

INTRUSION SALINE DANS UN AQUIFERE COTIER EN CONTEXTE D'URBANISATION RAPIDE ET DONNEES RARES: LE CAS DE SIHANOUKVILLE ETUDIE PAR TDEM (CAMBODGE)

VAN HANJA J.¹, CHORK V.², DESCLOITRES M.^{3,4}, MASSUEL S.^{1,4}, DOUNG R.², BAUDRON P.^{1,4}, LUN S.^{2,4}, SOK K.², EANG K.E.², CHHUON K.², UK S.²

¹ UMR G-EAU - IRD, Université de Montpellier, Montpellier, France

² Institut de Technologie du Cambodge, Phnom Penh, Cambodge

³ UMR IGE - IRD, Grenoble, France

⁴ LMI « CARE », Ho Chi Minh City, Vietnam.

RESUME

L'urbanisation rapide de Sihanoukville au Cambodge accroît la pression sur les ressources en eau, menacées par l'intrusion saline dans les aquifères côtiers. L'absence de données hydrogéologiques a conduit à l'utilisation de la méthode TDEM (Time Domain Electromagnetic) pour caractériser la salinité des eaux souterraines. Soixante-et-un sondages ont été réalisés et complétés par des enquêtes auprès des foreurs. Les résultats indiquent une grande variabilité spatiale et une intrusion d'eau salée.

Mots clés : TDEM, Aquifère côtier, Intrusion saline, Vulnérabilité, loi d'Archie

ABSTRACT

The rapid urbanization of Sihanoukville in Cambodia is increasing pressure on water resources, raising concerns about saline intrusion into coastal aquifers. The lack of hydrogeological data led to the use of TDEM method (Time Domain Electromagnetic) to characterize groundwater salinity. Sixty-one TDEM soundings were performed, supplemented by driller's knowledge. The results indicate high spatial variability and intrusion of seawater.

Key words: TDEM, Coastal aquifer, Saline intrusion, Vulnerability, Archie's law

INTRODUCTION

Sihanoukville est la principale ville côtière du Cambodge. Située sur la nouvelle route de la soie chinoise, la ville connaît un développement économique rapide, accompagnée d'une augmentation de la demande en eau. Or, les ressources en eau de surface sont limitées par un impluvium restreint, et les eaux souterraines deviennent une réserve de plus en plus convoitée.

Le contexte hydrogéologique de la zone a été peu étudié et il n'y a aucun réseau d'observation des eaux souterraines. Des rapports décrivent deux aquifères, un aquifère superficiel sédimentaire discontinu (max. 30m) reposant sur un aquifère de grès fracturés (Choup, 2014). La préoccupation majeure concerne le risque d'intrusion d'eau salée dans ces aquifères, un phénomène déjà observé ponctuellement dans la ville et dans d'autres zones littorales cambodgiennes soumises à une forte exploitation des ressources en eau souterraine (Choup, 2014).

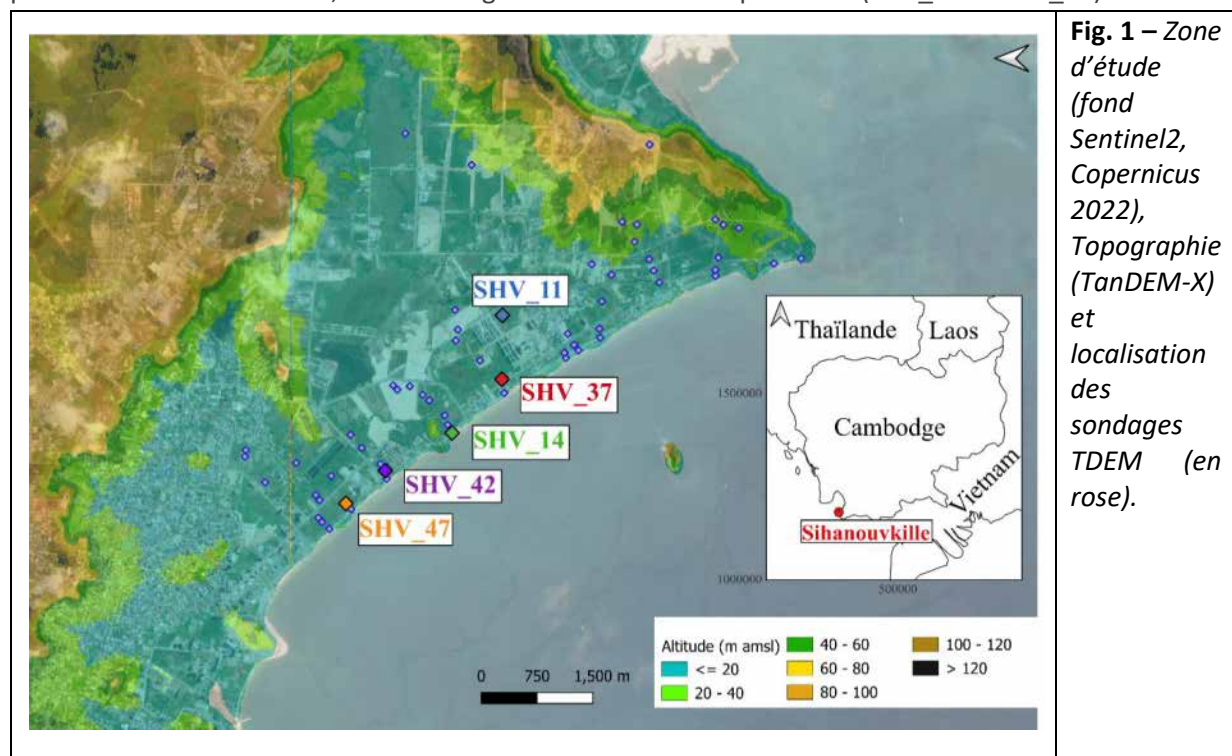
Pour caractériser la vulnérabilité des aquifères de la ville, et face à l'absence de données nous avons opté pour une caractérisation géophysique basée sur la méthode électromagnétique dans le domaine temporel (TDEM - Time Domain Electromagnetic). La mesure de la résistivité apparente des terrains par TDEM s'avère efficace pour évaluer l'intrusion saline (Nenna et al., 2013). Elle permet de discriminer une nappe d'eau douce dans des formations de résistivité intermédiaire d'un aquitard argileux ou d'une zone d'intrusion d'eau salée plus conductrices (Kafri & Goldman, 2005).

METHODOLOGIE

La méthode TDEM repose sur l'utilisation d'une boucle de câble émettrice (Tx) et d'une boucle réceptrice (Rx) disposées en surface. Nous avons utilisé des boucles Rx et Tx coïncidentes avec le TEMFAST

48 d'AEMR Technology. Un courant continu est injecté dans Tx, générant un champ magnétique primaire. Lorsque le courant est soudainement interrompu, une induction crée des courants de Foucault dans le sol, qui se diffusent de plus en plus profondément au fil du temps. Ces courants génèrent des champs magnétiques secondaires, qui induisent des courants dans Rx. L'appareillage mesure la décroissance de la tension au cours du temps, tension convertie en une courbe de résistivité apparente, interprétée par une inversion itérative pour obtenir un modèle tabulaire de couches de résistivité en fonction de la profondeur.

Dans la région de Sihanoukville, 61 sondages TDEM ont été réalisés (fig.1) ainsi que des entretiens avec des foreurs expérimentés. La description lithologique de 4 sites a été recueillie auprès des foreurs ainsi qu'une description de la qualité de l'eau (eau de mer, eau douce). Des sondages TDEM réalisés à proximité de ces sites de forage ont permis une comparaison avec les modèles de résistivité (fig.2). Soit les sondages SHV_11, SHV_37 et SHV_14 pour les trois premiers sites. Le quatrième site n'étant pas directement accessible, deux sondages ont été réalisés à proximité (SHV_42 et SHV_47).



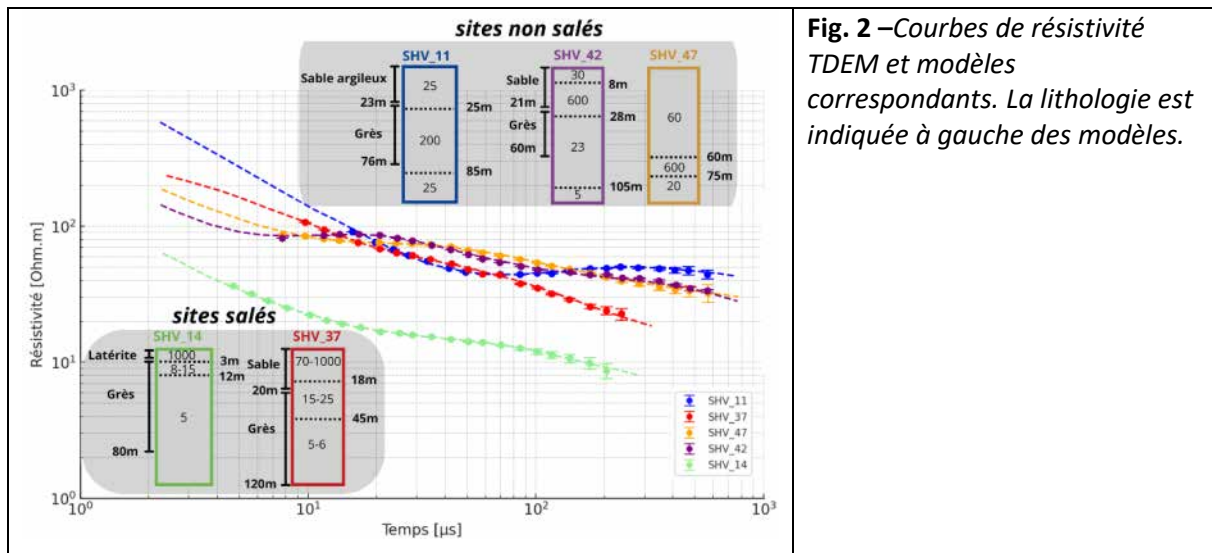
RESULTATS

Sites salés

Nous avons étudié les sondages SHV_37 et SHV_14 (fig.2) avec présence d'eau salée. Dans les deux cas la couche profonde a une résistivité de $5 \Omega.m$ et se situe dans du grès. Cette valeur est cohérente avec la littérature pour du grès saturé en eau salée avec une concentration proche de l'eau de mer (p.ex. Alhumimidi et al. (2020)).

Selon la loi d'Archie cette couche aurait une porosité de 15 %, avec plusieurs hypothèses : a) la fracturation des grès est assimilable en grand à un milieu poreux, b) les paramètres d'Archie sont ceux proposés par Keller (1982) pour des roches fortement cimentées, soit $a = 0,62$ et $m = 1,95$, c) la conductivité électrique de l'eau souterraine salée est supposée égale à celle de l'eau de mer, soit 36 mS/cm . Si l'on applique cette hypothèse de porosité de 15 % à la seconde couche de résistivité de $20 \Omega.m$ du

sondage SHV_37 (équivalence entre 15 et 25 $\Omega.m$), la conductivité électrique de l'eau souterraine dérivée est d'environ 10 000 $\mu S/cm$, ce qui correspondrait à une eau saumâtre. Cependant, cette valeur de porosité mérite d'être discutée à la lumière des observations faites sur les affleurements de la région. En effet, ces affleurements ne présentent pas de signes évidents de fracturation intense. À l'inverse, ils révèlent une grande hétérogénéité des roches, allant de matériaux sableux peu consolidés à des grès massifs. Ainsi, la porosité estimée de 15 % pourrait refléter une moyenne à l'échelle du sondage TDEM.



Sites non salés

Le sondage TDEM SHV_11 indique une première couche de sables argileux (25 $\Omega.m$) contenant de l'eau douce, confirmée par les observations des foreurs. La seconde couche (200 $\Omega.m$) correspond à l'aquifère gréseux. La troisième couche (25 $\Omega.m$) pourrait indiquer soit une formation argileuse, soit un aquifère saumâtre (15 % de porosité) ou salinisé (8 % de porosité). L'absence de formations argileuses profondes dans les forages voisins (ex. forage proche de SHV_37 jusqu'à -120 m, fig.2) remet en question l'hypothèse d'un substrat argileux profond généralisé dans la région. Pour les sondages SHV_47 et SHV_42, la comparaison est faite avec un même forage situé à équidistance. SHV_47 montre une première couche sableuse (60 $\Omega.m$), un aquifère gréseux (600 $\Omega.m$) et une couche profonde (20 $\Omega.m$), qui pourrait correspondre à un aquifère saumâtre ou salin. SHV_42 présente un profil similaire, avec une dernière couche (5 $\Omega.m$ à -105 m), suggérant un grès massif saturé en eau salée.

Cartes de résistivité

L'interpolation des modèles de résistivité par profondeur permet d'obtenir une carte des résistivités (fig.3). Dans le cas de la zone sédimentaire (jusqu'à 30m de profondeur) les valeurs de résistivité entre 5 et 35 $\Omega.m$ sont associées à de l'eau salée ou saumâtre. Les zones au Nord et au Sud avec des résistivités plus élevées correspondent à des zones de grès non saturés en eau salée. Plus profondément, lorsqu'on atteint le grès sur l'ensemble de notre zone d'étude (ici à -45m), les résistivités varient le long de la côte. Cette variabilité, mise en évidence par l'existence de sites salés et non salés dans la partie précédente, appuie l'idée d'une intrusion préférentielle selon le réseau de fractures.

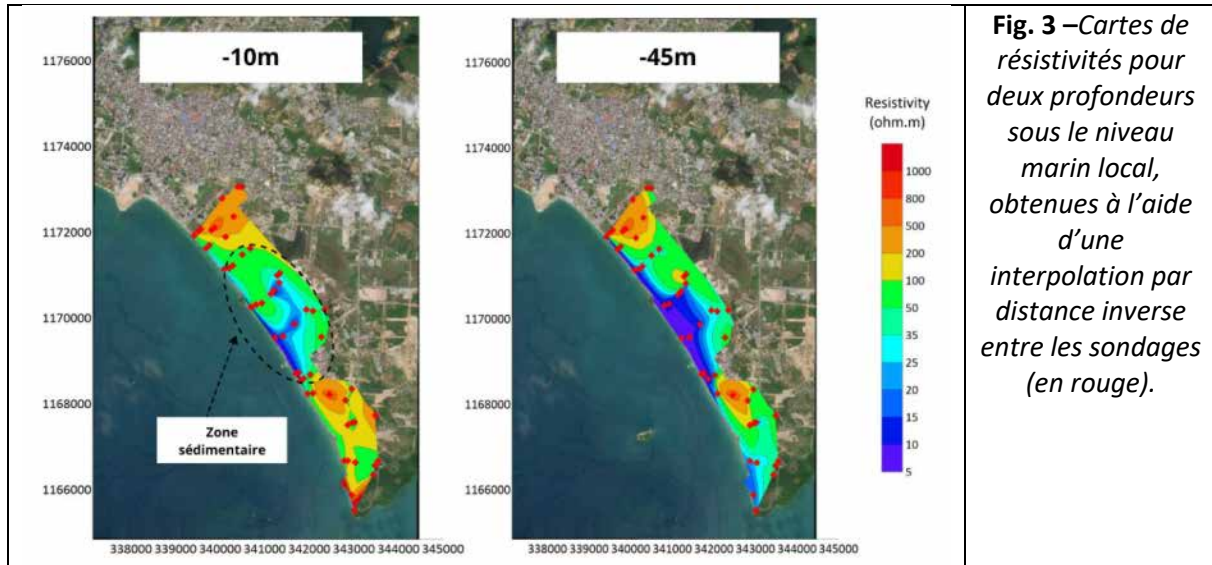


Fig. 3 –Cartes de résistivités pour deux profondeurs sous le niveau marin local, obtenues à l'aide d'une interpolation par distance inverse entre les sondages (en rouge).

CONCLUSION

Les informations collectées auprès des foreurs indiquent l'absence de formation argileuse épaisse régionale, par conséquent les résistivités TDEM comprises entre 5 et 25 $\Omega.m$ peuvent être raisonnablement attribuées à des grès saturés d'eau saumâtre ou d'eau de mer. Pour les grès saturés d'eau douce, les résistivités TDEM sont supérieures à 200 $\Omega.m$. La porosité de l'aquifère gréseux pourrait varier entre 8% et 15% selon une hypothèse fixant les paramètres de la loi d'Archie pour des formations fortement cimentées. Les données TDEM permettent d'interpréter une intrusion préférentielle d'eau salée dans l'aquifère gréseux, probablement à la faveur du réseau de fracture, ce qui explique que certains forages tapent des eaux salées malgré des distances équivalentes au littoral. La salinisation semble se propager à la nappe superficielle, au moins durant les basses eaux lorsque les charges sont équivalentes. Ces premières hypothèses de porosité de l'aquifère de grès dans la zone seront primordiales pour de futures modélisations hydrogéologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALHUMIMIDI S., 2020** – An integrated approach for identification of seawater intrusion in coastal region: A case study of northwestern Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, 32(7), 3187-3194.
- CHOUP S., 2014** – Seawater intrusion along coastal line in Krong Preah Sihanouk of Kingdom of Cambodia. In: *Project report on CCOP-GSI/AIST-GA Groundwater Phase II Project Final Meeting, 18-20 March 2014, Bandung, Indonesia. CCOP Technical Secretariat, Bangkok, Thailand*, 1-15.
- KAFRI U., GOLDMAN M., 2005** – The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity. *Journal of Applied Geophysics*, 57(3), 167-178.
- KELLER G.V., 1982** – Electrical properties of rocks and minerals. In: *Carmichael, R.S. (Ed.), Handbook of Physical Properties of Rocks, Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, FL*, 217-293.
- NENNA V., HERCKENRATH D., KNIGHT R., ODLUM N., MCPHEE D., 2013** – Application and evaluation of electromagnetic methods for imaging saltwater intrusion in coastal aquifers : Seaside Groundwater Basin, California. *Geophysics*, 78(2), B77-B88.

Remerciements

Nous remercions les membres de la JEA1 4C-Water et le laboratoire Mixte International CARE au Vietnam pour leur soutien lors des opérations de terrain.

ACTES DU 14^{ème} COLLOQUE
DE GEOPHYSIQUE DES SOLS
ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

organisé par le réseau

GEOFCAN

4-6 juin 2025

co-organisé par



avec le soutien de

