

VARIABILITE MULTI-ECHELLE DE LA STRUCTURE ET DU FONCTIONNEMENT DES SOLS SALES DE LA THAÏLANDE CONTINENTALE. APPROCHE CROISEE HYDRO-SALINO-DYNAMIQUE ET GEOPHYSIQUE

Jean-Pierre MONTOROI⁽¹⁾, Olivier GRÜNBERGER⁽²⁾, Claude HAMMECKER⁽²⁾, Jean-Luc MAEGHT⁽²⁾, Somsak SUKCHAN⁽²⁾, Kriengsak SRISUK⁽³⁾, Suwanchai NADEE⁽³⁾, Nordine BOUZID⁽⁴⁾, Sébastien FLAGEUL⁽⁵⁾, Gagrik HOVHANNISSIAN⁽¹⁾, Alain TABBAGH⁽⁵⁾, Yannick ENET⁽⁶⁾, Olivier BRUYERE⁽⁷⁾, Ly Sinn MAO⁽⁸⁾, Jean-Luc MICHELOT⁽⁸⁾, Somjai CHENYAPANICH⁽²⁾, Nitjaporn KUNGKLANG⁽²⁾

⁽¹⁾ IRD, 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France (montoroi@ird.fr) ; ⁽²⁾ IRD-LDD, Phahonyothin Road, Chatuchak, 10900 Bangkok, Thaïlande ; ⁽³⁾ GWRC ; GroundWater Research Center, Khon Kaen University, 40002 Khon Kaen, Thailand ; ⁽⁴⁾ Zonge Engineering and Research Organization, Inc., 3322 East Fort Lowell Road, Tucson, Arizona 85716, USA ; ⁽⁵⁾ UMR 7619 « Sisyphé », Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris, France ; ⁽⁶⁾ Université Paris XII Val-de-Marne, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France ; ⁽⁷⁾ CHYN Centre d'Hydrogéologie, Neuchâtel, Suisse ; ⁽⁸⁾ UMR 8148 « Ides », Université Paris-Sud XI, 91405 Orsay, France ;

Mots-clés : Sols salés, Hydrosystème, Géochimie, Géophysique, Thaïlande

I - INTRODUCTION

La salinisation naturelle des sols du Nord-est de la Thaïlande est liée aux formations géologiques du Crétacé contenant des niveaux évaporitiques (Japakasetr et Workman, 1981) et se manifeste en surface par des zones incultes, discontinues dans le paysage et de taille variable, qui sont localement appelées « taches salines ». Des processus de salinisation secondaires sont induits par des activités humaines récentes telles que la déforestation des terres hautes et l'absence de drainage en période d'inondation (Yuvaniyama *et al.*, 1996). Les eaux souterraines, qui se rechargent à l'échelle régionale (plateau de Korat) depuis les versants amont, se minéralisent au travers des évaporites et remontent par artésianisme dans les zones basses des bassins versants (Williamson *et al.*, 1989 ; Srisuk, 1994). La production rizicole pluviale s'en trouve gravement diminuée par l'extension progressive des taches salines dans le paysage. L'excès de sodium altère les propriétés physiques des sols et empêche les racines des plantes de pénétrer la structure compacte. Environ 28.500 km² de terres sont salés à des degrés divers, soit environ 17% de la région du Nord-Est de la Thaïlande (Vijarnsorn et Eswaran, 2002).

Pour appréhender les mécanismes de salinisation, le projet de recherche mené de 2003 à 2006 par l'équipe franco (IRD) - thaï (LDD, Land Development Department) vise à étudier les transferts d'eaux et de sels à de courts pas de temps en prenant en compte le régime hydrique particulier des rizières et la structure des sols. Deux stations expérimentales, situées dans des environnements salés bien contrastés, donnent une information continue et abondante (Saejiew, 2003). Pour évaluer la représentativité spatiale des sols de ces deux stations, une approche géophysique complémentaire a été mise en œuvre.

L'objectif de la présente communication est : (i) de caractériser, à différentes échelles, le milieu physique en précisant la distribution spatiale des taches salines dans le paysage d'un terroir donné ; (ii) d'identifier les processus régissant l'évolution spatiale et temporelle de ces taches ; (iii) de modéliser le fonctionnement hydrosalin des rizières irriguées.

II – MATERIELS ET METHODES

Site d'étude

Le site de Ban Daeng est situé à environ 20 km au sud-ouest de Khon Kaen (16°21'N - 102°36'E) dans le district de Phra Yun. Le climat est de type savané tropicale avec des précipitations annuelles de 1200 mm réparties de mai à octobre. En dehors du cœur de la mousson (de juillet à septembre), les pertes par évaporation excèdent les apports météoriques. Les sols, appartenant à la série de KulaRonghai, sont sablo-limoneux en surface et limono-sableux en profondeur. La teneur en argile est plus faible en surface (10%) et en profondeur (5% à plus d'un mètre) et présente un maximum d'environ 20% à 50-80 cm. La fraction argileuse est composée de smectite et de kaolinite. Les sols sont saturés par des remontées de la nappe phréatique chlorurée-sodique et par des infiltrations d'eau douce depuis la surface. La nappe a une conductivité électrique d'environ 20 dS m⁻¹ et un pH voisin de la neutralité. En saison sèche, la profondeur de la nappe varie entre 1,5 et 2 m. Un riz pluvial à cycle long, dit « gluant ou collant », est cultivé et le manque d'eau temporaire dû à la variabilité climatique est compensé par des petits réservoirs à ciel ouvert. Les sols

reposent sur les évaporites de la formation Crétacé de Maha Sarakham dont l'épaisseur varie entre 250 m et 1,1 km. La formation se compose de trois unités présentant des dépôts d'halite et de gypse séparés par des dépôts rouges d'origine clastique. La profondeur du toit des dépôts évaporitiques varient entre 60 et 100 m à cause de l'existence de dômes diapiriques (Imaizumi et al., 2002).

Méthodologie

Deux appareils électromagnétiques de type Slingram ont été mises en œuvre : l'EM38 et le CS60. L'EM38 a d'abord été utilisé en 2002 pour cartographier un périmètre d'environ 1,5 ha (Figure 1) et choisir l'emplacement des stations de mesure automatique à la limite de deux propriétés. Les mesures ont été faites, en mode vertical (VCP), dans une trentaine de parcelles rizicultivées et une zone inculte (tache saline), l'espacement entre les mesures de CE_a étant de 2 m. En 2003, une seconde cartographie a été réalisée (Enet, 2003) et un nouvel emplacement des stations a été choisi (parcelles L14 et L25). En 2004, la cartographie du même périmètre a été faite en saison des pluies après l'insertion de l'EM38 dans un boîtier en plexiglas étanche. Les mesures sont directes et exprimées en $mS\ m^{-1}$ (Figure 2). Par ailleurs, l'EM38, qui a le défaut d'être très sensible aux variations diurnes de la température de l'air et du sol, nécessite une calibration dans l'air fréquente pour limiter la dérive instrumentale des lectures. En mars-avril 2005, le CS60 a été utilisé, en mode vertical et horizontal (HCP), pour cartographier deux parcelles rizicoles (L16 et L24) et lever deux transects perpendiculaires (nord-sud, A-B et est-ouest, C-D), selon un espacement des mesures de 2 mètres (Figure 1). Le CS60 permet deux lectures exprimées en « digits ». L'une correspond à la phase qui, multipliée par $4,77\ 10^{-05}$, donne la susceptibilité magnétique (en unités SI). L'autre correspond à la quadrature, qui donne une valeur de CE_a (en $S\ m^{-1}$) au moyen d'une calibration soit théorique (modélisation), soit expérimentale (prélèvement d'échantillons de sol et extraction de la solution du sol). Le boîtier en plastique thermorésistant protège l'électronique des variations de température. Cependant, des calibrations régulières dans l'air ont été réalisées pour contrôler l'éventuelle dérive instrumentale. Des mesures de potentiel spontané ont été faites, en décembre 2005 sur la même surface d'1,5 ha, à l'aide d'un voltmètre à haute impédance et de deux électrodes non polarisées, l'une servant de référence, l'autre étant mobile selon une maille carrée de 5 m et deux transects (pas de 5 m sur 250 m et 150 m).

Quatre forages de 20 m de profondeur, deux à l'intérieur de taches salines, deux autres à l'extérieur (Figure 1) ont fourni des carottes métriques qui ont été décrites morphologiquement et analysées minéralogiquement. Une fois les carottes prélevées et stockées, les forages ont été tubés en surface pour éviter leur comblement et ont permis de mesurer la variation verticale de la composition chimique des eaux souterraines. Par ailleurs, des données ont été acquises au cours du temps à l'aide d'une station météorologique et d'une station d'acquisition automatique de paramètres du sol (capteurs "in situ" (humidité, salinité, pH, Eh, température) placés à différentes profondeurs). Un réseau piézométrique comportant 35 piézomètres sur 2,6 ha a été installé en 2004, puis étendu en 2005 à 58 piézomètres sur 40 ha. Il a fait l'objet d'un suivi mensuel du niveau de la nappe et de sa conductivité électrique et des tests d'infiltration ont été réalisés. Une campagne de prélèvement d'eau de nappe a été effectuée en mars 2005 pour déterminer sa composition chimique (éléments majeurs).



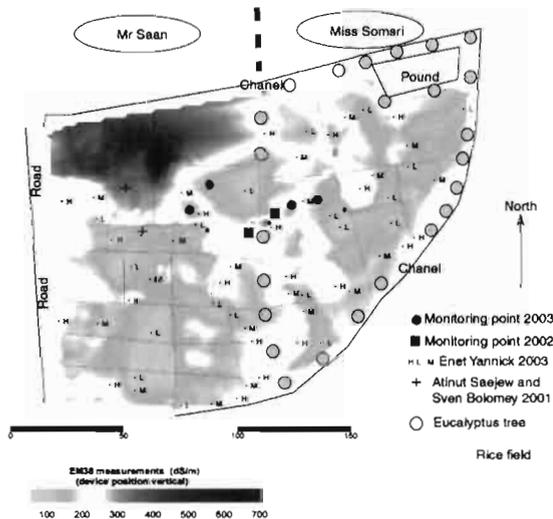
Figure 1. Localisation sur le site de Ban Daeng des surfaces cartographiées par les outils géophysiques et des forages profonds (BH1 à BH4).

III – RESULTATS ET DISCUSSIONS

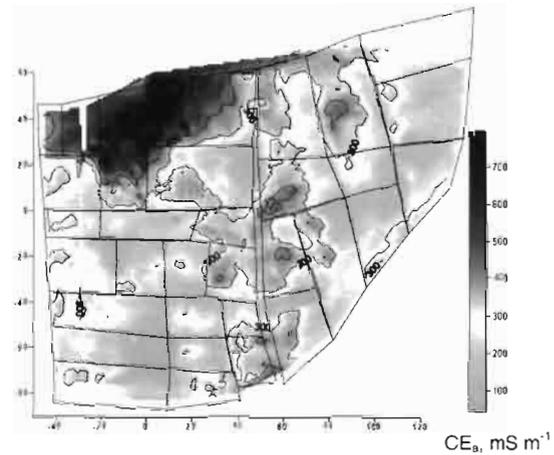
Une distribution hétérogène de la salinité, tant verticale que latérale, contrôlée par la structure et la nature des dépôts sédimentaires (Enet, 2003 ; Grünberger et al., 2007 ; Montoroi et al., 2004a, b et c, 2005, 2006, 2007).

Les méthodes géophysiques en domaine temporel (TDEM, Temfast 32), en domaine fréquentiel (FDEM, EM38, EM34, CS60) et en termes de potentiel spontané, mise en œuvre sur 1,5 ha et 9 ha, ont montré que la distribution de la salinité se faisait à la surface des sols soit en taches bien circonscrites, dénuées de toute végétation (croûtes et efflorescences salines), soit en taches plus diffuses, occupées par une végétation adaptée (halophytes) ou bien replantée (riz). La carte de conductivité électrique apparente (CE_a) obtenue en saison sèche et en saison des pluies par l'EM38 permet de distinguer les zones où le riz n'est pas affecté par la salinité ($CE_a < 200 \text{ mS m}^{-1}$) et où il l'est ($200 < CE_a < 400 \text{ mS m}^{-1}$) ainsi que les zones où les rizières sont incultes ($CE_a > 400 \text{ mS m}^{-1}$). Les deux appareils EM38 et CS60 montrent une bonne sensibilité aux variations de la salinité du sol à l'échelle du parcellaire (Figures 2a et 2c) ou d'une parcelle (Figures 2d). Les mesures de CE_a délimitent des taches salines qui correspondent à celles observées en surface par la précipitation de sels. C'est notamment le cas lorsque le sol est saturé en saison des pluies (Figure 2b). La figure 2e montre trois zones fortement conductrices le long du transect A-B. Les calibrations dans l'air du CS60 indiquent une bonne stabilité des mesures, notamment en quadrature. On remarquera que les gammes de variations de la CE_a sont différentes selon l'appareil utilisé, probablement à cause de leur calibration. On pourra regretter de ne pas avoir pu avoir les deux appareils au même moment, mais des raisons logistiques ne l'ont pas permis.

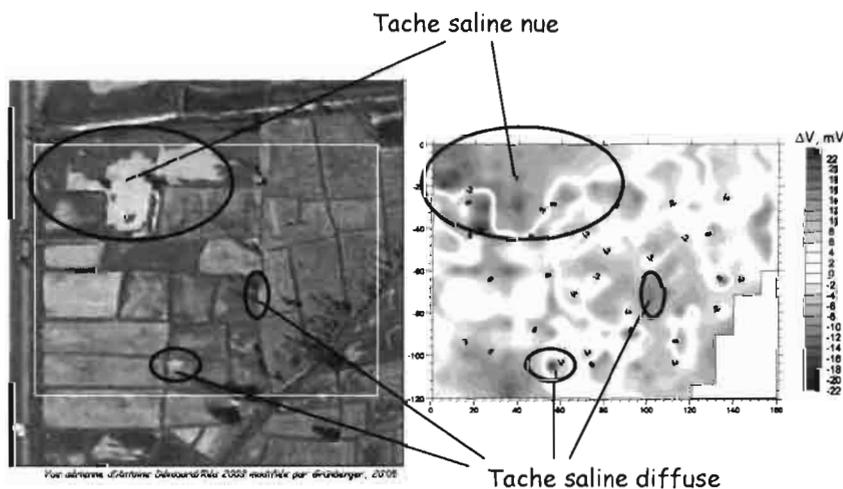
(a)



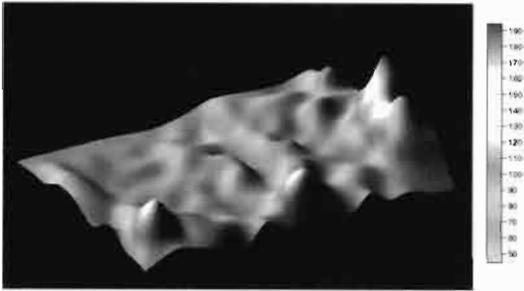
(b)



(c)



(d)



(e)

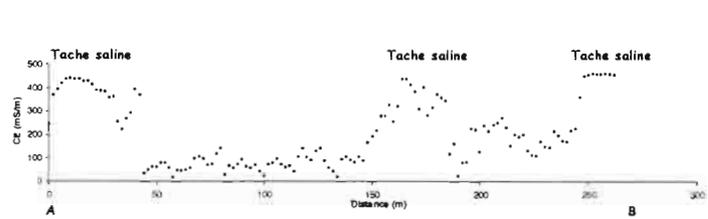


Figure 2. Différents modes de représentation spatialisée de la salinisation d'un bas-fond rizicultivé, à l'échelle d'1,5 ha intégrant un parcellaire [par EM38 en saison sèche (a) et en saison pluvieuse (b) ; par potentiel spontané (c) ; par CS60 le long d'un transect (e)] et à l'échelle d'une parcelle [par CS60, parcelle L24 (d)].

Au niveau d'une tache saline, les croûtes de sels présentent des morphologies variées allant d'efflorescences blanches reposant sur des particules de sable au centre de la tache à de véritables croûtes litées beige ocre en périphérie. Les spectres de diffraction RX montrent qu'elles sont composées essentiellement d'halite (NaCl), certains échantillons présentant une fraction de gypse ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$).

Les quatre forages, effectués à l'intérieur et à l'extérieur de taches salines, sont globalement similaires et montrent trois couches principales :

- . entre la surface et 4 m de profondeur, une couche sablo-limoneuse, ocre beige ; la kaolinite est le minéral argileux dominant et la goethite est présente ;
- . entre 4 et 6 m, une couche plus argileuse, gris foncée, plus plastique ;
- . entre 6 et 20 m, une couche de roche-mère (argilite) brun rouge, calcaire, compacte, dense, fracturée dans toutes les directions et présentant des précipitations de calcite (CaCO_3 , Mg) sur les plans de fracture ; des minéraux sodiques ont été détectés comme l'analcime (zéolite de formule $\text{Na}(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_6, \text{H}_2\text{O}$) et les plagioclases albite Na/anorthite Na-Ca ; les minéraux argileux dominants sont smectitique et illitique et de l'hématite (Fe_2O_3) est également présente.

Par ailleurs, les observations directes des formations superficielles ont permis de calibrer les mesures géophysiques préalablement obtenues à l'échelle de 9 ha par la méthode TDEM entre 2 et 50 m de profondeur. La structure électriquement très conductrice, identifiée entre 5 et 10 m de profondeur, est explicitée par la présence à ce niveau d'une couche intermédiaire plus argileuse.

Un système hydrogéologique marqué par deux aquifères, l'un profond et fracturé, l'autre superficiel et sableux (Bruyère, 2005 ; Mao, 2006 ; Montoroi et al., 2007).

Les mesures tensiométriques montrent un flux hydrique ascendant en conditions salées (artésianisme), le taux d'infiltration étant de l'ordre de $-0,25 \text{ cm j}^{-1}$ avec une augmentation progressive de la concentration en solutés vers le haut du profil de sol (mélange convectif ascendant). En conditions peu salées, c'est l'inverse : le taux d'infiltration est pratiquement nul avec aucune modification du profil de concentration en solutés (pas de mélange convectif). Les taches salines seraient associées à des interruptions d'un niveau plus dense situé à environ 60 cm de profondeur. Par ailleurs, durant le cycle cultural du riz, le pH de l'horizon de surface est contrôlé au voisinage de la neutralité, notamment en présence de matière organique.

La cartographie du toit de la nappe montre deux situations bien contrastées en saison des pluies et en saison sèche. Un creux piézométrique est observé selon un axe sud-est nord-ouest en saison sèche. Les valeurs de conductivité électrique sont comprises entre 15 et 30 dS m^{-1} en saison sèche. Dans les quatre forages, la distribution verticale de la salinité de la nappe varie considérablement à l'intérieur et à l'extérieur des taches salines. Entre 4 et 20 m de profondeur, la nappe est quatre à cinq fois plus salée, que ce soit en saison des pluies ou en saison sèche, les valeurs maximales correspondant à une salinité deux fois plus élevée que celle de l'eau de mer (Figure 3).

Le modèle conceptuel⁴ de la figure 4 synthétise la dynamique hydrique des sols salés de rizières en prenant en compte les discontinuités structurales observées en profondeur ($> 2 \text{ m}$) et en surface ($< 1 \text{ m}$). Les variations du niveau de la nappe sont brutales au début de la saison des pluies, la dynamique étant spatialement très variable. La salinité du sol inondé augmente avec la profondeur dans les deux premiers mètres, de 2 à environ 30 dS m^{-1} .

En profondeur, les eaux souterraines remontent subverticalement par artésianisme à l'intérieur d'un aquifère fracturé et depuis les zones de recharge en amont des bassins versants. Elles se mélangent aux eaux circulant latéralement dans l'aquifère superficiel sableux présentant des discontinuités texturales impliquant des variations de perméabilité. En surface, des zones de moindre densité apparente permettent l'accès des flux hydriques et salins vers la surface des sols que ce soit en saison des pluies (sols inondés) ou en saison sèche (croûtes et efflorescences salines). Ces flux hydriques ascendants, identifiés en conditions saturées et sèches, provoqueraient l'extension latérale des taches salines.

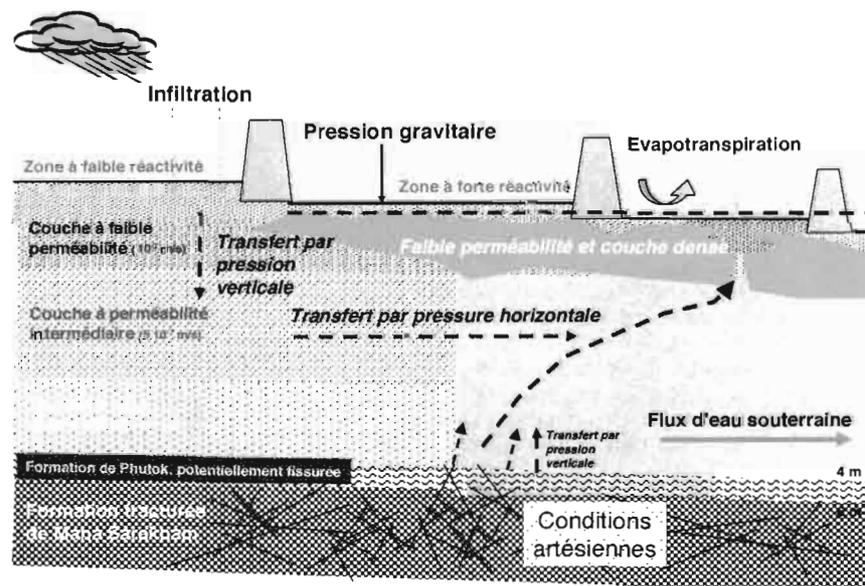
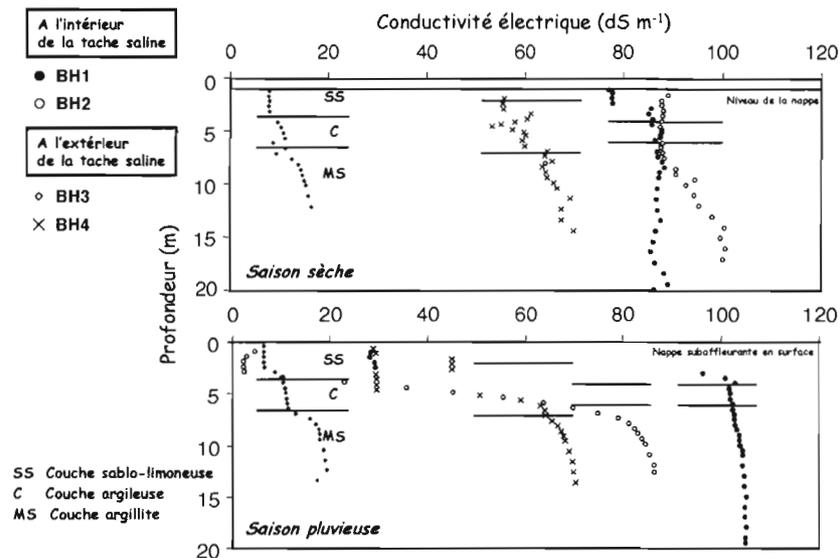


Figure 4. Modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des sols de bas-fonds rizicultivés.

IV - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les méthodes géophysiques ont permis de cartographier la variabilité spatiale de la salinité des sols et des roches à différentes échelles (parcelle, bas-fond) et à différentes profondeurs (de la surface à plusieurs dizaines de mètres). L'approche multidisciplinaire a conduit à l'élaboration d'un modèle conceptuel du fonctionnement hydrosalin d'un bas-fond rizicultivé à une échelle locale. Pour une meilleure gestion de leurs terres salinisées, les agriculteurs devront prendre en compte les interactions hydrochimiques qui existent en toute saison entre l'aquifère superficiel sableux et l'aquifère profond fracturé.

Les perspectives de cette étude seront de deux ordres. D'une part, les données acquises vont servir à alimenter un modèle hydrogéologique (Modflow) pour simuler le fonctionnement d'un bas-fond salé selon plusieurs scénarii. Des essais sont en cours et prometteurs. D'autre part, dès 2007, l'étude va se prolonger sur les versants pour s'intéresser à la réversibilité du processus de salinisation en évaluant l'impact d'une reforestation par des plantations d'hévéas sur le cycle hydrologique.

V - REFERENCES

- Bruyère O., 2005.** Spatial analysis of groundwater flow and its influence on the formation of saline patches in tropical sandy soils. Master 2 Report, CHIN, Neuchâtel, Suisse, 57 p. et annexes.
- Enet Y., 2003.** Influence des pratiques culturales sur les caractéristiques du sol et sur la répartition de la salinité au sein de deux propriétés rizicoles du Nord-Est de la Thaïlande. Mémoire de DESS, Univ. Paris XII-Val-de-Marne, Créteil, 102 p.
- Grünberger O., Maeght J.L., Montoroi J.P., Enet, Y., Rattana-Annap S., Wiengwongnam J., Hammecker C., 2007.** Assessment of salinity hazard by electromagnetism induction method in flooded sandy paddy soils. In: « *Proceedings of International Symposium on Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics 27th November - 2nd December 2005, Khon Kaen, Thailand* », FAO, Bangkok, p. 460.
- Grünberger O., Maeght J.L., Montoroi J.P., Rattana-Annap S., Wiengwongnam J., Hammecker C., 2007.** Assessment of salinity hazard by Time Domain Reflectometry in flooded sandy paddy soils. In: « *Proceedings of International Symposium on Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics 27th November - 2nd December 2005, Khon Kaen, Thailand* », FAO, Bangkok, 112-117.
- Imaizumi M., Sukchan S., Wichaidit P., Srisnk K., Kaneno F., 2002.** Hydrological and geochemical behavior of saline groundwater in Phra Yun, Northeast Thailand, JIRCAS, Working Report, 30.
- Japakasetr T., Workman D.R., 1981.** Evaporite deposits of Northeast Thailand. *American Assoc. of Petroleum Geologists*, 179-187.
- Mao L.S., 2006.** Salinization of a shallow aquifer of paddy fields in Northeast Thailand: geochemical and isotopic study. Master 2 Report, Univ. Paris XI Sud, Orsay, 72 p. et annexes.
- Montoroi J.P., Bouzid N., Grünberger O., Sukchan S., 2004.** Apport de méthodes géophysiques innovantes pour l'étude des sols salés du Nord-Est de la Thaïlande. In P. Chéry, L. Commagnac et A. Lee (Eds) : « *Actes des 8^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, 26-28 octobre 2004* », AFES-ENITAB, Bordeaux, 113-114.
- Montoroi J.P., Bouzid N., Grünberger O., Sukchan S., 2004.** Geophysical characterization of saline patches in Northeastern Thailand. In S. Rieb, P. Wongpornchai et S. Chantraprasert (Eds) : « *Proceedings of the International conference on Applied Geophysics, Chiang Mai (Thaïlande), 26-27 novembre 2004* », Chiang Mai University, 48-49.
- Montoroi J.P., Bouzid N., Grünberger O., Sukchan S., 2004.** Tomographie 2-D et 3-D de la salinité des sols par électromagnétisme temporel. In « *20^{ème} Réunion des Sciences de la Terre, Strasbourg, 20-25 septembre 2004* », Soc. Géol. de France, (disponible en CD-Rom).
- Montoroi J.P., Grünberger O., Sukchan S., Kungklang N., 2005.** Estimation de la salinité des sols du Nord-est de la Thaïlande par électromagnétisme en domaine fréquentiel. In : « *Actes du 5^{ème} colloque de géophysique des sols et des formations superficielles, GEOFCAN, Orléans, 20-21 septembre 2005* », Université Pierre et Marie Curie, Paris, 60-64.
- Montoroi J.P., Grünberger O., Sukchan S., Kungklang N., 2006.** Self potential method applied to salt-affected soils of Thailand. In : « *European Geosciences Union, General Assembly, 2-7 April 2006, Vienna, Austria* », Geophysical Research Abstracts, vol. 8, 10193.
- Montoroi J.P., Grünberger O., Bouzid N., Enet Y., Maeght J.L., Sukchan S., Srisnk K., Nadee S., 2006.** Salinity Hazard Assessment of paddy soils in Thailand using innovative ground geophysics. In: « *18th World Congress of Soil Science, Frontiers of Soil Science, Technology and the Information Age, Abstracts, July 9-15 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA* », 159-17, 1846a, p. 597.
- Montoroi J.P., Grünberger O., Bouzid N., Enet Y., Sukchan S., Srisnk K., Nadee S., 2007.** Geophysical study of salinity distribution in Northeastern Thailand paddy soils. 2007. In : « *Near Surface 2007, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 3-5 September 2007, Istanbul, Turkey* ».
- Montoroi J.P., Grünberger O., Bouzid N., Enet Y., Mao L. S., Nadee S., Srisnk K., Sukchan S., Kungklang N., 2007.** Multi-scale and multi-approach study of saline soils in Continental Thailand. Int. Workshop « *Improving soil and water management in Northeast Thailand under saline conditions and in rubber plantations* », 28 Feb- 2 Mar 2007, Khon Kaen (Thaïlande).
- Saejiew A., 2003.** Evolution des sols de bas-fonds au Nord-est de la Thaïlande : étude des interactions entre sodisation et ferrollyse. Thèse ENSA Montpellier.
- Srisnk K., 1994.** Genetic characteristics of the groundwater regime in the Khon Kaen drainage basin, Northeast Thailand. Ph. D. thesis, University of Alberta, Canada.
- Vijarusorn P., Eswaran H., 2002.** The soil resources of Thailand. 17th WCSS, First Press Ltd, Bangkok, Thaïlande, 264 p.

Williamson D.R., Peck A.J., Turner J.V., Arunin S., 1989. Groundwater hydrology and salinity in a valley in Northeast Thailand. In: "*Groundwater contamination*". IAHS Publ., 185 : 147-154.

Yuvaniyama A., Arunin S., Takai Y., 1996. Management of saline soil in the Northeast of Thailand. *Thai J. Agric. Sci.*, 29, 1:1-10.

Montoroi Jean-Pierre, Grünberger Olivier, Hammecker Claude, Maeght Jean-Luc, Surchan S., Srisuk K., Nadee S., Bouzid N., Flageul S., Hovhannissian Gagghik, Tabbagh A., Enet Y., Bruyère O., Mao L.S., Michelot Jean-Luc, Chenyapanich S., Kungklang N.

Variabilité multi-échelle de la structure et du fonctionnement des sols salés de la Thaïlande continentale : approche croisée hydro-salino-dynamique et géophysique

In : Vauclin M. (ed.) ECCO : ecosphère continentale, risques environnementaux. Paris : INSU, 7 p., 2007, Colloque de Restitution Scientifique : ECCO.Ecosphère Continentale, Risques Environnementaux, 1., Toulouse (FRA), 2007/12/03-05.