux missions, la carte gravi du Tanezrouft (sud algérien), en collaboration avec les Universités d'Alger et de Montpellier.

En 1976-1977, Roger Foy, Jean-Claude Lachaud, Saïdou Ly, Yves Albouy, Alain Lesquer, Michel Chauvin complètent, dans la région des Iforas, la carte gravimétrique du Mali en levant environ trois mille points.

Saïdou Ly, Norbert Miekoutima et Yves Albouy réalisent en 1985 un profil de 690 km sur les fleuves Oubangui et Congo.

En régions désertiques ou sahéliennes, les profils de mesure sont espacés d'une vingtaine de kilomètres, les stations de mesures sont distantes de trois à quatre kilomètres, la densité des stations est d'environ 200 par degré carré. En régions de forêt, la couverture est beaucoup moins dense, et dépend du réseau de pistes existantes, et, éventuellement, de la facilité de navigation des rivières. Lors de toutes les campagnes ORSTOM antérieures aux années 90, le nivellement était de type barométrique avec correction de la variation journalière de pression par référence à une ou des stations fixes. En RCA, la densité des mesures ORSTOM ne dépassait pas la centaine de points par degré carré.

En 1987 et 1988, Sylvain Bonvalot, Annick Padovani, Roger Foy et Jean-Claude Villeneuve sont les acteurs orstomiens des campagnes gravimétriques menées par l'I.G.N. à l'initiative de la D.M.A. (Saint Louis, Missouri), l'I.G.N. est chargée de la logistique et du positionnement des points, l'ORSTOM de la mesure gravimétrique : au Mali, en Guinée Konakry comme en Guinée Bissau ou dans certaines régions de la RCA, les levés se font par hélicoptère avec positionnement par centrale à inertie. En Côte d'Ivoire, au Mali, au Bénin, au Togo comme en RCA, le positionnement est assuré par G.P.S. et l'accès aux points par voitures tout terrains. 2536 points sont mesurés.

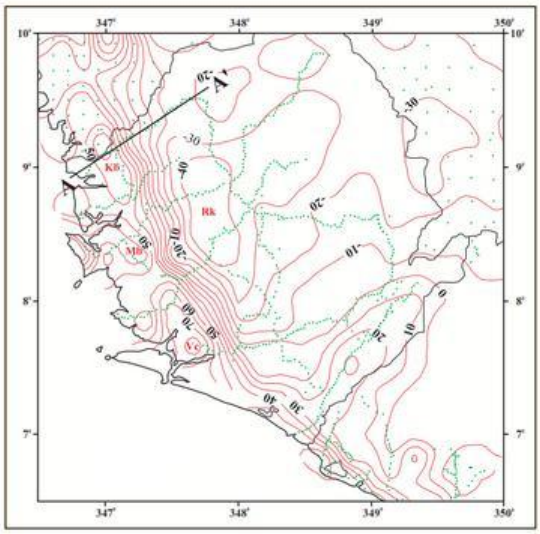
En 1987, Sylvain Bonvalot et Jean-Claude Villeneuve couvrent la Sierra-Leone, qui jusque là était vierge de points gravimétriques.

Objectifs, résultats

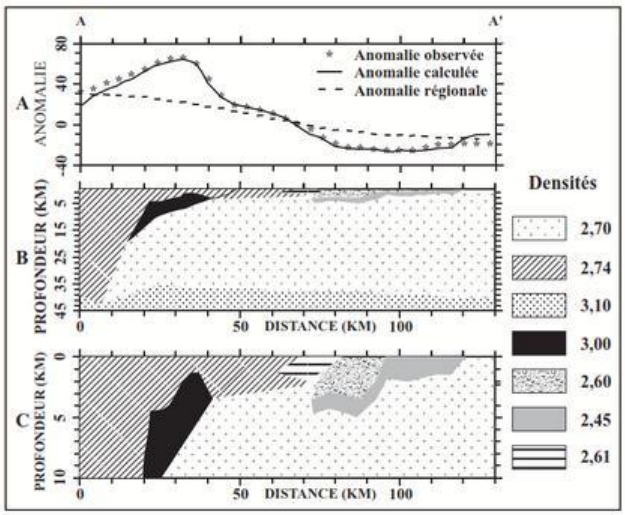
Les objectifs des campagnes gravimétriques sont de contribuer à l'amélioration des connaissances en géologie structurale, avec des applications possibles en géologie minière, en géologie pétrolière ou en hydrogéologie.

Les premières interprétations de la gravimétrie du Togo-Bénin (anciennement Dahomey) sont dues à Y. Crenn (Crenn, 1957). Elle imagine une structure en écaille à la base de la croûte pour expliquer l'existence de deux anomalies allongées dans le sens nord-sud. P. Louis, dans sa thèse de 1970, évoque l'affrontement de deux plaques : cratons et zone mobile pour expliquer ces structures. Cette hypothèse servira de base aux travaux menés dans les Iforas (Mali) et dans le Tanezrouft (Algérie). Tous ces travaux confirment la possibilité d'une tectonique des plaques fonctionnant déjà au précambrien. La thèse de P. Louis accorde, en plus, une large place à l'étude des bassins sédimentaires sur lesquels sont mis en oeuvre des sondages électriques à très grande longueur de ligne (AB de 20 km). Cette thèse renforce les suppositions émises par Y. Crenn quant à l'existence de structures potentiellement pétrolifères comme le fossé de Doba, au sud du Tchad, actuellement exploité.

Les structures de bordures de craton sont reconnues tant sur la bordure est du craton Ouest-Africain dans les Iforas (Li et al., 1984) au Mali, que sur la bordure ouest en Sierra Leone (Bonvalot et al., 1991, article dont sont extraites les figures qui suivent).



Carte des anomalies de Bouguer de la Sierra Leone, très fort gradient sur AA'



Interprétation du profil AA', long de 130 km, corps dense, profond à l'ouest, corps légers, superficiels à l'est.

Quelques profils gravimétriques en mer sont réalisées par des scientifiques de l'ORSTOM au large de la Côte d'Ivoire et du Ghana, qui mettent en évidence une transition très brutale entre les croûtes continentale et océanique (B. Pontoise et al., 1990).

La gravimétrie de Madagascar a fait l'objet de plusieurs thèses, réalisées soit au sein de l'ORSTOM soit avec l'aide de l'ORSTOM : Julien Rechenmann (1982), Solofo Rakotondraompiana (1992), Eddy Rasolomanana (1999). Les deux premières portent sur la géologie structurale de la grande île. J. Rechenmann insiste sur la très forte anomalie de la côte Est qu'il attribue à un passage brutal de la croûte continentale à la croûte océanique. S. Rakotondraompiana implique l'ensemble de la lithosphère. S. Rakotondraompiana et ses collègues reprennent une partie du travail de sa thèse basée sur l'étude de l'épaisseur élastique (S. Rakotondraompiana et al., 1999).

Les applications de la gravimétrie à la recherche minière sont illustrées par deux travaux, réalisés l'un sur le site de Bemanevika par J. Rechenmann (J. Rechenmann ,1968) et, l'autre, sur un site au sud du précédent, celui d'Andriamena, qui fait l'objet de la thèse d'E. Rasolomanana. Il est à noter que cette thèse associe le magnétisme à la gravimétrie. La gravimétrie s'applique à la prospection des chromites compte tenu des très importants écarts de densité avec les formations encaissantes,

Une autre thèse qui associe les deux méthodes est celle de David Boukeke (D. Boukeke, 1994), qui porte sur la célèbre anomalie magnétique de Bangui, anomalie dont on sait qu'elle est la plus grande du monde. D. Boukeke souligne l'important épaississement de la croûte au sud et la présence d'un corps dense en profondeur qui pourrait être le responsable de l'anomalie magnétique.

Plusieurs thèses se basent sur l'analyse spectrale des couples altitude-anomalies de Bouguer pour étudier le comportement mécanique de la lithosphère. Il en ressort que le dôme de l'Adamaoua correspond à une épaisseur élastique de 20 kilomètres, Yvette Poudjom et ses collègues détaillent ces résultats dans un article (Y. Poudjom-Djomani et al., 1993).

La thèse de Tihama El Abbas (1993) porte sur la région de Faguibine au Mali, elle interprète la grande anomalie de la région par la présence d'un corps volcanique qu'elle met en relation avec d'éventuelles formations volcaniques actuelles, observées en surface (T. El Abbas, 1992), formations qui selon certains géologues, n'auraient rien de volcanique et ne seraient que les résultats de « cuisson » par des feux de tourbe.

Collaborations avec les Universités dans le domaine de la gravimétrie en France

Pierre Louis, responsable du Centre de Bangui et des campagnes gravimétriques en Afrique centrale, quitte l'ORSTOM, après sa thèse obtenue en 1970, pour devenir professeur de géophysique à Montpellier. Plusieurs campagnes communes de mesures s'ensuivent au Mali et en Algérie. Saïdou Ly (parfois orthographié « Li »), étudiant Malien et élève ORSTOM, et Amar Bourmatte, étudiant Algérien, sont accueillis en thèse à l'université et participent aux travaux de terrain respectivement dans les Iforas et le Tanezrouft. Dans le laboratoire de Pierre Louis, qui regroupe des géologues et des géophysiciens, Alain Lesquer est le plus impliqué dans les travaux gravimétriques en Afrique. Jean-François Ponsard et Zouïr Guetat, étudiant Tunisien, travaillent sur les données ORSTOM du Sénégal, ils sont encadrés aussi par des collègues géologues de l'université d'Aix-Marseille.

Michel Diament, enseignant chercheur en gravimétrie à l'université d'Orsay, dirige plusieurs thèses sur l'interprétation des données gravimétriques de l'ORSTOM, celles de Chokri Jallouli, d'Yvette Poudjom-Djomani et de David Boukeke.

Dans les années 80, le D.E.A. de Géophysique Appliquée de Paris VI est remplacé par un D.E.S.S. du même nom, dirigé par Pierre Andrieux. Des étudiants issus du D.E.A., Sylvain Bonvalot, ou du D.E.S.S. Tihama El Abbas, David Boukeke, sont accueillis au laboratoire de Bondy.

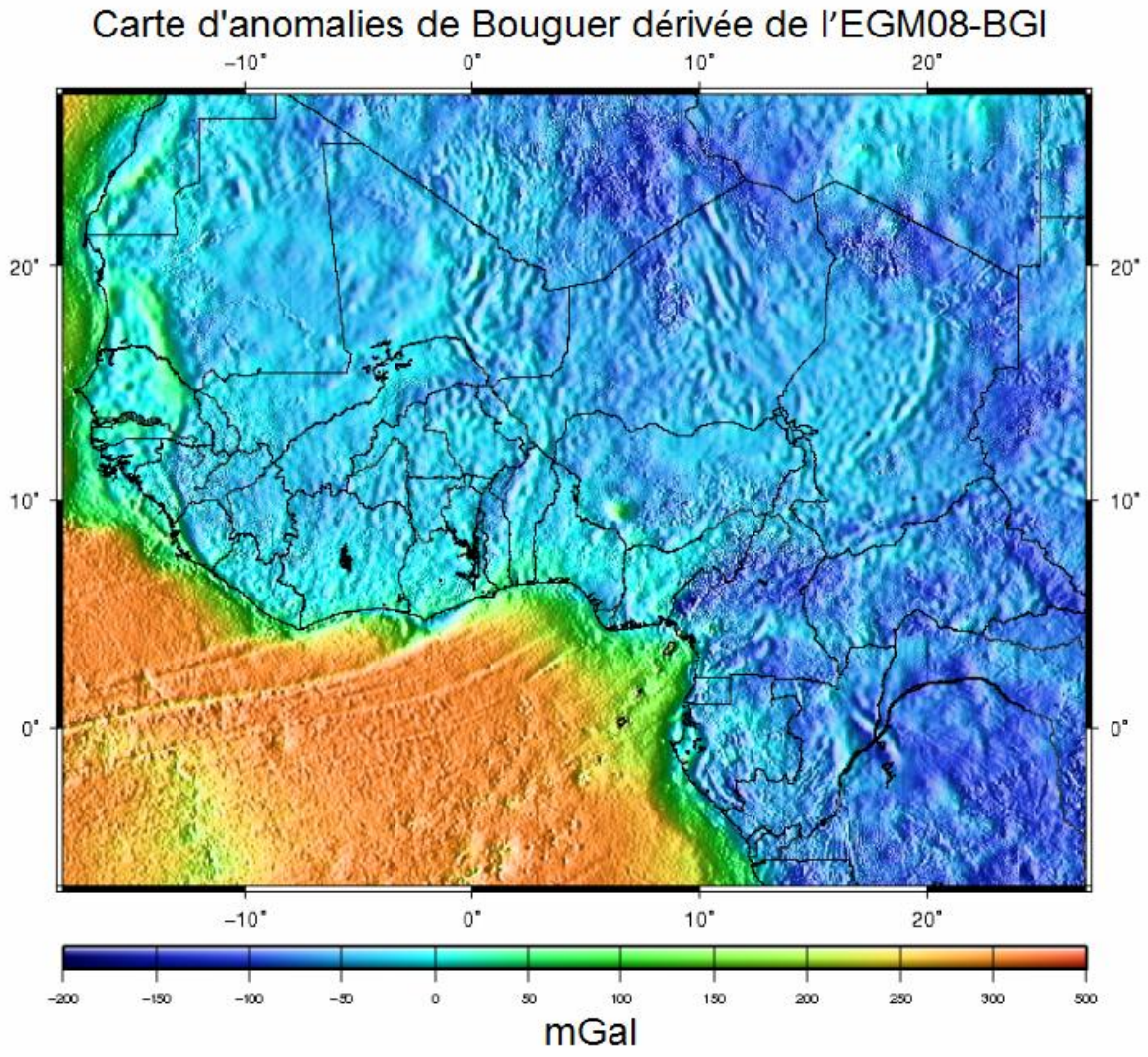
A Marseille, Michel Villeneuve collabore avec l'ORSTOM et notamment avec Sylvain Bonvalot sur l'interprétation des anomalies gravimétriques d'Afrique de l'Ouest.

Collaborations avec les Universités dans le domaine de la gravimétrie à l'étranger.

Au Cameroun, par l'intermédiaire de James Derek Faihead, sismologue et gravimétricien britannique, débutent des coopérations avec l'I.R.G.M., notamment avec Ateba Bekoa.A Madagascar, deux enseignants chercheurs de l'observatoire de géophysique, préparent leurs thèses en collaboration avec l'ORSTOM : S. Rakotondraompiana et E. Rasolomanana, le premier sur des données ORSTOM, le second sur des données acquises lors de son travail de thèse. A Brazzaville Jean-Paul Vicat participe à l'interprétation des levers gravimétriques du Congo. A l'université de Leeds, en Grande Bretagne, James Derek Fairhead collabore, sur le Cameroun, avec l'ORSTOM, d'abord en sismologie, puis en gravimétrie. Il encadre des étudiants comme Nnange, en thèse, et Yvette Poudjom-Djomani en post-doc. Pour répondre à l'intérêt de seize sociétés pétrolières, il lance l'African Gravity Project qui rassemble, en 1985, les données de toute l'Afrique.

Devenir de la gravimétrie à l'ORSTOM-IRD

L'I.R.D. n'a plus d'activités proprement gavimétriques en Afrique mais le BGI (Bureau Gravimétrique International), sis à Toulouse, est actuellement dirigé par S. Bonvalot de l'I.R.D., qui vient de publier les cartes mondiales de gravimétrie (S. Bonvalot, 2012), d'où est tirée la carte suivante. Les anomalies négatives étendues, en bleu foncé sur la carte correspondent soit à des bombements comme le Hoggar ou l'Adamaoua soit à des fossés comme la Bénoué ou Doba.



D’autre part, plusieurs scientifiques « irdiens » du groupe hydrogéophysique participent au programme GHYRAF Gravity and HYdrology in Africa. Ce programme utilise notamment les données satellitaires de GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). Enfin, on peut classer en gravimétrie l’observation des niveaux des mers par satellites, qui traduisent, une fois corrigés des variations temporelles telles que vagues et courants, le relief sous-marin. Une carte mondiale des fonds océaniques a été éditée par l’I.R.D. et le C.N.E.S. (S. Calmant et al., 2006).

Bibliographie : articles

BONVALOT S., VILLENEUVE M., **ALBOUY** Y., 1991 - Interprétation gravimétrique de la Sierra-Leone, mise en évidence d'une suture de collision dans la chaîne panafricaine des Rokelides. *Comptes Rendus de l'Académie des Science*s, série 2, Vol. 312, n° 8, p. 841-848.

BONVALOT S., BALMINO, G., BRIAIS, A., M. KUHN, PEYREFITTE, A., VALES, BIANCALE, R., **GABALDA** G., MOREAUX, G., REINQUIN, F. SARRAILH, M., 2012 - World Gravity Map, 1:50000000 map, *Eds. : BGI-CGMW-CNES-IRD*, Paris.

CALMANT S., CAZENAVE A., BERGE-NGUYEN M., 2006 – Carte des fonds océaniques par altimétrie spatiale – Coédition IRD CNES *CARTES ET NOTICES CÉDÉROM N° 116 © IRD 2006*

CRENN Y., 1957 - Mesures gravimétriques et magnétiques dans la partie centrale de l'AOF : interprétations géologiques. *Cahiers ORSTOM. Série Géophysique*, 47 p.

EL ABASS T., PERSON A., **GERARD** M., **ALBOUY** Y., SAUVAGE M., SAUVAGE J.F. et BERTIL D., 1993 - Arguments géophysiques et géologiques en faveur de manifestations volcaniques récentes dans la région du lac Faguibine (Mali) - *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, Série 2, Vol. 316, p. 1303-1310.

LI S., LESQUER A., HAMADOUN B., BLACK R., 1984 - Structure profonde du batholite occidental de l'Adrar des Iforas (Mali), une synthèse des données gravimétriques et géologiques. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, Vol. 25, n° 1, p 33-44.

PONTOISE B., **BONVALOT** S., MASCLE J., BASILE C. 1990 - Structure crustale de la marge transformante de Côte-d'Ivoire - Ghana déduite des observations de gravimétrie en mer. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.Série 2 : Mécanique...*, 310 (5), p. 527-534.

POUDJOM Y., DIAMENT M. et **ALBOUY** Y., 1992 - Mechanical behaviour of the lithosphere beneath the Adamawa uplift (Cameroon, West Africa) based on gravity data - *Journal of African earth Sciences,* Vol. 15, n° 1, p.81-90.

RAKOTONDRAOMPIANA S., **ALBOUY** Y. et PIQUE A**.,** 1999 - Modèle de lithosphère pour l'île de Madagascar (océan Indien occidental): nouvelle interprétation des données gravimétriques: Lithospheric model of the Madagascar island [western Indian ocean]: a new interpretation of the gravity data. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 28, n° 4, p. 961-973.

RECHENMANN J. 1968 - Etude gravimétrique du gisement de chromite de Bemanevika. *Cahiers ORSTOM.Série Géophysique*, (9), p. 2-16.

Bibliographie : thèses

BONVALOT S., 1990 - Mesures gravimétriques en Guinée et en Sierra Leone. Modélisation structurale et étude du comportement mécanique de la lithosphère : Etude d'une chaîne péricratonique, d'un bombement intraplaque et de marges transformantes. *Thèse de Doctorat* de l'université P. et M. Curie, Paris 6, 344 p.

BOUKEKE D., 1994 - Structures crustales d'Afrique centrale déduites des anomalies gravimétriques et magnétiques: le domaine précambrien de la République Centrafricaine et du Sud Cameroun. *Thèse de Doctorat* de l'université Paris Sud, Orsay, 263 p.

BOURMATTE A., 1977 - Etude gravimétrique du Tanezrouft (Algérie). *Thèse de Doctorat de 3° cycle*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 137 p.

EL ABASS T., 1993 - Comparaison de méthodes d'interpolation de données géophysique. Apport de la gravimétrie à l'étude d'un bassin précambrien supérieur: bassin du Gourma (Mali). *Thèse de Doctorat* de l'université P. et M. Curie, Paris 6, 236 p.

FOURNO J.P., 1994 - Inversion des données télésismiques et gravimétriques, sismicité et structure crustale des Hautes Terres de Madagascar. *Thèse de Doctorat* de l'université d'Aix-Marseille3, 2 vol., 300 p.

GUETAT Z., 1981 - Etude gravimétrique de la bordure occidentale du craton ouest africain. Essai de corrélations géologiques. *Thèse de Doctorat de 3° cycle* de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 185 p.

JALLOULI C., 1989 - Caractérisation du comportement mécanique de la lithosphère continentale à partir des données gravimétriques: implications géodynamiques pour la chaîne panafricaine du Sahara central de l'Afrique (Aïr). *Thèse de Doctorat* de l'université Paris Sud, Orsay. 239p.

LOUIS P., 1970 - Contribution géophysique à la connaissance géologique du bassin du lac Tchad. *Thèse de Doctorat d'Etat* de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. Mémoire ORSTOM Géophysique n° 42, éd. ORSTOM, Paris, 311 p.

LY S., 1979 - Etude gravimétrique de l'Adrar des Iforas (Nord Est Mali). *Thèse de Docteur-Ingénieur* de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 107 p.

NNANGE J.M, 1991 - The crustal structure of the Cameroun volcanic line and the Foumbam shear zone based on gravity and aeromagnetic data. *Ph. D. Thesis*, University of Leeds, 242 p.

PONSARD J.F., 1984 - La marge du craton ouest africain du Sénégal à la Sierra Leone: interprétation géophysique de la chaîne panafricaine et des bassins du protérozoïque à l'actuel. *Thèse de Doctorat de 3° cycle* de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 198 p.

POUDJOM-DJOMANI Y., 1993 - Apport de la gravimétrie à l'étude de la lithosphère continentale et implications géodynamiques: étude d'un bombement intraplaque: le massif de l'Adamaoua (Cameroun). *Thèse de Doctorat* de l'université Paris Sud, Orsay, 286 p.

RECHENMANN J., 1982 - Gravimétrie de Madagascar. Interprétation et relations avec la géologie. *Thèse de Doctorat d'Etat* de l'université Paris Sud, Orsay. *Mémoire ORSTOM Géophysique n°18,* éd. ORSTOM, Paris, 128 p.

RAKOTONDRAOMPIANA S., 1992 - Gravimétrie de Madagascar et structure de la lithosphère. *Thèse de Doctorat de 3° cycle* de l'université d'Antananarivo. 320 p.

RASOLOMANANA E. 1999. Etude du potentiel en minéralisation chromifère du complexe basique et ultra-basique d'Andriamena par prospections gravimétrique et magnétique. *Thèse de Doctorat d'état* de l'université d'Antananarivo. 158 p.

SAGBOHAN W., 1972 - Contribution à la géologie du Dahomey par l'utilisation des mesures gravimétriques et magnétiques. *Thèse de Doctorat de 3° cycle* de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, 133 p.

Méthodes électriques et électromagnétiques (EM)

Les dispositifs de mesures électriques sont généralement des électrodes (piquets métalliques) enfoncés dans le sol, deux reliés à un générateur de courant, les deux autres à un appareil de mesure dit résistivimètre. Le paramètre mesuré est la résistivité, exprimée en Ohm.m, que ce soit en électrique ou en EM. La résistivité, pour un matériau donné, est sa capacité à s'opposer au passage du courant électrique. L'inverse de la résistivité est la conductivité qui s'exprime en Siemens/m.

De manière générale, en dehors du graphite et de quelques sulfures métalliques, qui présentent une conductivité de type métallique, la conductivité d'une formation, de type ionique, dépend de sa porosité, de sa teneur en eau, et de la minéralisation de cette eau.

Les méthodes électromagnétiques associent diverses composantes du champ magnétique alternatif entre elles ou avec les composantes du champ électrique. Dans le premier cas on utilise des bobines d'émission et de réception, proches les unes des autres, dans le second on mesure des signaux lointains, naturels ou artificiels, avec des capteurs électriques et des capteurs magnétiques, c'est la magnéto-tellurique.

Méthodes électriques

La profondeur d'investigation dépend, en électrique, de la distance entre électrodes d'injection et de mesure, en magnétotellurique de la période des phénomènes mesurés, en EM de la géométrie des dispositifs : taille et distance des bobines et des fréquences. Notons que l'EM ne nécessite pas de contact direct avec le sol donc autorise les mesures aéroportées. Les profondeurs de pénétration vont de quelques décimètres à quelques dizaines de mètres, en général, pour les méthodes E.M. En MT, dans les cas favorables il est possible d'atteindre plusieurs kilomètres. C'est la seule méthode, parmi celles ici évoquées, mise en œuvre en prospection pétrolière. Notons que les principes de la prospection électrique ont été définis dans les années 1920 par Conrad Schlumberger et ceux de la magnétotellurique par Louis Cagniard en 1953.

Les méthodes EM ont été développées surtout à partir des années 1970, surtout par les Nord-Américains et les Suédois.

A l'ORSTOM la prospection électrique se pratique dès les années 1950 pour les applications hydrogéologiques ou minières, à la demande de diverses sociétés intéressées aux exploitations. Une variante grandes profondeurs est utilisée pour la prospection des bassins sédimentaires, en parallèle avec la gravimétrie notamment au Cameroun sur le fossé de la Bénoué et au sud du Tchad sur le fossé de Doba. Le centre de Bangui dispose d'un générateur très puissant et d'un équipement permettant des mesures jusqu'à des distances de 20 km entre les électrodes d'injection.

Que ce soit en Afrique centrale ou en Afrique occidentale, les prospections électriques sont, le plus souvent, appliquées à l'hydrogéologie. Le paramètre résistivité ne suffit pas à caractériser la présence ou l'absence de nappes souterraines : la mise en évidence de zones conductrices peut, dans certains contextes, indiquer la présence de nappes, mais dans d'autres cas la conductivité observée est associée à des argiles, certes saturées d'eau mais cette eau, liée, ne peut être extraite. Une application très intéressante de la prospection électrique est celle de la distinction entre eaux douces et eaux salées. L'électrique a donc été largement utilisée en bordures de mer ou de fleuves : à la suite de C.G.G. (Compagnie Générale de Géophysique), de nombreuses études ont été menées par l'ORSTOM dans les régions côtières du Sénégal et de la Mauritanie et en bordure des fleuves. Dans les décennies 1950 à 1980, beaucoup de ces travaux répondent aux demandes des hydrogéologues du B.R.G.M. ou de divers services nationaux et ne font généralement pas l'objet de rapports ou de publications propres à l'ORSTOM. Dans les années 1980 et 1990, des géophysiciens orstomiens de Dakar

encadrent des étudiants de l'université Cheikh Anta Diop dont les travaux donnent lieu à des soutenances de mémoires : citons S. Diouf sur le littoral de Taïba à Rao, Y . Koussoube sur le fleuve Sénégal et O. Toguyeni sur Tanma, Ferlo et Nianing, J. Tchani sur la presqu'île du Cap-Vert.

D'autres prospections électriques intéressent les zones de socle, comme, au Sénégal oriental le massif granitique de Saraya étudié dès les années 1960 et revu, au cours de travaux coordonnés entre géologues et géophysiciens dans les années 1970. C'est alors que les prospecteurs sont à même de décrire la tectonique de ce massif et mettent en évidence les aquifères constitués de filons de dolérite altérés, qui contiennent les nappes les plus importantes du massif (C. Dorbath et al., 1975), l'étude hydrogéologique du massif de Saraya est reprise, de manière détaillée, dans la thèse de S. Diouf (1999), qui réalise des prospections avec les tout nouveaux systèmes multi-électrodes.

Les sondages électriques en grandes longueurs de ligne (20 km entre les électrodes d'injection) sont réalisés dans les années 1960 en zones sédimentaires, leurs résultats sont donnés dans la thèse de P. Louis (1970), leur interprétation renforce celle de la gravimétrie, notamment dans le Tchad méridional, où sont précisés les contours et les profondeurs des fossés de Baké-Birao et de Doba, séparés par l'accident de Bebo ; le fossé crétacé de Doba, dont les intérêts pétrolier et hydrogéologique sont soulignés, communiquerait via le chenal de Pala avec le fossé de la Bénoué.

L'amélioration des instruments de mesures électriques dans les années 1990 et les possibilités nouvelles d'interprétation par ordinateurs, entraînent une meilleure coopération entre collègues pédologues, hydrologues et géophysiciens., les expériences de terrains sont plus nombreuses et les terrains plus diversifiés.

Au Cameroun, dans le sud (H. Robain et al., 1996), le bassin versant de Nko'ongop est étudié de manière détaillée et l'interprétation permet de distinguer trois terrains dans les formations latéritiques et deux dans les saprolites. Au Cameroun encore, dans le nord (non loin de Maraoua) un horizon sableux, à forte cohésion, très conducteur est bien mis en évidence par prospection électrique (M. Lamotte et al., 1994).

En Tunisie (M. Schmutz et al., 2003), au voisinage du lac collinaire d'El Gouazine une étude électrique détaillée conduit les auteurs à imaginer des structures anisotropes pour rendre compte des données observées.

Au Sénégal les manteaux latéritiques sont l'objet d'études électriques : (M. Ritz et al., 1999), dans ce dernier travail les auteurs mettent en évidence des structures nettement plus contrastées électriquement au dessus des socles granitiques et moins contrastées sur socles schisteux.

Dans les années 2000, l'engouement pour les prospections électriques multi-electrodes ne faiblit pas. Au Burkina, Rémi Clément et ses collègues (R. Clément et al., 2009), étudient de manière très fine les variations temporelles de la résistivité pour mettre en évidence différents modes d'infiltration dans le temps, de telles études nécessitent des mesures très détaillées et l'enregistrement simultané des températures qui influent sur les résistivités des terrains proches de la surface.

Des mesures de potentiel spontané sont réalisées sur des terrains du Sud Cameroun (J.Q. Yene Atangana, 2003), à Nsimi terrain prospecté de manière très détaillée en électrique. L'interprétation des mesures ne montre aucune corrélation entre la carte des anomalies PS et celle des résistivités, alors que peuvent être mises en évidence des relations entre le signal PS et l'altitude, d'une part, et, la teneur en argiles de la couverture latéritique, d'autre part. La carte des résistivités de Nsimi est corrigée des défauts dus aux inhomogénéités proches des électrodes (M. Ritz et al., 1999), ce qui permet davantage de précision dans les modélisations.

Dans la région d'Androy au sud de Madagascar les variabilités dans les salinisations des eaux sont étudiées notamment en électrique (V. Rabemanana et al., 2005).

Les études électriques et géochimiques contribuent à montrer que les fortes salinités se rencontrent dans les fonds de vallée et dans les terrains argileux alors que les faibles salinités se trouvent en terrains peu argileux, granuleux, le plus souvent situés dans les pentes des vallées.

Méthode magnétotellurique (MT)

Elle se développe à l'ORSTOM surtout à la fin des années 1970 et dans les années 1980 : il s'agit de MT « longues périodes », donc à grande profondeur d'investigation. Les géophysiciens du Sénégal sont équipés de dix stations à quatre composantes horizontales, deux magnétiques, deux telluriques, numérisées. Michel Ritz devient le principal spécialiste de cette méthode. Les données acquises sont souvent bruitées, les algorithmes de traitement automatique sur ordinateur sont peu développés à cette époque, Michel Ritz démontre un savoir-faire rare dans le choix des bonnes données et il abat un travail considérable en sachant s'associer avec d'excellents géologues comme Bernard Robineau, René Flicoteaux ou Yves Bellion. Entre 1982 et 1989, il publiera, en premier auteur, et souvent en auteur unique, pas moins de dix-sept contributions à des revues anglophones de rang A, il est le géophysicien le plus prolifique de sa génération. Il détermine, du point de vue des résistivités, les structures profondes des bassins sédimentaires sénégalo-mauritaniens et des zones de contacts craton – zone mobile au Mali et au Niger, à propos de ses interprétations structurales on peut citer trois articles parus au Journal of Geophysical Research : M. Ritz, 1982 et 1986, M.Ritz et J. Vassal, 1986.

Dans les années 1990, d'autres appareillages permettront des mesures dans les courtes et moyennes périodes soit au Sénégal (M. Ritz, 1993), soit à la Réunion. Dans le contexte volcanique du piton de la Fournaise, l'audiomagnétotellurique se montre très efficace pour la détection des formations aquifères, (B. Robineau et al., 1997, Ritz et al., 1997, Courteaud et al., 1996).

Méthode TDEM (Time Domain Electro-Magnetic)

C'est un nouvel appareillage qui mesure les signaux électriques, à des intervalles de temps de plus en plus grands, après la coupure brutale d'un courant injecté dans une boucle posée à la surface du sol. Ces signaux sont les réponses des courants induits de plus en plus profondément dans les diverses couches du terrain. Par des traitements appropriés, le géophysicien peut estimer les résistivités et les épaisseurs de ces couches. C'est d'abord à la Réunion, au bas du piton de la Fournaise, que cette méthode est mise en œuvre, conjointement avec l'audiomagnétotellurique. Le TDEM permet de bien estimer les épaisseurs et résistivités des couches superficielles et de corriger les débuts de courbes MT des effets du relief, la Mt permet, elle, de plus grandes profondeurs d'investigation. Les interprétations autorisent les auteurs à supposer l'existence d'une paléo-vallée remplie d'alluvions aquifères (références déjà citées pour la MT).

Sur le volcan Fogo, dans les îles du Cap Vert, le TDEM est associé à l'électrique, avec mesures de polarisation provoquée, différents dispositifs, avec différentes dimensions des boucles d'injection de courant, sont expérimentés, montrant que même dans des conditions difficiles sur des terrains polarisables, très résistants des modélisations de qualité sont possibles autorisant la détection de terrains aquifères (M. Descloitres et al., 2000).

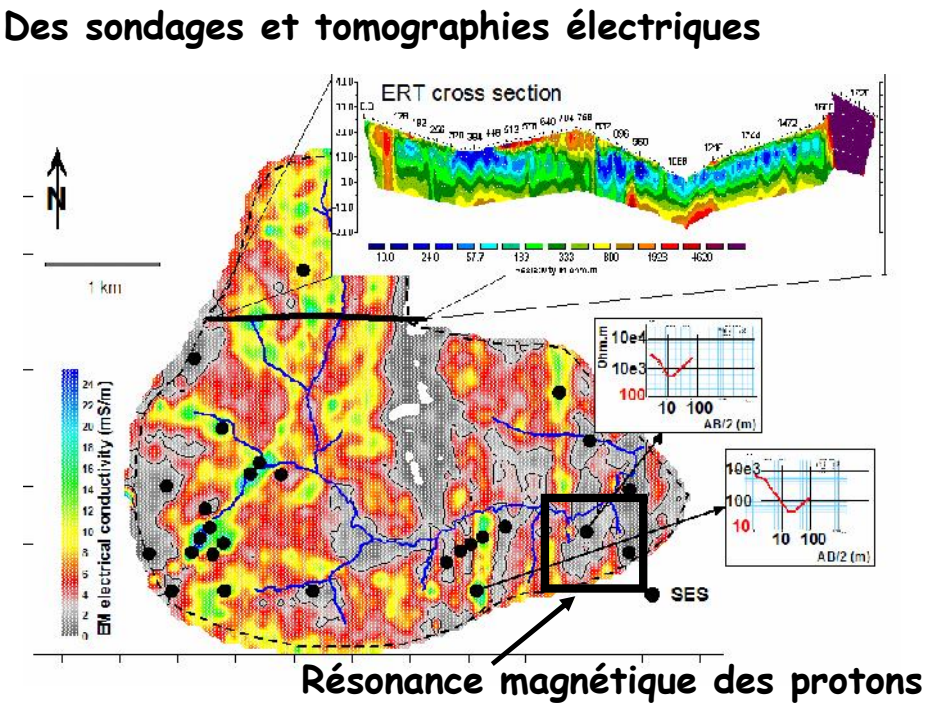
Lassina Zerbo présente dans sa thèse en 1993 les difficultés d'interprétation en magnétisme et TDEM aéroportés sur le district minier de Goren, difficultés liées à l'existence de terrains altérés conducteurs difficiles à distinguer des formations conductrices liées aux minéralisations, il définit des pistes possibles pour inverser de manière conjointe les données observées et pour améliorer les techniques de mesure elles-mêmes.

Méthode RMP (Résonance Magnétique des Protons)

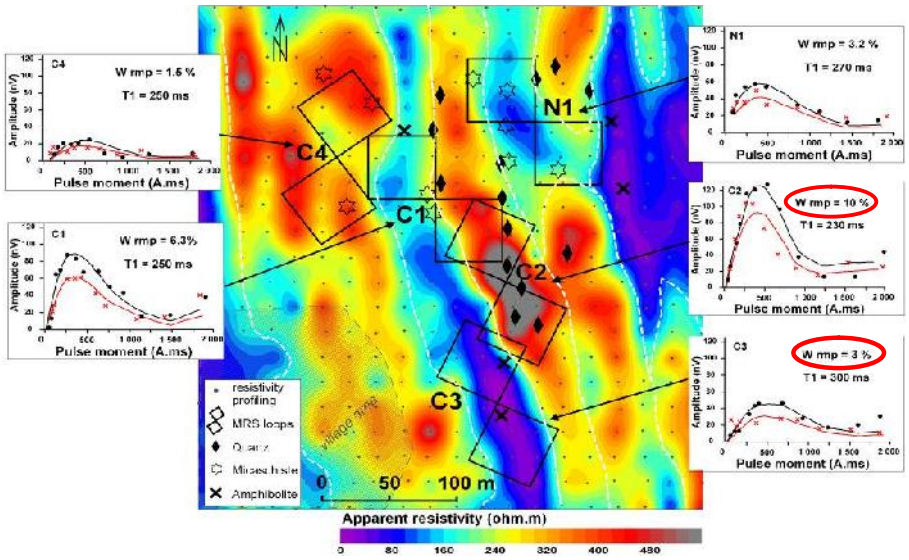
C'est la seule méthode directement sensible à la présence d'eau. Dans une boucle posée sur le sol on génère un courant proportionnel à la valeur du champ magnétique local, les protons de l'eau s'orientent suivant la direction du champ induit par le courant et, après la coupure du courant « précessionnent » pour se replacer dans la direction du champ terrestre. C'est l'amplitude et la décroissance de ce signal qui sont mesurées par l'instrument, plus l'amplitude du signal est grande, plus la teneur en eau est importante, plus la durée de la décroissance est grande, plus la dimension des pores qui contiennent l'eau est grande, plus l'intensité du courant dans la boucle est intense, plus grande est la profondeur de pénétration. Les premiers travaux sur l'application de la RMP à la prospection des eaux souterraines ont été menés par les géophysiciens de l'Académie des Sciences de Russie. Après leur prototype HYDROSCOPE, ils ont mis au point le NUMIS, en collaboration avec le BRGM et la société IRIS INSTRUMENT. Le concepteur, Anatoli Legchenko, devenu ingénieur au BRGM, a ensuite été recruté, en 2003, par l'IRD, où il va prendre en main le groupe Hydrogéophysique. De nombreux tests de validation de la méthode sont mis en œuvre dans différents contextes géologiques comme le démontre la publication de Jean-Michel Vouillamoz et de ses collègues (J.M. Vouillamoz et al., 2005).

La RMP est bien la seule méthode capable de détecter directement l'eau mais elle est incapable de préciser si cette eau est douce ou salée, d'où l'intérêt de l'associer aux autres méthodes EM ou électriques, qui elles, distinguent très bien eaux salées et eaux douces par le paramètre résistivité. D'autre part la RMP est plus difficile à mettre en œuvre, elle est utilisée en prospection de détail et non pas en prospection de reconnaissance.

Les figures qui suivent sont tirées d'un document de travail de Marc Descloitres destiné à présenter les activités de l'hydrogéophysique au Bénin, des cartes de conductivités (première figure) ou de résistivités (seconde figure) sont établies, dans certains secteurs, ainsi identifiés, une tomographie électrique est réalisée qui donne une image plus détaillée, enfin des sondages par RMP peuvent sont faits sur certains emplacements pour estimer les porosités.



La Résonance magnétique des protons permet de connaitre les différences de porosité efficace du sous sol



Dans le même document, Marc Descloitres définit les objectifs suivants :

- reconnaître les différentes unités du sous-sol pôuvant jouer un rôle hydrogéologique
- connaître la profondeur du socle
- donner des estimations sur les porosités efficaces des compartiments altérés.
- Nourrir les modélisations hydrogéologiques.

L'état actuel en électrique et E.M. : l'hydrogéophysique

Huit thèses ont été soutenues, trois par des Français, cinq par des ressortissants des PVD. Les applications de la géophysique à la reconnaissance des aquifères constituent un ensemble bien identifié sous le nom d'hydrogéophysique. Ces applications sont mises en oeuvre au Niger et, surtout au Bénin. L'équipe du Bénin compte, en 2012, cinq expatriés IRD, chercheurs, ingénieurs ou techniciens, quatre nationaux I.R.D., ingénieurs ou techniciens. Un projet, nommé GRIBA (Groundwater Resource in Basement Rocks of Africa) a été accepté et sera financé par l'Europe**.**

Dans les activités géophysique en Afrique, le domaine de l'hydrogéophysique est le seul en croissance.

Bibliographie : articles

CLEMENT R., **DESCLOITRES** M., GUNTHER T., **RIBOLZI** O., **LEGCHENKO** A., 2009 - Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT : experience of advanced interpretation. *Comptes Rendus Geoscience*, 341 (10-11), p 886-898.

COURTEAUD M., **RITZ** M., **DESCLOITRES** M., ROBINEAU B., COUDRAY J., 1996 - Cartographie AMT du biseau salé sur le flanc sud du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 2a : Sciences de la Terre...*, 322 (2), p. 93-100.

DESCLOITRES M., GUÉRIN R., **ALBOUY** Y., TABBAGH A., **RITZ** M., 2000 - Improvement in TDEM sounding interpretation in presence of induced polarization : a case

study in resistive rocks of the Fogo volcano, Cape Verde islands. *Journal of Applied Geophysics*, 45, p. 1-18.

DORBATH C., **FROIDEVAUX** P.L, **BLOT** A., **CARN** M., 1975 - Application des propriétés de résistivité des terrains d'altération à la connaissance de la tectonique du massif de Saraya (Sénégal oriental). *Cahiers ORSTOM. Série Géologie*, 7 (2), p. 111-123.

LAMOTTE M., BRUAND A., DABAS M., DONFACK P., **GABALDA** G, HESSE A., HUMBEL F.-X, **ROBAIN** H. 1994, Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord-Cameroun : apport d'une prospection électrique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris. Série 2 : Mécanique...*, 318, p. 961-968.

R**ABEMANANA** V., VIOLETTE S., DE MARSILY G., **ROBAIN** H., DEFFONTAINES B., ANDRIEUX P., BENSIMON M., PARRIAUX A., 2005 - Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar. *Journal of Hydrology*, 310 (1-4), p. 143-156

RITZ M., **PARISOT** J.-C., **DIOUF** S., **BEAUVAIS** A., DIONE F., **NIANG** M., 1999 - Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa. *Journal of Applied Geophysics*, 41, p. 335-344.

RITZ M., **ROBAIN** H., PERVAGO E., **ALBOUY** Y., CAMERLYNCK C., **DESCLOITRES** M., **MARIKO** A., 1999 - Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects : application to a soil system in South Cameroon. *Geophysical Prospecting*, 47, p. 85-101.

RITZ M., **VASSAL** J. , 1986 - Geoelectrical structure of the northern part of the Senegal basin from joint interpretation of magnetotelluric and geomagnetic data. *Journal of Geophysical Research*, 91 (B 10), p. 443-456. ISSN 0148-0227.

RITZ M., 1984 - Inhomogeneous structure of the Senegal lithosphere from deep magnetotelluric soundings. *Journal of Geophysical Research*, 89 (B13), p. 11.317-11.331.

RITZ M., 1983 -Use of the magnetotelluric method for a better understanding of the West African shield. *Journal of Geophysical Research*, 88 (B12), p. 10625-10633.

RITZ M., DIA A., **NIANG** M.F.K., 1993 - Etude structurale par la méthode audiomagnétotellurique des complexes du protérozoïque inférieur au Sénégal oriental. *Journal of African Earth Sciences*, 17 (2), p. 225-232.

ROBINEAU B., **RITZ** M, COURTEAUD M., **DESCLOITRES** M., 1997- Electromagnetic investigations of aquifers in the Grand Brulé coastal area of Piton de la Fournaise volcano, Reunion island. *Ground Water*, 35 (4), p. 585-592,.

RITZ M., **DESCLOITRES** M., ROBINEAU B., COURTEAUD M., 1997 - Audiomagnetotelluric prospecting for groundwater in the Baril coastal area, Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island. *Geophysics*, 62 (3), p. 758-762.

ROBAIN H., DESCLOITRES M., **RITZ** M., ATANGANA Q.Y. 1996 - A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics*, 34, p. 237-253.

SCHMUTZ M., **MONTOROI** J.-P., ANDRIEUX P., BOBACHEV A., NASRI S., 2003 - Apport des méthodes de résistivité électrique en milieu semi-aride méditerranéen : application au lac d'El Gouazine (Tunisie centrale). In : *Géophysique des sols et des formations superficielles : Geofcan : actes du 4ème colloque*. Paris (FRA), Paris : Université Pierre et Marie Curie, 2003, p. 117-120. Colloque Geofcan, 4.

VOUILLAMOZ J.-M., **DESCLOITRES** M., **TOE** G., **LEGCHENKO** A., 2005 - Characterization of crystalline basement aquifers with MRS : comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics*, 3 (3), p. 205-213.

YENE ATANGANA J.Q., NYECK B., BITOM D., **ROBAIN** H, 2003 - Self-potential anomalies in the lateritic cover of the Nsimi watershed in southern Cameroon : origin and influence of electrical and granulometric parameters. *Journal of Applied Geophysics*, 54, p. 85-96.

Bibliographie : thèses

DESCLOITRES M., 1998 - Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion). Paris : Université Paris 6, 238 p. multigr. Th. Géophys., Université de Paris 6 : Paris, 1998/06/29

DIOUF S., 1999 - Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental : application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs. Dakar : ORSTOM, 158 p. multigr. Th. : Géol. Appliquée, UCAD : Dakar, 1999/01/09.

NIANG MAGATTE F.K., 1995 - Interprétation de données géophysiques sur la structure profonde du bassin sédimentaire sénégalais et sur la zone de socle au Sénégal oriental. Dakar (SEN), Dakar : ORSTOM, UCAD, 114 p.multigr. Th. 3e cycle : Sci. : Géol-Géophys., UCAD : Dakar, 1995/07/20.

RABEMANANA V., 2002 - Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (sud de Madagascar). Paris (FRA), Paris : Université de Paris 6, IRD, 203 p. multigr. Th. : Sci. de la Terre, Université de Paris 6 : Paris, 2002/04/12.

RITZ M., 1985 - La distribution de la résistivité électrique dans la lithosphère de l'Afrique de l'Ouest suivant un profil Ouest-Est : implications géodynamiques. Paris : ORSTOM, 200 p. (Travaux et Documents Microfichés ; 21). Thèse Sci. : Géophys., Paris 6, 1985/06/21

TOE G., 2004 - Apport de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères de socle : tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, résonance magnétique protonique : applications au Burkina Faso. Paris (FRA), Bondy : Université Pierre et Marie

Curie, IRD, 274 p. multigr. Th. : Sci. de la Terre : Géophys. Appliquée, Université Pierre et Marie Curie , 2004/06/11

VOUILLAMOZ J.-M., 2003 – La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique. Thèse Université de Paris 11, Orsay, 315p multigr. , 2003/06/27

ZERBO L., 1993 - Modélisation et interprétation de données magnétiques et électromagnétiques aéroportées : application au prospect minier de Goren (Burkina Faso). Thèse Université de Paris 11, Orsay, 205p multigr. , 1993/07/28

Regards sur le passé et le présent

Les géophysiciens des années 1950 et 60 utilisaient des abaques, la règle à calcul, la table de logarithmes. Les jeunes chercheurs ou ingénieurs sont mieux formés et plus spécialisés que nous ne l'étions. Avant les années 1980, l'ORSTOM assurait deux ans de formation à ses futurs chercheurs, cet enseignement n'existe plus, le recrutement se fait après la thèse. Chez les techniciens de nombreux autodidactes étaient formés sur le tas. Cette pratique est de plus en plus rare, le niveau se recrutement s'est élevé mais les personnels techniques sont moins nombreux, alors que les effectifs des personnels administratifs s'accroissent. Les chercheurs que nous étions acceptaient facilement les activités de service et travaillaient souvent de manière anonyme pour répondre à des demandes d'organismes nationaux, cette pratique n'a plus cours, les « irdiens », jugés essentiellement sur leurs contributions à des revues de rang A, publient bien davantage que leurs aînés. Les récentes réformes ont abouti à intégrer leurs activités dans des U.M.R., ce qui ajoute aux lourdeurs bureaucratiques et contribue à éloigner les acteurs de la recherche de l'I.R.D. de leurs terrains d'intervention. De plus ces terrains d'intervention sont différents de celles de l'ORSTOM, l'Afrique n'est plus le continent privilégié, concurrencée qu'elle est par l'Amérique latine et l'Asie. Mais certaines évolutions sont positives, ainsi le souci du développement efficace est affirmé, en ce sens là on peut penser qu'il est préférable de faire progresser les connaissances dans le domaine de l'hydrogéologie plutôt que dans l'étude structurale de la lithosphère ; c'est en ce sens là aussi que l'I.R.D. pourrait affirmer sa différence par rapport au C.N.R.S.

Les instruments ignoraient l'électronique et l'acquisition numérique. Et l'informatique est arrivée. Les techniques de numérisation et de traitement des données ont suivi les progrès de l'informatique. L'appareillage a été formidablement amélioré : magnétomètres à protons et magnétomètres flux-gate, gravimètres absolus, GPS, électrique multi-électrodes, TDEM, RMP, pratiquement tous intègrent des systèmes d'acquisition numérique et sont accompagnés de logiciels de modélisation automatiques. De nombreux satellites spécialisés observent notre planète, même la gravimétrie se pratique depuis l'espace, comme on l'a dit, (satellite GRACE) et permet d'estimer les variations de profondeur du toit des grandes nappes (GHYRAF, Gravity and Hydrology in Africa). Cet apport des satellites diminue encore la nécessité du travail de terrain, terrain d'ailleurs de moins en moins accessible vu la dégradation des conditions de sécurité, notamment en Afrique.

Je veux dire mon admiration pour le travail que mes jeunes collègues accomplissent actuellement au Niger ou au Bénin, malgré les obstacles bureaucratiques qu'ils doivent surmonter, et pour le souci qu'ils ont d'encadrer les étudiants et de coopérer avec les scientifiques nationaux.

Et, pour terminer, je veux aussi célébrer la mémoire de trois de nos anciens disparus.

Yvonne Crenn

Yvonne Crenn, normalienne de Sèvres, devient agrégée de physique en 1944, à 24 ans. Détachée à ce qui est alors l'ORSC (Office de la Recherche Scientifique Coloniale), elle est affectée, après sa formation à l'IPG de Paris, à l'Institut Français d'Océanie, à Nouméa, de 1949 à 1952. Elle prend ensuite la direction du centre de Mbour. Elle réalise, sans chauffeur ni mécanicien, au volant d'un camion tout terrain l'itinéraire gravimétrique de Mbour à Djamena, actuel Fort-Lamy, à cette époque, où les pistes sont dans un état épouvantable, c'est un exploit. Toute petite, elle semble fragile, mais ce n'est qu'une apparence, elle est déterminée, sans faiblesse d'aucune sorte, toute entière dévouée à la science. Marxiste convaincue, elle croit au progrès, elle veut agir pour le développement des connaissances, elle croit à la coopération, au développement agricole ou industriel mais aussi humain et elle œuvre sans relâche pour faire partager son savoir à tous les techniciens, Sénégalais et Français, qu'elle recrute. Elle ne se cantonne pas à la seule méthode gravimétrique, elle utilise aussi bien les prospections magnétique et électrique mais c'est bien en gravimétrie qu'elle est et reste la plus connue. Avant Pierre Louis, elle met en évidence l'anomalie négative de la région de Doba, au sud du Tchad, que les géologues, comme les géophysiciens, jugeront potentiellement pétrolifère. Elle va lancer les grandes campagnes de gravimétrie que continueront notamment Pierre Louis et Julien Rechenmann,

Je rencontre Yvonne Crenn en 1965 au laboratoire de Bondy, elle y développe un appareillage d'enregistrements destiné à la magnétotellurique, elle est proche de Louis Cagniard, inventeur de la MT en 1953, qu'elle apprécie particulièrement. Par contre, elle n'a pas de mots assez durs pour fustiger le comportement scientifique du géophysicien Yves Rocard, qui vient de publier « Le signal du sourcier », elle dénonce les biais de ses expériences et son manque de rigueur. Elle me rappelle certaines évidences comme celle-ci : la nappe de la Beauce est continue depuis le sud de Chartres jusqu'à la vallée de la Bièvre, si le signal du sourcier est lié à l'eau souterraine, il doit être continu sur la même zone, or ce n'est pas le cas. Elle me conte ses déboires avec un sourcier appelé par les autorités de Mauritanie pour détecter les eaux souterraines près de Nouakchot. L'ORSTOM y avait réalisé des sondages électriques qui montraient des lentilles d'eau douce d'épaisseurs très faibles voire nulles, au dessus de très importantes nappes salées. Le sourcier était formel, la géophysique avait tort, il avait donc indiqué plusieurs positions de forages dont les résultats, hélas pour lui, devaient confirmer toutes les interprétations géophysiques. Je garde en mémoire un souvenir ébloui de son enthousiasme et de la clarté de ses exposés.

Ousseini Fambitakoye

L'histoire, édifiante, commence à Fambita, bourgade du Niger, dans les années quarante du vingtième siècle, avec la visite du gouverneur. Celui-ci croise un petit Nigérien, qui se promène à cheval. Il lui pose quelques questions auxquelles l'enfant répond, par le truchement d'un interprète, de manière fort avisée. Il s'enquiert de sa famille : c'est l'un des nombreux fils du chef de village. Fambitakoye, koye signifiant chef, Ousseini de son prénom, a alors neuf ans. Le gouverneur va aussitôt s'entretenir avec le chef et le persuade d'envoyer son fils à l'école. Il accepte, le gouverneur lui attribue une bourse d'étude qui couvrira frais de scolarité et d'hébergement dans la cité voisine.

Sans connaître, au départ, un mot de français, Fambitakoye termine son année premier de sa classe. La bourse qu'il a obtenue ne lui permet pas de rouler sur l'or, il a une ardoise et un seul cahier, une gomme et quelques crayons. Son seul cahier, sur lequel il écrit de tout petits caractères, l'accompagnera tout au long de ses études primaires. C'est à regret qu'il efface les notes de l'année précédente pour y inscrire celles de l'année en cours. C'est un élève exceptionnel, qui veut mériter la confiance se son grand homme de père et aussi celle du gouverneur. Quel que soit le nombre d'élèves dans toutes les classes, il en est toujours le premier et il passe le concours de l'Ecole Normale de Sébikotane, pépinière des élites intellectuelles de l'Afrique noire francophone.

Sa bourse devient confortable, habillé, logé et nourri aux frais de l'école, il bénéficie d'un accès à une bonne bibliothèque, de livres gratuits et d'un enseignement de haut niveau par des professeurs remarquables. Les élèves sont très motivés ; leur assiduité, leur sérieux, leur soif de connaissances sont presque inimaginables pour des potaches du vingt et unième siècle. Il n'est plus le premier partout, d'autres sont meilleurs que lui, en français ou en histoire, mais il reste le premier en mathématiques et le miracle continue : ses professeurs obtiennent une bourse pour qu'il poursuive ses études après le bac, réussi bien entendu avec mention.

Dès ses débuts à la Sorbonne, les qualités de l'étudiant Fambitakoye sont remarquées par les enseignants, à la fin de la licence, il intègre l'équipe prestigieuse du professeur Zamansky pour préparer l'agrégation Mais, tout à coup, à quelques jours des épreuves écrites, il tombe malade, il reste alité et ne peut se présenter aux épreuves. Hospitalisé une dizaine de jours, il guérit mais craint l'avenir. Par bonheur, son vieux copain Bokar Kaloga, lui aussi ancien de Sébikotane, vient d'être recruté à l'ORSTOM et l'engage à y déposer sa candidature, qui est aussitôt acceptée. Fambitakoye devient élève géophysicien à l'I.P.G. de Paris.

Il se consacrera à l'étude de l'électrojet équatorial dont il deviendra l'un des spécialistes mondialement reconnus. Dans les années quatre-vingt, il présidera le groupe international d'études du jet qui comprendra des chercheurs Anglais, Brésiliens, Français, Ivoiriens, Sénégalais.

Claude Villeneuve

A l'état civil c'est Jean-Claude, mais son prénom usuel était Claude. Au début des années 1950, quand il est recruté par Yvonne Crenn, il vient de passer cinq ans comme engagé volontaire en Indochine, comme l'on disait alors, parachuté derrière les lignes ennemies près de Dien Bien Phu, il est l'un des rares survivants de son groupe, après de terribles combats. Il n'en tire aucune fierté mais une tranquille assurance.

Il s'était vu confier la responsabilité des stations de terrain de la campagne de l'électrojet équatorial dans les années 1969-1970 au Tchad. Confronté à des situations extrêmement risquées en cette période de rébellion, il avait montré une lucidité et un sang froid proprement extraordinaires. Dans la réalisation des campagnes de mesures sa rigueur et son professionnalisme étaient reconnus de tous. Dans les années 1980, il assura la direction du centre de Mbour. Le centre s'ouvrait alors aux stages d'étudiants envoyés par l'Université Cheikh Anta Diop. Les étudiants étaient unanimes pour reconnaître son sens de la pédagogie et la qualité de son accueil. Il pratiquait simplement la coopération, mais se gardait de tout angélisme. Il était fin connaisseur de la géopolitique africaine et les étudiants appréciaient la justesse de ses points de vue. Droit et juste, il était reconnu, comme le sont les sages en Afrique. Fidèle en amitié, alors qu'un couple de ses amis avait perdu leur fils dans un accident d'avion sur le Mont Cameroun, Villeneuve avait, sur ses congés, monté une expédition pour le rechercher, mais malgré tous ses efforts dans cette région terriblement hostile, sa quête était demeurée infructueuse.

Et je terminerai par une anecdote. En 1985, l'I.G.N., à la demande de la D.M.A. (Defense Mapping Agency) est responsable d'une opération de compléments gravimétriques en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale, il est entendu que les mesures seront réalisées par les gravimétriciens de l'ORSTOM. Les protocoles de mesure, avec hélicoptère équipé d'une centrale à inertie, sont très stricts. Villeneuve est le premier opérateur ORSTOM. Le premier jour des mesures, je reçois un coup de fil du chef de mission I.G.N., le protocole prévoit trois minutes et quarante secondes pour la réalisation de la mesure par le gravimétricien, Villeneuve refuse cet impératif, l'I.G.N. me demande de lui donner l'ordre de s'y conformer, bien entendu je refuse et je demande l'arbitrage des donneurs d'ordre Américains. Quelques heures plus tard, décalage horaire oblige, après que toute l'équipe I.G.N. a attendu, un peu énervée, auprès de Villeneuve, très calme, l'arbitrage tombe : le gravimétricien prendra le temps qu'il lui faudra. Ainsi sera fait, le temps moyen des mesures sera d'ailleurs, en moyenne, inférieur au temps prévu par le protocole mais il était inimaginable de vouloir imposer, à Villeneuve, le risque de faire une mauvaise mesure.

Oui, il était comme ça, notre Villeneuve.