

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 130 (2004)
Heft: 19: Risques naturels

Artikel: Les barrages à l'origine de tremblements de terre
Autor: Mekkawi, Mahmoud / Schnegg, Pierre-André
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99342>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Les barrages à l'origine de tremblements de terre

Si la plupart des séismes sont dus à la dérive des continents¹, certains d'entre eux peuvent être provoqués par les activités industrielles de l'Homme. C'est notamment le cas dans la région du lac Nasser (Egypte), où l'on a pu montrer, à partir du catalogue sismique de la zone et de mesures de la résistivité électrique du sous-sol, que l'imposante masse d'eau retenue par le barrage d'Assouan est responsable d'un récent regain d'activité sismique.

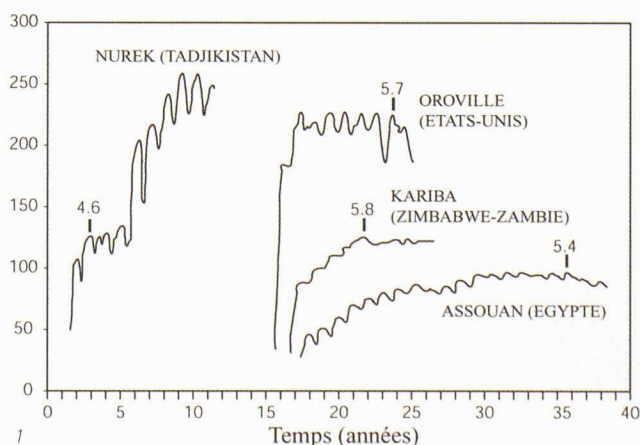
Les activités humaines responsables de séismes sont principalement l'injection ou l'extraction de fluides du sous-sol (eau, pétrole, gaz), l'exploitation des mines ou des carrières et la création de lacs artificiels. Dans ce dernier cas, l'accumulation d'eau dans les lacs de barrage influence périodiquement le champ de contraintes mécaniques auquel sont soumises les roches du sous-sol. L'application et le retrait annuels d'une fraction de la charge d'eau sont capables de déclencher un tremblement de terre. L'augmentation de la pression

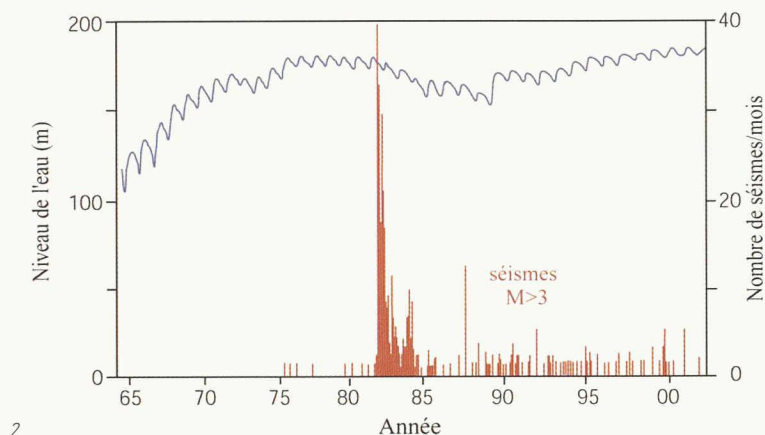
à l'intérieur des pores de la roche semble être le mécanisme déclencheur : la présence d'eau réduit les forces de contact entre les aspérités des failles préexistantes et conduit au déclenchement sismique. Des études sur la célèbre faille de San Andreas en Californie suggèrent que, dans une zone critique, des variations de contraintes de 0,1 bar sont suffisantes pour provoquer un séisme [1]².

De la sismicité induite par des réservoirs d'eau a été observée dans de nombreux endroits, comme en Grèce, en Inde, en Chine ou à la frontière de la Zambie et du Zimbabwe. Sept cas conduisirent à un tremblement de terre d'une magnitude supérieure à $M=5,5$ sur l'échelle de Richter. Jusqu'en 1992, on a répertorié 33 cas où la magnitude avait dépassé $M=4$. En 1988, Roeloffs [2] a démontré comment des réservoirs pouvaient provoquer des tremblements de terre juste après leur remplissage, en raison de l'augmentation des contraintes résultant de la pression de l'eau dans les fissures de la roche (fig. 1). D'autres réservoirs - tels ceux des barrages d'Assouan (Egypte), Koyna (Inde), et Oroville (Etats-Unis) - ne sont sismiquement actifs qu'après plusieurs années, à l'occasion d'une variation importante du niveau d'eau. Ainsi, dans une région historiquement dépourvue de séismes, le tremblement de terre survenu en 1967 à Koyna a causé plusieurs centaines de victimes.

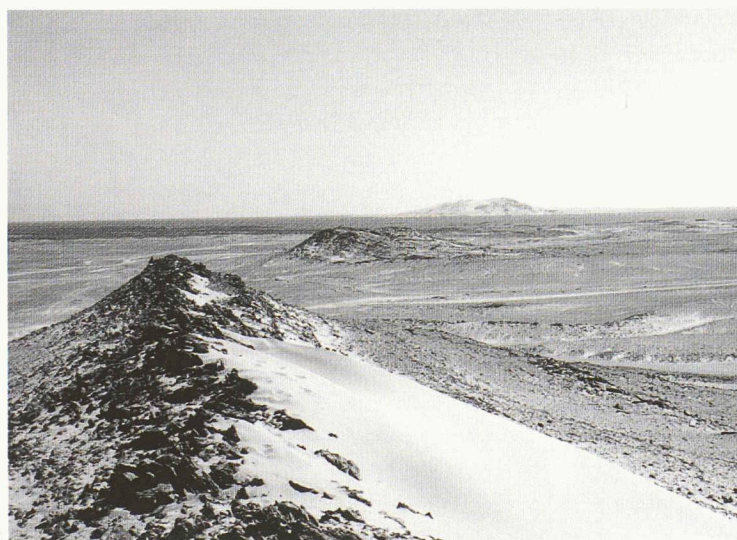
¹ Ou tectonique des plaques, selon la théorie proposée en 1912 par Alfred Wegener (<http://www.ucmp.berkeley.edu/history/wegener.html>)

² Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.





2



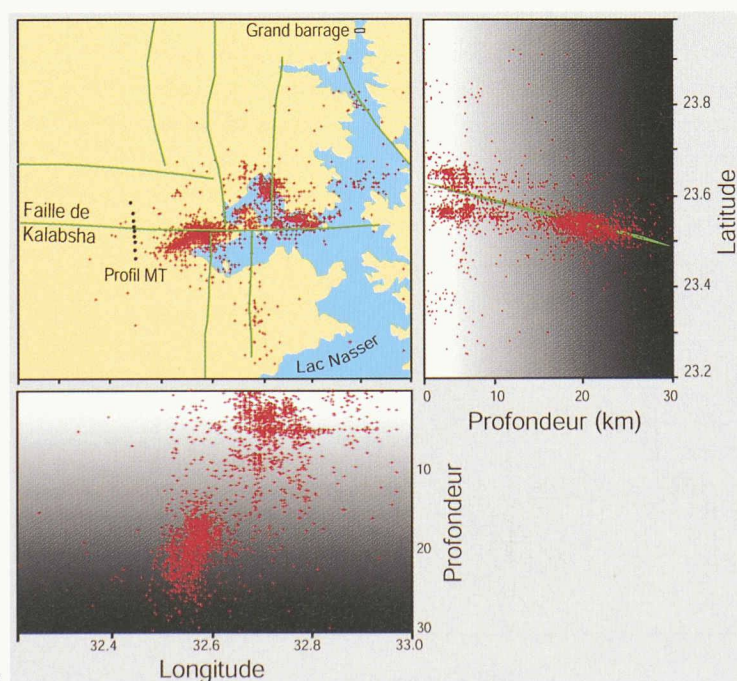
3

Sismicité de la région d'Assouan

Le 14 novembre 1981, trois ans après que le lac eut atteint sa cote maximale, un tremblement de terre d'une magnitude de 5,4 ébranla la région du Grand barrage d'Assouan. Apparue ce jour là, l'activité sismique se manifeste encore aujourd'hui (fig. 2). L'épicentre se situait à quelque 60 km au sud de la ville, sur la faille pourtant réputée inactive de Kalabsha (fig. 3). On comprit rapidement qu'un suivi sérieux de la sismicité de la région devenait capital pour la sécurité du barrage. Un réseau télémétrique constitué de treize sismographes fut alors installé dans toute la partie nord du lac, englobant le site du barrage et la faille de Kalabsha. Vingt ans plus tard, le catalogue sismique répertoriait 4514 événements de magnitude supérieure à 1. La figure 4 illustre les données du catalogue sismique de la région. On constate que les foyers des tremblements de terre se concentrent sur de grands plans de failles, englobant la faille principale de Kalabsha et certaines failles perpendiculaires. Sachant que la localisation des foyers revêt une incertitude de l'ordre du kilomètre, on peut logiquement imaginer que les foyers des séismes coïncident avec les plans de faille. Dès la première année d'exploitation du réseau de sismographes, Kebeasy [3] suggérait que le regain d'activité sismique de la région était dû au nouveau lac artificiel.

Sismicité et niveau du lac

Le niveau du lac Nasser, mesuré deux fois par jour, monte et baisse selon un cycle annuel où les hautes eaux apparaissent en novembre/décembre et les basses en juillet/août. La figure 5 représente une comparaison graphique du niveau du lac et des moyennes annuelles de la sismicité régionale. Chaque courbe indique le niveau de l'eau au cours d'une année, ceci entre 1982 et 2001. Les barres de l'histogramme représentent la moyenne de tous les séismes enregistrés sur les mêmes périodes de dix jours consécutifs. L'histogramme basé sur l'ensemble des données du catalogue sismique (fig. 5a) montre un fléchissement systématique de l'activité sismique autour du jour 290, soit vers mi-octobre, 70 jours après le niveau d'eau le plus bas. Le minimum d'activité sis-



4

Fig. 1 : Variation temporelle du niveau de l'eau de quatre lacs artificiels lors de leur remplissage initial. Indication du moment où est survenu un tremblement de terre local et magnitude observée.

Fig. 2 : Evolution temporelle du niveau du lac Nasser (ligne sinueuse), comparée à l'histogramme de la fréquence mensuelle des séismes de magnitude supérieure à $M=3$. La montée de l'eau est la cause de l'activité sismique, légèrement retardée par la lenteur de la diffusion de l'eau dans la faille préexistante.

Fig. 3 : Vue de la faille de Kalabsha (alignement de collines et talus) et du lac Nasser en direction de l'est

Fig. 4 : Carte de la région d'étude et du système de failles orthogonales. Le profil MT traverse la faille de Kalabsha. Localisation de l'ensemble des séismes observés depuis 1981. On remarque qu'ils se groupent en deux essaims : séismes superficiels (<15 km) et séismes profonds.

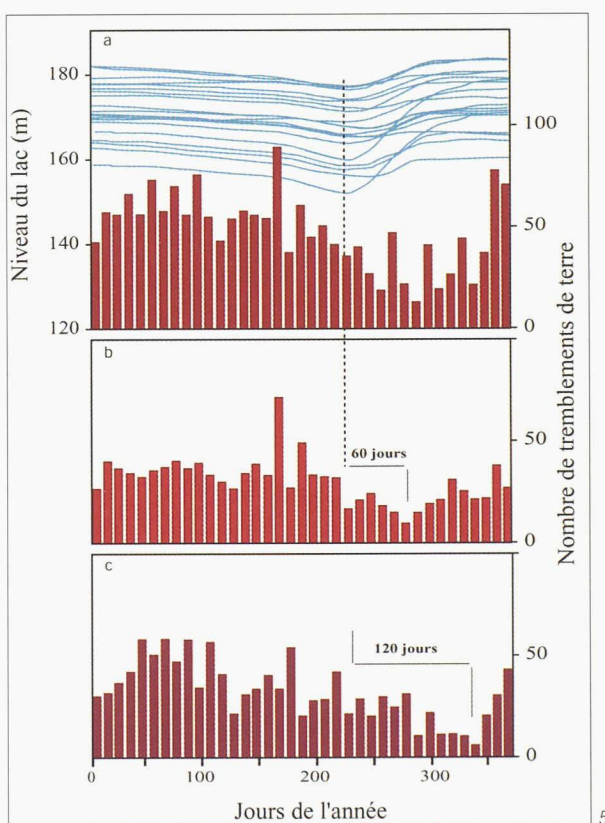
Fig. 5 : Corrélation entre le niveau du lac (1 courbe/an) et les tremblements de terre ; a) tous les séismes ; b) séismes superficiels, retard de 60 jours par rapport au niveau du lac ; c) séismes profonds, retard de 120 jours

Fig. 6 : Site MT dans le désert nubien. Les trois capteurs magnétiques sont protégés du soleil par une feuille métallisée. Boîtier d'enregistrement et lignes telluriques non visibles sur cette vue

mique se différencie nettement si on sépare les séismes profonds (plus de 15 km) et les séismes superficiels : pour ces derniers, on note un retard de 60 jours entre leur activité minimum et les basses eaux (fig. 5b), alors que ce retard atteint 120 jours (fig. 5c) pour les séismes profonds. L'interprétation de ce résultat est aisée : la corrélation entre le niveau du lac et la sismicité montre bien que cette dernière est provoquée par la pression de l'eau du réservoir. Le déphasage observé entre la cause de la sismicité et son effet indique clairement que la variation annuelle de pression met 60 jours pour atteindre les zones instables des failles superficielles, et le double pour les failles profondes. Dans ce mécanisme, le rôle joué par le réseau de failles semble déterminant, puisqu'il constitue probablement le chemin le plus facile pour la propagation de fluides à partir du réservoir d'eau du lac Nasser. Il restait donc à vérifier la présence effective de cette eau au cœur des failles locales. C'est dans ce but qu'on a réalisé un profil de sondages magnétotelluriques (MT) coupant la faille de Kalabsha à angle droit.

Présence d'eau dans la faille de Kalabsha

La méthode MT est appropriée pour la recherche d'eaux souterraines (voir encadré, p. 10). En effet, les roches sèches constituent généralement de mauvais conducteurs électriques. La présence d'eau de pore ou d'interstice abaisse la résistivité du matériau de plusieurs ordres de grandeur. En mettant en œuvre cette méthode, il est aisé de localiser une formation géologique quelconque si elle présente un fort contraste de résistivité par rapport aux roches voisines. C'est exactement la situation qu'on est en droit d'attendre dans le cas d'une roche sèche, faillée, au sein de laquelle on cherche à mettre en évidence la présence d'eau. Un profil magnétotellurique avec neuf sites de mesure sur une longueur de 15 km fut donc déployé à travers la faille de Kalabsha (fig. 6). L'idée initiale était naturellement d'implanter ce profil au milieu des épicentres, mais cette région était inondée par l'eau du lac. En revanche, la faille fut facile à localiser puisqu'elle se manifeste en surface par un alignement de collines et de talus (fig. 3).



Les sondages magnétotelluriques

Moins connus que leurs cousins sismiques, les sondages magnétotelluriques (MT) n'en constituent pas moins une méthode de choix pour l'étude de la croûte terrestre, c'est-à-dire de la couche qui, sous les continents, s'étend de la surface de la terre jusqu'à une profondeur de 25 à 70 km. L'information obtenue n'est plus un paramètre mécanique (vitesse de l'onde et densité du milieu), mais électrique (conductivité électrique). Pour exécuter un sondage, il faut donc disposer d'une source d'énergie. Mais contrairement à la méthode sismique, la source est ici gratuite : la MT utilise en effet comme source de signal les fluctuations naturelles du champ magnétique terrestre provoquées par l'interaction du vent solaire, électriquement chargé et irrégulier, et du champ magnétique de la planète. Or, on sait qu'un champ magnétique variable induit un courant dans un conducteur électrique, ce que sont à divers degrés les roches du sous-sol. Ainsi, la méthode MT consiste à enregistrer simultanément deux champs - l'un électrique E (on parle de champ tellurique dans le cas présent) et l'autre magnétique H - et à en déduire une résistivité « apparente ». La distribution spatiale de la résistivité des roches du sous-sol s'obtient en étudiant le comportement spectral du signal, les fréquences les plus basses concernant les grandes profondeurs (en tant que conducteur, la terre agit comme un filtre pour les plus hautes fréquences). Ainsi, pour une fréquence ω , la résistivité apparente vaut :

$$\rho_a(\omega) = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E(\omega)}{H(\omega)} \right|^2 \quad \text{où } \mu_0 = 10^{-7} \text{ henry/m est la perméabilité du vide.}$$

Les variations latérales de la résistivité du sous-sol se déduisent quantitativement en enregistrant simultanément les deux composantes horizontales de E et de H. La modélisation des données MT produit couramment des modèles 1D et 2D de la géologie, et depuis peu une version 3D.

L'installation d'un site MT implique le déploiement de deux dipôles électriques de 50 à 100 m dans les directions NS et EW, terminés par des électrodes non-polarisables. Le potentiel recueilli est de l'ordre du millivolt. Les composantes du champ magnétique se mesurent avec des bobines inductives à noyau de mu-métal qui possèdent une sensibilité de 20 mV/nT et un bruit propre de 10^{-4} nT/Hz^{1/2} à 1 Hz et de 5×10^{-6} nT/Hz^{1/2} à 400 Hz. Deux types de bobines se partagent l'étendue du spectre mesuré : 10^{-3} à 10^3 Hz. Afin de recueillir suffisamment de périodes de signal dans la partie basse fréquence du spectre, l'équipement enregistre les champs pendant 24 heures au minimum.

Le dépouillement des enregistrements produit pour chaque site une matrice d'impédance complexe de dimensions 2x2. Une rotation mathématique des axes de coordonnées permet de trouver le « strike », c'est-à-dire la direction géologique caractéristique. Les deux éléments antidiagonaux de la matrice fournissent alors les deux courbes de résistivité apparente et de phase selon les directions parallèles et orthogonales au strike (fig. 7). Finalement, l'ensemble de ces courbes est utilisé pour le calcul d'un modèle de résistivité (généralement 2D)³.

³ Pour en savoir plus, voir par exemple l'ouvrage de Telford [5] qui consacre un chapitre à la méthode MT

La figure 7 reproduit les résultats de sondage sur l'un des neuf sites de mesure. L'interprétation simultanée de l'ensemble des courbes recueillies sur chaque site conduit au modèle 2D du sous-sol présenté à la figure 8 auquel sont superposés pour comparaison les foyers de séismes. On constate que la zone de la faille, matérialisée par la trace des foyers sismiques, présente sur une profondeur de trois à quatre kilomètres une forte anomalie de résistivité électrique ($\sim 10 \Omega\text{m}$) par rapport au socle précambrien ($> 1000 \Omega\text{m}$). Au-delà de 5 km, le modèle MT devient moins sûr, à cause du pouvoir de résolution limité de la MT. Cette résistivité anormalement basse pour des roches granitiques implique l'existence de fractures remplies d'eau. De manière plus quan-

titative, et moyennant la connaissance des vitesses hydrauliques entre différents puits [4], nos mesures permettent de préciser que la porosité de la roche passe d'une valeur moyenne normale de 6% à une valeur maximale de 22% au centre de la faille de Kalabsha.

Principaux enseignements

Le réseau de failles responsable de la récente sismicité observée dans la région d'Assouan, consécutivement à la création du lac artificiel, est connecté hydrauliquement avec le lac Nasser. La présence d'eau dans la faille principale de Kalabsha a été mise en évidence par les résultats de sondages MT. Cette eau est probablement statique, c'est-à-dire qu'il

n'existe pas d'écoulement latéral d'eau du lac par l'intermédiaire des failles. Cependant, les variations saisonnières de la pression de l'eau, provoquées par les changements du niveau du lac, se transmettent au cœur même des failles sur des distances de 20 à 30 km, avec un retard de deux à quatre mois suivant la profondeur atteinte. Elles sont suffisantes pour influencer la sismicité de manière significative.

L'étude magnétotellurique a été grandement facilitée par l'absence totale de perturbations électromagnétiques. En effet, le site du profil se trouve à quelques 60 km au sud de la ville d'Assouan, localité la plus proche. L'étude sismique, quant à elle, a bénéficié de l'enregistrement continu de la sismicité durant plus de vingt ans. Le réseau de sismographes fut particulièrement performant, pour les mêmes raisons que la MT: absence de trafic routier et d'activités industrielles proches.

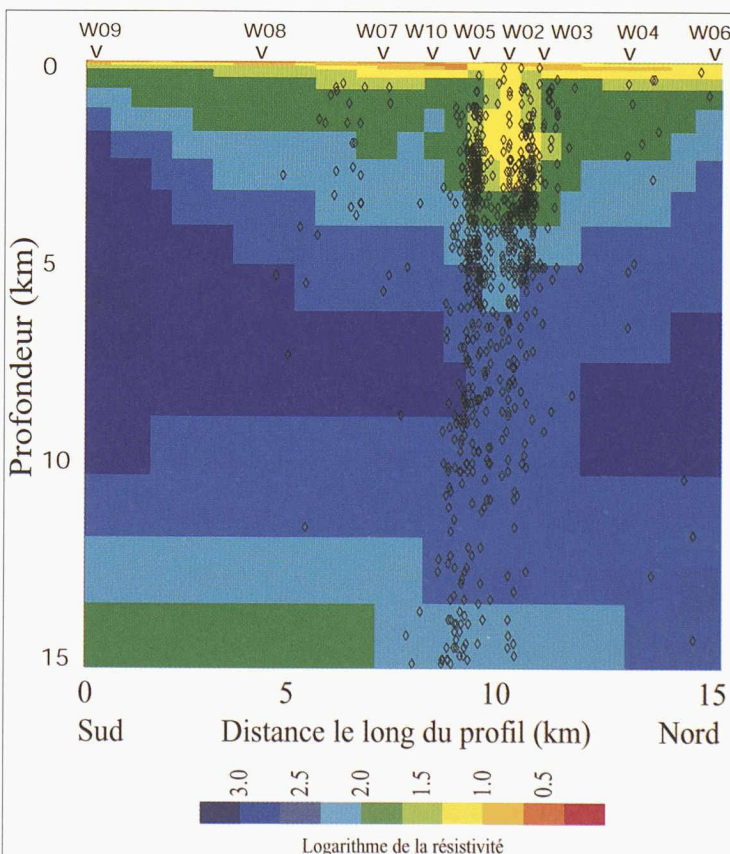
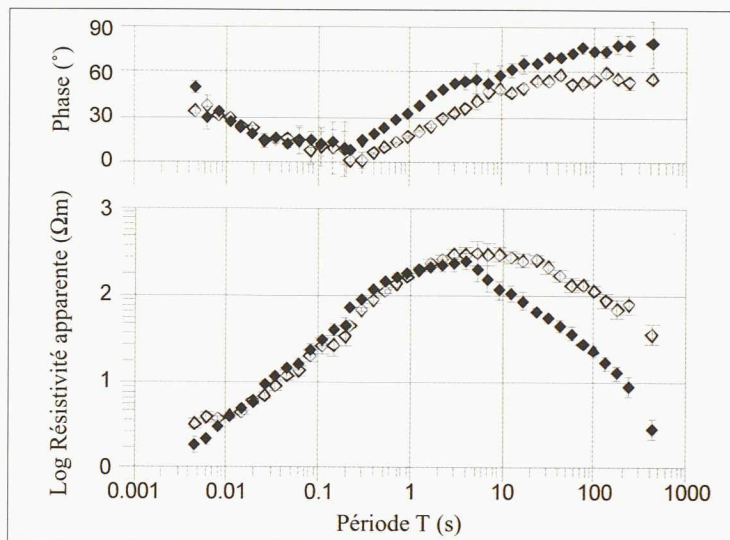
Dr Mahmoud Mekkawi, géophysicien
Dr Pierre-André Schnegg, physicien

Institut de Géologie, Université de Neuchâtel
Rue Emile Argand 11, CH - 2007 Neuchâtel

Fig. 7 : Courbes typiques de résistivité apparente et de phase, après dépouillement des enregistrements de E et H.

Fig. 8 : Modèle de résistivité MT 2D avec superposition des foyers sismiques dans le plan du profil. On notera la concordance des foyers sismiques et des zones faiblement résistives du modèle, indiquant la présence d'eau.

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'Université de Neuchâtel)



Références

- [1] R.S. STEIN: « The role of stress transfer in earthquakes occurrence », *Nature*, 1999, 402, 605-609
- [2] E.A. ROELOFFS: « Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variation of water level », *J. Geophys. Res.*, 1988, 93, 2107-2124
- [3] R.M. KEBEASY, M. MAAMON, E.M. IBRAHIM: « Aswan lake induced earthquake », *Bull. Int. Inst. Seis. Earthquake Eng.*, Tsukuba, 1982, 19
- [4] K. EVANS, J. BEAVAN, D. SIMPSON: « Estimating aquifer parameters from analysis of forced fluctuations in well level: An example from the Nubian formation near Aswan, Egypt. Hydrogeological background and large-scale permeability estimates », *J. Geophys. Res.*, 1991, 96 (B7), 12127-12137
- [5] W.M. TELFORD, L.P. GELDART, R.E. SHERIFF: « Applied geophysics », 2nd ed., 1994, Cambridge University Press, ISBN 0 521 33938 3, 770 p.

Remerciements

Cette recherche a constitué la thèse de doctorat de l'un des auteurs (M. Mekkawi), présentée à l'Université de Neuchâtel le 24 octobre 2003. Le projet a été soutenu par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (FNRS 2100-65188).