

## Capteur résonnant pour détection d'obstacles dans de l'eau douce *Resonant sensor for obstacle detection in fresh water*

Nicolas Troesch\*<sup>1</sup>, Arnaud Vena<sup>1</sup>, Séverin Pistre<sup>2</sup>, Philippe Combette<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IES Montpellier, Université de Montpellier, nicolas.troesch@umontpellier.fr

<sup>2</sup>HSM HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier,

*Karst, Capteur, Résonnant, Eau douce // Karst, Sensor, Resonant, Fresh water*

### Résumé/Abstract

Cet article présente un nouveau dispositif de détection d'environnement sous-marin et d'obstacles utilisant un capteur résonnant fonctionnant dans une plage de fréquences allant de 50 à 180 MHz. La conception du capteur ne nécessite pas un processus de fabrication complexe. L'électronique du capteur est relativement simple et à faible consommation d'énergie. Les résultats de simulation et les mesures pratiques en environnement contrôlé valident les travaux supplémentaires sur cet outil novateur, qui est un capteur basse consommation basé sur une antenne résonante, capable de détecter des parois rocheuses et des poches d'air avec une portée de détection de 200 mm.

This paper presents a new underwater environment and obstacle detection device using a resonant sensor operating in the frequency range from 50 to 180MHz. The sensor design does not require a complex manufacturing process. The sensor electronic is fairly simple and low power. Simulation results and practical measurement in a controlled environment validate the additional work on this novel tool, which is a low-power sensor based on a resonant antenna that is able to detect rock walls and air pockets with a detection range of 300-400 mm.

### 1 Introduction

Afin de faire face aux pressions climatiques et anthropiques à venir sur les hydrosystèmes et les ressources en eau, il est indispensable de proposer des outils d'ingénierie permettant la reconnaissance et la gestion des réservoirs karstiques. En effet, les réservoirs karstiques alimentent 25% de la population mondiale en eau potable [1]. Ils représentent donc une ressource en eau souterraine importante, mais qui pourrait dans de nombreux cas être davantage exploitée notamment sur les rives de la Méditerranée. Depuis 50 ans, la compréhension des processus qui contrôlent leur fonctionnement hydrodynamique a très largement progressé. Cette progression a permis d'améliorer leur modélisation mais des obstacles majeurs demeurent ; Ils sont liés à la caractérisation de leur structure interne et à l'organisation des écoulements.

Même si les réservoirs karstiques sont particulièrement anisotropes et hétérogènes, un réseau organisé et hiérarchisé de conduits concentre et contrôle les écoulements vers un ou plusieurs exutoires. Or, la reconnaissance de ces conduits se limite actuellement à l'utilisation de traceurs artificiels donnant une vitesse "à vol d'oiseau" entre une entrée d'eau et un exutoire, ou à l'exploration en plongée qui ne peut concerner qu'une infime partie des conduits. Face à ces difficultés, l'imagerie géophysique et les simulateurs stochastiques font partie des pistes actuelles mais ces méthodes manquent de précision pour générer une cartographie fiable des conduits. Ainsi, l'absence d'informations plus précises sur la géométrie des conduits, sur les conditions d'écoulement à travers ceux-ci ou sur l'évolution de la qualité de l'eau le long des drains constitue un réel verrou pour développer des modèles de gestion des aquifères karstiques. L'objectif principal de cet article est de développer un capteur faible consommation à intégrer dans une capsule étanche autonome emportée par l'eau. Celle-ci devra être capable de détecter une paroi à l'intérieur d'un karst dans le but de reconstruire son parcours dans les conduits. Aujourd'hui, il existe un nombre conséquent de moyens de détecter un objet ou une paroi à l'aide de différentes technologies. Mais dans le domaine du karst, les technologies les plus fréquemment utilisées sont les capteurs à ultra-sons [2] et les capteurs laser [3]. Ces deux solutions donnent d'excellents résultats lorsqu'il s'agit de véhicules autonomes sous-marins, mais dans notre cas, nous recherchons une solution intégrable dans une capsule et à faible consommation d'énergie. Notre conception s'inspire des capacités d'électrolocalisation des anguilles et d'autres espèces de poissons [4], [5], qui ont été précédemment étudiées par G. Baffet et al [6], [7], [8]. Le capteur sera placé à l'intérieur d'une capsule autonome transportée par l'eau. Cette recherche vise à créer un capteur à faible consommation capable de détecter les parois ou les poches d'air au sein d'un karst et de reconstruire le tracé du conduit. Dans cet article, nous visons à augmenter la portée de détection en concevant des capteurs fonctionnant

autour de leur fréquence de résonance. Nous aborderons tout d'abord la géométrie du capteur proche d'un dipôle, puis les résultats des simulations, ensuite nous présenterons des mesures en conditions réelles afin de valider nos simulations, ensuite nous présenterons un design intégrable pour une structure simple, puis nous présenterons une solution d'amélioration de la résolution spatiale du capteur. Pour finir nous exposerons ensuite des perspectives suite à cette étude et enfin nous conclurons.

## 2 Théorie / Modèle / Simulation

Les environnements karstiques sont principalement composés de roches solubles, comme des roches carbonatées et calcaires. L'eau a une permittivité relative d'environ 80. En revanche, il est difficile de donner une valeur précise pour la permittivité des roches calcaires, celle-ci dépend de différents facteurs chimiques. La mesure effectuée par le capteur se réalise entre deux éléments principaux ( $Ea$  et  $Eb$ ) qui constituent un résonateur basé sur un dipôle terminé par des pads capacitifs (cf. Figure 1). La présence d'un obstacle affecte le champ électrique par une modification de la permittivité relative autour du résonateur. L'étude consiste à mesurer l'impédance du dipôle composé des deux électrodes  $Ea$  et  $Eb$ . Dans notre cas, nous allons nous intéresser à la différence de permittivité relative entre l'eau, les roches et l'air au-dessus de la surface de l'eau. Lorsque le résonateur se trouve à proximité d'une roche, on observe un décalage de la fréquence de résonance. Cela est dû au fait que la constante diélectrique des roches est généralement plus faible que celle de l'eau, ce qui entraîne une diminution de la permittivité effective autour du dipôle, et les lignes de champs sont plus dispersées (cf. Figure 1), entraînant une variation de son impédance. Cette étude se concentre sur la mesure de la fréquence de résonance du dipôle. En analysant le paramètre  $S_{11}$ , l'impédance  $Z_{11}$  peut être extraite afin de déterminer la fréquence de résonance. Les branches  $Ea$  et  $Eb$  sont constituées de deux plans de cuivre de rayon  $r$  reliés à deux fils de cuivre de longueur  $L$ .

Pour affiner le modèle de nos simulations, nous avons décidé de mener une campagne de caractérisation de roches provenant de différentes strates. La permittivité relative des roches prélevées aux alentours de Montpellier a été mesurée à travers différentes couches à l'aide d'un kit d'évaluation diélectrique pour couches minces (*DAK-TL2*) connecté à un analyseur de réseau vectoriel *ZNH26*. La plage de fréquences utilisée s'étend de 4 MHz à 20 GHz, comme indiqué à la Figure 2. Les échantillons de roche ont été découpés et polis afin d'obtenir une surface lisse et plane avec une épaisseur de  $3,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ . Ces échantillons proviennent de strates caractérisées par leur âge géologique. L'eau présente une permittivité relative de  $\epsilon_{r_{eau}} = 78$  et une conductivité de  $200 \text{ } \mu\text{S/cm}$ . La Figure 2 met en évidence un léger contraste dans la permittivité relative mesurée, allant de  $\epsilon_r = 5$  pour le Valanginien à près de  $\epsilon_r = 8$  pour le Berriasien.

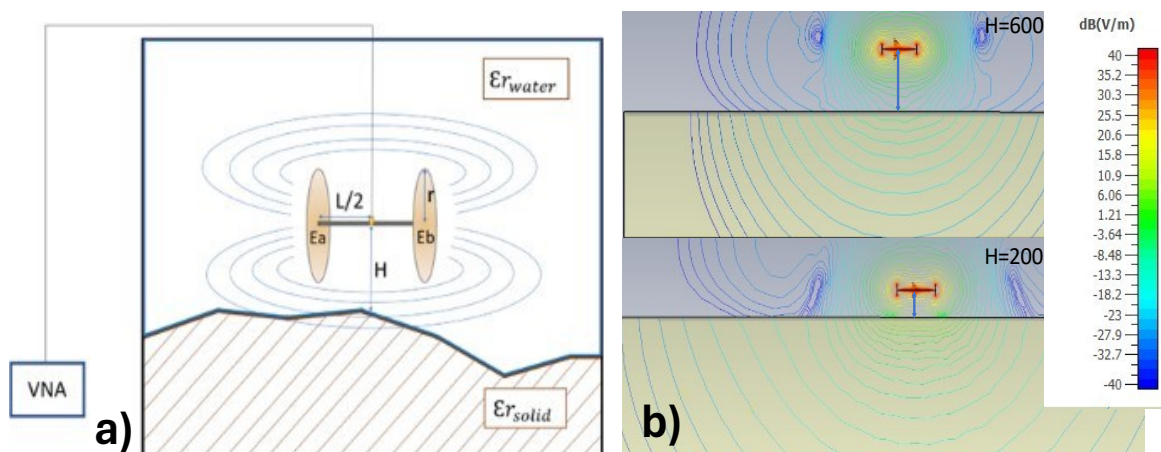
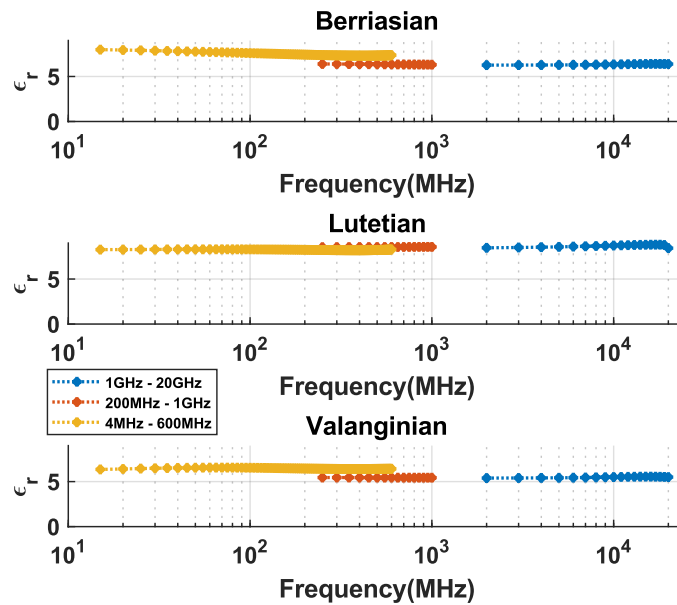


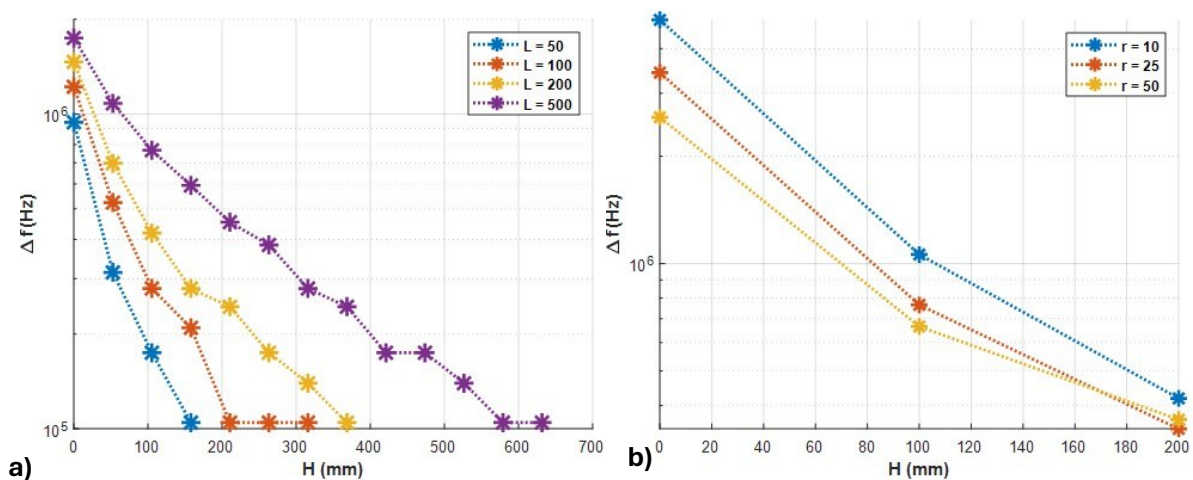
Figure 1: a) Principe de détection d'obstacle par mesure d'impédance d'un résonateur ; b) Exemple de deux simulation pour un set de paramètres  $r=50\text{mm}$ ,  $L=200 \text{ mm}$  avec  $H=[600 ; 200]\text{mm}$

Pour ces simulations, nous avons utilisé CST Microwave Studio et effectué des simulations avec le solveur fréquentiel. L'environnement de simulation est composé de notre dipôle, une grande structure d'un matériau caractérisé par la permittivité mesurée et l'environnement caractérisé par de l'eau douce avec une permittivité relative de  $\epsilon_{\text{eau}} = 78$  et une conductivité de  $200 \mu\text{S/cm}$ .



**Figure 2:** Permittivité relative d'échantillon de roches provenant de différentes strates, pour une gamme de fréquence de 4MHz à 20GHz

La structure karstique simulée est volontairement grande afin d'avoir un volume de roche beaucoup plus grand par rapport à la taille du capteur et donc de limiter les effets de bord. Pour caractériser le dipôle, deux simulations paramétriques ont été réalisées. L'une sur le rayon  $r$  et l'autre sur la longueur  $L$  (cf. Figure 3) La longueur  $L$  et le rayon  $r$  du dipôle agissent directement sur la portée de détection. En effet, plus ces paramètres sont élevés, plus nous augmentons sa portée. D'après les résultats de simulation, ces paramètres permet d'obtenir une portée de détection proche de 700 mm pour  $L=500$  mm et d'environ 400 mm pour  $L=200$  mm dans l'eau douce. Pour l'application visée dans le contexte d'un environnement karstique, nous devons minimiser la taille du dipôle afin qu'il puisse être intégré dans des capsules autonomes. Pour conclure, un bon compromis entre la taille et la distance de détection consiste à choisir  $L = 200$  mm et  $r$  entre 10 mm et 50 mm.



**Figure 3:** a) Variation de la fréquence de résonance en fonction de la hauteur du capteur ( $H$ ), pour différentes longueur ( $L$ ) ; b) Variation de la fréquence de résonance en fonction de la hauteur du capteur ( $H$ ), pour différents rayon ( $r$ )

### 3 Validation

Des mesures ont été effectuées à la source de Lauret située à environ 30 km au nord de Montpellier. La source de Lauret, qui n'est plus exploitée, provient de l'aquifère karstique de l'Hortus (Valanginien supérieur), isolé des autres aquifères de la région. Notamment la source du Lez qui est plus profonde dans les strates jurassiques alimentant plus de 400.000 habitants. Au moment de nos mesures, le débit d'eau était constant mais pas aussi fort qu'en période d'inondation, c'est pourquoi nous n'avions qu'une profondeur d'eau de 1,10 m pour effectuer nos mesures. Sur place, un analyseur de réseau vectoriel, ZNH26, a été connecté à un câble SMA de 6 m de long directement à notre dipôle (cf. Figure 4.b).

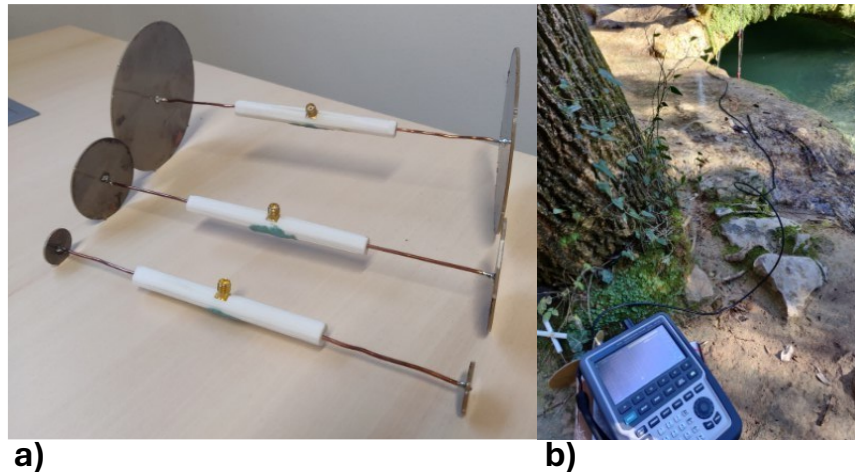


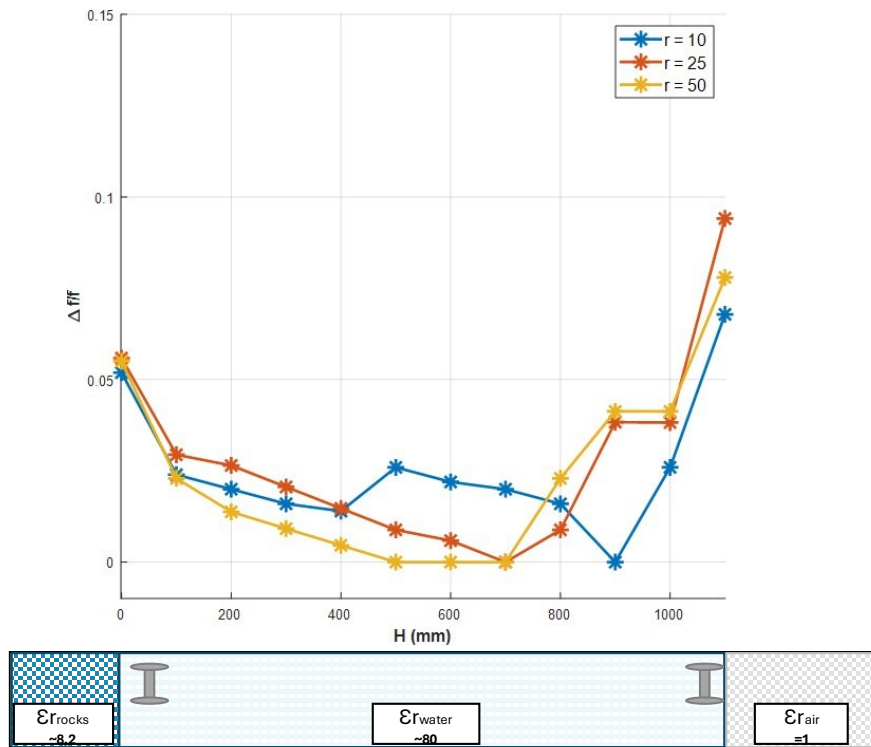
Figure 4: a) Dipôles ( $r=10,25,50$  mm ;  $L=200$ mm) ( $L$ ) ; b) Environnement de mesure

Nous avons mesuré le paramètre  $S_{11}$  de 1 à 100 MHz et avons ensuite calculé la matrice  $Z_{11}$ . (Nous avons ensuite localisé la fréquence de résonance de chaque matrice pour calculer la figure 7. Les dipôles ont été réalisés à l'aide de deux cercles découpés dans une plaque de cuivre simple face d'une épaisseur de  $35\mu\text{m}$  de cuivre. Ces deux plaques ont été soudées à deux fils de cuivre (100mm de long avec un diamètre de  $0.025\text{mm}$ ) soudés à un connecteur SMA. Afin de rigidifier les dipôles, un manchon imprimé en 3D entoure les deux fils de cuivre (cf. figure 4.a).

Il convient de noter qu'une fine couche isolante a été déposée sur les parties en cuivre. Les résultats sont en accord avec les simulations, ce qui confirme que nous pouvons détecter la proximité de roches. En effet, il y a le même comportement dans le déplacement de la fréquence de résonance de la structure en simulation et en pratique. (Figure 5 & Figure 3.a). Grâce à la symétrie du dipôle, nous sommes capables de détecter la présence d'air. Effectivement, l'eau et l'air ont une permittivité différente, ce qui nous donne la possibilité de différencier les deux matériaux dans nos mesures. Les mesures ont été effectuées avec une incertitude sur la hauteur  $H$  de  $\Delta = \pm 50$  mm, et garantissent pour un résonateur de longueur  $L=200$ mm une distance de détection comprise entre 300 et 400 mm en fonction du rayon  $r$  des électrodes.

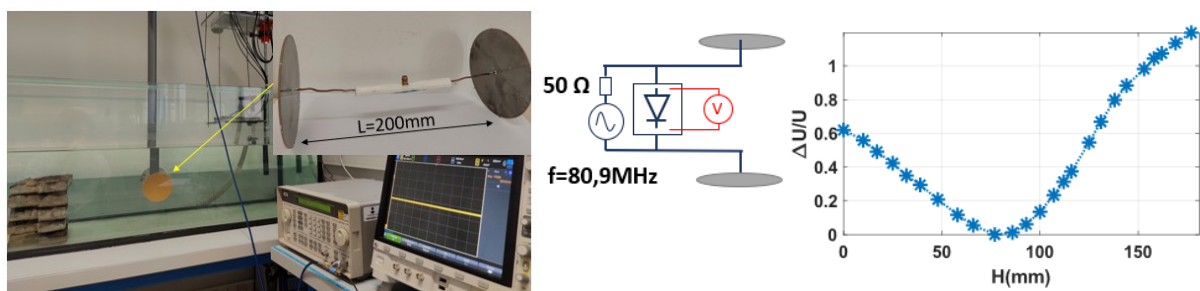
### 4 Intégration électronique

Cette section vise à proposer une électronique simple nous permettant d'intégrer la mesure de la fréquence de résonance en se passant d'un analyseur de réseau vectoriel utilisé précédemment. Les mesures ont été effectuées dans un aquarium rempli de 300 mm d'eau douce. Une méthode électronique simple a été utilisée pour enregistrer le déplacement de la fréquence de résonance. Un générateur a été utilisé pour envoyer un signal à la fréquence de résonance du capteur ( $f = 80,9$  MHz) vers un détecteur de puissance RF CPDETLS-4000. La tension aux bornes du composant a ensuite été mesurée à l'aide d'un oscilloscope (voir Figure 6). Pour appliquer ce principe dans un



**Figure 5:** Mesures de la fréquence de résonance en fonction de la hauteur du capteur ( $H$ ) pour une longueur  $L = 200$  mm et pour différentes valeurs de rayon ( $r$ )

système embarqué, nous pourrions connecter un VCO et un ADC à un microcontrôleur afin de réaliser les mêmes mesures. Dans cette expérience, nous avons mesuré la tension moyenne pour différentes hauteurs allant de  $H = 0$  mm à  $H = 180$  mm. Les résultats de simulation indiquent que la fréquence de résonance de la structure est modifiée par la présence d'un matériau présentant un contraste élevé de permittivité relative par rapport à l'eau. En générant un signal à la fréquence de résonance de la structure et en le plaçant à proximité d'un matériau, la permittivité relative de ce matériau peut être déterminée en observant le changement de fréquence de résonance de la structure et l'augmentation de tension qui en résulte. La Figure 6 montre que nous avons pu détecter la présence d'une paroi, ainsi que la table, le fond de l'aquarium et l'air.

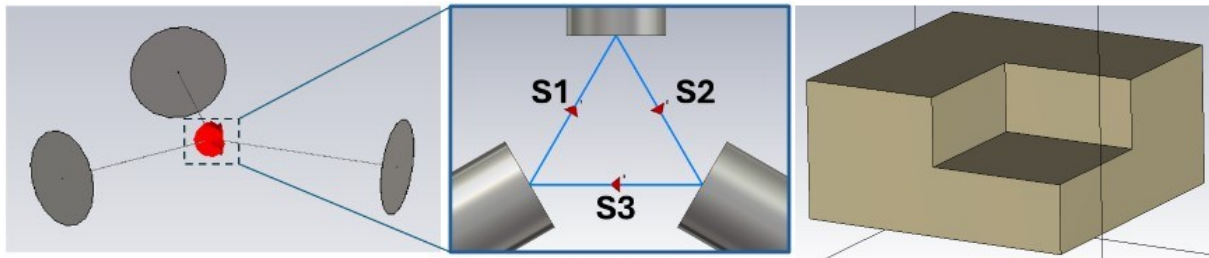


**Figure 6:** Variation relative de la tension ( $U$ ) aux bornes du capteur en fonction de la hauteur ( $H$ ) ; Electronique simple dans un environnement contrôlé

## 5 Détection d'obstacles en 2D / 3D

Les parties précédentes ont démontré la possibilité d'utiliser un résonateur pour la détection d'obstacle en champ proche. Dans cette partie nous allons essayer d'améliorer la résolution spatiale du capteur. Le premier design proposé est composé de trois branches, nommées ( $Ea$ ,  $Eb$ ,  $Ec$ ), connectées par des ports ( $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ). Nous avons réalisé des simulations pour ce design en utilisant *CST Microwave Studio* et le solveur fréquentiel, allant de 120 MHz à 170 MHz. La structure rocheuse a été modifiée pour ajouter sur  $\frac{1}{4}$  de sa surface, une marche de la

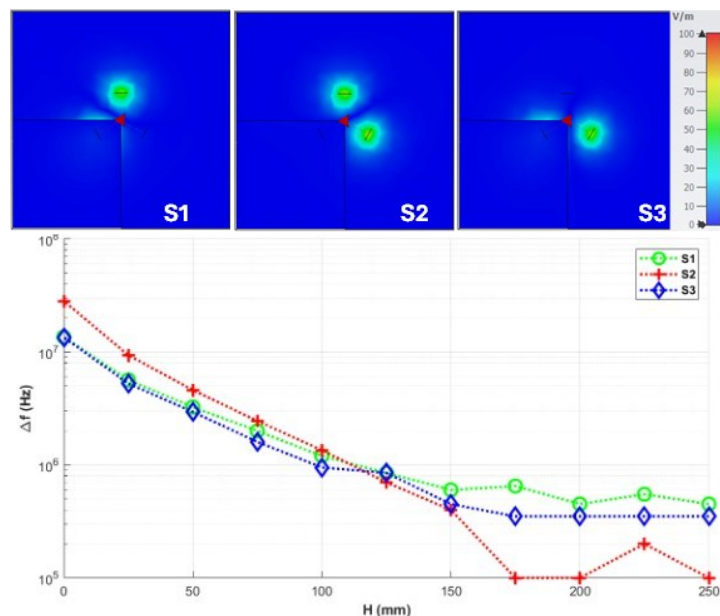
moitié de l'épaisseur du bloc de roche (cf. figure 7). Il est à noter que la fréquence de résonance de la structure va dépendre du design utilisé.



**Figure 7:** Capteur trois fils & structure rocheuse en simulation

La figure 8 montre le champ électrique généré par chaque capteur et leurs « points chauds » sur les matériaux rocheux. Pour les capteurs S1 et S3, l'une des branches se trouve au-dessus de la marche. Par conséquent, la fréquence de résonance des structures est moins influencée par la roche car le contraste de permittivité relative autour de S1 et S3 à cet endroit est plus important qu'autour de S2. En mesurant la fréquence de résonance de chaque capteur successivement, on peut extraire les courbes sur la figure 8 démontrant ainsi la détection d'une irrégularité dans une structure rocheuse.

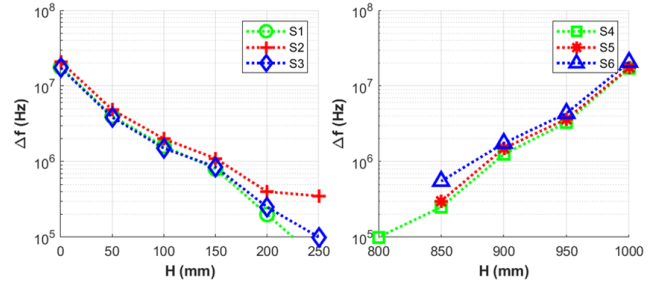
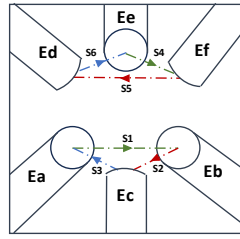
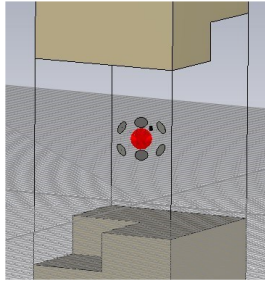
Le second design proposé est composé de six branches, nommées ( $Ea, Eb, \dots, Ef$ ), connectées par des ports ( $S1, S2, \dots, S6$ ) (cf. Figure 9). Nous avons réalisé des simulations pour ce design en utilisant *CST Microwave Studio* et le solveur fréquentiel, allant de 120 MHz à 170 MHz. Ce design nous permettrait de coupler une détection d'irrégularité surfacique ainsi qu'une détection de proximité. La figure 10 démontre le fonctionnement de ce capteur en simulation.



**Figure 8:** Capteur trois fils et visualisation du champ électrique ; Variation de la fréquence de résonance pour les trois ports en fonction de la hauteur ( $H$ )

## 6 Conclusion

Ce travail démontre la capacité à détecter des cavités et des variations dans les structures rocheuses à l'aide d'un capteur placé dans de l'eau douce. L'ajout de branches réalisé par rapport aux structures précédentes ont permis d'améliorer la résolution spatiale de notre capteur. Cependant il est à noter que la version actuelle n'est



**Figure 9:** Environnement de simulation & vue schématique

**Figure 10:** Variation de la fréquence de résonance en fonction de la hauteur (H) du capteur à 6 ports

pas intégrable pour faute de son encombrement, de plus l'ajout de branches impacte directement la distance de détection, passant d'une distance de détection de 400mm à une distance de 200mm pour le design à six branches. Une amélioration serait de trouver un design souple permettant aux branches d'évoluer sans contraindre la capsule dans l'environnement. Nous avons également démontré une méthode permettant d'intégrer nos mesures sans recourir à un analyseur de réseau vectoriel, ce qui réduit ainsi la consommation d'énergie de notre capteur et rend l'électronique intégrable. De plus, cette étude fournit des mesures fiables de la permittivité relative de différentes couches rocheuses dans la plage de 4 MHz à 20 GHz, données encore non mesurée dans le domaine. Nos travaux futurs se concentreront sur la miniaturisation du capteur, l'installation de l'électronique de conditionnement pour le capteur à six branches, et l'exploration du potentiel de catégorisation des objets présentant des permittivités variables le long du trajet de la capsule dans l'eau.

## Références

- [1] N. Goldscheider *et al.*, 'Global distribution of carbonate rocks and karst water resources', *Hydrogeology Journal*, vol. 28, pp. 1–17, Apr. 2020, doi: 10.1007/s10040-020-02139-5.
- [2] M. Alarab, 'An acoustic shield for karstic exploration with underwater robot', phdthesis, Université Montpellier, 2021. Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-03442894>
- [3] D. Modarress, P. Svitek, K. Modarress, and D. W. Wilson, 'Micro-Optical Sensors for Underwater Velocity Measurement', in *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, Apr. 2007, pp. 235–239. doi: 10.1109/UT.2007.370801.
- [4] K. Wang, L. Cui, and K. D. Do, 'An underwater electrosensory membrane bio-inspired by weakly electric fish', in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea: IEEE, Oct. 2016, pp. 4951–4956. doi: 10.1109/IROS.2016.7759727.
- [5] J. R. Solberg, K. M. Lynch, and M. A. MacIver, 'Robotic Electrolocation: Active Underwater Target Localization with Electric Fields', in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 2007, pp. 4879–4886. doi: 10.1109/ROBOT.2007.364231.
- [6] G. Baffet, F. Boyer, and P. B. Gossiaux, 'Biomimetic localization using the electrolocation sense of the electric fish', in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok: IEEE, Feb. 2009, pp. 659–664. doi: 10.1109/ROBIO.2009.4913079.
- [7] V. Lebastard, C. Chevallereau, A. Girin, F. Boyer, and P. B. Gossiaux, 'Localization of small objects with electric sense based on kalman filter', in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2012, pp. 1137–1142. doi: 10.1109/ICRA.2012.6224824.
- [8] Y. Morel, V. Lebastard, and F. Boyer, 'Neural-based underwater surface localization through electrolocation', in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2016, pp. 2596–2603. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487417.