



HAL
open science

Rétrodiffusion de cibles RF résonantes passives pour la traçabilité et pour applications capteur

Etienne Perret

► **To cite this version:**

Etienne Perret. Rétrodiffusion de cibles RF résonantes passives pour la traçabilité et pour applications capteur. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2022, 2. hal-04775568

HAL Id: hal-04775568

<https://hal.science/hal-04775568v1>

Submitted on 10 Nov 2024

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.

Applications à l'utilisation du champ rétrodiffusé par des résonateurs RF imprimables

Le 08 03 2022

Etienne Perret

Maître de conférences UGA - Grenoble INP

Membre honoraire de l'Institut Universitaire de France (IUF)

Titre :

Rétrodiffusion de cibles RF résonantes passives pour la traçabilité et pour applications capteur

Introduction

Les applications radar ont vues le jour pendant la seconde guerre mondiale et se sont progressivement répondues dans la société. Les applications radar grand public restent toutefois assez récentes avec notamment les contrôles de vitesse routier ou encore les radars de recul des voitures. A contrario elles sont très utilisées par les militaires ou plus généralement pour l'aide à la navigation aussi bien maritime que dans l'avionique. Ces utilisations ont en commun de s'appliquer à des objets encombrants le plus souvent métalliques qui se déplacent dans un virement dégagé et à de grandes distances (dizaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres) du radar à l'image d'un avion dans le ciel que l'on cherche à localiser. Toutefois dès que l'environnement de mesure est plus contraint avec par exemple plusieurs objets (pas forcément connus) proches entre eux et proche du radar et en plus de cela se déplaçant, les choses se complexifient grandement et des méthodes et équipements spécifiques doivent être utilisés. Ceci explique sans doute en partie pourquoi jusqu'à il y a quelques années, peu de travaux ont porté sur l'utilisation de l'approche radar pour applications grand public comme celles qui consisteraient à chercher à identifier un objet pour de la traçabilité de marchandises ou simplement pour mesurer une grandeur physique comme la température par exemple.

Une manière de répondre à la problématique soulevée précédemment, à savoir utiliser une approche radar dans un environnement contraint où se trouvent des objets inconnus, à faible distance du lecteur, potentiellement en mouvement, est d'utiliser une cible radar spécifique, comportant une signature RF reconnaissable qui va être positionnée sur les objets à tracer, ou à monitorer. Dans ce cas cette cible radar va jouer un rôle très important, à savoir le rôle d'un marqueur qui devra pouvoir contenir des informations fixes comme un identifiant (ID) unique mais également certaines informations qui vont être intimement liées à leur environnement direct pour réaliser une fonction capteur. Ces étiquettes auront un signal électrométrique rétrodiffusé reconnaissable et qui va pouvoir être séparé des signaux réfléchis par les autres objets environnants.

Principes de l'approche radar basée sur une cible passive spécifiquement conçue pour servir de traceur RF

Alors que les développements actuels en communications sont poussés par les avancées technologiques en lien avec la production de puces électroniques toujours plus performantes, et pour certaines intégrant davantage de fonctionnalités, il peut paraître surprenant de retourner le problème

en se demandant ce qui est possible de faire avec des dispositifs sans puce. En effet, la question peut être la suivante : peut-on réaliser des systèmes d'identification ou des capteurs sans fils basés sur une étiquette comportant aucun composant électronique ? Quel est la quantité d'information, la sensibilité que l'on peut obtenir ainsi que la distance de lecture ? Est-ce utilisable en environnement réel pour des applications de la vie de tous les jours ?

Ces questions peuvent paraître anachroniques, en effet alors que l'on cherche à mettre toujours plus de transistors sur une surface toujours plus petite, il peut paraître étrange de chercher à faire des systèmes sans aucune puce, avec une simple étiquette comportant des motifs conducteurs. Dernier cela, en plus de la motivation purement intellectuelle, il y a également une considération écologique qui redistribue les cartes et nous impose à repenser les choses sous un autre angle. Pourrions-nous tagger l'ensemble de nos colis (on parle de 100 milliards d'unités expédiés par an dans le monde, ce qui ne représente qu'une partie des objets taggués) avec des tags RFID, c'est-à-dire des étiquettes qui contiennent chacune une puce en silicium ? On note également que ces tags ont dans l'immense majorité vocation à être utilisés une seule fois, c'est-à-dire sont à usage unique...

Intéressons-nous au principe de fonctionnement d'une solution sans puce. Comme on peut le voir sur la figure 1, le fonctionnement repose sur une approche radar où l'on va retrouver un lecteur avec un fonctionnement proche de celui d'un radar, à savoir capable d'émettre une onde électromagnétique et de récupérer le champ rétrodiffusé par la scène située en face des antennes. Pour des questions notamment de réglementation, un radar impulsif est privilégié. En effet, dans ce cas il est possible de respecter le gabarit d'émission réglementaire tout en bénéficiant d'une large bande de fréquence (typiquement de 3.1 GHz à 10 GHz) indispensable pour l'application (voir figure 1a). Si on ne prend pas en compte la réglementation, une architecture de lecteur de type radar à saut de fréquence (Stepped-Frequency Continuous-Wave Radar) que l'on retrouve dans les analyseurs de réseaux vectoriels (ARV), équipements RF très présents dans les laboratoires, permet de réaliser la fonction de lecture souhaitée (voir figure 1b).

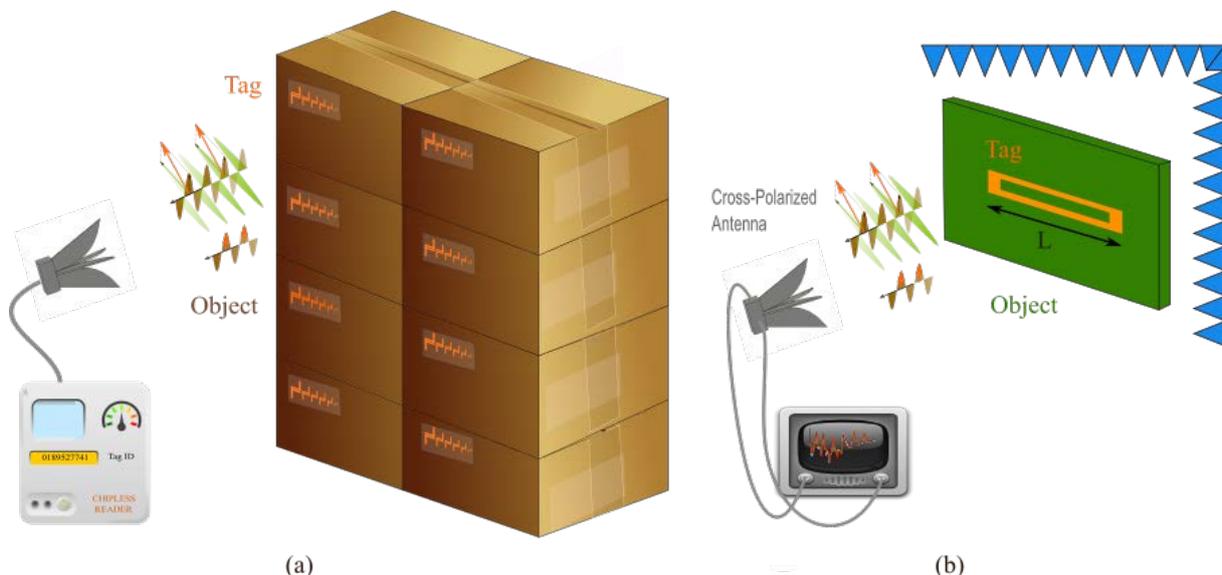


Fig. 1 – Mise en œuvre pratique d'un système de détection basé sur une approche radar de type chipless RFID. a) Application à l'identification d'objets en environnement réel. b) Application à la mesure de grandeurs physiques en environnement maîtrisé.

Applications à l'utilisation du champ rétrodiffusé par des résonateurs RF imprimables

En plus de la partie émission et réception, le lecteur dispose d'une partie calcul qui va traiter le signal réceptionné afin de décoder l'identifiant du tag ou réaliser l'extraction d'une grandeur physique. Dans la mesure où les tags sont dimensionnés pour résonner dans la bande de fonctionnement du lecteur, une partie significative du post-traitement repose sur l'idée de séparer le signal utile (celui du tag) du signal total dont ce dernier a le plus souvent une amplitude bien plus importante. Côté étiquette (ou tag) l'objectif est d'avoir plusieurs très bons résonateurs (voir figure 2) avec des facteurs de qualité supérieurs à 100 de manière à attribuer à chaque résonateur une bande de fréquence relativement étroite (de l'ordre de 80 MHz). De plus, dans la mesure où cette capacité à bien résonner est directement liée au travail de conception de la forme des motifs, ceci signifie que l'on ne va pas retrouver ces caractéristiques au niveau des objets du quotidien. Aussi ce caractère résonnant va permettre de reconnaître et donc d'isoler la présence du résonateur dans le signal rétrodiffusé et à partir de là, d'en déduire l'information qu'il contient. Une illustration du principe de codage de l'information est sur la figure 2. En effet, on peut y voir la correspondance qu'il existe entre le spectre du signal rétrodiffusé par le tag, la géométrie de l'étiquette et l'identifiant que l'on va attacher à l'étiquette. La bande de fréquence disponible est découpée en sous bandes (12 dans l'exemple) et la présence ou non d'un pique de résonance dans une sous bande est à l'origine de l'identifiant du tag. On note sur la figure 2 la valeur binaire 1 si un pique est présent et la valeur 0 en cas d'absence ce qui permet d'avoir un identifiant sur 12 bits dans l'exemple. Comme il existe un lien direct entre une longueur du motif (notée L sur la figure 2), et sa fréquence de résonance, pour obtenir un tag avec un autre identifiant, il suffit de modifier en conséquence les dimensions spécifiques afin d'avoir l'identifiant souhaité. Ceci est illustrée figure 2b où la dimension L d'un résonateur a été réduite par rapport au tag présenté figure 2a, ce qui a donné lieu à un nouvel identifiant. On voit à travers cet exemple le lien bijectif qu'il existe entre d'un côté la géométrie du tag et de l'autre son identifiant : il est possible de générer un motif pour un ID donné, et d'effectuer le lien inverse à savoir à partir d'une onde rétrodiffusée de détecter les fréquences de résonance et d'extraire l'ID du tag.

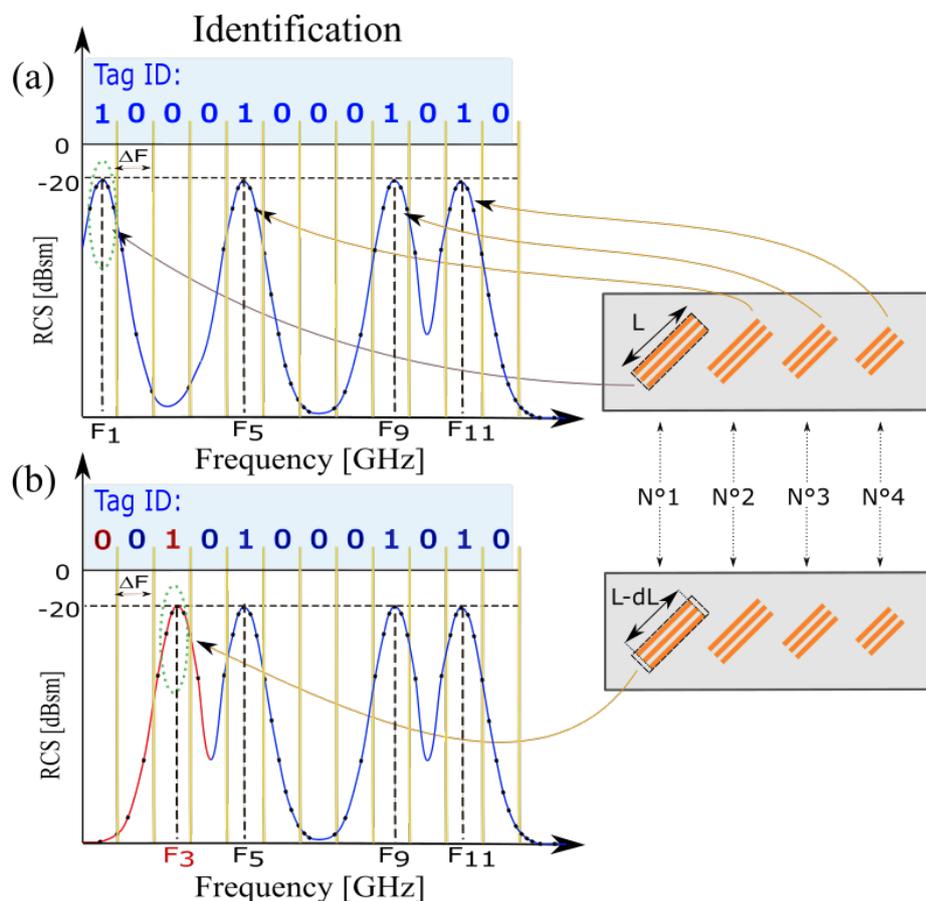


Fig. 2 – Principe de codage en RFID chipless. Association d’une géométrie à un identifiant. Signature spectrale et code correspondant pour un tag comportant, a) un motif de longueur L et un ID 100010001010, b) un motif de plus petite longueur $L-dL$, et un ID 001010001010.

Grandeurs caractéristiques intrinsèques aux tags et grandeurs mesurées

Pour coder de l’information ou mesurer une grandeur physique à partir d’une approche radar comme celle décrite figure 1, il est indispensable de pouvoir récupérer des caractéristiques intrinsèques de l’étiquette. On entend par là des données qui sont uniquement liées à l’étiquette (où à l’étiquette et son environnement en contact) et non à l’approche de mesure ou l’environnement, comme par exemple la distance entre le lecteur et le tag ou tout autres modifications de l’environnement qui n’ont aucun lien avec les résonateurs présents sur l’étiquette. Dans notre cas, les grandeurs intrinsèques qui nous intéressent sont liées au caractère résonant des diffuseurs. On les appelle les résonances naturelles complexes que sont la fréquence de résonance et le facteur de qualité de chaque résonateur.

Sur la figure 2 on peut voir le principe de codage de l’information à partir de l’acquisition du champ rétrodiffusé par la scène où l’étiquette est présente. Plus spécifiquement nous avons fait correspondre un pic à une fréquence de résonance f_{res_i} , et donc implicitement laissé penser que chaque maximum permettait de déterminer la fréquence de résonance des résonateurs présents sur l’étiquette. Ceci est parfaitement vrai dans un environnement contrôlé, où le signal mesuré ne contient que celui réfléchi par l’étiquette. Dans un environnement complexe, avec un grand nombre d’objets, dont certains mobiles, les choses sont assez différentes et nécessitent un traitement spécifique. Ainsi, dans un environnement réaliste ces pics ne se produisent pas précisément aux fréquences de résonances f_{res_i} .

Applications à l'utilisation du champ rétrodiffusé par des résonateurs RF imprimables

Des décalages incontrôlés vont apparaître et impliquent que la largeur de bande du canal de codage associé à chaque diffuseur doit être élargie pour compenser ces variations (voir figure 2). Ceci a pour conséquence de réduire la capacité de codage. Dans le cas contraire, une erreur de décodage pourrait se produire lors du processus de lecture.

En plus de l'identification, la technologie RFID sans puce est également utilisée pour de la détection sans fil, pour la surveillance de l'environnement et le contrôle industriel. Ces applications sont par exemple la détection de l'humidité [1], la détection de la température [2] et du CO₂, la détection du niveau des fluides, la détection de la permittivité de différents matériaux, la détection des déformations et des fissures, la détection des déplacements submillimétriques [3], la reconnaissance des gestes [4], la détection de la localisation 2D. La plupart de ces résultats sont obtenus en quantifiant les déplacements infimes des sommets des pics associés aux diffuseurs résonnants présents sur les étiquettes RFID sans puce (voir figure 2). L'exigence de techniques de détection robustes est donc apparue comme l'un des défis majeurs de la mise en œuvre pratique de la technologie RFID sans puce. Les techniques de détection robustes sont nécessaires notamment parce que la réponse de l'étiquette sans puce est généralement très faible par rapport à la réponse des objets inconnus environnants. De plus, l'intérêt croissant pour l'augmentation de la capacité de codage des étiquettes RFID sans puce implique la nécessité de techniques précises de détection comme évoqué précédemment. En effet, en RFID sans puce où l'information est codée en fréquence, une capacité de codage élevée implique l'augmentation du nombre des pics (associés à chaque diffuseur résonnant présent sur l'étiquette et donc aux fréquences de résonances $f_{res,i}$) dans la bande ULB (Ultra large Bande) nécessairement limitée en pratique. Cet encombrement de la bande de fréquence a pour conséquence de réduire la bande attribuée à chaque pic (noté Δf sur la figure 2) qui sert de canal de codage pour chaque diffuseur. Avec des canaux de codage trop étroits dans un environnement réel, les sommets des pics peuvent être décalés de leur position attendue, ceci en raison de la superposition des réflexions provenant de la présence d'objets inconnus autour de l'étiquette sans puce. Ces décalages incontrôlés de la position des sommets des pics peuvent entraîner une erreur de décodage pour les étiquettes sans puce à haute densité. On note également que la lecture de l'identifiant des étiquettes en technologie RFID sans puce est beaucoup plus difficile que pour la RFID UHF (ultra-haute fréquence), en raison de l'absence de modulation du signal rétrodiffusé [5].

À ce jour, la plupart des travaux scientifiques réalisés dans le domaine de la RFID sans puce sont basés sur deux mesures : la mesure du tag et la mesure à vide (c'est-à-dire en l'absence d'étiquette). Le post-traitement commence par la soustraction de la mesure de l'étiquette par celle de la mesure à vide. Dans les cas pratiques où l'environnement varie dans le temps, cette normalisation peut être très difficile à réaliser. Dans ces conditions, seule une partie du signal perturbateur va être éliminée : les signaux provenant d'objets statiques et du couplage des antennes (voir figure 3a). Aussi, un léger changement de l'angle, de la distance, ou de la taille de l'objet à étiqueter peut également produire des décalages des sommets des pics par rapport à leur position fréquentielle nominale. À proprement parler, en environnement réel, les sommets des pics que l'on peut voir sur le signal rétrodiffusé par la scène ne correspondent pas forcément aux fréquences de résonance des diffuseurs. Sans techniques robustes de détection, les valeurs extraites ne sont pas indépendantes de la configuration de mesure et sont donc enclin à des erreurs de décodage.

La technique que l'on a introduite pour répondre à cette problématique repose sur le fait que le champ rétrodiffusé par les diffuseurs des étiquettes, du fait de leur caractère résonant, vont s'étaler dans le

temps contrairement aux autres signaux issus de structures non résonantes qui vont avoir une durée très courte (noté mode de structure ou réflexions quasi-optiques, voir figure 3b) [6]. En effet, coté lecteur, on reçoit en premier ces réflexions quasi-optiques du fait de la présence d'objets à proximité du tag et le signal du tag lui va s'étaler sur plusieurs dizaines de nanosecondes (voir figure 3b). Cette durée est liée au facteur de qualité du résonateur, élément très important qui est optimisé lors de la phase que conception des motifs des étiquettes. Au niveau post-traitement, une approche consistant à représenter le signal sous une forme temps-fréquence (voir figure 3c) est particulièrement intéressante pour récupérer les informations de fréquences de résonances et de facteurs de qualité des résonateurs présents sur l'étiquette [6]. Ainsi on montre que la partie du signal retardé contient l'information sur les résonances naturelles complexes propres aux résonateurs (précisément la fréquence de résonance ainsi que le facteur de qualité) qui sont connues pour être des grandeurs intrinsèques. Comme évoqué précédemment, ceci signifie que ces grandeurs sont indépendantes de la manière dont elles ont été mesurées (type d'antenne, signaux d'excitation, distance ou orientation de l'étiquette...). Ces données sont donc de première importance pour soit coder de l'information soit récupérer une information en lien avec une modification de la géométrie de l'étiquette.

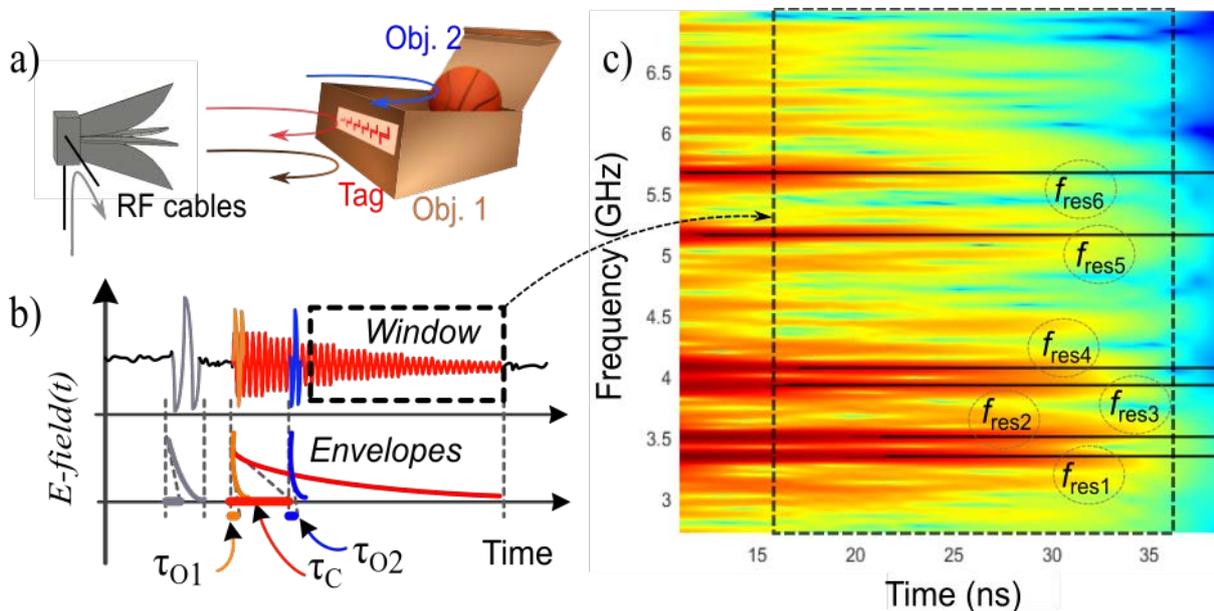


Fig. 3 – Problématique de mesure d'une approche radar en environnement réel. Extraction de la fréquence de résonance et du facteur de qualité des résonateurs, principe de séparation temporelle du signal. a) Représentation des différentes parties que composent le signal mesuré par le lecteur. b) Représentation temporelle du signal. c) Représentation temps / fréquence (spectrogramme) du signal sur lequel l'extraction des grandeurs intrinsèques du tag peuvent être réalisées.

Application à la caractérisation de grandeurs physiques

Le principe basé sur l'approche radar et sur l'utilisation d'une cible résonante très compacte comme on peut le voir sur la figure 1 permet également de mesurer des grandeurs physiques à distance. Ceci est directement applicable à la réalisation de capteur sans fil, où l'on a accès aux informations présentes au niveau de l'étiquette (voir figure 1b). Dans cette configuration, en plus de l'extraction des fréquences de résonance comme décrit précédemment, il est également intéressant de mesurer la phase du champ rétrodiffusé à ces fréquences de résonance. A partir de ces informations directement accessibles sur un ADR, il est possible d'en déduire un grand nombre d'informations.

Applications à l'utilisation du champ rétrodiffusé par des résonateurs RF imprimables

Capteurs basés sur la détection de fréquences de résonance

Si on regarde la dépendance de la fréquence de résonance f_{res} en fonction de paramètres géométriques et électriques pour un résonateur de formes élémentaires comme la boucle présentée figure 1b, on a en première approximation l'équation (1).

$$f_{res} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}(L+2\Delta L)}} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}L'}} \quad (1)$$

Où c est la vitesse de la lumière, L la longueur de la boucle (figure 1b), ΔL une grandeur caractéristique à cette forme que l'on va considérer constante pour une forme donnée et ε_{eff} la permittivité effective qui dépend notamment des propriétés électriques du substrat. Cette équation montre que si une grandeur physique modifie un de ces paramètres comme L ou encore ε_{eff} , il est possible de voir son impact directement par la lecture de f_{res} selon le principe évoqué précédemment. Pour s'assurer que la modification mesurée est liée uniquement à l'effet de la grandeur physique, on va devoir le plus souvent contraindre l'environnement de mesure comme schématisé sur la figure 1b. On pourra remonter à la valeur de la grandeur physique (et non simplement à son effet) à partir du moment où on est capable de modéliser l'effet, en faisant apparaître cette grandeur recherchée dans l'expression (1).

Prenons l'exemple de la température [2, 7]. Son effet sur la fréquence de résonance est parfaitement modélisable : une modification de température va 1) dilater les matériaux notamment modifier la longueur géométrique L , 2) modifier les paramètres électriques du substrat (partie en contact avec la boucle métallique) et donc ε_{eff} [2]. Pour simplifier, si on ne prend pas en compte le second effet (la boucle métallique est dans l'air ou de manière plus réaliste posée sur un matériau de type mousse), on obtient l'expression (2) très proche de (1), où l'on fait apparaître la variation de température ΔT et le coefficient de dilatation thermique du métal α .

$$f_{res} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}L'(1+\alpha\Delta T)}} \quad (2)$$

A partir de cette équation, deux options s'offrent à nous : 1) utiliser cette approche pour caractériser la grandeur physique α , approche très différente de celles classiquement utilisées, le plus souvent basées sur une mesure mécanique en contact. 2) Pour un métal connu, mesurer la température T en temps réel et là aussi à distance du tag [2]. On note que pour obtenir de tels résultats, il est indispensable d'être capable de mesurer de très faibles variations de fréquence de résonance. En effet, pour une variation de température ΔT d'une longueur de ligne L , on obtient une élongation égale à $dL=L\alpha\Delta T$. Une simple application numérique, en considérant $L=50\text{mm}$ (pour $f_{res}=2.96\text{GHz}$), $\Delta T=20^\circ\text{C}$, et $\alpha=17\text{E-6}^\circ\text{C}^{-1}$ (pour du cuivre) donne un $dL=10\ \mu\text{m}$ ce qui est extrêmement faible. En termes de variation de fréquence Δf occasionnée par cette variation de température (20°C), on a la relation $\Delta f = f_{res} \alpha\Delta T$ qui nous donne $\Delta f=1\text{MHz}$. Ainsi cette méthode de mesure nécessite un appareil de mesure très sensible et en contrepartie va permettre de mesurer des variations de longueur de quelques micromètres relativement à des variations de température que quelques degrés. En effet dans [2] est reporté des mesures de température en environnement réel entre 0 et 60°C avec une erreur maximale de 3°C , ce qui montre la possibilité de récupérer de manière très précise des variations de grandeurs physiques.

Ce principe de mesure peut très facilement se généraliser à l'acquisition simultanée de plusieurs grandeurs physiques en simultanée. Pour cela, il faut mettre au point un modèle (à l'image de l'équation (2)) qui relie les grandeurs physiques à considérer à la fréquence de résonance. Si par

exemple on souhaite mesurer en même temps par cette approche les variations de la température et de l'humidité (l'humidité a un effet sur la permittivité effective du substrat ε_{eff} qui est parfaitement modélisable sur une grande plage de variation), on a donc deux inconnues. Aussi il faut deux boucles de différentes longueurs L pour résoudre le problème et obtenir ainsi les grandeurs recherchées [1].

Sur ce principe, nous avons pu montrer qu'il est possible également d'extraire des informations intéressantes comme la permittivité relative ε_r des objets placés en contact avec le tag. L'idée peut là aussi est explicitée à partir de (1), en remarquant que ε_{eff} est fonction de ε_r et que pour des formes élémentaires de résonateur comme la boucle, il est possible d'avoir une expression analytique reliant les deux paramètres. Là aussi, il existe un très grand nombre d'approches pour mesurer ε_r , l'originalité de celle-ci repose sur le fait que l'extraction est basée sur une approche résonnante tout en étant à distance, c'est-à-dire sans aucun câblage. On est ainsi à mi-chemin entre une approche quasi optique (échantillon placé entre deux antennes) et l'utilisation d'une cavité résonante qui est l'approche la plus précise mais nécessite d'enfermer l'objet à caractériser dans la cavité.

Ainsi, l'utilisation de ces cibles résonantes compactes ont pu être utilisées pour répondre à un grand nombre d'applications, par exemple la réalisation de capteur d'orientation [8], l'extraction à distance (sans connecteur comme c'est traditionnellement réalisé) de paramètres électriques de ligne de transmission ou encore, elles ont pu être utilisées comme un objet de calibration pour des bancs expérimentaux de mesure de SER ou pour faire de l'authentification.

Application à la détection de gestes

Le fait de monitorer en temps réel le déplacement d'une étiquette comportant des résonateurs trouve une application directe à la détection de gestes lorsque l'étiquette RFID est tenue dans la main [4],[17]. Pour ce faire il faut combiner la détection de distances d'au moins 3 résonateurs avec de la multilatération. En effet, la multilatération est une approche bien connue pour localiser une cible, où la position d'au moins trois antennes est requise (c'est-à-dire la trilatération). Dans notre cas, la multilatération est inversée de telle sorte qu'il y a une antenne et cinq résonateurs dans la position sur l'étiquette est connue avec précision [9]. Notez qu'en théorie, trois diffuseurs peuvent suffire, mais en pratique, pour améliorer la précision, cinq ont été utilisés. A partir de là, différents gestes avec l'étiquette dans la main peuvent être reconnus [10]. Cette approche a pour elle d'être basée sur un modèle, contrairement aux méthodes classiques de type intelligence artificielle (par exemple, l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond et les réseaux neuronaux) utilisées dans la plupart des techniques de reconnaissance de gestes.

Conclusion

Le développement d'un nouveau paradigme de système de communication RF basé sur des étiquettes sans puce, sans batterie, sans composant électronique, totalement imprimables est en cours. Avec des coûts comparables à ceux d'un code à barres, cette nouvelle technologie devrait se démarquer en offrant plus de fonctionnalités que l'approche optique. Les étiquettes en papier sans puce pourraient avoir un impact considérable sur le développement du concept d'"emballage intelligent" ou de "papier intelligent".

Applications à l'utilisation du champ rétrodiffusé par des résonateurs RF imprimables

Références

- [1] F. Requena, N. Barbot, D. Kaddour, and E. Perret, "Chipless RFID Temperature and Humidity Sensing," in *2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 7-25 June 2021 2021, pp. 545-548, doi: 10.1109/IMS19712.2021.9574942.
- [2] F. Requena *et al.*, "Thermal Modeling of Resonant Scatterers and Reflectometry Approach for Remote Temperature Sensing," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 11, pp. 4720-4734, 2021, doi: 10.1109/TMTT.2021.3096986.
- [3] E. Perret, "Displacement Sensor Based on Radar Cross-Polarization Measurements," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 65, no. 3, pp. 955 - 966, 2017, doi: 10.1109/tmtt.2016.2638842.
- [4] N. Barbot and E. Perret, "Gesture recognition with the chipless RFID technology," in *2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, 19-26 Aug. 2017 2017, pp. 1-3, doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8104990.
- [5] N. Barbot, O. Rance, and E. Perret, "Classical RFID Versus Chipless RFID Read Range: Is Linearity a Friend or a Foe?," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 9, pp. 4199-4208, 2021, doi: 10.1109/TMTT.2021.3077019.
- [6] A. Ramos, E. Perret, O. Rance, S. Tedjini, A. Lazaro, and D. Girbau, "Temporal Separation Detection for Chipless Depolarizing Frequency-Coded RFID," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 7, pp. 2326-2337, 2016, doi: 10.1109/tmtt.2016.2568180.
- [7] F. Requena, N. Barbot, D. Kaddour, and E. Perret, "Contactless Characterization of Metals' Thermal Expansion Coefficient by a Free-Space RF Measurement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 2, pp. 1230-1234, 2021, doi: 10.1109/tap.2020.3010982.
- [8] N. Barbot, O. Rance, and E. Perret, "Angle Sensor Based on Chipless RFID Tag," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 233-237, 2020, doi: 10.1109/lawp.2019.2955890.
- [9] N. Barbot and E. Perret, "A Chipless RFID Method of 2D Localization Based on Phase Acquisition," *Journal of Sensors*, vol. 2018, p. 7484265, 2018/07/19 2018, doi: 10.1155/2018/7484265.
- [10] <https://www.scatterid.eu/results/>.