



Visite à l'EOST

23 février 2009

Applications de la RMN en hydrogéophysique:  
Contenu en eau et taille des pores



ECOLE ET OBSERVATOIRE  
DES SCIENCES DE LA TERRE

# LA TECHNIQUE RMP\* ET SON APPLICATION AUX ÉTUDES D'EAUX SOUTERRAINES

J. Roy, IGP

jeanroy\_igp@videotron.ca

\* RMP: Résonance Magnétique Protonique  
(SRM: Sondage par Résonance Magnétique  
MRS: Magnetic Resonance Sounding)

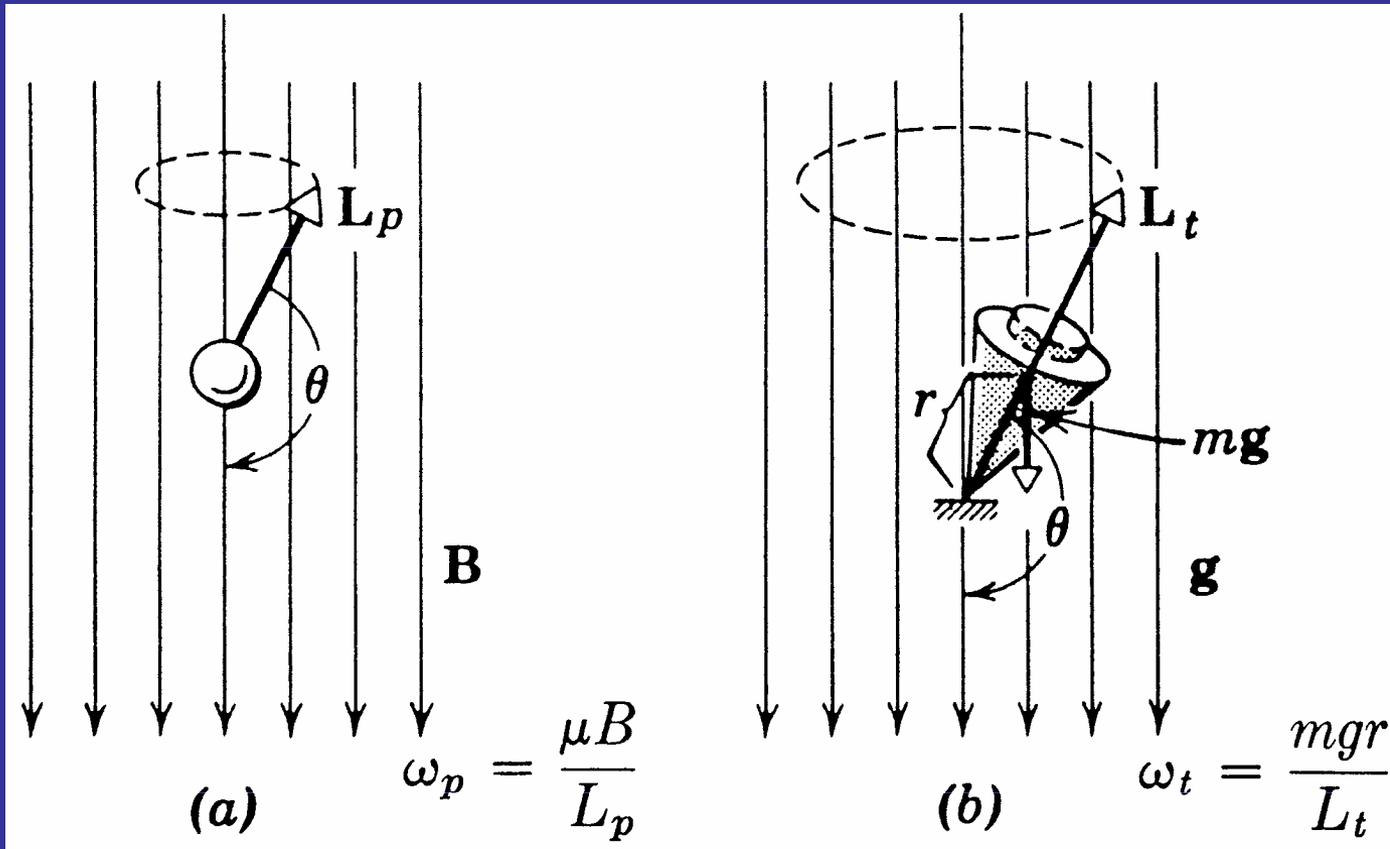


# 1<sup>ère</sup> PARTIE - RMP: Concepts et mise en œuvre

Attn.:

- plusieurs des graphiques utilisés n'ont pas été traduits

# RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)



RMN: analogie avec une toupie en précession; un modèle quantique est également très utile

Halliday & Resnick, 1962

- a) un noyau d'hydrogène ( $^1H^+$ ) tournant en précession dans le champ magnétique ambiant  $B$ :  $\omega_p$  est la fréquence de précession angulaire de  $^1H^+$ ,  $\mu$  est son moment magnétique ( $1.4 \cdot 10^{-26} \text{ J/T}$ ),  $B$  est en  $T$  et  $L_p$  est le moment d'inertie de  $^1H^+$  ( $5.3 \cdot 10^{-35} \text{ J}\cdot\text{s}$ ).  $\gamma = \mu/L_p$  est le rapport gyromagnétique. Pour l'hydrogène,  $\gamma = 2.675 \times 10^8 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\text{T}^{-1}$
- b) Une toupie tournant en précession dans le champ gravitationnel:  $\omega_t$  est la fréquence de précession angulaire,  $mg$  est son poids,  $r$  est le rayon et  $L_t$  est le moment d'inertie de la toupie. Dans les deux cas la fréquence de précession est égale au couple divisé par le moment d'inertie (Halliday & Resnick, 1962).

## (DEMO TOUPIE)

Axe vertical

Axe incliné

Friction

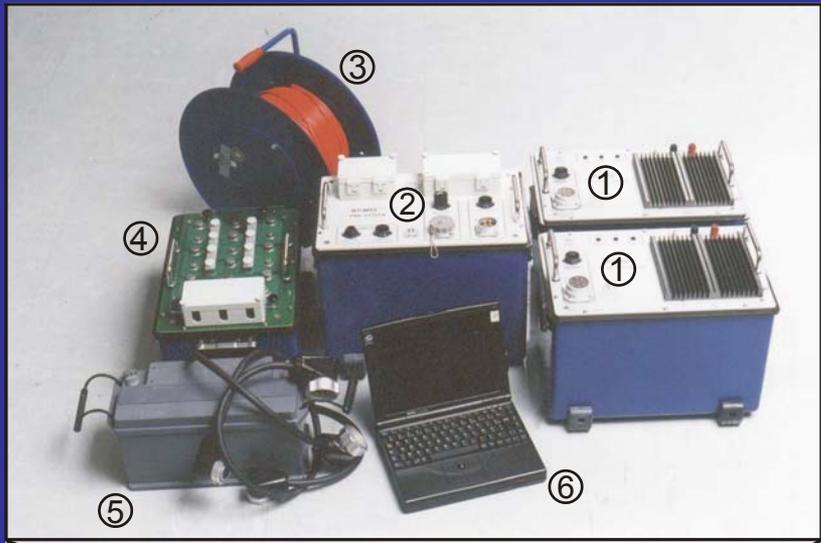
Précession

relaxation

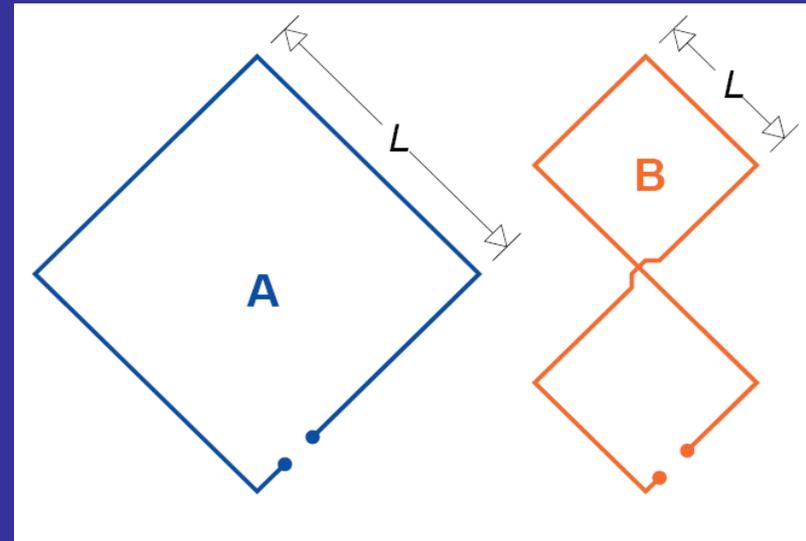
nutaton

# RMP: MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

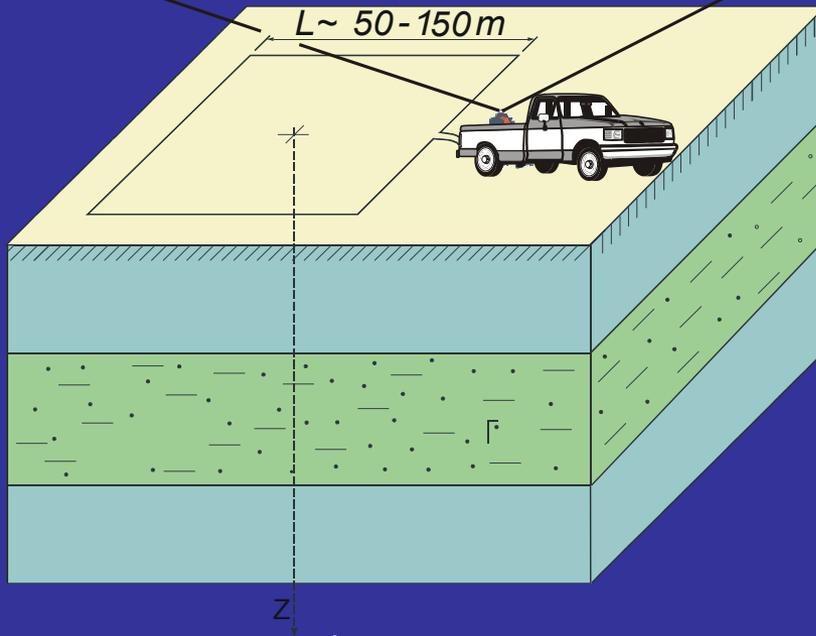
## Appareillage et mise en place terrain



## Patron de boucles: carré et 'carré en huit'



suivi au magnétomètre – levé RMP



## ACQUISITION DE DONNÉES RMP

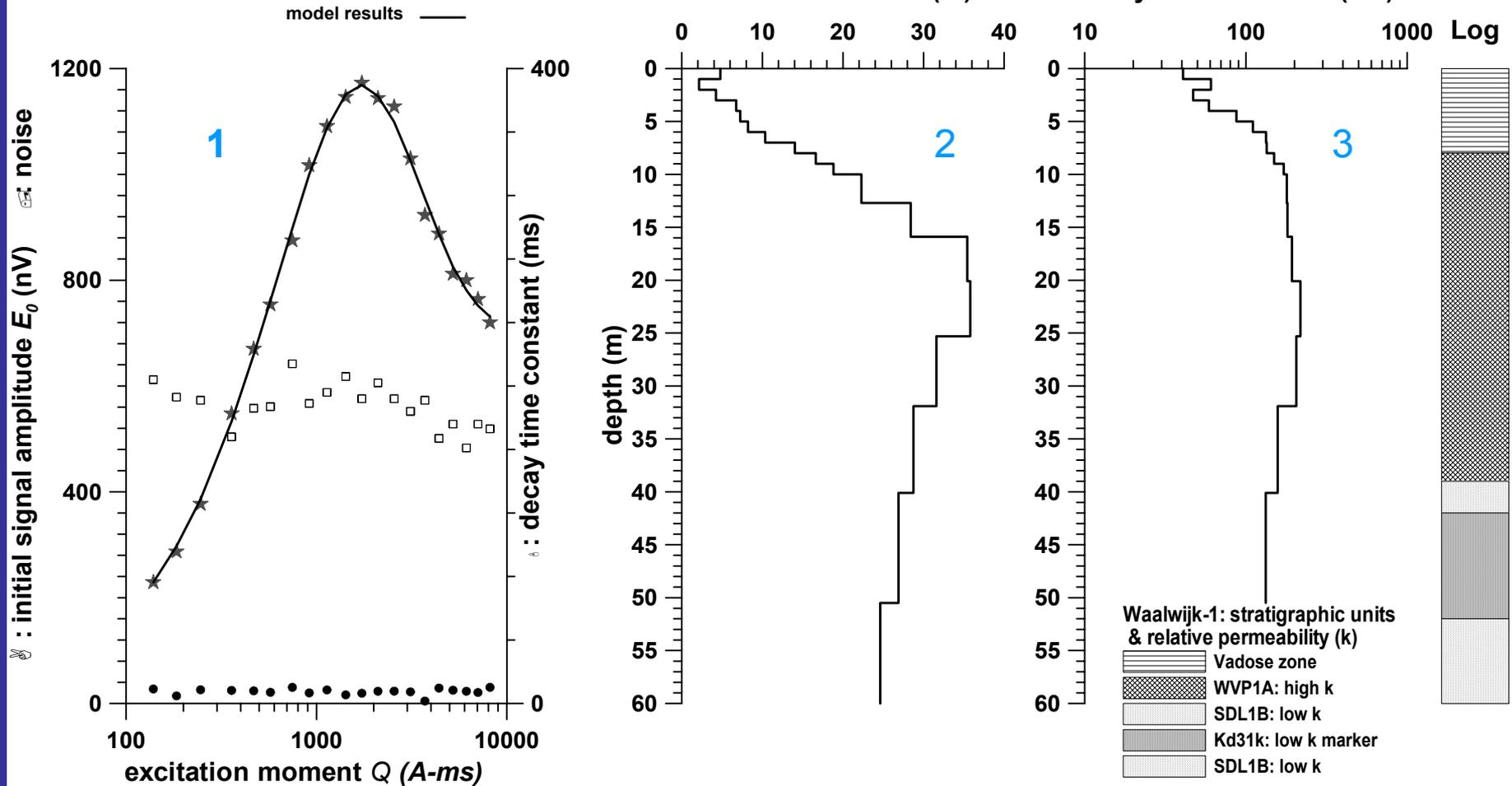
- levé magnétique:  $f_l$  et homogénéité de  $B_e$
- en milieu conducteur: SEV ou sondage EMDT
- examen du bruit, boucle: patron et position
- synthonisation du système à  $f_l$
- mini-sondage RMP e.g. #Q ~ 5
- sondage RMP #Q ~ 16 – 24
- accumulation ("stacking") pour augmenter le rapport signal/bruit (S/B)

## INVERSION DES DONNÉES RMP

- Calcul de la matrice:
  - $B_e$  et son pendage
  - section géo-électrique
  - patron et dimension de la boucle
  - gamme des valeurs de  $Q$
  - gamme des profondeurs
- Inversion sur des intervalles de profondeurs:
  - contenu en eau:  $\theta_{MRS}$
  - taux de décroissance du signal:  $T_d$

Site: Waalwijk-1 Date: 1997/12/06 Instrument: NUMIS  
 Loop: Square, 80 m Window width = 250 ms  
 Stacking = 64 Filter bandwidth: 10 Hz

## MRS inversion results

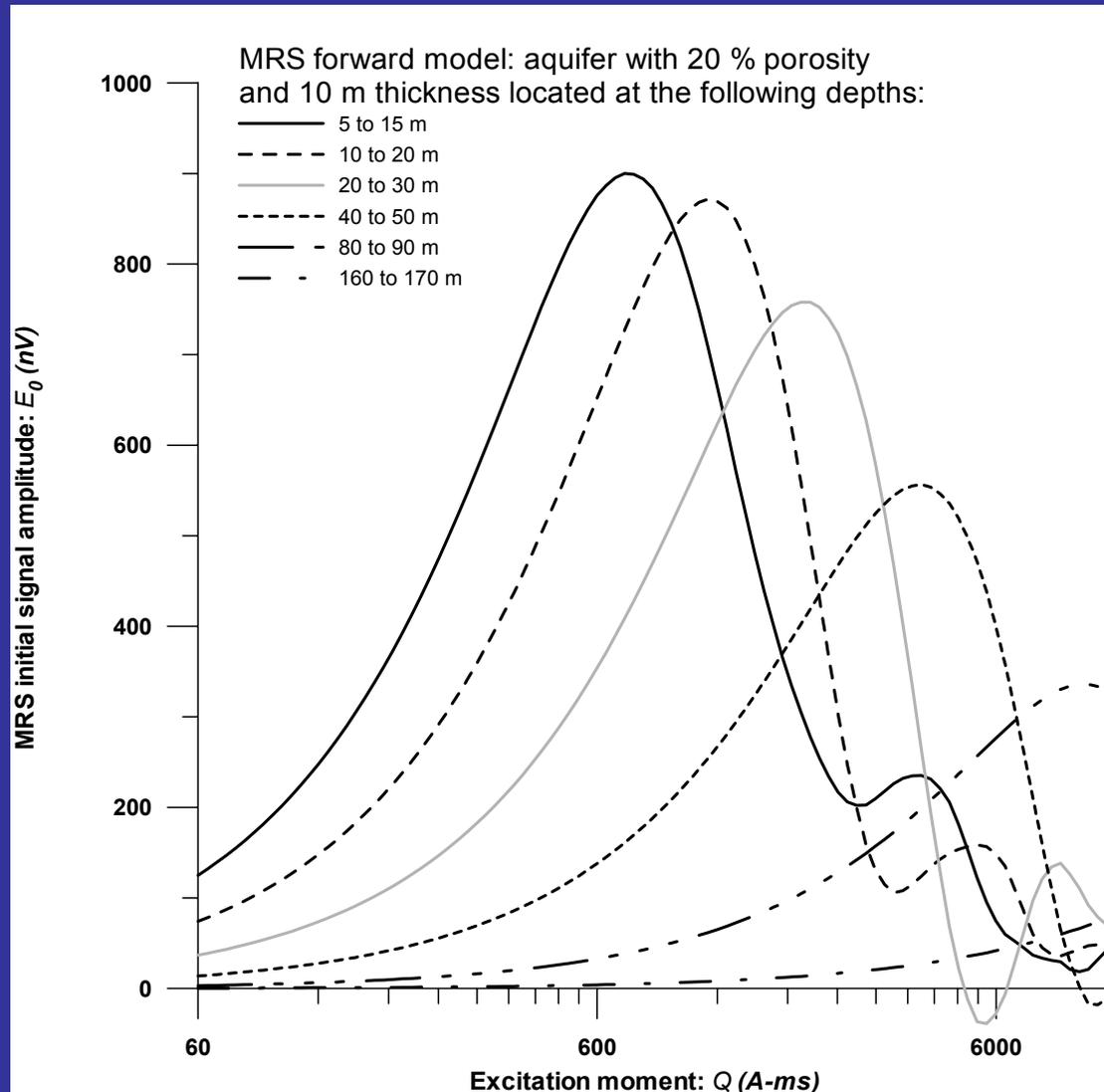


4

Données RMP et inversion; Waalwijk-1, Pays-Bas: de gauche à droite (1) résumé des données RMP, mesures de terrain [ $\star$  -  $E_0$ ,  $\square$  -  $T_2^*$ ,  $\bullet$  - bruit] & modèle RMP [—] vs.  $Q$ , (2 & 3) résultats de l'inversion RMP: contenu en eau et taux de décroissance du signal vs. profondeur, (4) Stratigraphie interpolée à partir des trois forages les plus rapprochés: dans cette séquence, la couche WVP1A a une perméabilité plus élevée que les couches SDL1B et Kd31k. (Item 4, TNO, 1998).

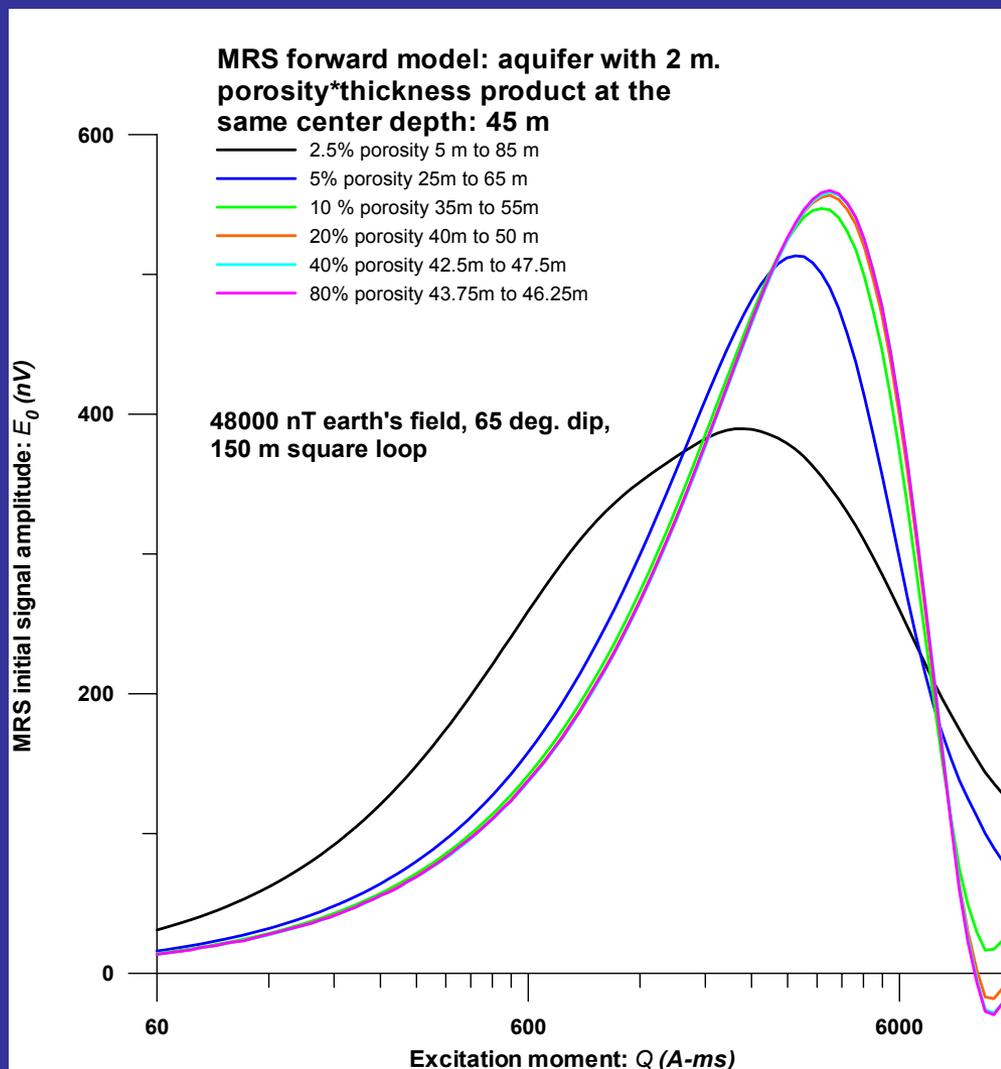
2<sup>ième</sup> Partie – RMP:  
Exploitation des données pour les  
études d'eaux souterraines (ES)

# Exploitation des données RMP: GÉOMÉTRIE DE L'AQUIFÈRE



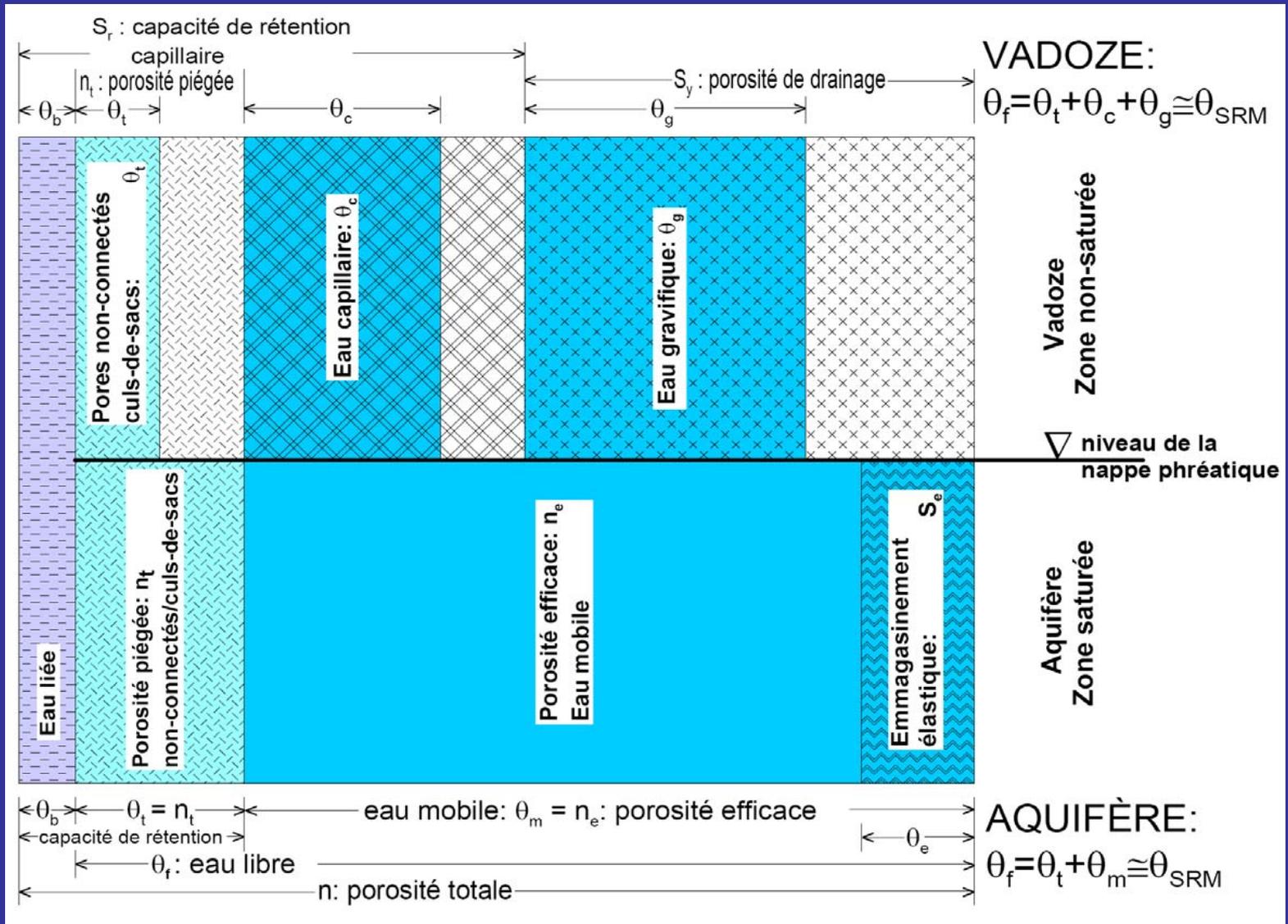
Modèle RMP: couche saturée  $\Phi = 20\%$  à 10, 15, 25, 45, 85 et 165 m de profondeur  $Q =$  paramètre de sondage, voir fonction  $\sin(Q\dots)$

# Exploitation des données RMP: GÉOMÉTRIE DE L'AQUIFÈRE - ÉQUIVALENCE



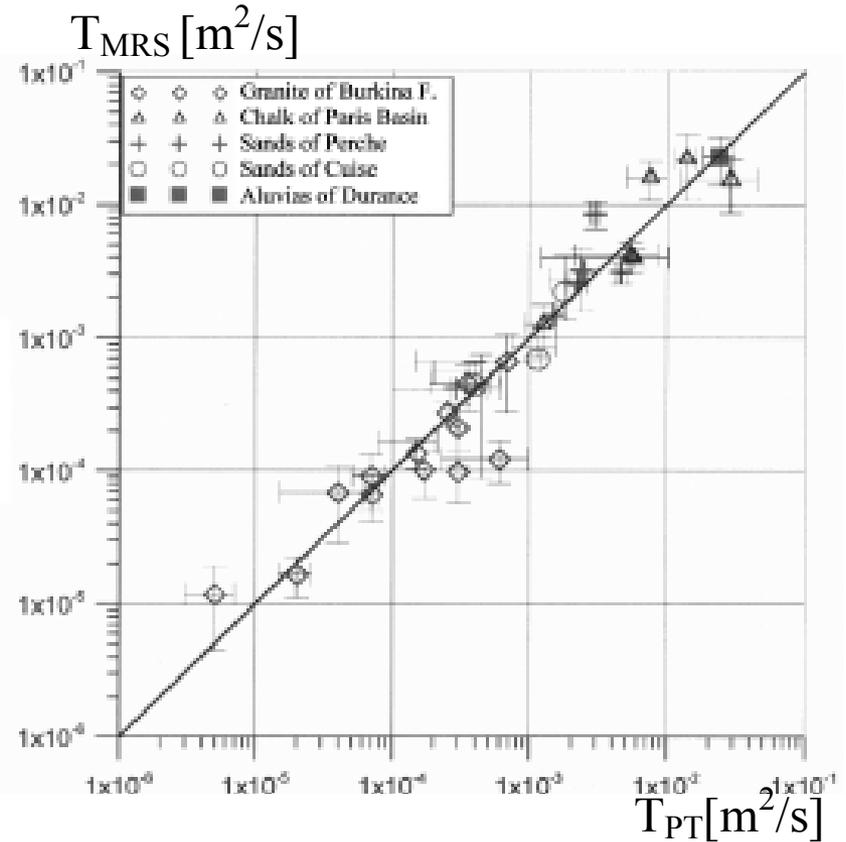
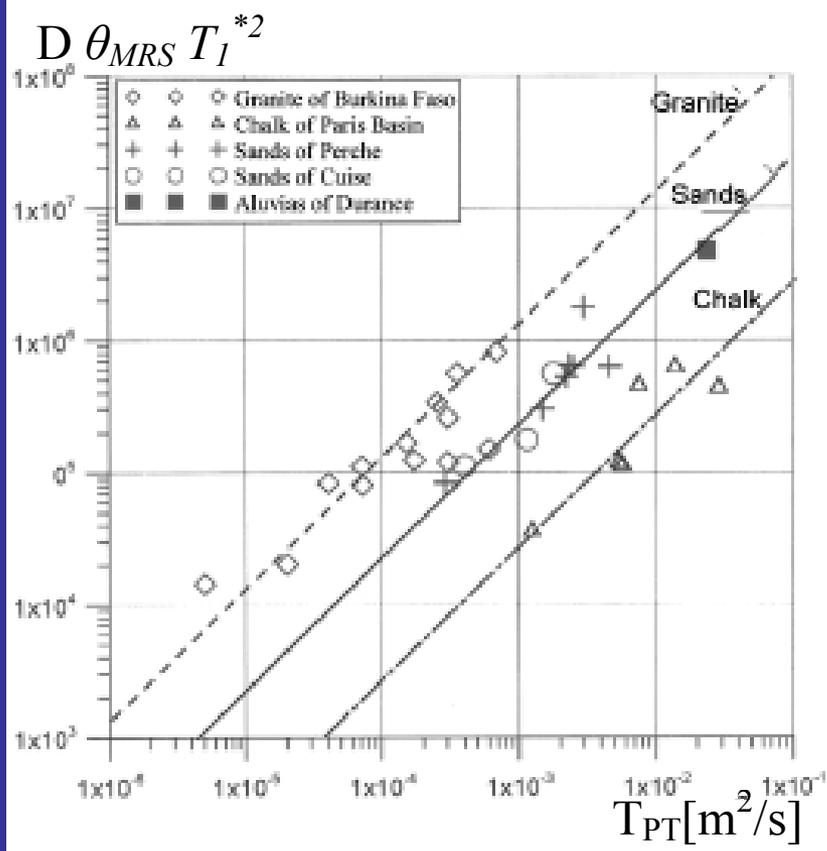
Modèle RMP: couche saturée  $\Phi \times b = 2\text{m}$  à 45 m profondeur pour  $\Phi = 2.5, 5, 10, 20, 40$  et 80% voir équivalence pour  $\Phi$  élevé (ici  $> 10\%$ ).

# Exploitation des données RMP: EMMAGASINEMENT AQUIFÈRE & VADOZE



Contenu en eau RMP ( $\theta_{MRS}$ ) et paramètres d'emmagasinement ES suivant: Lubczynski & Roy (2005), de Marsily (1981), Freeze & Cherry (1979)

# Exploitation des données RMP: ÉCOULEMENT – CALIBRATION de TRANSMISSIVITÉ



Calibration RMP: transmissivité par essai de pompage ( $T_{PT}$ ) vs. estimé RMP  $a \theta_{MRS}^b T_1^{*2}$  soulignant le facteur lithologique "a" – où la lithologie est identifiée sommairement comme granites, craies, sables et alluvions (Vouillamoz, 2003)

## RMP: CAPACITÉS ET LIMITATIONS

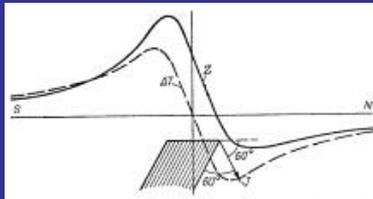
### CAPACITÉ DE LA RMP POUR LES ÉTUDES D'ES:

- sélectivité pour  $^1\text{H}^+$  et donc en proche surface pour ES (< 200 m)
- outil de sondage non-invasif i.e. inversion des données  
en fonction de la profondeur  $\rightarrow$  géométrie de l'aquifère
- pertinence des paramètres de l'inversion:  $\theta_{MRS} \rightarrow$  emmagasinement  
 $T_d \rightarrow$  écoulement: caractérisation des aquifères et des aquitards
- caractérisation et des couches saturées et de la zone vadose
- les calibrations pour K et T progressent en fonction de la  
détermination des facteurs lithologiques
- dans certains cas, distribution sommaire de la taille des pores  
(e.g. Maun BH8351 – si le temps le permet)

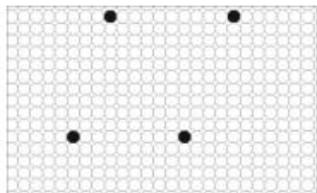
# RMP: CAPACITÉS ET LIMITATIONS

## LIMITATIONS:

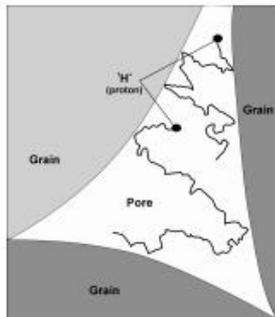
- pour le moment, essentiellement limité au cas 1D: acquisition et inversion
- sensibilité au bruit ambiant (naturel et culturel)
- pour le moment, incompatibilité avec certains environnements géologiques:
  - e.g. atténuation en milieu conducteur, masquage par rotation de phase dans le cas d'aquifères multiples en terrains conducteurs, sensibilité aux gradients magnétiques à différentes échelles (voir schéma ci-contre)
- la mise en œuvre actuelle est limitée à un canal (NUMIS)



Field scale:  $10^0$  to  $10^3$  m



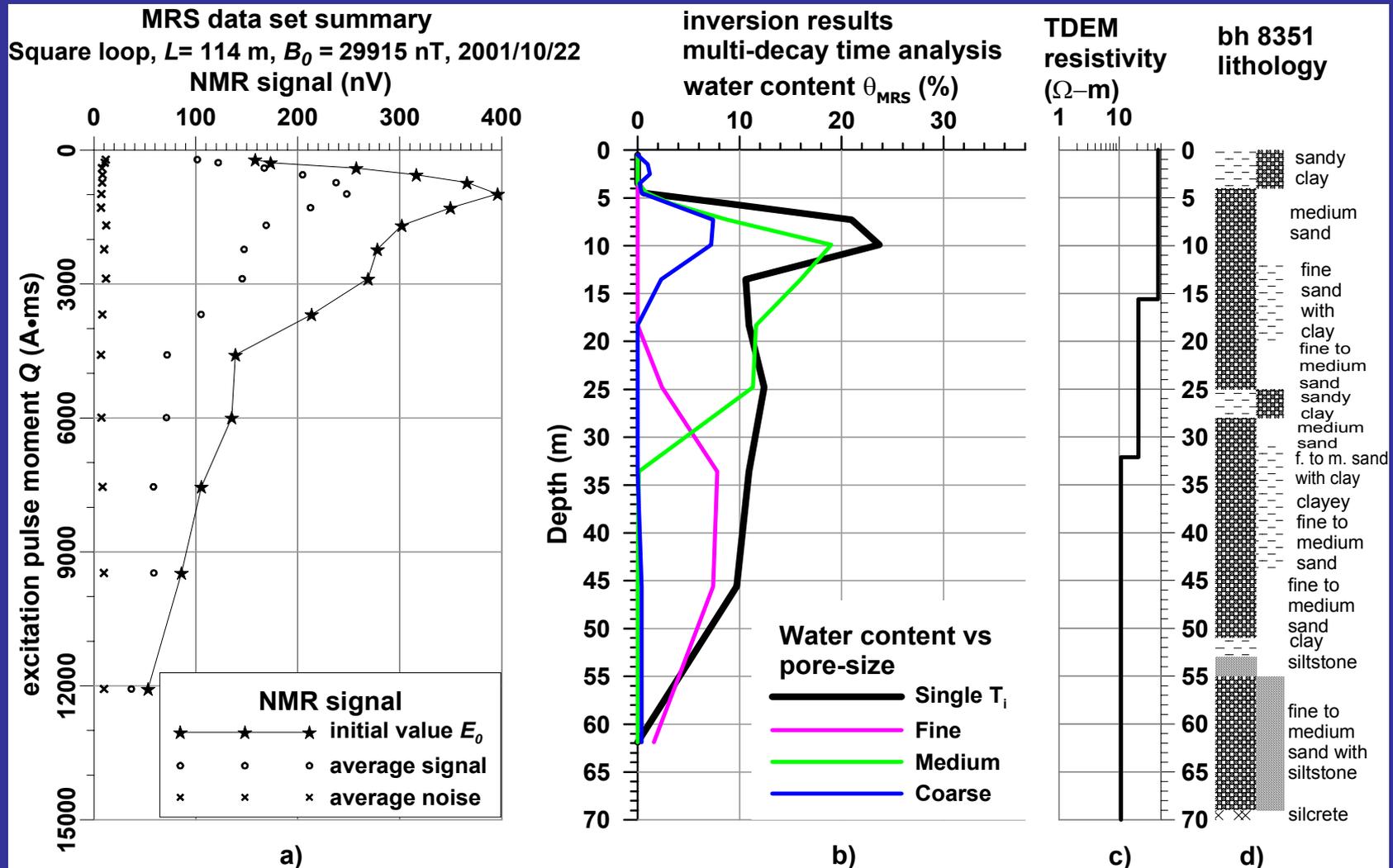
'Grain' scale:  $10^{-5}$  to  $10^{-1}$  m



Coating film scale:  $10^{-6}$  to  $10^{-5}$  m

Gradients magnétiques à différentes échelles pertinentes aux travaux de RMP: (haut) structure sur le terrain, (milieu) grains dans la roche, (bas) films sur la surface des pores

# RMP: DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES



Levé RMP au-dessus d'un paléo-chenal près de Maun, Botswana au site BH8351 - a) résumé des données de terrain , b) Résultats de l'inversion des données RMP avec analyse multi-exponentielle: c) résistivité suivant un sondage EMDT, d) stratigraphie du forage BH8351 (suivant Mangisi, 2004; Roy et Lubczynski, 2005).

# REMERCIEMENTS:



Departamento de Hidrogeologia

J. Bernard  
M. Bureau  
M. Chouteau  
A. da Costa  
A. Legtchenko  
M. Lubczynski  
R. Meyer  
A. Rouleau

L. Kgothlang  
N. Mangisi  
E. Martinez  
C. Owuor  
J. Menier