



**HAL**  
open science

## Calibration d'un modèle hydrologique à l'aide de mesures de résonance magnétique protonique

Gru Guillaume, Nolwenn Lesparre, Philippe Ackerer, Benjamin Belfort,  
Jean-François Girard

► **To cite this version:**

Gru Guillaume, Nolwenn Lesparre, Philippe Ackerer, Benjamin Belfort, Jean-François Girard. Calibration d'un modèle hydrologique à l'aide de mesures de résonance magnétique protonique. 13e Colloque GEOFCAN, Nov 2023, Strasbourg, France. hal-04300913

**HAL Id: hal-04300913**

**<https://hal.science/hal-04300913v1>**

Submitted on 22 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## CALIBRATION D'UN MODELE HYDROLOGIQUE A L'AIDE DE MESURES DE RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE

GRU G.<sup>1</sup>, LEPARRE N.<sup>1</sup>, ACKERER P.<sup>1</sup>, BELFORT B.<sup>1</sup>, GIRARD J.F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg/EOST/ENGEES, CNRS UMR 7063, 5 rue Descartes, Strasbourg F-67084, France

[gru@unistra.fr](mailto:gru@unistra.fr), [lesparre@unistra.fr](mailto:lesparre@unistra.fr), [ackerer@unistra.fr](mailto:ackerer@unistra.fr), [belfort@unistra.fr](mailto:belfort@unistra.fr), [jf.girard@unistra.fr](mailto:jf.girard@unistra.fr).

### RESUME

*Des mesures de résonance magnétique protonique ont été acquises de manière répétée lors d'un suivi de fonte de neige sur le bassin versant du Strengbach (site de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement, Vosges) pendant l'hiver 2021. Nous utilisons ces mesures géophysiques pour caractériser les propriétés de la zone vadose, en estimant les paramètres d'un modèle hydrologique unidimensionnel (Richards 1D) grâce à une approche de modélisation couplée hydrologique et géophysique. La méthode d'estimation de paramètres choisie (inférence bayésienne) permet à la fois d'estimer les paramètres du modèle et de quantifier l'incertitude sur cette estimation.*

**Mots clés :** *résonance magnétique protonique, modèle hydrologique 1D, problème inverse, inférence bayésienne*

### HYDROLOGIC MODEL CALIBRATION USING MAGNETIC RESONANCE SOUNDING MEASUREMENTS

### ABSTRACT

*Magnetic resonance sounding data were repeatedly acquired during the follow-up of a snowmelt event on the Strengbach catchment (Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement, Vosges mountains) during the winter 2021. We use these geophysical measurements to characterize the vadose zone properties by inferring the parameters of a hydrologic 1D model (Richards 1D) through a hydrologic and geophysical coupled modeling approach. The parameter inference method chosen (Bayesian inference) also quantifies the uncertainty on the estimated parameters.*

**Key words:** *magnetic resonance sounding, 1D hydrologic model, inverse problem, Bayesian inference*

### INTRODUCTION

La ressource en eau en montagne est primordiale à la fois pour les écosystèmes locaux et pour un certain nombre d'activités anthropiques (Viviroli et al., 2011). Le dérèglement climatique pourrait avoir un impact négatif sur la ressource en eau disponible. Il est impératif de réduire les incertitudes sur les prédictions d'évolution de cette dernière. L'objectif du travail présenté est d'utiliser des mesures géophysiques pour apporter une information sur le stock d'eau contenu dans la sub-surface. Cette information est utilisée dans des méthodes de calibration automatique appliquées à des modèles hydrologiques. Nous avons effectué le couplage d'un modèle d'écoulement unidimensionnel basé sur l'équation de Richards et d'un modèle d'estimation de signaux de résonance magnétique protonique (RMP) à partir de distributions de teneur en eau. Nous utilisons cette modélisation couplée pour estimer les paramètres du modèle hydrologique avec des méthodes d'inférence bayésienne.

### DESCRIPTION DU SITE

Le lieu d'étude sur lequel les données utilisées ont été récoltées est le bassin versant expérimental du Strengbach (carte du bassin versant avec les stations de mesures : **Fig. 1**). Ce site de 80 ha est localisé dans le massif vosgien entre 800 et 1100 mètres d'altitude. L'exutoire du bassin versant est situé à l'Est

au niveau de la station de suivi du débit sur la limite du bassin versant. Ce bassin versant expérimental est le site d'étude de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE). Des données météorologiques, hydrologiques et géochimiques y sont acquises depuis 1986. Cet observatoire étudie les modifications à long-terme des écosystèmes dues à des perturbations naturelles ou anthropiques (Pierret et al., 2018).

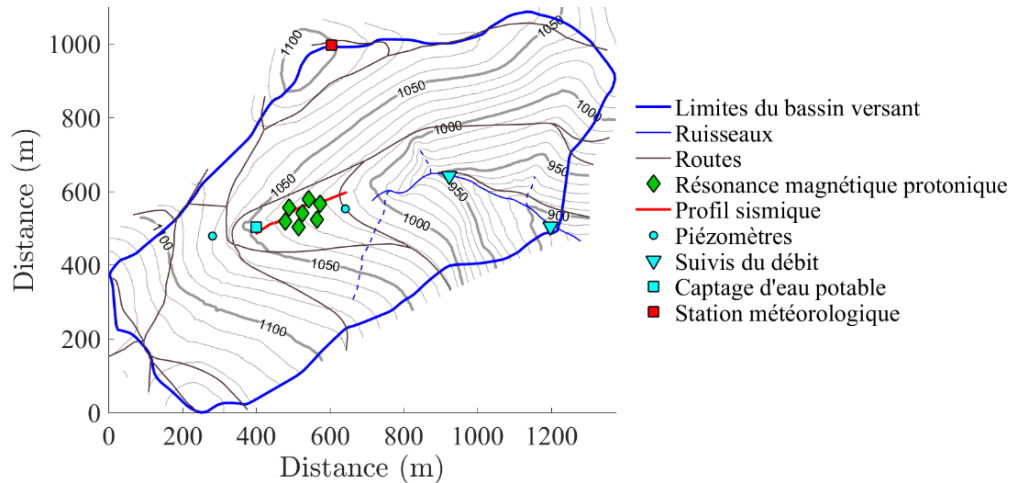


Fig. 1 – Carte du bassin versant du Strengbach et localisation des stations de mesures.

## MATERIEL ET METHODES

### Données météorologiques et hydrologiques

Nous utilisons des mesures hydrologiques et météorologiques pour imposer les conditions aux limites de nos simulations (cf. Fig. 2). La condition limite supérieure de flux est déduite des précipitations mesurées à la station météorologique. La condition limite inférieure en pression est quant à elle imposée par la mesure de hauteur de nappe effectuée au piézomètre situé en aval de la station de mesure RMP. La fréquence d'acquisition est d'une mesure toutes les 10 minutes.

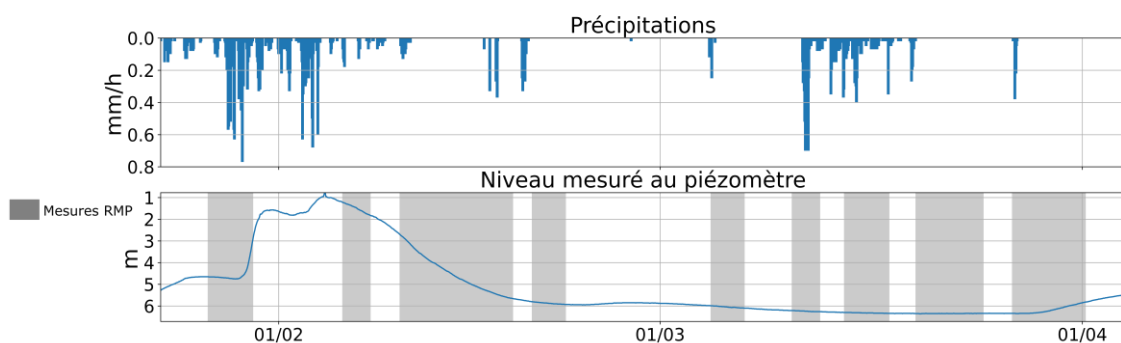


Fig. 2 – Chroniques de précipitations et de niveau piézométrique (aval).

### Modélisation hydrologique

Le modèle d'écoulement unidimensionnel avec lequel nous travaillons est basé sur l'équation de Richards et les modèles de Mualem et Van Genuchten. Le code numérique utilisé pour les simulations, WAMOS (WATER MOVEMENT in SOIL), est basé sur une discrétisation de l'équation de Richards et une résolution de l'équation discrète par la méthode de Newton-Raphson (Maina et Ackerer, 2017). Les

paramètres des modèles de Mualem et Van Genuchten sont les suivants :  $(K_s, \theta_s, \theta_r, L, \eta, h_0)$ .  $K_s$  est la conductivité hydraulique à saturation,  $\theta_s$  et  $\theta_r$ , respectivement la teneur en eau à saturation et la teneur en eau résiduelle. Les paramètres  $L, \eta$  et  $h_0$  sont quant à eux des paramètres d'échelle. Dans un premier temps les paramètres que nous estimons sont  $K_s, \theta_s, \eta$  et  $h_0$ .

### Mesures de résonance magnétique protonique

Nous utilisons des données de mesures RMP. Le principe de cette méthode est d'introduire un champ électromagnétique qui va dévier les dipôles magnétiques des atomes d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau du sol et du sous-sol de leur état d'équilibre. Puis la réponse du milieu est observée sous forme d'un signal électrique dont l'intensité ( $[nV]$ ) est (Legchenko et Valla, 2002)

$$V(t, q) = \int_z \kappa(q, z) \theta_{RMP}(z) e^{-\frac{t}{T_2^*(z)}} dz . \quad (4)$$

Où  $q$  ( $[A.ms]$ ) est le pulse injecté,  $\kappa$  ( $[nV.m^{-1}]$ ) est la fonction de sensibilité RMP qui dépend de la géométrie du système d'acquisition et du champ magnétique terrestre local et  $T_2^*$  ( $[s]$ ) est le temps de relaxation caractéristique. On note  $V_0(q) = V(t = 0, q)$ . La profondeur sondée par une mesure RMP augmente avec le pulse injecté  $q$ .

### Expérience RMP répétée sur du socle

L'objectif du sondage RMP était de vérifier si cette méthode de mesure est assez sensible pour détecter les variations de teneur en eau sous la surface dues à la fonte de neige. L'année pendant laquelle ces mesures ont été effectuées (2021) était une année exceptionnelle en terme de chute de neige. Quand l'appareil de mesure (Numis<sup>plus</sup>, IRIS instruments) a été installé, une couche de 80cm de neige était présente sur le site. Quelques jours après l'installation de l'expérience une pluie intense a déclenché une fonte de neige et quelques semaines plus tard une chute de neige plus faible a eu lieu. De cette manière deux événements d'infiltration avec des caractéristiques différentes ont pu être suivis. Les acquisitions ont été réalisées pour 30 valeurs de pulse et 800 stacks. Habituellement les acquisitions sont réalisées pour moins de 10 pulses et environ 200 stacks. Nous avons choisi d'augmenter le nombre de pulse et de stacks dans le but d'allonger la durée de la mesure pour observer l'évolution temporelle du contenu en eau du milieu. Nous avons limité la valeur maximale du pulse injecté à **2260 A.ms** pour sonder la partie superficielle du milieu. La particularité de cette expérience, outre le fait que les mesures aient été acquises de manière répétée, est la nature du milieu sondé : du socle. Les études RMP en time-lapse ont en effet principalement été effectuées en milieux calcaires (Mazzilli et al., 2020).

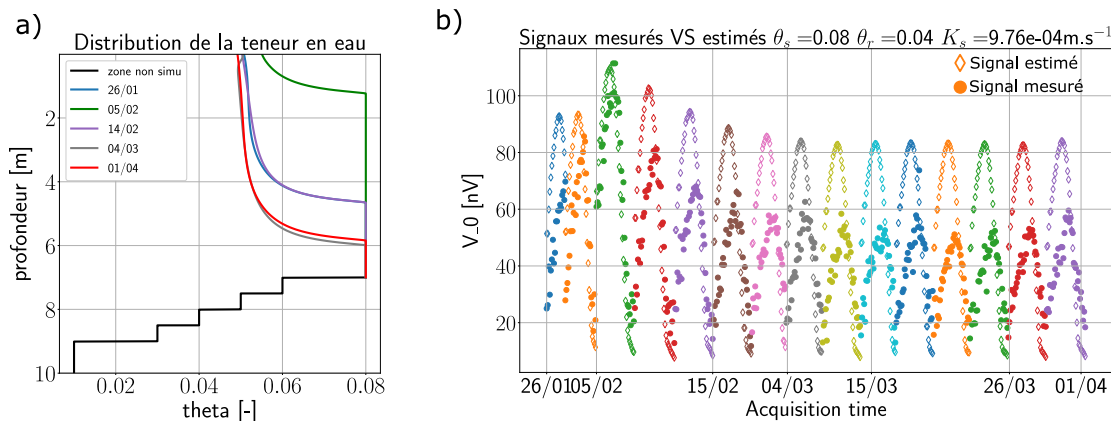
### Méthodologie d'estimation de paramètres

Pour l'estimation des paramètres du modèle hydrologique nous utilisons une méthode d'inférence bayésienne : Markov Chain Monte Carlo (MCMC). L'intérêt de cette méthode est de fournir des informations sur l'incertitude des paramètres estimés.

## RESULTATS PRELIMINAIRES

### Couplage des modèles

Nous avons couplé les modèles décrits ci-dessus, de manière à utiliser les distributions de teneurs en eau obtenues par simulation pour estimer les signaux RMP correspondants. Ce couplage est utilisé pour comparer les signaux mesurés lors de l'expérience de terrain et les signaux simulés pour un jeu de paramètres donné (cf. Fig.3).



**Fig. 3** – a) Distribution de teneurs en eau, résultat de la simulation WAMOS - b) Comparaison des signaux RMP mesurés et simulés sur toute la période d'acquisition.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le couplage des modèles hydrologique et géophysique est fonctionnel et fournit des résultats cohérents. Nous avons choisi la mesure de divergence entre les données simulées et mesurées : le  $\chi^2$ . Pour poursuivre le travail, il s'agira d'utiliser cette modélisation couplée dans un schéma d'inférence statistique de type MCMC.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Rohianuu Moua et Alain Hernandez pour leur participation à la mise en place de l'expérience. L'expérience de terrain a bénéficié d'un financement de l'EQUIPEX CRITEX. Le programme Idex-Unistra W16RPD19 a financé l'appareil d'acquisition. Nous remercions l'Institut Terre et Environnement de Strasbourg pour le financement du stage de fin d'études de Guillaume Gru

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hassane Maina, F., & Ackerer, P. (2017)** – Ross scheme, Newton–Raphson iterative methods and time-stepping strategies for solving the mixed form of Richards' equation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2667-2683.
- Legchenko, A., & Valla, P. (2002)** – A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 50(1-2), 3-19.
- Mazzilli, N., Chalikakis, K., Carrière, S. D., & Legchenko, A. (2020)** – Surface Nuclear Magnetic Resonance Monitoring Reveals Karst Unsaturated Zone Recharge Dynamics during a Rain Event. *Water*, 12 (11), 3183.
- Pierret, M. C., Cotel, S., Ackerer, P., Beaulieu, E., Benarioumlil, S., Boucher, M., et al., & Probst, A. (2018)** – The Strengbach catchment: A multidisciplinary environmental sentry for 30 years. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-17.
- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F. et al. & Woods, R. (2011)** – Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471-504.