

Antennes boucles magnétiques à 1 GHz pour lentilles de contact intelligentes

P. Salzenstein¹, A. M. Bessou¹, B. Guichardaz¹

¹ FEMTO-ST UMR 6174, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Université Marie et Louis Pasteur (UMLP), 15B avenue des Montboucons, F25030 Besançon Cedex, FRANCE
patrick.salzenstein@femto-st.fr

Résumé

Ce travail étudie la conception électromagnétique, les performances et les aspects thermiques d'antennes à double boucle micro-fabriquées destinées à des lentilles de contact intelligentes auto-alimentées. Une structure compacte à double boucle empilée, avec des boucles de 9,5 mm de diamètre, est optimisée pour la bande 900 MHz–1,1 GHz, résonnant autour de 1,01 GHz. L'antenne génère un diagramme de rayonnement large avec des directions verticales privilégiées, permettant une communication sans fil avec des appareils tels que les smartphones et les montres connectées. Son facteur de qualité (Q) d'environ 5 assure un fonctionnement à large bande tout en respectant les contraintes strictes de taille imposées par la lentille. Les analyses électriques et thermiques mettent en évidence des pertes résistives dues à l'effet de peau dans les conducteurs en or, avec une profondeur de peau d'environ 0,7 μm conduisant à une faible efficacité de rayonnement (0,02–0,71 %). Le couplage entre la grande et la petite boucle ($k \approx 0,59$) favorise la détection en champ proche et le transfert d'énergie sans fil. Malgré les limitations en matière de rayonnement, ces antennes présentent un fort potentiel pour assurer une communication fiable à courte portée dans des lentilles de contact intelligentes autonomes et biocompatibles.

1. Introduction

Suite à des travaux antérieurs [1, 2] sur la conception de lentilles de contact [3], dont l'énergie peut être fournie par la salinité des larmes [4] ou le clignement des yeux [5], ce travail se concentre sur la conception électromagnétique, et l'analyse des performances d'antennes à double boucle magnétiques, spécifiquement développées pour des lentilles de contact intelligentes auto-alimentées. La structure compacte d'antenne à double boucle est constituée d'une grande boucle d'un diamètre de 9,5 mm et d'une petite boucle de dimension inférieure, optimisées pour une radiation directionnelle dans la gamme 900 MHz - 1,1 GHz, centrée sur 1,01 GHz, adaptées à la communication sans fil avec des dispositifs externes tels que les smartphones et les montres connectées. Toutefois il y a une faible efficacité de rayonnement (0,02 à 0,71 %). Le couplage inductif entre les antennes est modéré ($k \approx 0,59$), mais adapté au capteur en champ proche et au transfert d'énergie. L'intégration de ces antennes dans des lentilles de contact montre leur potentiel pour une communication fiable à courte portée, malgré les limitations inhérentes au rayonnement, marquant une avancée significative dans le développement de dispositifs biomédicaux portables autonomes et biocompatibles.

2. Bande de fréquence d'utilisation et paramètres principaux des antennes boucles magnétiques

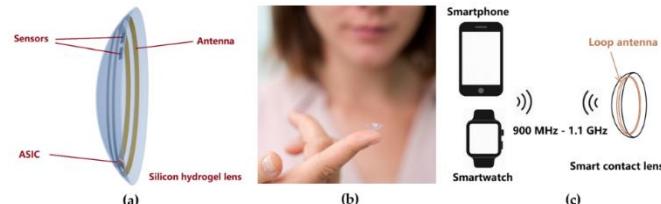


Figure 1. (a) Principe de fabrication d'une lentille de contact, avec antenne, circuit intégré spécifique (ASIC) et capteurs pour communiquer avec une montre connectée ou un mobile. (b) Cliché Freepix illustrant l'échelle et la fragilité d'une lentille de contact standard. (c) Communication entre une lentille de contact intelligente et une montre connectée et/ou un smartphone.

Table 1. Fréquences et orientation¹.

Paramètre	Détermination	Valeur – Bande passante
Fréquence opérationnelle ¹	Tx/Rx	900 MHz – 1.1 GHz
Fréquence centrale	$f = c / \lambda$	1.01 GHz
Angles préférentiels		0° – 180°

¹ Longueur d'onde estimée : $\lambda \approx 10C$ avec l'approximation d'une petite boucle. La bande passante est donnée à -3dB.



Figure 2. (a) Couplage à l'antenne émettrice-réceptrice, avec la nécessité de maintenir le champ de vision à travers la lentille. Les boucles dorées des antennes sont représentées en jaune or. Le rectangle marron en bas à droite est l'ASIC. (b) Densité de puissance reçue à 80, 70 et 60 cm.

Table 2. Résultats.

Parameter	Designation	Value (Range)
Auto-inductance de la grande antenne boucle	L_1	5.96nH
Auto-inductance de la petite antenne boucle	L_2	4.68nH
Facteur géométrique	γ	0.4
Inductance mutuelle	M	0.42nH
Coefficient de couplage	k	0.59
Effet de peau	δ	0.7 μm
Résistance du rayonnement	R_r	0.127 m Ω
Efficacité du rayonnement	η	0.020 – 0.71%

L'antenne double boucle intégrée à la lentille de contact fonctionnant vers 1 GHz et rayonnant selon l'axe vertical, cela permet une transmission vers une montre connectée située au maximum à environ 80 cm dans le même plan. Si l'ASIC applique 0 dBm (1 mW) à l'antenne, seuls 200 nW à 7 μW environ sont réellement rayonnés. L'affaiblissement en espace libre à 1 GHz sur 0,8 m est d'environ 30 dB. Des papiers de références sont donnés ici [6-10]. Parmi les problèmes potentiels : une forte dépendance à l'orientation de l'antenne, l'absorption [11] et les pertes dues à l'hydrogel de la lentille.

3. Conclusion

Le dispositif à base d'antenne reste à être optimisé. L'utilisation de polymères biocompatibles (PDMS) et de techniques avancées comme l'impression 3D ou la micro fabrication est essentielle pour intégrer antennes, capteurs et ASICs dans une lentille de 10 mm, tout en maîtrisant les effets thermiques, mécaniques et électromagnétiques. L'association de sources bioénergétiques, systèmes RF miniaturisés et matériaux optiques adaptatifs laisse entrevoir des applications en suivi de santé, amélioration de la vision et interaction en temps réel.

4. Bibliographie

- [1] M.V. Pogurmirskiy, et al, Proc. of SPIE 13524, 135240D (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3058758>.
- [2] P. Salzenstein, et al, arXiv 2025, arXiv:2505.15593. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.15593>.
- [3] Vorobev A.Y., Vorobyev K.A., Cifra. Biomedical Sciences 3(3), 1–10 (2024). <https://doi.org/10.60797/BMED.2024.3.3>.
- [4] Jeonghun Yun et al, Nano Energy 110(1), 108344 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108344>.
- [5] Pourshaban E., et al., Small 2024, 20(32), 2401068. <https://doi.org/10.1002/smll.202401068>.
- [6] Lule E., Babi T., Siwiak K., Microw. Opt. Technol. Lett. 46, 512–514 (2005). <https://doi.org/10.1002/mop.21040>.
- [7] Shastri S.P., et al, Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 8, 3496–3501 (2018). <https://doi.org/10.48084/etasr.2308>.
- [8] Q. Balzano and K. Siwiak, IEEE Trans. Veh. Technol. 36, 173–183 (1987), <https://doi.org/10.1109/T-VT.1987.2411668>.
- [9] Q. Balzano and K. Siwiak, Proc. 36th IEEE Veh. Technol. Conf., Dallas, TX, USA, pp. 15–25 (1986), <https://doi.org/10.1109/VTC.1986.1623405>.
- [10] Pfeiffer C., IEEE Transactions on Antennas and Propagation 65(4), 1642–1650 (2017). <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670532>.
- [11] Atanasova G., Atanasov N., Sensors 20(18), 5157 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20174937>.