

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Université BLIDA 1**

Institut d'Aéronautique et études Spatiales

Laboratoire des Sciences Aéronautique

**Projet de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Aéronautique**

**Spécialité : Télécommunication Spatiale**

**THÈME :**

**Conception d'un Tag capteur RFID sans puce**

Encadré par :

- **Mr. ALLANE DAHMEN**

- **Mm. MOUFFOK LILA**

Présenté par :

- **HADJADJ SARRA**

- **DAMERDJI MOUNA ZHOR**

**Année universitaire : 2018/2019**

# *Dédicaces*

On a l'immense honneur de dédier ce mémoire :

À nos très chers parents qui étaient présents à nos côtés durant toute notre vie.

À nos frères et nos sœurs.

À nos très chers amies et collègues.

À tous nos connaissances.

À tous nos enseignants qui ont fait leurs possibles pour nous donner le maximum d'informations concernant notre étude.

À tous la promotion télécommunications spatiales « 2019 ».

## Résumé :

Actuellement, le code à barres est progressivement remplacé par des tags RFID sans puce (Radio Fréquence Identification) dites aussi « étiquettes communicantes » ayant la possibilité de stocker l'information dans une signature électromagnétique et de communiquer sans fil avec leur l'environnement ambiant. Ce projet de fin d'étude vise à concevoir un tag-capteur passif basé sur la RFID sans puce. Diverses conceptions des tags codés dans le domaine fréquentiel ont été présentées. Pour chaque tag, nous avons optimisé sa géométrie et ses dimensions en faisant plusieurs simulations avec le logiciel CST afin de déterminer les paramètres de tag qui influencent le plus ses performances .Ensuite, Nous avons choisi l'un de ces tags afin de l'ajouter une fonction capteur.

**Mots-clefs :** RFID sans puce, capteur, Signature électromagnétisme, CST.

## Abstract:

Currently, the barcode is gradually being replaced by chipless RFID tag (Radio Frequency Identification) also known as "communicating tags" with the possibility of storing the information in an electromagnetic signature and communicating wirelessly with their surrounding environment. This graduation project aims to design a passive chipless sensor tag. Various designs of tags coded in the frequency domain were presented. For each tag, we optimized its geometry and dimensions by performing several simulations with the CST software to determine the tag parameters that most influence its performance and then we chose one of these tags to add a sensing function.

**Keywords :** Chipless RFID, Tag, electromagnetic signature ,CST ,sensor.

## ملخص :

حاليا تستبدل تقنية التشفير العمودي تدريجيا ببطاقات التعريف عن طريق موجات الراديو الخالية من الرقاقات الالكترونية (Chipless RFID). تعتمد هذه البطاقات على بث المعلومة على شكل إشارات كهرومغناطيسية خاصة والتواصل مع البيئة المحيطة بدون اسلاك.موضوع هذه المذكرة يقضي بصنع لاقط باستخدام تقنية التعريف عن طريق موجات الراديو بدون رقاقات الكترونية.لقد قدمنا عدة نماذج من بطاقات تعتمد على الترميز الترددي , حيث قمنا بتحسين شكل و ابعاد كل من هذه البطاقات و هذا بعد القيام بعدة محاكات باستعمال برنامج CST التي بدورها سمحت لنا بتحديد الابعاد الأكثر تأثيرا في تحسين أداءها . من ثم اخترنا واحدة من بين هاته البطاقات بهدف اثبات إمكانية تحويلها الى لاقط.

**كلمات المفتاح:**التعريف عن طريق الموجات الراديو بدون بطاقة, اشارات كهرومغناطيسية,برنامج سيياستي , لاقط.

### Table des matières

Résumé.....	2
Table de matières.....	3
Liste des Figures.....	5
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations.....	8
Introduction générale.....	9

### Chapitre 1 : L'état de l'Art de la technologie RFID

1.1. Introduction .....	12
1.2. Historique de la RFID .....	12
1.3. La technologie RFID classique.....	13
1.3.1. Infrastructure de la technologie RFID classique .....	14
1.3.2. Principe de fonctionnement d'un système RFID classique.....	14
1.3.3. Les différentes classes de la technologie RFID .....	15
1.4. La technologie RFID sans puce .....	17
1.4.1. Fonctionnalités de base d'un système RFID sans puce.....	17
1.5. L'utilisation de la technologie RFID dans l'aérospatial.....	18
1.6. Conclusion.....	20

### Chapitre 2 : Techniques de codage et structures des tags RFID sans puce

2.1 Introduction .....	22
2.2 Les techniques de codage.....	22
2.2.1 Les techniques temporelles .....	23
2.2.1.1 Les tags temporels.....	23
2.2.1.2 Codage temporel .....	25
2.2.2 Les techniques fréquentielles .....	25
2.2.2.1 Les tags fréquentsiels .....	25
2.2.2.2 le codage fréquentsiels .....	26
2.2.2.2.1 codage d'amplitude .....	26
2.2.2.2.2 codage en phase .....	26
2.3. critères de performance du codage .....	28
2.4. les tags temporels et les tags fréquentsiels.....	28

## Table des matières

---

2.5.	La structure de tag codé dans le domaine fréquentiel .....	29
2.5.1.	résonateurs dipole court-circuit.....	29
2.5.2.	Résonateur en C .....	30
2.5.3.	Critères de performances d'un résonateur.....	31
2.5.4.	Association de plusieurs résonateurs.....	31
2.5.4.1.	Tag à 10-C .....	32
2.5.4.2.	Le tag double C .....	34
2.6	la fonction capteur dans les tags RFID sans puce .....	35
2.6.1.	Fonctionnalisation de tags RFID sans puce pour la réalisation de capteurs .....	35
2.7	Conclusion .....	36

### Chapitre 3 : conception et simulation

3.1	Introduction.....	38
3.2	Simulation des tags RFID sans puce.....	38
3.3.	Les structures simples des résonateurs ... ..	39
3.4.	Les tags RFID sans puce.....	42
3.4.1.	Tag à 5 C avec arrangement vertical et horizontal.....	42
3.4.2.	le tag double C.....	45
3.4.3.	Tag en L .....	48
3.4.4.	Tag RFID sans puce à base des résonateurs en forme de T .....	51
3.5.	capteur à base de la technologie RFID sans puce .....	54
3.5.1	La fonction capteur.....	56
3.6	Conclusion.....	57

**LISTES DES FIGURES**

**Chapitre 1**

Figure 1.1: les composants d'un tag RFID avec puce..... 14  
Figure 1.2: principe de fonctionnement d'un système RFID..... 14  
Figure 1.3: La puce du tag RFID..... 15  
Figure 1.4: système RFID à tag actif..... 16  
Figure 1.5 : Système RFID à tag semi-passif..... 16  
Figure 1.6 : Système RFID à tag passif..... 17

**Chapitre 2**

Figure 2.1 : Principe de fonctionnement d'un tag Saw [14]. ..... 23  
Figure 2.2 : Principe de fonctionnement du tag de Zeng et al [16]..... 24  
Figure 2.3 : codage saut de phase, (a) Résonateur en C. (b) Variation de l'amplitude en fréquence. (c) Variation de la phase en fréquence [29]..... 28  
Figure 2.4 : Résonateur dipôle court-circuit..... 30  
Figure 2.5 : Résonateur cellule en c. .... 30  
Figure 2.6 : Tag à 5 résonateurs en C, (a) tag avec un arrangement horizontal, (b) tag avec un arrangement vertical [32]. ..... 32  
Figure 2.7 : Modèle de conception d'un tag 10-C [34]..... 33  
Figure 2.8 : Un résonateur en forme C court-circuité. .... 33  
Figure 2.9 : Illustration du principe de codage à travers l'exemple du tag en C. Le tableau de correspondances indique le lien entre les fréquences de résonance du tag et le code binaire associé, ici un code sur 6 bits [36].GRANDS ..... 35  
Figure 2.10 : Architecture de capteurs RFID sans puce basé sur l'association de résonateurs multiples dont un seul assure la fonction capteur [43]. ..... 36

**Chapitre 3**

Figure 3.1 : configuration d'une onde plane polarisé verticalement. .... 39  
Figure 3.2 : La configuration de résonateur dipôle court-circuit. .... 40  
Figure 3.3 : Réponse RCS de résonateur dipôle court-circuit..... 40  
Figure 3.4 : La configuration de résonateur en C..... 41  
Figure 3.5 : Réponse RCS de résonateur en C. .... 41  
Figure 3.6 : (a) La configuration de résonateur Cellule en C + dipôle (CCD),(b) réponse RCS de résonateur Cellule en C + dipôle (CCD)..... 42

## Table des matières

---

Figure 3.7 : Simulation d'un tag 5C ; (a) La configuration de Tag 5c vertical, (b) réponse RCS de Tag 5c vertical. ....	43
Figure 3.8 : La configuration de Tag 5c horizontal. ....	44
Figure 3.9 : La réponse RCS de Tag 5c horizontal. ....	44
Figure 3.10: Simulation d'un tag 5C ;(a) Tag RFID sans puce 5C ID 11010, (b) réponse RCS de tag RFID sans puce 5C ID 11010. ....	46
Figure 3.11: Configuration et structure du tag double C. ....	47
Figure 3.12 : La réponse RCS de tag double C. ....	47
Figure 3.13: SER simulée sous CST du tag en double C pour différentes longueurs de Court-circuit L1. ....	48
Figure 3.14 : SER simulée sous CST du tag en double C Pour différentes longueurs de Court-circuit L2. ....	47
Figure 3.15 : SER simulée sous CST du tag en double C pour différentes longueurs de Court-circuit L4. ....	48
Figure 3.16 : Configuration du tag Forme L. ....	49
Figure 3.17 : La réponse RCS de tag L. ....	49
Figure 3.18 : La réponse RCS de tag ID-00000000. ....	51
Figure 3.19 : Réponse RCS de tag ID-10000000. ....	51
Figure 3.20: Résonateur en forme de T. ....	52
Figure 3.21: Simulation d'un tag en T ; (a) configuration tag RFID en T, (b) La réponse RCS du tag. ....	52
Figure 3.22 : Simulation d'un tag en T codé 1111111111 ; (a) la séquence des bits dans le codage de tag en T, (b) réponse RCS et codage du tag. ....	53
Figure 3.23: Simulation d'un tag en T codé 1001100110 ; (a) Tag RFID sans puce 10 T avec ID 1001100110, (b) réponse RCS de tag RFID sans puce 10T ID 1001100110. ....	54
Figure 3.24: La réponse SER de tag 5c avec le substrat FR-4. ....	55
Figure 3.25: Simulation de tag 5C + dipole ;(a) tag C+dipôle, (b) repense RCS du tag. ....	55
Figure 3.26: C Tag RFID sans puce avec capacité. ....	56
Figure 3.27 : Réponses RCS d'un capteur RFID avec différents valeurs de capacité. ....	57

### LISTE DES TABLEAUX

#### CHAPITRE 1

Tableau 1.1 : Les cas d'utilisation de l'RFID liés à l'espace.....	19
--	----

#### CHAPITRE 2

Tableau 2.1 Classification de technologies RFID sans puce suivant les techniques de génération des données ou de l'identifiant avec quelque exemples des tags .....	22
---	----

#### CHAPITRE 3

Tableau 3.1 : Dimensions des résonateurs et fréquences de résonance associées. Les longueurs L1 à L5 et les fréquences théoriques F1 à F5 sont extraites à partir de la caractéristique du résonateur C liant la fréquence de résonance avec la longueur de la fente L. Les fréquences obtenues en simulations sous CST pour les topologies verticales et horizontales des Fig. 3.7(b) et 3.9 sont également données.....	44
Tableau 3. 2 le lien entre les fréquences de résonance du tag et le code binaire associé. ....	49
Tableau 3. 3 les longueurs des résonateurs de tag L. ....	50
Tableau 3. 4 les fréquences des résonances de tag L. ....	50
Tableau 3. 5 Les dimensions de deux résonateurs extérieurs 1 et 2.....	52

**LISTE DES ABRIVIATIONS:**

**DCS** : Densité de codage surfacique .

**DSC** : Densité spectrale de codage.

**EPC** : Electronic Product Code..

**IFF**: Identification Friend and Foes.

**ID**: Identification.

**OOK** : On Off Keying.

**PPM** : Pulse Position Modulation.

**RFID**: Radio frequency identification.

**RF**: Radio frequency.

**RCS**: Radar cross section.

**SAW**: Surface Acoustic Wave.

**CRLH**: Composite Right Left Handed.

## Introduction générale

Les technologies d'identification ont fortement modifié les modes d'achat, de suivi des marchandises et les services. Le code à barres en est une bonne illustration inventé en 1949 et exploité industriellement à partir de 1974, il tient aujourd'hui encore le haut de la pyramide dans le monde de la traçabilité des marchandises où il a été le moteur d'un marché de la distribution qui est devenu planétaire. Aujourd'hui le code à barres est visible sur chaque produit acheté et permet de remplacer dans certains cas le traditionnel billet de train ou le ticket de cinéma. Ceci est vrai qu'il soit imprimé sur du papier ou visible sur le l'écran d'un smartphone.

Les technologies d'identification par radiofréquence RFID font aujourd'hui l'objet d'un engouement sans précédent. La RFID (*Radio Frequency IDentification*) est basée sur l'échange d'informations véhiculées par des ondes électromagnétiques entre une étiquette, ou encore notées « *tag* » et un lecteur. Actuellement, cette technologie est en plein essor sur le plan économique. Leur essor reste cependant freiné par le coût unitaire d'un tag, notamment si on le compare au système d'identification mondial de référence qu'est le code à barres. En effet, dans certaines applications, les objets à identifier peuvent parfois avoir un prix unitaire inférieur au prix d'un tag RFID. Pour ces raisons, les chercheurs sont passés à une autre branche de la RFID qui se situe en termes de performance et d'application à la frontière entre le code à barres et la RFID conventionnelle qui est la RFID sans puce.

L'objectif de ce travail est de réaliser un tag RFID sans puce à une haute capacité de codage avec une surface réduite, et l'imprimer sur des matériaux à faible coût, afin de diminuer le coût unitaire du tag. Aussi, de montrer comment il est possible d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires à un simple tag RFID sans puce et réaliser des tag-capteurs.

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier chapitre est un état de l'art de la technologie RFID, qui présente les éléments et composants constituant un système RFID, ainsi que ses différentes classes. Il présente aussi les applications de cette technologie dans le domaine aérospatiale.

Le deuxième chapitre introduit des critères de performances qui permettent de juger de l'efficacité de codage d'un dispositif suivant la bande passante occupée et la surface requise, différentes techniques de codages sont présentées et comparées.

Le troisième chapitre présente la simulation sous le logiciel CST MICROWAVE STUDIO SUITE de différents tags sans puces avec différents capacités de codages ainsi

différents niveaux de complexité. Enfin, on aborde la manière d'ajouter la fonction capteur sur le tag RFID sans puce.

# **Chapitre 1 : L'état de l'Art de la technologie RFID**

### 1.1. Introduction

Ce chapitre présente en premier lieu un état de l'art sur la technologie RFID avec ses différentes classes. Chaque classe vise une certaine application allant de la simple identification jusqu'à fournir des données physiques du milieu environnant dans lequel est placé le tag, et cela grâce à la fonction capteur. Cette fonction peut être réalisée sans capteur physique réduisant ainsi le coût du tag capteur au minimum, d'où l'intérêt porté aux tags capteurs sans puce.

### 1.2. Historique de la RFID

Les technologies de communication d'aujourd'hui deviennent de plus en plus performantes tout en devenant de plus en plus simples notamment en termes d'ergonomie, de commodité d'usage et simplicité d'utilisation. A ce titre, les technologies sans fil sont très attractives et de ce fait font l'objet de beaucoup de développements. L'invention de la technologie RFID est à l'origine d'une véritable révolution dans l'environnement des technologies d'interactions actuelles. En 1945, Léon Theremin a inventé un dispositif d'espionnage, appelé « the thing », pour l'Union Soviétique qui assure la fonction d'un microphone sans fil transmettant un signal acoustique sur une porteuse [1]. Les ondes acoustiques font vibrer une membrane intégrée dans une cavité électromagnétique couplée à une antenne de type monopole. Ainsi en présence d'onde sonore il y a vibration de la membrane ce qui conduit à une modulation de la réflexion du monopole et donc la transmission de l'onde sonore comme signal modulant une onde RF incidente sur « the thing ». Bien que « the thing » soit avant tout un dispositif d'écoute clandestine, pas un tag d'identification, il est sans doute l'ancêtre des tags modernes de la technologie RFID. Il est aussi totalement passif et intègre une fonction capteur.

Une autre technologie utilisant le principe de communication par ondes réfléchies est apparue durant la deuxième guerre mondiale. Il s'agit du transpondeur IFF (Identification Friend and Foes), inventé au Royaume-Uni en 1944 par Robert Watson-Watt [2]. Il a été très largement exploité par les alliés durant la Seconde Guerre mondiale pour identifier les avions amis des avions ennemis. L'IFF est encore utilisé par la plupart des aéronefs à ce jour.

Le premier travail théorique explorant le principe de la RFID fut publié en 1948 par Harry Stockman dans un article IRE intitulé "Communication au moyen de puissance réfléchie" [1]. Stockman a conclu son papier par "... un travail de développement et de

recherche considérable doit être fait avant que les problèmes fondamentaux de la communication par puissance réfléchie soient résolus et que le domaine des applications utiles soit exploré". Mario Cardullo (U.S. Patent 3,713, 148 en 1973) était le premier vrai ancêtre de la RFID moderne; en développant un transpondeur radio passif avec mémoire. Le dispositif originel était passif, actionné par un signal d'interrogation, a été présenté en 1971 à la New York Port Authority et à d'autres utilisateurs potentiels. Il était composé d'un transpondeur avec une mémoire de 16 bits pour une utilisation comme un dispositif de péage. Le plan d'affaires original présenté aux investisseurs en 1969 a intégré des applications dans le transport (l'identification de véhicules, le système de péage automatique, la plaque de licence électronique, le véhicule « routing »), dans les opérations de banque (le chèque électronique, la carte de crédit électronique), dans la sécurité (l'identification de personnel, les portes automatiques, la surveillance) et dans le domaine médical (l'identification, le suivi des patients) [1-3].

Une toute première démonstration de la puissance réfléchie (rétro-réflexion modulée) des tags de RFID, passifs et semi-passifs, a été exécutée par Steven Depp, Alfred Koelle et Robert Freyman au Laboratoire National de Los Alamos en 1973. Le système portatif opérait à 915MHz et utilisait les tags de 12-bit. Cette technique est utilisée par la majorité des tags UHF et micro-ondes RFID [4]. Le premier brevet à être associé à l'abréviation RFID a été accordé à Charles Walton en 1983 (U.S. Patent 4,384, 288).

Le plus grand déploiement de RFID actif est celui utilisé par le Ministère de la défense Américains. Il s'agit de tags actifs installés sur chacun du million de conteneurs maritimes qui voyagent à l'extérieur des États-Unis. Depuis le début de ce siècle et avec l'apparition de la norme EPC Global, de très nombreux développements ont vu le jour et la technologie ne cesse d'évoluer et de s'ouvrir à d'autres applications de la RFID dans de nombreux domaines de la vie quotidienne comme des applications dans les réseaux de capteurs sans fil et "Internet of Things" [4-5].

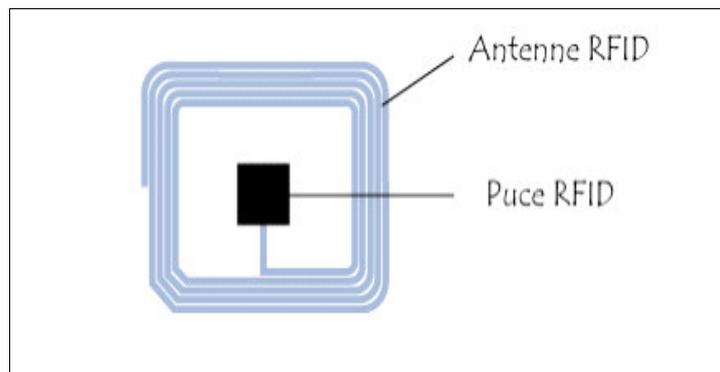
### **1.3. La technologie RFID classique**

La technologie RFID est en plein développement. Equipée d'un émetteur fixe ou mobile, d'un récepteur sous forme d'antenne et d'une puce implantée dans un dispositif appelé « Tag ». Ce type de communication par onde radio permet de faire un sondage quasi instantané de plusieurs puces. Ainsi on a accès à une identification d'un objet, de son suivi, de ces caractéristiques et on peut même suivre son cheminement.

### 1.3.1. Infrastructure de la technologie RFID classique

Un système RFID se compose :

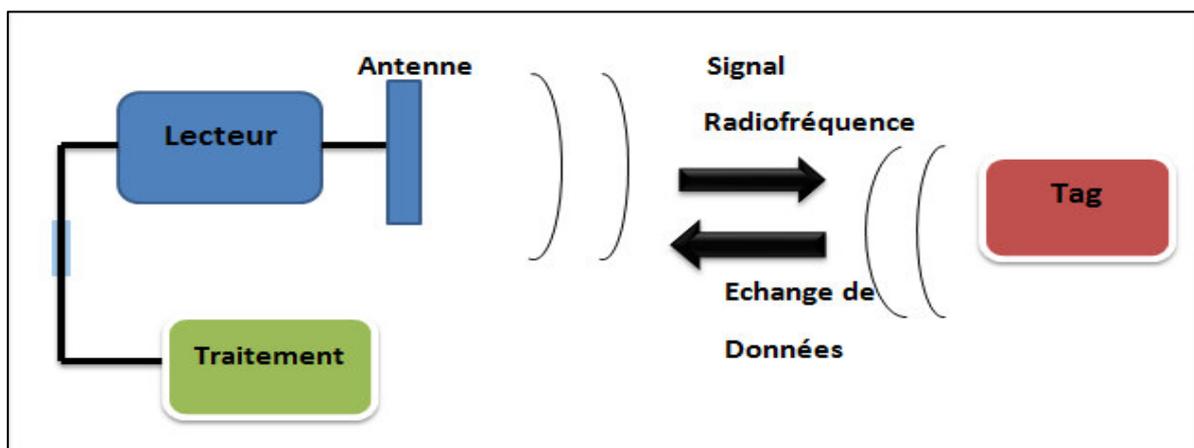
- d'une station de base ou une lecture (fixe ou mobile) : comprenant une antenne intégrée ou non (aussi appelée interrogateur).
- d'une radio- étiquette ou RFID-tag : qu'est transpondeur, dit aussi, badge RFID composé d'une puce électronique et d'une antenne RFID (figure 1.1 ).
- un ordinateur de stockage et de traitement de l'information recueillie par le lecteur.



**Figure 1.1:** les composants d'un tag RFID avec puce.

### 1.3.2. Principe de fonctionnement d'un système RFID classique

La station de base RFID « lecture » ou « élément fixe » émet des ondes électromagnétiques, qui sont reçues par l'antenne d'une ou de plusieurs tags et induisent un courant dans ces derniers. La puce du tag reconnaît le signal émis et délivre des informations sur le tag, comme illustré sur la figure 1.2.



**Figure 1.2:** principe de fonctionnement d'un système RFID.

En général, la puce du tag contient (voir figure 1.3) :

- Un circuit de récupération d'énergie réalisé à l'aide d'un pont de diodes (**a**).
- Un démodulateur asynchrone, ou détecteur d'enveloppe à diode (**b**) pour la réception des requêtes du lecteur.
- Un microcontrôleur (**C**) pour le traitement des requêtes, la cryptographie et la préparation des réponses.
- Une zone mémoire pouvant contenir l'identifiant du tag et d'autres informations spécifiques à l'application
- Un circuit électronique de commutation permettant de moduler l'impédance complexe du tag afin de générer une réponse.

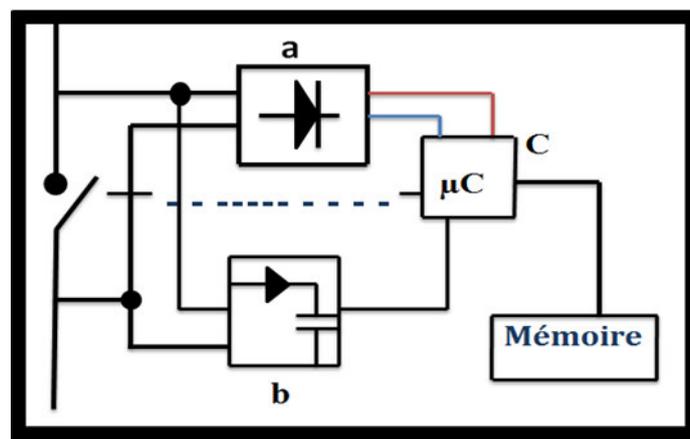
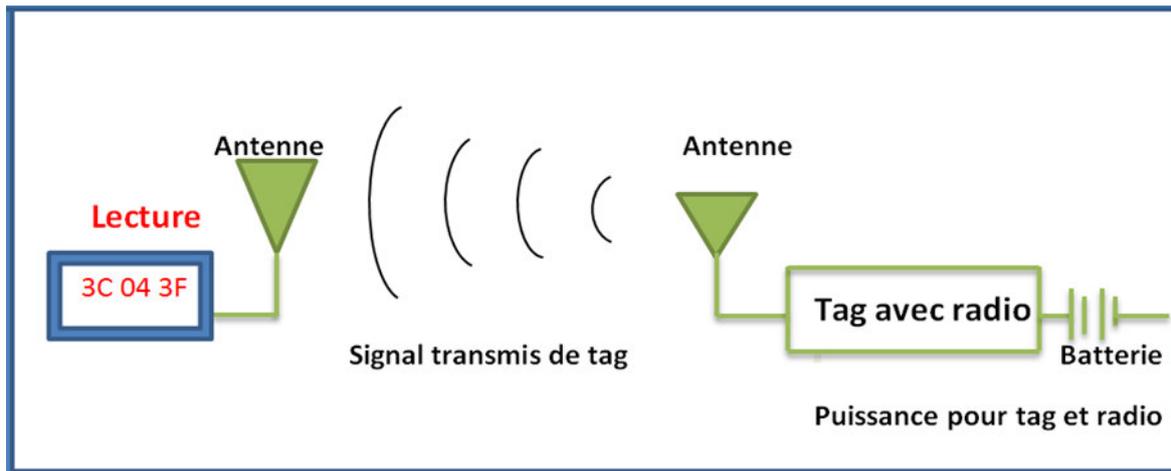


Figure 1.3 : La puce du tag RFID.

### 1.3.3. Les différentes classes de la technologie RFID

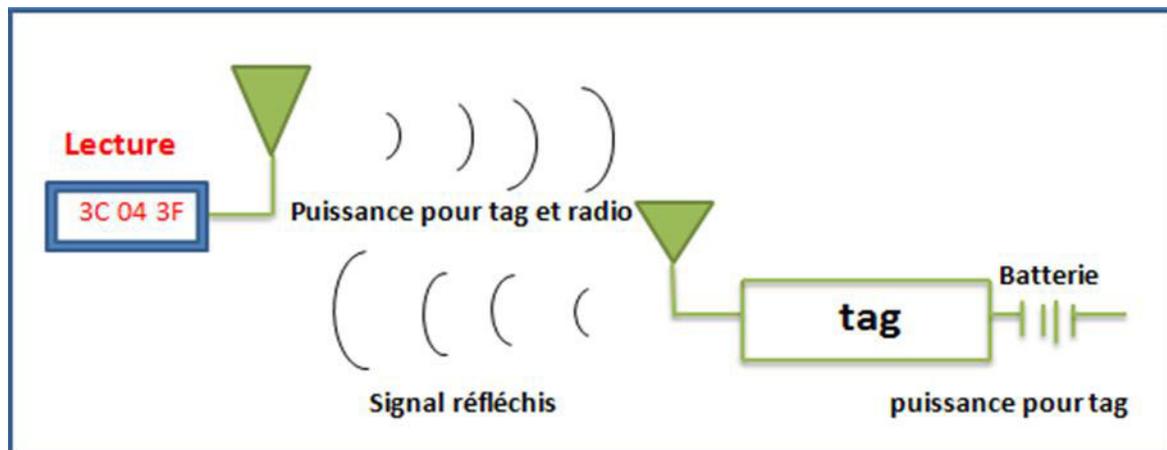
Les tags RFID peuvent être regroupés selon leur consommation d'énergie en des tags passifs ; actifs et semi-passifs :

- Les tags RFID actifs : ils sont reliés à une source d'énergie embarquée (pile, batterie...) comme le montre la figure 1.4. Les inconvénients de ce type de tag est son coût, sa durée de vie limitée, ainsi que l'autonomie de la source d'énergie.



**Figure 1.4:** système RFID à tag actif.

- Les tags RFID semi-passifs : ils possèdent une batterie nécessaire uniquement à l'enregistrement et au maintien de l'information sur le tag comme l'illustre la figure 1.5. Ils communiquent avec l'interrogateur en mode passif. Ces tags sont par exemple utilisés pour le suivi de produits sous température contrôlée et enregistrent la température de la marchandise à intervalle régulier.



**Figure 1.5 :** Système RFID à tag semi-passif.

- Les tags RFID passifs : ne possèdent pas de source d'énergie. Ils utilisent l'énergie propagée par le signal radio de l'émetteur (lecture) comme le montre la figure 1.6 . Comparé au tag actif, le tag passif est moins coûteux et peut être de plus petite dimension et sa durée de vie est presque illimitée.

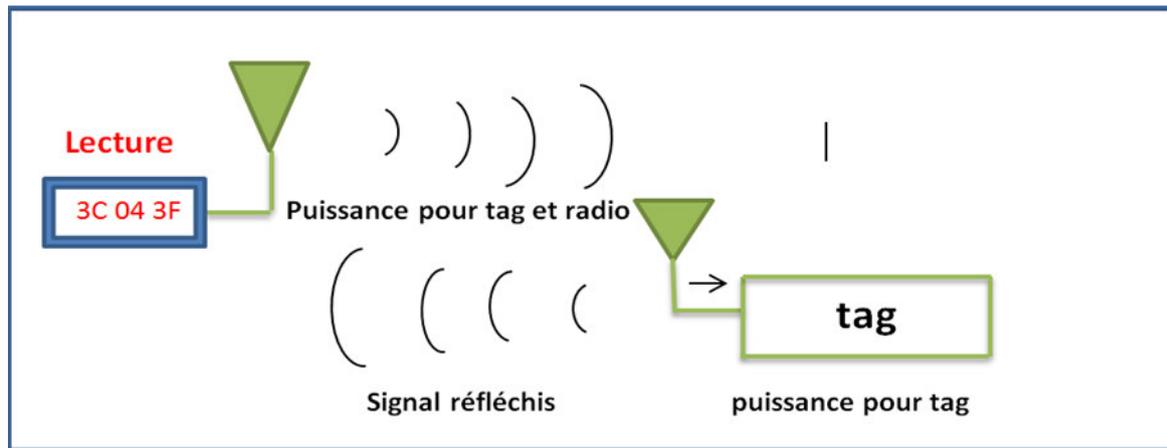


Figure 1.6 : Système RFID à tag passif.

### 1.4. La technologie RFID sans puce

Malgré les avantages apportés par la technologie RFID classique, leur essor est freiné par le coût unitaire du tag. Une solution intéressante qui permet d'allier la fonctionnalité de la RFID telle que l'identification au faible coût est apparue sous le nom de RFID sans puce.

La RFID sans puce est une discipline de recherche récente. Les premiers articles mentionnant la conception de tags sans puce sont apparus en 2002 [6] avec les tags à Onde Acoustique de Surface, connue également par SAW (Surface Acoustic Wave). Toutefois, il faut noter que le concept de base fut élaboré un demi-siècle plus tôt avec l'un des tous premiers systèmes RFID imaginés par Léon Theremin en 1945. Ce dispositif décrit précédemment dans ce chapitre constitue probablement le premier système RFID sans puce.

La RFID sans puce est une variante technologique qui constitue une rupture avec le schéma de communication utilisé par les systèmes d'identification radiofréquence. En effet, dans un système RFID sans puce, le tag n'embarque aucun composant électronique. Aucun protocole de communication n'est donc envisageable à la différence des technologies RFID conventionnelles. Cette technologie peut être très robuste sur le plan mécanique. Elle est capable, par exemple, de fonctionner dans des environnements d'utilisation très sévères soumis à de fortes variations de température, à des rayonnements intenses, ou encore à des décharges électrostatiques.

#### 1.4.1. Fonctionnalités de base d'un système RFID sans puce

Dans les tags sans puce (Chipless), l'identification (ID) est stockée sous forme de modifications physiques permanentes. Ces modifications sont uniques pour chaque tag et modifient sa réponse RF rétrodiffusé. Ceci représente la signature du tag. Pour rendre un objet

identifiable, il suffit de lui affecter un code unique. Pour cela des principes physiques basés sur l'utilisation des ondes électromagnétiques peuvent être utilisés. En effet, chaque objet matériel peut être identifié à distance car il génère un signal sous la forme d'une signature électromagnétique qui lui est propre lorsqu'il est soumis à une onde incidente. Plusieurs techniques sont utilisées, afin d'augmenter la capacité de codage et donc d'identifier plusieurs objets. On les présentera en détail au deuxième chapitre.

Il convient de noter que les informations stockées dans les tags sans puce ne peuvent pas être modifiées une fois qu'elles ont été fabriquées, car leurs caractéristiques physiques sont permanentes. Néanmoins, la RFID sans puce peut fournir une alternative peu coûteuse, ce qui pourrait augmenter les capacités d'identification automatique.

Contrairement à la RFID avec les tags à puce, il n'existe pas de norme standard pour la RFID sans puce.

### 1.5. L'utilisation de la technologie RFID dans l'aérospatial

L'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) utilise la RFID pour capturer les données relatives aux vibrations et mesurer les émissions acoustiques lors des lancements des navettes spatiales et des fusées au Kennedy Space Center (KSC) de Floride et à la base aérienne de Cape Canaveral, située à Patrick Air Force (L'Amérique). Des tags- capteur RFID actives sont utilisées pour transmettre des données à un lecteur et à un PC, où l'information peut être examinée afin de déterminer les niveaux sonores et de vibration générés par un lancement de fusée. La solution consiste en des tags RFID actifs de 2,4 GHz avec des capteurs intégrés qui capturent les vibrations qui se produisent à différents endroits autour d'un pas de tir au décollage, qui transmet en utilisant le protocole d'interface aérienne IEEE 802.15.4 (le même standard sur lequel ZigBee est basé) à une distance pouvant atteindre 2 kilomètres (1,2 miles). L'étiquette reçoit les données du capteur et les transmet à 256 fois par seconde [7].

On utilise aussi la technologie RFID pour activer ou faciliter les systèmes automatisés de gestion des stocks pour les missions spatiales. Le tableau 1.1 résume les domaines d'application communs, ou scénarios d'utilisation [8].

**Tableau 1.1** : Les cas d'utilisation de l'RFID liés à l'espace.

<b>Logistique de la chaîne d'approvisionnement au sol (équipement de vol et composants)</b>	Assurer le suivi de la gestion des stocks au sol et des articles de vol utilisés pour soutenir une activité de l'agence ou mission
<b>Transferts d'approvisionnement de véhicules spatiaux</b>	Suivi de haute précision des fournitures transférées d'un véhicule à l'autre
<b>Équipement/consommables audits des stocks</b>	Assurer une gestion automatisée des stocks et les niveaux d'approvisionnement en consommables/équipements
<b>Localiser l'équipement et articles de consommation</b>	Fournir la localisation des consommables/équipements à réduire au minimum les tâches liées à l'équipage
<b>Identification des pièces et association</b>	Reconnaissance immédiate d'une multitude de pièces et association à la ou aux bases de données pertinentes
<b>Inventaire des échantillons scientifiques</b>	Offrir des capacités de " sac et d'tag " pour déterminer l'inventaire et l'acquisition d'échantillons scientifiques localisation
<b>Suivi des produits à usage unique</b>	Automatisation de la décrémentation des articles de l'inventaire

Cette technologie est très employée dans le domaine d'aéronautique, les cellules des aéronefs d'aujourd'hui s'appuient sur les technologies RFID pour surveiller des milliers de pièces d'avion et renforcer la transparence tout au long de la chaîne d'approvisionnement [9].

Chaque avion a une histoire, tout comme chacune de ses parties. Et ce n'est pas seulement enregistré pour la postérité. Lorsqu'il s'agit de l'entretien d'un aéronef, la capacité d'examiner l'origine et l'historique des réparations d'une pièce donnée est essentielle pour assurer sa qualité et sa sécurité. Dans le passé, ces dossiers exhaustifs étaient tenus à jour au

moyen de documents papier ou électroniques qui étaient compilés manuellement. Aujourd'hui, les pièces critiques sont surveillées à l'aide d'un tag RFID qui peut stocker les informations nécessaires suivantes :

- Enregistrement de naissance, y compris le numéro de série et les informations relatives à la fabrication.
- Enregistrement en cours, y compris les détails de reconfiguration.
- Historique de l'entretien, y compris les changements dans la garde/lieu et l'utilisation/consommation.
- Notes supplémentaires ajoutées par le technicien.

Les techniciens peuvent lire et mettre à jour les tags à l'aide d'un scanner portable, les données recueillies étant automatiquement ajoutées à une base de données centralisée et des rapports en temps réel générés. Contrairement aux systèmes manuels ou même à codes à barres, la RFID simplifie ce processus en permettant aux tags d'être scannés sans vision directe du tag et de lire plusieurs tags à la fois, ce qui est particulièrement utile pour les composants difficiles d'accès. Les fournisseurs des tags innovants optimisent également les tags RFID pour l'aérospatiale afin de réduire l'encombrement au sol, d'augmenter la portée de lecture et de résister aux effets des surfaces métalliques et aux conditions environnementales difficiles. A titre d'exemple, BAE Systems, une société mondiale du secteur de l'aérospatiale, de la défense et de la sécurité, a lancé une solution RFID dont l'objectif est triple : automatiser le réapprovisionnement des stocks, gérer l'état et la localisation des biens et des outils, et donner une visibilité aux travaux en cours [10].

### **1.6. Conclusion**

L'état de l'art sur la technologie RFID présenté dans ce chapitre nous a permis d'introduire les différentes familles de technologies RFID, et de comprendre le fonctionnement de chacune d'elle. Suivant les applications, les solutions peuvent être différentes. Les tags RFID sans puce se sont imposés en tant que technologie d'identification compétitive et fiable. En effet, ils présentent l'avantage d'être à faible coût de réalisation, et à capacité de mémoire qui peut être élevée.

**Chapitre2 : Techniques de codage et structures  
des tags RFID sans puce**

### 2.1 Introduction

Ce chapitre traite de la problématique majeure en RFID sans puce, en l'occurrence le codage de l'information dans un tag RFID. En effet, augmenter les capacités de codage est un enjeu majeur qui permettra d'imposer la technologie sans puce comme une réelle alternative aux technologies d'identification actuelles que sont le code à barres et la RFID conventionnelle. Nous introduirons des critères de performances qui permettront de juger de l'efficacité de codage d'un dispositif suivant la bande passante occupée et la surface requise. Différentes techniques de codages seront présentées et comparées. Ensuite, nous allons présenter plusieurs géométries et les éléments clés qui peuvent composer un tag RFID sans puce.

### 2.2 Les techniques de codage

Deux approches peuvent être distinguées dans la technologie RFID sans puce, suivant les techniques de génération des données ou de l'identifiant (voir tableau 2.1) :

- L'approche temporelle : la charge complexe connectée à l'antenne est généralement constituée d'une ligne de transmission sur laquelle des éléments parasites sont positionnés (capacités...) pour créer des réflexions à des instants précis. La position de chaque réflecteur varie d'une configuration à une autre pour réaliser un codage PPM (Pulse Position Modulation).
- L'approche spectrale ou fréquentielle consiste à coder l'information en créant des pics de résonance à certaines fréquences. Elles nécessitent donc un spectre très large. Le codage utilisé est une transposition du codage OOK (On Off Keying) ou PPM (Pulse Position Modulation) temporel dans le domaine fréquentiel. Ainsi la présence (ou l'absence), ou encore le décalage d'une résonance à une fréquence particulière constitue un élément de codage.

**Tableau 2.1 :** Classification de technologies RFID sans puce suivant les techniques de génération des données ou de l'identifiant avec quelques exemples des tags.

Tag RFID sans puce		
Fréquentielle	Temporelle	
Multi LC Multi résonateur	Imprimable	Non imprimable
	Ligne à retard	Saw

## 2.2.1. Les techniques temporelles

### 2.2.1.1. Les tags temporels

La fonctionnalité des tags RFID sans puce dans le domaine temporel est évaluée par la transmission d'une impulsion du lecteur et en écoutant le signal réfléchi par l'étiquette. Les données sont codées en envoyant des impulsions adjacentes à différents intervalles de temps. [12] [13].

#### ➤ Les tags SAW (Surface Acoustic Wave)

Les premières conceptions de tag sans puce sont composés d'une antenne, souvent de type dipôle, directement connectée à un transducteur électro-acoustique (Interdigital Transducer ou IDT). Le principe de fonctionnement est le suivant :

Une onde sous la forme d'une impulsion électromagnétique courte est envoyée par le lecteur et elle est ensuite captée par l'antenne du tag. L'onde devenue acoustique, se propage ensuite à vitesse lente dans le substrat. Des réflecteurs sont positionnés tout au long de son chemin afin de générer des réflexions en direction de l'antenne. Ces réflexions seront donc converties en ondes électromagnétiques et ré-rayonnées vers le lecteur (figure 2.1).

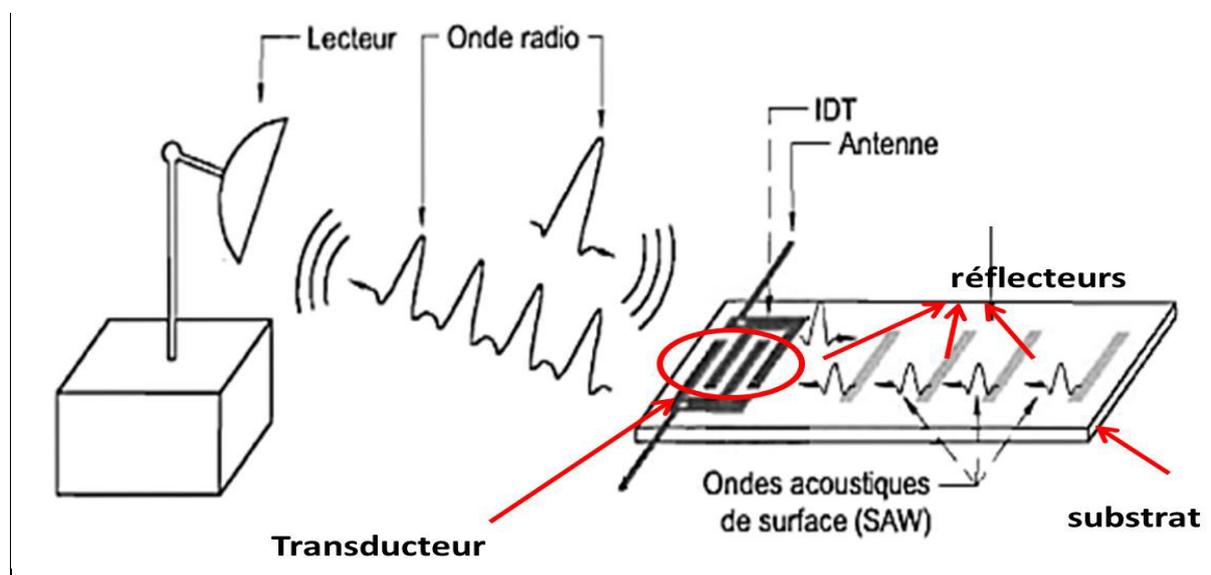


Figure 2.1 : Principe de fonctionnement d'un tag Saw [14].

### ➤ Tag à ligne de transmission

D'autres solutions, encore au stade de recherche [15], sont proposées dans le domaine temporel. Le principe de lecture reste identique dans le sens où le lecteur envoie une onde ultra courte et le tag répond par des réflexions multiples comme un écho radar. Leur principe de fonctionnement se base sur des lignes à retard de type micro-ruban, ces lignes forment des méandres de manière à réduire au maximum la surface totale du tag. Le lecteur excite le tag par une impulsion courte, l'impulsion d'interrogation est reçue par le tag et réfléchi à différents points le long de la ligne, créant de multiples échos.

Le retard entre les échos est déterminé par la longueur de la ligne de retard entre les discontinuités (voir figure 2.2), chaque réflexion occupe un slot de 2 ns, donc un espacement minimum de 180 mm entre chaque discontinuité est nécessaire pour éviter le recouvrement des pulses. Néanmoins, les premiers essais de cette technologie sans puce ont montré que seulement 4 bits de données peuvent être encodés avec succès, ce qui montre le potentiel limité de cette technologie [16].

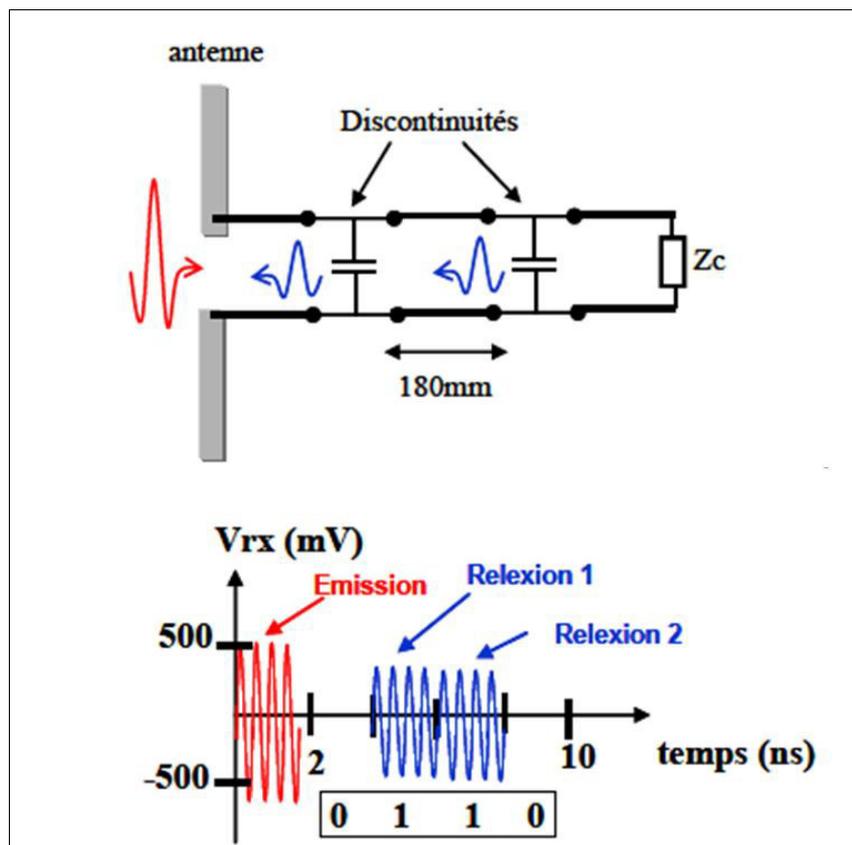


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement du tag de Zeng et al [16].

### 2.2.1.2 . Codage temporel

Dans les systèmes de communications classiques, c'est l'évolution du signal en fonction du temps qui est utilisée pour coder de l'information. C'est notamment le cas pour la RFID classique qui utilise des modulations en amplitude et en phase en fonction du temps.

#### ➤ Modulation tout ou rien (OOK)

La modulation OOK est considéré comme la méthode de données la plus simple. Dans ce cas-ci, la présence d'un signal dans une durée de temps prédéterminée représente la logique 1, alors que son absence est considérée comme logique 0.

#### ➤ Modulation de position d'impulsion (PPM)

Dans le cas d'un codage du type modulation de position d'impulsion ou PPM, il s'agit de changer la position temporelle d'une impulsion dans une fenêtre donnée. Ce type de codage se veut être plus étalé dans le temps qu'un codage du type OOK pour une capacité équivalente. Par contre il présente l'avantage de nécessiter un nombre plus faible de réflecteurs. Ceci se traduit par des pertes d'insertion moins élevées. Car chaque discontinuité à l'origine d'une réflexion induit des pertes. Les tags SAW utilisent ce principe de codage.

Pour calculer le nombre de combinaisons que l'on peut obtenir, on utilise l'équation (2.1) dans le cas d'un codage PPM classique, et l'équation (2.2) pour le codage PPM étendu en cas d'absence de pic. La durée d'un symbole doit être détectable par le système de lecture qui va fixer la résolution temporelle  $dt$ . Le nombre de combinaisons que l'on peut obtenir est donc lié à la fenêtre d'observation  $\Delta T$  et à la résolution temporelle  $dt$  [13].

$$N = \left[ \frac{\Delta t}{dt} \right]^k \quad (2.1)$$

$$N = \left[ \frac{\Delta t}{dt} + 1 \right]^k \quad (2.2)$$

## 2.2.2 Les techniques fréquentielles

### 2.2.2.1 Les tags fréquentiels

La seconde approche utilisée s'appuie sur la signature fréquentielle du tag pour coder les informations. Contrairement aux tags temporels les informations contenues dans les tags fréquentiels sont basées sur une variation d'amplitude ou de phase en fonction de la fréquence et non plus en fonction du temps. Ces tags sont entièrement imprimables, robustes, disposent

de capacité de données supérieure à celle des autres tags sans puce, et peuvent être fabriqués à faible coût.

### 2.2.2.2 Le codage fréquentiel

#### 2.2.2.2.1. Codage d'amplitude

Dans le domaine fréquentiel, il est possible de coder des informations en s'intéressant aux variations en fréquence de l'amplitude de l'onde réémise vers le lecteur. ceci est possible en utilisant des éléments résonants près d'une ligne [17][18][19] ou encore en jouant sur la fréquence de résonance de dipôles constitués en réseaux [20][21]. Les codages envisageables sont similaires à ceux utilisés dans le domaine temporel à la différence près que nous n'allons plus parler de pulse dans le temps mais de résonance dans le spectre.

L'exemple le plus traditionnel est le codage en fréquence pour lequel chaque bit codé correspond à la présence ou l'absence d'un pic à une fréquence donnée du spectre. Chaque pic étant associé à un résonateur physique, on a donc une efficacité de codage de 1bit par résonateur. Ce codage a l'avantage d'être simple et robuste en raison du contraste entre les deux états possible de chaque symbole [22]. Pour des raisons d'encombrement, nous ne pouvons cependant incorporer qu'un nombre limité de résonateurs dans un tag de la taille d'une carte de crédit et il n'est donc pas possible d'atteindre 128 bits avec ce type de codage. [22]. La formule (2.3) ci-dessous peut être utilisée pour calculer la capacité de codage d'un tel dispositif [23] :

$$N = 2^{\frac{\Delta f}{df} + 1} \quad (2.3) [23]$$

Avec  $N$  le nombre de combinaisons,  $\Delta f$  la fenêtre d'observation et  $df$  la résolution temporelle. Dans le cas du codage PPM fréquentiel, la fréquence d'apparition du pic est liée à une des longueurs des résonateurs. Pour une longueur variable, on peut considérer que le pic peut prendre des valeurs discrètes correspondant à  $F_0 + k \cdot \delta F$ , ou  $\delta F$  est la résolution fréquentielle. La résolution fréquentielle  $\delta F$  caractérise le plus petit espacement en fréquence que l'on est capable de distinguer entre deux pics successifs en mesure. En pratique,  $\delta F$  dépend de la sélectivité du résonateur, de la précision de conception, mais également des conditions d'application. Si l'on dispose d'une plage de fréquence  $\Delta F$  pour le codage, le nombre d'états différents que peut coder le résonateur est  $N = \frac{\Delta F}{\delta F}$ . L'efficacité de codage dans ce cas est alors de  $\log_2(N)$  bits par résonateurs [24].

### 2.2.2.2.2. Codage en phase

Le codage en phase peut apporter une meilleure fiabilité pour la détection des tags sans puce. En outre, une densité de codage par unité de surface plus importante peut être obtenue.

#### ➤ Allure de phase

Dans un travail réalisé par Mukherjee [25], il a été montré qu'il est envisageable et particulièrement intéressant de coder l'information sur la variation de la phase de l'onde en fonction de la fréquence. Pour cela une approche de codage en phase basée sur l'utilisation d'une charge complexe placée au niveau de l'antenne a été développée. Le système de lecture permet de remonter à cette charge complexe en fonction de l'évolution en fréquence de la phase. C'est donc la charge complexe qui joue ce rôle d'identifiant unique. Le codage dans ce cas se fait sur l'évolution globale de la phase en fonction de la fréquence. Dans ce travail, il est montré que 4 charges différentes produisent 4 profils de phase différents.

Pour remonter au nombre de combinaisons possibles il faudrait définir une résolution minimale et borner les différents paramètres de la charge complexe. Ces contraintes sont déterminées par les précisions de fabrication du tag et le système de lecture.

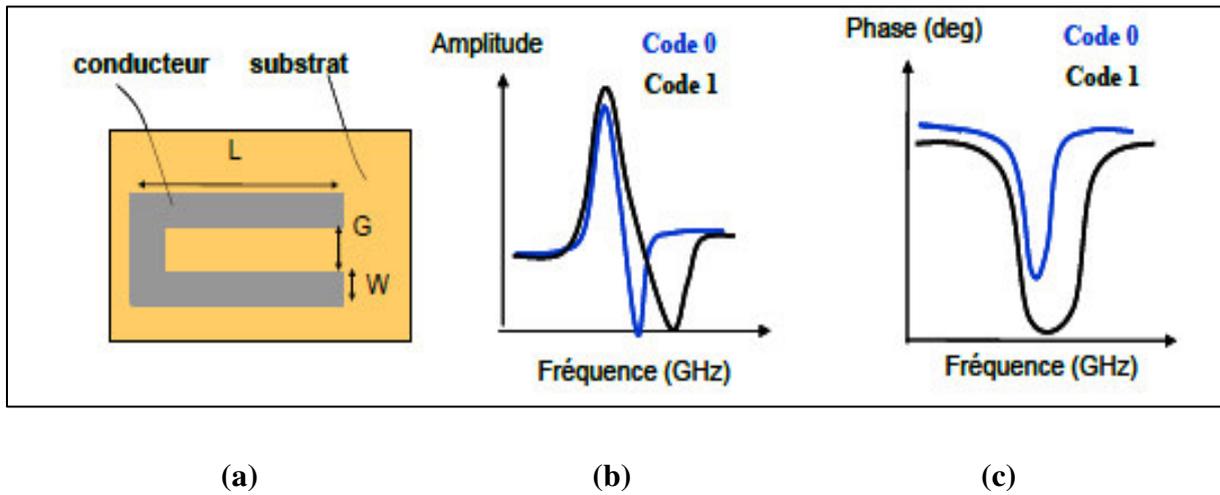
#### ➤ Saut de phase

Un autre design utilisant la phase pour coder des informations a été proposé dans [26]. Dans ce cas, il s'agit de moduler la valeur du déphasage pour des fréquences précises. Une analogie peut être faite avec un codage de type OOK ou PPM. Pour calculer le nombre de combinaisons avec ce principe de codage nous pouvons utiliser l'équation (2.4) avec  $\varphi_{max}$  et  $\varphi_{min}$  les limites hautes et basses de la phase,  $d\varphi$  la résolution du système de détection et  $k$  le nombre de fréquences utilisées [27].

$$\left[ \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{d\varphi} \right]^k \quad (2.4)$$

L'ensemble de chercheurs Vena, Perrete et Tedjini [28], ont démontré qu'il était possible d'utiliser la largeur d'un saut de phase en fréquence pour coder des données. En effet, le résonateur en C présenté à la Fig. 2.3 (a) se comporte comme un déphaseur large bande avec une bande passante qui peut être modulée en fonction du gap  $g$  (voir Fig. 2.3(a)). L'allure de l'amplitude et de la phase du signal réfléchi sont présentées Fig. 2.3 (b) et (c) pour deux valeurs de gap  $g$  différents. Dans le cas le plus simple, une bande passante étroite donne un état logique '0', tandis qu'une bande passante plus large donne un état logique à '1'. Dans cette étude, il est démontré qu'un quatre largeurs de bandes passantes peuvent être

discriminées sans erreur pour remonter à l'identifiant du tag, ce qui conduit à une efficacité de codage de 2 bits par résonateur.



**Figure 2.3 :** codage saut de phase, (a) Résonateur en C. (b) Variation de l'amplitude en fréquence. (c) Variation de la phase en fréquence [16].

### 2.3. Critères de performance du codage

Comme nous l'avons vu, il y a plusieurs paramètres à prendre en compte pour définir l'efficacité de codage d'un dispositif sans puce. L'idéal étant de coder le maximum d'informations dans une surface la plus réduite possible et nécessitant la plus faible largeur de bande fréquentielle. Si l'on considère la capacité de stockage de données, la bande de fréquence, et les dimensions du tag, il est clair que ces trois paramètres sont intimement liés, même s'ils décrivent différents aspects. La réalité veut donc que des compromis soient faits entre ces différents critères de performance qui changent d'une application à l'autre. De là, il est intéressant d'établir des facteurs de mérite ou critères de performance afin d'évaluer les différents designs entre eux et de choisir le plus adapté en fonction des divers compromis à prendre en considération. C'est pourquoi comme nous l'avons vu, il est intéressant d'introduire les deux critères suivants :

- La Densité de Codage Surfaccique (DCS) en nombre de bits par  $\text{cm}^2$ .
- La Densité Spectrale de Codage (DSC) en nombre de bits par GHz.

Une fois ces deux critères définis nous pouvons comparer différents designs de tags sans puce codés selon une approche fréquentielle.

### 2.4. Les tags temporels et les tags fréquentiels

Le problème de ces tags est le principe de codage utilisé, ces tags codent l'information en fonction de la position d'une impulsion dans le temps ou de sa présence. Pour séparer

suffisamment deux positions temporelles de telle manière que les signaux réfléchis ne se recouvrent pas, il est nécessaire d'ajouter des lignes à retard entre chaque discontinuité. Le plus petit retard à créer est fonction de la largeur d'impulsion du signal émis. Ainsi pour une impulsion de 1 ns de largeur, un retard supérieur à 1 ns doit être créé pour séparer deux réflexions. Pour augmenter le nombre de positions temporelles, il faut donc soit augmenter le nombre de tronçons de ligne à retard soit diminuer la largeur de l'impulsion, donc nous allons rencontrer les problèmes suivants :

- L'augmentation du nombre de tronçons de lignes conduit à une surface de tag plus importante. De plus, à chaque nouvelle discontinuité, l'amplitude du signal décroît ce qui rend doublement difficile l'augmentation de la longueur de la ligne.
- Une impulsion très courte donne une densité spectrale de puissance très étalée dans le spectre fréquentiel. Cependant, la diminution de la largeur d'impulsion n'est pas chose facile à réaliser en pratique. De plus elle augmente considérablement le coût du système de lecture de tags sans puce.

Des équipes de recherche travaillant dans ce domaine ont d'ailleurs cherché à diminuer le nombre de tronçons de lignes et leurs tailles en combinant une technique de codage QPSK (améliorant ainsi l'efficacité de codage) avec l'utilisation de lignes CRLH qui permettent de véhiculer des ondes lentes [29]. Malheureusement cette architecture reste trop complexe, et très délicate à réaliser. De plus, les dimensions nécessaires sont imposantes (20 cm de long), le tout pour coder 6 bits. Elle n'est donc absolument pas réaliste d'un point de vue pratique et non compétitif sur le plan économique.

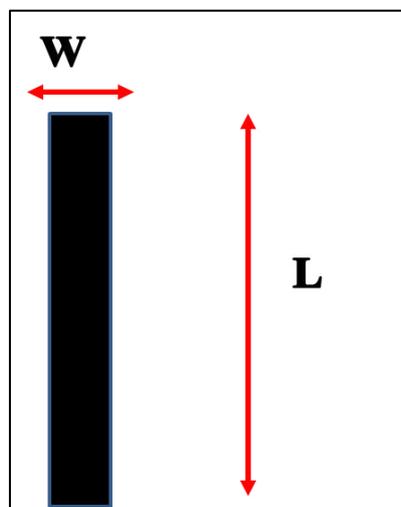
Pour répondre aux verrous identifiés concernant la mise en place de la technologie sans puce, il faut s'orienter vers le design de tags sans puce codés dans le domaine fréquentiel. En effet, dans la littérature, et contrairement aux tags temporels, des capacités de codages pouvant aller jusqu'à 35 bits sur des surfaces réduites ont été reportées.

### **2.5. La structure de tag codé dans le domaine fréquentiel**

Le composant de base de chaque tag RFID sans puce codé en fréquence est le résonateur. Afin de donner une signature électromagnétique spécifique pour chaque étiquette, il existe plusieurs formes des résonateurs. Parmi eux, le résonateur dipôle court-circuit et le résonateur en C.

#### **2.5.1. Résonateur dipôle court-circuit**

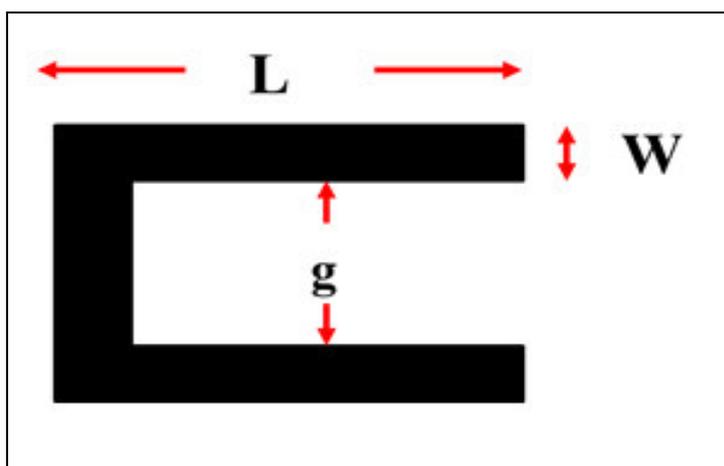
Le dipôle court-circuit est la structure la plus simple et la plus base des résonateurs, il a une réponse électromagnétique très large donc on a passé à une autre structure avec une bande plus sélective (Figure 2.4).



**Figure 2.4 :** Résonateur dipôle court-circuit.

### 2.5.2. Résonateur en C

Ce résonateur peut être vu comme un dipôle en court-circuit replié en son centre. L'intérêt de cette structure est sa capacité de résonner de manière très sélective en fréquence. Une résonance se produit lorsque le quart de la longueur d'onde du signal incident équivaut à la longueur électrique de la fente  $L$  formée par les deux bras du C, ce qui permet de réduire la dimension maximale du résonateur d'un facteur 2 par rapport au dipôle en court-circuit. De plus, en jouant uniquement sur son gap  $g$ , nous pouvons augmenter sa sélectivité. Enfin, dans le cas où le gap  $G$  est petit, sa fréquence de résonance peut être modifiée simplement en ajustant la longueur de la fente [16]. Il peut être positionné dans un arrangement vertical sans qu'il n'y ait trop de couplage entre les différents éléments.



**Figure 2.5 :** Résonateur cellule en c.

Pour estimer les performances d'un tag RFID sans puce qui sera réalisé par l'association de plusieurs résonateurs du même type, il faut définir tous les critères de performances d'un résonateur.

### 2.5.3. Critères de performances d'un résonateur

- La sélectivité ; il faut générer des résonances avec des bandes passantes très étroites, pour garantir un codage dense dans une bande passante donnée. C'est ce qui va nous permettre d'améliorer la résolution fréquentielle et donc d'augmenter la capacité de codage.
- La surface équivalente radar ou radar cross section (SER, ou RCS) ; est la fonction de la polarisation de l'onde incidente et de la direction d'observation. Elle va définir en grande partie la portée de détection du résonateur. La valeur de SER intervient directement dans le calcul du bilan de puissance pour estimer la portée de lecture.
- Le diagramme de ré-rayonnement à la résonance ; il va nous aider à vérifier que le maximum d'énergie est bien réfléchi dans une direction normale à la surface du tag.
- La longueur maximale et la surface occupée par le résonateur, doit être la plus réduite par rapport à la longueur d'onde pour assurer une densité de codage surfacique élevée.
- La position du 1er mode d'ordre supérieur ; En effet, il va définir la limite haute de la bande passante utilisable.

Concernant le codage, un résonateur peut coder qu'un seul bit, pour augmenter le nombre de bit de codage il est nécessaire d'avoir plusieurs résonateurs.

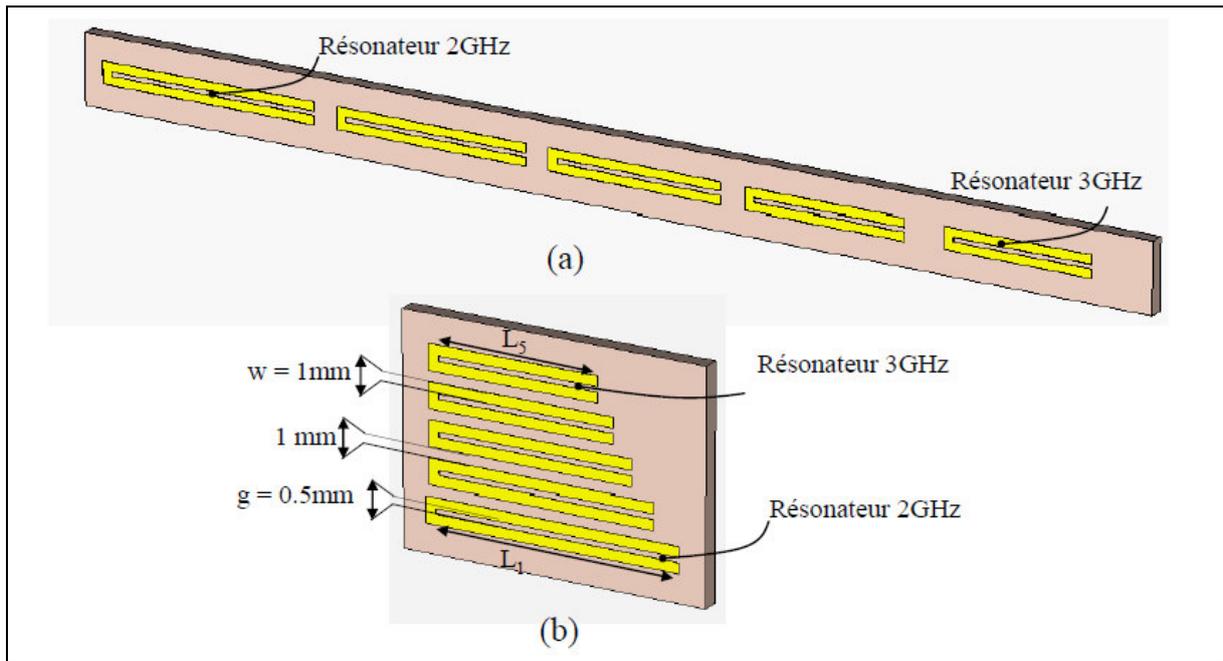
### 2.5.4. Association de plusieurs résonateurs

Avant de faire la description de quelques designs réalisés, il faut définir les méthodes d'optimisation et les règles de conception qui ont été utilisées pour converger vers la réponse électromagnétique souhaitée. En 2012, A. Vena [16] a posé les concepts de base permettant de générer une structure basée sur l'association des résonateurs identiques. Ils ont détaillé le moyen d'obtenir un modèle assez précis permettant de relier une fréquence de résonance à un paramètre physique à l'aide de deux étapes de conception :

- Une première étape consiste à considérer le résonateur seul afin d'obtenir une première caractéristique qui donnera une valeur plus ou moins précise pour chaque résonateur constituant le tag complet.
- Une seconde étape, dite d'optimisation, va permettre d'affiner la caractéristique Fréquence / paramètre(s) physique(s) en prenant en compte le couplage entre les résonateurs qui dépend de leurs dispositions et de l'écartement entre eux.

Une fois le résonateur choisi et optimisé afin de converger vers un niveau de SER et une sélectivité requise, il faut établir un lien entre la caractéristique différenciatrice dans le spectre et un ou plusieurs paramètres géométriques de la structure. Ce paramètre physique pourra être, une longueur de fente, une largeur de gap ou simplement un facteur d'agrandissement/réduction de la totalité de la structure.

Après plusieurs simulations, ils ont observé des décalages par rapport aux fréquences souhaitées. Il faut noter que ces décalages sont fortement liés à l'arrangement des résonateurs et à leur espacement. En effet, le couplage entre les différents résonateurs dévie les fréquences de résonance. La figure (2.6) présente deux exemples de tags associant plusieurs résonateurs en C.



**Figure 2.6 :** Tag à 5 résonateurs en C, (a) tag avec un arrangement horizontal, (b) tag avec un arrangement vertical [16].

#### 2.5.4.1. Tag à 10-C

La fréquence de résonance d'un résonateur en C dépend de la longueur  $L$  de la fente et de son gap  $g$ , tandis que son facteur de qualité est défini par le rapport  $L/g$  [16]. En effet, lorsque les deux bras du C sont plus proches, des lignes de champ sont plus denses de telle sorte que le facteur de qualité est augmenté. Le tag en forme de 10-C ayant 10 résonateurs est présenté à la figure (2.7) [30]. Le bit 0 peut être généré en court-circuitant le résonateur (figure 2.8). Le court-circuit consiste à joindre les bras du résonateur en utilisant le même matériau que celui utilisé pour les résonateurs [30]. Ainsi, le tag 10-C permet de générer des séquences de  $2^{10}$  bits. Chaque séquence de bits est unique pour produire un identifiant unique qui est ensuite utilisé pour marquer un objet devant être identifié à distance. Pour générer un nouveau tag ID, le résonateur 2, le résonateur 6 et le résonateur 8 du tag en forme de 10-C sont court-circuités. En conséquence, le Tag-B ID est généré, c'est-à-dire 10111101011. Le Tag-C ID est produit en court-circuitant le résonateur 3 et le résonateur 5. Le Tag-C ID a le code binaire 11010101111111. Le tag en forme de 10-C conçue à l'origine dont tous les bits sont réglés à 1.

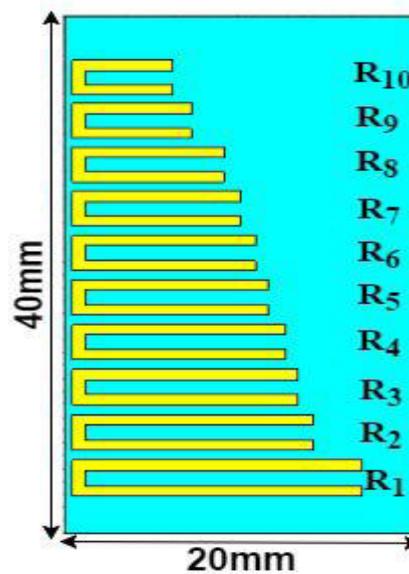


Figure 2.7 : Modèle de conception d'un tag10-C [30].

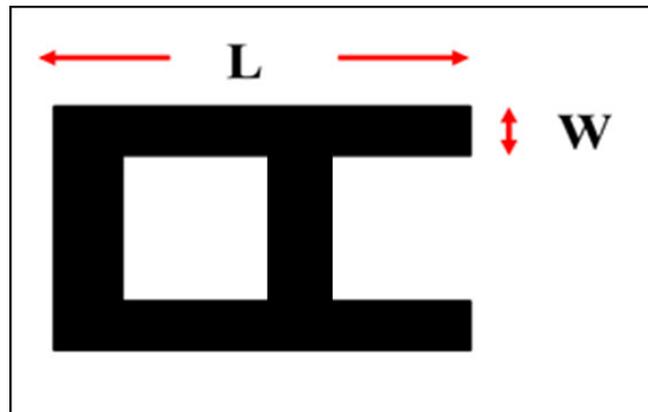


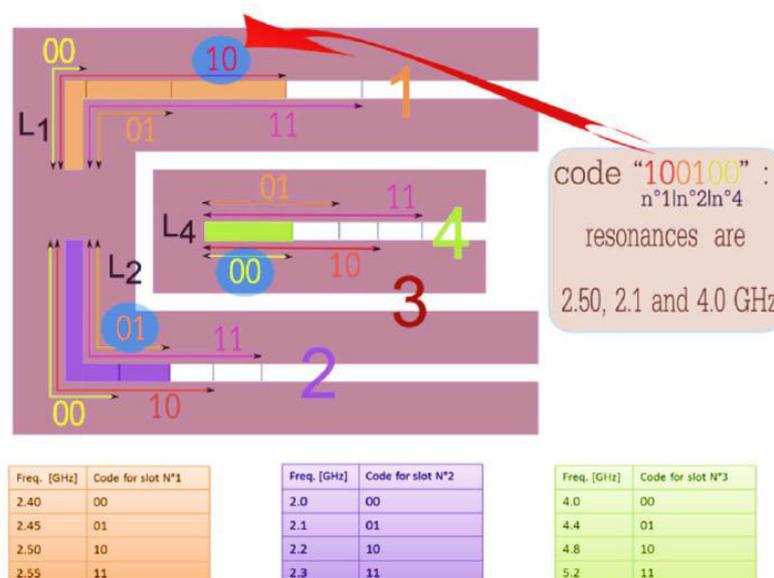
Figure 2.8 : Un résonateur en forme C court-circuité.

Pour pouvoir coder le maximum d'informations dans une surface la plus réduite possible avec la plus faible largeur de bande fréquentielle. D'autres structures imbriquées ont été suggérées telles que le tag double C.

#### 2.5.4.2. Le tag double C

Il est composé de quatre résonateurs notés 1, 2, 3 et 4 indépendants les uns des autres (figure 2.9). Des court-circuits permettent d'ajuster la longueur des trois fentes L1, L2 et L4 et donc les fréquences de résonance. L'intérêt d'une telle structure repose sur le fait que les résonances sont découplées les unes des autres, bien que les fentes soient très proches. Cette absence de couplage permet de contrôler indépendamment chaque fréquence de résonance et donc de coder un nombre important d'informations, le tout sur une surface réduite à 1.5 cm × 2 cm.

Intéressons-nous à la récupération de l'information contenue dans le tag à partir de sa signature EM. Pour remonter à l'information du tag, le signal rétrodiffusé est récupéré par le lecteur est traité. Ensuite, une correspondance entre ces valeurs physiques et un code binaire (l'identifiant du tag) est définie, comme le montre la figure (2.9). Un tableau permet d'associer à chaque combinaison de fréquences une combinaison de zéros et de uns, cette dernière constituant le code binaire du tag. Elle illustre ainsi le principe de codage que l'on peut mettre en œuvre pour relier la signature au code binaire. Dans la mesure où le tag admet trois fentes totalement découplées, on peut coder de cette manière un total de 6 bits, deux bits par fentes. A titre d'exemple, si l'on cherche à coder l'identifiant 110110, conformément au tableau de correspondance, il suffit de faire résonner la fente n°1 à 2,55 GHz et les fentes n°2 et 4 respectivement à 2,1 et 4,8 GHz.



**Figure 2.9 :** Illustration du principe de codage à travers l'exemple du tag en C. Le tableau de correspondances indique le lien entre les fréquences de résonance du tag et le code binaire associé, ici un code sur 6 bits [31].

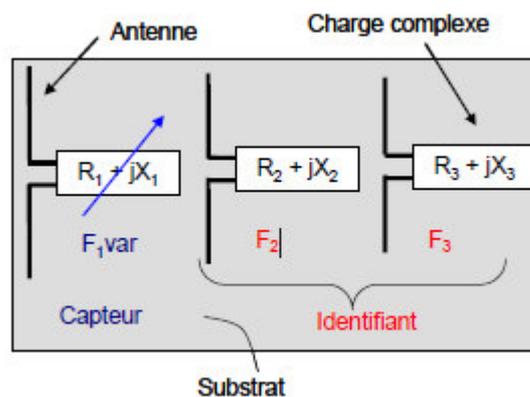
### 2.6. La fonction capteur dans les tags RFID sans puce

Le développement rapide et à grande échelle des systèmes sans fils a engendré de nouvelles attentes sur les technologies RFID. L'avantage fondamental de la RFID passive UHF réside dans l'auto-alimentation des tags et la communication sans fil qui permet l'échange d'informations de manière rapide et efficace. Les applications de la RFID sont devenues nombreuses et englobent plusieurs domaines. Equipés de capteurs, les tags RFID sont destinés à devenir plus autonomes et intelligents [32][33]. Des capteurs très bas coût peuvent même être réalisés en se basant sur la technologie sans puce. Les solutions

développées vont du capteur de gaz d'ammoniac et d'oxydes d'azote jusqu'aux capteurs de température [34][35][36][37].

### 2.6.1. Fonctionnalisation de tags RFID sans puce pour la réalisation de capteurs

Dans un tag RFID sans puce, pour détecter la variation d'un paramètre physique, il faut rendre un des résonateurs sensible à l'environnement. Cela consiste à utiliser des matériaux dont les paramètres physiques tels que la conductivité, la permittivité et la perméabilité sont sensibles à l'environnement. Ainsi, une variation d'un paramètre physique modifie sa réponse électromagnétique en fréquence, en amplitude ou en phase. En règle générale, une variation de la conductivité entraîne une modification du niveau de réponse d'un résonateur du tag alors qu'un changement de la perméabilité ou de la permittivité va se traduire par un décalage de sa fréquence de résonance. Un tag RFID sans puce peut être modélisé par une série d'antennes (ou résonateurs) chargées avec des impédances complexes comme nous pouvons le voir sur la Figure (6.10). La fonction capteur est assurée lorsque l'impédance de charge de l'une des antennes est sensible à l'environnement alors que les autres valeurs d'impédances ne doivent pas l'être de manière à garder la fonction identification.



**Figure 2.10** : Architecture de capteurs RFID sans puce basé sur l'association de résonateurs multiples dont un seul assure la fonction capteur [16].

## 2.7. Conclusion

Ce chapitre a permis d'introduire les différentes techniques de codage envisageables dans un système RFID sans puce dans les deux cas d'approches temporel ou fréquentiel. Les performances qui peuvent être atteintes en termes de robustesse de lecture, de portée de détection sont directement liées à la géométrie du tag. Les résonateurs sont les éléments de base constituant les tags sans puce. Le choix d'un type de résonateur est crucial car il va conditionner les performances du tag, premièrement en termes de densité de codage

## **Chapitre2 : Techniques de codage et structures des tags RFID sans puce**

---

surfactive et spectrale, mais également d'un point de vue du niveau de signal réfléchi caractérisé par sa SER.

## **Chapitre 3 : Conception et résultats de simulation**

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter différents tags RFID sans puces, conçues et simulées sous le logiciel CST MICROWAVE STUDIO SUITE, en commençant par des structures simples, allant jusqu'aux tags plus complexes et imbriqués. Enfin, nous introduirons la fonction capteur dans un tag RFID sans puce.

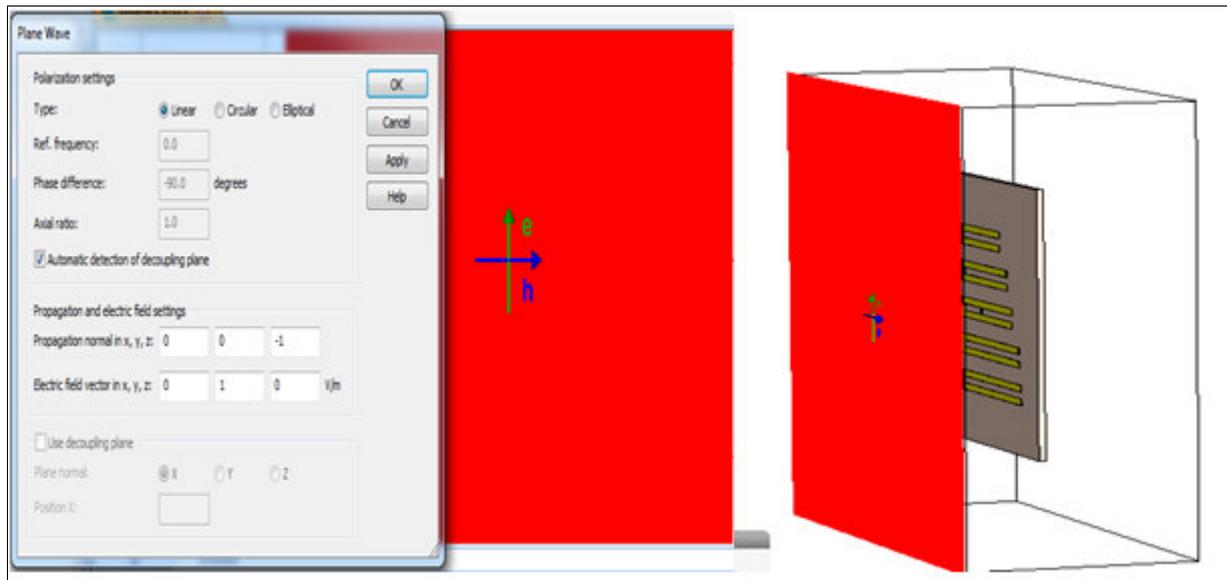
### 3.2. Simulation des tags RFID sans puce

Toutes les structures simulées sont excitées par une onde plane. Cette onde incidente peut avoir différents types de polarisation qui dépend de l'orientation de l'axe de structure conductrice. Le conducteur polarisé verticalement est excité par une onde plane polarisée verticalement et vice versa [38].

La cellule en C, le dipôle ou bien les éléments de base de nos conceptions sont des éléments qui génèrent une réponse que l'on peut considérer comme ayant la même polarisation que le champ incident.

Le résonateur en C, à l'image du dipôle, est un élément dont la signature spectrale dépend fortement de la polarisation de l'onde incidente. Pour exciter un dipôle, la polarisation du champ électrique doit être alignée avec le dipôle comme dans le cas d'une antenne dipôle classique. Pour que le résonateur en C crée un mode très résonant, il faut également l'exciter avec une polarisation verticale. En l'excitant sur sa polarisation horizontale, nous obtenons à l'inverse une réponse très large bande.

Dans nos simulations, tous les tags sont polarisés verticalement (Figure 3.1) car ils sont basés sur des résonateurs dipôles ou cellule en C qui sont des conducteurs polarisés verticalement [39].



**Figure 3.1** : Configuration sous CST d'une onde plane polarisé verticalement.

La structure est placée à une distance assez éloignée de la sonde pour être dans la zone du champ lointain (équation 3.1) [41] :

$$Z \geq \frac{2 \times D^2}{\lambda} \quad (3.1) [40]$$

- $Z$  : distance par rapport à la cellule en m (La portée).
- $D$  : la plus grande dimension de l'antenne exprimée en m.
- $\lambda$  : longueur d'onde.

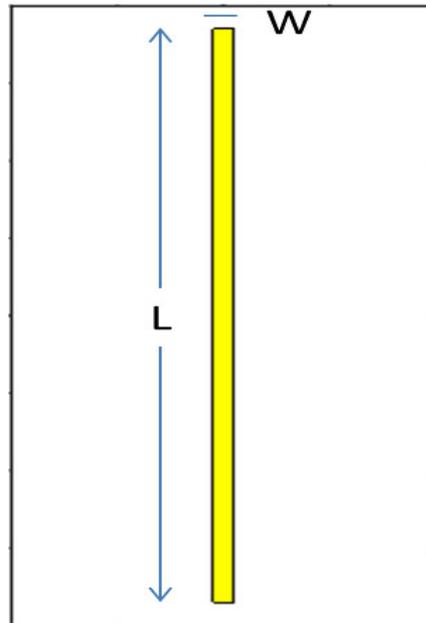
### 3.3. Les structures simples des résonateurs

Pour concevoir un tag sans puce, il faut respecter les critères de performance d'un résonateur et de codage cités dans le chapitre précédent. Dans cette partie, on a essayé de simuler différents résonateurs, afin de choisir la forme la plus performante qui donne un grand niveau de RCS et une bonne sélectivité. La bonne sélectivité veut dire une bande passante plus réduite. Donc après l'association de plusieurs résonateurs, on aura une grande densité spectrale de codage.

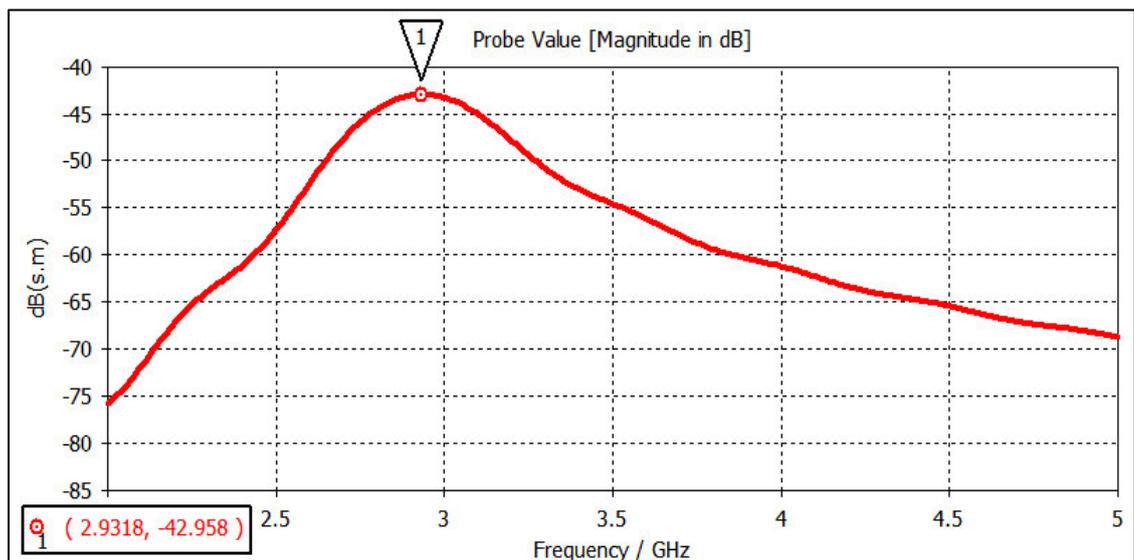
#### ➤ Les dipôles court-circuités

Nous avons commencé nos configurations par l'antenne dipôle référence. La fréquence de résonance désirée est de 3 GHz.

La structure consiste en un résonateur dipôle en court-circuit comme le montre la figure 3.2 imprimé sur un substrat de taille de  $20 \times 40 \times 0.8 \text{ mm}^3$ , de type FR-4 de permittivité relative  $\epsilon_r = 4.3$ , de constante de pertes  $\delta = 0.025$  avec  $L = 37 \text{ mm}$  et  $w = 1 \text{ mm}$ .



**Figure 3.2 :** La configuration de résonateur dipôle en court-circuit.



**Figure 3.3 :** Réponse RCS de résonateur dipôle court-circuit.

D'après la figure 3.3, on constate que la bande de fréquence d'un seul résonateur dipôle est très large et ça provoque une grande densité spectrale de codage. Donc, nous devons chercher d'autres formes plus sélectives.

Afin de régler le problème de la largeur de bande, nous nous sommes orientés vers d'autres types de résonateurs, qui sont les résonateurs dipôles repliés.

### ➤ Résonateur en C

Dans le même substrat, nous avons conçu un résonateur en forme C (figure 3.4) . La fréquence de résonance désirée est de 3 GHz, aussi :  $L=16.5\text{mm}$ ,  $g=0.5$ ,  $w=1\text{mm}$ .

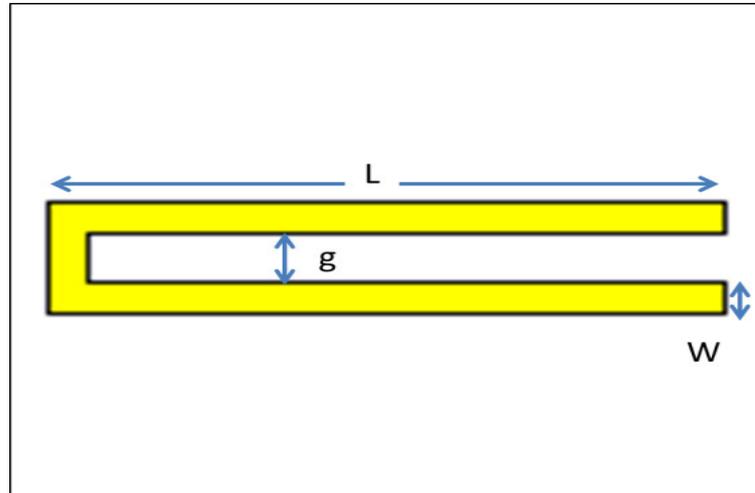


Figure 3.4 : La configuration de résonateur en C

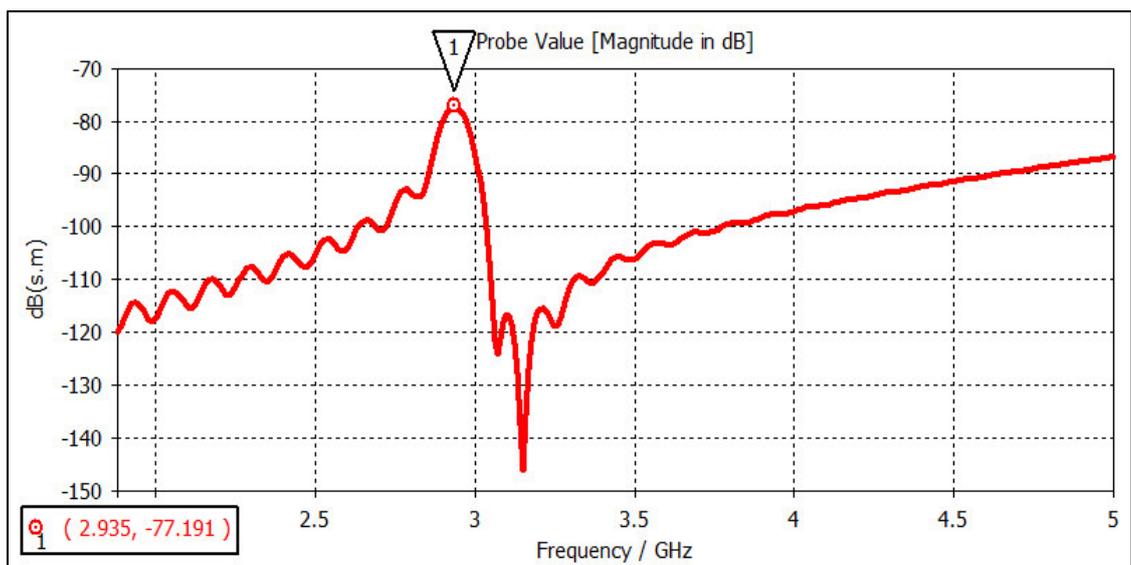


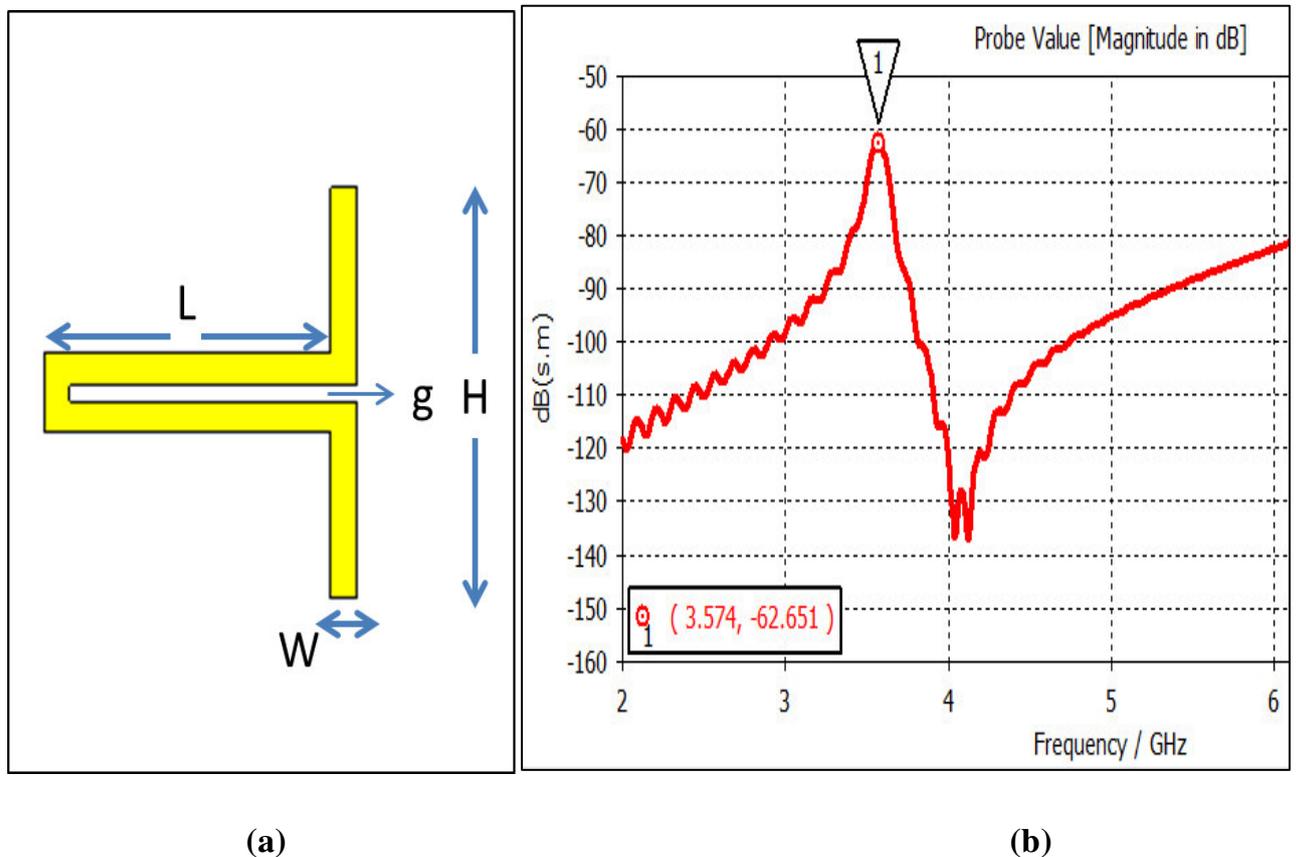
Figure 3.5 : Réponse RCS de résonateur en C.

Comme le montre la figure 3.5, le résonateur en C donne une très bonne sélectivité mais un niveau de RCS un peu faible .

### ➤ Résonateur cellule en C plus dipôle (CCD)

Afin de pallier au problème de faible niveau de RCS de la structure précédente, nous avons utilisé le résonateur CCD (Figure 3.6 (a)). Ici aussi, le même substrat FR4 est utilisé, pour concevoir

un résonateur en C plus dipôle avec une fréquence désiré de 3 GHz. Les dimensions sont les suivantes :  $W=1\text{mm}$ ,  $L=13\text{mm}$ ,  $g=0.5\text{ mm}$ ,  $H= 13\text{mm}$ .



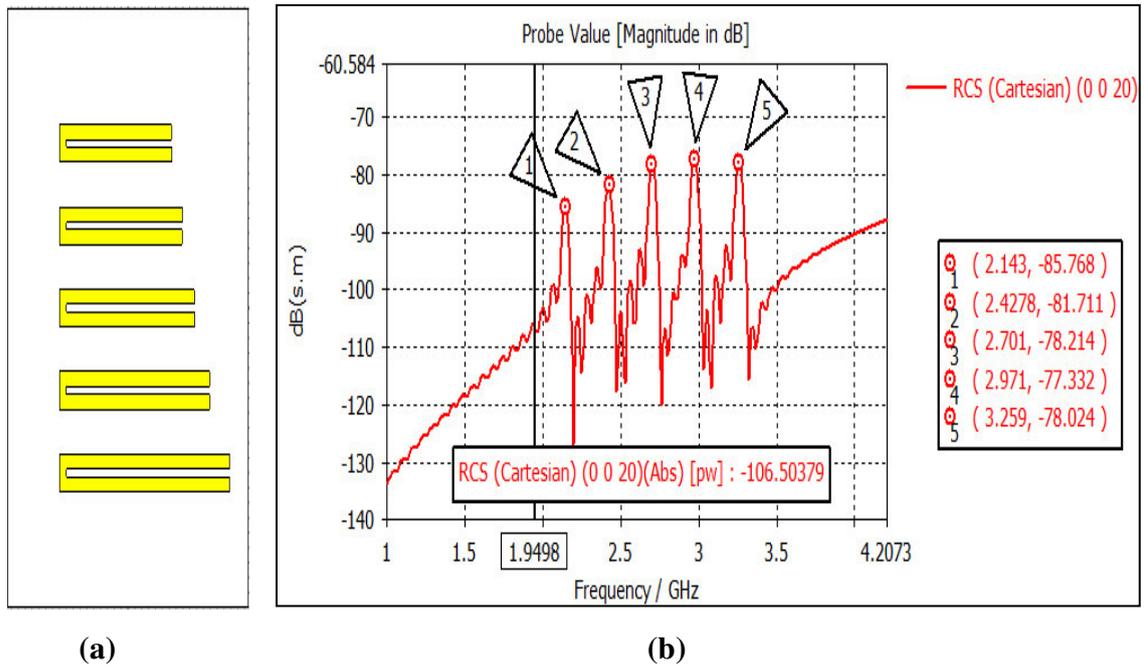
**Figure 3.6 :** Simulation de résonateur en c +dipôle ;(a) La configuration de résonateur Cellule en C + dipôle (CCD), (b) réponse RCS du résonateur Cellule en C + dipôle (CCD).

On peut remarquer qu'un simple dipôle court-circuité présente un bon niveau de réponse mais une large bande passante, tandis qu'un CCD (Cellule en C + dipôle), est meilleur en matière de sélectivité et donne un niveau de réponse proche de -62 dB. Enfin une structure simple de type "C" donne la meilleure sélectivité.

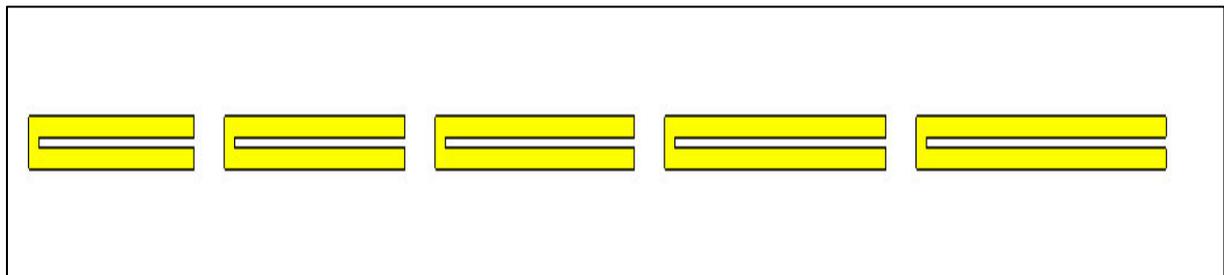
### 3.4. Les tags RFID sans puce

#### 3.4.1. Tag à 5 C avec arrangement vertical et horizontal

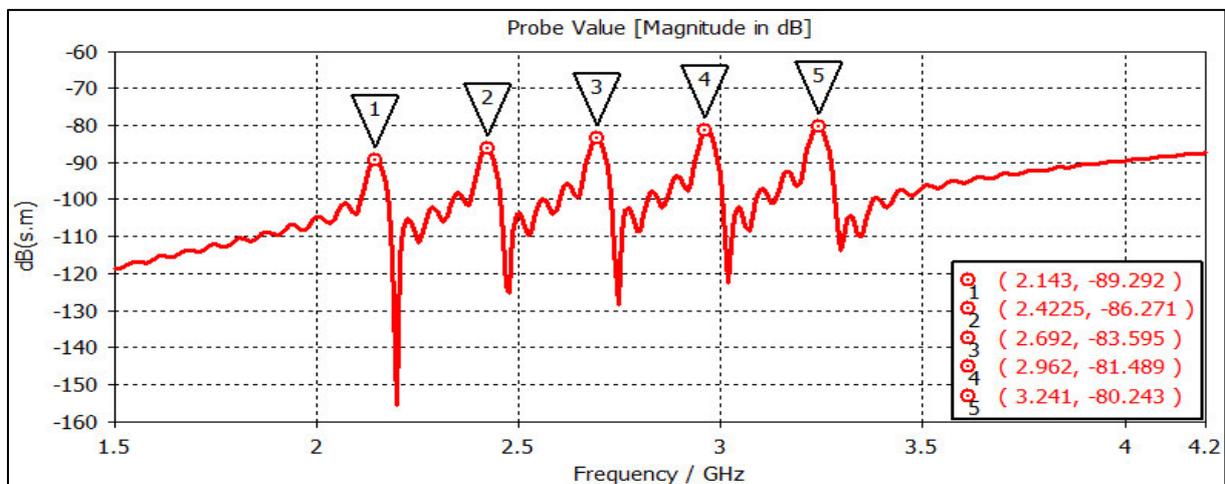
La structure du Tag consiste en 5 résonateurs en C avec un arrangement vertical (Figure 3.7 (a)) et un autre horizontal (Figure 3.8), imprimés sur un substrat de type ROGERS4003C de permittivité relative  $\epsilon_r=3.38$  de constante de pertes  $\delta= 0.0027$ , d'épaisseur  $h=0.8\text{mm}$  et de taille  $2\times 4\text{ cm}^2$ . Les dimensions des résonateurs sont présentées dans le tableau 3.1. Dans le même type de substrat de taille  $12.3\times 1.4\text{ cm}^2$ .



**Figure 3.7 :** Simulation d'un tag 5C ; (a) La configuration de Tag 5c vertical, (b) réponse RCS de Tag 5c vertical.



**Figure 3.8 :** La configuration de Tag 5c horizontal.



**Figure 3.9 :** La réponse RCS de Tag 5c horizontal.

### Chapitre 3 : Conception et résultats de simulation

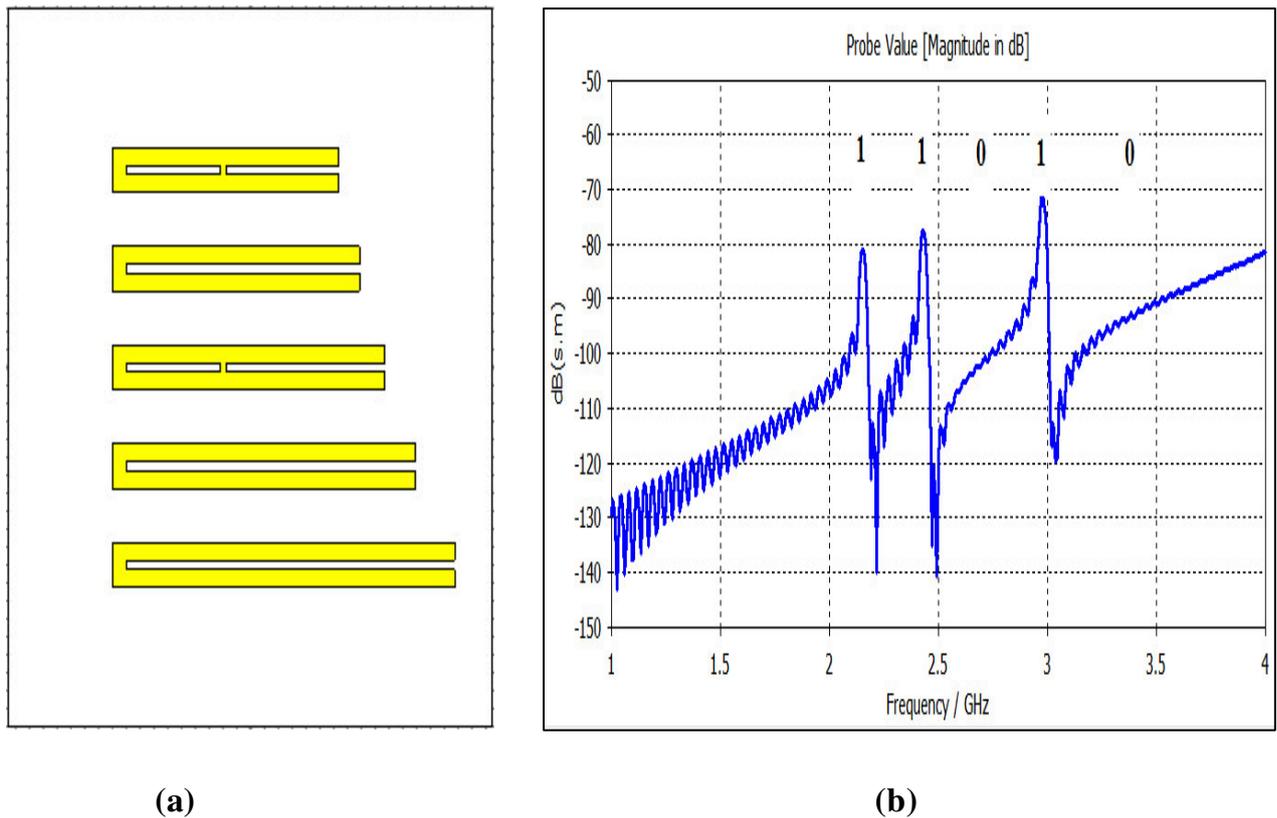
**Tableau 3.1 :** Dimensions des résonateurs et fréquences de résonance associées. Les longueurs L1 à L5 et les fréquences théoriques F1 à F5 sont extraites à partir de la caractéristique du résonateur C liant la fréquence de résonance avec la longueur de la fente L. Les fréquences obtenues en simulations sous CST pour les topologies verticales et horizontales des Fig. 3.7(b) et 3.9 sont également données.

Topologie	Les longueurs des résonateurs (mm)					Fréquences simulation (GHz)				
	L1	L2	L3	L4	L5	F1	F2	F3	F4	F5
Verticale	24.75	21.9	19.69	17.875	16.35	2.14	2.4	2.7	2.97	3.25
Horizontale	/	/	/	/	/	2.14	2.42	2.69	2.96	3.24

D'après les résultats de simulations des deux tags, nous concluons que n'y a pas de différences entre un arrangement horizontal et vertical, nous avons les mêmes fréquences de résonances, mais il est préférable d'utiliser l'arrangement vertical car il nous permet de minimiser la taille du tag donc une densité de codage surfacique (DSC) plus élevée.

#### ➤ Codage du tag a 5 C

Le principe de codage d'un tag 5C est expliqué au chapitre 2. Le tag 5 C est un tag de 5 bits. Un pic dans la réponse RCS (Figure 3.10 (b)) correspond au bit 1 qui est due à la présence du résonateur respectif. Pour générer le bit 0, on a court-circuité les résonateurs 3 et 5 comme le montre la figure 3.10 (a). On peut remarquer que les pics 3 et 5 ont disparus du graphe RCS.



**Figure 3.10 :** Simulation d'un tag 5C ;(a) Tag RFID sans puce 5C ID 11010, (b) réponse RCS de tag RFID sans puce 5C ID 11010.

### 3.4.2. Le tag double C

Le premier défi en termes de technologie RFID sans puce est la miniaturisation des tags ainsi que l'augmentation de la densité de codage surfacique. La structure double C (Figure 3.11) offre une très bonne sélectivité et nécessite une surface réduite. La structure obtenue permet de disposer de 4 résonateurs indépendants qui présentent une réponse spectrale exploitable entre 2 et 6 GHz (Figure 3.12).

Le substrat utilisé est du FR4, de permittivité 4.6 et d'épaisseur 0.8 mm, occupant une surface de 1.5x2 cm<sup>2</sup>. Les dimensions des fentes des tags sans les courts-circuits sont les suivantes : L1 = 24.7 mm, L2 = 20.3 mm, L3 = 11.1 mm. la largeur des pistes est w=2 mm et la largeur des gaps g1=g2=g3=0.5 mm avec g4=1 mm.

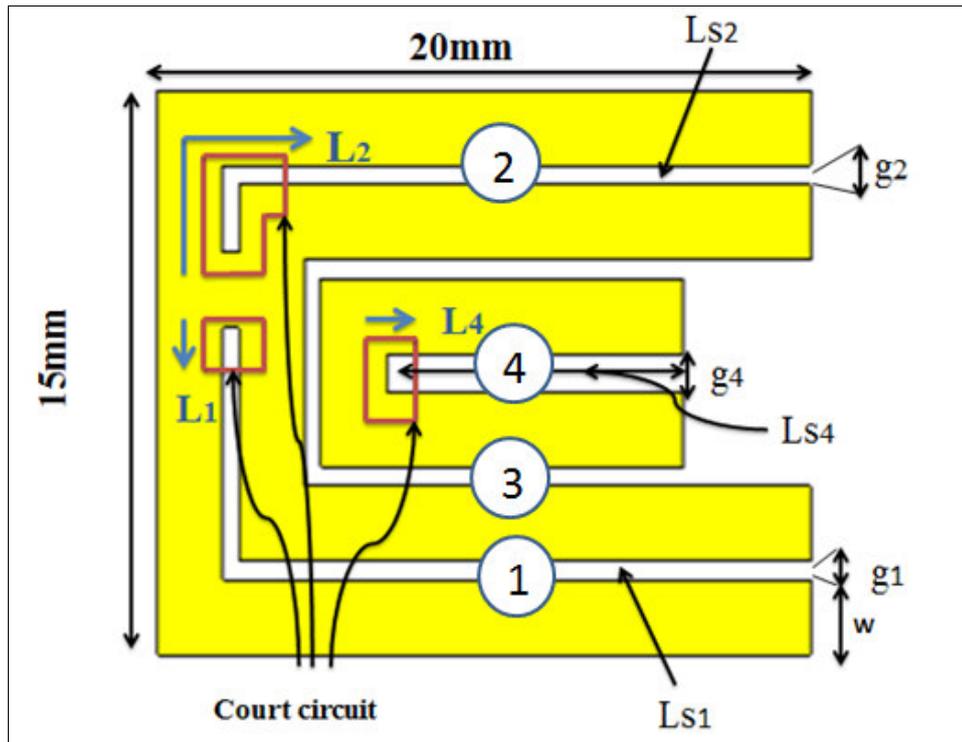


Figure 3.11 : Configuration et structure du tag double C.

Les termes  $Ls1$  à  $Ls4$  représentent la longueur des fentes repérés par les numéros 1 à 4 sur la figure 3.11. Les termes  $L1$ ,  $L2$  et  $L4$ , définissent uniquement la longueur des courts circuits positionnés dans les zones délimités par des rectangles marron sur la figure 3.11.

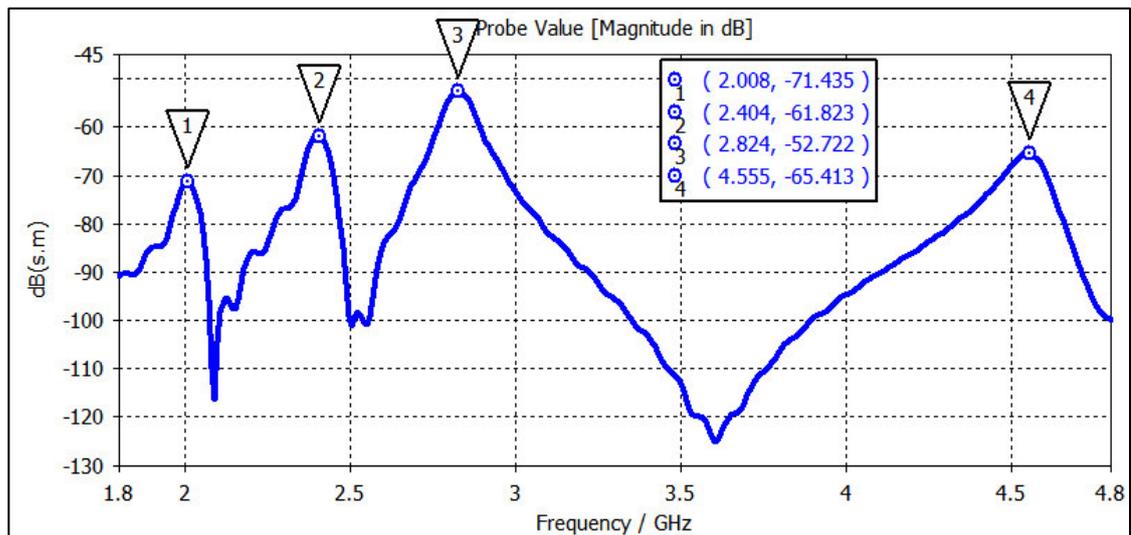


Figure 3.12 : La réponse RCS de tag double C.

➤ Le codage du tag double C

Le principe de codage du tag double C, est mieux défini au chapitre précédent. Nous avons simulé pour des longueurs de court-circuit différentes L1, L2 et L4. Nous avons varié la dimension L1 de 0 à 3mm avec un pas de 1mm. L'augmentation de 'L1' de 0 à 3mm engendre un décalage de fréquence comme l'illustre la figure 3.13. Idem pour L2 (Figure 3.14) et L4 (Figure 3.15). Le tableau 3.2 résume le lien entre les fréquences de résonances et le code binaire associé.

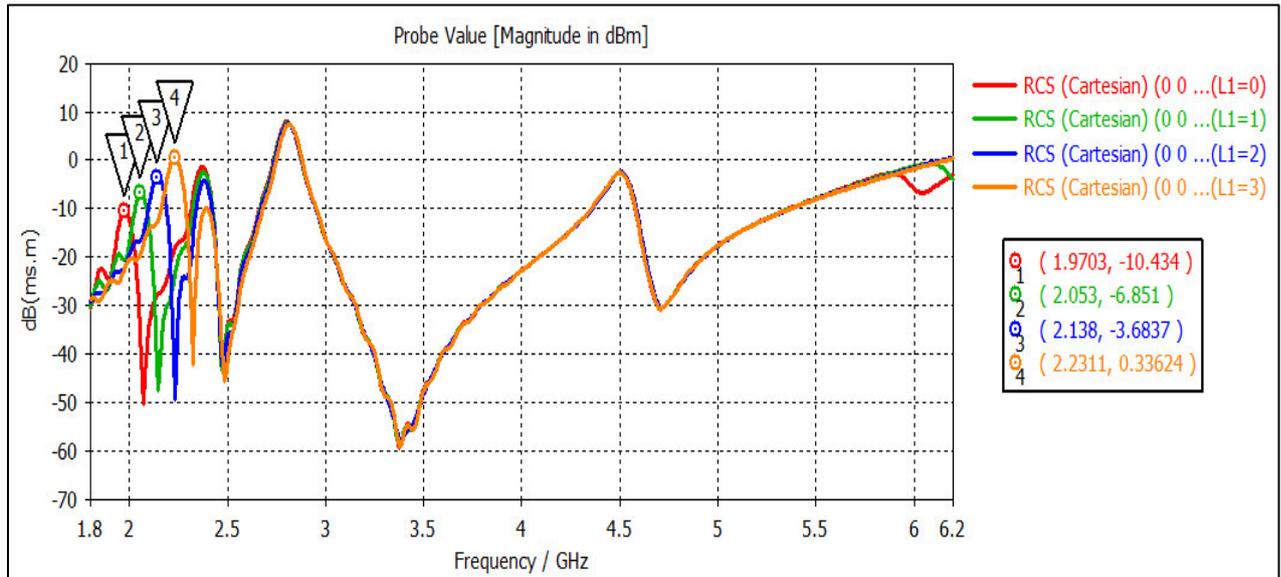


Figure 3.13 : SER simulée sous CST du tag en double C pour différentes longueurs de Court-circuit L1.

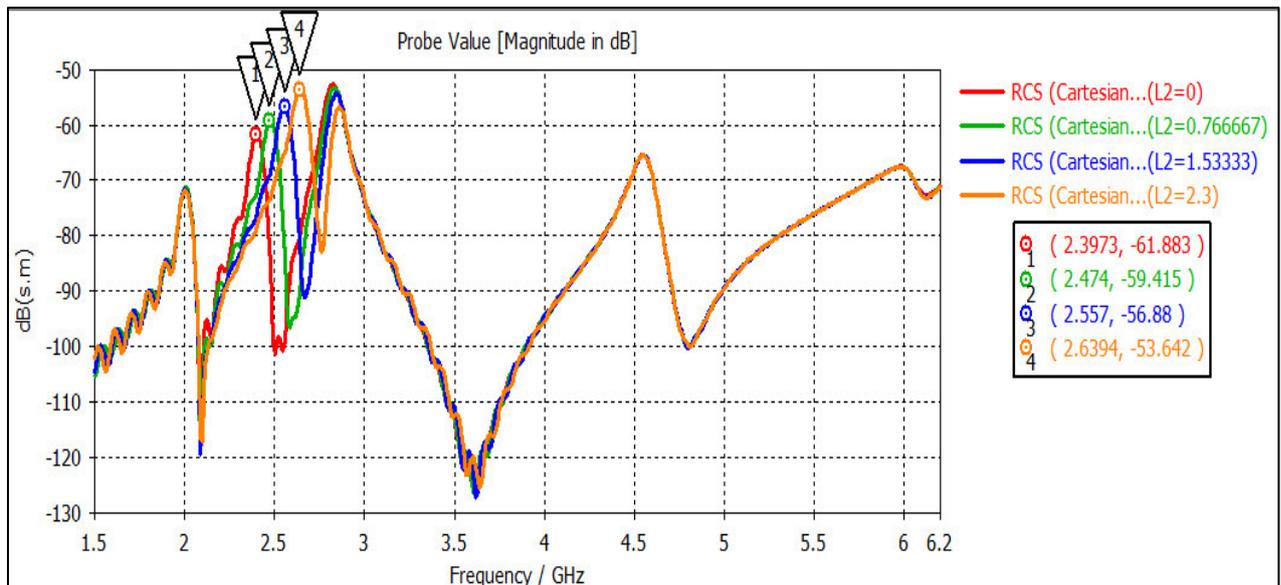


Figure 3.14 : SER simulée sous CST du tag en double C Pour différentes longueurs de Court-circuit L2.

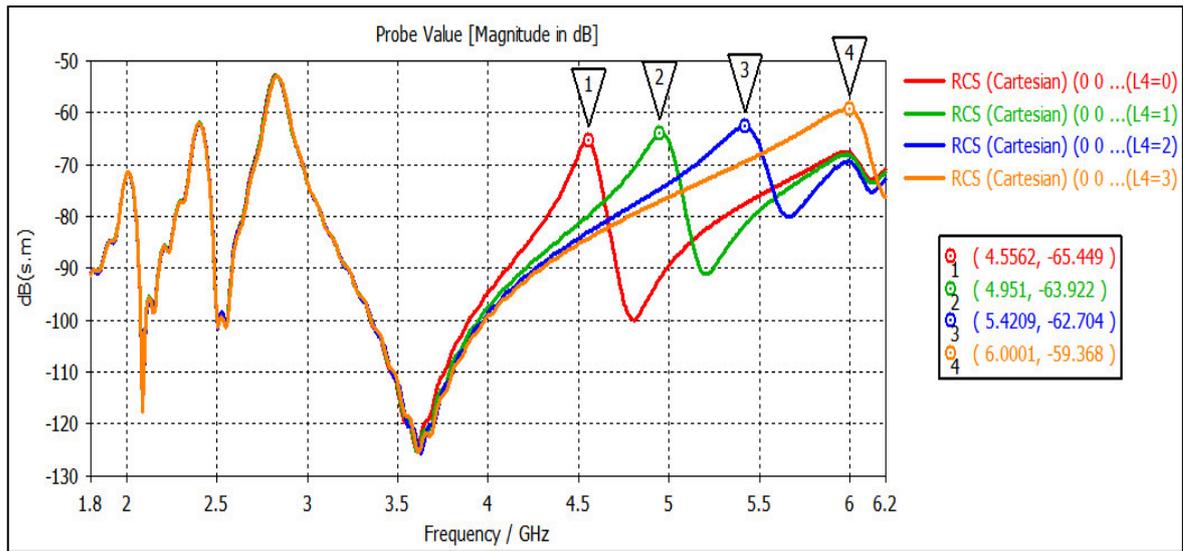


Figure 3.15 : SER simulée sous CST du tag en double C pour différentes longueurs de Court-circuit L4.

Tableau 3.2 : Le lien entre les fréquences de résonance du tag et le code binaire associé.

Tableau slot n°1		Tableau slot n°2		Tableau slot n°3	
Fréquence(GHz)	Code	Fréquence(GHz)	Code	Fréquence(GHz)	Code
2.00	00	2.4	00	4.55	00
2.08	01	2.47	01	4.95	01
2.16	10	2.55	10	5.42	11
2.24	11	2.64	11	6	10

### 3.4.3. Tag en L

Une autre structure de tag de forme L (figure 3.16) proposé par A. Habib [42], de grande densité surfacique de codage a également été étudiée et simulée à l'aide du logiciel CST Microwave studio. Le tag consiste en sept résonateurs en forme L et une en forme de I. Imprimé sur substrat du papier avec une permittivité relative  $\epsilon_r=2.31$ , épaisseur  $h=0.8\text{mm}$  et de taille  $1.7\times 4.2\text{ cm}^2$ . Les dimensions et les fréquences de la structure sont résumées dans le tableau 3.3 et 3.4 successivement.

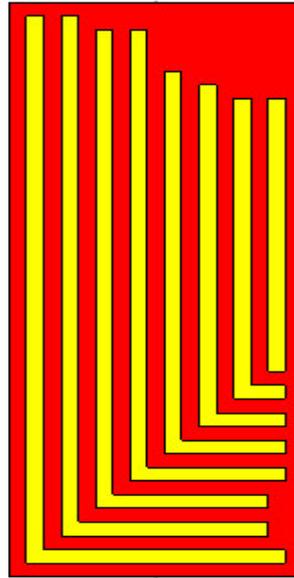


Figure 3.16 : Configuration du tag Forme L.

Tableau 3.3: Les longueurs des résonateurs de tag L en (mm).

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
55 mm	50 mm	45 mm	40 mm	35 mm	30 mm	25 mm	20 mm.

Tableau 3.4 : Les fréquences des résonances de tag L en GHz.

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
2.28	2.48	2.74	2.97	3.49	4.0629	4.82	5.71

Dans la figure 3.17 ci-dessus on peut bien voir les 8 pics de résonances de F1 à F8. Donc le tag « L » a l'avantage de coder 8 bit dans juste 1.7×4.2 cm<sup>2</sup> de surface.

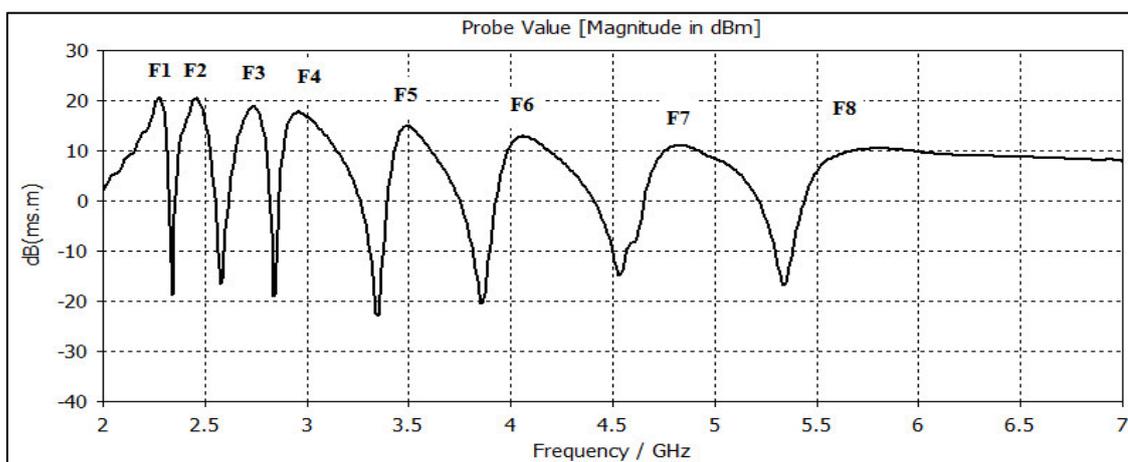


Figure 3.17 : La réponse RCS de tag L.

➤ **Codage du tag L**

Plusieurs ID d'étiquettes peuvent être générés avec le principe de codage par décalage de fréquence. Le premier tag est représenté par un ID 00000000 figure 3.18, En changeant la longueur du résonateur, un décalage du pic de résonance se produit par un facteur ' $\Delta$ ' repérer par la comparaison avec le premier tag. Ce changement correspond à l'état logique 1. Comme illustre la figure 3.19. L'état logique 1 correspond à la transmission de bit '1' tandis que l'état logique 0 correspond à la transmission du bit '0'.

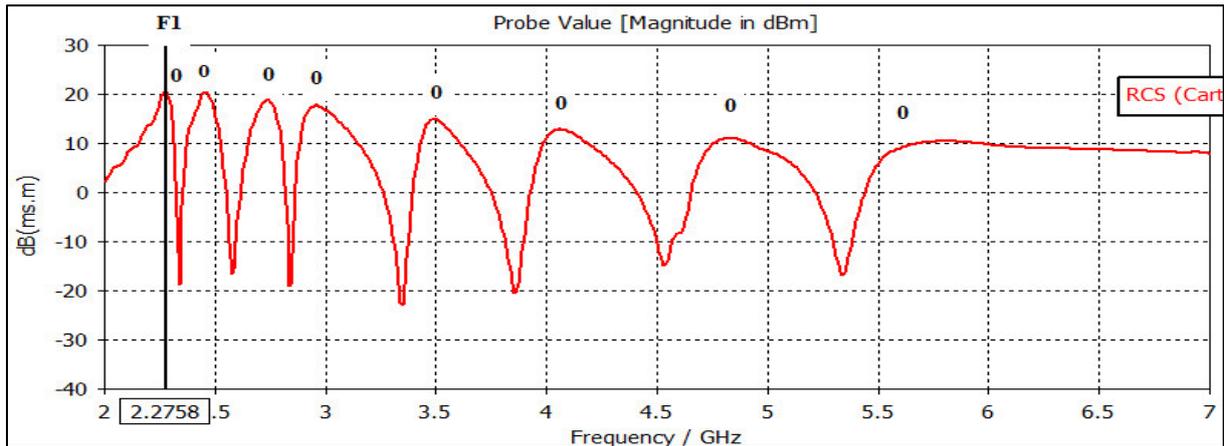


Figure 3.18 : La réponse RCS de tag ID-00000000.

Pour générer un nouveau tag ID, on a changé (diminuer)  $L_1$  de 55mm a 53mm, cela a induit un décalage de fréquence  $\Delta F=2.36-2.27=0.09\text{GHz}$  ce qui correspond au bit 1 (Figure 3.19). Tandis que les autres pics n'ayant pas subi de décalage, alors l'état logique représenté est 0.

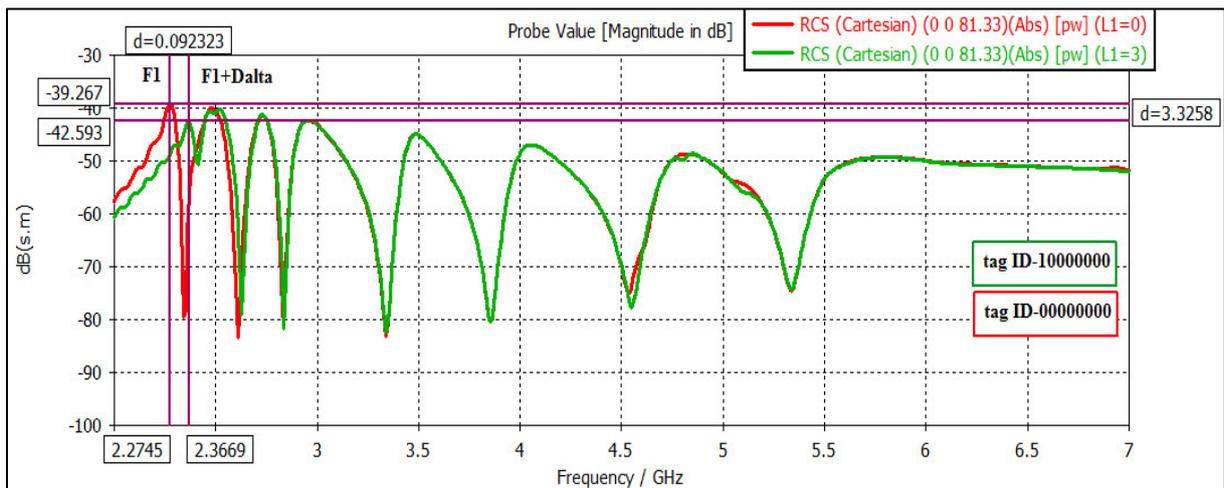


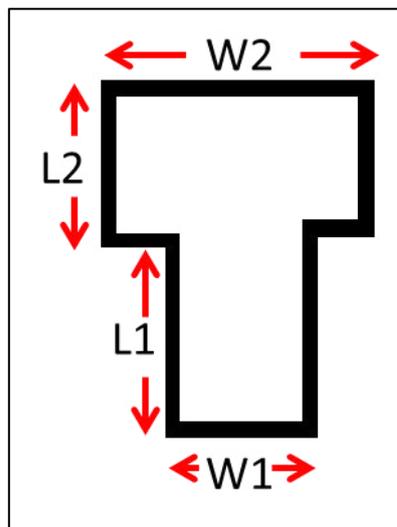
Figure 3.19 : Réponse RCS de tag ID-10000000.

#### 3.4.4. Tag RFID sans puce à base des résonateurs en forme de T

Un nouveau circuit de codage de données en forme de T, capable de fonctionner comme une étiquette RFID sans puce est proposé par M.Riaz [43]. Comme le montre la Figure 3.20, la géographie globale de la structure métrique d'un résonateur arbitraire en forme de T est commandée par un ensemble de variables : largeur de la base horizontale donnée par  $W1$ , largeur de l'horizontal plafond représenté par  $W2$ , longueur de la barre verticale inférieure donnée par  $L1$ , la longueur de la barre verticale supérieure représentée par  $L2$ .

C'est une cellule unitaire fabriquée sur un substrat FR4 ayant des dimensions physiques de  $7.5 \times 15 \text{ mm}^2$ . L'ensemble de résonateurs imbriqués dans la cellule unité A et B, comme le montre la figure 3.21 (a) sont inversés afin de minimiser l'effet du couplage mutuel.

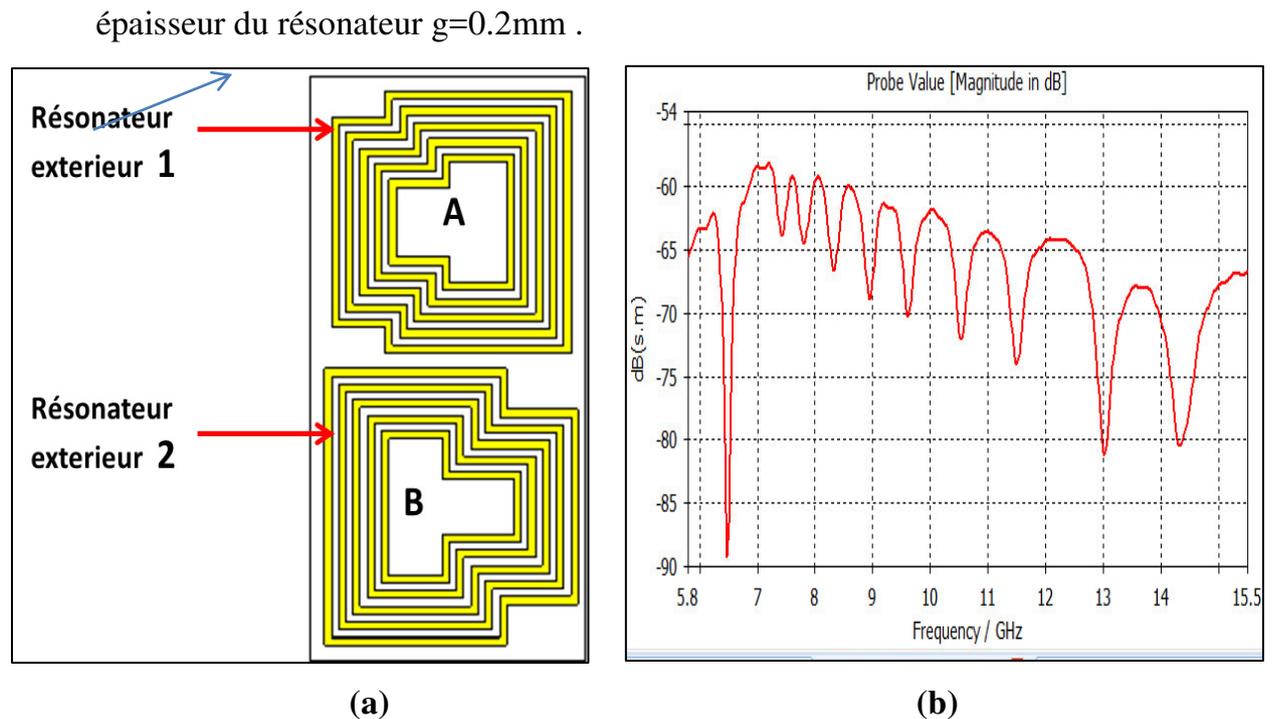
La cellule unitaire est composée de plusieurs résonateurs en T. Les dimensions sont présentées dans le tableau 3.5. Le tag 10 bits proposé est à la fois compact et robuste.



**Figure 3.20 :** Résonateur en forme de T, les dimensions  $w1$ ,  $w2$ ,  $L1$ ,  $L2$  sont indiquées dans le tableau 3.5.

**Tableau 3.5 :** Les dimensions de deux résonateurs extérieurs 1 et 2.

Mm	L1	L2	W1	W2
Résonateur extérieur 1	1.5	5.2	5.4	6.7
Résonateur extérieur 2	2	5.1	7.1	5

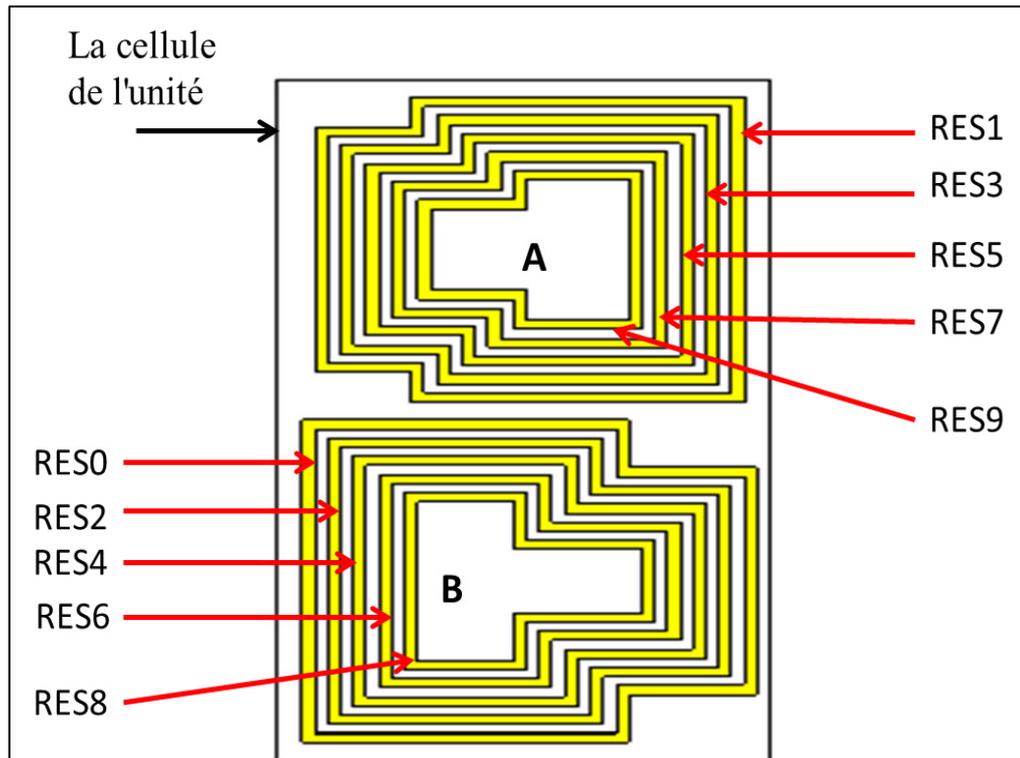


**Figure 3.21** : Simulation d'un tag en T ; (a) configuration tag RFID en T, (b) La réponse RCS du tag.

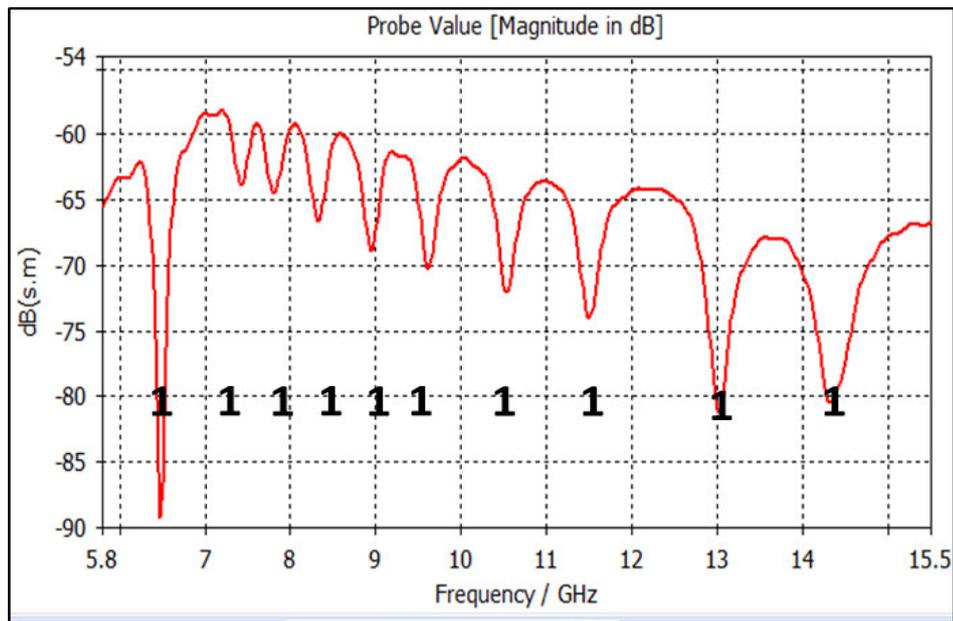
Donc sa DCS= est le DSC=

➤ **Codage du tag en T**

Le circuit résonnant permet le codage d'une séquence de bits arbitraire par inclusion (signifiant " 1 " bit de données) ou omission (signifiant " 0 " bit de données) de résonateurs en T dans la cellule de l'unité. Le tag (l'unité) contient deux ensembles A et B (Figure 3.22 (a)), chaque ensemble contient 5 résonateurs en T. Chaque résonateur peut coder un bit. Le résonateur en forme de T produit une résonance à une valeur spécifique de fréquence. La même résonance est distinctement observable dans la réponse de la section transversale du radar (RCS) (Figure 3.22 (b)), identifiant un bit de données " 1 ". En l'absence du résonateur, l'onde électromagnétique incidente est réfléchiée et la résonance disparaît, ce qui signifie un bit de données " 0 " (voir Figure 3.23).



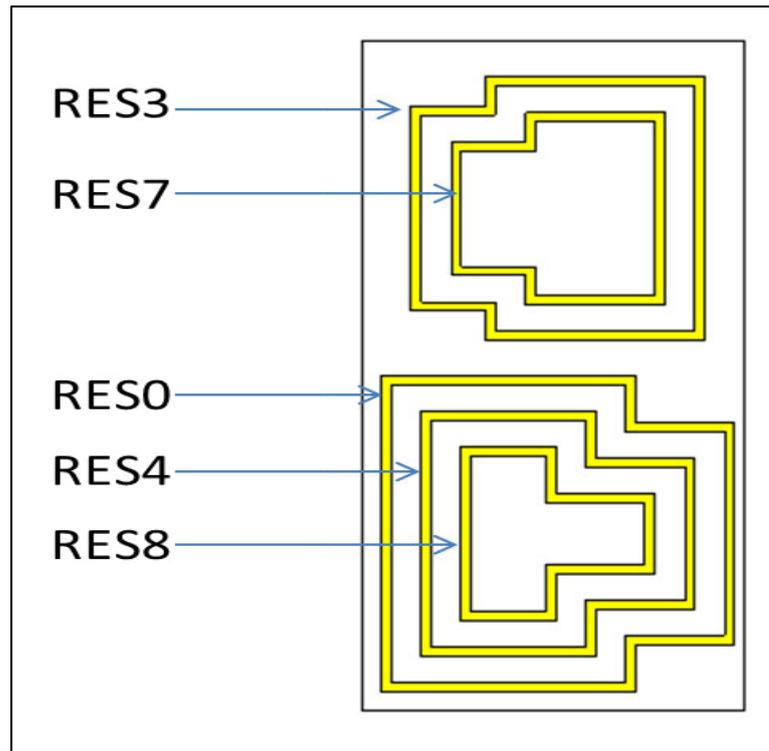
(a)



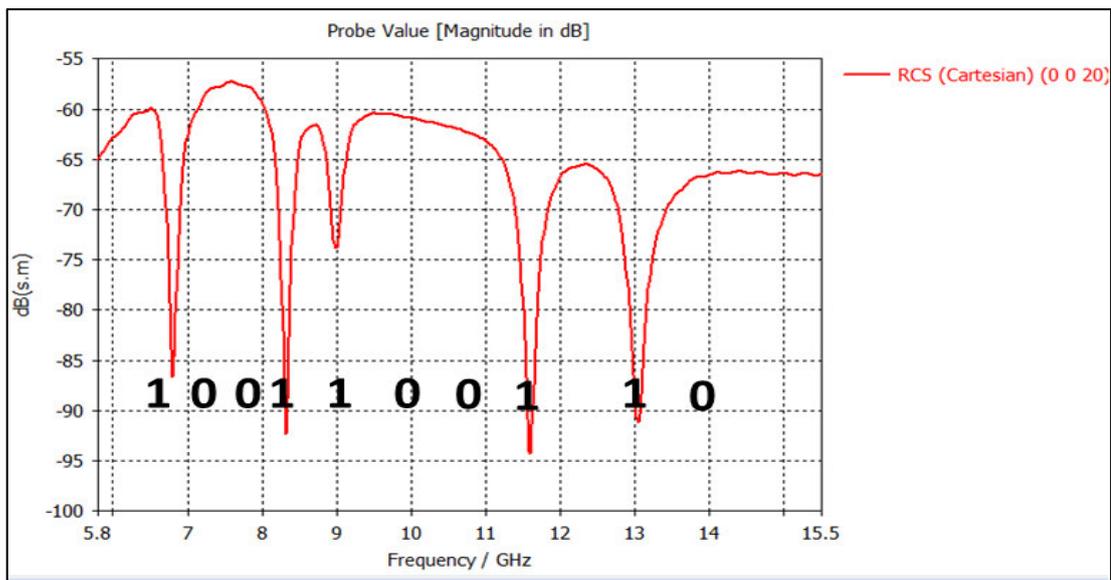
(b)

**Figure 3.22** : Simulation d'un tag en T codé 1111111111 ; (a) la séquence des bits dans le codage de tag en T, (b) réponse RCS et codage du tag.

**ID de ce tag se présente comme suit:** (RES0 RES1 RES2 RES3 RES4 RES5 RES6 RES7 RES8 RES9). **L'ID** pour ce tag est 1111111111.



(a)



(b)

**Figure 3.23** : Simulation d'un tag en T codé 1001100110 ; (a) Tag RFID sans puce 10 T avec ID 1001100110, (b) réponse RCS de tag RFID sans puce 10T ID 1001100110.

### 3.5. capteur à base de la technologie RFID sans puce

Dans cette partie, on va expliquer comment on peut ajouter une fonction capteur à un simple tag RFID sans puce, on a choisi le même tag 5C mais cette fois imprimé sur un substrat FR-4 au lieu de ROGERS4003C.

### Chapitre 3 : Conception et résultats de simulation

L'utilisation d'un substrat bas coût, comme le FR4 permet ici de montrer la tolérance de ce design au support. Ceci est un point très important pour pouvoir rester sur des techniques de réalisation bas coût. Mais le problème c'est que l'FR-4 a des pertes élevée ce qui conduit à des niveaux de SER très faible (figure 3.24).

Afin de pallier à ce problème, on est orienté vers une autre forme de résonateur qui est le résonateur Cellule en C + dipôle (Figure 2.25 (a)) qui a un bon niveau de SER d'après les résultats précédents.

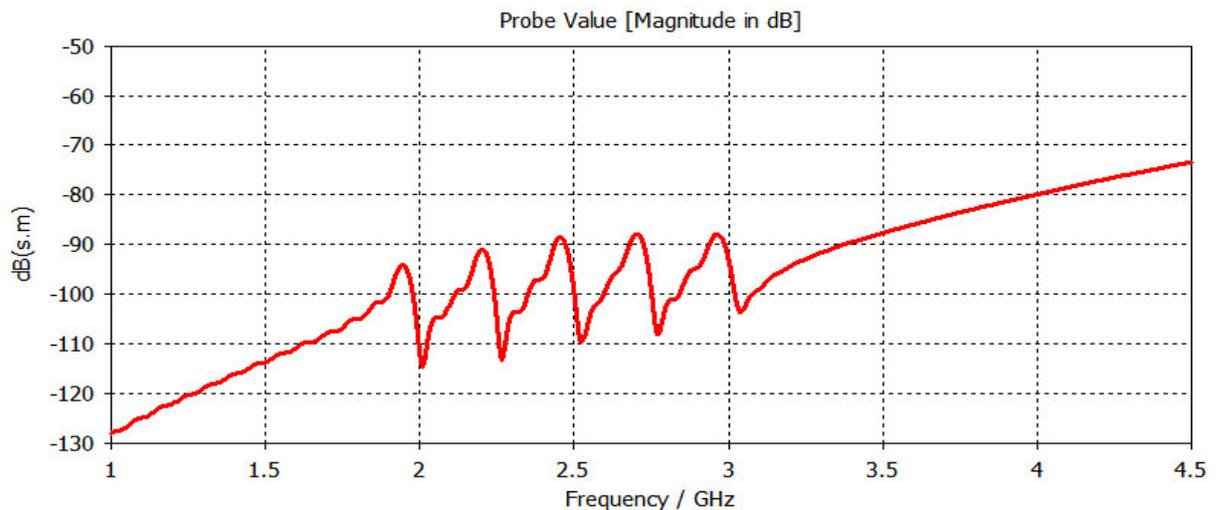


Figure 3.24 : La réponse SER de tag 5c avec le substrat FR-4.

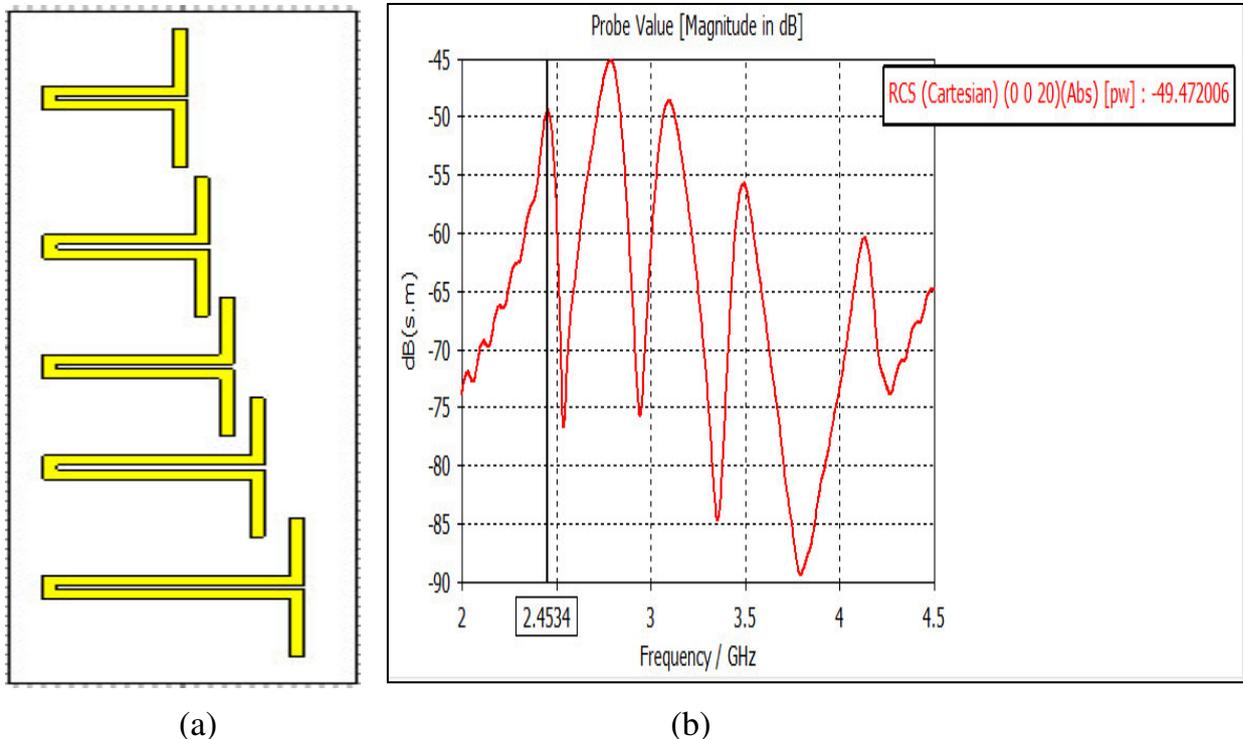


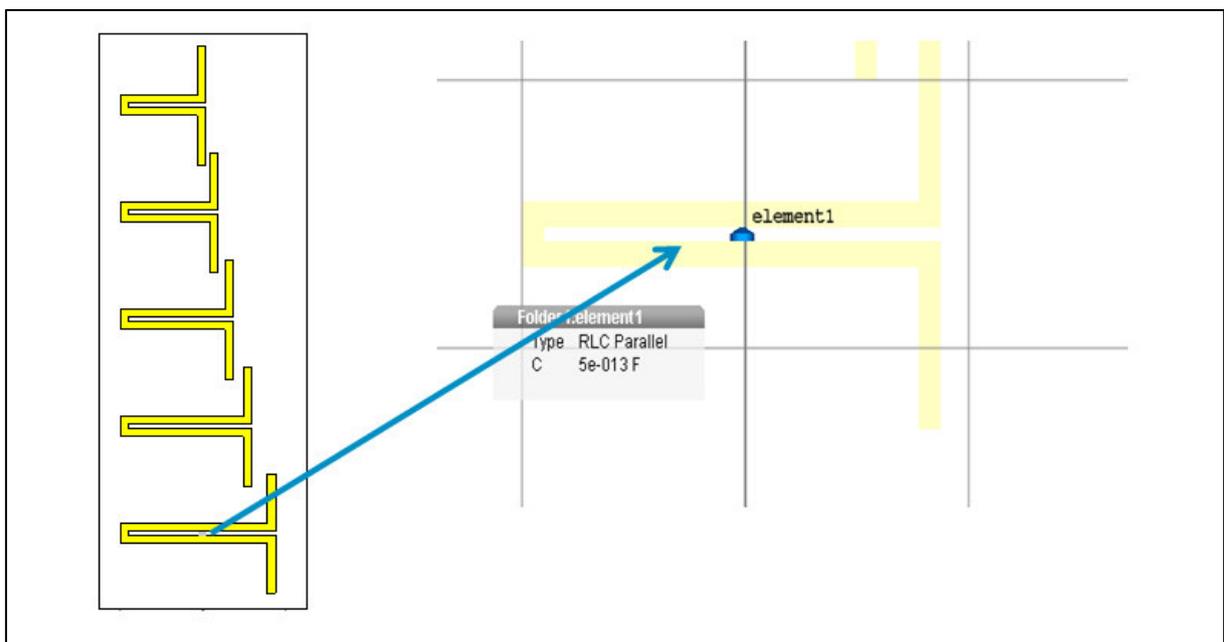
Figure 3.25 : Simulation de tag 5C + dipôle ;(a) tag C+dipôle, (b) repense RCS du tag.

Voilà, comme le montre les figures 2.24 et 2.25 (b). Le meilleur résultat de RCS est obtenue avec le tag 5C+ dipôle, les niveaux de RCS est passé de -88dB a -45dB.

### 3.5.1. La fonction capteur

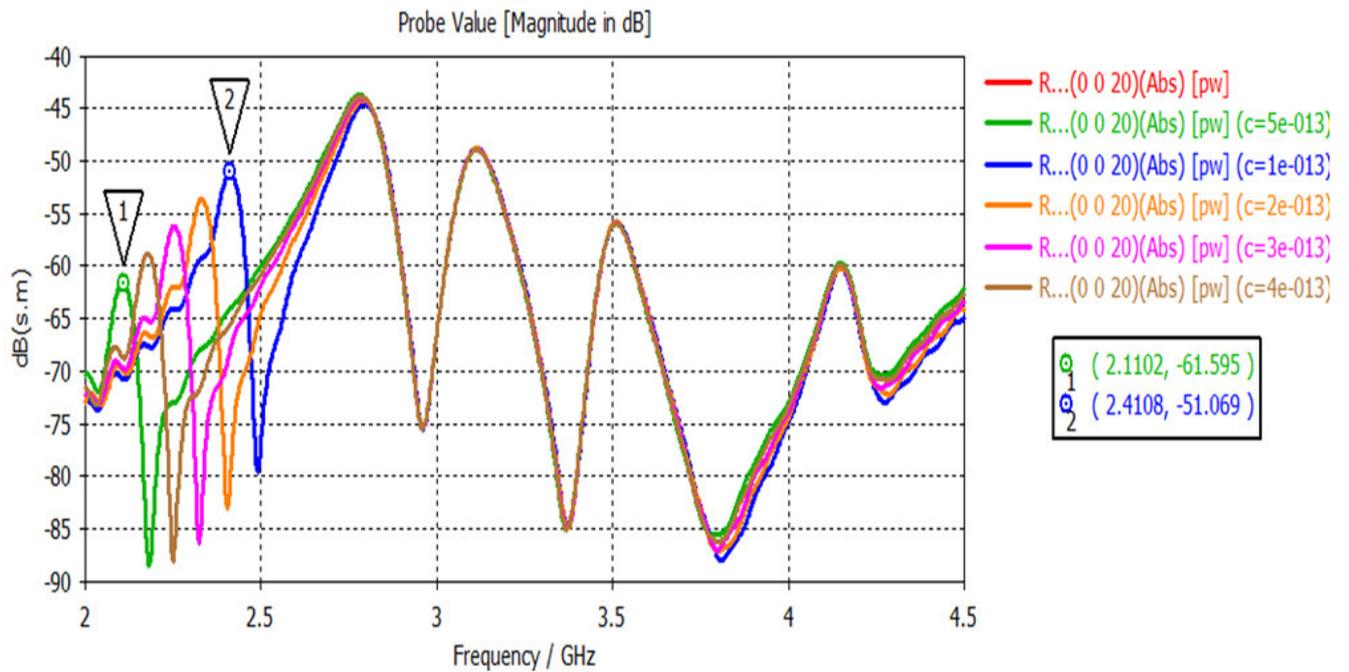
Pour qu'un tag soit doté de la fonction d'un capteur, il faut qu'il soit sensible à son environnement. En RFID classique, pour détecter la variation d'un paramètre physique, des capteurs se présentent sous la forme de composants localisés et permettent de donner une information en tension proportionnelle à la concentration d'un gaz ou de la température. Ce signal analogique doit être ensuite converti en signal numérique par un convertisseur analogique / numérique embarqué dans le microcontrôleur du tag RFID et stocké en mémoire. D'autres techniques bien plus simples sont basées sur l'évolution du niveau de signal réfléchi directement par le tag RFID. Dans ce cas, l'antenne ou son circuit d'adaptation sont rendus sensibles à des paramètres environnementaux comme l'humidité [16].

Dans un tag RFID sans puce, pour détecter la variation d'un paramètre physique, il faut rendre un des résonateurs sensible à l'environnement. Cela consiste à utiliser une capacité (Figure 3.26) contenant un matériau sensible dont la permittivité va varier en fonction de la grandeur à mesurer, ce changement de la permittivité va se traduire par un décalage de sa fréquence de résonance (Figure 3.27).



**Figure 3.26 :** C Tag RFID sans puce avec capacité.

Dans notre conception, on a varié la valeur de capacité de 0.1pF à 0.5pF, et ça induit un décalage de 0.3GHz dans la fréquence de résonance du premier résonateur (figure 3.27). La résonance qui a été modifiée est celle correspondante au capteur uniquement.



**Figure 3.27 :** Réponses RCS d'un capteur RFID avec différents valeurs de capacité.

Aujourd'hui avec le développement des nanostructures, des capteurs sans fil basés sur ce principe ont été réalisés. Associant des propriétés électriques, mécaniques, électromagnétiques et thermiques exceptionnelles, ces nanostructures assurent des fonctions capteurs très sensibles qui permettent d'identifier des paramètres physiques de leur environnement. Les nanotechnologies permettent d'augmenter de manière drastique la sensibilité d'un élément chimique. La détection d'une seule molécule est même envisageable avec les nanomatériaux [16].

### 3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé plusieurs tags RFID sans puce. En essayant de satisfaire les deux critères de performances du codage qui sont ; la densité de codage surfacique et la densité spectrale de codage, donc notre challenge était de coder le plus grand nombre de bits dans la surface et la bande de fréquences la plus réduites possible.

Enfin, nous avons démontré qu'on peut aller à la fonction capteur juste avec un petit changement capacitif qui entraîne un changement dans la fréquence de résonance. En utilisant juste un substrat FR-4 à moindre coût.

### *Conclusion Générale*

Dans ce travail nous avons premièrement introduit la technologie RFID et ses différentes familles, et spécifiquement la RFID sans puce.

Ensuite, nous avons abordé les concepts de codage que l'on peut utiliser dans un tag sans puce, où l'information est codée dans le domaine fréquentiel. Nous avons introduit des critères de performance sur le codage tel que la densité de codage surfacique et la densité de codage spectrale pour mieux évaluer le codage d'un tag sans puce donné.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté la conception et la simulation de différents designs de tags sans puces, conçus avec différents substrats dont le FR-4 qui a un substrat à bas coût. Les résultats obtenus ont été comparés notamment en termes de performances (DCS et DSC) et niveau du signal SER détecté.

Enfin, il a été question de présenter les dernières expérimentations qui permettront d'ajouter des fonctions supplémentaires aux tags sans puce telles que la possibilité de détecter la variation d'un paramètre environnemental.

Pour réaliser cette fonction, il faudrait dans la pratique utiliser des capacités inter-digités dont la valeur est fonction de la permittivité relative du milieu dans lequel elle est placée. En ajoutant cette capacité entre les brins d'un résonateur en C par exemple, et en ajoutant un matériau (dit smart material) au-dessus de cette capacité qui est sensible à un paramètre physique, telle qu'un gaz, ou la température ou bien l'humidité, le changement de permittivité de ce matériau induit un changement de valeur de la capacité inter-digité et donc provoque un décalage en fréquence d'un pic de la réponse SER. En faisant un étalonnage entre le décalage en fréquence, et les valeurs de la capacité à des valeurs réelles de références on arrive ensuite à extraire la valeur du paramètre physique surveillé.

Dans notre étude, nous nous sommes contentés de vérifier par simulation qu'en plaçant une capacité localisée entre les brins d'un résonateur en C, choisit pour la fonction capteur et en modifiant sa valeur manuellement on retrouve bien un décalage du pic sur la réponse SER du Tag, ce qui s'apparente à un changement de la valeur physique surveillée, si la capacité était sensible à son environnement.

L'ajout de la fonction capteur dans les tags RFID sans puce est aujourd'hui au stade de la recherche, tout comme la RFID sans puce qui est aujourd'hui encore non standardisé. Ceci doit être vu comme une des nombreuses perspectives de développement que devrait connaître cette technologie prometteuse.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] D.Dobkin, “RF in RFID: Passive RFID UHF in Practice”, Newnes, 2008.
- [2] [Http://www.vectorsite.net/ttwiz\\_01.html](http://www.vectorsite.net/ttwiz_01.html).
- [3] Himanshu Bhatt and Bill Glover, “RFID Essentials”, 1st edition, O’Reilly Media ,2006.
- [4] [Http://www.rfidjournal.com](http://www.rfidjournal.com).
- [5] [Http://www.discoverrfid.org/how-it-works/history/development-of-rfid.html](http://www.discoverrfid.org/how-it-works/history/development-of-rfid.html).
- [6] C. Hartman, A global saw id tag with large data capacity. Ultrasonics Symposium, 2002.Proceedings.2002 IEEE, p.65-69. 2002.
- [7] [www.rfidjournal.com](http://www.rfidjournal.com), C.Swedberg. “NASA Launches RFID to Track Vibration”, 1 ,Sep 22, 2011.
- [8] Wireless Network Communications Overview for Space Mission Operations. Report Concerning Space Data System Standards, CCSDS 880.0-G-1.Green Book.Issue 1. Washington, D.C.: CCSDS, December 2010.
- [9] <https://www.vizinexrfid.com/rfid-used-aerospace-aviation>.
- [10] [www.rfidjournal.com](http://www.rfidjournal.com),C.Swedberg “Aerospace Company Gains Efficiency Threefold With RFID”, 10 juin 2018.
- [11] L.Margulis, Preradovic,Stevan,Karmakar,Nemai,Croatia,INTECHOpen AccessPublisher, 2011.
- [12] A. El-Awamry, M. Khaliel, A. Fawky, M. El-Hadidy, T. Kaiser, “Novel notch modulation algorithm for enhancing the chiplessrfid tags coding capacity,” in RFID (RFID),2015 IEEE International Conference on, p. 25–31, April 2015.
- [13] M.Khaliel, A.El-Awamry, A.Fawky, M.El-Hadidy and T. Kaiser,“A Novel Co/CrosspolarizingChipless RFID Tags for High Coding Capacity and Robust Detection,” 2015IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vancouver, BC, p.159-160. 2015.
- [14] V.Plessky,L.Reindl ” Review on SAW RFID tags”,IEEE Trans,Ultrason,Ferroelectr. Freq,Control, p 654–668,2010.
- [15] L.Zhang,S.Rodriguez, H.Tenhunen,”An innovative fully printable RFID technology based on high speed time-domain reflections”. High DensityMicrosystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, p.166-170, 2006.
- [16] A.Vena, “ Contribution au développement de la technologie RFID sans puce à haute capacité de codage”, thèse de doctorat, p.38, 96 ,110-112,204 ,206, 2012.
- [17] S.Preradovic, N.Karmakar. “Design of fully printable planar chiplessrfid transponder with 35-bit data capacity”. Microwave Conference, 2009,EuMC 2009, European, P.13-16, 2009.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [18] S.Preradovic ,S.Roy, N.Karmakar .”Fully printable multi-bit chiplessrfid transponder on flexible laminate”,Microwave Conference, 2009,APMC 2009. Asia Pacific, p.2371-2374, 2009.
- [19] S.Preradovic ,I.Balbin , N.Karmakar ,G.Swiegers. “A novel chipless rfid system based on planar multiresonators for barcode replacement”. RFID, 2008 IEEE International Conference on, p.289-296. 2008.
- [20] I.Jalaly ,I.Robertson .“Capacitively-tuned split microstrip resonators for rfid Barcodes”. Microwave Conference, 2005 European, p.1-4, 2005.
- [21]I.Jalaly ,I.Robertson .. “Rf barcodes using multiple frequency bands. Microwave Symposium Digest”, 2005 IEEE MTT-S International, p.1-4, 2005.
- [22]O. Rance, E. Perret.“Synthèse de SER pour la technologie RFID sans puce à forte capacité de codage”, thèse de doctorat ,Romain, p.98,2015.
- [23] S. Preradovic ,I.Balbin , N.Karmakar ,G.Swiegers. “A novel chiplessrfid system based on planar multiresonators for barcode replacement”.RFID, 2008 IEEEInternational Conference on, p.289-296. 2008.
- [24] O.Rance, E.Perret.“Synthèse de SER. pour la technologie RFID sans puce à forte capacité de codage”,Romain, p.99,2015.
- [25] S.Mukherjee.”Chipless radio frequency identification by remote measurement of complex impedance”,Wireless Technologies, 2007 European Conference on, , p.249-252. 2007.
- [26] I.Babli, N. Karmakar. “Phase-encoded chiplessrfid transponder for largescale low-cost applications”. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, p.509-511.2009 .
- [27] A.Vena ,E.Perret , S.Tedjini.”Novel compact rfidchipless tag”.PIERS Proceedings, Marrakesh, Morocco, p.1062-1066, 2011.
- [28] A.Vena, E.Perrete ,S.Tedjini . “Rfidchipless tag based on multiple phase Shifters” .Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International, p.1-4.2011.
- [29] C.Mandel ,M. Schussler ,M.Maasch ,M.Jakoby.“ A novel passive phase modulator based on lh delay lines for chipless microwave rfidapplications”. Wireless Sensing,Local Positioning, and RFID, 2009. IMWS 2009.IEEE MTT-S International MicrowaveWorkshop on, p.1-4 ,2009.
- [30] M. Mumtaz, S. Amber ,A. Ejaz , A. Habib. “ Design and analysis of C shaped chipless RFID tag”,November 2017.
- [31] A. Vena, E.Perret, and S. Tedjini.“Chipless RFID Tag Using Hybrid Coding Technique,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, no. 12, p. 3356-3364, December 2011.
- [32] E. Perret. “ Technologie RFID sans puce”, Prix Brillouin-Glavieux ,3-3 -2017.
- [33] R.Bhattacharya ,C.Floerkemeier , S.Sharma. “Low-cost, ubiquitous rfid-tag-antenna-based sensing. Proceedings of the IEEE, p.1593-1600,2010.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [34] K.Finkenzeller.“Rfid handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication”. Wiley. 2010.
- [35] L.Yang ,R.Zhang , D.Staiculescu , C.Wong , M.Tentzeris.“ A novel conformalrfid-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas-detection applications”. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, p.653-656,2009.
- [36] T.Thai ,F.Chebila , J.Mehdi , P.Pons ,H. Aubert, G.Dejean, M.Tentzeris, , R.Plana.“Design and development of a millimetre-wave novel passive ultrasensitive temperature transducer for remote sensing and identification”. Microwave Conference (EuMC),2010 European, p.45-48 ,2010.
- [37] S.Shrestha,M.Balachandran, M. Agarwal,V.Phoha, K.Varahramyan.“ Achiplessrfid sensor system for cyber centric monitoringapplications”. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, p.1303-1309,2009 .
- [38] F.Chebila ,M.Jatlaoui , P.Pons ,H.Aubert. “Reconfigurable multi-band scatterers for micro-sensors identification. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009.APSURSI'09. IEEE, p. 1-4, 2009.
- [39] N. Javed, A. Habib, A. Akram, Y. Amin, H. Tenhune.“16-Bit Frequency Signature Directly Printable Tag for Organic Electronics,”IEICE Electronics Express, vol. 13, no. 11, p. 1-6, 2016.
- [40] M. Polivka, J.Machac, “Improvement of backscatter properties of C-shaped dipole scatterer for chipless RFID,” Asia-Pacific MicrowaveConference, Sendai, Japan, p. 962-964, 2014.
- [41] K. Mahmud, P.Majumder. “Improvement of the read range of a chipless RFID for MPSK UWB system in outdoor and farm NLOS environment using receiver diversity with maximal ratio combining,” 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), Dhaka, p. 504-509, 2014.
- [42] A.Habib, R. Asif, M. Fawwad, Y.Amin, J. Loo, and H. Tenhunen. “Directly printable compact chipless RFID tag for humidity sensing”, 01 May 2017.
- [43] M. Riaz S. Aslam ,H. Shahid ,Y.Amin “Novel T-shaped resonator based chipless RFID tag” . September 2017.