



**HAL**  
open science

# Conception et optimisation de circuits électroniques communicants pour une intégration au format carte bancaire : application à une serrure de vélo à assistance électrique

Fatine Lahmani

## ► To cite this version:

Fatine Lahmani. Conception et optimisation de circuits électroniques communicants pour une intégration au format carte bancaire : application à une serrure de vélo à assistance électrique. Autre. Université de Cergy Pontoise, 2014. Français. NNT : 2014CERG0686 . tel-01023711

**HAL Id: tel-01023711**

**<https://theses.hal.science/tel-01023711>**

Submitted on 15 Jul 2014

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

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



Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Cergy-Pontoise

Ecole doctorale Sciences et Ingénierie

Par

Fatine LAHMANI

***« Conception et optimisation d'un circuit autonome et  
communicant au format carte bancaire.  
Application à une serrure de vélo à assistance électrique »***

Jury :

Présidente : Emmanuelle Bourdel – Maître de Conférences à l'UCP

Rapporteur : Cécile Belleudy – Professeur à l'Université de Nice Sophia-Antipolis

Rapporteur : Samir Bouaziz – Professeur à l'Université Paris-Sud Orsay

Examineur : Bertrand GRANADO – Professeur à l'Université de Paris 6

Examineur : Jean-Charles RENAUD – Directeur général d'UINT



## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Bertrand Granado, Professeur des Universités au LIP6. J'ai pu bénéficier de ses compétences et de son expérience ainsi que de son large soutien durant mes années de thèse et plus particulièrement la période de rédaction. Je remercie également très chaleureusement tous les membres de l'entreprise UINT à commencer par son président Philippe Blot, toujours présent pour prodiguer de précieux conseils ; Jean-Charles Renaud, son directeur général qui a joué le rôle d'un co-encadrant, j'ai pu bénéficier de ses nombreuses compétences et de sa grande expérience mais également d'un large soutien moral lors des moments difficiles. Un grand merci à Didier Mobétie, responsable de la R&D au sein de l'entreprise avec qui j'ai été en étroite collaboration et qui m'a permis de comprendre les nombreuses contraintes du monde industriel ainsi que pour toutes ses connaissances en électronique embarquée et en RF et pour tous les échanges fructueux que l'on a pu avoir.

Mes remerciements vont également à Thomas Leoudec et Jean-Philippe Authier, les deux autres membres de l'équipe d'UINT pour leur accueil, leur bonne humeur et leur soutien.

Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler au sein du laboratoire ETIS : les permanents : Inbar, Laurent, Olivier, Guy ; le personnel administratif : Annick et Anthony et les doctorants : Amel, Laurent, Liang, Lounis et Lotfi.

Un grand merci à Emmanuelle Bourdel pour avoir accepté de présider mon jury de thèse et pour les échanges et son aide lors du choix des antennes.

J'adresse mes remerciements à Cécile Belleudy, maître de conférences à l'Université de Nice-Sophia Antipolis et Samir Bouaziz, professeur de l'Université de Paris 6 pour avoir accepté d'être rapporteurs de ces travaux et pour leurs remarques constructives.

Je remercie sincèrement les personnes que j'ai côtoyées au sein du LIP6 lors de la période de rédaction : les permanents : Patrick, Andrea, Annick, Khalil mais surtout les doctorants qui m'ont accueillie et supportée pendant 3 mois : Christian mon voisin de bureau, merci pour ton soutien, ta bonne humeur et les longues discussions à refaire le monde mais aussi tous les autres : Ruomin, Yuhui, Laurent, Alexandre, Imen et Mohammed.

Un énorme merci à mes amis qui m'ont supportée et soutenue pendant ces années de thèse et surtout durant la période de rédaction : Marion, qui a commencé par être ma collègue et ensuite amie, merci pour tous les fous rires et surtout d'avoir toujours cru en moi !! Laure, ma binômette de toujours et ma plus vieille amie pour tes encouragements malgré la distance, les longues discussions au téléphone et tout simplement d'avoir été là. Mes amis bordelais : Nicole, Sofiane, David et Steven. Mes amis parisiens : Florie, Kelly, Marie, Youness, Fred, Oussama, Pauline, Amine, Maryse, Marie-Line, Fathia, Jessica et tous les autres... La liste est longue et je ne peux citer tout le monde. Mes amis du Maroc : Adil, Hind, Sara et Maha et tous ceux dont j'ai croisé la route durant ces années.

Enfin mes plus sincères remerciements vont à ma famille : mes parents, mon frère et ma sœur qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenue quelles que soient les décisions que j'ai prises. Je vous dédie ce travail.

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Les contraintes liées à la conception de systèmes au format carte bancaire.....</b>	<b>5</b>
1. Les contraintes géométriques .....	6
2. La consommation .....	8
2-1. La consommation des circuits embarqués.....	8
2-2. L'alimentation des cartes au format bancaire .....	10
2-2-1. Principe de fonctionnement .....	11
2-2-2. Applications.....	12
3. L'identification par radio-fréquence .....	13
3-1. Les briques principales d'un système RFID.....	14
3-2. Notion de passif et d'actif.....	14
3-3. Le marché de la RFID.....	14
3-4. Taxonomie.....	16
3-5. Fonctionnement théorique.....	17
3-5-1. Couplage inductif .....	18
3-5-2. Couplage électrique .....	21
3-5-3. Le cas des tags actifs .....	22
3-6. Régulations et normes RFID.....	23
4. Conclusion .....	24
<b>Chapitre 2 : Etat de l'art de la RFID active.....</b>	<b>27</b>
1. Le marché de la RFID active.....	29
2. Les applications de la RFID active.....	31
3. Les produits de la RFID active.....	33
3-1. Le coin ID.....	34
3-2. Les Items IR .....	34
3-3. Porte badge actif.....	35
3-4. Boîtier de télécommande .....	35
3-5. Thineline IR.....	36
3-6. Slim ID .....	36
3-7. Tag actif de chez Axem Technology .....	37
3-8. Porte clé actif de chez Ingecom .....	37
3-9. Bracelet actif de chez Ingecom .....	38
3-10. Tag actif de chez Newsteo .....	38
4. La RFID active en Chine .....	39
4-1. Généralités .....	39
4-2. Les facteurs de développement.....	40
4-3. Les domaines d'applications de la RFID en Chine .....	40
4-4. Quelques exemples de produits .....	41
4-4-1. Le badge fin actif.....	42
4-4-2. Tag actif spécialement conçu pour les surfaces métalliques.....	43
4-4-3. Tag actif « porte-clé » .....	43
5. Conclusion .....	44

## Table des matières

---

<b>Chapitre 3 : Etudes préliminaires sur les batteries et les antennes .....</b>	<b>45</b>
1. Etude effectuée sur différentes batteries flexibles .....	46
1-1. Les batteries primaires .....	46
1-1-1. Caractéristiques des batteries .....	46
1-1-2. Les tests effectués .....	48
1-1-2-1. Première série de tests .....	48
1-1-2-2. Deuxième série de tests .....	50
1-2. Les batteries rechargeables .....	56
1-2-1. Caractéristiques des batteries .....	56
1-2-2. Les tests effectués .....	57
1-2-2-1. Type 1 .....	58
1-2-2-2. Type 2 .....	59
1-2-2-3. Type 3 .....	61
1-2-2-4. Type 4 .....	62
1-2-2-5. Type 5 .....	64
1-2-2-6. Conclusion .....	65
2. Conception de systèmes intégrés RFID .....	65
3. Exemple d'application : la biométrie .....	69
4. Conclusion .....	70
<b>Chapitre 4 : Conception et réalisation d'un tag actif au format carte bancaire .....</b>	<b>71</b>
1. Première solution .....	72
1-1. Les étapes de conception .....	72
1-2. Les étapes de réalisation .....	73
1-3. Les tests expérimentaux .....	76
2. Deuxième solution .....	78
2-1. Les étapes de conception .....	78
2-1-1. Conception du tag .....	80
2-2-2-1. Choix des composants .....	80
a) L'antenne .....	80
b) Le transceiver .....	82
c) Le microcontrôleur .....	83
d) Les passifs .....	84
e) Les plots de programmation .....	84
f) Les plots de test .....	84
g) Les batteries .....	84
2-2-2-2. Le schéma de principe du tag .....	85
2-2-2-3. Le schéma électrique du tag .....	86
2-1-2. Conception du lecteur .....	87
2-2-2-1. Les principaux éléments qui constituent le lecteur .....	87
a) L'antenne .....	87
b) Le circuit d'adaptation de l'antenne .....	87
c) Le transceiver .....	88
d) Le quartz .....	88
e) Le microcontrôleur .....	88

## Table des matières

f) La partie récupération du signal .....	88
g) La partie régulation de la tension d'alimentation et protection.....	89
h) Les passifs.....	89
2-2-2-2.Le schéma de principe du lecteur .....	90
2-2-2-3.Le schéma électrique du lecteur .....	90
2-1-3.Programmation .....	91
2-2-3-1.Programmation du tag .....	91
2-2-3-2.Programmation du lecteur .....	92
2-2.Les étapes de réalisation.....	93
2-2-1.Le routage .....	93
2-2-2.Fabrication des boards et montage des composants .....	95
2-2-3.Programmation des circuits .....	96
2-3.Validation expérimentale.....	96
2-4.Caractéristiques finales de la carte.....	99
3.Conclusion .....	100
<b>Chapitre 5 : Optimisation de la conception.....</b>	<b>101</b>
1.Un méthodologie de conception de systèmes basée sur les modèles .....	102
1-1.La méthode APBD .....	102
1-2.La méthodologie proposée .....	103
1-3.Système à modéliser .....	104
2.Introduction à la modélisation .....	104
2-1.Comment peut-on modéliser un système hétérogène comme le nôtre ? .....	105
2-2.Les moyens de modélisation.....	105
3.VHDL-AMS .....	106
3-1.Histoire du VHDL-AMS .....	106
3-2.Les avantages de VHDL-AMS .....	106
3-3.Les limites de VHDL-AMS .....	106
4.Modèle d'une batterie .....	107
4-1.Modèles électriques basés sur le schéma équivalent de Thévenin.....	107
4-1-1.Le modèle idéal .....	107
4-1-2.Le modèle idéal amélioré.....	108
4-1-3.Autre modèle électrique .....	108
4-2.Modèles électriques basés sur le temps de fonctionnement de la batterie .....	109
4-3.Le modèle électrique évolué de la batterie .....	110
4-4.Le modèle en VHDL-AMS .....	112
4-5.Résultat de la simulation.....	113
5.L'antenne et le canal de propagation.....	113
6.Le microcontrôleur et le bus SPI.....	113
7.Utilisation des modèles .....	114
8.Conclusion .....	114
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>115</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>117</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>121</b>

## Liste des figures

---

Figure 1: Domaines d'activité d'UJINT .....	3
Figure 2: Dimensions normalisées d'une carte au format bancaire .....	7
Figure 3: Les différentes couches qui constituent une carte .....	7
Figure 4: Glop top.....	8
Figure 5: Exemple d'un circuit flexible .....	8
Figure 6: Exemple d'une batterie fine et flexible .....	10
Figure 7: Procédé d'oxydo-réduction au sein d'une batterie.....	11
Figure 8: Caractéristiques d'une batterie spécialement conçu pour un applicatif au format carte bancaire.....	13
Figure 9: Briques principales composant un système RFID .....	14
Figure 10: Recettes enregistrées par les composants RFID en Milliards de dollars en 2012 [22] .....	15
Figure 11: Projection du marché de la RFID en Milliards de dollars – [22] .....	15
Figure 12: Illustration de tags RFID et de code-barres.....	16
Figure 13: Représentation d'un système RFID sous forme de blocs .....	18
Figure 14: Transfert d'énergie par couplage magnétique – [21] et [24].....	18
Figure 15: Dipôle magnétique ou boucle de courant.....	20
Figure 16: Boucle de courant rectangulaire.....	20
Figure 17: Schéma électrique équivalent du lecteur couplé avec le transpondeur.....	21
Figure 18: Dipôle électrique ou Hertzien .....	22
Figure 19: Couplage électromagnétique et modulation d'impédance .....	22
Figure 20: Figure schématisant la fermeture de la serrure.....	28
Figure 21: Figure schématisant l'ouverture de la serrure .....	29
Figure 22: Valeur du marché de la RFID active en Milliards de Dollars – [27] .....	30
Figure 23: Secteurs de la RFID active – [27] .....	31
Figure 24: Application RFID active pour la surveillance anti-vol.....	32
Figure 25: Domotique: home automation via la RFID active .....	33
Figure 26: Coin ID – ELA [28] .....	34
Figure 27: Items IR –ELA [28].....	34
Figure 28: Porte badge actif – ELA [28] .....	35
Figure 29: Télécommande – ELA [28].....	35
Figure 30: Thineline IR – ELA [28].....	36
Figure 31: Slim ID – ELA [28].....	36
Figure 32: Tag actif – Ingecom [29] .....	37
Figure 33: Porte clé actif – Ingecom [29] .....	37
Figure 34: Bracelet actif – Ingecom [29] .....	38
Figure 35: Tag actif – Newsteo [30].....	38
Figure 36: Croissance du marché de la RFID en Chine [31].....	39
Figure 37: Badge fin actif.....	42
Figure 38: Tag actif - SZAAT .....	42
Figure 39: Tag actif anti-métal .....	43
Figure 40: Tag actif "porte-clé" .....	43
Figure 41: Différentes batteries primaires .....	47
Figure 42: Caractéristique de décharge standard d'une batterie .....	49
Figure 43: Principe de fonctionnement de l'appareil à interrupteurs .....	50
Figure 44: Décharge témoin d'une pile bouton .....	51



## Liste des figures

---

Figure 45: Zoom sur une partie de la décharge de la figure précédente.....	52
Figure 46: Profil de courant appliqué.....	53
Figure 47: Courbe de décharge pour la batterie type 1.....	53
Figure 48: Courbe de décharge de la batterie type 2.....	54
Figure 49: Courbe de décharge de la batterie type 3.....	54
Figure 50: Courbe de décharge de la batterie type 4.....	55
Figure 51: Courbe de décharge de la batterie type 5.....	55
Figure 52: Différentes batteries rechargeables.....	56
Figure 53: Kit de développement utilisé pour la deuxième série de tests.....	57
Figure 54: Profil de courant en mode discontinu.....	57
Figure 55: 5mA - 100/400ms.....	58
Figure 56: Courant continu 5mA.....	58
Figure 57: 2mA - 5/20ms.....	59
Figure 58: Charge de la batterie type 1.....	59
Figure 59: Décharge 30mA - type 2.....	60
Figure 60: 30mA continu - batterie type 2.....	60
Figure 61: Courbes de charge - batterie type 2.....	61
Figure 62: Décharge 10mA continu.....	61
Figure 63: Décharge 10mA - 5/20ms.....	62
Figure 64: Courbe de charge de la batterie type 3.....	62
Figure 65: Décharge continue.....	63
Figure 66: Décharge discontinue.....	63
Figure 67: Charge de la batterie type 4.....	63
Figure 68: 5mA continu.....	64
Figure 69: 20mA - 100/400ms.....	64
Figure 70: Paramètres géométriques de l'antenne imprimée.....	66
Figure 71: Différents designs d'antennes.....	66
Figure 72: Disposition du plan de masse autour des antennes.....	67
Figure 73: Comparaison entre deux fréquences de résonance pour un design d'antenne.....	68
Figure 74: Carte au format bancaire intégrant un lecteur biométrique.....	69
Figure 75: Clés existantes pour verrouiller/déverrouiller un vélo électrique.....	72
Figure 76: Schéma du principe de fonctionnement du système à 125kHz.....	73
Figure 77: Routage du circuit.....	75
Figure 78: Circuit obtenu après hybridation.....	76
Figure 79: Facteur de couplage.....	76
Figure 80: Géométrie d'une antenne basse fréquence.....	77
Figure 81: Dimensions du lecteur chinois.....	78
Figure 82: Différents designs d'antennes pour PCB à la fréquence 2,45GHz.....	81
Figure 83: Antenne du tag.....	81
Figure 84: Fréquence de résonance de l'antenne dipôle.....	82
Figure 85: Diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle.....	82
Figure 86: Configuration optimale pour le transceiver.....	83
Figure 87: Illustration d'une communication via un bus SPI.....	83
Figure 88: Schéma fonctionnel du tag.....	86
Figure 89: Microcontrôleur.....	86

## *Liste des figures*

---

Figure 90: Transceiver .....	87
Figure 91: Antenne du lecteur.....	88
Figure 92: Circuit d'adaptation de l'antenne.....	88
Figure 93: Partie récupération du signal .....	89
Figure 94: schéma du régulateur.....	89
Figure 95: Schéma fonctionnel du lecteur .....	90
Figure 96: Partie 1 .....	91
Figure 97: Partie 2 .....	91
Figure 98: Description du programme du tag .....	92
Figure 99: Description du programme du lecteur.....	93
Figure 100: Routage du tag .....	94
Figure 101: Routage du lecteur .....	94
Figure 102: Fabrication du tag.....	95
Figure 103: Fabrication du lecteur .....	95
Figure 104: Positionnement du lecteur lors des tests.....	98
Figure 105: Carte à vélo active .....	100
Figure 106: Méthode APBD .....	102
Figure 107: Etape 1 de la méthodologie: la base de données .....	103
Figure 108: Méthodologie proposée.....	104
Figure 109: blocs à modéliser.....	104
Figure 110: Modèle idéal d'une batterie [47] .....	108
Figure 111: Modèle de Thévenin [47] .....	109
Figure 112: Schéma fonctionnel de la batterie [47].....	109
Figure 113: Modèle discret pour tous types de batteries [47] .....	111
Figure 114: Réponse transitoire à un courant de décharge impulsionnel [47].....	112
Figure 115: Résultat de la simulation de la batterie PL-383562 avec deux profils de courant constants [47] .....	113
Figure 116: Modélisation de certains composants .....	114

## *Liste des tableaux*

---

Tableau 1: Puissances autorisées en fonction des principales fréquences de communication .....	24
Tableau 2: Caractéristiques des batteries primaires.....	47
Tableau 3: Résumé de la première série de tests sur les batteries primaires .....	49
Tableau 4: Principales caractéristiques des batteries rechargeables .....	56
Tableau 5: Mesures des fréquences de résonance .....	68
Tableau 6: Liste des solutions envisagées .....	79
Tableau 7: Consommation du transceiver en fonction du mode de puissance.....	85
Tableau 8: Consommation selon la puissance émise.....	97
Tableau 9: Mesure des distances entre le lecteur et le tag .....	98
Tableau 10: Détection des tags dans une poche ou un sac .....	99

*Introduction  
générale*

Depuis son apparition dans les années 70, les cartes à puce ont envahi le marché mondial, leur utilisation n'a cessé d'augmenter et de se diversifier. Sans forcément nous en rendre compte, chacun de nous en a plusieurs dans son portefeuille, son sac, son attaché-case...

Ces cartes peuvent servir dans des domaines multiples et variés :

- Le domaine bancaire avec la carte bleue ou visa...
- Les télécoms avec les cartes cabines téléphoniques,
- La téléphonie avec la carte SIM,
- La santé avec la carte vitale,
- Les transports avec le pass Navigo,
- L'identification de personnes avec les badges d'accès en entreprise...

En 2011, 6,3 milliards de cartes à puce ont été produites. 75% sont des cartes SIM et 16% des cartes bancaires [1]. En France, on dénombre en 2010, 88,6 millions de cartes à puce à usage bancaire [2].

Selon un récent rapport que vient de publier la compagnie RBR, il y avait 10 milliards de cartes de paiement en circulation en 2012 [3]. Il est également prévu qu'en 2018, 13,6 milliards de cartes seront en circulation. Cette croissance de 36% par rapport à 2012 s'explique par un fort développement du marché des cartes dans les pays émergents.

La filière française de la carte à puce compte une centaine d'acteurs, dont trois parmi les cinq leaders mondiaux : Gemalto, Oberthur et Morpho (groupe Safran). Les deux autres leaders étant l'allemand Giesecke & Devrient et le chinois Watchdata. La filière française emploie 35 000 personnes dans le monde et réalise 70% des 7 milliards d'euros de chiffre d'affaires généré par l'industrie de la carte dans le monde [4].

Toutes ces cartes ont pour point commun le fait de contenir des informations sur son titulaire qui servent à son identification dans les différentes actions qu'il souhaite effectuer. Ces informations sont présentes sur la piste magnétique et/ou sur la puce embarquée dans la carte. Avec les progrès technologiques actuels et plus précisément la miniaturisation des composants électroniques, nous sommes de plus en plus amenés à voir des composants complexes embarqués dans des cartes à puce pour satisfaire des besoins en applicatifs de plus en plus sophistiqués.

La complexification des systèmes embarqués intégrés dans une carte à puce amène à prendre en compte différentes contraintes lors de la conception. Tout d'abord, il y a celles liées aux systèmes embarqués standards, telles que la surface, la consommation et la rapidité d'exécution. Ensuite viennent celles liées à la carte à puce en elle-même, des spécificités liées à l'épaisseur et aux contraintes mécaniques. On retrouve également des contraintes de consommation et de surface.

L'apparition de la technologie sans-contact a révolutionné le domaine de la carte à puce. Plus besoin d'introduire la carte dans un lecteur pour lire les informations. Les données ne transitent plus par un contact entre la puce et un lecteur mais via l'air grâce à une antenne intégrée. Il suffit de se trouver à proximité du lecteur sans forcément sortir la carte de sa poche ou du sac. Elles sont connues sous le nom de cartes RFID pour Radio Frequency Identification ou identification par radio fréquence.

D'autres contraintes de conception sont alors apparues : choix de la fréquence à laquelle va se faire la communication et l'échange des données, la géométrie de l'antenne, le choix des composants...

L'entreprise UINT, dans laquelle mes travaux ont eu lieu est une société spécialisée dans les solutions de circuits électroniques flexibles, insérables dans des cartes au format bancaire et autonomes c'est à dire embarquant leur propre source d'énergie. Elle a été créée en Avril 2008 et a obtenu le label de Jeune Entreprise Innovante (JEI) en Juin 2009, décerné par le Ministère du Budget, des Comptes Publics et de la Fonction Publique [5].

La figure 1 montre les différents domaines d'activités d'UINT.



Figure 1: Domaines d'activité d'UINT

Dans le détail UINT a parmi ses activités :

- L'authentification forte : UINT propose des solutions pour pouvoir s'authentifier de manière sécurisée avec des cartes à mot de passe dynamique (OTP, One Time Password ou mot de passe à usage unique). L'OTP est soit une séquence numérique qui s'affiche sur un écran ou une séquence acoustique. Elle investigate aussi un autre moyen de l'authentification forte qui est la biométrie avec un capteur biométrique directement intégrée dans la carte de crédit.
- Le médical : pour l'un de ses clients, UINT a développé une carte destinée aux secouristes afin de les aider à contrôler certains gestes thérapeutiques comme le massage cardiaque.
- Le jeu : adaptation de jeux célèbres au format carte, tel que la roue de la fortune ou encore des cartes à gratter électroniques.
- Carte cadeau : une carte cadeau qu'il est possible de personnaliser avec du son et de la lumière.

La plupart des cartes d'UINT sont au format bancaire ISO 7810 qui spécifient notamment les caractéristiques géométriques de ces cartes : la largeur, la hauteur et l'épaisseur sont prédéfinies. Ces cartes diffèrent des cartes à puce habituelles car l'on peut intégrer différents composants avec ou sans la puce propre à la carte bancaire. Parmi ces composants on peut trouver des microprocesseurs, des écrans d'affichage, des antennes, des leds, des buzzers et bien d'autres.

Tous ces composants ont besoin d'une source d'alimentation. Les circuits RFID dits passifs puisent leur énergie dans le champ magnétique produit à proximité du lecteur mais la complexité de certains circuits nécessite la présence d'une source d'alimentation intégrée dans la carte, dans ce cas les circuits sont dits actifs. En général, ce sont des batteries fines et flexibles qui sont utilisées. Là aussi, la technologie a fait d'immenses progrès et des batteries plus fines et avec de plus grandes capacités voient le jour. Ce sont ces batteries qui viennent alimenter les composants de la carte. Tous ces éléments constituent un véritable système électronique.

Cette thèse industrielle a pour but dans un premier temps de concevoir un circuit électronique embarqué dans une carte au format bancaire pour réaliser une serrure sans fil pour un vélo électrique en répondant à un cahier des charges bien défini tout en prenant en compte les différentes contraintes imposées par ce format.

Ce circuit se devra d'être flexible, autonome et consommant le moins d'énergie possible.

Dans un deuxième temps, une fois le produit réalisé et validé le but est de l'optimiser en proposant une méthodologie de conception pour accélérer le temps de mise sur le marché. Cette méthodologie peut s'appuyer sur des modèles simples mais qui prennent en compte toutes les contraintes liées à ce type d'applications.

Ce manuscrit comporte cinq chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre explique plus en détails les contraintes liées à la conception des systèmes embarqués en général et des cartes à puce en particulier. On y abordera plus précisément les problématiques liées à la RFID afin d'en comprendre les briques principales et le fonctionnement ; ainsi que celles liées à la consommation et aux batteries.

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art de la RFID active et des solutions existantes sous forme de tags actifs.

Le troisième chapitre est consacré aux études menées sur les batteries fines et flexibles et sur la RFID, primordiales pour les choix technologiques liés à la conception. Un exemple de conception typique y est présenté.

Le quatrième chapitre donne toutes les étapes de conception et de réalisation de la serrure pour vélo.

Et finalement le cinquième chapitre est quant à lui consacré aux solutions proposées afin d'optimiser la conception de tels circuits électroniques.

*Chapitre 1 : Les  
contraintes liées à la  
conception des  
systèmes au format  
carte bancaire*



Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux contraintes liées à la conception des circuits embarqués dans une carte au format bancaire et aux paramètres qu'il faut prendre en compte lors de cette phase.

Un système embarqué peut être défini comme un système électronique et informatique autonome fonctionnant en temps réel. Il a en général les spécificités suivantes :

- Il est dédié pour une application spécifique,
- Il a un coût normalement réduit,
- Il dispose d'un espace restreint (volume, capacité mémoire),
- Il a une capacité de calcul plus ou moins importante selon les applications,
- Il possède une fiabilité et une sûreté de fonctionnement,
- Il a une consommation d'énergie très faible,
- Il est généralement réalisé autour d'un processeur.

Les contraintes de développement et conception pour les systèmes embarqués concernent en général trois points : la surface ou les contraintes géométriques, la consommation et la rapidité d'exécution. Avec les progrès de la technologie dans la miniaturisation des composants et les techniques de fabrication, les systèmes embarqués sont amenés à être de plus en plus performants et notamment de plus en plus rapides dans l'exécution des commandes et des consignes.

Ces trois contraintes sont en général liées ; plus les systèmes doivent être rapides et performants plus ils consomment de l'énergie alors que ce qui est recherché est justement l'effet inverse. D'où la nécessité de trouver un compromis entre rapidité et consommation.

Nous allons, dans un premier temps, nous intéresser plus en détails aux deux premiers points et aborder également le cas particulier des cartes à puce. La rapidité quant à elle est généralement liée au processeur utilisé et dépend fortement des applications [6].

Nous allons nous intéresser ensuite à un autre point primordial lors de la conception, qui est la communication avec le monde environnant. Cette communication s'effectue en général via une liaison radio-fréquence.

### **1. Les contraintes géométriques :**

Les contraintes géométriques liées aux cartes à puce sont liées aux normes ISO (organisation internationale de normalisation) qui impliquent des contraintes physiques de géométrie de la carte.

Les cartes à puce et les cartes bancaires sont régies par les normes ISO 7810 [7] qui spécifient entre autres les dimensions géométriques des cartes.

Les cartes doivent mesurer 85 x 54 mm. Elles sont en général en plastique avec une épaisseur de 0,8 mm et des coins arrondis avec un rayon de 3 mm. La figure 2 illustre ces dimensions.

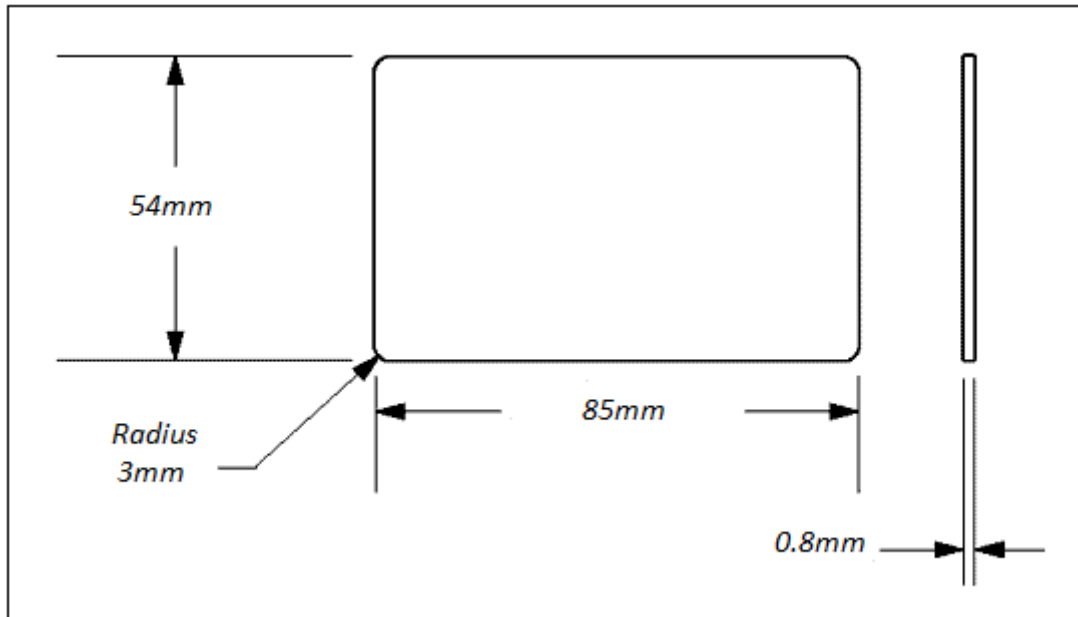


Figure 2: Dimensions normalisées d'une carte au format bancaire

La principale contrainte qui découle de cette spécification géométrique est relative à l'épaisseur des composants.

La figure 3 illustre les différentes couches qui constituent une carte bancaire ou à puce.

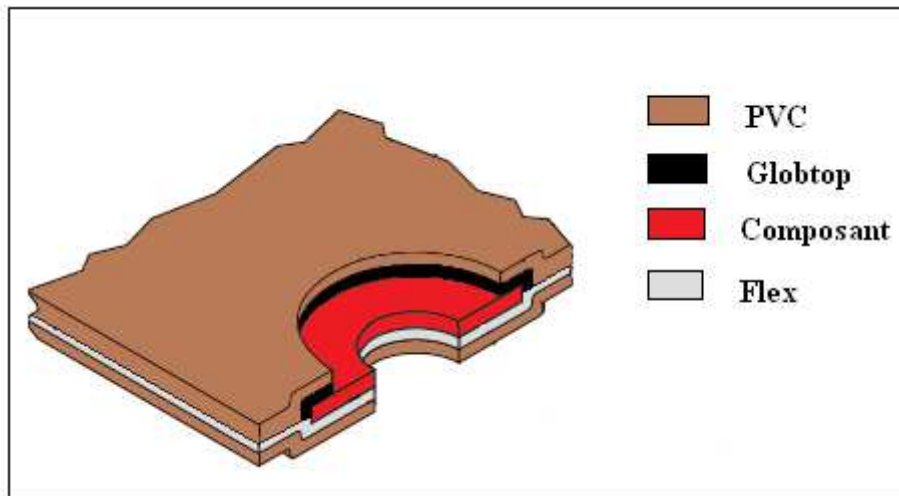
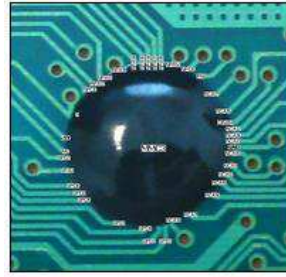


Figure 3: Les différentes couches qui constituent une carte

Tout d'abord il y a le flex. Cette couche est généralement constituée de FR-4. Le FR-4 (Flame Resistant 4) est un composite de résine époxy renforcé de fibre de verre et est couramment utilisé pour la fabrication des circuits imprimés à cause de sa haute résistance mécanique et son isolation électrique. C'est sur cette couche également que seront montés les composants.

Dans certains cas les composants doivent être montés sans leur packaging qui peut être trop volumineux, ils sont alors dits en puce nue ou en die. Ce sont essentiellement les microprocesseurs et autres composants de ce type qui sont concernés. Pour les protéger, on rajoute par-dessus une résine de protection que l'on appelle glop top (figure 4). Les composants de base comme les composants passifs et les leds satisfaisants ces contraintes sont assez faciles à trouver sur le marché.



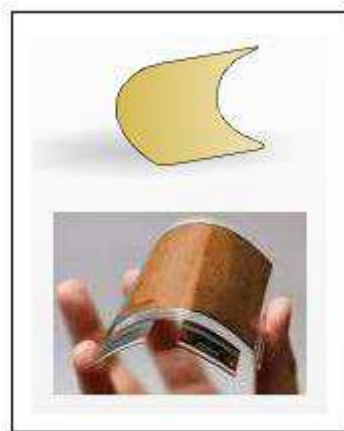
**Figure 4: Glop top**

Le flex ainsi constitué est prêt à être laminé, c'est-à-dire « encarté » entre deux couches de plastique (PVC) grâce à un procédé que l'on appelle lamination ou laminage [8]. La lamination peut se faire à chaud ou à froid.

Ce sont toutes ces différentes couches qui doivent faire 0,8 mm en épaisseur au maximum. Si on prend en compte les épaisseurs des autres couches nous arrivons au fait que les composants ne doivent pas dépasser 400 $\mu$ m.

Une contrainte qui existe aussi pour la conception de circuits au format carte bancaire est liée à la flexibilité. La carte bancaire est une carte qui est flexible, pour pouvoir la glisser dans la poche ou dans un support non rigide sans l'abîmer, ceci est illustré sur la figure 5.

Cette contrainte implique que les composants qui doivent y être embarqués doivent également être flexibles ainsi que le circuit reliant ces composants.



**Figure 5: Exemple d'un circuit flexible**

L'épaisseur des composants et la flexibilité constituent les principales contraintes géométriques qui rentrent en compte dans la conception des cartes à puce. Bien évidemment, il y a aussi la contrainte de la surface qui est limitée sur une carte. Il faut également la prendre en compte dans l'agencement des composants et des pistes qui les relient.

Voyons maintenant ce qu'il en est de la consommation.

## **2. La consommation :**

### **2.1. La consommation des circuits embarqués :**

La consommation est un élément très important dans l'élaboration et la conception des circuits électroniques embarqués [9]. La technologie des composants électroniques est un domaine où les progrès se succèdent à un rythme extrêmement rapide. L'augmentation des fréquences de fonctionnement des processeurs, ainsi que la réduction de la taille des circuits permettent une intégration toujours plus fine, concentrant une puissance de plus en plus importante dans un espace toujours plus étroit.

L'une des caractéristiques citées auparavant des circuits embarqués est leur importante puissance de calcul combinée à une grande autonomie. Or, ces deux paramètres sont en général contradictoires. En effet, les technologies actuelles ne permettent l'augmentation de la capacité de traitement des processeurs qu'au prix d'une augmentation de l'énergie consommée. De nombreuses techniques, matérielles et logicielles, ont été développées afin de maîtriser cette consommation. Parmi ces méthodes on peut citer le projet OpenPeople qui permet de caractériser en amont la consommation des composants d'un système [10]. Cette gestion de la consommation revêt une importance de plus en plus grande dans la conception d'un système embarqué, et concerne de plus en plus de composants au sein d'un tel ensemble.

Un système embarqué est composé en général d'un processeur, d'une mémoire, d'entrées et sorties et d'un programme contrôlant ces différents éléments. Il doit également disposer d'une source d'énergie sous forme de générateurs ou de batteries [11].

Le principal problème relatif à la consommation des systèmes embarqués est l'autonomie. Quelle est la durée de vie de la batterie source d'énergie et par la même occasion celle du produit ?

Pour étendre l'autonomie de fonctionnement d'un système, deux méthodes existent : augmenter la quantité d'énergie embarquée ou diminuer la consommation du système. La première solution a donné lieu à de nombreuses recherches qui malgré les progrès effectués dans ce domaine mènent toujours au même résultat : il est difficile d'augmenter la capacité d'une batterie sans en augmenter le poids, le volume et le prix. La seconde solution est complémentaire à la première. Au final, il faudra trouver un compromis entre les deux. Il existe plusieurs méthodes [11] pour obtenir un système à faible consommation. La première et la plus répandue est la conception de composants spécifiquement conçus pour consommer le minimum d'énergie. La seconde méthode consiste à modifier le logiciel pour diminuer le coût énergétique de son exécution : optimisation du code des applications, adaptation des protocoles de communication, etc... La troisième méthode mêle le matériel et le logiciel afin d'optimiser la consommation totale du système. Elle s'appuie sur des mécanismes matériels pour diminuer la consommation mais utilise le logiciel pour réaliser une adaptation dynamique de la consommation en fonction de la charge courante du système, comme par exemple la mise en veille des périphériques ou l'endormissement d'une partie ou de la totalité du système pendant un temps donné ou bien de stratégies de modification de la fréquence ou de la tension d'alimentation nommées DVFS (Dynamic Voltage Frequency Scaling) ou encore des architectures multibancs mémoire [12].

Les méthodes matérielles préconisent de travailler sur la consommation des composants utilisés, soit en essayant de diminuer leur tension d'alimentation grâce au progrès dans la conception des processeurs et à la meilleure maîtrise des techniques de fabrication, soit en choisissant les périphériques du composant qui consomment le moins et de faire un compromis entre consommation et dernière technologie de pointe.

Les techniques logicielles consistent quant à elles à modifier le code à exécuter afin de diminuer la consommation induite par l'exécution de ce dernier. Elles interviennent en général au niveau des outils

de développement des applications. L'estimation réelle du coût énergétique d'un code reste difficile à réaliser. Dans certains systèmes il est toutefois possible d'avoir une idée de ce coût. Dans des systèmes multi-bancs mémoires où il est possible d'éteindre certains bancs, un code important en taille utilisera plusieurs bancs et risque d'augmenter de facto la consommation. Il est aussi possible de réduire la durée d'exécution d'une application pour réduire la consommation induite, par exemple en recopiant le code d'une fonction à l'endroit où elle est invoquée plutôt que d'insérer une procédure d'appel de fonction qui peut induire une surcharge de consommation. On peut également faire un gain de consommation en modifiant le protocole de communication, en regroupant par exemple les données à émettre afin de diminuer le nombre d'émissions/réceptions.

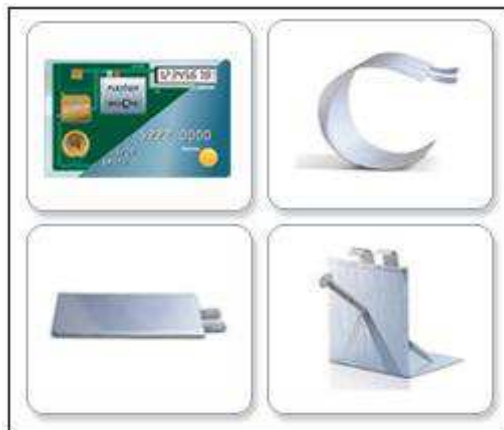
Les techniques hybrides, qui combinent le matériel et le logiciel, se basent sur les capacités du matériel pour diminuer la consommation du circuit embarqué mais les décisions sont prises par le logiciel. L'une des techniques les plus répandues est la mise en veille. La mise en veille consiste à désactiver certains périphériques ou certaines parties du périphérique lorsque le système n'en a pas l'usage pendant un certain temps, cela peut aller de l'activité totale à la mise en sommeil complète, voir la déconnexion du système. Ces différents états de veille correspondent à des niveaux de consommation différents, fonctions de l'activation ou la désactivation des sous-systèmes du périphérique. Plus l'état de veille est profond, plus la consommation est diminuée. Cela au coût d'un temps de réveil qui augmente.

Toutes ces caractéristiques, problèmes et solutions sont évidemment valables pour les cartes intelligentes au format bancaire qui embarquent des microcontrôleurs et autres composants et qui sont des systèmes embarqués un peu particuliers. Nous verrons par la suite comment ont été mises en œuvre ces techniques. Intéressons-nous maintenant à la façon dont ces cartes sont alimentées.

## 2.2. L'alimentation des cartes au format bancaire :

Les cartes bancaires présentes actuellement sur le marché n'embarquent aucune source d'énergie. Elles sont alimentées une fois insérées dans le terminal de lecture ou de paiement.

Dans le cas des cartes au format bancaire certaines embarquent leur propre source d'énergie, celle-ci se présente sous forme de batteries fines et flexibles comme le montre la figure 6.



**Figure 6: Exemple d'une batterie fine et flexible**

Une batterie est un système qui convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Il en existe deux catégories de batteries : les piles qui ne sont pas rechargeables et les accumulateurs qui eux le sont.

Les batteries les plus utilisées dans le milieu de l'électronique portable sont les batteries lithium-ion [13].

Le lithium est le plus réducteur des métaux. Il peut donc générer une grande quantité d'énergie ce qui, en addition du fait qu'il est léger ( $530\text{kg/m}^3$ ), en fait un matériau de choix pour la fabrication de batteries.

Les batteries lithium-ion sont les plus chères à cause de leur cathode en oxyde de cobalt et de leur système de protection.

### 2.2.1. Principe de fonctionnement :

A l'intérieur d'une batterie, une réaction d'oxydo-réduction induit un transfert d'électrons de l'anode vers la cathode. La figure 7 montre les différents éléments qui y participent [14].

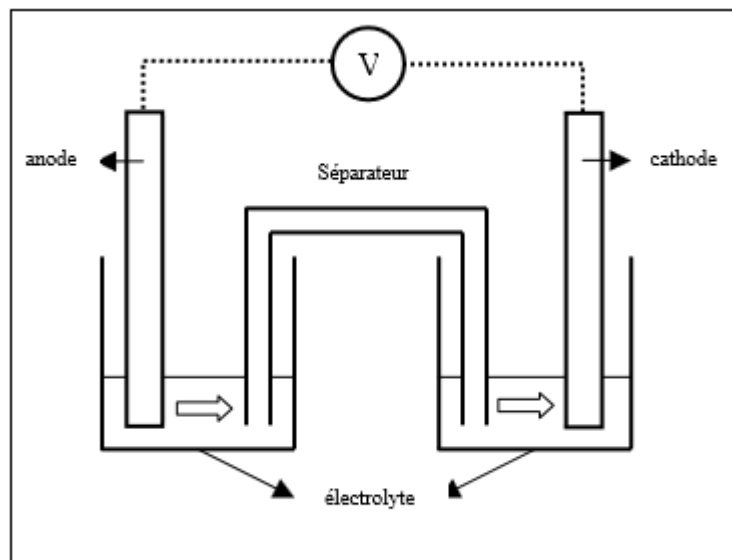


Figure 7: Procédé d'oxydo-réduction au sein d'une batterie

D'après [14], la technologie actuelle pour la fabrication des batteries lithium-ion utilise une anode en carbone dans laquelle sont insérés des ions lithium  $\text{Li}^+$ . Pendant la décharge, ces ions migrent à travers l'électrolyte, pour aller s'intercaler dans la structure cristalline de la cathode.

L'anode doit pouvoir contenir le plus d'ions  $\text{Li}^+$  possible. Elle est en carbone. La cathode quant à elle, est en oxyde de cobalt ( $\text{CoO}_2$ ) ou de manganèse ( $\text{MnO}_2$  ou  $\text{MnO}_4$ ). Lors d'une surcharge, l'électrode de cobalt fournit un surplus d'ions lithium qui peut alors se transformer en lithium métallique. Un coûteux circuit de protection doit être mis en place afin d'éviter les éventuelles surchauffes. Les électrodes de manganèse sont moins chères et ne nécessitent qu'un circuit de protection simplifié. Par contre, celles-ci supportent des températures moins élevées et possèdent une durée de vie légèrement plus faible que leur équivalent en cobalt.

Le transport des ions est assuré par l'électrolyte qui est une solution liquide. Il doit être compatible avec les autres composants, être électriquement isolant et stable thermiquement. Toutefois, il peut poser

des problèmes de sécurité du fait de son caractère hautement inflammable. Les recherches sont intensifiées dans ce domaine afin de trouver des solutions moins problématiques.

Il existe également ce que l'on appelle les batteries lithium-ion polymère. Elles fonctionnent sur le même principe que les batteries lithium-ion traditionnelles. Seul l'électrolyte diffère. Il est remplacé par une matrice polymère solide dans laquelle est emprisonné le liquide conducteur. Grâce à une superposition de 3 couches minces, il est possible de fabriquer des batteries de toutes formes géométriques et suffisamment fines pour les applications au format carte bancaire [15].

### 2.2.2. Applications :

Sony est le pionnier en la matière, c'est en 1991 que la firme japonaise a commercialisé la première batterie lithium-ion [16].

Les batteries lithium-ion sont déjà très largement utilisées dans tous les appareils électroniques grand public, comme les ordinateurs et téléphones portables, les PDA ou les lecteurs musicaux. D'autres secteurs d'applications voient le jour : les domaines de la sécurité (systèmes de détection, de reconnaissance et de surveillance), le militaire (moyens de communication, imagerie thermique et vision de nuit, systèmes de visée), l'aérospatiale (batteries de satellites, robots et sondes spatiales) ou encore la médecine (défibrillateurs et moniteurs portables ainsi que les puces destinées à l'exploration de l'anatomie humaine).

Le plus grand potentiel de croissance du Li-ion réside dans les moyens de transport. Comme par exemple les bicyclettes à assistance électrique qui se répandent déjà largement en Chine.

Les critères déterminants dans le choix des batteries diffèrent selon les applications : dans les applications grand public, l'encombrement et la masse prédominent. Dans le domaine industriel, la durée de vie est prépondérante. Dans les cartes au format bancaire, tout est important. Ce qui fait des batteries au lithium de très bonnes candidates comme moyen d'alimentation au vu de leurs nombreux avantages :

- Tension de fonctionnement élevée ( $>3,5V$ ),
- Energie spécifique élevée ( $>120 \text{ Wh.kg}^{-1}$ ),
- Energie volumique élevée ( $>250 \text{ Wh.l}^{-1}$ ),
- Logue durée de vie en cyclage ( $>1000$  cycles),
- Faible autodécharge,
- Pas d'effet mémoire,
- Pas de maintenance,
- Large plage d'utilisation en température (de  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ )

Les projets de recherche foisonnent dans ce secteur. Pour la première fois, une équipe américaine dans l'Illinois a démontré en juin 2013 qu'il était possible d'imprimer en 3D une mini-batterie de la taille d'un grain de sable, avec une capacité de stockage d'énergie suffisante pour l'alimentation de petits dispositifs électroniques [17].

Bien évidemment les contraintes géométriques citées auparavant vont également s'appliquer aux batteries. La figure 8 montre un exemple de caractéristiques de batteries spécialement conçues pour les applicatifs cartes au format bancaire.

- Safe and Environmentally Friendly
- Shelf-life 2-4+ years depending on product chosen. Contact sales for more details.
- Flexible: ISO 7816 Certified
- UL Listed: UL1642
- UN 1-8 Test Certified
- Capacity: 10mAh To 25mAh
- Survives Hot Lamination (135°C) at 220 PSI
- Wide Temperature Range: -10° C to 60° C
- Ultra-Thin: 0.37mm – 0.45mm
- Nominal Voltage: 3.0 Volts
- High Energy Density

**Figure 8: Caractéristiques d'une batterie spécialement conçue pour un applicatif au format carte bancaire**

Ces batteries ont, en général, une durée de vie entre 2 et 4 ans selon les applications, sont certifiées aux normes ISO 7810, ont une capacité allant de 10mAh jusqu'à 25mAh et délivrent une tension de 3V. Leur épaisseur varie entre 0,37mm à 0,45mm. Nous verrons dans un autre chapitre leur comportement en décharge dans différents cas et les comparerons à d'autres batteries du même genre.

Après avoir pris connaissance des problématiques liées à la surface et la consommation, nous allons nous intéresser à la manière de communiquer avec le monde environnant.

### **3. L'identification par radio-fréquence :**

La RFID est une technologie qui permet de lire des informations et de les récupérer à distance. Son plus grand concurrent est le code-barres. Contrairement à ce dernier, la RFID ne nécessite pas la vision directe de l'objet à identifier.

La RFID a commencé à se développer dans les années 1940 [18]. La première application RFID fut un système de la Royal Air Force destiné à distinguer les avions ennemis et qui avait pour nom Friend and Foe [19]. A cause de son coût relativement élevé, la mise sur le marché a été longue. Il a fallu attendre les années 90 et le géant de la distribution américaine Wal Mart pour la voir se généraliser. Ce dernier ayant imposé à ses fournisseurs d'avoir des étiquettes RFID sur ses produits afin de notamment en faciliter la traçabilité et le suivi.

Les principaux buts que l'on cherche à atteindre dans le domaine de la traçabilité sont la réduction des erreurs et de la fraude, l'amélioration des processus, services et produits et bénéficier de plus de sécurité et d'ergonomie.

Au fil des ans, les applications RFID se sont diversifiées et différents domaines utilisent maintenant cette technologie. Parmi eux : le transport avec le pass par exemple dans les transports parisiens, le Ski pass utilisé dans les remontées mécaniques dans les stations alpines et le Liber-T utilisé pour les télépéages. Il y a aussi la gestion de jardins publics dans certaines municipalités, les livres et les DVDs dans les bibliothèques, les médicaments dans les pharmacies... Des études sont en cours pour l'utiliser dans des capteurs biomédicaux implantés [20]. Une des applications les plus importantes est la gestion des stocks en industrie, le contrôle d'accès, le suivi des en-cours, les outillages et les emballages ainsi que le processus d'automatisation dans les chaînes automobiles.



UIC utilise dans certains de ses produits, pour récupérer des informations stockées dans la puce et qui concernent son utilisateur.

### 3.1. Les briques principales d'un système RFID :

Un système RFID est composé de deux entités principales qui communiquent entre elles, ainsi que d'un système hôte [21].

- Un tag ou étiquette intelligente (aussi appelé transpondeur). Il est constitué d'une antenne et d'une puce électronique et est capable de répondre à une demande venant d'un lecteur.
- Une station de base ou lecteur RFID qui a pour mission d'identifier le tag en lui envoyant une onde électromagnétique auquel le tag répond en renvoyant une information.
- Le système hôte qui assure la gestion de l'application à plus haut niveau.



Figure 9: Briques principales composant un système RFID

### 3.2. Notion de passif et d'actif :

Un élément RFID passif est un élément qui contient une information et qui a besoin d'un autre élément pour être alimenté et la communiquer.

A l'inverse, un élément actif embarque sa propre source d'énergie et est capable de transmettre son information en autonomie.

Il existe l'élément « battery assisted » qui est en général un tag passif qui a besoin d'une source d'alimentation externe au lecteur pour communiquer mais qui ne peut pas émettre son propre signal pour autant.

### 3.3. Le marché de la RFID :

Le marché de la RFID a atteint une valeur de 7,67 Milliards de dollars en 2012 avec une hausse de 17% par rapport à 2011 où il était à une valeur de 6,51 Milliards de dollars [22].

Ce marché comprend les tags ou étiquettes, les lecteurs, les cartes et tout ce qui touche à la RFID. 3,98 Milliards de tags ont été vendus en 2012 contre 2,93 Milliards en 2011. Essentiellement des tags passifs pour les très hautes fréquences (100MHz – 1GHz) selon une étude menée par IDTechEx [22].

La figure 10 donne la répartition des recettes engendrées par les composants RFID en 2012.

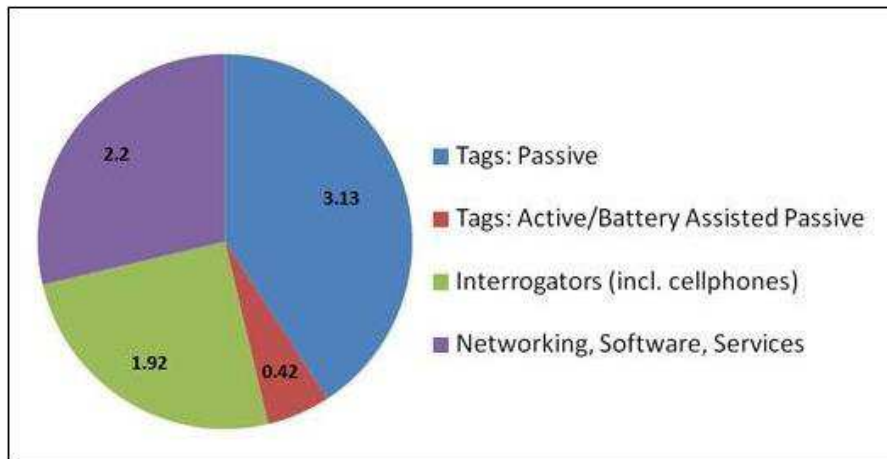


Figure 10: Recettes enregistrées par les composants RFID en Milliards de dollars en 2012 [22]

IDeTechx prévoit dans son étude que la hausse de la valeur de marché sera de plus en plus importante et atteindra plus de 26 Milliards de dollars à l'horizon de l'année 2022.

La figure 11 met en avant l'évolution du marché prévue sur les 2 prochaines années. Un marché en perpétuelle évolution.

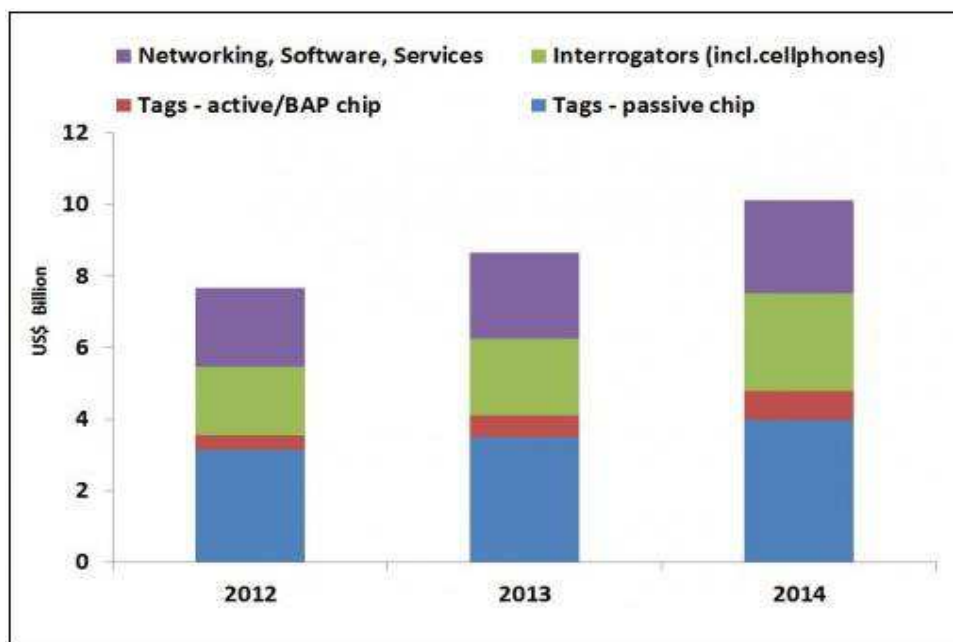


Figure 11: Projection du marché de la RFID en Milliards de dollars – [22]

Le marché de la RFID active a quant à lui concerné en premier lieu les RTLS (Real Time Location System ou système de localisation en temps réel) qui permettent de localiser des objets physiques en temps réel [23].

Le principal concurrent de la technologie RFID est le code-barres. Il est encore aujourd'hui la technique la plus utilisée pour étiqueter les produits commercialisés. Grâce à son faible coût, sa robustesse et ses normes bien établies, on le retrouve partout. Néanmoins il connaît des limites. Parmi ses inconvénients

on peut citer le nombre restreint d'informations qu'il contient et surtout la parfaite visibilité optique directe qui est nécessaire pour le lire. On peut voir sur la figure 12 des exemples de tags RFID et de code-barres.



**Figure 12: Illustration de tags RFID et de code-barres**

La RFID permet de s'affranchir de ces inconvénients, non seulement l'information contenue dans une puce électronique est bien plus importante que celle contenue dans un code-barres mais en plus elle peut évoluer dans le temps. De plus, la visibilité directe requise pour le code-barres devient obsolète grâce au transfert sans contact par ondes électromagnétiques entre la puce et le lecteur.

Néanmoins, elle rencontre deux problèmes majeurs : le coût de fabrication des puces encore plus élevé que celui de l'impression d'un code-barres, et la normalisation qui permet le bon fonctionnement des systèmes RFID et la protection des utilisateurs mais peut influencer le choix de la solution technique.

#### 3.4. Taxonomie:

Comme nous l'avons déjà évoqué, les dispositifs RFID peuvent être classifiés selon plusieurs critères : leur nature (actifs ou passifs), leur distance de communication, leur mode de fonctionnement ou encore leur mode de communication.

En ce qui concerne la distance, on distingue deux modes de fonctionnement : champ proche et champ lointain. En champ proche, la distance entre le lecteur et le tag est très petite devant la longueur d'onde du signal, la liaison RF se fait par couplage inductif ou capacitif. Nous sommes alors en basses fréquences (moins de 30MHz). Le fonctionnement en champ proche se rapproche de celui d'un transformateur. Les distances en champ proche varient en général de 0 à 1 mètre.

Le couplage capacitif permet une télé-alimentation robuste et l'intégration dans le tag de composants complexes comme un microprocesseur mais est plus contraignant en terme de distance.

Au-delà du mètre, nous nous retrouvons en champ lointain et les systèmes RFID obéissent alors aux lois de propagation. Nous sommes en très hautes fréquences (UHF 100MHz – 1GHz) ou en micro-ondes (>1GHz).

Si les systèmes RFID UHF permettent des distances de fonctionnement et un débit d'échange d'information plus importants, ils sont en contrepartie plus complexes que les systèmes à couplage. De plus, la propagation est plus sensible aux interférences que le phénomène de couplage ce qui peut être gênant pour certaines applications (propagation dans un liquide par exemple).

A chacune des familles de systèmes RFID précitées correspond une normalisation bien précise qui permet de fixer les fréquences permises de fonctionnement ou les niveaux de puissances autorisés.

Une autre manière de classer les transpondeurs est leur mode de fonctionnement : soit en lecture seule, lecture et écriture multiples, lecture et écriture protégées, lecture et écriture sécurisées et lecture et écriture cryptées.

Le mode de communication peut être simple si un seul transpondeur est présent dans le champ d'action du lecteur ou complexe si plusieurs transpondeurs se trouvent dans le champ d'action d'un même lecteur. Des problèmes de collisions peuvent se produire à ce moment là. On distingue les :

- Transpondeurs TTF: pour Tag Talks First, cela veut dire que dès qu'un transpondeur de ce type rentre dans le champ d'un lecteur, il se fait connaître. Le risque, est évidemment lorsque plusieurs de ces transpondeurs sont présents dans le champ d'un lecteur en même temps, à ce moment là il y a conflit ou collision.
- Lecteurs RTF: pour Reader Talks First, dans ce genre de configuration, les transpondeurs une fois alimentés via le champ magnétique, entrent dans un état d'attente d'une requête de la part du lecteur pour signifier leur présence.

Pour transmettre les données, il existe deux modes. Le mode half duplex où le transpondeur et le lecteur communiquent alternativement, par tranches de temps et le mode full duplex où ils communiquent simultanément.

En ce qui concerne les tags actifs, nous distinguons deux types:

- Les transpondeurs : lorsqu'un tag actif approche d'un lecteur, ce dernier envoie un signal qui réveille le tag. Le tag renvoie alors son identifiant unique pour commencer à échanger des informations avec le lecteur. La durée de vie de la batterie est conservée car le tag ne diffuse de signal qu'à partir d'une certaine distance du lecteur (portée du lecteur).
- Les balises : utilisées dans les systèmes de localisation en temps réel ou real-time locating systems (RTLS), qui requièrent une localisation plus ou moins précise des objets tracés. Dans un système RTLS, la balise émet un signal à intervalle préétablis (cela peut aller d'une émission toutes les secondes ou une fois par jour, dépendant de l'importance de connaître l'emplacement de l'objet à intervalles réguliers). Le signal de la balise est capté par au moins trois antennes (de lecteurs) se trouvant dans le périmètre de la zone où l'objet est tracé.

### 3.5. Fonctionnement théorique :

La question que l'on va principalement se poser est comment s'effectue la communication entre le tag et le lecteur.

La théorie prend principalement en compte la distance de communication et donne les lois physiques qui la caractérisent.

En champ proche, ce sont le couplage magnétique et électrique qui priment. En champ lointain, ce sont les lois de propagation des ondes.

3.5.1. Couplage inductif :

L'antenne qui est une bobine, produit l'énergie nécessaire à l'alimentation de la puce RFID en utilisant les phénomènes d'induction créés par le champ magnétique émis par le lecteur. Ce mode de fonctionnement concerne essentiellement les systèmes avec des fréquences allant de 120kHz à 135kHz en basses fréquences et 13,6MHz en hautes fréquences. Ce sont les valeurs normalisées des fréquences. Les systèmes en couplage magnétique peuvent fonctionner jusqu'à 29MHz. Historiquement, les premiers systèmes magnétiques fonctionnaient en basses fréquences puis, les premières applications à hautes fréquences ont vu le jour à partir de 1998 [21].

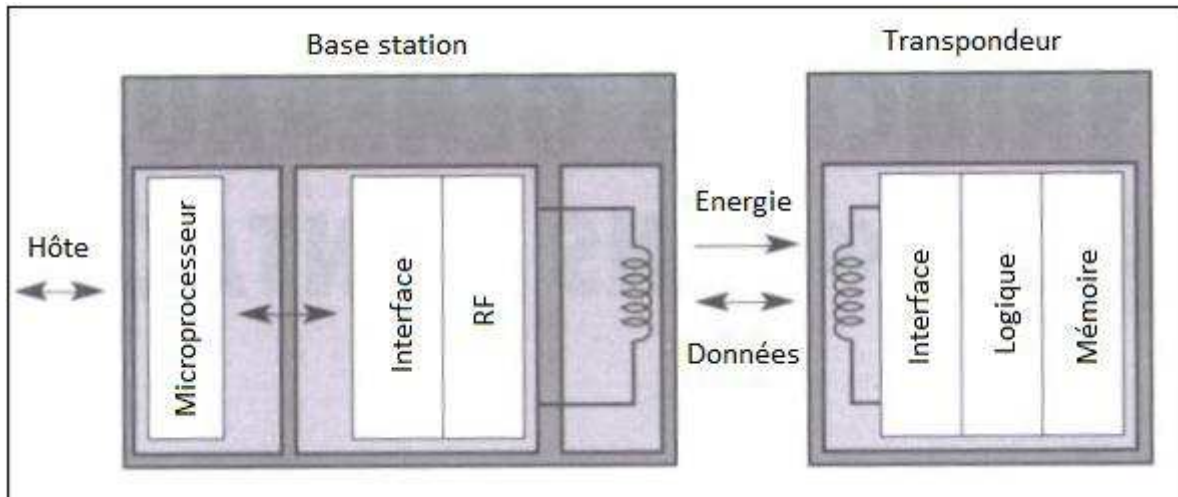


Figure 13: Représentation d'un système RFID sous forme de blocs

La figure 13 montre l'agencement du système RFID sous forme de blocs. Il est représenté comme un transformateur. La figure 14 montre quant à elle la forme des lignes de champ qui sont créées lors du couplage.

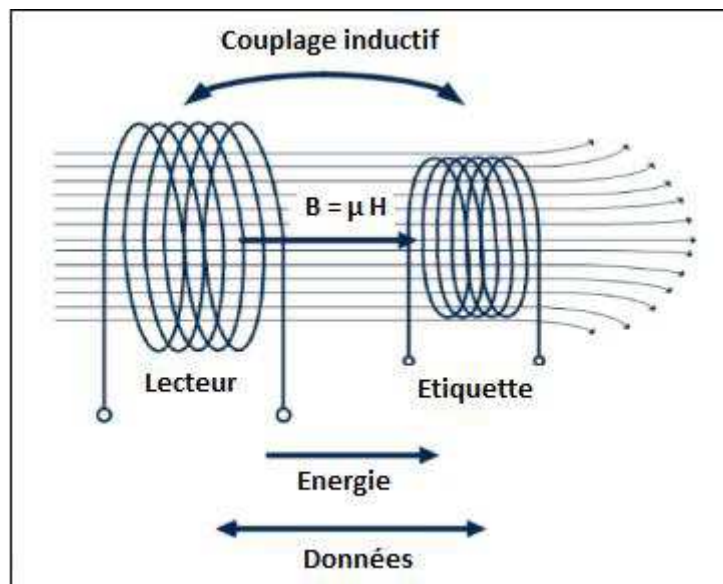


Figure 14: Transfert d'énergie par couplage magnétique – [21] et [24]

Tout circuit, et en particulier les antennes, rayonnent. A une distance maximale de l'ordre de la longueur d'onde, une source émet un faisceau quasiment parallèle qui permet à la source d'entrer en résonance inductive avec un récepteur, comme les enroulements d'un transformateur [21] et [24].

Le transfert d'énergie est effectué à l'aide d'un champ magnétique alternatif  $I(t)$  dans l'antenne du lecteur selon la relation  $H=NI$ , où  $N$  est le nombre de spires par mètre parcouru par le courant. La valeur du champ magnétique est exprimée en A/m (ampères par mètre).

A ce champ magnétique est associé une induction  $B(t)=\mu H(t)$  où  $\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu traversé.

On définit  $\mu=\mu_0\mu_r$  dans laquelle  $\mu_0$  représente la perméabilité de l'air ( $4\pi 10^{-7}$ ) et  $\mu_r$  la perméabilité du milieu traversé (eau, métal,...). La valeur de l'induction magnétique est exprimée en teslas (T).

Les lois de Biot - Savart établissent la relation entre l'induction magnétique et le courant circulant dans une antenne. Pour une antenne de rayon  $r$ , de  $N$  spires, traversée par un courant  $I$ , la valeur de l'induction est donnée par la l'équation 1.1

$$\mathbf{B}(\mathbf{d}, \mathbf{r}) = \mu \frac{r^2}{2 \left[ (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}} \right]} \mathbf{N} \cdot \mathbf{I} \quad (\text{Eq 1.1})$$

La communication entre le lecteur et le transpondeur repose essentiellement sur deux principes : la télé-alimentation et la rétro-modulation.

D'un point de vue physique, ces deux concepts reposent sur les phénomènes d'induction électromagnétique. La télé-alimentation est la méthode employée pour fournir l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation de la puce. Le lecteur va produire un champ magnétique qui va créer une force électromotrice dans l'antenne du tag (phénomène d'induction).

Une fois alimenté, le transpondeur, utilise un phénomène de rétro-modulation en faisant varier son impédance de charge. Cela crée une variation du champ magnétique qui est détectée par le lecteur.

Les antennes d'émission/réception RF sont généralement composées de fils métalliques. Pour un lecteur RFID fonctionnant en couplage magnétique à  $13,56\text{MHz}$ , cette antenne est une boucle de courant rectangulaire.

On considère que le système travail en champ proche ( $d = 10\text{cm} \ll \lambda/2 \approx 10\text{m}$ ).

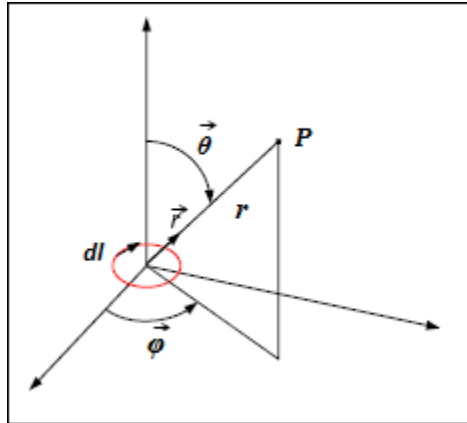


Figure 15: Dipôle magnétique ou boucle de courant

Dans le cas d'une petite boucle de courant  $dl$ , l'expression du champ magnétique rayonné est donné en coordonnées sphériques par l'équation 1.2

$$\vec{H} = j \frac{I \cdot dl}{4\pi\beta r^3} (2 \cos \theta \cdot \vec{r} + \sin \theta \cdot \vec{\theta}) \quad (\text{Eq 1.2})$$

Comme l'on se trouve en champ proche, on peut considérer que le champ magnétique est découplé du champ électrique et que l'énergie ne se propage pas. L'expression du champ magnétique créé par une boucle de courant donne alors la loi de Biot et Savart :

$$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \cdot \vec{r}}{r^3} \quad (\text{Eq 1.3})$$

Pour une boucle de courant rectangulaire, le champ magnétique est le résultat de la superposition des champs de chaque brin pris individuellement.

La composante  $x$  du champ est représentée sur la figure 16.

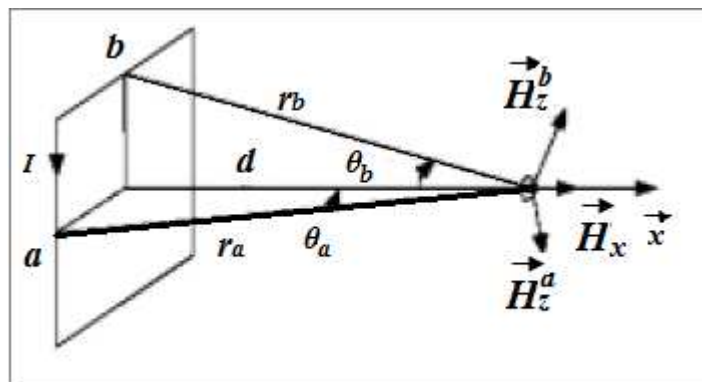


Figure 16: Boucle de courant rectangulaire

On peut alors caractériser la décroissance du champ magnétique (Eq 1.4) en fonction de la distance par rapport à l'antenne.

$$Hx = I \cdot \frac{2}{\pi} \frac{ab}{\sqrt{a^2+b^2+4d^2}} \left[ \frac{1}{a^2+4d^2} + \frac{1}{b^2+4d^2} \right] \quad (\text{Eq 1.4})$$

Si on prend l'exemple d'une antenne comportant une spire et mesurant 5cm x 8cm, le champ devient très faible au delà de 10 cm. L'énergie du champ magnétique sera stockée à proximité du lecteur. Pour l'exploiter, le transpondeur devra se situer à une distance suffisamment faible pour exploiter le phénomène d'induction.

Son antenne de réception fonctionnera sur le même principe et créera une force électromotrice d'induction s'exprimant comme la dérivée par rapport au temps du flux du champ magnétique, Eq 1.5.

$$e = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \oint \mathbf{H} \cdot d\boldsymbol{\sigma} \quad (\text{Eq 1.5})$$

Cette expression traduit en plus de la création de l'alimentation du transpondeur, la manière dont le lecteur va lui transmettre ses données. La force électromotrice induite dans l'antenne du tag dépend du champ magnétique du lecteur, ce dernier dépendant directement de l'intensité  $I$  alimentant l'antenne émettrice, il suffira de moduler le courant par un signal contenant les données à transmettre pour qu'elles soient communiquées par la modulation du champ  $H$ .

Le lecteur couplé avec le transpondeur peut être assimilée au circuit primaire et secondaire d'un transformateur couplés avec un facteur de couplage électromagnétique  $k$  qui dépend des inductances propres de chacune des deux parties et de la mutuelle inductance due au couplage (figure 17).

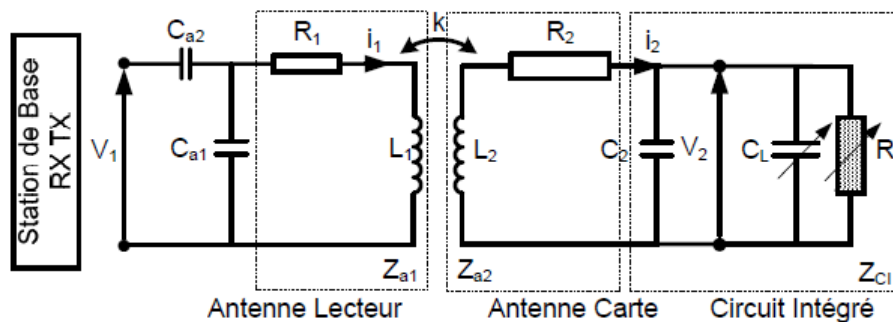


Figure 17: Schéma électrique équivalent du lecteur couplé avec le transpondeur

Les antennes boucles sont représentées par les inductances en série avec les résistances ( $L_1, R_1$ ) pour le lecteur et ( $L_2, R_2$ ) pour la carte. Les condensateurs  $Ca_1$  et  $Ca_2$  représentent l'adaptation d'impédance de l'antenne. Le circuit du transpondeur est modélisé par des composants à impédance variable (traduisant l'activité de la puce) et une résistance  $R_M$  de modulation.

Dans le cas où le transpondeur est loin du lecteur, les circuits électroniques de chacun des appareils est adapté à son antenne. L'introduction du tag dans le champ magnétique de la station de base va être vue une comme désadaptation d'impédance du lecteur ce qui permet de détecter sa présence.

La rétro modulation s'effectue alors en ouvrant et fermant l'interrupteur DATA (visible sur la figure 19) par la modulation introduite par les données à envoyer, ce qui va alors faire basculer l'impédance de charge du transpondeur de  $R_L$  à  $R_M$ .



3.5.2. Couplage électrique [24]:

En champ proche, c'est le champ magnétique qui est responsable du transfert de l'énergie et il baisse en fonction du cube de la distance alors qu'en champ lointain, c'est le champ électrique qui est responsable du transfert de l'énergie et il ne baisse plus que proportionnellement à la distance. Les systèmes en couplage électrique ne sont pas limités par l'émission localisée autour des lignes de champ du lecteur.

En utilisant les propriétés propagatrices du champ électrique rayonné par une antenne, il est possible de transporter de l'énergie et des données d'un lecteur à un transpondeur et inversement sur plus d'une dizaine de mètres. Les dimensions des antennes capables de produire de tels champs électriques sont de l'ordre de la demi-longueur d'onde (pour une fréquence de  $100\text{MHz}$ , l'antenne devra mesurer  $\approx 1,50\text{m}$ ). En pratique, la limitation de l'utilisation du couplage électrique dans la RFID se verra dans l'exploitation des bandes de basses fréquences. Dans le cas de transpondeurs passifs, l'énergie d'alimentation est créée par exploitation du phénomène du dipôle de Hertz (figure 18) produit par le champ électrique émis par le lecteur. La densité d'énergie du signal rayonné décroît en fonction de l'inverse du carré de la distance séparant le lecteur de l'étiquette. De ce fait, l'utilisation des systèmes passifs se limite à des distances ne dépassant pas la dizaine de mètres pour des fréquences aux alentours de  $500\text{MHz}$ . Cette distance diminue lorsque la fréquence augmente (moins d'un mètre à  $2,5\text{GHz}$ ), au-delà de ces fréquences, les transpondeurs nécessitent une alimentation et deviennent actifs.

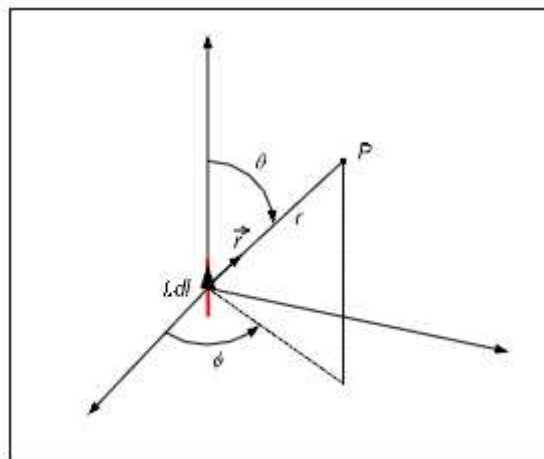


Figure 18: Dipôle électrique ou Hertzien

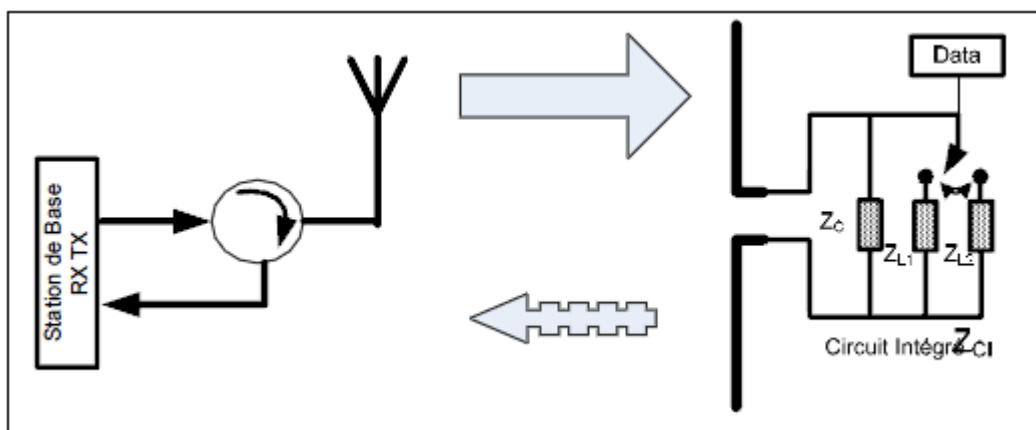


Figure 19: Couplage électromagnétique et modulation d'impédance

Lorsque l'onde incidente émise par le lecteur rencontre l'obstacle RFID, elle est réfléchi. Il se produit une variation d'impédance qui peut être résistive, capacitive ou les deux à la fois. L'information est alors renvoyée au lecteur par modulation du champ électromagnétique réfléchi.

### 3.5.3. Le cas des tags actifs :

En ce qui concerne le tag actif, il ne dépend pas du champ électromagnétique du lecteur vu qu'il dispose de son propre émetteur et de sa batterie et peut donc émettre son propre signal. La source d'alimentation est souvent une batterie mais on trouve des tags actifs qui puisent leur énergie du soleil ou d'autres sources d'énergie.

Les données captées par le lecteur sont transmises et traitées par un système informatique comportant un logiciel, tel qu'un système de contrôle d'inventaire, d'un système de contrôle d'accès ou d'un système de contrôle de production.

Il existe des tags plus complexes qui intègrent des capteurs de température, d'humidité ou de chocs.

Les lecteurs de tags actifs ont en général besoin de moins de puissance d'émission et ont des distances de lecture plus importantes.

La mémoire d'un transpondeur comprend généralement une ROM (Read Only Memory ou mémoire à lecture seule), une RAM (Random Access Memory ou mémoire à accès aléatoire) ainsi qu'une mémoire programmable non-volatile pour la conservation des données selon le type et le degré de complexité du produit. La mémoire ROM contient des données de sécurité ainsi que les instructions de l'OS (Operating System ou système d'exploitation) de l'étiquette en charge des fonctions de base telles que le délai de réponse, le contrôle du flux de données et la gestion de l'énergie. La mémoire RAM est utilisée pour les stockages temporaires de données pendant les processus d'interrogation et de réponse.

En général les tags actifs opèrent en UHF (455MHz, 860MHz ou 960MHz) et ondes radio (2,45GHz et 5,8GHz).

Leur portée s'étend en général entre 20 et 100 mètres.

Les bandes de fréquence UHF et micro-ondes offrent une moins bonne pénétration du signal à travers les obstacles que la bande HF, mais elles permettent d'atteindre des distances de lecture plus grandes et un débit d'échange d'informations plus important.

La puce RFID active permet un gain en puissance (en général +20dBm par rapport aux puces passives). Elle améliore ainsi la portée. L'inconvénient majeur de ce genre de technologie est les problèmes d'interférences (elles multiplient les échos radios qui engendrent à leur tour des difficultés de localisations des puces par les lecteurs). Il faut à ce moment là incorporer au niveau logiciel, des protocoles et des algorithmes qui permettent de corriger, en partie, l'impact de ces interférences multi-chemins mais cela augmente la consommation électrique).

### 3.6. Régulations et normes RFID :

Il existe plusieurs normes régissant le domaine de la RFID [25]. Celles-ci ont pour objectif d'harmoniser le secteur afin de faciliter l'accès au marché et d'augmenter les volumes de ventes. Elles doivent garantir

en plus l'interopérabilité des systèmes RFID et protéger l'utilisateur des dangers potentiels pour la santé et le respect de la liberté individuelle.

On distingue différents types de normes :

- Les normes techniques, telles que les normes relatives aux interfaces d'air de la série ISO 18000, ISO 15693 et ISO 14443 pour les cartes sans contact de proximité. Ces normes sont en adéquation avec la norme 7816 des cartes au format bancaire.
- Les normes relatives aux données, telles que l'ISO 15693, l'ISO 15418, la série ISO 7816 et l'ISO 15434 qui régissent entre autres les identifiants et la syntaxe.
- Les normes relatives à la conformité, afin de permettre l'interopérabilité entre les produits de divers fabricants, telles que les normes de la série ISO 18047 et ISO 10373.
- Les normes relatives aux réseaux, telles que les séries ISO 1736x, ISO 10374, ISO/TS 10891, et IATA 1740c.

Pour les systèmes RFID fonctionnant en couplage inductif, les fréquences 125 kHz-133kHz et 13,56 MHz font aujourd'hui l'objet d'un consensus international mais ce n'est pas encore complètement le cas pour les hautes fréquences UHF (400-950 MHz) et micro-ondes (2,45 GHz et 5,8 GHz).

En ce qui concerne les niveaux de puissances autorisés, les réglementations varient fortement en fonction des pays. Les puissances permises aux Etats-Unis sont supérieures à celle permises en Europe. Le tableau 1 donne un aperçu des puissances maximales autorisées en Europe et aux Etats-Unis pour les différentes fréquences de communication. Ces données sont celles proposées par les instances de régulation ETSI (European Telecommunications Standard Institute) pour l'Europe et FCC (Federal communications Commission) pour les Etats-Unis.

Région	Bande de fréquence	Puissance maximale autorisée
Europe	13,56 MHz	42 dB $\mu$ A / m @ 10 m
Europe	865,5-867,6 MHz	2 W ERP
Europe	869,4-869,5 MHz	0,5 W ERP
Europe	2,400-2,4835 GHz	0,5 W ERP en extérieur
Europe	2,400-2,4835 GHz	4 W ERP en intérieur
Etats-Unis	902-928 MHz	4 W EIRP
Etats-Unis	2,400-2,4835 GHz	4 W EIRP

**Tableau 1: Puissances autorisées en fonction des principales fréquences de communication**

Dans le tableau 1, les puissances maximales autorisées sont exprimées en Watt pour les fréquences UHF et micro-ondes. Mais ces puissances sont calculées différemment en Europe et aux Etats-Unis. En Europe, l'unité est le Watt calculé en ERP (Effective Radiated Power) alors qu'aux Etats-Unis, l'unité est toujours le Watt mais calculé en EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power). Le rapport entre les deux unités est le suivant : 1W ERP=1,62 W EIRP. En ce qui concerne les systèmes fonctionnant en champ proche (autour de 13,56 MHz), c'est l'intensité maximum du champ en A/m qui est spécifiée.

#### **4. Conclusion :**

Les contraintes de conception d'un système embarqué sont nombreuses. La géométrie, la consommation et la RFID sont les contraintes détaillées dans ce chapitre car elles sont au cœur de la conception d'un système intégré dans une carte au format bancaire, avec une batterie et une antenne RFID et répondant aux normes ISO 7810.

Nous allons maintenant faire un état de l'art des applications RFID actives existantes avant de nous pencher sur l'applicatif qui a été développé lors de cette thèse.

Nous ne nous intéressons pas à la RFID passive, dans notre application un protocole de communication complexe devant être mis en place, ce type de RFID est aujourd'hui inadéquat par manque d'énergie nécessaire à l'alimentation de composants tels que des microp processeurs nécessaires aux communications prévues dans nos systèmes.



# *Chapitre 2 : Etat de l'art de la RFID active*

L'objet de mes travaux de thèse a été la conception d'une serrure au format carte bancaire. Cette serrure est une clé électronique utilisée pour un vélo à assistance électrique (VAE) utilisant un moteur électrique pour aider au pédalage.

Les VAE utilisent une batterie rechargeable et aident l'utilisateur jusqu'à une vitesse comprise entre 24 km/h et 32 km/h suivant la législation en vigueur dans le pays. Dans certains pays, les VAE tendent à remplacer les vélos traditionnels ou scooters.

PikeResearch a publié un rapport en 2010 [26], prévoyant que les ventes mondiales des VAE, motos électriques et scooters électriques atteindront plus de 466 millions entre 2010 et 2016, la Chine continuant de dominer le marché mondial avec plus de 95% des ventes durant cette période. En 2010, la Chine disposait de 120 millions de vélos électriques. PikeResearch a indiqué que le marché mondial du véhicule 2 roues devrait progresser d'environ 9% de moyenne par an jusqu'en 2016.

La clé, qui est l'objet de ces travaux de recherche, doit permettre d'ouvrir et de fermer la serrure du vélo à distance. Il s'agit de dépasser les limites du système existant qui ne peut être utilisé qu'à proximité de la serrure et en contact avec elle. Ce système a besoin d'être en contact avec la serrure pour fonctionner, comme un pass Navigo, ce qui implique de le sortir de la poche ou du sac. Ce que l'on cherche ici c'est de justement d'éviter de le sortir et que la clé ouvre la serrure dès que l'utilisateur se situe à proximité du VAE.

La clé doit être au format ISO 7810 car le savoir-faire d'UINTE réside dans le fait de proposer des produits au format carte respectant la norme ISO 7810. Ce format a également été demandé par le client.

Cette serrure est constituée d'un lecteur (qui est monté dans un boîtier de contrôle sur le guidon du vélo) et d'un ou plusieurs tags couplés.

Le principe d'utilisation est schématisé dans les figures 20 et 21:

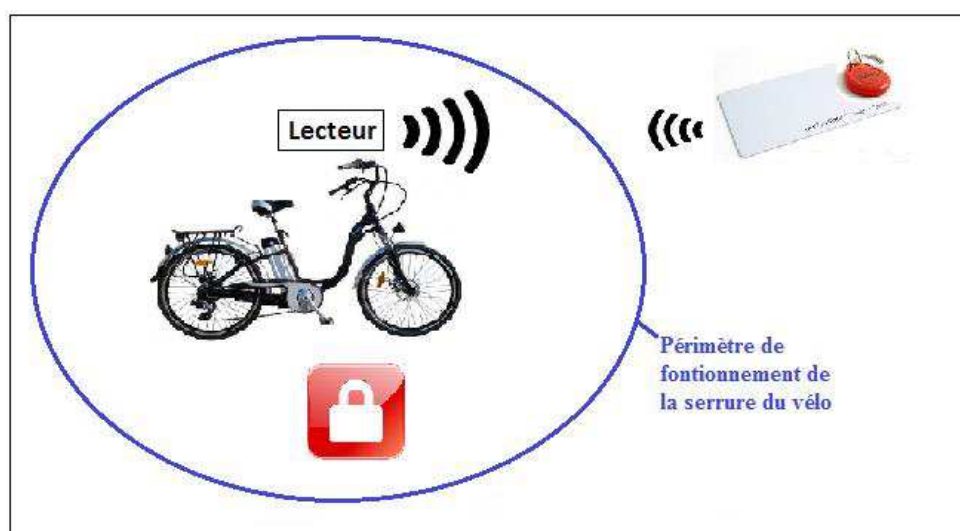


Figure 20: Figure schématisant la fermeture de la serrure

Dans la figure 20, lorsque le tag est en-dehors du champ de réception du lecteur, la serrure reste verrouillée et le vélo électrique ne peut être utilisé.

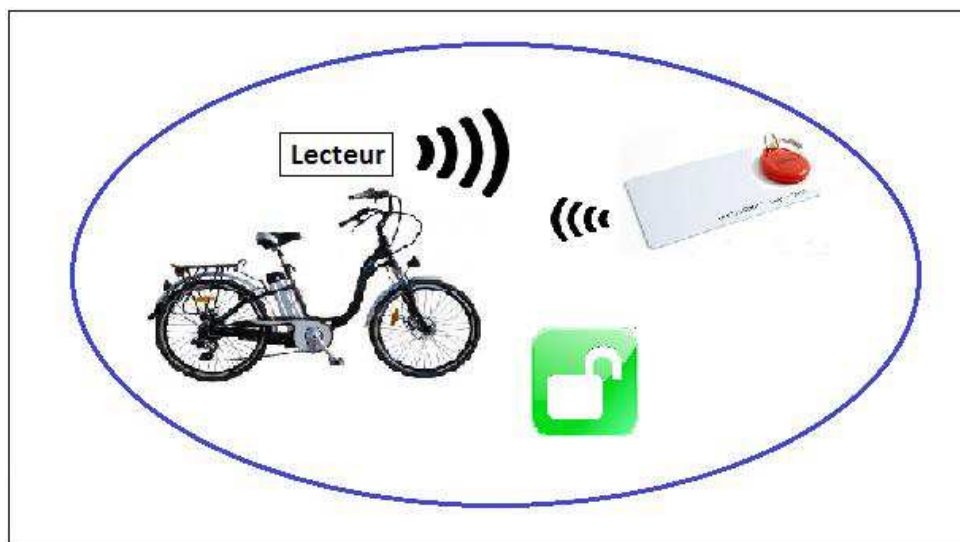


Figure 21: Figure schématisant l'ouverture de la serrure

Dans la figure 21, lorsque le tag pénètre le champ du lecteur et entre en communication avec lui, la serrure peut être déverrouillée après reconnaissance du tag. Le vélo électrique peut alors être utilisé. En s'approchant du vélo à une distance comprise entre 3 et 5 mètres, le boîtier de contrôle doit vérifier que la carte est bien autorisée à démarrer le vélo et si c'est le cas démarrera le moteur du vélo immédiatement.

En s'éloignant du vélo de 3 à 5 mètres, le boîtier de contrôle arrêtera automatiquement le moteur du vélo.

La réalisation de cette clé fait intervenir plusieurs domaines : l'électronique analogique, l'électronique numérique et la radiofréquence. Il s'agit ici de concevoir un système mixte intégré au sein d'une carte au format bancaire.

La distance de fonctionnement varie selon plusieurs paramètres: les antennes et leur géométrie, la puissance d'émission du tag, la puissance fournie au tag. Cette puissance va jouer à la fois sur la distance mais également sur la consommation. L'enjeu étant de trouver un compromis entre la consommation et la distance. Un autre paramètre à prendre en compte va être les obstacles et comment vont réagir le tag et le lecteur face aux différents obstacles : sac à dos, portefeuille, corps humain...

Avant de passer à la conception de la clé, nous proposons un état de l'art sur les systèmes RFID actifs en abordant aussi le marché économique correspondant et en listant les différents produits qui existent.

Nous montrons également les particularités du marché chinois dans lequel la clé sera commercialisée.

### 1. Le marché de la RFID active :

Lors de son lancement, la RFID active était beaucoup liée aux systèmes de localisation en temps réel (Real Time Location System ou RTLS), qui nécessitent de longues portées et de la puissance lors de l'émission du signal.

Actuellement, en plus des RTLS, elle englobe également tout ce qui est réseaux de capteurs sans fil et les systèmes utilisant les protocoles Zigbee ou Wifi.



La RFID active participe de plus en plus à l'essor du marché de la RFID en général. La part du marché de la RFID active par rapport au marché global de la RFID était de 13% en 2010. Il est prévu qu'elle atteigne 25% d'ici 2020, ce qui correspond en termes de revenus à plus de 6 Milliards de Dollars. Il y a également une part du marché qui concerne les modules RFID pour les téléphones portables (un autre secteur de la RFID active) estimée à 180 Millions de Dollars en 2010, elle devrait atteindre 1,6 Milliards à l'horizon 2020 d'après l'étude [27].

La figure 22 montre l'évolution du marché de la RFID active sur les années 2011-2013 en Millions de Dollars.

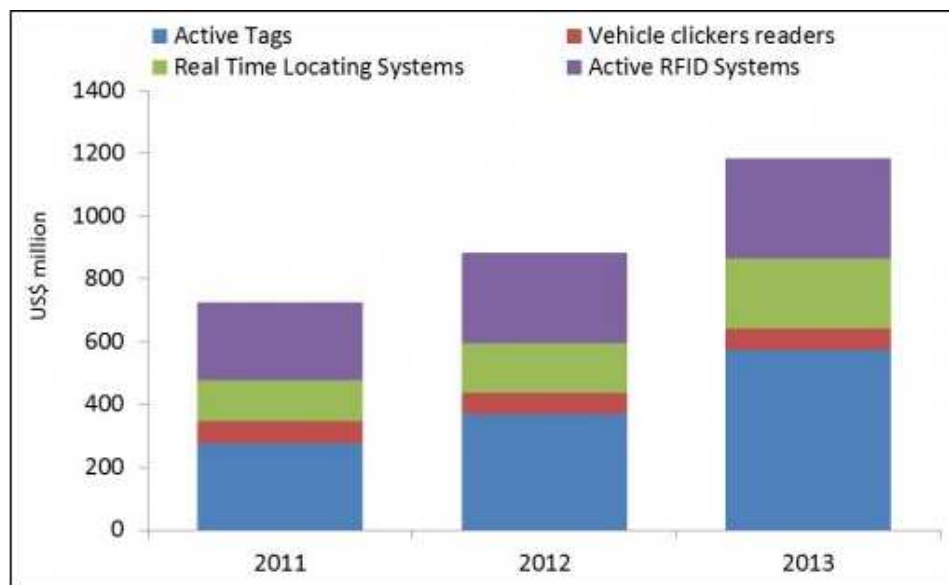


Figure 22: Valeur du marché de la RFID active en Millions de Dollars – [27]

Plusieurs facteurs contribuent à cette évolution :

- La demande qui est de plus en plus forte concernant la localisation, le suivi et le contrôle en temps réel de la sûreté dans le milieu hospitalier, les fraudes sur le web, les épidémies...
- Baisse du coût des tags actifs et de leur taille
- Développement des réseaux de capteurs sans-fil dans les immeubles, forêts, rivières, hôpitaux...
- Popularisation de nouveaux moyens de communication sans fil : wifi, zigbee, NFC (Near Field Communication)...
- Utilisation de plus en plus fréquente d'appareils mobiles pour les achats, les transports aériens et ferroviaires, les affiches intelligentes...

En 2010, 772 millions de tags actifs ont été vendus. Les clés de voiture intégrant une ouverture à distance constituent la plus grande part des ventes avec près de 690 millions de tags vendus à travers le monde. Le second secteur d'applications est le secteur militaire avec 14 millions de tags. Le total des recettes a dépassé le milliard de dollars.

Les boîtiers des tags de la RFID active étaient dans un premier temps relativement volumineux mais leur taille diminue constamment. Les tags sous forme d'étiquettes ou qui sont laminés commencent à se répandre, grâce en grande partie à la réduction de la taille des batteries et à la baisse des prix.

Les plus grands secteurs de la RFID active sont les transports, l'automobile et le médical. On trouve également la sécurité des bâtiments et la surveillance des personnes via les RTLS, notamment dans les

hôpitaux où tous les ans une cinquantaine sont équipés de réseaux de capteurs pour le suivi de l'équipe, patients et équipements.

Le contrôle des personnes et leur suivi a plus de mal à se développer en France que dans ses voisins européens. De nombreuses associations de défense des libertés individuelles se mobilisent contre une technologie qui peut apparaître liberticide. Elles condamnent ainsi son utilisation dans les hôpitaux et maisons de retraite par exemple.

La figure 23 illustre la répartition des différents secteurs qui utilisent ou commencent à utiliser de la RFID active.

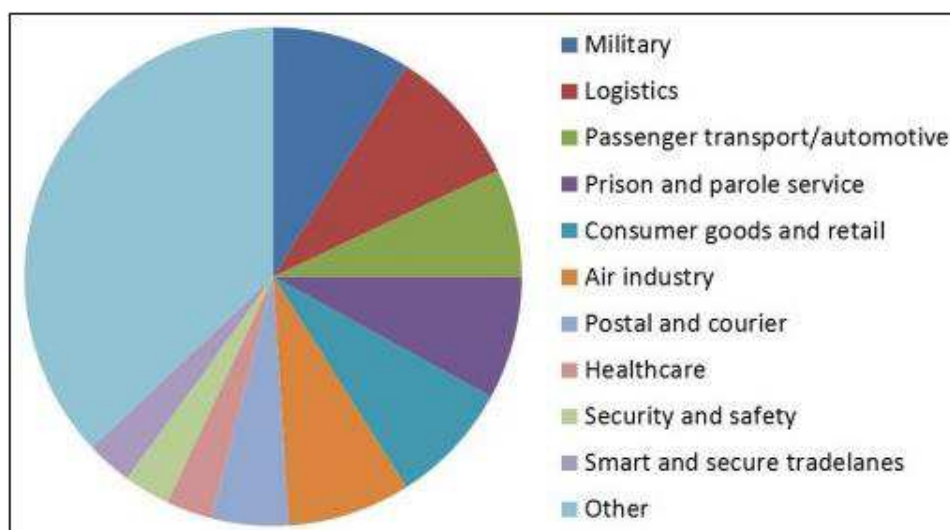


Figure 23: Secteurs de la RFID active – [27]

## 2. Les applications de la RFID active :

- La sécurité :
  - Contrôle d'accès des véhicules : identification rapide, suivi des entrées/sorties et inventaire du site,
  - Surveillance anti-vol pour matériel sensible : identification, suivi de localisation et contrôle de la perte du signal,
  - Surveillance de zones à risques : comme par exemple le convoyage et le compactage dans une chaîne de recyclage, en cas de détection d'un employé portant un badge dans un des processus, celui-ci est localisé, arrêté. Cela sert également au contrôle du fonctionnement,
  - Evacuation de sites : système de comptage du personnel, identification, suivi des entrées/sorties et inventaire,
  - Maintenance dans la défense : maintenance prédictive : identification, température, humidité, chocs et accélérations, déformations,

- Localisation de personnel dans les bâtiments militaires : une expérimentation a été lancée dans la marine nationale, l'objectif étant de localiser du personnel marin à l'intérieur des frégates dans la salle des machines et visualiser les informations sur les PCs de sécurité.
- Protection des biens : inventaire automatique et surveillances d'objets de valeur.



Figure 24: Application RFID active pour la surveillance anti-vol

La figure 3 donne un exemple d'utilisation de la RFID active dans le domaine de la sécurité []. Le schéma représente le protocole mis en place lors d'une surveillance anti-vol. Cela se fait suivant le schéma suivant :

- Transmission permanente entre les tags et la base pour prévenir le brouillage, le masquage, la destruction, le mouvement ou l'arrachage d'une étiquette,
  - Base électronique en dialogue permanent avec le centre de télésurveillance 24h/24 et 7j/7,
  - Plate-forme de gestion qui gère l'alarme et prévient par SMS ou déclenche une intervention suivant le niveau de l'alerte.
- Logistique :
- Localisation en temps réel : cela se fait par exemple dans les centres de répartition et de maintenance aéronautique dont certains d'entre eux voient passer jusqu'à 170 avions et hélicoptères par an, ce qui constitue 250 000 pièces en stock et près de 151 magasins.
  - Contrôle des températures : mesure et contrôle en temps réel de la température pour les besoins de cartographie thermique d'entrepôts et de traçabilité dans le transport frigorifique.

- Industrie : suivi de production, identification, température et suivi en temps réel.
- Bâtiments et travaux publics :
  - Surveillance et prévention industrielle : identification des équipements, suivi de la température, contraintes, déformations et chocs.
  - Infrastructures : gestion intelligente de l'énergie.
- Domotique : automatisation de l'habitat, identification du lieu, paramétrage de la température, contrôle de l'humidité, ouverture des portes et volets, déclenchement des lumières (figure 25).

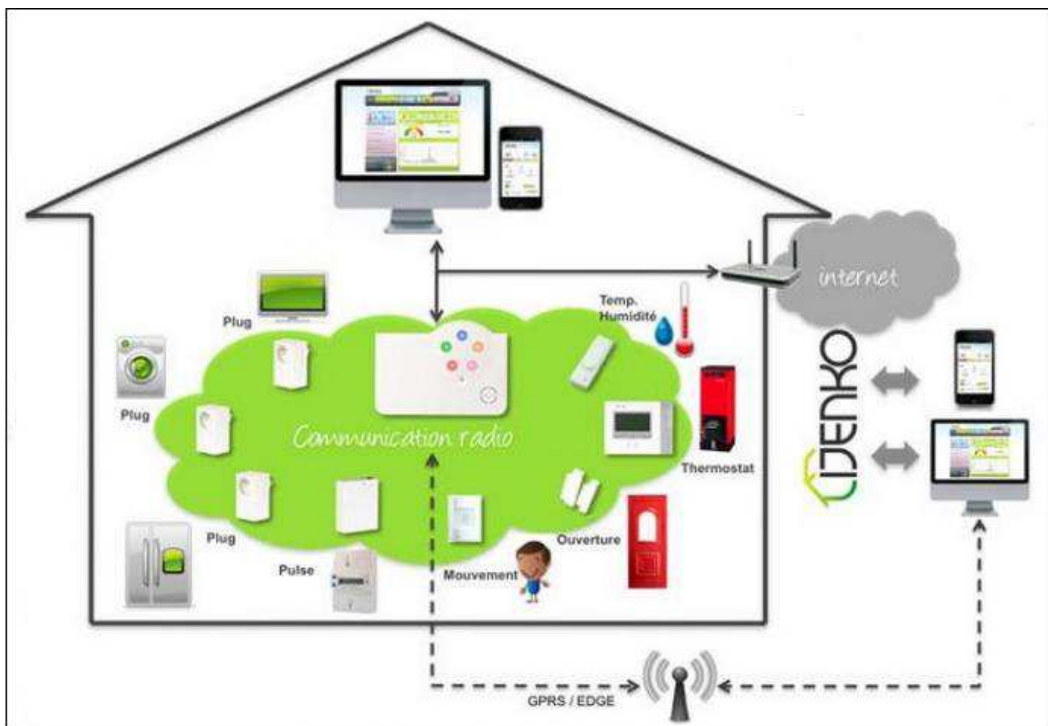


Figure 25: Domotique: home automation via la RFID active

- Radio-tracking : suivi et repérage à distance d'animaux ou pour le chronométrage automatique d'épreuves sportives.

### 3. Les produits de la RFID active:

La majorité des tags actifs qui existent sur le marché sont sous forme de boîtiers. Ceci s'explique par la taille des batteries nécessaires à l'alimentation des circuits. Elle doit pouvoir assurer le bon fonctionnement du produit pour des durées d'un an, 3 ans, 5 ans ou plus.

#### 3.1. Le coin ID :



Figure 26: Coin ID – ELA [28]

Ce tag arrondi, figure 26, est un tag actif étanche. Il émet de manière périodique et paramétrable son identifiant. Il a une autonomie de 3 à 8 ans, fait 36 mm de diamètre et 11 mm d'épaisseur. On peut le trouver dans des applications telles que le comptage du personnel sur un chantier pour la sécurité BTP, l'inventaire automatisé sur les plates-formes logistiques ou le radio-tracking.

Une version plus épaisse (15 mm) et disposant d'une plus grande autonomie existe pour des applications de localisation et sûreté anti-vol.

On trouve également des capteurs de température et de taux d'humidité. Ils mesurent 36 mm de diamètre et 11 mm d'épaisseur. En plus d'envoyer leur identifiant, ils envoient également la valeur de la température ou du taux d'humidité relevée avec une précision de +/- 0,5°C pour la température et +/- 3% pour le taux d'humidité. Ils ont une autonomie de 5 à 6 ans et sont destinés aux transports de produits sanguins et tout ce qui est frigorifique dans l'agro-alimentaire ou encore le monitoring dans les entrepôts de stockage pharmaceutiques.

### 3.2. Les Items IR :



Figure 27: Items IR – ELA [28]

Ce tag, figure 27, a principalement deux caractéristiques : une longue portée de 60m et pouvant aller jusqu'à 100m en champ libre et une autonomie de 5 à 10 ans. Le boîtier est assez large, il fait 28 mm en épaisseur.

Il est essentiellement destiné au contrôle d'accès de site en main libres et l'inventaire en temps réel mais peut aussi servir comme anti-vol de marchandises.

### 3.3. Porte badge actif :



Figure 28: Porte badge actif – ELA [28]

Ce porte badge, figure 28, intègre une puce RFID active qui envoie son ID périodiquement. Elle est alimentée avec une pile bouton d'une autonomie de 3 ans et qui peut être remplacée. D'une portée de 30m en champ libre, ce porte badge sert essentiellement à s'authentifier en main libre pour les ouvertures de sessions sur ordinateur.

### 3.4. Boîtier de télécommande :



Figure 29: Télécommande – ELA [28]

Cette télécommande longue portée, figure 29, peut envoyer jusqu'à 3 identifiants, selon le bouton sur lequel on appuie. Elle a une autonomie de 3 à 6 ans. La pile peut être remplacée et le boîtier à une épaisseur de 16 mm.

3.5. Thinline IR :



Figure 30: Thinline IR – ELA [28]

Le Thinline, figure 30, est un badge longue portée, il peut émettre jusqu'à 80 mètres en champ libre. D'une autonomie de 2 ans à 5 ans suivant les paramètres. Il peut émettre son identifiant, une alarme pour prévenir du niveau de la batterie lorsqu'elle est trop faible et une consigne activation/désactivation. Le boîtier a les dimensions standards d'un badge en longueur et largeur et une épaisseur de 5mm.

Il est destiné à l'identification mains libres du personnel, véhicule ou matériel sur un site.

3.6. Slim ID :



Figure 31: Slim ID – ELA [28]

Le Slim ID, figure 31, est une étiquette active. Elle envoie un identifiant jusqu'à une distance de 60 mètres en champ libre. Elle a une autonomie de 1 à 7 ans suivant les paramètres (en plus de l'identifiant, elle dispose d'une alarme batterie, d'un procédé d'activation/désactivation et peut également servir comme détecteur d'arrachement). Cette étiquette fait partie des tags actifs les plus fins sur le marché avec ses 2,4 mm d'épaisseur, loin des 0,8mm d'une carte bancaire.

On la retrouve dans les domaines de l'inventaire automatique, la localisation d'objets et comme antivol dans les entrepôts de logistique.

3.7. Tag actif de chez Axem Technology:



Figure 32: Tag actif – Ingecom [29]

Le tag actif de chez AXEM Technology, figure 32, est conçu pour des applications d'inventaire (en logistique et en contrôle d'accès), de détection de température (logistique pharmaceutique, suivi de la chaîne du froid et du chaud, suivi du sang, surveillance des processus industriels) et tout ce qui est antivol et détection de mouvement.

Il a une portée pouvant aller jusqu'à 100 mètres en champ libre et émet à une fréquence de 2,45 GHz. Alimenté via une pile bouton, il a une autonomie de 5 à 10 ans suivant les utilisations.

Le boîtier a une épaisseur de 4 mm.

3.8. Porte clé actif de chez Ingecom :



Figure 33: Porte clé actif – Ingecom [29]

Ce porte clé actif émet à une fréquence de 2,45GHz, figure 33. Il a une conception très robuste qui lui permet de fonctionner dans des environnements sévères et il est particulièrement résistant aux agressions chimiques.

D'une épaisseur de 9 mm, il a une durée de vie de 6 ans suivant l'intervalle d'émission utilisé qui configurable entre 1s et 30s. Il supporte une large gamme de température allant de -20 °C à 70 °C.



3.9. Bracelet actif de chez Ingecom :



Figure 34: Bracelet actif – Ingecom [29]

Ce bracelet actif, figure 34, émettant à une fréquence de 2,45GHz, a été conçu pour le suivi des patients en domaine hospitalier. Particulièrement, les nouveaux nés en maternité ou les patients souffrant de troubles de la mémoire en hôpital ou en maisons spécialisées. Il génère une alerte en cas de sortie d'une zone non autorisée dans un rayon de 30 m en champ libre.

D'une épaisseur de 8 mm, le boîtier est spécialement conçu pour les milieux stériles et il est antiallergique.

Le bracelet a une durée de vie de 5 ans avec un intervalle d'émission de 4s. L'intervalle peut varier de 1s à 30s. Les températures supportées varient quant à elle entre -20 °C et 70 °C.

3.10. Tag actif de chez Newsteo :



Figure 35: Tag actif – Newsteo [30]

Visible sur la figure 35, ce tag dispose d'une longue portée radio pouvant aller jusqu'à 100 mètres, il a une autonomie de plusieurs années.

Il peut être utilisé dans plusieurs applications :

- Identification de marchandise dans une zone de stockage ou pendant le transport,
- Solution d'identification d'un parc de véhicules/bateaux positionnés dans un parking/port,
- Solution de chronométrage sportif,
- Solution de surveillance d'entrée sortie dans une zone à accès restreint,
- Identification de pièces détachées dans une machine,
- Système anti-vol.

Les domaines d'activités de la RFID active sont variés. Ils requièrent tous une longue portée et une autonomie importante. Mise à part l'exemple de l'étiquette, le facteur géométrique de l'épaisseur n'est pas un critère de conception imposé et il n'existe pas de tag actif respectant la norme ISO 7810.

#### 4. La RFID active en Chine :

UINT possède un bureau de ventes à Shanghai en Chine. Il est intéressant de voir les opportunités qu'offre ce marché pour la promotion des produits RFID.

##### 4.1. Généralités :

La Chine fait partie des pays où la RFID se développe de plus en plus. Ayant la plus grande population du monde, la Chine constitue naturellement le plus grand marché de consommation mondial.

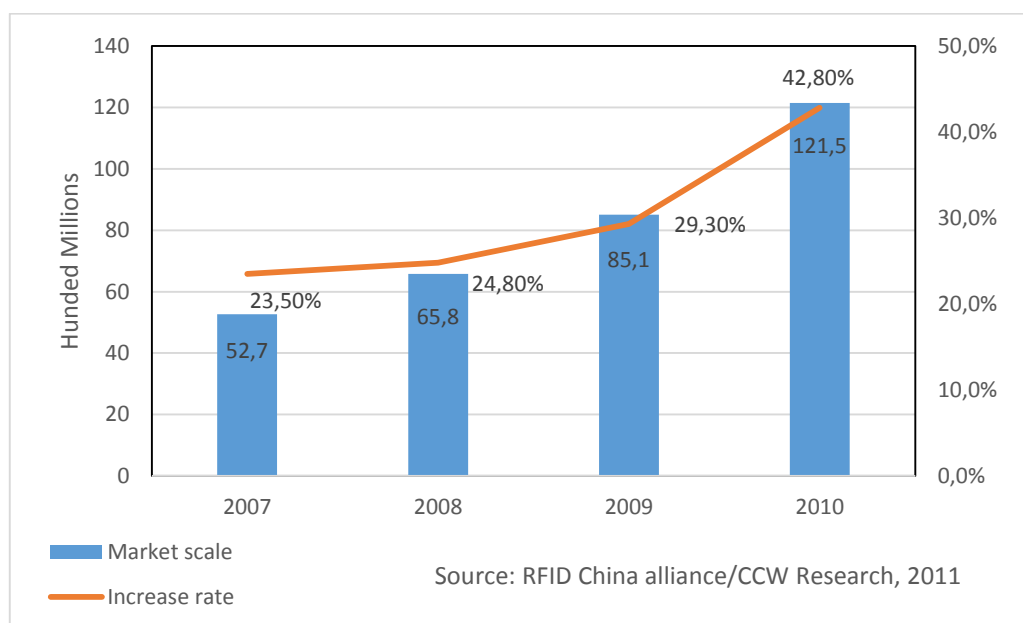


Figure 36: Croissance du marché de la RFID en Chine [31]

La figure 36 montre l'évolution du marché de la RFID chinois durant ces dernières années.

Le marché d'identification par radiofréquence en Chine devrait croître en 2013 d'environ 35% pour atteindre 32 milliards de RMB (522 millions de dollars) d'après Zhang Qi président de l'association d'information de l'industrie et du commerce de la Chine. En 2012, il était de 23,66 milliards de RMB (386 millions de dollars) [32].

Selon Lux Research [33], le marché des cartes RFID de la Chine va presque doubler en valeur et plus du double en unités en 2017 ; poussé par l'accent mis par le gouvernement sur l'Internet des objets et une accélération de la croissance du secteur privé.

Le volume du marché devrait atteindre 2,11 milliards d'unités d'ici 2017, contre de 894 millions en 2012.

### 4.2. Les facteurs de développement :

Plusieurs facteurs favorisent le développement de la RFID en Chine :

- La Chine est le plus grand marché de consommation au monde. Les applications de la RFID grand public ont toutes les chances de croître à un rythme exponentiel.
- La montée en puissance d'équipementiers chinois spécialisés dans les tags RFID.
- Le développement de l'UHF dans les utilisations domotiques. Ce marché devrait atteindre 236 millions de dollars en 2017.
- Le gouvernement chinois accorde beaucoup d'importance à la croissance de la RFID. Il a mis en place des plans d'aide au développement et a établi des mesures afin d'en faciliter le développement. L'appui des principaux ministres (commerce, santé, sécurité, transports...) a eu un impact important notamment la création d'un groupe de travail spécialement dédié à la RFID.
- Mise en place de fonds nécessaires pour l'étude et le développement de solutions RFID ainsi que de toutes les briques de base : techniques de design de la puce, de l'antenne, du lecteur, des applications software...
- Le progrès rapide du paiement via mobile.

### 4.3. Domaines d'applications de la RFID en Chine [31]:

- Les transports :

Le ministère des Transports chinois préconise le transport intelligent, il fournit des aides pour développer la recherche et accélérer la production d'applicatifs, tels que le réseau du péage autoroutier, le système de supervision de la sécurité GPS, la gestion de la circulation de l'eau, l'identification automatique des embarcations. Les utilisateurs du péage automatique ont dépassé les 650 000. 14 provinces l'ont mis en place, ce qui améliore l'efficacité du transport. Jusqu'en 2009, 17000 locomotives et 708 camions ont installé des systèmes RFID actifs pour un suivi en temps réel. Les E-tickets incluant une puce RFID sont aussi en très large circulation afin d'éviter les fraudes, que ce soit dans les trains ou dans les bus.

- Les E-passeports ou passeports biométriques :

200 millions de demandes sont enregistrées chaque année.

- L'événementiel :

En 2010, l'application la plus importante où la RFID a été utilisée dans la gestion de l'événement est le « Shanghai World EXPO E-ticket ».

- Le contrôle d'accès :

Cela inclut le contrôle d'accès aux entreprises, lotissements, et places de parking. Plusieurs personnes peuvent être rapidement vérifiées.

- La lutte contre la contrefaçon :

Les technologies qui luttent contre la contrefaçon sont utilisées dans les produits de consommation de luxe, les produits électroniques, les documents importants... Grâce à un code unique, très complexe, les produits sont facilement traçables. Toutes les informations relatives au produit sont encryptées, le logo, le nom, le numéro, la date de production...

- La santé :

Dans les soins de la santé, on retrouve le suivi de la désinfection des instruments chirurgicaux, la gestion des médicaments, le suivi en temps réel des patients, l'identité des patients... Ce domaine est en perpétuelle évolution.

- La gestion de la sécurité des produits alimentaires et des médicaments :

Elle a été mise en place afin de prévenir les problèmes dus aux intoxications alimentaires, additifs alimentaires, pesticides, afin d'en réguler les utilisations également.

- Les bibliothèques :

Les applications RFID en bibliothèque incluent les prêts de livres, retours, traitements, recherches, vérifications, déclarations, échanges...

- La logistique :

En Chine, l'utilisation de la RFID en logistique concerne essentiellement les entreprises, les chaînes d'approvisionnement et le réseau de trafic national. Par exemple, la chaîne d'approvisionnement du coton est suivie dans toutes ses étapes (achat, contrôle qualité, logistique, entreposage).

- Les paiements par téléphone :

La technologie de communication mobile s'étant beaucoup développée, le commerce électronique passe par le téléphone. On peut également valider un ticket de transport avec son téléphone.

- Le suivi des animaux :

Il est en plein développement, notamment pour ce qui est du suivi et de la protection des animaux rares.

- La gestion des biens :

Cela concerne les biens en industrie, personnel et matériels, suivi, entretien, entrées/sorties... et fournitures de bureau : ordinateurs, bureaux...

#### 4.4. Quelques exemples de produits [34]:

On retrouve beaucoup de tags précédemment cités car une grande majorité est fabriquée en Chine. Il y en a néanmoins qui se différencient.

L'une des figures les plus importantes du marché RFID chinois est la SZAAT, l'académie de technologie aérospatiale de Shenzhen, co-financée par le gouvernement. Avec un chiffre d'affaires de 60 millions de dollars, elle compte près de 300 salariés dont 85% de chercheurs dans les différents domaines de technologie.

Elle s'est spécialisée dans la RFID dès sa création, notamment l'UHF et le 2,45GHz. Ses clients viennent de l'aérospatial, la défense et le domaine public.

4.4.1. Le badge fin actif :



**Figure 37: Badge fin actif**

Ce tag actif, figure 37, sous forme de badge, est sûrement le plus fin qui existe sur le marché. Il a pour dimensions 86mm x 54mm x 2mm. Par contre, à cause de son épaisseur, il n'est pas aux normes ISO 7810.

Grâce à une batterie au lithium de 750mAh, il a une durée de vie allant jusqu'à 6 ans suivant son mode d'utilisation.

Il est conçu pour résister à l'eau et fonctionner à une température comprise entre -40°C et 70°C.

Il émet un signal jusqu'à une distance supérieure à 100m en mode outdoor à la fréquence de 2,45GHz.

Ses principales applications sont la gestion du personnel scolaire et le suivi de leur position ainsi que l'identification automatique des véhicules soit dans les parkings ou les péages d'autoroutes.

Quasiment pour les mêmes domaines d'applications on retrouve un autre tag actif visible sur la figure 38.



**Figure 38: Tag actif - SZAAT**

Il émet également à la fréquence de 2,45GHz à une distance de 150m suivant le mode de puissance utilisé.

Il a une durée de vie de 5 ans grâce à la batterie de 550mAh qu'il embarque.

Il est un peu plus grand et plus épais que le précédent tag : 65mm x 35mm x 5mm, loin de la norme ISO 7810.

**4.4.2. Tag actif spécialement conçu pour les surfaces métalliques :**



**Figure 39: Tag actif anti-métal**

Ce tag, figure 39, a spécialement été conçu pour les surfaces métalliques. En effet, grâce à son design d'antenne particulier, il peut être posé sur des surfaces métalliques sans que cela n'interfère sur son bon fonctionnement.

Il fonctionne à une fréquence de 2,45GHz et peut être lu à plus de 1500m. Grâce à sa batterie lithium de 1600mAh, il a une durée de vie pouvant aller jusqu'à 6 ans.

Ses dimensions sont de 120mm x 50mm x 15mm. On le retrouve dans le transport et la gestion des containers et tous les grands équipements en général.

**4.4.3. Tag actif « porte-clé » :**



**Figure 40: Tag actif "porte-clé"**

Utilisé pour le contrôle d'accès, ce tag fonctionne à la fréquence de 2,45GHz et a une autonomie de vie de 4 ans grâce à sa batterie lithium d'une capacité de 450mAh. Il est visible figure 40.

Il peut émettre jusqu'à plus de 150m et mesure 52mm x 30mm x 10mm.

**5. Conclusion :**

La RFID active prend une place de plus en plus importante sur le marché de la RFID car elle permet la réalisation de systèmes embarqués complexes et autonomes. Ses applicatifs sont divers et ses produits déclinés sous différentes formes.

Néanmoins, la nécessité d'autonomie ne permet pas d'embarquer des batteries suffisamment fines pour descendre en dessous de 2mm d'épaisseur. Il n'existe à ce jour aucun dispositif intégrant de la RFID active qui soit aux normes 7810.

L'objet de mes travaux de thèse est l'étude d'un dispositif qui embarque une puce RFID active alimentée via une batterie fine et intégrée dans un circuit au format bancaire.

*Chapitre 3 : Etudes sur  
les batteries et les  
antennes pour des  
systèmes au format  
carte bancaire*



La batterie est certainement l'un des éléments les plus contraignants à choisir. Nous présentons dans ce chapitre l'étude que nous avons menée afin d'explorer les choix possibles pour cet élément. Nous montrons les mesures que nous avons effectuées sur un panel de batteries ainsi que sur différents designs d'antennes, l'autre composant critique, afin de mettre en évidence les critères de choix de ces composants et leur importance dans les cartes au format bancaire.

Le chapitre comprend trois parties. La première partie est consacrée à l'étude des batteries flexibles, la deuxième aborde le design d'antennes et la dernière s'intéresse à une application biométrique pour laquelle les mesures des deux premières parties ont été utilisées.

Pour des raisons de confidentialité du caractère industriel de ces travaux, les références et les fabricants des différents composants et batteries ne sont pas donnés. Nous utiliserons en lieu et en place notre propre désignation.

## **1. Etude effectuée sur différentes batteries flexibles :**

Au début de mes travaux de thèse, les batteries fines et flexibles commençaient à faire leur apparition. Un seul fabricant en faisait auparavant, des primaires (non-rechargeables) avec une capacité de 10mAh.

Les principaux fabricants étaient asiatiques (Chine, Japon et Corée du Sud) en situation de monopole. Un fabricant américain a commencé à s'y intéresser et a proposé l'une des premières batteries fines et flexibles rechargeables.

### **1.1. Les batteries primaires :**

Les batteries primaires sont des batteries non-rechargeables à usage unique. Une fois déchargée, il faut la remplacer. Dans un produit au format carte bancaire, lorsque la batterie se décharge c'est la fin de vie du produit.

La figure 41 regroupe les différentes batteries primaires sur lesquelles nous avons effectués des tests afin d'établir quelle batterie était adaptée à telle ou telle application, laquelle résistait mieux aux courants continus et laquelle résistait mieux aux pics de courant.

#### **1.1.1. Caractéristiques des batteries :**

Le tableau 2 regroupe les caractéristiques de ces batteries. Les principales caractéristiques des batteries primaires sont :

- La tension nominale qui est la tension d'alimentation en volts,
- La capacité nominale qui symbolise la quantité d'énergie que peut délivrer la batterie dans un temps spécifique, bien évidemment en fonction de la charge et d'autres paramètres tels que la température,
- Les courants de décharge maximum, en mode continu et en mode pulsé,
- Les températures de fonctionnement et de stockage, très importantes notamment pour évaluer si la batterie pourra ou non supporter une lamination à chaud.
- Les dimensions dont la plus importante est l'épaisseur qui doit être inférieure à 0,5mm,
- L'autodécharge qui renseigne sur le devenir de la batterie et donc du produit et qui concrètement donne le pourcentage de perte par rapport à la tension nominale de la batterie.

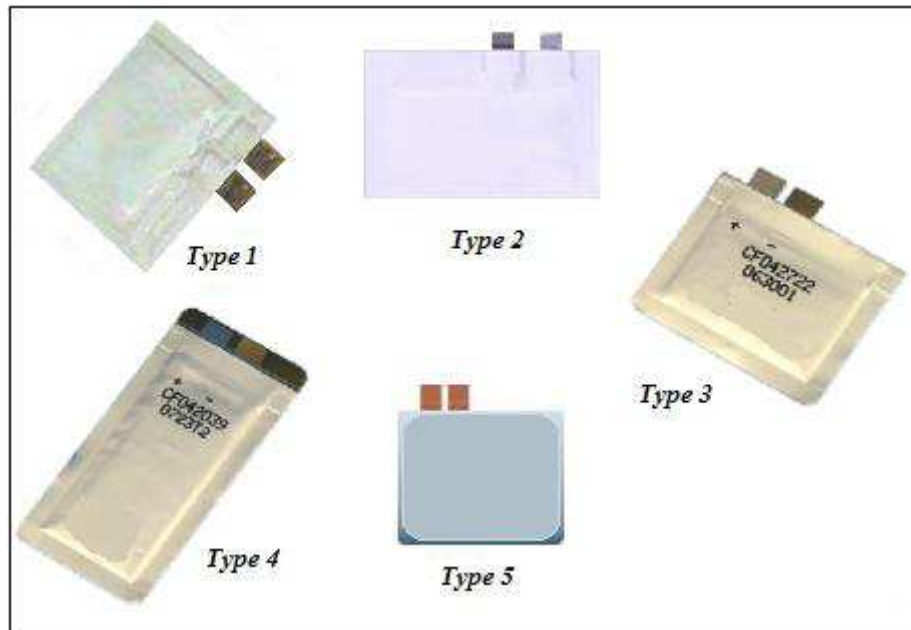


Figure 41: Différentes batteries primaires

Batterie primaire	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Tension nominale	3 V	3 V	3 V	3 V	3 V
Capacité nominale	22 mAh	14 mAh	11 mAh	18 mAh	10 mAh
Courant de décharge standard	1 mA	0,35 mA	0,25 mA	0,25 mA	0,25 mA
Courant de décharge continu max	10 mA	1,4 mA			5 mA
Courant de décharge pulsé max	25 mA				
Tension endpoint	2 V	2 V	2 V	2 V	2 V
Température de fonctionnement	-10°C à 60°C	-10°C à 60°C	-10°C à 60°C	-10°C à 60°C	-10°C à 60°C
Température de stockage	-20°C à 40°C	-20°C à 40°C			-20°C à 40°C
Dimensions (mm)	23,4 x 29 x 0,45	22,5 x 29 x 0,47	25,5 x 27 x 0,42	42,4 x 20 x 0,42	0,45
Epaisseur mesurée (mm)	0,46	0,43 - 0,44	0,415 - 0,42	0,415 - 0,42	
Dimensions des languettes (mm)	3,6 x 4	3 x 3	3,5 x 4	3,5 x 4	
Auto-décharge (à 23°C)	moins de 10% en 1 an	moins de 10% en 5 ans	moins de 3% par an	moins de 3% par an	moins de 1% par mois
Technologie	lithium polymère	Li/MnO <sub>2</sub>	lithium polymère	lithium polymère	lithium polymère

Tableau 2: Caractéristiques des batteries primaires

Quand on regarde les dimensions de ces différentes batteries, elles ont quasiment les mêmes longueurs et largeurs sauf pour le type 4 qui est relativement longue par rapport aux autres. Cette longueur peut d'ores et déjà constituer un handicap si l'on veut concevoir un circuit intégrant beaucoup de composants, bien que sa capacité de 18mAh soit très intéressante. Toutes ces batteries ont la même épaisseur entre 0,42mm et 0,47mm qui permet la garantie un produit final au format carte bancaire qui soit aux normes 7810.

Nous pouvons remarquer aussi qu'elles ont la même tension nominale de 3V. Aujourd'hui, cette tension est suffisante pour alimenter la majorité des processeurs et autres composants présents sur le marché et dont on peut avoir besoin lors de la conception des circuits embaqués au format carte bancaire.

A l'identique, les températures de fonctionnement et de stockage sont semblables ce qui est relatif à la technologie utilisée : le lithium.

La différence majeure réside dans les capacités nominales de ces batteries, qui varie de 10mAh jusqu'à 25mAh.

Un autre critère, très important mais qui n'est pas explicité dans le tableau est le prix. En général, plus la capacité est grande plus la batterie est chère. D'où l'importance des tests pour avoir une idée sur le comportement des batteries en présence de différentes charges.

Le protocole de test qui a été mis en place est de faire des tests de décharges sur les batteries en utilisant différentes charges. Pour chaque type de batterie, plusieurs batteries ont été utilisées (entre 5, 10 et 20) en fonction des stocks disponibles à UINT.

#### 1.1.2. Les tests effectués :

Nous avons réalisé deux séries de tests sur nos échantillons de batteries :

- Dans un premier temps, ce sont des résistances qui ont été utilisées. Les valeurs ont été choisies en fonction de résistances utilisées dans des projets antérieurs. Ce sont des tests un peu particuliers qui cherchent à mesurer la différence entre la tension nominale et la tension mesurée une fois la charge appliquée.
- Dans un deuxième temps, nous avons utilisé un dispositif à base d'interrupteurs pour simuler des pics de courant. Ce dispositif permet de définir des intervalles très longs. Certaines manipulations peuvent durer des jours. Les données étaient enregistrées via un logiciel de saisie.

##### 1.1.2.1. Première série de tests :

Tout d'abord nous allons introduire la notion de décharge au sein d'une batterie. Celle-ci s'effectue en trois étapes. Une première étape où la décharge est bien marquée, mais courte. Vient ensuite l'étape de stabilisation, où pendant la majeure partie de la décharge, la batterie va se stabiliser à une certaine valeur de tension et enfin la troisième étape qui est la fin de vie de la batterie lorsqu'elle se rapproche de sa tension de rupture. La chute de la tension est alors fortement marquée et la batterie arrive en fin de cycle.

La figure 42 montre une courbe de décharge standard avec les trois étapes citées précédemment.

La tension de stabilisation caractéristique de la deuxième étape du cycle de décharge est importante car c'est elle qui va déterminer la véritable tension de fonctionnement de la batterie. Nous cherchons des batteries avec une tension de stabilisation supérieure ou égale à 3V.

C'est cette tension que nous avons essayé de déterminer par rapport aux types de batteries testées. La démarche est assez simple, on relie les batteries à des charges et on mesure la tension à leurs bornes. Au préalable, il faut également mesurer la tension initiale de la batterie.

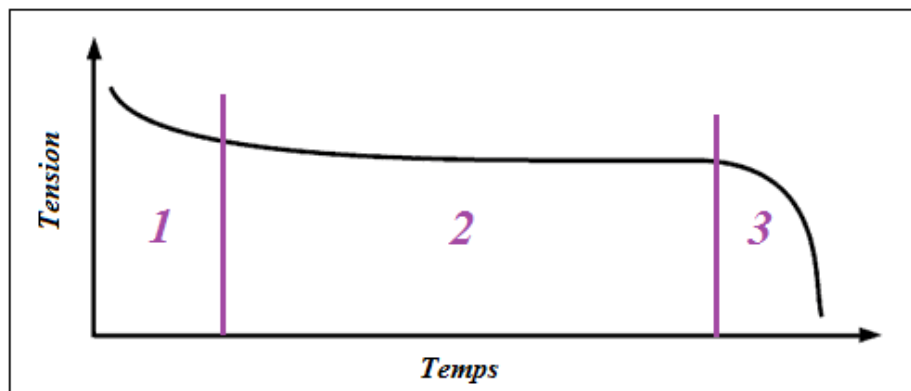


Figure 42: Caractéristique de décharge standard d'une batterie

Le tableau 3 regroupe toutes ces mesures en fonction des différentes batteries.

Batterie	Résistance kΩ	Courant équivalent en mA	Tension mesurée avant branchement en V	Tension mesurée après branchement en V	Perte en %
<b>Type 1</b>					
Batterie 1	3,3	0,88	3,54	2,78	21,47
Batterie 2	0,330	8,8	3,61	2,53	29,92
Batterie 2	4,7	0,63	2,997	2,994	0,10
<b>Type2</b>					
Batterie 1	2,2	1,36	3,24	2,98	8,02
Batterie 2	2,2	1,36	3,25	3,05	6,15
Batterie 3	4,7	0,63	3,24	3,125	3,55
Batterie 4	0,330	8,8	3,24	2,6	19,75
Batterie 5	3,3	0,88	3,24	3,04	6,17
Batterie 6	3,3	0,88	3,24	2,79	13,89
Batterie 7	3,3	0,88	3,24	3,09	4,63
Batterie 8	3,3	0,88	3,24	3,04	6,17
<b>Type 3</b>					
Batterie 1	3,3	0,88	3,2	3,152	1,50
Batterie 2	4,7	0,63	3,19	3,19	0,00
Batterie 3	0,330	8,8	3,19	2,78	12,85
<b>Type 4</b>					
Batterie 1	11,5	0,26	3,12	3,11	0,32
Batterie 2	3,3	0,88	3,13	2,98	4,79
<b>Type 5</b>					
Batterie 1	3,3	0,88	3	2,9	3,33
Batterie 2	3,3	0,88	3	2,9	3,33

Tableau 3: Résumé de la première série de tests sur les batteries primaires

Suivant le type de batterie et la charge que l'on applique, les tensions de stabilisation diffèrent. La dernière colonne du tableau donne en % la perte en tension par rapport à la tension initiale. Certaines batteries résistent très bien aux différentes charges appliquées et d'autres moins.

Nous n'avons pas pu avoir le même nombre de batteries à tester à chaque fois car ce sont des échantillons envoyés par les fournisseurs.

Bien évidemment, plus la charge appliquée est grande moins la chute de tension est importante. Les charges appliquées sont les mêmes afin de mieux comparer les résultats.

Le type 3 est celui qui réagit le mieux. Si nous appliquons par exemple un courant de 8,8mA, il ne perd que 12,85% de sa tension nominale en comparant avec le type 2 qui lui perd 19,75% ou le type 1 qui perd 29,92%. Pour les types 4 et 5, nous n'avons pas eu suffisamment d'échantillons pour tester plusieurs courants mais si on compare par rapport au courant de 0,88mA, le type 4 perd presque 5% de sa tension nominale et le type 5 perd 3,3% contre 1,5% pour le type 3.

De plus, le type 3 a une tension supérieure à 3V pour des courants proche de 1mA et de presque 2,8V pour un courant proche de 10mA.

#### 1.1.2.2. Deuxième série de tests :

Le principe de fonctionnement du dispositif est le suivant : la charge appliquée à la batterie passe par un interrupteur (comme on le voit sur la figure 43). L'interrupteur est piloté par un logiciel où l'on définit le temps de fermeture et l'intervalle entre chaque fermeture de l'interrupteur. On peut donc ainsi simuler des pics de courant.

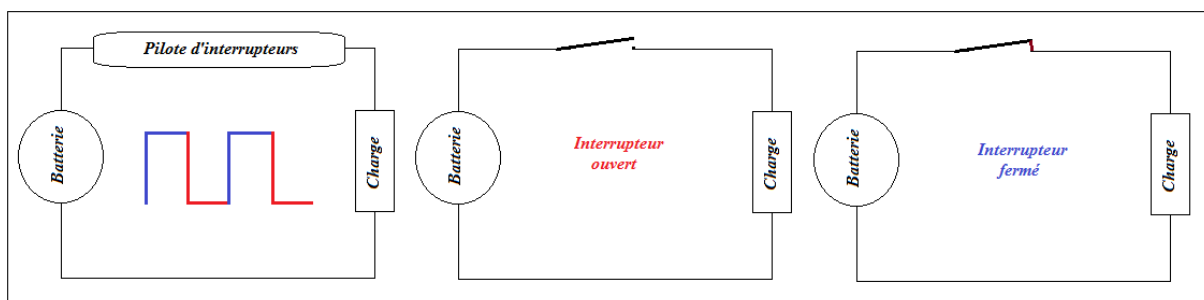


Figure 43: Principe de fonctionnement de l'appareil à interrupteurs

Le but de cette deuxième série de tests est de tester le fonctionnement des batteries en présence de pics de courant, les charges constantes sont rarement élevées dans les applicatifs. Ce qui se produit la plupart du temps, ce sont des appels de courant pendant un court laps de temps.

Au préalable et afin d'avoir une mesure témoin et de vérifier le bon fonctionnement de l'installation, des tests préliminaires ont été effectués avec une pile bouton.

Les mesures ont été enregistrées de deux manières différentes :

- un voltmètre avec un intervalle d'une seconde entre 2 mesures,
- l'appareil à interrupteurs qui via un logiciel (audiosmartcard) enregistre une mesure toutes les 40s. Ce temps est paramétrable.

Si l'installation est fiable, on doit avoir deux courbes de mesures quasi-identiques.

La figure 44 montre les résultats obtenus.

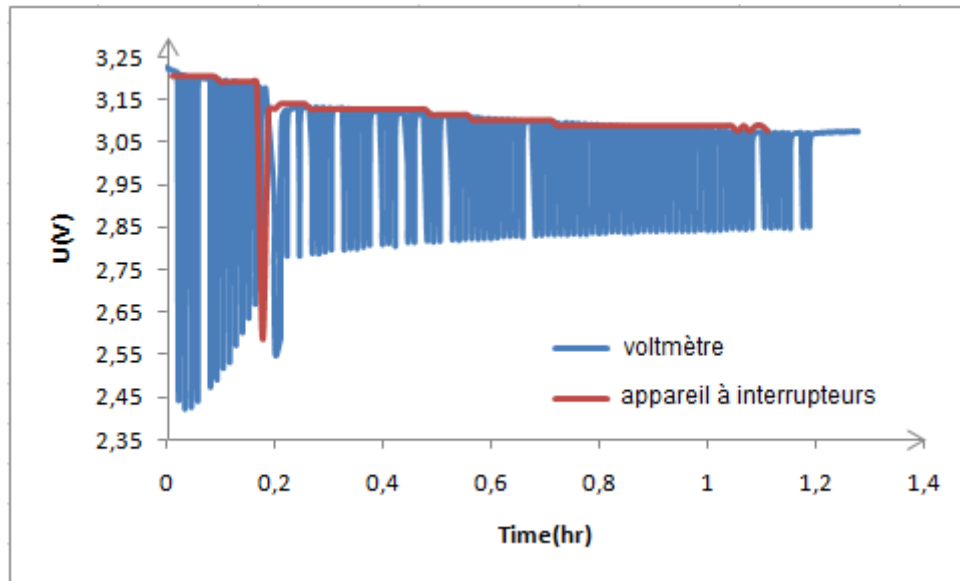


Figure 44: Décharge témoin d'une pile bouton

La courbe en bleu représente les mesures du voltmètre, les artefacts correspondent aux moments où l'interrupteur se ferme. Comme nous l'avons remarqué avec la première série de tests, dès que l'interrupteur se ferme, il y a une chute de tension. Au début les chutes de tensions sont importantes et par la suite elles le deviennent moins. Elles sont assez régulières avec parfois des 'trous', c'est-à-dire des moments où l'interrupteur n'est à priori pas fermé.

La courbe rouge quant à elle représente les mesures prises par « l'appareil à interrupteurs ». De manière générale elle suit la courbe bleue (mise à part les artefacts). Elle est légèrement décalée, on le voit bien à la chute de tension en rouge qui doit correspondre à la chute de tension en bleue vers les 0,2h. Cette chute de tension est peut-être due à une non-ouverture de l'interrupteur. Comme il lui arrive de rester ouvert, il lui arrive aussi de rester fermé.

Le décalage quant à lui, peut s'expliquer par un décalage dans la datation des deux appareils qui n'ont pas la même référence temporelle mais ne remet pas en question la validité des mesures effectuées.

La figure 45 est un zoom sur la figure 44 entre 0,8h et 1h, elle permet de voir que la chute de tension est périodique, donc qu'elle est bien due à la fermeture des interrupteurs. La chute de tension dure le temps de fermeture de l'interrupteur qui est dans notre cas de 2s.

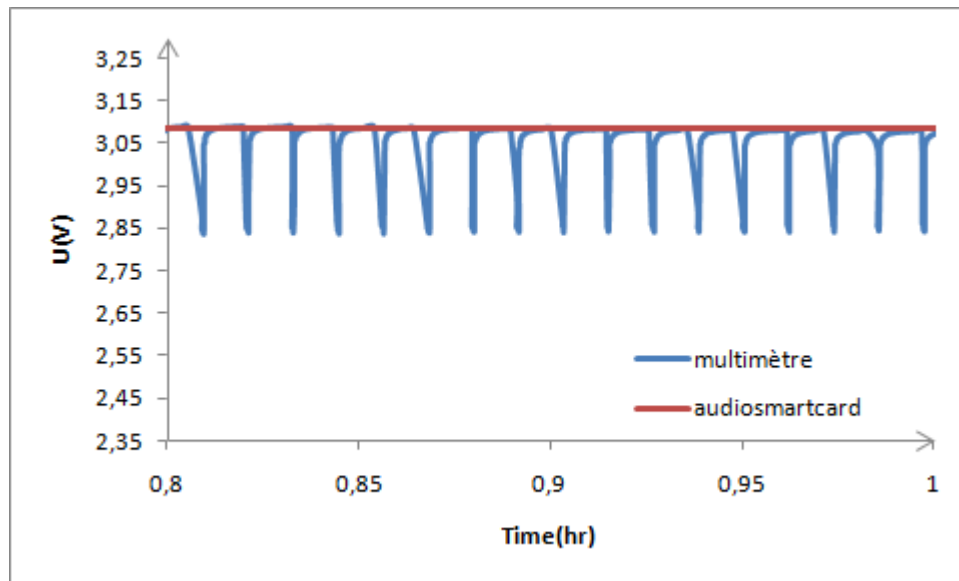


Figure 45: Zoom sur une partie de la décharge de la figure précédente

Ce test valide donc le dispositif de test utilisé pour les mesures en pics de courant.

Pourquoi ce test sous forme de pics de courant est-il si important ? Dans les applications réelles dans les cartes au format bancaire, les cas où la batterie sera sollicitée en continu sont très rares voire inexistants. Bien évidemment, il y a le cas des modes d'endormissement pour justement économiser la batterie mais ce sont des modes où la consommation est de l'ordre du  $\mu\text{A}$  voire du  $\text{nA}$ . Dans ce test, on considère des appels de courant de l'ordre du  $\text{mA}$  et de la dizaine de  $\text{mA}$  voire de la centaine de  $\text{mA}$  pour certaines applications. La plupart du temps, ces appels de courant sont appliqués pendant des laps de temps très courts, soit pour un calcul au niveau du processeur, soit le temps de communiquer entre une puce RFID active et son lecteur.

Prenons le cas d'une carte avec génération d'un mot de passe acoustique : le principe est qu'à chaque fois que l'utilisateur appuie sur le bouton de la carte, une séquence acoustique unique est générée grâce à un buzzer, elle peut servir à s'authentifier sur des sites d'achats sur internet par exemple. Le but est de savoir combien d'utilisations peuvent être assurées ? En appliquant des pics de courant suffisamment espacés pendant un laps de temps court, on peut avoir un ordre d'idée sur la durée de vie de la batterie et donc du produit.

Le profil que nous avons choisi d'appliquer est le suivant : des pics de courant de  $1\text{mA}$  d'une durée de 2s toutes les 40s.

Le profil de courant est schématisé sur la figure 46.

Nous pouvons voir que le profil est assez régulier et les pics périodiques. Il peut néanmoins y en avoir qui sont irréguliers comme celui vers 2000s où l'on voit deux pics, certainement dû à l'interrupteur qui ne s'est pas rouvert. Le dispositif étant assez vieux, des problèmes mécaniques peuvent survenir et empêcher l'interrupteur de s'ouvrir ou de se fermer au bon moment. Néanmoins, comme on peut le voir sur les résultats des figures 44 et 45, cela arrive très rarement et est négligeable pour le bon déroulement des tests.

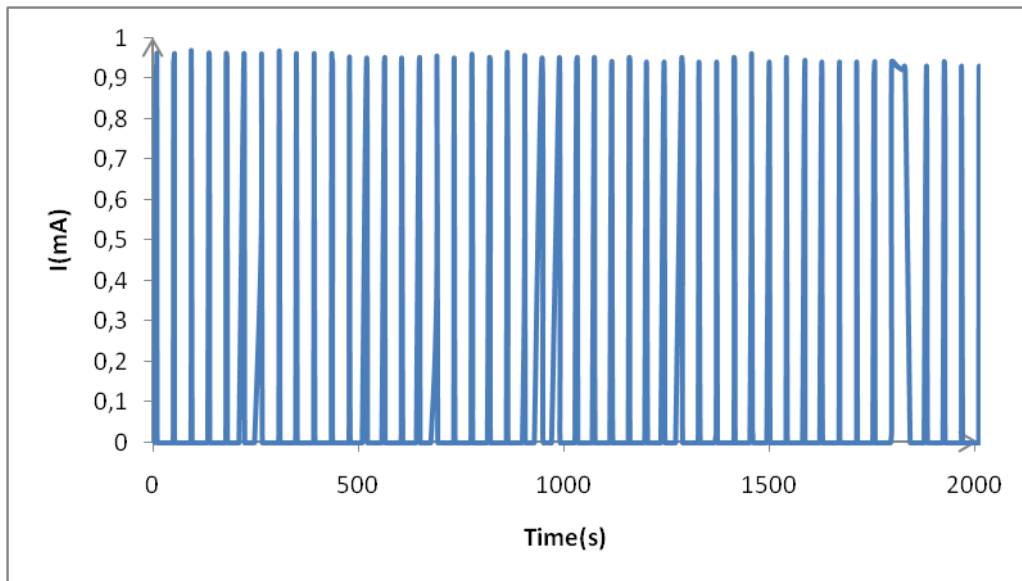


Figure 46: Profil de courant appliqué

Les différents résultats obtenus sont les suivants :

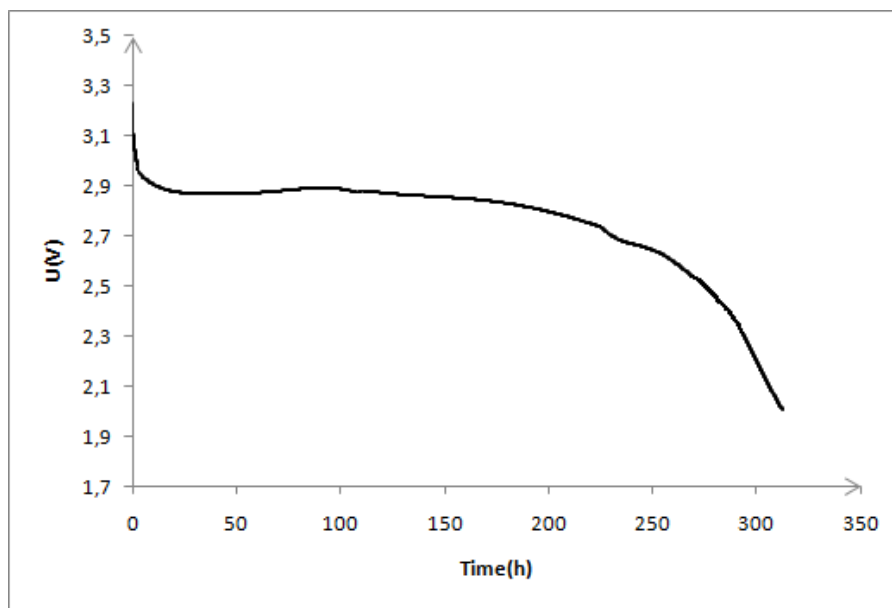


Figure 47: Courbe de décharge pour la batterie type 1



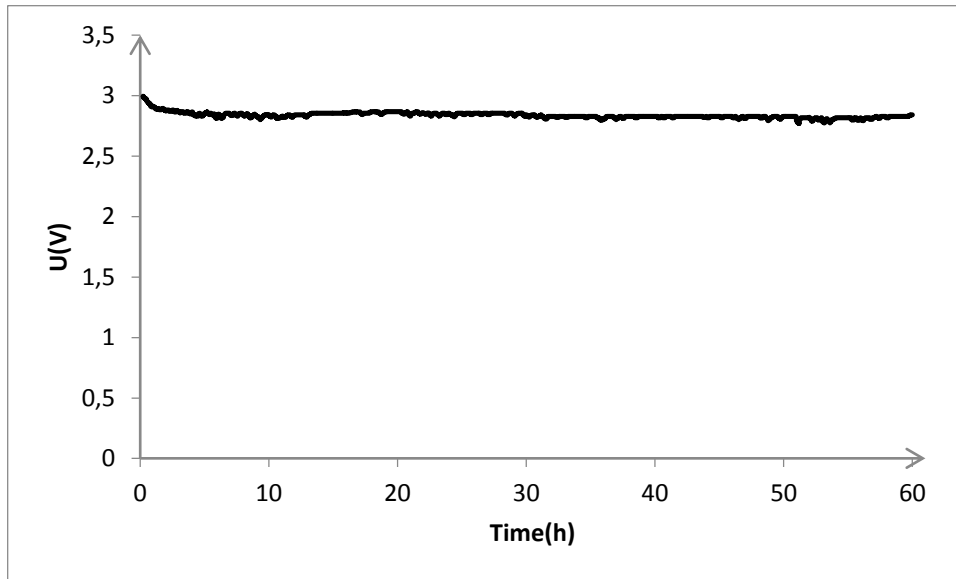


Figure 48: Courbe de décharge de la batterie type 2

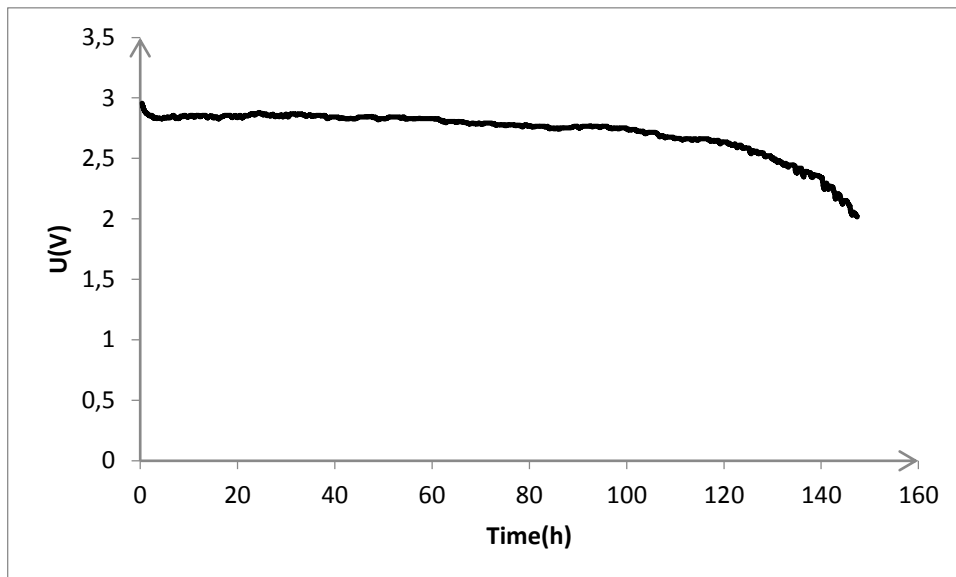


Figure 49: Courbe de décharge de la batterie type 3

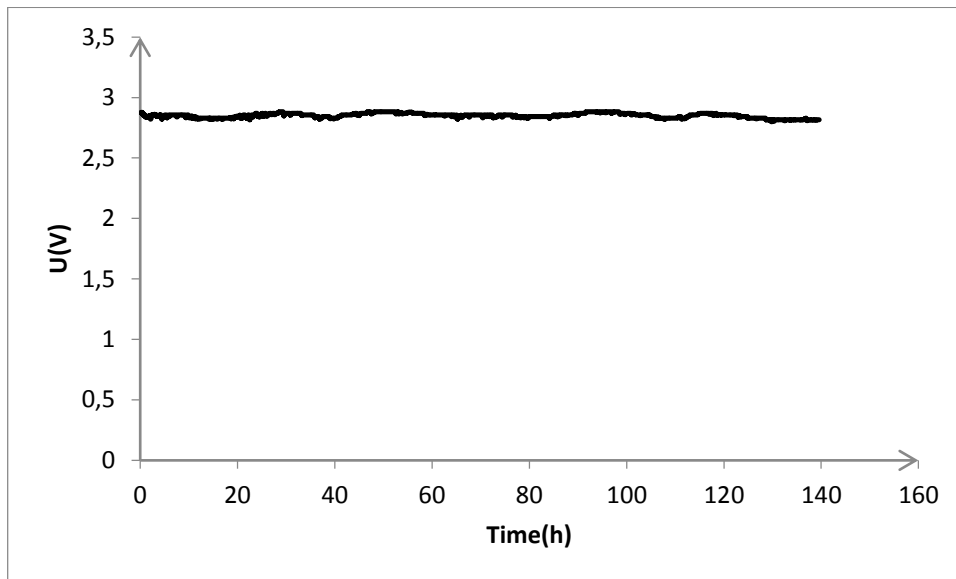


Figure 50: Courbe de décharge de la batterie type 4

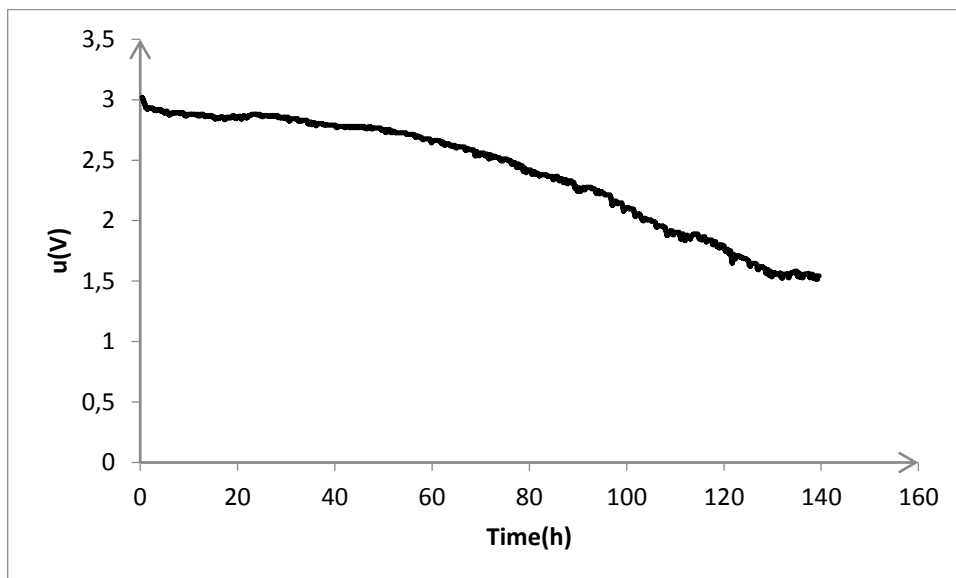


Figure 51: Courbe de décharge de la batterie type 5

Nous pouvons déjà remarquer que les courbes ont l'allure de courbes de décharge. Pour certaines d'entre elles nous avons appliqué des courants continus mais elles ne durent pas plus que quelques minutes.

Le type 2 (figure 48) et le type 4 (figure 50) ont des profils incomplets. Les expériences se sont interrompues pour des raisons inconnues et nous n'avons pas suffisamment d'échantillons pour en effectuer d'autres. Le type 5 (figure 51) est celui qui réagit le moins bien. En effet, son étape de stabilisation est la moins marquée de toutes. Cela rend la batterie moins fiable dans la durée.

Le type 1 (figure 47) et le type 3 (figure 49) sont les batteries qui réagissent le mieux. Les trois étapes sont bien délimitées. Les tensions de fonctionnement d'à peu près 2,9V sont très intéressantes pour les utilisations des circuits intégrés. Le type 1 se démarque par sa tenue dans le temps. Cette batterie supporte en effet presque 2 fois plus de pics que le type 3.

1.2. Les batteries rechargeables :

Les batteries rechargeables flexibles et fines sont apparues depuis peu, elles permettent une inversion du processus de décharge donc une recharge de la batterie grâce à une tension continue ou un courant continu.

De manière globale, elles ont des capacités nominales moins importantes que les batteries primaires.

1.2.1. Caractéristiques des batteries :

Le tableau 4 donne les principales caractéristiques de différents types de batteries rechargeables.

Batterie	Tension de fonctionnement (V)	Capacité nominale (mAh)	Courant de décharge continu max (mA)	Courant de décharge pulsé max (mA)	Température de stockage	Température de fonctionnement	Dimensions (mm)
Type 1	3,6 - 4,2	0,7	5	10	-40°C - 60 °C	-40 °C - 60 °C	25,4 x 25,4 x 0,2
Type 2	3,9 – 4	0,7 - 1	30			-40 °C - 85 °C	25,4 x 25,4 x 0,17
Type 3	3,7	10	10	10	-20 °C - 45 °C	-20 °C - 55 °C	58 x 35,4 x 0,45
Type 4	3,7	12	8		-20 °C - 35 °C	-20 °C - 50 °C	28 x 32 x 0,47
Type 5	3,7	10	20		-20 °C - 25 °C	-20 °C - 60 °C	29 x 25 x 0,4

**Tableau 4: Principales caractéristiques des batteries rechargeables**

En plus de caractéristiques communes avec les batteries primaires listées auparavant, on retrouve des caractéristiques propres aux batteries rechargeables :

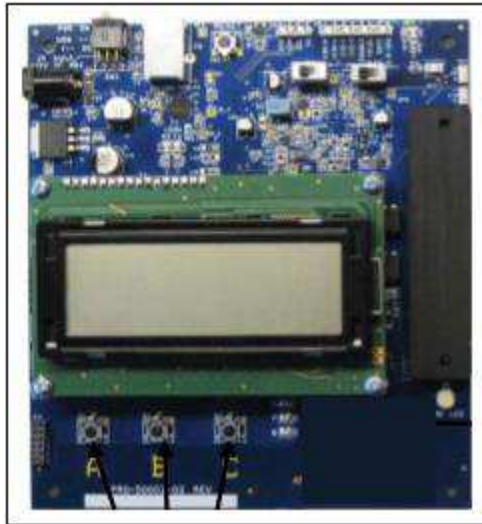
- Le nombre de cycles de vie,
- Le temps de charge,
- Le courant de charge,
- La méthode de charge,
- La tension de coupure en décharge.



**Figure 52: Différentes batteries rechargeables**

1.2.2. Les tests effectués :

Un kit de développement a été utilisé. Ce dernier permet d'appliquer une charge à la batterie et de pouvoir choisir entre une décharge continue ou discontinue. Pour la décharge discontinue la charge appliquée est à intervalles réguliers préalablement choisis. C'est comme si des pics de courant étaient appliqués.

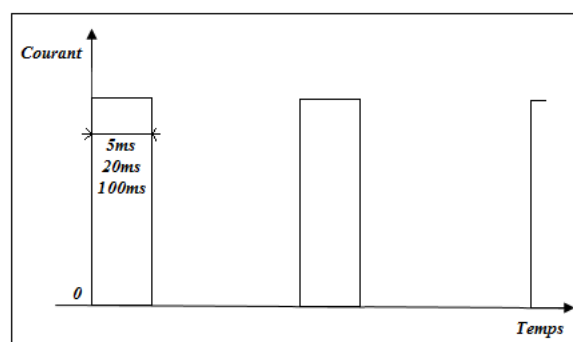


**Figure 53: Kit de développement utilisé pour la deuxième série de tests**

Une fois la batterie branchée au kit, un message apparaît pour nous dire si la batterie est suffisamment chargée ou pas. Si elle ne l'est pas, il nous propose de la charger. Une fois chargée, on peut définir la charge que l'on souhaite appliquer. On choisit tout d'abord le mode (courant continu ou discontinu) et ensuite la valeur du courant de décharge. Si c'est un courant discontinu, il faut également déterminer la valeur du courant et choisir parmi trois propositions les intervalles de temps :

- 5ms/20ms
- 20ms/80ms
- 100ms/400ms

Cela veut dire que pendant 5ms (20ms et 80ms), la valeur du courant est celle que l'on a programmé et pendant 15ms (60ms et 300ms), la valeur du courant est à 0. On obtient un profil de courant comme celui de la figure 54.



**Figure 54: Profil de courant en mode discontinu**

Voici les résultats obtenus pour les différentes batteries rechargeables en notre possession.

1.2.2.1. Type 1 :

Les caractéristiques spécifiques aux batteries rechargeables et concernant le type 1 sont :

- Nombre de cycles de vie : c'est le nombre de fois où l'on peut recharger la batterie et la faire fonctionner. Pour le type 1, le nombre de cycle est de 1000.
- Temps de charge : le temps que prend la batterie pour être rechargée à 80% ou 90% de la capacité totale. Le type 1 met 20mn à se recharger à 80% de sa capacité totale.
- Courant de charge maximum : pas de limite de courant.
- Méthode de charge : soit à tension constante soit à courant constant. Le type 1 a une tension de charge constante de 4,2V.
- Tension de coupure en décharge : tension à laquelle la décharge doit s'arrêter sous peine d'endommager la batterie et de ne plus pouvoir la recharger. Pour le type 1, elle est de 2V.

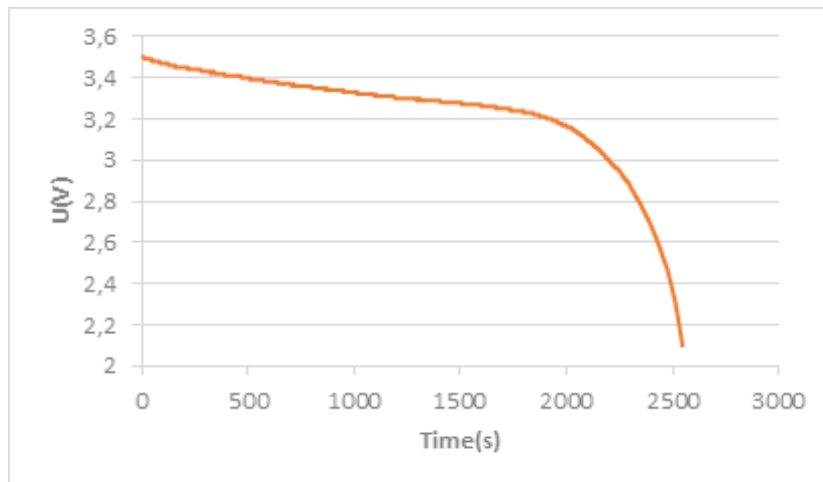


Figure 55: 5mA - 100/400ms

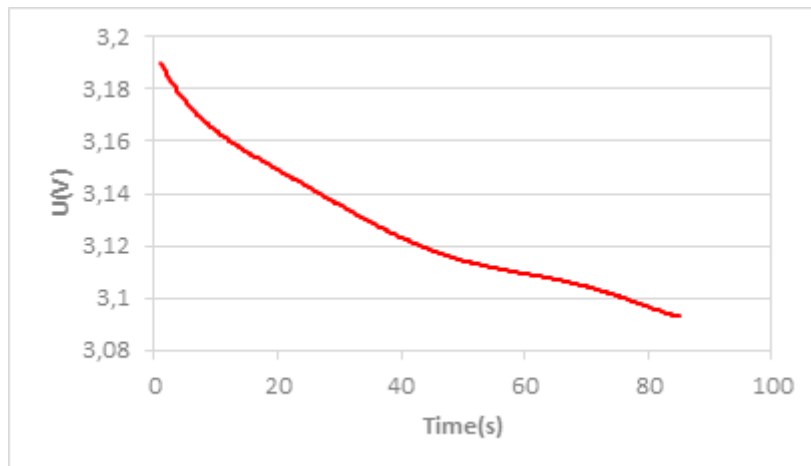


Figure 56: Courant continu 5mA

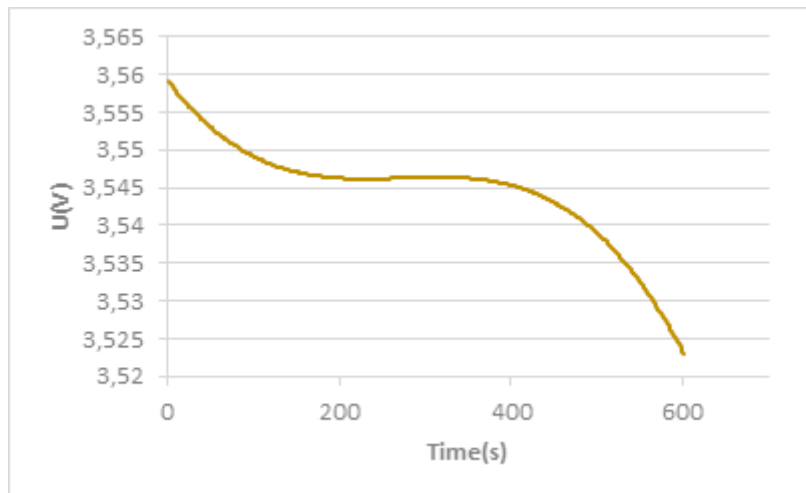


Figure 57: 2mA - 5/20ms

Les figures 55 à 57 montrent trois tests de décharge avec différents profils de courant continu et discontinu. La 1<sup>ère</sup> est une décharge standard avec les trois étapes de décharge bien visibles. Les deux suivantes par contre ne sont pas des profils standards. En effet, les trois étapes sont disproportionnées notamment en ce qui concerne la décharge continue de la figure 56.

Quelques jours après avoir effectué ces tests, des tâches sombres sont apparues sur les batteries. Ce qui peut expliquer le résultat des décharges. Les batteries ne fonctionnent plus correctement. Malgré le 1<sup>er</sup> test prometteur de la figure 55, nous sommes dans l'obligation de les mettre de côté.

La figure 58 montre quant à elle un profil de charge classique avec quand même une anomalie vers 100s. La batterie se recharge en une dizaine de minutes, ce qui est inférieure à la valeur indiquée sur la documentation constructeur. Ce qui montre bien un dysfonctionnement au niveau de ces batteries.

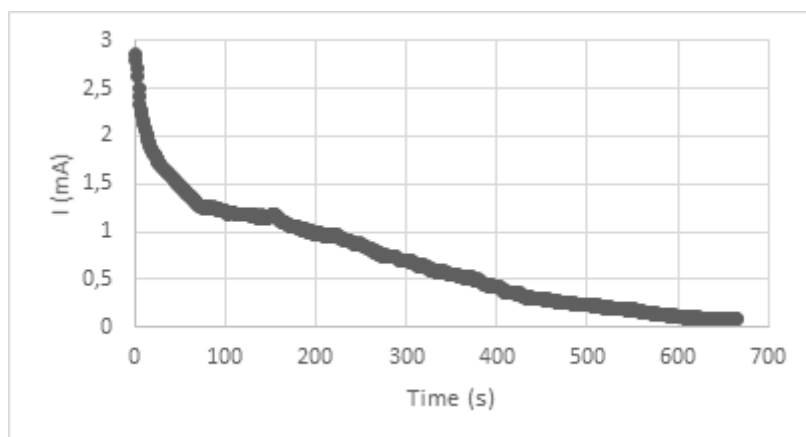


Figure 58: Charge de la batterie type 1

#### 1.2.2.2. Type 2 :

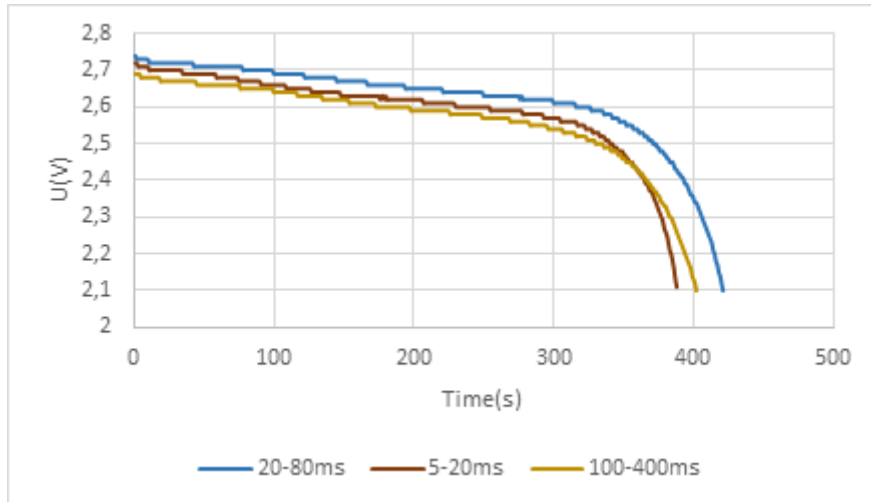
Avec leur épaisseur de 170 $\mu$ m, ce sont sûrement l'une des batteries les plus fines qui existent sur le marché.

Elles ont les caractéristiques suivantes :

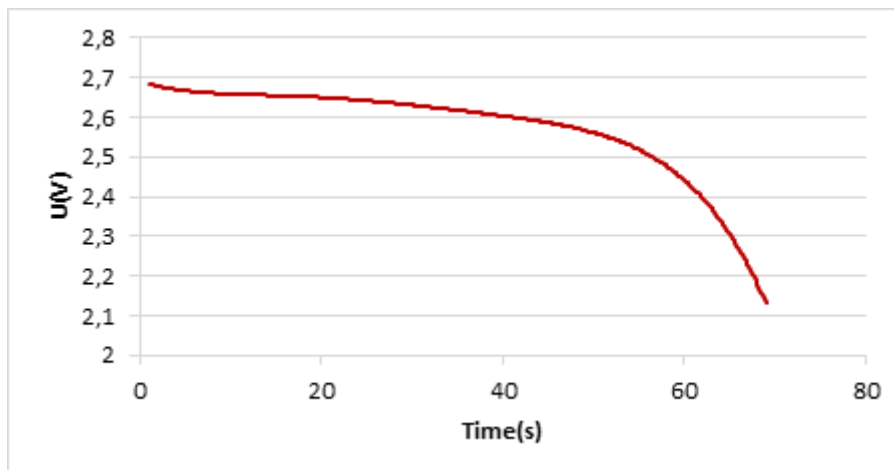
- Nombre de cycles de vie : 10000
- Temps de charge : 10mn pour atteindre 90% de sa capacité totale

- Courant de charge maximum : 10mA
- Méthode de charge : tension continue de 4,1V à 4,15V
- Tension de coupure en décharge : 2,1V

C'est la batterie qui a le nombre de cycles de vie le plus important. Cela compense sa faible capacité car cela donne un grand intervalle de rechargement et donc de temps d'utilisation.



**Figure 59: Décharge 30mA - type 2**



**Figure 60: 30mA continu - batterie type 2**

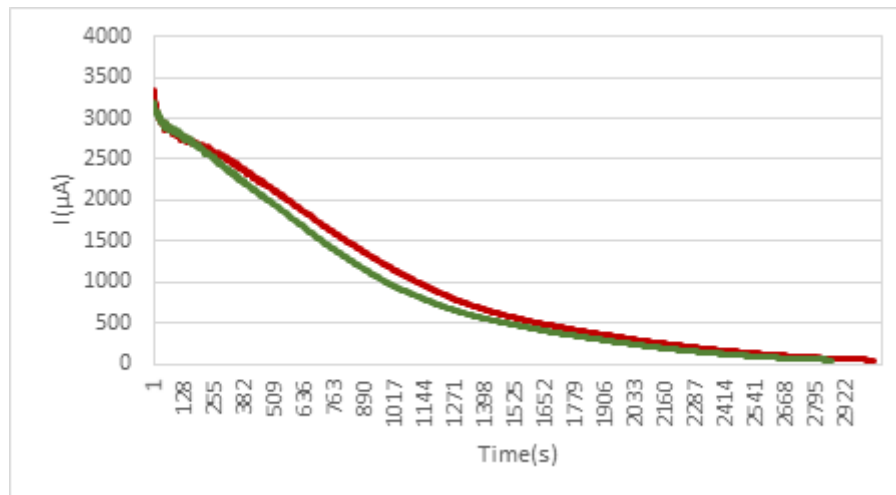


Figure 61: Courbes de charge - batterie type 2

Toutes les courbes de décharge du type2 sont classiques (figure 59 et 60). Même à 30mA, qui est le courant maximum supporté par la batterie, les tensions restent intéressantes à utiliser dans les applications au format carte bancaire.

Les courbes de charge sont également standards (figure 61). La batterie se charge en à peu près 45mn et atteint 90% de sa capacité totale en presque 25mn ce qui reste cohérent par rapport aux 20mn annoncées dans la documentation constructeur.

### 1.2.2.3. Type 3 :

Les caractéristiques de ce type de batteries sont :

- Nombre de cycles de vie :  $\geq 500$
- Courant de charge maximum : 10mA
- Méthode de charge : tension continue de 4,2V
- Tension de coupure en décharge : 3V

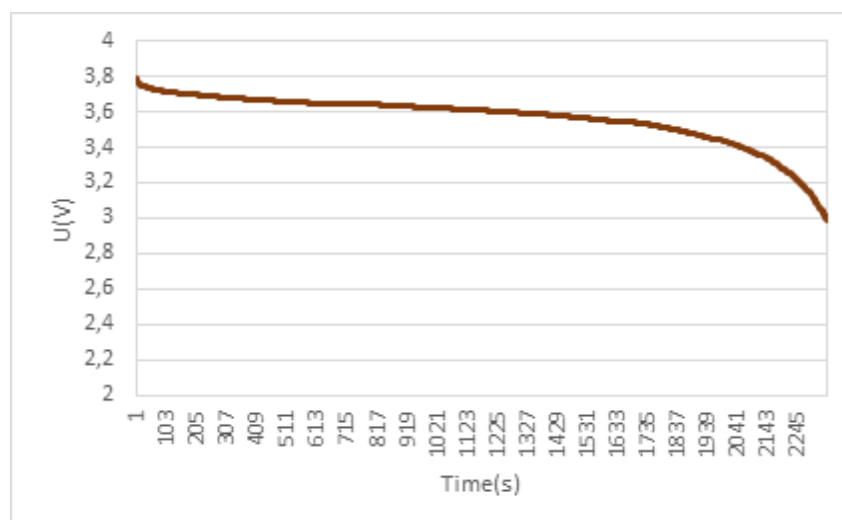


Figure 62: Décharge 10mA continu



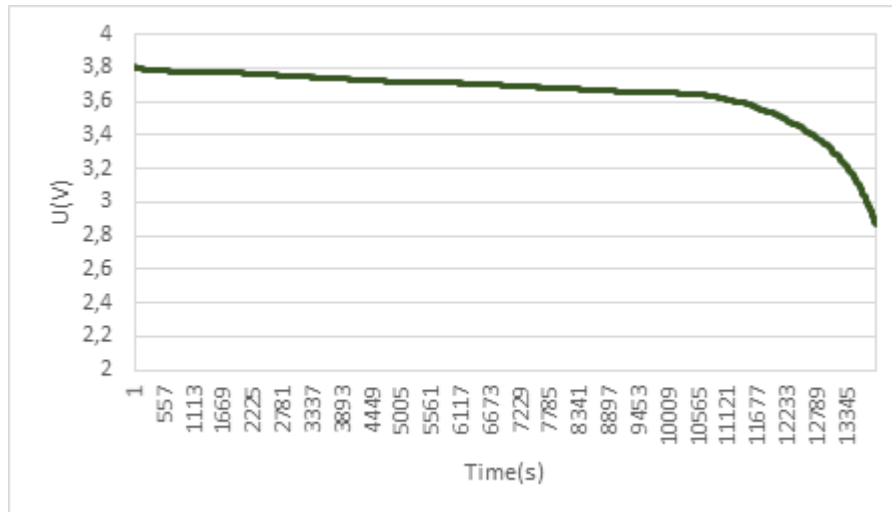


Figure 63: Décharge 10mA - 5/20ms

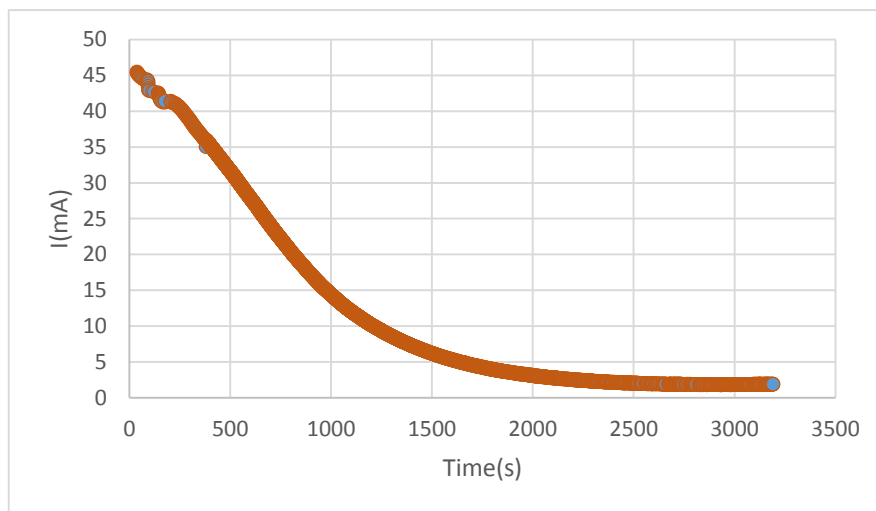


Figure 64: Courbe de charge de la batterie type 3

Les deux courbes de décharge (figure 62 et 63) sont des courbes de décharge classiques. Les trois étapes sont bien visibles et distinctes. La particularité de ces batteries est qu'elles ont une étape 2 assez longue à une valeur de plus de 3,5V et cela pour le courant maximum supporté. Cela les rend particulièrement intéressantes pour plusieurs applicatifs au format carte bancaire.

La courbe de charge (figure 64) est également classique. La batterie se charge complètement en quasiment 1h.

#### 1.2.2.4. Type 4:

Ses caractéristiques sont :

- Nombre de cycles de vie :  $\geq 500$
- Courant de charge maximum : 8mA
- Méthode de charge : tension continue de 4,2V
- Tension de coupure en décharge : 2,75V

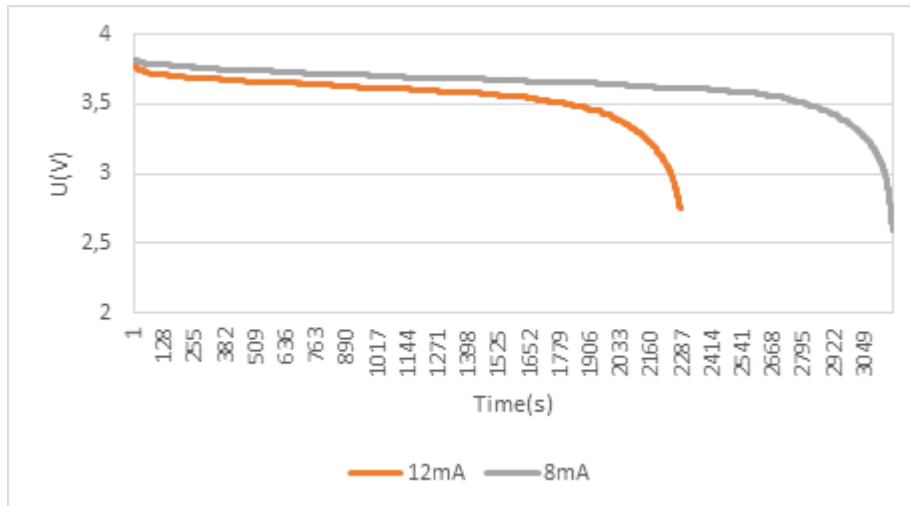


Figure 65: Décharge continue

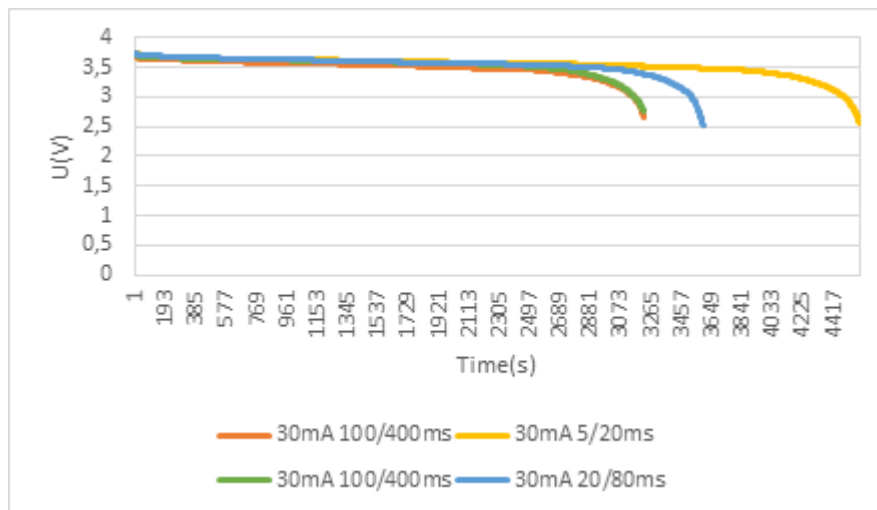


Figure 66: Décharge discontinue

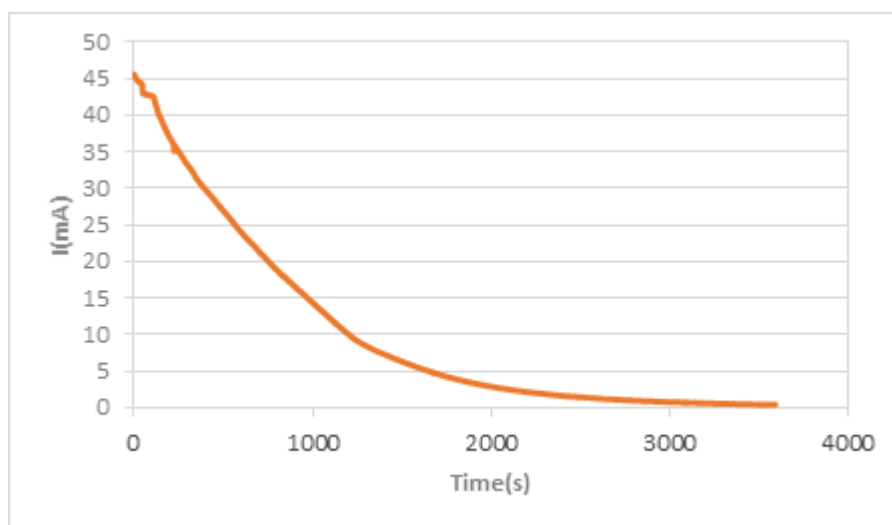


Figure 67: Charge de la batterie type 4

Les courbes de charge et décharge, figure 65 à 67, sont standards. L'étape 2 lors des décharges est très stable à une tension supérieure à 3,5V.

1.2.2.5. Type 5 :

Ces batteries ont des pads qui ressemblent à des feuilles d'aluminium, ce qui les rend très difficiles à manipuler. Les pads se décollent facilement. A cause de cela, peu de tests ont été effectués notamment en charge où aucun test n'a pu être fait. Nous ne pouvons malheureusement conclure sur l'intérêt de ces batteries.

Les caractéristiques de ces batteries sont les suivantes :

- Nombre de cycles de vie : 300
- Courant de charge maximum : 10mA
- Méthode de charge : tension continue de 4,2V
- Tension de coupure en décharge : 2,75V

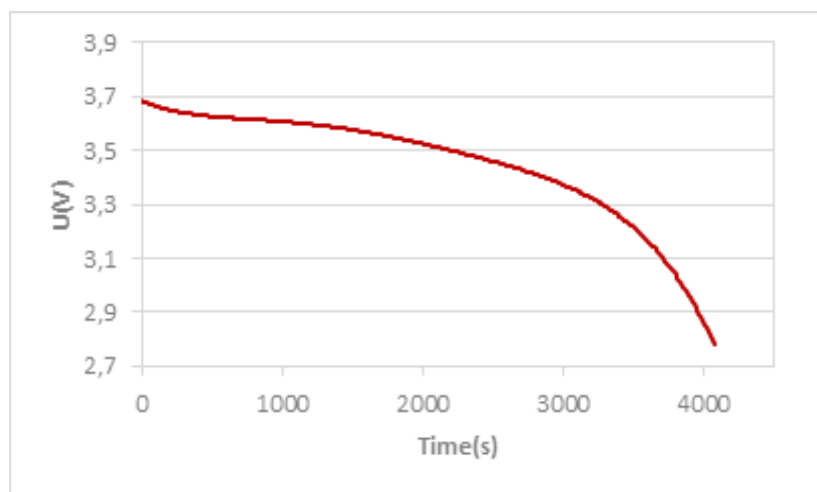


Figure 68: 5mA continu

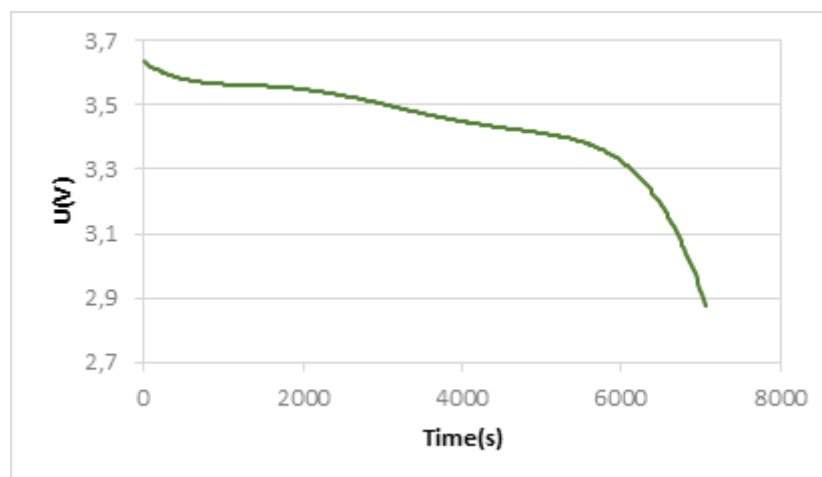


Figure 69: 20mA - 100/400ms

Les batteries ont des performances en décharge intéressantes (figures 68 et 69). La tension de stabilisation reste supérieure à 3V même si cette dernière est moins marquée que pour les batteries type 4 par exemple.

1.2.2.6. Conclusion :

Les deux batteries les plus intéressantes en terme de performance sont le type 3 et le type 4 pour leurs tensions stables à l'étape 2. Le type 2 reste satisfaisant au niveau performances et qui a en plus l'avantage d'avoir un grand nombre de cycles de vie. Les types 1 et 5 sont les moins concluantes, notamment pour des raisons mécaniques.

Malheureusement pour les types 3 et 4, la production pour une utilisation à grande échelle n'était pas envisageable avant plusieurs mois. Alors que pour le type 2, les processus étaient suffisamment avancés pour l'envisager. Ceci va évidemment rentrer en compte dans le choix des batteries.

**2. Conception de systèmes intégrés RFID :**

Un autre élément d'importance dans un système RFID est l'antenne. Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'importance du design de l'antenne dans le bon fonctionnement d'un système RFID. Nous allons développer le cas de figure d'un système communicant à 13,56MHz. Un design d'antenne à cette fréquence a été testé et choisi. Mais malheureusement une fois le produit assemblé, il était impossible de capter le moindre signal provenant du lecteur ce qui veut dire que la fréquence de communication a changé.

Quels facteurs ont pu intervenir dans ce décalage en fréquence ?

Plusieurs éléments doivent être pris en compte :

- Environnement perturbant de la carte au format bancaire,
- Proximité d'éléments perturbateurs : batteries, plan de masse trop près de l'antenne,
- Design inadapté au type de matériau utilisé.

En mesurant la fréquence du système entier, on trouve un décalage de presque 4MHz, au lieu d'être proche des 13,56MHz, nous étions à plus de 17MHz. Nous avons analysé ce phénomène pour le comprendre et déterminer les facteurs l'influençant.

Le design d'antennes utilisé est assez courant, c'est un design composé de spires carrées. Le nombre de spires ou de tours nécessaires est calculé à partir des paramètres géométriques et de certaines propriétés du matériau.

La figure 70 montre le design basique d'une antenne à spires carrées ainsi que ses paramètres géométriques. Plusieurs paramètres de l'antenne peuvent influencer sur la fréquence de résonance. Ceux que nous voulons étudier sont la largeur de l'antenne, le nombre de tours, la largeur des pistes et l'espace entre les pistes. Ces paramètres sont à prendre en compte dans notre étude à condition que l'on considère figés les paramètres d'environnement (matériaux du board, PVC...).

A partir du design initial, 22 nouveaux designs ont été imaginés. Les principaux paramètres qui changent sont le nombre de tours  $N$ , l'épaisseur des pistes  $t$  et la largeur de l'antenne  $a$ .

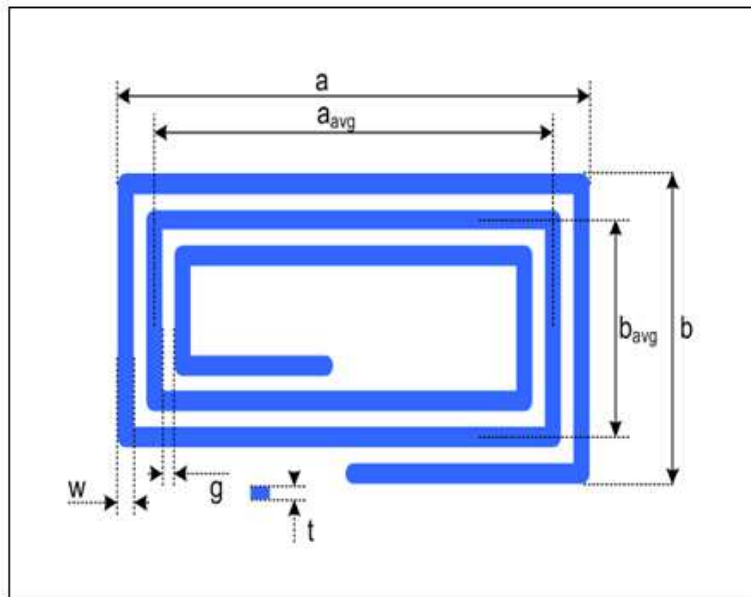


Figure 70: Paramètres géométriques de l'antenne imprimée

La figure 71 regroupe les designs d'antennes qui ont été testés. La partie bleue représente le plan de masse.

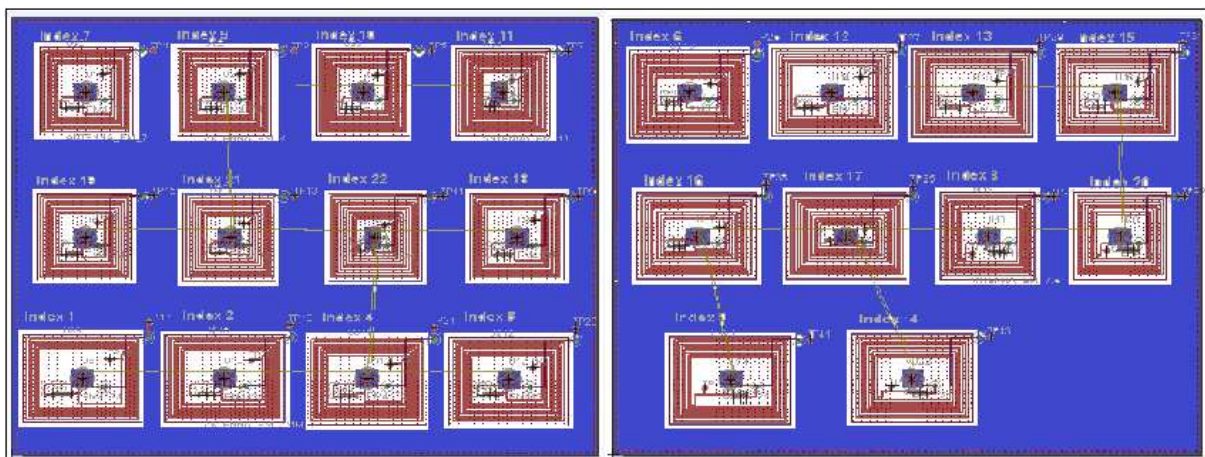


Figure 71: Différents designs d'antennes

Les antennes ont été testées dans différentes configurations. A leur fabrication, elles étaient entourées d'un plan de masse, qui est un plan de cuivre tout autour des antennes. Le but est de mesurer l'influence du plan de masse sur la fréquence de résonance de l'antenne.

Tout d'abord, pour chacune des 22 antennes la fréquence de résonance a été mesurée avec un analyseur d'antennes préalablement découpée. L'antenne est entourée de son plan de masse comme sur le dessin 4 de la figure 72. Ensuite, un des côtés du plan de masse a été découpé et la fréquence mesurée à nouveau. Toujours pour les 22 antennes. Le dessin 3 de la figure 72 montre cette étape. Chaque côté a été découpé jusqu'à avoir l'antenne toute seule (dessin 0 de la figure 72). Et à chaque fois la fréquence est mesurée.

Ceci a donné 5 mesures de fréquence de résonance par antenne. Donc en tout 5 x 22 mesures.

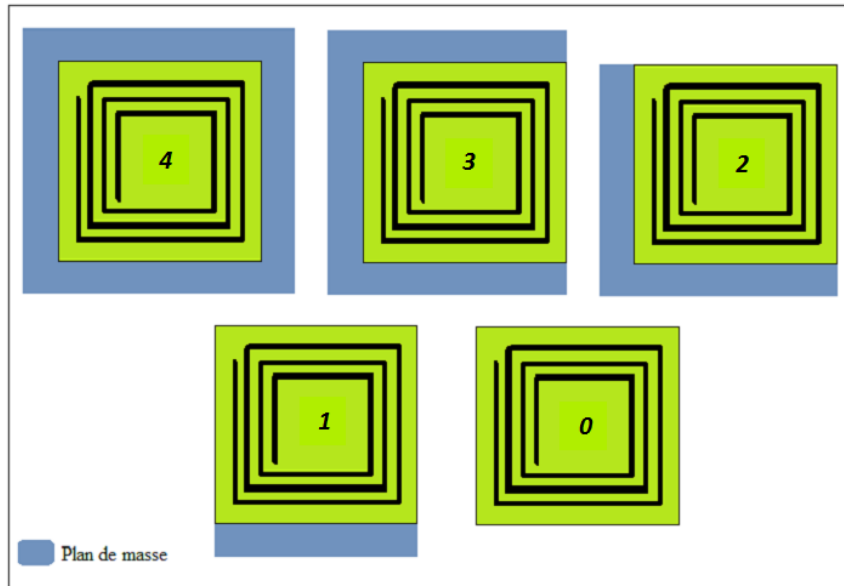


Figure 72: Disposition du plan de masse autour des antennes

Le tableau 5 résume les mesures obtenues, avec les caractéristiques des antennes :

- N : le nombre de spires carrées,
- w : largeur des pistes,
- a : largeur de l'antenne,
- F0 : fréquence de résonance de l'antenne sans plan de masse (antenne 0),
- F1 : fréquence de résonance de l'antenne avec un côté du plan de masse (antenne 1),
- F2 : fréquence de résonance de l'antenne avec deux côtés du plan de masse (antenne 2),
- F3 : fréquence de résonance de l'antenne avec trois côtés du plan de masse (antenne 3),
- F4 : fréquence de résonance de l'antenne entourée du plan de masse (antenne 4).

<i>n#</i>	<i>N</i>	<i>w</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>a</i> (mm)	<i>F4</i> (MHz)	<i>F3</i> (MHz)	<i>F2</i> (MHz)	<i>F1</i> (MHz)	<i>F0</i> (MHz)
<b>1</b>	6	200	18,5	17,911	15,65	15,617	15,588	15,518
<b>2</b>	7	200	18,5	16,103	14,103	14,09	14,061	13,977
<b>3</b>	7,5	200	18,5	15,068	13,305	13,245	13,206	13,113
<b>4</b>	8	200	18,5	14,772	13,042	13,025	13,012	12,927
<b>5</b>	9	200	18,5	13,721	12,122	12,104	12,082	12,05
<b>6</b>	11 + CC	200	18,5	14,802	14,279	14,279	14,279	14,279
<b>7</b>	7	200	14,5	17,728	15,737	15,667	15,594	15,542
<b>8</b>	7,5	200	14,5	16,725	14,845	14,779	14,737	14,686
<b>9</b>	8	200	14,5	16,29	15,333	14,455	14,409	14,366
<b>10</b>	9	200	14,5	15,263	13,659	13,49	13,49	13,482
<b>11</b>	11 + CC	200	14,5	16,596	16,056	16,032	16,0315	16,028
<b>12</b>	6	250	18,5	19,074	16,71	16,65	16,602	16,5
<b>13</b>	7	250	18,5	17,272	15,205	15,24	15,186	15,162
<b>14</b>	7,5	250	18,5	16,164	14,303	14,261	14,222	14,162
<b>15</b>	8	250	18,5	15,94	14,143	14,102	14,062	13,984
<b>16</b>	9	250	18,5	14,942	13,3055	13,26	13,248	13,197
<b>17</b>	11 + CC	250	18,5	16,488	15,993	15,977	15,961	15,9515

18	6	250	14,5	21,082	19,718	18,524	18,452	18,404
19	7	250	14,5	19,096	17,955	16,952	16,888	16,832
20	7,5	250	14,5	18,176	16,185	16,119	16,089	16,05
21	8	250	14,5	17,862	16,826	15,904	15,86	15,816
22	9	250	14,5	16,894	15,132	15,091	15,057	15,016

Tableau 5: Mesures des fréquences de résonance

La remarque générale que l'on peut faire est qu'il y a une différence assez importante entre les fréquences mesurées avec et sans plan de masse. En effet, la différence est en moyenne de 3MHz ce qui constitue un décalage suffisamment important pour que la communication entre le tag et le lecteur ne soit jamais établie.

On peut voir sur la figure 73 une illustration de ce décalage pour le design 16 par exemple.

La deuxième remarque est que de manière générale la fréquence diminue au fur et à mesure que l'on enlève le plan de masse. Ce qui veut dire que la disposition du plan de masse est à prendre en compte dans le design de la partie RFID.

La dernière remarque est que la différence est plus importante entre les design 4 et 3 qu'entre le 3 et le reste des designs. Ceci peut s'expliquer par le fait que le cuivre entourant l'antenne peut jouer le rôle d'une spire ou plus et ainsi augmenter la fréquence de résonance.

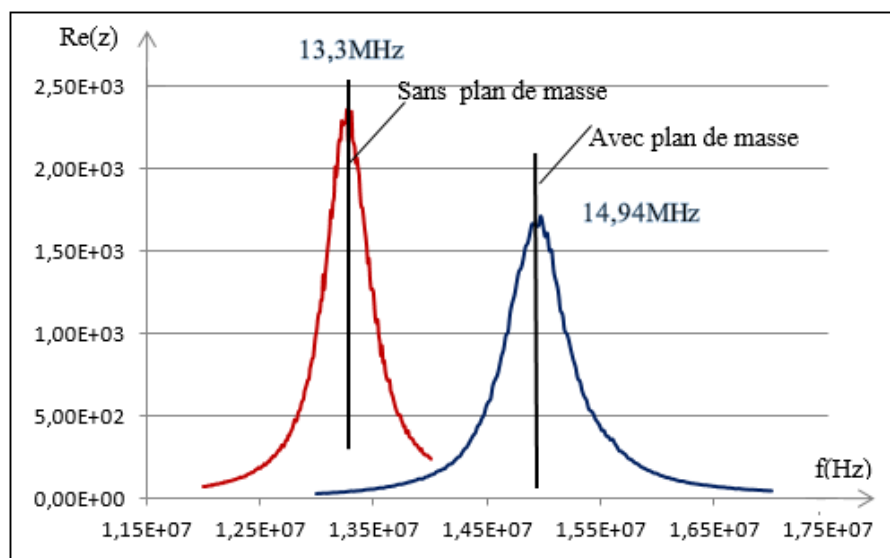


Figure 73: Comparaison entre deux fréquences de résonance pour un design d'antenne

Grâce à ces mesures, nous avons pu choisir un design adéquat pour l'applicatif et mieux comprendre l'importance de l'emplacement de l'antenne par rapport au plan de masse de la carte. La conclusion de nos mesures démontre qu'il faut placer l'antenne dans un coin de la carte pour qu'elle ne soit pas entièrement entourée par le plan de masse.

Pour le choix d'une antenne pour un applicatif communicant à  $13,56MHz$ , le design le plus approprié est le design 2 ou le 10. Même avec un léger décalage par rapport à  $13,56MHz$  (ils sont respectivement à  $14MHz$  et  $13,49MHz$ ), ils restent parfaitement détectables par les lecteurs basses fréquences travaillant à  $13,56MHz$ .

Nos mesures nous ont permis de définir une batterie et un design d'antenne pour un prototype d'application que nous allons introduire dans la section suivante.

### **3. Exemple d'application : la biométrie :**

Nous allons brièvement introduire un applicatif au format carte bancaire pour lequel nous nous sommes servis des études sur les batteries et les antennes pour faire notre choix lors du design.

UINT a eu en charge de développer une carte au format bancaire intégrant un capteur biométrique. Un projet ambitieux qui a abouti et le produit est prêt à être commercialisé après 4 ans de recherche et développement. C'est une nouvelle génération de carte à puce: la première carte à puce multi-applicatives, autonome, avec capteur d'empreintes digitales intégré. Elle a été conçue pour permettre l'identification biométrique du porteur et apporter une sécurité supplémentaire contre les fraudes d'identité et les vols de cartes bancaires par exemple [35].

La carte embarque son propre lecteur biométrique et réalise l'authentification du porteur directement dans la carte. Son utilisation est d'autant plus aisée que la source d'énergie est intégrée à la carte et permet ainsi des centaines de reconnaissances avant d'être rechargée. Cette carte est visible sur la figure 74.



**Figure 74: Carte au format bancaire intégrant un lecteur biométrique**

En plus du lecteur biométrique, la carte embarque une batterie rechargeable et une antenne RFID. La communication se fait à une fréquence de 13,5 MHz. Nous nous trouvons en champ proche la puce de l'antenne est alimentée par le champ du lecteur. Le choix de l'antenne s'est porté sur le design 9. Il fonctionne à une fréquence de 13,5MHz et est reconnu par le lecteur.

La batterie a pour rôle majeur d'alimenter le capteur ainsi que le microcontrôleur qui le pilote et qui a besoin de beaucoup de ressources afin d'effectuer les calculs et algorithmes nécessaires à la reconnaissance d'empreintes digitales. Les pics de courant que requièrent ce genre de calculs peut atteindre 100mA pendant quelques secondes le temps d'effectuer la reconnaissance biométrique. Il est donc déjà inenvisageable d'utiliser une batterie primaire. Le plus adapté est une batterie rechargeable. Les tests effectués sur les batteries nous ont permis de choisir le type 2 pour cet applicatif. Il a le grand avantage d'avoir un grand nombre de cycle de recharge (10000) et de se recharger rapidement. Il a aussi un processus de fabrication avancé par rapport aux autres concurrents.



**4. Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre les études effectuées sur deux types de composants : les batteries et les antennes RFID.

Les mesures obtenues nous ont permis de faire un premier choix de design pour un applicatif donné.

Ces mesures vont également nous servir lors de la conception de la serrure pour VAE que nous allons détailler dans le prochain chapitre.

*Chapitre 4 :  
Conception et  
réalisation d'un  
prototype de tag actif  
au format carte  
bancaire*

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la partie conception de la clé électronique pour la serrure vélo qui est l'objet étudié dans le cadre de cette thèse industrielle.

Nous avons investigué deux solutions, une première qui propose de garder le lecteur d'origine et de ne concevoir que le tag et une deuxième qui propose un nouveau design à la fois pour le lecteur et pour le tag.

Nous avons décidé dans un premier temps de garder le lecteur d'origine. Le client ne voulait pas changer son parc de vélos ce qui impliquait de garder les lecteurs actuels. Ces lecteurs fonctionnent à une fréquence de 125kHz. Cette fréquence comme nous l'avons vu auparavant ne permet de communiquer qu'à des petites distances de l'ordre du centimètre.

La figure 75 montre la clé électronique existante. L'utilisateur dispose d'un badge qu'il présente devant le lecteur, à l'instar d'un pass Navigo, pour déverrouiller la serrure et pouvoir démarrer le moteur. Il la repasse à nouveau quand il veut verrouiller la serrure et parquer le vélo.

Ces clés n'embarquent pas de source d'énergie étant donné la fréquence de fonctionnement, le circuit est directement alimenté par le champ magnétique produit en s'approchant du lecteur.

Le cahier des charges définit par le client énonce les contraintes suivantes :

- Garder le lecteur existant qui fonctionne à 125kHz,
- Avoir une distance de fonctionnement d'un mètre,
- Avoir une clé au format carte bancaire donc aux normes ISO 7810,
- Garantir le fonctionnement de la clé pour une durée minimale d'un an,
- Eviter si possible de sortir la clé de la poche ou du sac,
- Et finalement avoir un prix raisonnable, moins de 2€ le tag en coût de fabrication.



Figure 75: Clés existantes pour verrouiller/déverrouiller un vélo électrique

### **1. Première solution :**

La première solution que l'on a investiguée est construite autour du lecteur d'origine fonctionnant à 125kHz et consiste à améliorer le tag afin qu'il émette à une plus grande distance.

#### **1-1. Les étapes de conception:**

A 125kHz, le tag utilisé est un tag passif télé-alimenté par le lecteur. Il ne peut pas fonctionner à plus de quelques centimètres à cause des propriétés du champ magnétique comme nous l'avons expliqué dans le premier chapitre.

Le challenge ici est d'arriver à augmenter la distance de détection du tag, sans changer de fréquence. Le seul moyen est d'augmenter la puissance d'émission du tag. Ceci implique d'utiliser une source d'énergie propre. Une solution est de concevoir un tag actif en lieu et place du tag passif.

En investiguant les solutions et les produits qui existent sur le marché, nous avons trouvé un récepteur qui fonctionne à très basses fréquences (de 15 à 150kHz).

Le principe de fonctionnement du système, visible sur la figure 76, est le suivant :

Dès que le récepteur détecte le signal du lecteur, il génère une interruption et vient réveiller le système de transmission. Le système de transmission est constitué d'un microcontrôleur qui génère une PWM avec le numéro d'identification de la carte. La PWM est une modulation par largeur d'impulsions qui permet de générer un signal logique (valant 0 ou 1), à fréquence fixe mais dont le rapport cyclique est contrôlé numériquement. La moyenne du signal de sortie est égale au rapport cyclique. Le signal est ensuite amplifié et transmis au lecteur.

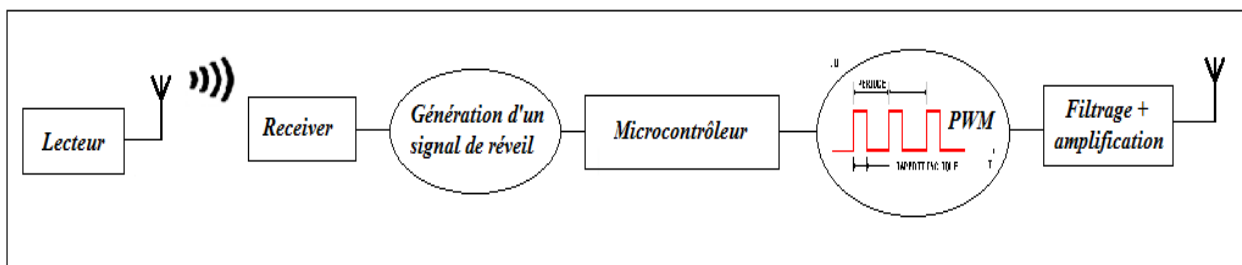


Figure 76: Schéma du principe de fonctionnement du système à 125kHz

### 1-2. Les étapes de réalisation :

Une fois le circuit conçu, nous pouvons passer à l'étape de réalisation. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, une carte est constituée de plusieurs couches (figure 3). Ces couches vont être assemblées en plusieurs étapes.

La première étape est la fabrication des flexs. Elle requiert trois semaines et permet d'avoir des flexs avec les pistes imprimées ainsi que les empreintes des composants.

Après la fabrication des flexs, vient l'étape d'hybridation où les composants sont montés sur les empreintes réservées à cet effet. En amont, un dossier d'hybridation est préparé avec toutes les consignes de montage des composants, la liste des composants et leur nombre exact ainsi que des tests simples qui peuvent être effectués afin de vérifier que tout est monté convenablement. Le Globtop est une mince couche de résine qui protège les composants en puce nue et qui remplace le boîtier. On vient la poser sur les composants une fois qu'ils sont montés sur le flex.

Le flex avec les composants et le gloptop est appelé board.

Finalement une couche de PVC, qui est une matière plastique d'usage courant, vient recouvrir le board de part et d'autre. Cette étape est généralement appelée lamination.

Afin de générer les fichiers nécessaires à la fabrication du flex et au montage des composants, on utilise un logiciel de routage. Le routage est le fait de matérialiser les liaisons existantes entre les composants sur le schéma électronique en des pistes de cuivre en utilisant un logiciel. Le logiciel que nous avons utilisé durant cette thèse est le logiciel EAGLE. C'est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur de circuits imprimés. Il comprend un éditeur de 'layout', de 'routage', un 'routeur automatique' et une librairie extensible de composants.

Le routage doit respecter certaines contraintes :

- Les contraintes de base : le routage est réalisé sur les deux couches de part et d'autre du circuit imprimé. Pour différencier ces deux couches dans le logiciel, celle côté composants est symbolisée en rouge (c'est la face recto de la carte) et l'autre en bleue (la face verso). Le but étant que deux pistes de cuivre ne se croisent jamais pour éviter tout court-circuit.
- Les contraintes du design : les batteries prennent une place non négligeable et réduisent la zone de routage, il faut les placer correctement de façon à optimiser la surface restante. Les éléments les plus rigides sont positionnés sur les coins pour minimiser les effets de torsion de la carte puisque le circuit est flexible. La position du quartz est aussi imposée, il doit en fait être le plus proche possible du transceiver (émetteur/récepteur) pour éviter les parasites qui peuvent perturber son fonctionnement. Les pistes qui sont assez proches, doivent être suffisamment larges pour assurer une bonne liaison entre les composants et pas trop pour ne pas créer de courts-circuits ou de parasites.
- Les contraintes de l'intégrateur : certaines fixations nécessaires au maintien du board lors d'étapes de fabrication sont imposées. Il faut les prendre compte lors du routage et respecter toutes les distances définies pour faciliter la fabrication et l'intégration des composants par la suite.
- Autres contraintes : la plupart des composants sont sous forme de puce, c'est à dire qu'ils ont des empreintes aux dimensions bien spécifiques. Comme la bibliothèque d'Eagle ne contient pas tous les composants, il a fallu en créer notamment pour le transceiver, le microcontrôleur, les batteries, le quartz et le transistor.

Une fois les empreintes des composants créées et toutes les liaisons faites le circuit final est semblable à celui de la figure 77 :

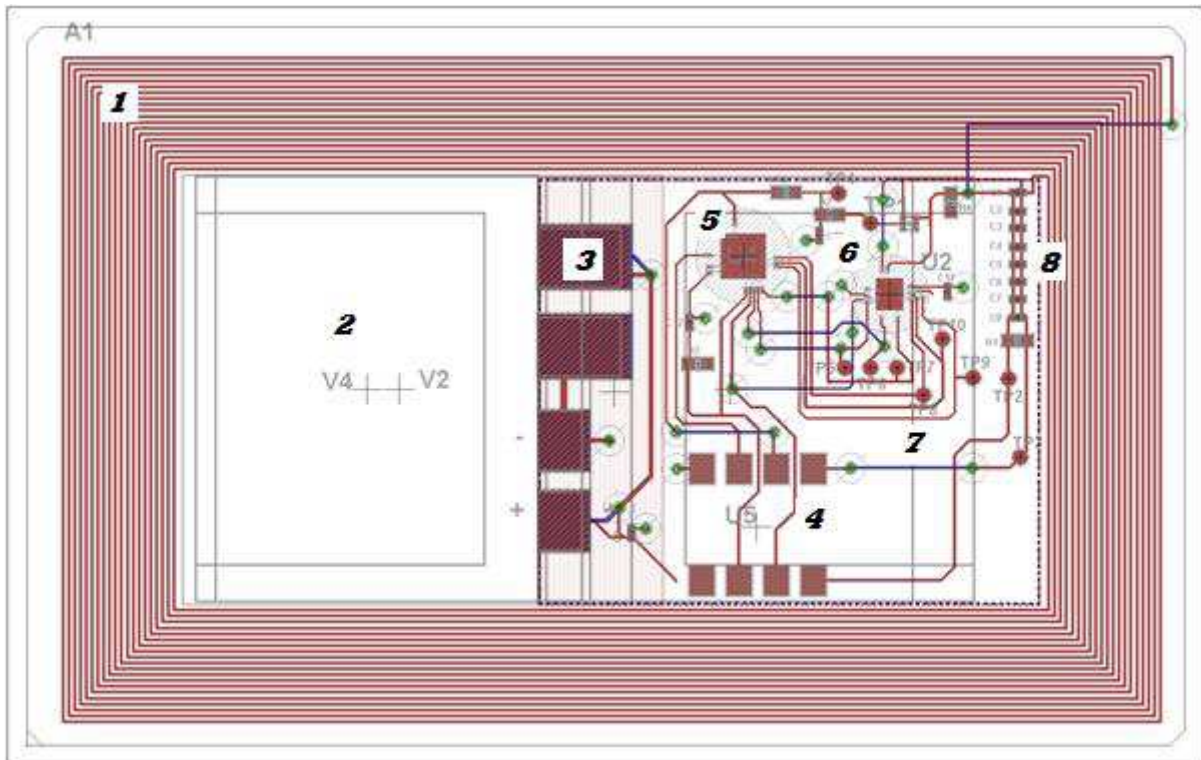


Figure 77: Routage du circuit

En gris, c'est la forme et l'emplacement des composants, V2 et V4 représentent l'emplacement des batteries. En rouge et en bleu, ce sont toutes les pistes et les empreintes sur lesquelles vont être collés ou soudés les composants. Le rouge représente la face supérieure de la carte et le bleu la face inférieure. Les plots en vert sont des vias qui permettent de faire la connexion entre les deux couches.

Les différents éléments que l'on retrouve sur le design sont :

- 1- L'empreinte de l'antenne,
- 2- L'emplacement des batteries. Tout ce qui est en gris délimite les surfaces des composants,
- 3- Les empreintes des composants, ici ce sont les plots des batteries,
- 4- Les plots de programmation nécessaires pour charger le programme du microcontrôleur,
- 5- Le microcontrôleur,
- 6- La partie transmission du signal,
- 7- Les plots de tests,
- 8- Les éléments passifs, essentiellement des résistances et des condensateurs.

Une fois le circuit imprimé ou le PCB prêt, on peut passer à l'étape d'hybridation. Tous les circuits et les composants sont envoyés pour être assemblés.



Figure 78: Circuit obtenu après hybridation

La figure 78 montre le circuit obtenu après le montage des composants. On voit bien les globtopps (ronds noirs) qui protègent le microcontrôleur et l'émetteur. Une fois le montage effectué, le circuit est prêt à être testé.

### 1-3. Tests expérimentaux:

Pour les tests préliminaires, le tag est alimenté avec une alimentation externe. Nous allons quantifier les distances de fonctionnement du système entre le tag et le lecteur du vélo chinois.

Nous avons effectué ces tests en intérieur.

En réception, le récepteur détecte le signal à une distance d'environ 80-90cm

En émission, nous avons remarqué que le lecteur ne captait aucun signal. Ceci peut être lié au fait que la puissance que fournit le tag couplée à celle que peut fournir le lecteur actuel est insuffisante pour la transmission des données à la distance voulue. Une des raisons possibles est que le facteur de couplage entre les deux antennes est trop faible.

A une fréquence aussi basse que 125kHz, les performances en terme de puissance et de distance sont limitées.

Regardons de peu plus près le facteur de couplage, il est illustré sur la figure 79 et son calcul est donné par l'équation 4.1.

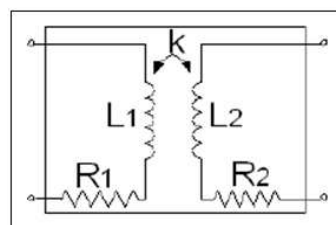


Figure 79: Facteur de couplage

La valeur du facteur de couplage  $k$  est donné par le calcul de l'équation 4.1

$$k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (\text{Eq 4.1})$$

Le facteur de couplage  $k$  dépend de l'inductance mutuelle entre le primaire et le secondaire du transformateur (rappelons qu'à cette fréquence nous sommes en présence d'un fonctionnement identique à celui d'un transformateur). L'inductance mutuelle est proportionnelle à l'inverse de la distance entre les deux bobines. Plus la distance est petite plus l'inductance est grande et le facteur de couplage également.

Le facteur de couplage diminue avec la distance et la puissance également.

La valeur de l'inductance de l'antenne joue également un rôle important, elle est donnée par les équations 4.3 à 4.9. Les paramètres géométriques intervenant dans les calculs sont schématisés sur la figure 80.

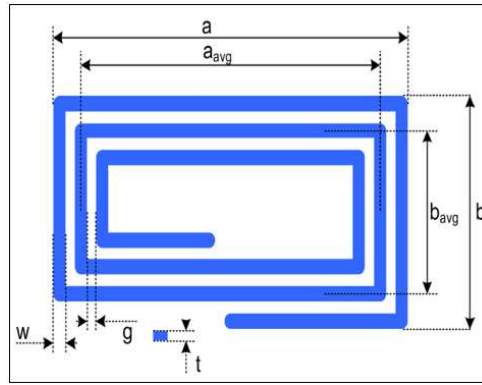


Figure 80: Géométrie d'une antenne basse fréquence

$$L = N^{1,8} \frac{\mu_0}{\pi} (x_1 + x_2 - x_3 + x_4) \quad (\text{Eq 4.3})$$

Avec 
$$x_1 = a_{avg} \ln \left[ \frac{2a_{avg}b_{avg}}{d(a_{avg} + \sqrt{a_{avg}^2 + b_{avg}^2})} \right] \quad (\text{Eq 4.4})$$

et 
$$x_2 = b_{avg} \ln \left[ \frac{2a_{avg}b_{avg}}{d(b_{avg} + \sqrt{a_{avg}^2 + b_{avg}^2})} \right] \quad (\text{Eq 4.5})$$

et 
$$x_3 = 2 \left( a_{avg} + b_{avg} - \sqrt{a_{avg}^2 + b_{avg}^2} \right) \quad (\text{Eq 4.6})$$

et 
$$x_4 = \frac{a_{avg} + b_{avg}}{4} \quad (\text{Eq 4.7})$$

et 
$$d = \frac{2(t+w)}{\pi} \quad (\text{Eq 4.8})$$



et  $a_{avg} = a - N(g + w)$  (Eq 4.9)

Afin de fournir une puissance suffisante, celle-ci doit être de l'ordre du mH (données constructeur) alors qu'en réalité la valeur calculée est de l'ordre du  $\mu$ H.

La fréquence de 125kHz ne permet pas d'avoir la distance voulue d'un mètre avec un design au format carte bancaire. Il faut soit changer le design de l'antenne et celui du lecteur soit travailler à une autre fréquence, soit les deux.

Nous avons donc conçu un second circuit fonctionnant à une fréquence autre que 125kHz afin de surmonter le verrou identifié précédemment.

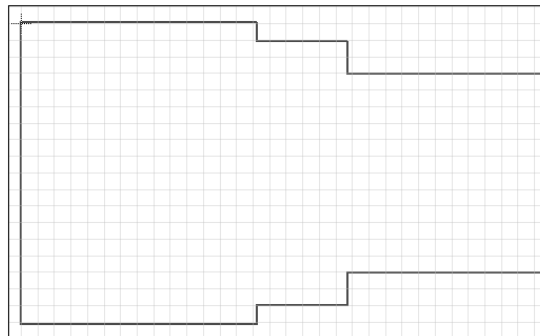
## **2. Deuxième solution :**

### **2-1. Les étapes de conception :**

Nous allons décrire à présent les étapes de conception, en allant du choix des composants jusqu'à l'étape de programmation pour le tag et pour le lecteur.

Nous nous sommes dirigés vers des produits spécialement conçus pour les applicatifs radios très basse consommation. La hauteur des composants n'est problématique que pour le tag pour avoir une carte aux normes ISO. Pour le lecteur, ce n'est pas le cas étant donné que le format carte bancaire n'est pas imposé. Nous pouvons choisir des composants au format boîtier.

La seule véritable contrainte au niveau du lecteur est une contrainte de surface imposée par le client qui nous a demandé de garder le format de l'ancien lecteur.



**Figure 81: Dimensions du lecteur chinois**

Le substrat du lecteur est encastré dans un cylindre en plastique qui fait 45mm de long et 25mm de diamètre. On peut voir la forme générale du substrat du lecteur sur la figure 81.

Pour la réalisation du tag, nous avons eu besoin d'une source d'alimentation (batteries), d'un émetteur/récepteur, un microcontrôleur et de passifs.

Après avoir mis de côté la solution entièrement basé sur le 125kHz, à cause de la puissance insuffisante en transmission, nous avons investigué les différentes pistes qui se présentaient à nous. Le tableau 6 résume les solutions présentes sur le marché lorsque nous avons effectué notre étude.

<i>Solution</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Système basé sur une émission et une réception en 27MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distance de communication d'1m</li> <li>- Peu de composants</li> <li>- Consommation intéressante en mode émission/réception (de l'ordre de 5mA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consommation importante en mode écoute</li> </ul>
Système basé sur une réception en 125KHz et une émission en 2,45GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus grande portée (jusqu'à 2,5m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus de composants</li> <li>- 2 designs d'antennes différents sur les 2 supports</li> <li>- Consommation élevée en émission/réception (de l'ordre de 20mA)</li> </ul>
Système basé sur une réception en 125KHz et une émission en 433MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solution « tout en un » qui intègre l'émetteur, le récepteur et le microcontrôleur</li> <li>- Consommation intéressante en réception (1,6µA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consommation importante en émission (10mA)</li> <li>- 2 designs d'antennes différents</li> </ul>
Tag passif en 868MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Portée d'1m</li> <li>- Tag télé-alimenté</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lecteur trop coûteux</li> </ul>
Système basé sur une émission et réception en 2,45GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Même design pour le tag et le lecteur</li> <li>- Grande distance de communication</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distances pouvant être trop importantes à cette fréquence (jusqu'à 100m)</li> </ul>

**Tableau 6: Liste des solutions envisagées**

Les critères de choix essentiels sur lesquels nous nous sommes basés sont :

- Le prix des composants et leur disponibilité notamment par rapport à la livraison des composants sous forme de puce nue. En effet, nous avons un calendrier et une date de livraison d'un premier prototype à fournir au client au bout de 12 semaines. Ce facteur temps est un facteur important et est décisif dans le choix de certains composants.
- La consommation, étant donné que le produit doit durer un an, les produits qui consomment 20mA sont à éviter. Les batteries utilisées n'ont qu'une capacité de 20mAh (25mAh au maximum) et c'est insuffisant pour garantir le fonctionnement d'un an. Une batterie

rechargeable peut être la solution, néanmoins le coût imposé pour le tag rend son utilisation inenvisageable.

- La distance de communication d'un mètre.

La solution qui propose un tag passif à 868MHz est très avantageuse en ce qui concerne le tag car il n'y a pas beaucoup de composants à prendre en compte dans le design et aucun problème par rapport à l'alimentation car le tag est auto-alimenté, malheureusement elle est très coûteuse en ce qui concerne le lecteur. En effet, les lecteurs fonctionnant à cette fréquence et se trouvant sur le marché peuvent atteindre 200€ par lecteur.

Les deux premières solutions présentent une consommation trop importante pour la durée de vie d'un an du produit que l'on souhaiterait.

La solution basée sur une émission à 433MHz et une réception en 125kHz est très intéressante, d'ailleurs les clés des voitures sans contact fonctionnent sur ce principe. Malheureusement le délai des livraisons en puce nue pour le tag est supérieur à 16 semaines. Le calendrier ne sera pas respecté. Nous avons donc choisi de ne pas aller plus loin dans l'investigation de cette solution.

Nous avons adopté la solution avec réception et émission à 2,45GHz. Cette fréquence est très intéressante car elle est autorisée partout dans le monde et notamment en Chine.

Nous allons aborder en détails les étapes de conception et de réalisation du tag et du lecteur.

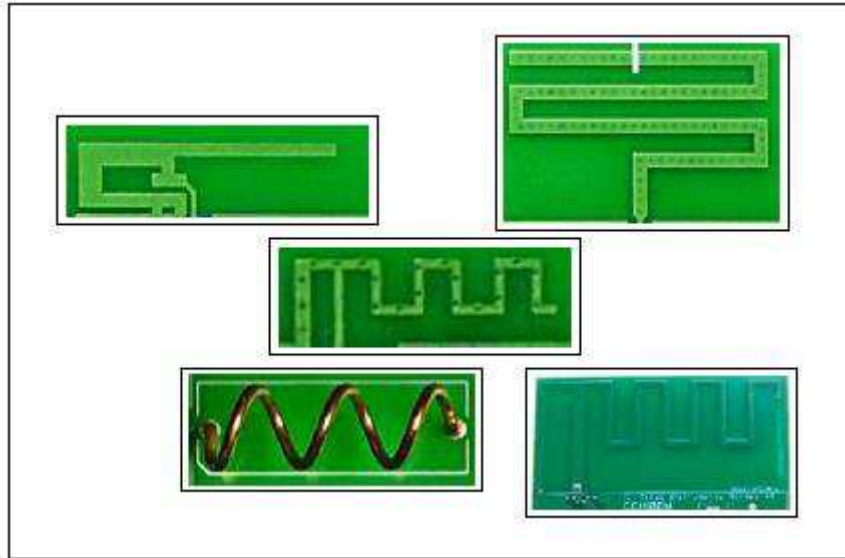
### 2-1-1. Conception du tag :

#### 2-1-1-1. Choix des composants :

##### a) L'antenne :

Plusieurs designs d'antennes existent pour les applications à 2,45GHz comme on peut le voir sur la figure 82.

Même si elles fonctionnent toutes à la fréquence de 2,45GHz, on utilise l'une ou l'autre selon le substrat et la place disponible sur le substrat mais également selon le rayonnement de l'antenne et son gain.



**Figure 82: Différents designs d'antennes pour PCB à la fréquence 2,45GHz**

Pour le tag, notre choix s'est porté sur une antenne dite dipôle plié (figure 83). D'après la documentation du composant qui sert d'émetteur et de récepteur c'est la géométrie la plus fiable avec ce type de composants. De plus grâce à sa géométrie qui lui donne quasiment une forme de boucle, à la résonance, elle aura une impédance 4 fois plus importante qu'une dipôle normale et donc une plus grande puissance [36]. Elle est caractérisée par une impédance différentielle réelle de 200 Ohms.



**Figure 83: Antenne du tag**

Nous avons simulé l'antenne en utilisant le logiciel de simulation ADS. En programmant les paramètres géométriques de l'antenne, nous pouvons visualiser sa fréquence de résonance et son diagramme de rayonnement.

Nous obtenons les résultats visibles sur la figure 84.

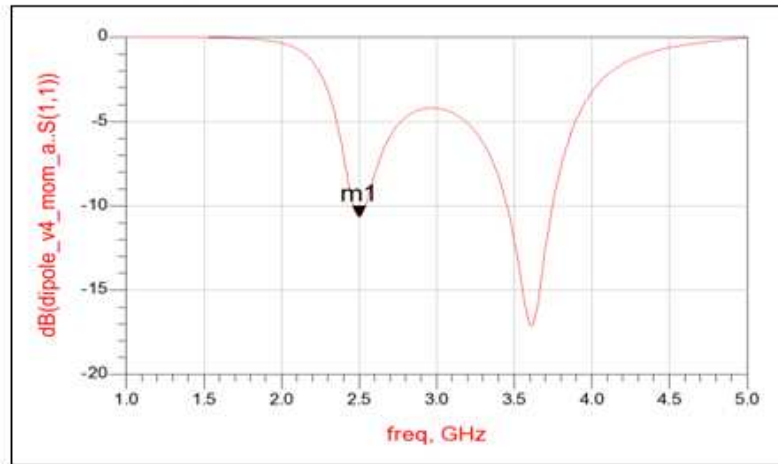


Figure 84: Fréquence de résonance de l'antenne dipôle

Son diagramme de rayonnement est celui de la figure 85.

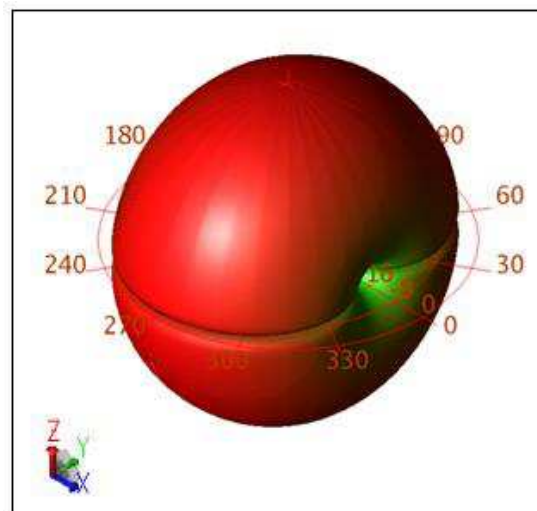


Figure 85: Diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle

En ce qui concerne la fréquence de résonance, on en obtient deux : une à quasiment 2,5GHz donc à la fréquence à laquelle nous souhaitons l'utiliser et une deuxième à 3,6GHz. Cela arrive généralement lorsque l'antenne est adaptée afin d'élargir la bande d'utilisation. Et nous savons que celle choisie est adaptée à  $200\Omega$  afin d'être directement reliée au transceiver.

Le diagramme quant à lui a la forme d'un « donut » et montre que l'antenne est omnidirectionnelle.

Le gain obtenu est de 2,3dBi.

D'après le constructeur, l'antenne nécessaire doit avoir un gain proche de 2,1dBi. Notre simulation est donc cohérente.

b) Le transceiver :

Un transceiver est à la fois un émetteur et un récepteur. La solution sur laquelle notre choix s'est arrêté est avantageuse essentiellement parce que l'on aura quasiment le même design pour le tag et le lecteur

mais aussi pour la distance de communication pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres et enfin pour la disponibilité des composants rapidement au format puce nue. C'est un modèle spécialement conçu pour les applications sans fil basse consommation fonctionnant dans la bande de fréquence ISM 2,400-2,4835GHz.

Une antenne avec une impédance de 200 Ohms peut directement lui être reliée. Si l'impédance diffère, l'utilisation d'un circuit d'adaptation est nécessaire.

La conception du transceiver impose l'utilisation de plusieurs éléments passifs, essentiellement des condensateurs de découplage. La figure 86 illustre cette configuration.

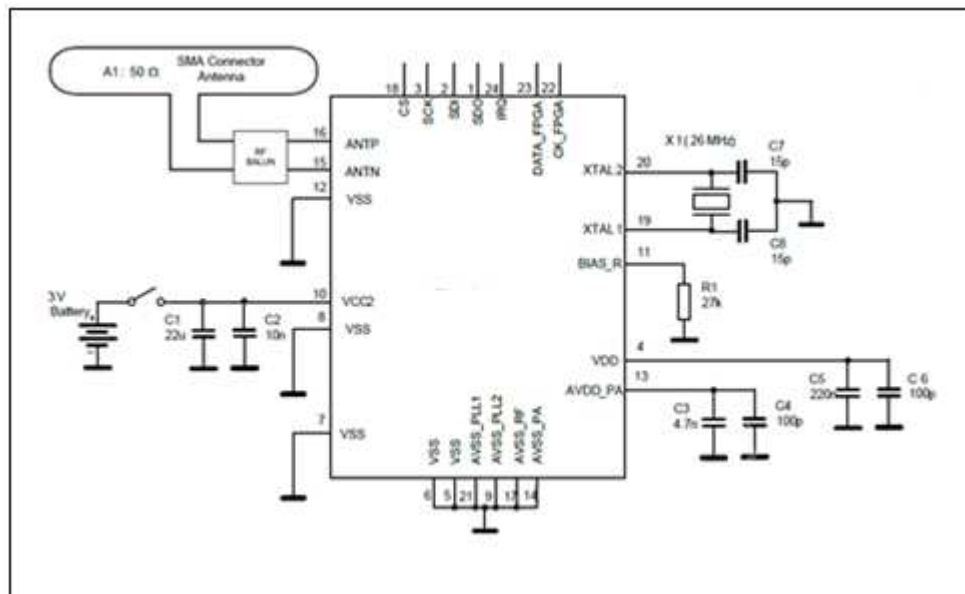


Figure 86: Configuration optimale pour le transceiver

Il est connecté directement à l'antenne d'une part et au microcontrôleur d'une autre part via un bus SPI (Serial Peripheral Interface) qui assure une liaison série entre les deux composants. Les circuits communiquent selon un schéma maître-esclave, où le maître s'occupe totalement de la communication.

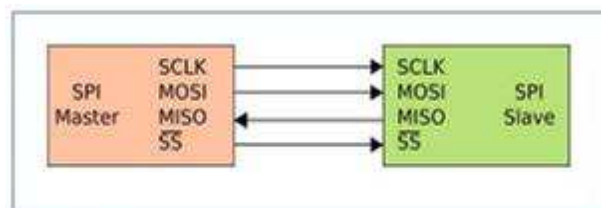


Figure 87: Illustration d'une communication via un bus SPI

Ce bus utilise quatre entrées/sorties logiques, la figure 87 montre les relations entre ces différents éléments :

- L'horloge pour la synchronisation de l'envoi/réception des données générée par le maître,
- Envoi des données,
- Réception des données (parfois l'envoi et la réception sont sur une unique broche),

→ Un « chip select » qui sélectionne l'esclave avec qui la communication va se faire.

c) Le microcontrôleur :

Il constitue le cœur du système. Il contient le programme qui pilote le tag.

Plusieurs types d'entrées/sorties sont utilisés :

- Les entrées d'alimentation,
- Les entrées/sorties numériques,
- Les entrées analogiques,
- D'autres entrées/sorties de type horloge, génération de tension...

Il dispose de plusieurs modes de fonctionnement dont certains sont à très basses consommations. Le but est de faire travailler le microcontrôleur dans différents modes pour optimiser l'utilisation des batteries et minimiser la consommation.

Les différents modes du microcontrôleur sont :

- Un mode actif où le CPU et tous les périphériques sont actifs et prêts à être utilisés. C'est le mode par défaut après toute remise à zéro du système. Dans ce mode, la consommation est en moyenne de 3,5 $\mu$ A à 8kHz et peut aller jusqu'à 1mA à 15MHz.
- Un mode stand-by où l'horloge de le CPU est désactivée ainsi que la mémoire flash. Les périphériques restent actifs. On peut sortir de ce mode grâce à une instruction spécifique ou une interruption. La consommation varie entre 2,3 $\mu$ A à 32KHz et 72 $\mu$ A à 15MHz.
- Un mode sleep où tous les oscillateurs sont désactivés sauf celui utilisé par le registre en charge du réveil (le sleep counter). Le CPU, et tous les périphériques sont également désactivés. La consommation est en moyenne de 1,9 $\mu$ A.
- Un mode power-down où tout est désactivé. Il consomme 0,45 $\mu$ A.

d) Les passifs :

Essentiellement des résistances et des condensateurs. Ils sont là pour calibrer et protéger les autres composants.

e) Les plots de programmation :

Au nombre de cinq, ils servent à programmer le microcontrôleur. Ils seront décrits un peu plus en détails dans la partie qui traite de la programmation.

f) Les plots de test :

Quelques plots de test sont à prévoir pour pouvoir vérifier les tensions et le bon fonctionnement du système une fois les composants montés.

g) Les batteries :

Afin de déterminer le nombre de batteries nécessaires ainsi que leur capacité, une estimation de la consommation du circuit est nécessaire.

Qu'en est-il de la consommation réelle du tag dans notre applicatif ?

Le transceiver dispose de plusieurs modes d'émission. A puissance maximale, il consomme à peu près 16 mA alors qu'à puissance minimale, le tag ne consomme que 8,8 mA. Cette notion de puissance a un impact direct sur la distance de détection. La puissance est paramétrable via le firmware, qui est le programme du microcontrôleur qui contient toutes les instructions d'exécution ainsi que leur déroulement.

RF Power (RFPwr[2:0])	Output power	DC Current consumption
111	+2 dBm	15.9 mA
110	0 dBm	13.5 mA
101	-3 dBm	12.2 mA
100	-6 dBm	10.9 mA
011	-9 dBm	10.0 mA
010	-12 dBm	9.5 mA
001	-16 dBm	9.0 mA
000	-20 dBm	8.8 mA

**Tableau 7: Consommation du transceiver en fonction du mode de puissance**

Comme le montre le tableau 7, le transceiver dispose de 8 modes d'émission. On peut choisir le mode en sélectionnant la valeur du registre correspondante dans la première colonne du tableau. Chaque puissance d'émission correspond également à une consommation.

Il dispose d'un mode « standby » où la consommation est réduite, tout comme le microcontrôleur, l'utilisation de ces différents modes permet de minimiser au maximum la consommation et de garantir la durée de vie d'un an de la carte. Et comme pour le microcontrôleur, ce paramètre est modifiable via le firmware.

Nous nous sommes basés sur une étude faite par le constructeur pour déterminer la capacité nécessaire pour garantir un an d'utilisation du tag. Nous avons besoin d'une capacité d'au minimum 40mAh. Avec les batteries primaires dont nous disposons actuellement, cela implique l'utilisation de deux batteries de type 1 et de type 3 présentées dans le 3<sup>ème</sup> chapitre.

2-1-1-2. Le schéma de principe du tag :

La figure 88 résume le schéma fonctionnel du tag. On retrouve les différents éléments qui vont composer le circuit.

Le microcontrôleur sera relié à la fois au transceiver, aux batteries pour être alimenté et aux plots de programmation. Le transceiver quant à lui est également relié aux batteries afin d'être alimenté, au quartz pour le bon fonctionnement de l'horloge interne, au microcontrôleur et enfin à l'antenne.



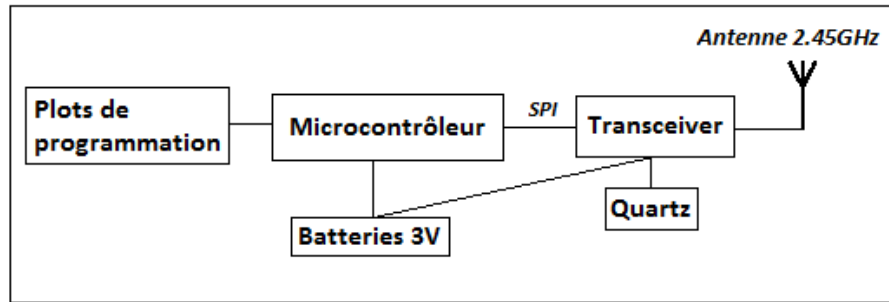


Figure 88: Schéma fonctionnel du tag

### 2-1-1-3. Le schéma électrique du tag :

A partir de la documentation des composants, nous générons avec le logiciel Eagle, les empreintes ainsi que les symboles que l'on utilise pour le schéma électrique et pour le calque qui va servir à la fabrication du flex.

Le logiciel dispose d'une bibliothèque avec les composants les plus standards notamment les résistances et les condensateurs.

La figure 89 représente le symbole du microcontrôleur avec toutes les connexions nécessaires à son bon fonctionnement. On retrouve les deux pads d'alimentation (Vcc et Gnd), les connexions nécessaires à la liaison SPI avec le transceiver ainsi que les liaisons qui vont servir à la programmation.

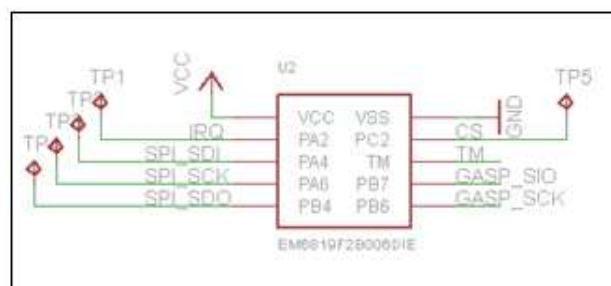


Figure 89: Microcontrôleur

La figure 90 montre quant à elle la configuration du transceiver et ses différentes connexions avec le quartz, l'antenne et le microcontrôleur.

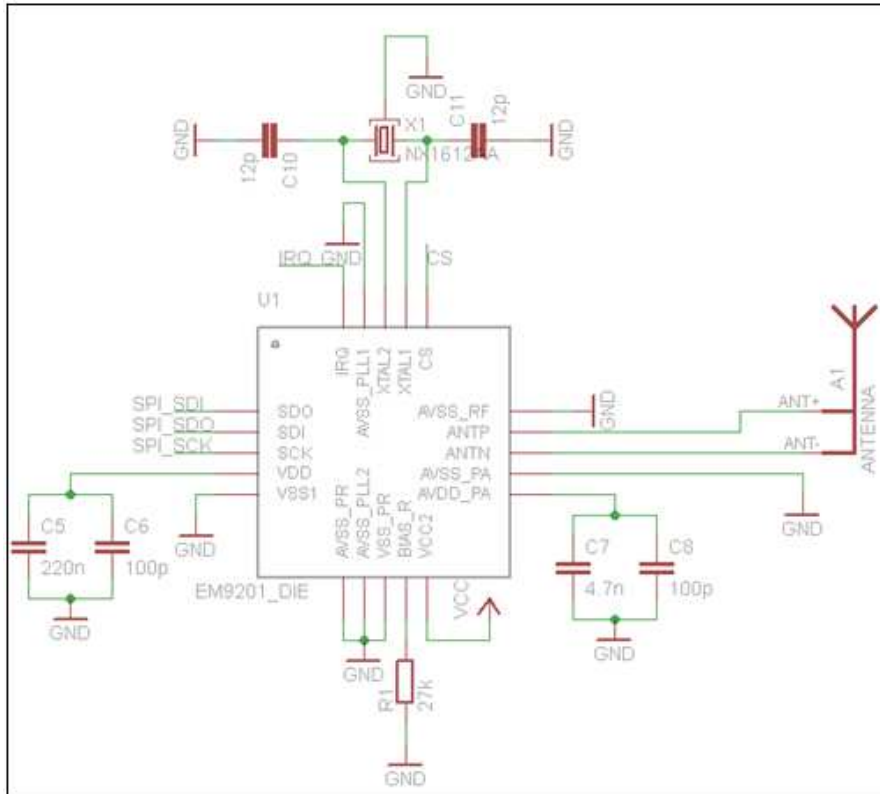


Figure 90: Transceiver

### 2-1-2. Conception du lecteur :

Le lecteur fonctionne différemment du tag. Tout d'abord il est relié au vélo et bénéficie de son alimentation. Il peut donc être alimenté et être en mode écoute en continu afin de détecter le tag dès que celui-ci rentre dans son champ de détection.

#### 2-1-2-1. Les principaux éléments qui constituent le lecteur :

##### a) L'antenne :

C'est une antenne dite IFA (Inverted-F Antenna). Elle est spécialement conçue pour les circuits à petite surface. Ce qui est le cas de notre lecteur comme on a pu le voir auparavant. Comme la surface dont on dispose est très réduite, nous avons dû choisir une géométrie différente de celle du tag.

Son principe de fonctionnement consiste à établir un mode de résonance quart d'onde sur une structure assimilable à un tronçon de ligne de transmission [37] [38]. La longueur de la ligne est adaptée à la fréquence d'utilisation (pour 2GHz, elle est de 31,4mm). Dans notre cas, le fait de n'avoir que 15mm pour la ligne de transmission explique sa forme carrée. La résonance est obtenue en imposant un circuit ouvert à une extrémité de l'antenne (broche 3 sur la figure 91) et un court-circuit à l'autre (broche 1 reliée à la masse). La deuxième branche (broche 2) est le point d'impédance adaptée à la source d'alimentation.



Figure 91: Antenne du lecteur

Contrairement à l'antenne du tag, cette antenne a une impédance de 50 Ohms. Elle ne peut de ce fait être reliée directement au transceiver et nécessite un circuit d'adaptation.

Son gain est de 2,1dBi.

b) Le circuit d'adaptation de l'antenne :

L'antenne IFA est adaptée à 50 Ohms. L'entrée du transceiver est à 200 Ohms d'où le besoin d'avoir un circuit d'adaptation. Ce circuit est constitué d'impédances et de condensateurs et donné par le constructeur (figure 92).

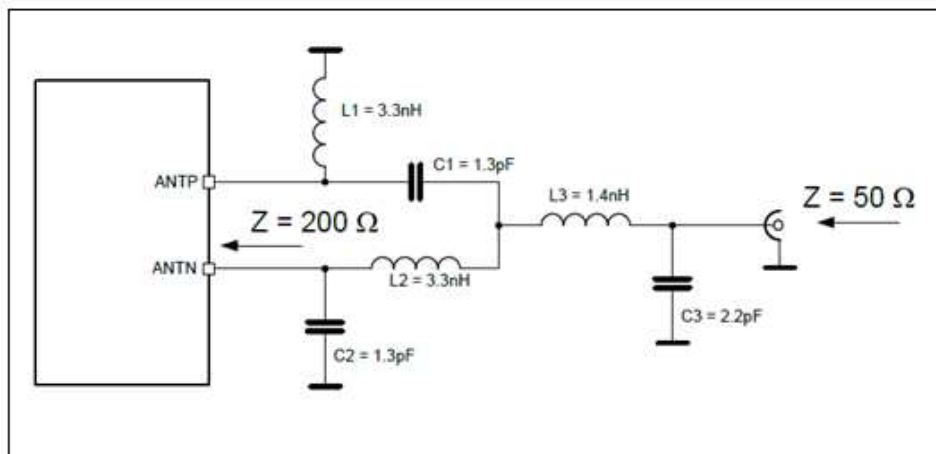


Figure 92: Circuit d'adaptation de l'antenne

c) Le transceiver :

Comme pour le tag, le transceiver a pour rôle de récupérer le signal reçu par l'antenne et de l'analyser. Il est d'une part relié au circuit d'adaptation de l'antenne et d'autre part au microcontrôleur.

d) Le quartz :

Le transceiver a besoin d'un quartz pour en assurer le bon fonctionnement notamment pour tout ce qui concerne les horloges. Le quartz fonctionne à la fréquence de 26MHz.

e) Le microcontrôleur :

Comme pour le tag, le microcontrôleur contient le programme qui pilote le système. Le microcontrôleur utilisé est comme le transceiver, le même que celui utilisé pour le tag.

f) La partie récupération du signal :

Ce que nous appelons la partie récupération du signal concerne essentiellement la conversion de la sortie du microcontrôleur en une tension suffisante pour ouvrir la serrure. L'ouverture de la serrure a besoin d'une tension de l'ordre de 48V alors que le microcontrôleur ne délivre que 3V. Le lecteur chinois dispose d'un système de conversion de tension à base de transistors que nous avons gardé, il est visible sur la figure 93.

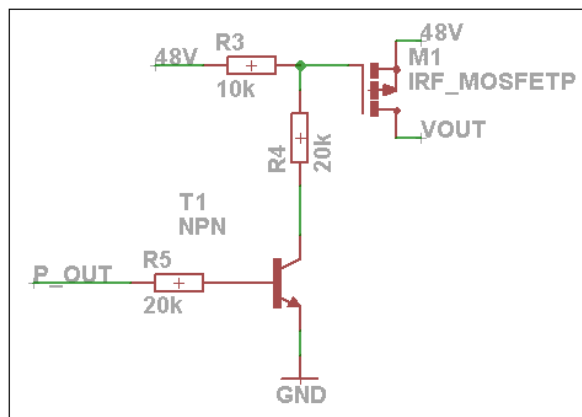


Figure 93: Partie récupération du signal

g) La partie régulation de tension d'alimentation et protection :

La tension d'alimentation de vélo est également de 48V. C'est cette tension qui sera naturellement utilisée pour l'alimentation du lecteur. Les composants radios et le microcontrôleur ont des tensions d'alimentation faibles (3V). Ils ne supporteraient donc pas une si grande tension. Un système de régulation de tension (régulateur intégré) et de protection (diode de puissance et capacités) est nécessaire. La figure 94 représente ce système.

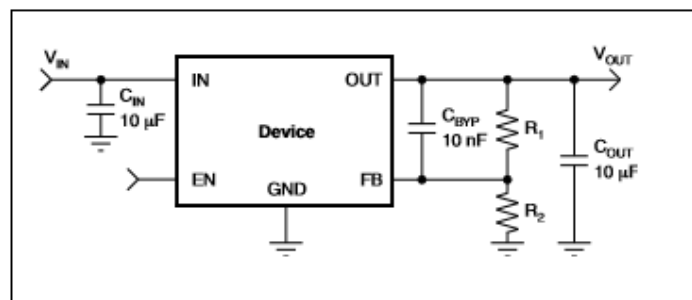


Figure 94: schéma du régulateur

La tension de sortie est déterminée en fonction des résistances R1 et R2 selon les équations 4.10 et 4.11:

$$R1 = R2 \left( \frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (\text{Eq 4.10})$$

$$\frac{V_{out}}{R1+R2} \geq 10\mu A \quad (\text{Eq 4.11})$$

A partir de ces deux équations, nous pouvons déterminer les valeurs des deux résistances. R1 a été fixée à 1kOhms et le calcul de R2 a donné une valeur de 1,54kOhms.

h) Les passifs :

Ce sont essentiellement des capacités et des résistances.

i) Comme le tag, le lecteur dispose également de plots de programmation et de test.

2-1-2-2. Le schéma de principe du lecteur :

En plus des blocs utilisés pour la conception du tag, on retrouve le bloc d'adaptation d'impédance entre l'antenne et le transceiver ainsi que le bloc de régulation de la tension d'alimentation. Le schéma fonctionnel est visible sur la figure 95.

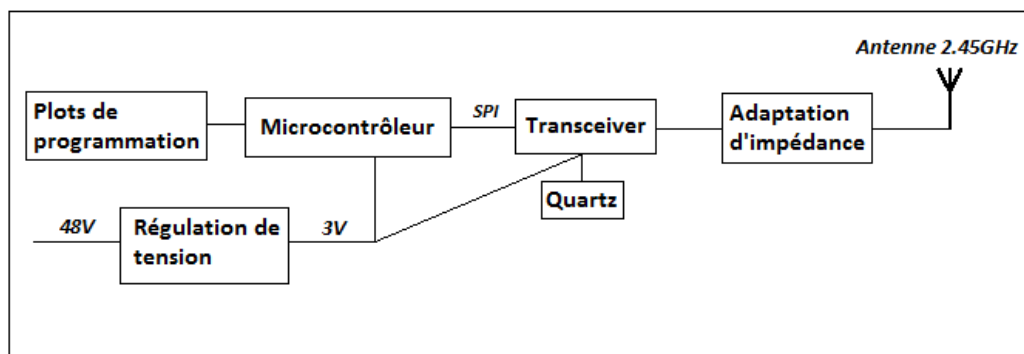


Figure 95: Schéma fonctionnel du lecteur

2-1-2-3. Le schéma électrique du lecteur :

On retrouve les deux parties principales du lecteur qui sont le transceiver (partie 1) et le microcontrôleur (partie 2), voir figure 96 et figure 97.

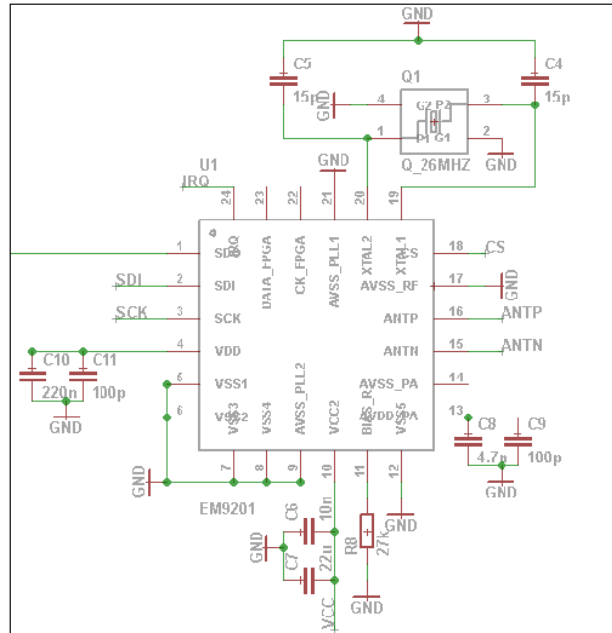


Figure 96: Partie 1

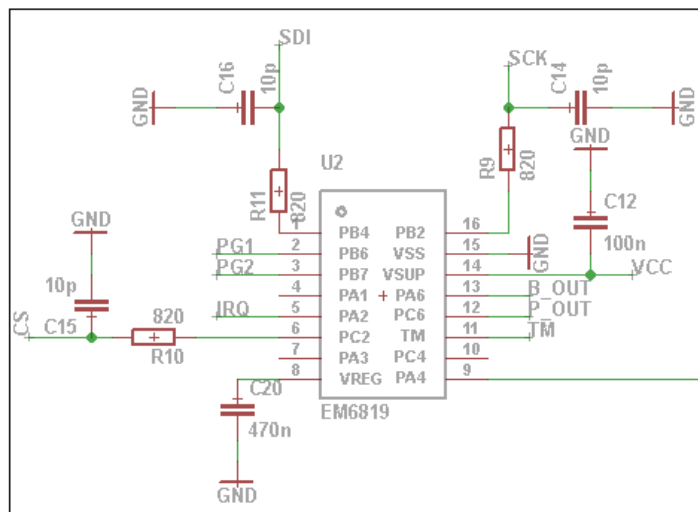


Figure 97: Partie 2

2-1-3. Programmation :

L'étape de programmation est une étape importante de la conception. Elle consiste à écrire le programme qui va piloter le microcontrôleur et donc le circuit.

La programmation a été effectuée en langage C.

Deux programmes ont été réalisés. Un pour le tag et un pour le lecteur.

2-1-3-1. Programmation du tag :

L'organigramme de ce programme est visible sur la figure 98.

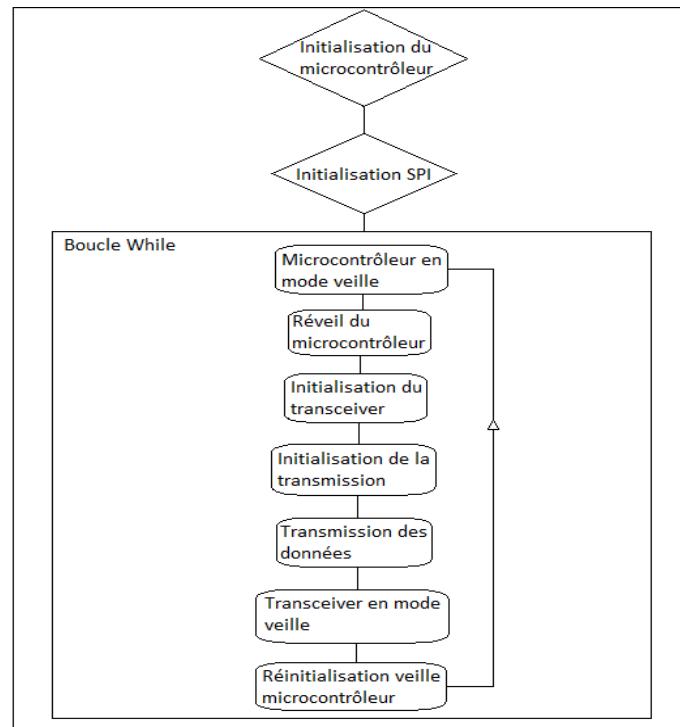


Figure 98: Description du programme du tag

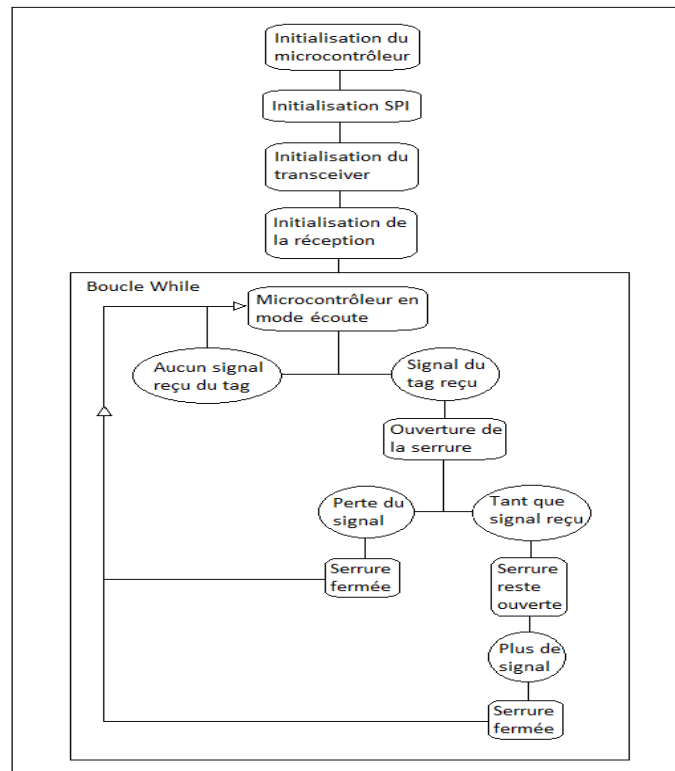
Son fonctionnement est le suivant :

- Initialisation du microcontrôleur : première étape du programme, elle permet de désactiver le watchdog (registre qui permet de mettre le système régulièrement à zéro afin de s'assurer qu'il ne reste pas bloqué à une étape du traitement), de sélectionner les sources d'horloge et d'initialiser les timers et le sleep counter. Le sleep counter est un compteur interne au microcontrôleur dont la valeur peut aller jusqu'à 35mn, il va servir à le sortir du mode sleep. Au bout de ce temps prédéfini, une interruption est générée au sein du microcontrôleur et va le réveiller pour exécuter des instructions. Une fois les instructions exécutées, le microcontrôleur est replongé dans le mode sleep après avoir au préalable réinitialisé le compteur.
- Initialisation de la liaison SPI entre le microcontrôleur le transceiver : permet de définir les périphériques qui sont utilisés dans cette liaison (nous rappelons qu'ils sont au nombre de 5)
- Initialisation du transceiver : réveille le transceiver qui est dans un mode sommeil et effectue une calibration, étape importante avant chaque envoi des données.
- Initialisation de la transmission : définition des paramètres de transmission propres au transceiver (chaîne de transmission, fréquence, adresse, longueur du paquet...)
- Transmission : définition des données à envoyer. Pour commencer et afin de valider le prototype, seul un identifiant sera envoyé, d'une longueur de 64 bits.

L'initialisation du microcontrôleur et de la liaison SPI ne se fait qu'une seule fois au démarrage. Le microcontrôleur rentre alors dans un mode d'économie d'énergie. Il en sort toutes les 7s (une fois que le timer associé arrive à 0). Il envoie les données et se rendort tout de suite après avoir réinitialisé le timer à la bonne valeur.

### 2-1-3-2. Programmation du lecteur :

L'organigramme de ce programme est visible sur la figure 99.



**Figure 99: Description du programme du lecteur**

Les étapes d'initialisation sont les mêmes que pour le tag. Une fois toutes les étapes d'initialisation effectuées, le lecteur rentre dans une boucle d'écoute. Une fois que le tag rentre dans son périmètre de détection, une interruption est générée au sein du microcontrôleur qui va aller exécuter la consigne « ouverture de la serrure ». Il rentre ensuite dans une deuxième boucle d'écoute, où tant qu'il perçoit le signal, la serrure reste ouverte.

Lorsque le signal n'est plus détecté, la consigne « fermeture de serrure » est exécutée. Le programme revient à la première boucle où il attend à nouveau le signal du tag pour générer une nouvelle interruption et ainsi de suite.

## **2-2. Les étapes de réalisation :**

### 2-2-1. Le routage :

La figure 100 montre le flex du tag vélo une fois le routage terminé.



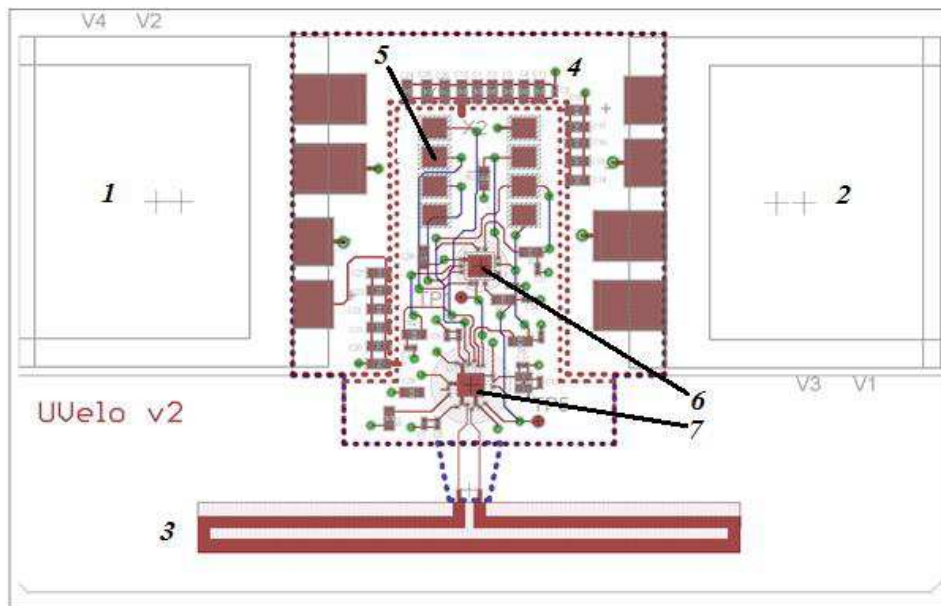


Figure 100: Routage du tag

- 1 & 2 : ce sont les emplacements prévus pour les deux batteries qui serviront à l'alimentation,
- 3 : antenne du tag,
- 4 : une partie des passifs nécessaires au bon fonctionnement du système,
- 5 : plots de programmation du microcontrôleur,
- 6 : microcontrôleur,
- 7 : transceiver.

Les pointillés en bleu et rouge délimitent les plans d'alimentation et de masse. Ils assurent une meilleure stabilité et réduisent les perturbations sauf pour l'antenne qui ne doit avoir aucun plan de masse autour ou en dessous, comme déterminé dans l'étude présentée au chapitre 3.

La figure 101 quant à elle montre le board du lecteur.

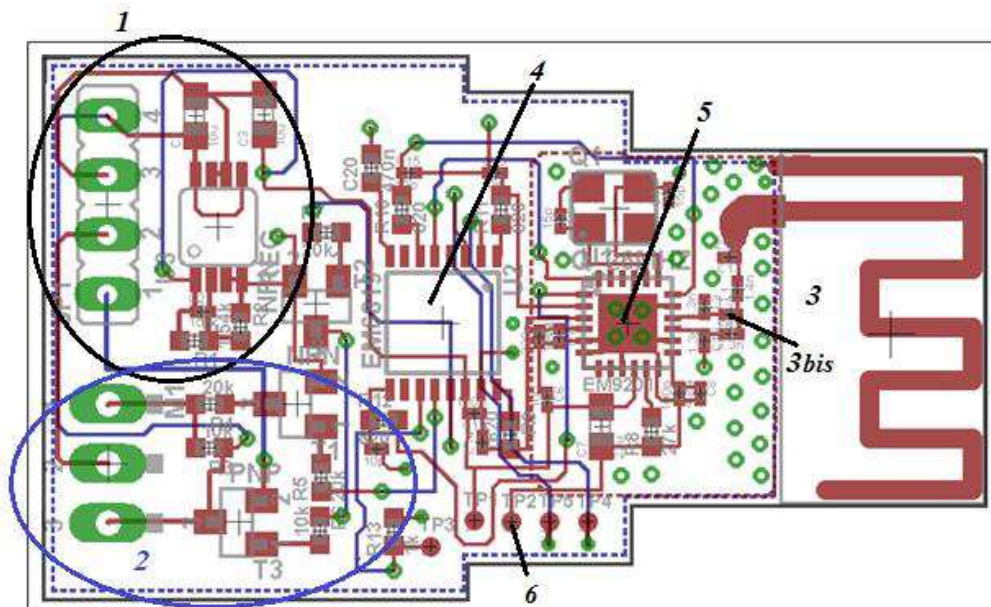


Figure 101: Routage du lecteur

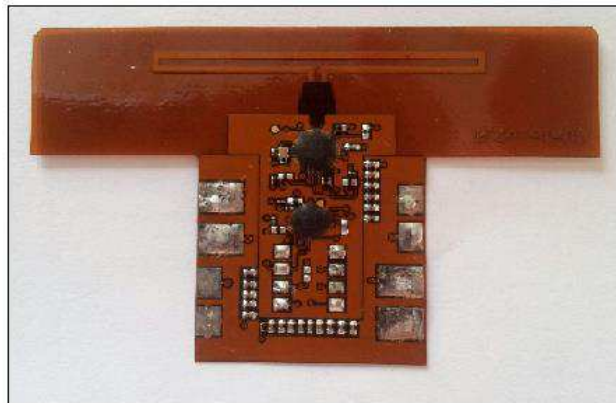
- 1 : partie régulation de l'alimentation, transformation du 48V en 3V,
- 2 : partie récupération du signal, tension qui va commander l'ouverture/fermeture de la serrure,
- 3 : antenne,
- 3bis : circuit adaptation d'impédance,
- 4 : microcontrôleur,
- 5 : transceiver,
- 6 : plots de programmation du microcontrôleur.

En plus des règles de routage générales à respecter, il faut ajouter celles liées à la partie RF notamment en ce qui concerne le lecteur :

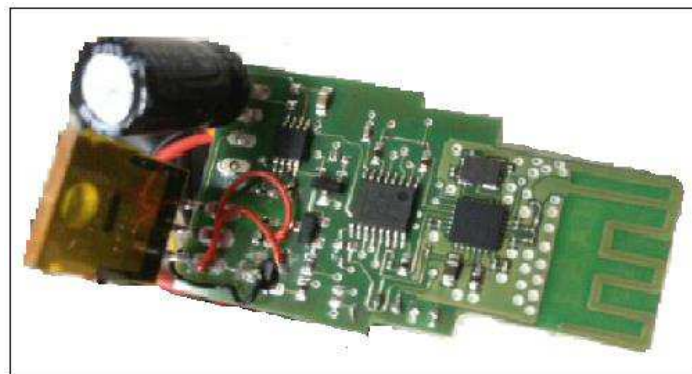
- Etant donné que le substrat est plus épais (0,8mm), il a fallu inclure des vias un peu partout en dessous de l'antenne et autour du circuit d'adaptation pour éviter les interférences.
- Le circuit d'adaptation devait être le plus près possible du transceiver afin d'éviter le rajout d'impédances (potentiellement celles des lignes de cuivre).
- La ligne de cuivre qui relie l'antenne au circuit d'adaptation doit avoir la même épaisseur (au possible) pour éviter les pertes.

#### 2-2-2. Fabrication des boards et montage des composants :

Les figures 102 et 103 représentent le tag et le lecteur une fois le montage des composants réalisé. Ils sont maintenant prêts à être testés.



**Figure 102: Fabrication du tag**



**Figure 103: Fabrication du lecteur**

2-2-3. Programmation des circuits :

La programmation constitue la dernière étape de la conception. Une fois les circuits fabriqués et tous les composants montés. Le programme conçu au préalable peut être transféré au microcontrôleur et être testé.

La programmation s'est faite à l'aide d'un kit de développement spécialement conçu pour la gamme des produits dont font partie le microcontrôleur et le transceiver. L'environnement de développement en fait partie aussi.

Un débogueur est également fourni pour pouvoir déboguer le programme. C'est-à-dire, mettre en évidence les erreurs et les corriger. Un compilateur qui va transformer le langage source (langage C) en un langage machine compréhensible par le microcontrôleur.

Les programmes sont chargés via les plots de programmation.

Au nombre de cinq, les plots de programmation sont les suivants :

- Le pôle positif de l'alimentation. Le microcontrôleur doit être alimenté pour pouvoir être programmé,
- Le pôle négatif ou la masse,
- Le ON/OFF qui signifie au microcontrôleur qu'il est en mode programmation,
- Une entrée d'horloge pour la synchronisation,
- Une entrée pour les données.

**2-3. Validation expérimentale :**

Afin de valider notre système de serrure, le lecteur et le tag ont été testés avec différentes configurations.

Tout d'abord, les programmes adéquats ont été chargés et le lecteur et le tag ont été alimentés avec des alimentations externes. Le but est de vérifier dans un premier temps le bon fonctionnement général. Pour le tag cela veut dire que lorsque l'on regarde à la sortie du transceiver, on doit détecter un signal périodique signe de l'envoi de la trame contenant l'identificateur de la carte. Cela a été vérifié à l'aide d'un oscilloscope.

Pour le lecteur, cela consiste à vérifier que la partie régulation de l'alimentation en entrée fonctionne bien et que tous les composants sont correctement alimentés.

Le premier problème qui a été rencontré est que lors de l'alimentation du lecteur via une alimentation externe égale à 48V (valeur de la tension d'alimentation du vélo électrique), le lecteur s'est mis à chauffer. En investiguant de plus près, on s'est rendu compte que c'est la capacité de protection qui chauffait. Nous l'avons changé et opté pour une capacité de puissance.

Une fois ce problème réglé, on a voulu vérifier que tous les composants étaient bien alimentés. Le microcontrôleur avait pour Vcc une tension de 1,64V loin des 3V requis pour son bon fonctionnement. En testant les résistances du système de régulation de tension qui doit convertir la tension de 48V en 3V, on s'est rendu compte que les résistances ont été inversées lors du montage des composants par

notre sous-traitant. Une fois les résistances remises à la bonne place, nous avons la tension de 3V attendue.

Après cela, on pouvait passer aux tests lecteurs/tags. Malgré une alimentation correcte, aucun signal n'était perçu par le lecteur en provenance du tag. On a investigué du côté du programme du microcontrôleur et on s'est rendu compte que la phase de démarrage du microcontrôleur est trop rapide par rapport au temps que met le régulateur de tension à convertir les 48V en 3V, entraînant une mauvaise alimentation des périphériques du microcontrôleur. Nous avons augmenté de plusieurs  $\mu$ s cette phase de démarrage.

Une fois ces problèmes réglés, nous avons pu passer aux tests du lecteur couplé avec le tag. Sur le lecteur, en plus du signal de commande de la serrure, un deuxième signal est disponible. On va l'utiliser pour alimenter un petit buzzer qui va nous servir d'indicateur quant à la réception du signal. Lorsque le lecteur détecte le tag le buzzer émet un bruit particulier et lorsqu'il ne le détecte plus il émet un autre bruit. Ce procédé est géré au niveau du firmware.

Tous les tests pour effectuer ces réglages préliminaires l'ont été en intérieur ensuite le dispositif a été mis à l'extérieur afin de se rapprocher de la réalité. Dans un premier temps, le lecteur a été alimenté avec une alimentation externe et le tag avec une pile bouton. Et dans un second temps, le lecteur a été monté sur un vélo électrique pour pouvoir faire des tests en roulant avec le vélo et afin de voir l'effet des obstacles (sacs, poches) sur la réception du signal tout en roulant.

Les tags ont été programmés avec deux configurations différentes. La première configuration utilise la puissance minimale du transceiver (tableau 8). C'est la configuration qui consomme le moins. La deuxième configuration utilise quant à elle la puissance maximale et consomme donc plus. Le but étant de comparer les deux modes d'émission en termes de distance.

RF Power (RFPwr[2:0])	Output power	DC Current consumption
111	+2 dBm	15.9 mA
110	0 dBm	13.5 mA
101	-3 dBm	12.2 mA
100	-6 dBm	10.9 mA
011	-9 dBm	10.0 mA
010	-12 dBm	9.5 mA
001	-16 dBm	9.0 mA
000	-20 dBm	8.8 mA

**Tableau 8: Consommation selon la puissance émise**

La figure 104 montre le positionnement du lecteur lors des tests. Nous cherchons à déterminer la distance de détection du tag suivant si l'utilisateur arrive face au lecteur placé sur la selle du vélo, derrière ou sur les côtés.

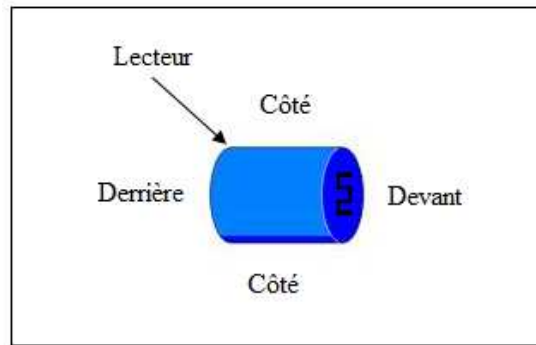


Figure 104: Positionnement du lecteur lors des tests

Pour les tests nous avons à notre disposition un panel de 5 lecteurs et 4 tags. Les lecteurs sont notés L1, L2, L3, L4 et L5.

Les tags 1 et 2 sont programmés avec une puissance minimale et les tags 3 et 4 avec une puissance maximale.

Tous les tags ont été testés avec chaque lecteur. Le tableau 9 résume les résultats des mesures obtenus.

	<i>Tag 1</i>			<i>Tag 2</i>			<i>Tag 3</i>			<i>Tag 4</i>		
<b>L1</b>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>
	Non détecté			<1m			8m	6m	5m	23m	>10m	>9m
<b>L2</b>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>
	3m	1m	1m	3m	3m	2m	21m	17m	16m	21m	20m	14m
<b>L3</b>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>
	80 – 90 cm			50cm			8m	7m	4m	20m	>10m	>10m
<b>L4</b>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>
	3,5m	2m	70-80cm	<1m			21m	15m	8m	23m	>10m	9m
<b>L5</b>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>	<i>Devant</i>	<i>Derrière</i>	<i>Côté</i>
	50cm			<1m			20m	>10m	>10m	20m	>10m	7m

Tableau 9: Mesure des distances entre le lecteur et le tag

Nous remarquons que tous les lecteurs n'ont pas les mêmes performances. Les lecteurs 1 et 3 ont des performances bien au dessous des 3 autres. En regardant de plus près, nous avons remarqué une légère différence entre les 5 lecteurs au niveau des circuits d'adaptation des antennes. En effet, sur les lecteurs 1 et 3, les boîtiers des condensateurs et des bobines sont plus gros. Les boîtiers des éléments passifs sont normalisés, en général le format utilisé est un format que l'on appelle 0102. La principale différence réside dans les tolérances des valeurs. Ce qui a du se passer c'est que la différence des tolérances a influé sur le bon fonctionnement du circuit et sur la bonne adaptation de l'antenne. Même si elle est à la bonne fréquence, le fait qu'elle ne soit pas correctement adaptée va influencer sur la distance de communication.

Ensuite, en ce qui concerne les distances de détection des trois autres lecteurs, on remarque qu'avec les deux tags en puissance minimale la distance de détection est en moyenne d'1m. Dans trois cas de figure, elle est de 3 mètres devant le lecteur et dans les 3 autres, elle est inférieure à 1m. Les tags en puissance maximale ont eux des résultats assez homogènes. La distance de détection peut même dépasser les 20m. Notons que les tags sont à l'air libre, ni dans une poche, ni dans un sac.

Lorsque le tag est mis dans une poche ou dans un sac, il est bien moins détectable. En puissance minimale, il ne l'est plus du tout. Le tableau 10 résume ces résultats.

	<b>Tag 1</b>	<b>Tag 2</b>	<b>Tag 3</b>	<b>Tag 4</b>
<b>L2</b>	Non	Non	Oui	Oui
<b>L4</b>	Non	Non	Oui	Oui
<b>L5</b>	Non	Non	Oui	Oui

**Tableau 10: Détection des tags dans une poche ou un sac**

Nous avons également essayé de voir l'influence du corps humain, dans le cas par exemple où le tag serait dans un sac à dos. Le tag n'est plus du tout reconnu que cela soit en puissance minimale ou maximale.

La puissance minimale n'est clairement pas suffisante pour garantir le fonctionnement du système dans un périmètre d'1m. La distance à laquelle sont détectés les tags à puissance maximale est trop grande par rapport au cahier des charges. Le meilleur compromis entre avoir une distance de détection dans un sac ou dans la poche avant mais aussi aux alentours d'un mètre est d'avoir une puissance moyenne entre la puissance minimale et la puissance maximale. Le transceiver permet d'avoir 5 puissances en tout. En prenant également en compte la consommation, il a été décidé de fixer la puissance à une des puissances moyennes délivrées par le transceiver (-9dBm dans le tableau 8) et également d'augmenter le temps entre chaque envoi de la trame du tag.

Un dernier test a été effectué en utilisant un véritable vélo électrique avec un tag accroché autour du cou ou dans une poche de la chemise. Le système fonctionne correctement et a permis à son utilisateur d'effectuer des trajets multiples.

#### **2-4.Caractéristiques finales de la carte :**

Le produit final, dont on peut voir le design externe sur la figure 105, possède les caractéristiques suivantes :



**Figure 105: Carte à vélo active**

- Fréquence : 2,45 GHz
- Température : - 20°C + 50°C
- Dimensions : ISO 7810
- Poids : 20g
- Elle peut être appairée avec plusieurs cartes
- Distance de lecture ajustable par logiciel
- Opération : émission toutes les 4 secondes (peut être ajustée)
- Distance de lecture : 3-5 mètres (jusqu'à 20 mètres)
- Durée de vie : 1 an

### **3. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté nos travaux pour la conception et la réalisation d'une clé sans contact au format ISO 7810 basée sur une technologie RFID active à 2,45GHz ce qui représente une innovation majeure.

Nous avons rencontré plusieurs problèmes qui ont été résolus avant d'arriver à la validation du produit final. Beaucoup de temps a également été passé dans le choix des composants et la conception de la première solution. Cela nous a amené à réfléchir sur la nécessité d'avoir une méthodologie visant à diminuer ce temps et à valider les solutions en amont.

Dans ce qui suit, nous allons voir comment optimiser cette conception et quelle genre de méthodologie nous pouvons mettre en œuvre.

*Chapitre 5:*  
*Optimisation de la*  
*conception*



Nous avons vu lors des chapitres précédents les étapes de conception et toutes les mesures faites en amont afin de réaliser la serrure pour le VAE. Le temps total pour la conception, la réalisation et les tests a été de 30 mois. Ce temps très long pénalise la mise rapide sur le marché d'un produit et hypothèque l'industrialisation du système réalisé.

Une bonne partie de ce temps a été utilisé afin de mettre en place des bancs de tests pour réaliser des mesures afin de choisir les composants. Ce temps d'exploration doit être réduit afin de rendre le produit disponible sur le marché au plus tôt pour conserver son avance technologique sur les concurrents.

Le choix des composants est crucial. Il est nécessaire de vérifier un certain nombre de paramètres au regard du cahier des charges. Par exemple : les fréquences de résonance et les distances de communication pour les antennes ; les capacités, les temps de décharge et l'influence de la température entre autres pour les batteries ; l'interaction des transceivers et des microcontrôleurs ; la consommation ; le temps de réponse...

Le recours à une méthodologie basée sur des modèles pour aider le concepteur dans le choix des composants sans réaliser de procédures de tests physiques est une piste scientifique pertinente que nous nous proposons d'explorer, au moins dans sa définition.

Nous proposons une méthodologie basée sur la construction de modèles stockés dans une base de données.

### 1. Une méthodologie de conception de systèmes basée sur les modèles:

Fort de notre expérience lors de la conception de la serrure, nous proposons une nouvelle méthodologie de conception de systèmes mixtes. Elle s'inspire de la méthode APBD.

#### 1.1. La méthode APBD :

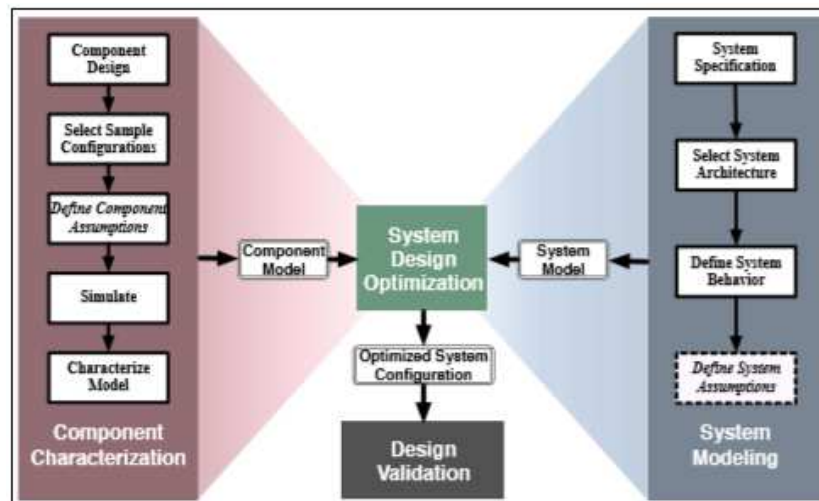


Figure 106: Méthode APBD

La méthode APBD, visible sur la figure 106, se base sur un flux de design orthogonal [39] [40]. Les composants sont modélisés selon une méthode ascendante pour fournir des modèles composants à un système d'optimisation. Le système, suivant ses contraintes se base sur une approche descendante pour avoir un modèle système. La phase d'optimisation vient s'enrichir des deux côtés (niveau composant et

niveau système) afin de trouver le bon compromis entre le respect des contraintes physiques du composant et les performances du système. Le design est ensuite validé avec des simulations électriques.

### 1.2. Méthodologie proposée :

La méthodologie que nous proposons s'inspire de la méthode APBD. Nous proposons de créer une base de données de modèles classée par types de composants. Le choix des composants à utiliser dans le système, se fait en parcourant cette base de données et en utilisant des paramètres non fonctionnels renseignés au préalable.

La figure 107 décrit la mise en forme de cette base de données :

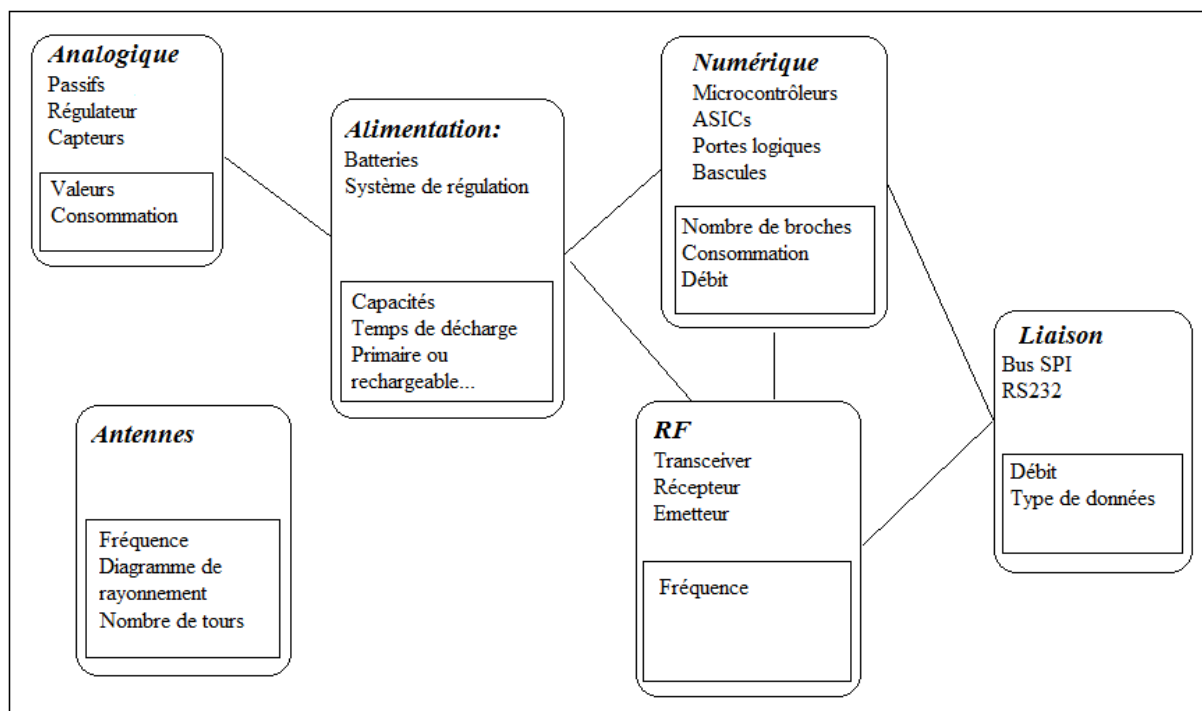


Figure 107: Etape 1 de la méthodologie: la base de données

La structure de la base de données est sous forme de blocs, où les composants sont rangés par familles : analogique, numérique, RF, conversion, alimentation... Plusieurs paramètres sont définis afin de choisir un composant au sein d'une famille.

Prenons l'exemple de la batterie et d'une application pour laquelle elle doit garantir le fonctionnement du système pendant un an à raison de 10 utilisations par jour. Chaque utilisation consomme  $10\mu\text{A}$ . L'interrogation de la base de données doit extraire tous les modèles de batterie satisfaisant ces contraintes.

Cette base de données constitue le cœur de la méthode, elle est entourée de deux flux.

Un premier flux où nous allons caractériser les composants en suivant une approche ascendante, c'est-à-dire en définissant les spécificités du composant, en le modélisant et en le validant par une simulation. On obtient alors une caractérisation du composant et un modèle qui va venir alimenter et enrichir la base de données.

Un second flux où nous spécifions le modèle système basé sur une modélisation descendante et qui viendra chercher les composants dont il aura besoin pour satisfaire ses contraintes dans la base de données.

La figure 108 montre le schéma global de la méthodologie proposée.

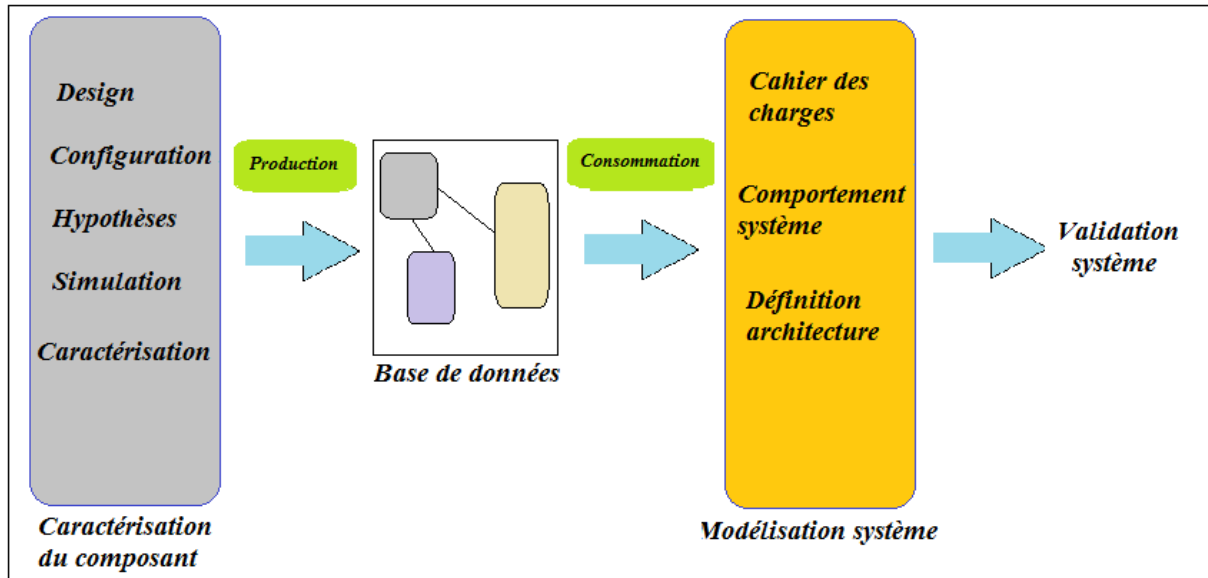


Figure 108: Méthodologie proposée

### 1.3. Système à modéliser :

Dans le cas de la serrure le modèle système est celui de la figure 109.

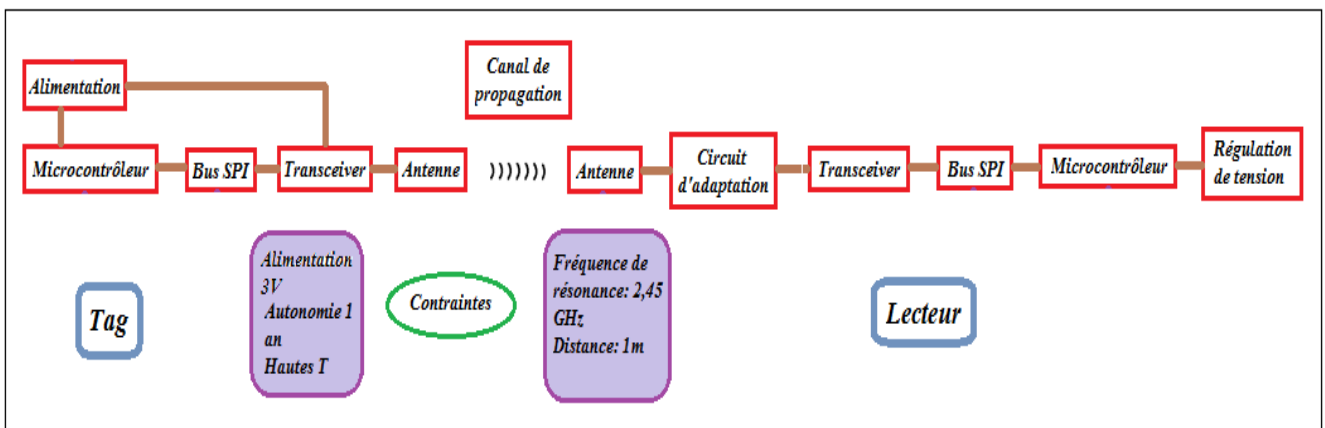


Figure 109: blocs à modéliser

Pour chaque composant du système, il est nécessaire d'interroger la base de données pour extraire les modèles qui répondent aux cahiers des charges. Il est nécessaire de commencer par modéliser au niveau composant chaque élément de la chaîne du tag et du lecteur.

## 2. Introduction à la modélisation :

Un modèle est un moyen de décrire un composant ou un système au niveau physique ou au niveau comportemental [41]. C'est une représentation partielle de la réalité.

Un composant ou système peut avoir plusieurs modèles, selon le point de vue de la personne qui le modélise et de son utilisation.

Il va essentiellement servir à en comprendre le fonctionnement afin d'en optimiser l'utilisation.

Il existe plusieurs méthodes pour modéliser un système : la plus utilisée est la méthode dite descendante (Top-down) qui part d'un modèle général et simple qui contient le moins de détails sur l'implémentation physique pour finir par spécifier les moindres détails du système étudié. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet de détecter les erreurs tôt dans le flot de conception et de retarder le choix des solutions techniques. Elle garantit également la réutilisabilité des modèles contrairement aux modèles conçus selon la méthode ascendante (Bottom-up), utilisée assez souvent mais dont les modèles partent du détail du composant pour finir par en décrire les généralités.

### 2.1. Comment peut-on modéliser un système hétérogène comme le nôtre?

En général, la modélisation de composants individuels est bien maîtrisée. L'affaire se complique lorsqu'il faut modéliser plusieurs composants qui interagissent entre eux. D'autant plus lorsque ces composants proviennent de domaines éloignés tels que le numérique, l'analogique ou encore la radio-fréquence. La difficulté réside dans la validation des interactions entre cette grande diversité de composants.

Un système tel que la serrure du VAE est un système mixte car il comprend des composants numériques, des composants analogiques, des composants qui ont des fonctions analogiques et numériques à la fois (microcontrôleur et transceiver) et des composants RF.

La principale différence entre les systèmes numériques et analogiques est la représentation qui est faite des valeurs et du comportement par rapport au temps [42]. Ainsi, un système est numérique s'il manipule et enregistre les informations quantifiées dans le temps en des valeurs discrètes. Celles-ci sont généralement exprimées par des équations booléennes logiques ou par des processus communicants et déclenchés par des événements.

Un système est analogique, si les informations manipulées ont des valeurs qui varient de façon continue dans le temps [43].

Un système RF est sans doute le plus complexe des trois car il contient du numérique, de l'analogique et fait appel à plusieurs domaines : traitement du signal, conception d'antennes...

Tous ces éléments doivent interagir entre eux. Les parties analogiques et numériques communiquent via des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique. La partie RF, transmet des signaux analogiques via une modulation numérique à sa fréquence de travail.

### 2.2. Les moyens de modélisation :

Des langages de modélisation pour systèmes multi-physique et signaux mixtes ont vu le jour. Un des besoins principaux auxquels ces langages tentent de répondre est de fournir des modèles de systèmes complexes comprenant toutes les parties quelque soit le domaine de la physique étudié et quelque soit la nature de signaux (discrète ou continue) [44].

La flexibilité offerte par ces langages permet la création de modèles réutilisables à différents niveaux d'abstraction avec un minimum d'effort de modélisation (et donc un moindre coût) : d'un côté, elle permet aux utilisateurs non spécialistes de maintenir une bibliothèque de modèles abstraits. D'un autre

côté, elle offre la possibilité aux concepteurs de se concentrer sur les composants critiques en utilisant un modèle global dans lequel seuls les composants critiques seront représentés au niveau physique (le reste du circuit sera maintenu à un niveau d'abstractions supérieur).

Les deux principaux langages de modélisation mixte multi-domaines sont aujourd'hui Verilog-AMS et VHDL-AMS. Ce sont des extensions analogiques et mixtes (AMS – Analog and Mixed Signal) issus respectivement de Verilog (1998) et de VHDL (1999). Comme leur noms l'indiquent, ces deux langages permettent de traiter indifféremment des modélisations logiques, analogiques ou mixtes au sein d'un même système. En revanche, Verilog-AMS n'est pas un standard IEEE contrairement à VHDL-AMS.

### **3. VHDL-AMS :**

#### **3.1. Présentation de VHDL-AMS :**

Apparu en 1987, le langage VHDL-AMS est un standard IEEE (IEEE 1076.1-1999). Il a été développé comme une extension du langage VHDL pour permettre la modélisation et la simulation de circuits et de systèmes analogiques et mixtes logiques-analogiques [45].

#### **3.2. Les avantages de VHDL-AMS :**

L'utilisation généralisée de ce langage facilite la communication entre les différents domaines scientifiques grâce à son approche multi-domaines native qui permet aussi bien à un électronicien qu'à un mécanicien ou même un chimiste [46] de modéliser la partie d'un dispositif qui le concerne directement sans problèmes de dialogue avec les autres parties.

La grande force de ce langage est de permettre la simulation mixte en autorisant aussi bien les modélisations à temps continu (analogiques) qu'à événements discrets (logiques) ou mélangeant les deux.

A cette flexibilité d'emploi s'ajoute la possibilité pour les concepteurs d'aborder leurs modèles à différents niveaux d'abstraction. En effet, VHDL-AMS propose des mécanismes permettant de gérer aussi bien les abstractions comportementales (c'est la fonction réalisée par le système qui est modélisée et non sa physique), que les abstractions structurelles (le système est divisé en sous-ensembles qui peuvent eux-mêmes être modélisés au moyen de différentes abstractions, ...) ou bien de type workflow : enchaînement de blocs fonctionnels dont les entrées n'ont pas d'influence sur les sorties des blocs précédents. Les modèles créés avec VHDL-AMS peuvent aussi bien être descriptifs que prédictifs [47].

Deux autres caractéristiques de VHDL-AMS, dont chacune est partagée avec quelques autres langages, sont le traitement des équations implicites et l'utilisation des lois de Kirchhoff généralisées, fondement des relations implicites entre les différents noeuds d'un système.

#### **3.3. Les limites de VHDL-AMS :**

VHDL-AMS n'est cependant pas à même de proposer des instructions répondant à tous les besoins des concepteurs de modèles. Par exemple, l'utilisation des dérivations spatiales n'est pas prévue par le langage, ce qui rend délicat les modélisations géométriques. Seules les dérivations temporelles sont acceptées par VHDL-AMS.

Le langage est à même de supporter certaines de ces lacunes grâce à ses possibilités d'interfaçage avec d'autres langages (notamment le C/C++), néanmoins, la forme de ces interfaces n'est pas standardisée.

Il y a aussi le fait que les simulateurs actuels sont basés sur des extensions et des modifications d'anciens simulateurs, et pas encore sur de nouvelles techniques de simulation spécifiques, ce qui implique des limitations dans les possibilités de simulation qui empêchent l'implémentation de certaines instructions du langage.

Muni de ce langage nous pouvons proposer des modèles pour les composants du système de clé, ce qui est l'objet des parties suivantes.

#### **4. Modèle d'une batterie:**

La méthodologie que nous proposons s'appuie sur la construction d'une base de données de composants paramétrés. Nous présentons ici un modèle du composant batterie.

Plusieurs études ont été faites afin de modéliser les batteries lithium. L'une d'elle [48] dresse la liste de tous les modèles existants.

En voici le résumé :

- Il existe plusieurs facteurs importants qui caractérisent un modèle de batterie. Chacun de ces facteurs peut servir de base pour classifier les modèles. Par exemple le choix de la technologie (Li-Ion, NiCd etc), le type de profil de courant de charge (constant ou impulsionnel) ou encore les effets non-linéaires de la batterie.
- Il existe plusieurs catégories de modèles : électrochimiques, analytiques ou empiriques, stochastiques, mixtes stochastiques et analytiques et basés sur des circuits électriques équivalents.

L'étude menée a montré que les modèles les plus représentatifs sont basés sur les circuits électriques équivalents.

Les modèles électriques utilisent une combinaison de sources de tension, de résistances et de capacités. Le principal avantage de ce type de modèle est la possibilité offerte de la co-simulation avec d'autres circuits électriques.

Il existe plusieurs modèles électriques dans la littérature. Nous les présentons dans les sections suivantes.

##### 4.1. Modèles électriques basés sur le schéma équivalent de Thévenin :

###### 4-1-1. Le modèle "idéal" :

Le modèle d'une batterie idéale est composé d'une source de tension  $E_0$  et d'une résistance interne équivalente notée  $R_0$  comme représentée sur la figure 110.

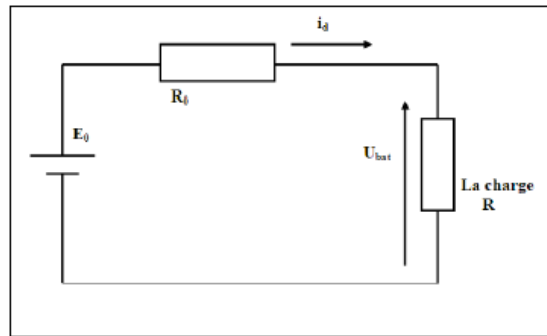


Figure 110: Modèle idéal d'une batterie [48]

$E_0$  correspond à la tension de la batterie obtenue par mesure à circuit ouvert. La résistance interne  $R_0$  est obtenue à partir de deux mesures : une mesure à vide et une mesure avec une charge connectée à la batterie totalement chargée. Ce modèle ne tient compte ni de l'impédance de la batterie qui varie avec l'état de charge, ni de ses effets non linéaires. Un tel modèle est applicable dans des cas très particuliers où l'énergie délivrée par la batterie peut être considérée comme illimitée, ce qui est loin d'être notre cas.

#### 4-1-2. Le modèle "idéal" amélioré :

Ce modèle est basé sur la même configuration que celle reportée sur la figure 110. L'état de charge de la batterie est pris en compte en transformant la résistance  $R_0$  constante, en une résistance variable  $R_v$  (Eq. 5.1). Dans l'expression donnée plus bas,  $R_0$  représente la résistance interne de la batterie à pleine charge et SOC (State Of Charge) l'état de charge de la batterie variant entre 0 (batterie déchargée) et 1 (batterie chargée).

L'expression de SOC est donnée par l'équation 5.2 où  $C_{10}$  représente la capacité de la batterie durant 10h à la température de référence.  $k$  est un coefficient qui dépend du pourcentage de décharge de la batterie.

$$R_v = \frac{R_0}{SOC^k} \quad (\text{Eq 5.1})$$

$$SOC = 1 - \frac{\sum Ah}{C_{10}} \quad (\text{Eq 5.2})$$

#### 4-1-3. Autre modèle électrique basé sur le schéma équivalent de Thévenin :

Le modèle de Thévenin de la figure 111 utilise une résistance interne série  $R_b$ , une tension à vide  $E_b$ , une capacité  $C_{0v}$  qui représente la capacité de la batterie et une résistance de surtension  $R_{0v}$ .

Le temps de réponse aux événements de charge SOC est modélisé par une résistance en parallèle avec une capacité. Ces modèles supposent généralement que la tension à vide  $E_0$  est constante quelque soit l'état de charge de la batterie.

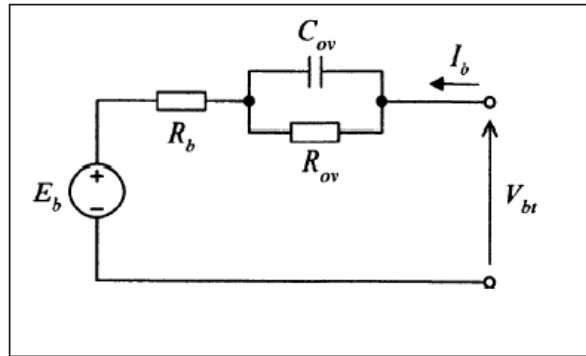


Figure 111: Modèle de Thévenin [47]

4.2. Modèles électriques basés sur le temps de fonctionnement de la batterie :

Ces modèles utilisent généralement un circuit complexe pour simuler la réponse en tension pour un courant de décharge constant. Ils ne peuvent pas prévoir la réponse en tension pour des variations en courant d'excitation.

Les modèles sont décrits sous SPICE et sont formés d'éléments passifs linéaires, de sources de tensions et de LUT pour modéliser respectivement les batteries NiMH et les batteries Li-Ion. Une LUT (Look-Up Table) étant une liste d'association de valeurs et qui désigne sa sortie de manière unique en fonction de ses entrées et du contenu de la table.

Cette méthode suppose que plusieurs courbes de décharge ont été extraites expérimentalement avec plusieurs profils de décharge à faible régime (de 20 à 200 heures). La courbe moyenne, suppose typique est alors convertie en une LUT utilisée dans une source de tension.

La batterie est modélisée par les circuits de la figure 112.

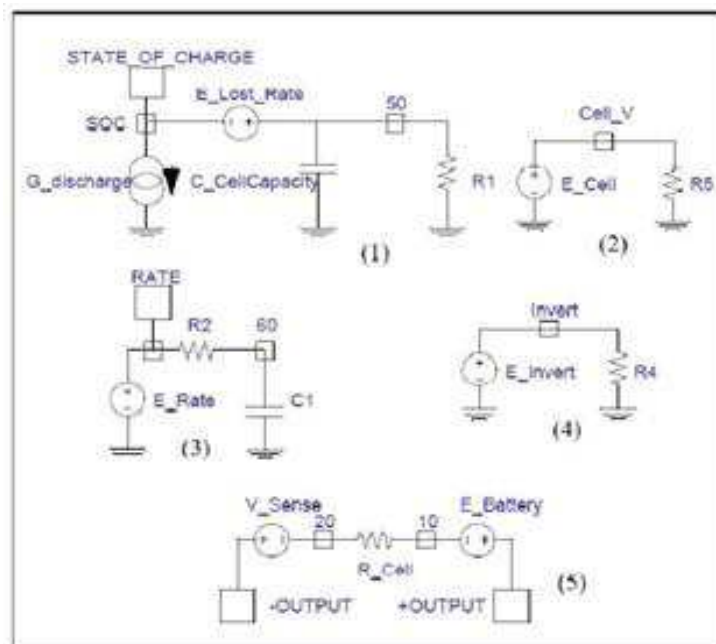


Figure 112: Schéma fonctionnel de la batterie [48]



Les éléments composant le circuit de la figure 112 sont :

- Une capacité  $C_{cellCapacity}$  calculée selon l'équation 5.3. Elle est utilisée pour caractériser la capacité totale de la batterie.

$$C_{cellCapacity} = 3600 \cdot Capacite \cdot Correc \quad (\text{Eq 5.3})$$

Dans cette équation,  $Correc$  est un coefficient de correction qui permet à l'utilisateur d'aligner la capacité simulée avec les données du constructeur.

- $E\_Lost\_Rate$  : une source de tension qui représente la capacité perdue. La dépendance avec le profil de décharge est modélisée par une source de tension contrôlée par une tension montée en série avec la tension de sortie de la batterie.
- Une résistance  $R\_cell$  qui représente la résistance de la cellule.
- Une source de tension nulle  $V_{sense}$  est utilisée en guise de capteur de courant. Selon le type de batterie étudiée, la résistance de la batterie est modélisée par une simple résistance série constante ou variable en fonction de l'état de charge.
- Le taux de décharge instantané est défini comme étant la capacité de la cellule déchargée en une heure.

Quand la décharge s'effectue avec un rapport cyclique faible et une amplitude élevée, le courant de décharge, élevé au début, décroît au bout de quelques secondes. Ce retard est modélisé par un circuit RC. La valeur exacte de cette constante de temps dépend du type et de la taille de la batterie utilisée.

- La LUT qui représente la tension de la cellule en fonction de l'état de charge. En général, elle est utilisée pour inverser l'état de charge (c'est à dire que 0 correspond à un état de charge de 100% et 1 à un état de charge de 0%).

Cette méthode peut sembler relativement simple, elle repose sur le même principe pour modéliser tous les phénomènes non linéaires de la batterie à savoir des LUT qui relient des tensions de boucles distinctes. En revanche, cette simplicité se heurte à une complexité de calcul inhérente à la méthode. Le nombre de boucles augmente avec les effets implémentés, ce qui engendre des temps de simulations longs et des problèmes de convergence éventuels pour les gros circuits.

### 4.3. Le modèle électrique évolué de la batterie :

Plus récemment en 2006, un modèle qui se base en partie sur les différentes approches détaillées précédemment, a été proposé [48]. Les deux principaux avantages du modèle sont :

1. Sa simplicité par rapport au modèle basé sur le temps de fonctionnement de la batterie : uniquement deux circuits comme illustré dans la figure 113 (contre au moins 5 circuits dans le modèle Gold)
2. Sa précision. L'erreur sur l'estimation de la durée de vie de la batterie est de 0.12% selon l'auteur contre 10% d'erreur pour le modèle précédent.

Le modèle est composé des deux boucles suivantes :

- Une boucle responsable de la modélisation de la durée de vie de la batterie. Cette boucle est formée :
  - d'une source de courant  $I_{batt}$  pour charger ou décharger  $C_{capacity}$ ,

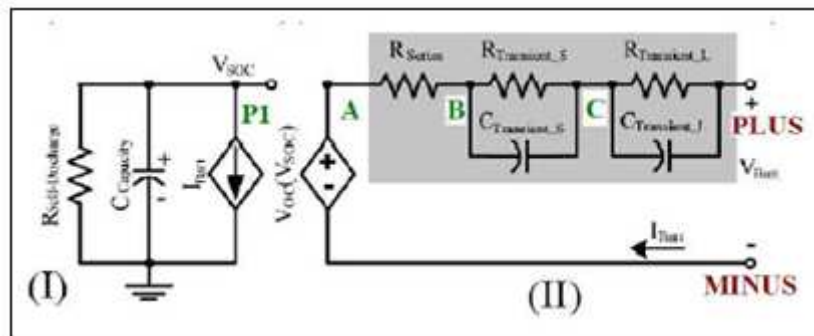


Figure 113: Modèle discret pour tous types de batteries [48]

- d'une capacité  $C_{capacity}$  calculée selon l'équation 5.4 qui caractérise la capacité totale de la batterie,

$$C_{cap} = 3600 \cdot Capacity \cdot f_1(cycle) \cdot f_2(T) \quad (\text{Eq 5.4})$$

Dans l'équation 5.4,  $f_1(\text{cycle})$  et  $f_2(T)$  sont des coefficients de corrections qui varient en fonction du nombre de cycles et de la température. Cependant, dans la pratique, l'auteur a considéré que  $f_2(T) = 1$ , autrement dit, il a négligé l'effet de la température.

- d'une résistance d'autodécharge  $R_{self-Discharge}$  pour caractériser la perte d'énergie quand la batterie est stockée pendant un temps relativement long.

Théoriquement, cette résistance est fonction de la température et du nombre de cycles de charge et de décharge toléré durant la durée de vie de la batterie. Sur le plan pratique, cette variation est très faible donc la résistance est très grande.

- Une deuxième boucle responsable des caractéristiques Courant/Tension de la batterie. Cette boucle est formée :
  - d'une source de tension contrôlée par une tension notée  $V_{oc}$ . Elle est utilisée pour illustrer la relation non linéaire entre la tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  et l'état de charge.
  - d'une résistance série notée  $R_{serie}$ , qui modélise la chute de tension instantanée dès la fermeture du circuit.
  - et de deux circuits RC composés de  $R_{transientS}$ ,  $C_{transientS}$ ,  $R_{transientL}$  et  $C_{transientL}$  pour modéliser les temps de réponse long et court de la décharge de la batterie comme montrée dans la figure 114. Dans la phase de changement d'état de courant de charge ou de décharge, la tension de sortie de la batterie répond lentement alors qu'elle répond plus rapidement à un courant constant d'où l'utilisation de deux constantes de temps différentes.

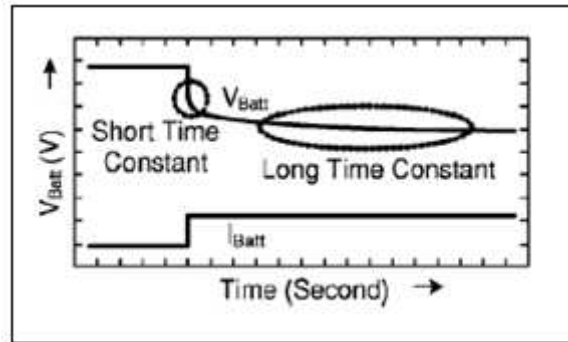


Figure 114: Réponse transitoire à un courant de décharge impulsionnel [48]

Selon l'auteur, les mesures expérimentales ont montré que l'utilisation de deux constantes de temps au lieu de trois ou d'une seule présente le meilleur compromis entre précision et complexité (donc temps de simulation). Il a ainsi obtenu 1 mV d'erreur sur toutes les courbes obtenues par simulation par rapport à celles obtenues expérimentalement. C'est pour cette raison qu'il est intéressant de retenir cette technique de modélisation des batteries.

#### 4.4. Le modèle en VHDL-AMS :

Le modèle VHDL-AMS est un modèle fonctionnel conservatif. Deux méthodes sont envisageables pour décrire le modèle de la batterie :

- Utiliser deux blocs fonctionnels : Le premier aura pour fonction la description des caractéristiques courant/tension de la batterie tandis que le deuxième aura pour rôle de déterminer sa durée de vie.
- Adopter une modélisation structurelle formée d'éléments électriques. Chaque composant aura en revanche une description comportementale.

Le modèle structurel est une connexion entre les différents sous blocs de la batterie. Il a comme paramètres globaux l'état de charge initial  $V\_SOC\_INIT$  (témoignant de l'état de charge initial de la batterie) et la température de celle-ci. Pour une meilleure portabilité, les différents paramètres des sous blocs sont passés en paramètres globaux (en "generic" de l'entité "bat"). Ici, ils sont gardés en paramètres locaux pour une meilleure lisibilité. Les différentes assertions correspondent à des erreurs qui ont pour rôle d'avertir l'utilisateur qu'il ne respecte pas les consignes de charge et de décharge maximales et minimales ainsi que les marges de température tolérées. Ces paramètres sont à adapter selon les consignes du constructeur. L'utilisateur non spécialiste n'a pas à se soucier de l'implémentation de chaque sous bloc. Il suffira qu'il affecte à chaque paramètre, celui qui correspond à sa batterie (le paramètre obtenu par interpolation polynomiale suite à une extraction à partir des résultats expérimentaux) [49].

Les modèles sont détaillés en annexe.

4.5. Résultat de la simulation :

La figure 115 montre une simulation de ce modèle avec deux courants de décharge différents. Les courbes obtenues sont des courbes de décharge typiques avec des temps de décharge en fonction du courant appliqué. Plus le courant est élevé plus le temps de décharge est court.

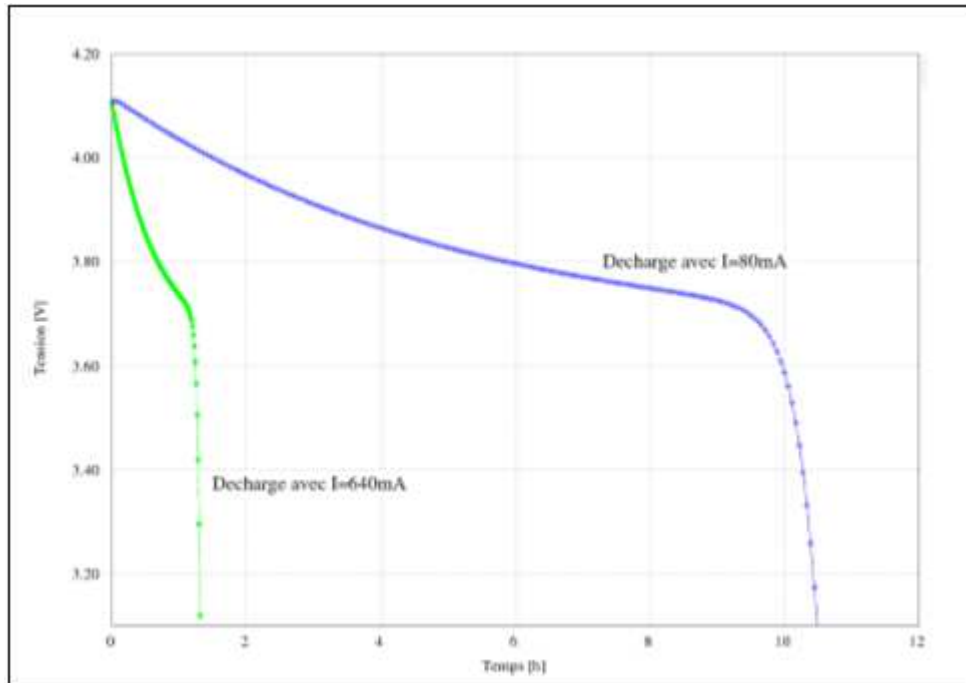


Figure 115: Résultat de la simulation de la batterie PL-383562 avec deux profils de courant constants [48]

Ces résultats valident le modèle proposé et montre que l'on peut concevoir des modèles paramétrables de batteries.

5. L'antenne et le canal de propagation :

Hormis la batterie, nous proposons aussi un modèle pour le canal de propagation.

Le canal de propagation qui contient les effets de transmission et de réception des antennes ainsi que les effets de propagation est modélisé par un bloc de gain idéal avec en plus un bruit blanc gaussien. Le bruit blanc est le plus utilisé en modélisation malgré le fait qu'il y ait bien évidemment d'autres interférences dans le cas réel d'une transmission RF [50] [51].

6. Le microcontrôleur et le bus SPI :

Nous avons aussi modélisé le microcontrôleur et le bus SPI.

Les codes pour le microcontrôleur et le bus SPI sont également détaillés en annexe.

Le microcontrôleur a été modélisé sous forme d'une machine à état. En effet, malgré sa complexité et les nombreuses fonctionnalités dont il dispose, pour le moment, on envoie juste une trame correspondant au numéro de série du tag.

Nous avons commencé à construire la base de données qui contiendra tous les composants nécessaires à la modélisation système de différents applicatifs.

La figure 116 montre l'état des schémas blocs à l'heure d'aujourd'hui.

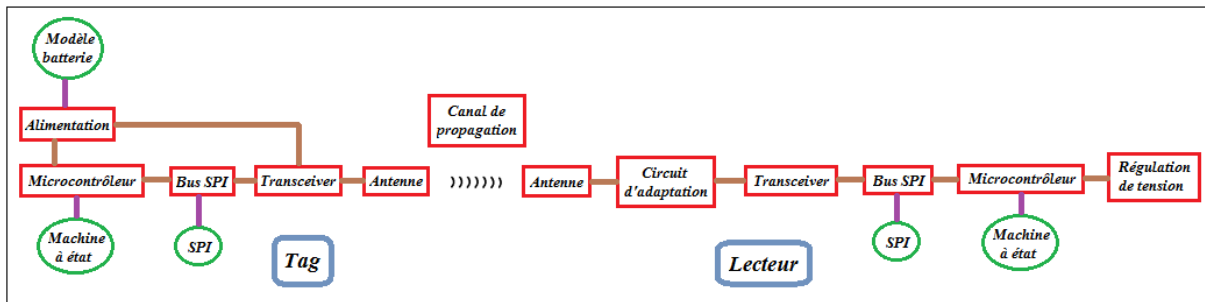


Figure 116: Modélisation de certains composants

## 7. Utilisation des modèles :

A l'aide de modèles que nous avons commencé à décrire, nous pouvons alimenter une base de données qui contiendra le modèle et ses paramètres. Le rôle de cette base de données est d'être interrogée en s'appuyant sur le modèle du système, et ceci composant par composant. Une fois qu'un modèle composant satisfait aux exigences du modèle du système, il est instancié dans le modèle système.

## 8. Conclusion :

Maintenant que nous avons proposé une méthodologie qui peut être utilisée dans la conception des cartes au format bancaire au sein d'UINT, il faut discuter de sa faisabilité réelle étant donné que le temps nous a manqué pour aller jusqu'au bout de notre proposition.

Nous pouvons distinguer trois niveaux de validation afin de rendre viable notre méthodologie :

- Au niveau du modèle : il faut vérifier que tous les composants peuvent être modélisés, simulés et validés. Ce domaine connaît de perpétuelles avancées et de nouveaux outils de simulation voient le jour. Aujourd'hui on est capable de modéliser des composants de tous les domaines grâce à des langages comme VHDL-AMS.
- Au niveau de la requête : il s'agit ici de réaliser des requêtes de bases de données en s'appuyant sur des langages type SQL. Nous avons vu qu'il est possible de créer des modèles de nos composants multidomains, il s'agit ici de les classer et d'en extraire les paramètres pertinents afin de réaliser notre base de données.
- Au niveau du système : le modèle système doit permettre une interrogation de la base de données des modèles des composants. Ceci peut être rédigé avec des langages de type UML [52]. Une fois la base de données interrogée et les modèles de composants identifiés, une simple transformation de modèles [53] permettra de générer automatiquement un modèle VHDL-AMS du système.

Notre proposition doit bien sûr être validée par une mise en pratique, ce qui est l'une des perspectives de ces travaux de thèse.

*Conclusion*  
*et*  
*perspectives*

Nous avons durant ces travaux de thèse conçu un système intégré complet dans une carte au format bancaire respectant la norme ISO 7810, et participé à la conception d'un second système. Ce qui au démarrage de cette thèse était inexistant et difficilement réalisable du fait des contraintes relatives à ce format.

C'est à notre connaissance deux réalisations qui sont à l'état de l'art à la date d'écriture de ce manuscrit.

Pour concevoir et réaliser ces systèmes, nous avons commencé par lister leurs contraintes en terme de consommation, géométrie et communication.

Nous avons présenté l'applicatif de la serrure pour vélo électrique et fait un état de l'art des produits qui existent sur le marché. Nous avons pu constater qu'il n'existait aucun tag actif au format carte bancaire et aux normes ISO 7810.

Nous avons présenté les résultats des tests nécessaires au choix des composants et à la compréhension du système en terme de batteries et d'antennes et présenté un applicatif réalisé pour le domaine de la biométrie où ces tests ont joué un rôle important pour le choix de la batterie et de l'antenne.

Nous avons ensuite présenté les étapes de conception et de réalisation du tag actif au format carte bancaire avec deux solutions proposées. La première n'a pas été validée car elle ne satisfaisait pas les contraintes imposées par le cahier des charges. La deuxième a quant à elle été validée après une série de tests et utilise une fréquence de 2,45GHz jamais utilisé jusqu'alors dans ce type d'applicatifs.

En vue du temps et des ressources passés dans l'élaboration et la validation de cet applicatif, nous avons mis en avant la nécessité d'avoir une méthodologie de conception. Nous avons présenté notre proposition de méthodologie inspirée de la méthode APBD et basée sur la construction d'une base de données qui contient des modèles de composants validés que l'on peut choisir à l'aide de paramètres définis par le flux système.

Nous n'avons malheureusement pas pu aller au bout de la mise en pratique de la méthodologie.

Nous proposons deux approches en ce qui concerne les perspectives.

Une approche niveau produit où l'on peut améliorer le tag et le lecteur actuels soit en intégrant d'autres composants ou en changeant certains comme la batterie par exemple afin d'augmenter les performances du tag ainsi que sa durée de vie. Nous pouvons même envisager l'intégration d'une batterie rechargeable. Nous pouvons aussi étudier l'intégration d'un protocole anti-collision qui a commencé à faire l'objet d'une étude afin d'éviter les risques de perturbation avec d'autres tags et également intégrer des protocoles de sécurisation pour d'autres applications futures telles que dans le domaine bancaire.

Une approche niveau méthodologie où il faudrait finaliser les modèles des composants, les simuler et les valider afin de construire une première base de données. Et également définir les paramètres de choix qu'utilisera le système. Pour finir par une mise en pratique.

En ce qui concerne la finalisation des modèles, si nous prenons l'exemple du microcontrôleur qui a été modélisé par une simple machine à état, niveau de description suffisant en première approche. Il serait intéressant de s'y intéresser plus en détails et de faire un modèle qui inclut tous les blocs qui le constituent en terme de CPU, périphériques, horloge... Mais également de faire une étude sur la consommation et l'influence de chacun des blocs dans la consommation.

On peut également envisager d'améliorer les bancs de tests qui ont notamment servis lors des études concernant les batteries et les antennes. Pour les batteries, il serait intéressant de reprendre la conception d'un circuit spécifique dédié à la décharge et la charge des batteries et de définir des profils, soit de décharge soit de charge, adaptées à nos batteries et qui prennent en compte les paramètres tels que la température. Il serait également intéressant d'investiguer des méthodes de recharge qui s'appuieraient soit sur de l'énergie solaire en intégrant par exemple des panneaux photovoltaïques minces et flexibles ou de l'énergie provenant du champ magnétique produit lors d'une communication RFID par exemple.

Pour les antennes, il serait judicieux d'investiguer tous les autres paramètres qui peuvent influencer sur la fréquence de résonance et de faire une étude complète incluant l'influence des inductances mutuelles des pistes.

La clé conçue a été spécialement dédiée à une application donnée qui est la serrure d'un vélo électrique mais on peut très bien envisager d'autres utilisations, telles que la reconnaissance de personnes ou de biens et l'adapter soit en changeant le design, le programme ou les deux.





# *Bibliographie*

- [1] : *The voice of the smart security industry*. Eurosmart. Brussels, 25 April 2012.
- [2] : *Rapport 2010*. Observatoire de la sécurité des cartes de paiement. Banque de France, Annexe D.
- [3] : Global Payment Cards Data and Forecasts 2012-2018, IdeTechEx. <http://www.idtechex.com>
- [4] : Loukil R (2013). Menaces sur les cartes à puce. *Usine Digitale* [en ligne]. <http://www.usine-digitale.fr/article/menaces-sur-la-carte-a-puce-francaise.N194634>
- [5] : UINT. About UINT [en ligne]. <http://www.uint.fr/Company/index.html>
- [6] : Bouchhima A. Modélisation du logiciel embarqué à différents niveaux d'abstraction en vue de la validation et la synthèse des systèmes monopuces. Thèse de l'INP de Grenoble. Mai 2006.
- [7] : Warwick D. Identification cards – Physical characteristics. ISO/IEC. Juin 2006.
- [8] : Droz F. Methods for making cards. NagraIDSA. Novembre 2004.
- [9] : Durou H. Vers l'autonomie énergétique des réseaux de capteurs embarqués : conception et intégration d'un générateur piézoélectrique et d'un micro dispositif de stockage capacitif en technologie silicium. Thèse de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III. Décembre 2010.
- [10] : Senn E, Chillet D, Zendra O, Belleudy C, Ben Atitallah R, Fritsch F, Samoyeau C. Open-People: an Open Platform for Estimation and Optimizations of energy consumption. Design and Architectures for Signal and Image Processing Conference, DASIP, 23-25 Octobre 2012. Karlsruhe, Allemagne.
- [11] : Parain F, Banâtre M, Cabilic G, Higuera T, Issarny V, Lesot JP. Techniques de réduction de la consommation dans les systèmes embarqués temps-réel. Rapport de recherche INRIA. Mai 2000.
- [12] : Ben Fradj H, Belleudy C, Auguin M, Pegatoquet A. Multi-Bank Memory Allocation for Multimedia Application. 2006 IEEE.
- [13] : Franger S. Les batteries Li-ion, vers un stockage efficace de l'énergie. Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay. Conférence du 21 Mars 2013.
- [14] : Lazzari O. Les accumulateurs lithium-ion au Japon. Dépêche, service pour la science et la technologie, ambassade de France au Japon. Juillet 2006.
- [15] : Ammar Y. Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystèmes autonomes. Thèse de l'Université Joseph Fournier de Grenoble. Février 2006.
- [16] : Larrue P. La coordination des activités de recherche et d'innovation dans les phases d'émergence : le cas des batteries pour véhicules électriques et hybrides. Thèse de l'Université Montesquieu Bordeaux IV. Mai 2000. 447 pages.
- [17] : Marais C. Avancées récentes pour les batteries lithium-ion : à la recherche d'une batterie durable à forte capacité et à charge rapide [en ligne]. Bulletins Electroniques. Juillet 2013. <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/73406.htm>
- [18] : Historique de la RFID [en ligne]. Le CNRFID, de l'innovation au déploiement de solutions RFID et NFC. <http://www.centrenational-rfid.com/introduction-a-la-rfid-article-15-fr-ruid-17.html>

- [19] : Costa L. L'identification par radiofréquence et la protection des données à caractère personnel. Mémoire de Master de l'Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne. 2008
- [20] : Romain O, Garda P, Flecher E, Karouia M, Leprince P, Lagree P.-Y, Destrade M. Endocom : "Wireless communicative stent for follow-up of abdominal aortic aneurysm", Biomedical Circuits and Systems Conference, 2006. IEEE BioCAS 2006.
- [21] : Paret D. Applications en identification radiofréquence et cartes à puce sans contact. Technologie Electronique. Dunod 2003. 409 pages.
- [22] : Harrop P, Das R. RFID Forecasts, Players and Opportunities 2012 – 2022. IDTechEx. Mars 2013. 256 pages.
- [23] : Clapaud A, Dibar E, Mathieux B. RFID : Quatre secteurs en pointe dans l'adoption des étiquettes électroniques. 01Informatique. 2006. P20-27.
- [24] : Paret D. RFID en ultra et super hautes fréquences :UHF – SHF, théorie et mise en œuvre. Dunod/L'Usine Nouvelle. 2008. 496 pages.
- [25] : Ghiotto A. Conception d'antennes de tags RFID UHF, application à la réalisation par jet de matière. Thèse de l'institut polytechnique de Grenoble. Novembre 2008.
- [26] : Electric Two-Wheel Vehicles. PikeResearch. Février 2010.
- [27] : Harrap P, Das R. Active RFID and sensor networks 2011 – 2021, Forecasts, Players, Opportunities. IDTechEx. Juin 2011. 328 pages.
- [28] : Produits de la RFID active de chez ELA [en ligne]. <http://ela.fr/index.php?pagendx=80>
- [29] : Produits de la RFID active de chez Ingecom. Axem Technology [en ligne]. <http://www.axemtec.com/produit/>
- [30] : Tag actif de chez Newsteo [en ligne]. <http://www.newsteo.com/gb/data-logger/features/active-RFID-tag.php>
- [31] : Report of China. 2011 CJK RFID Industry development Report. June 2011.
- [32] : China's RFID market to hit RMB 32 bln in 2013. China Knowledge [en ligne]. Juin 2013. <http://www.chinaknowledge.com/Newsires/NewsDetail.aspx?type=1&NewsID=51914>
- [33] : Jacques C. Identifying Growth and Threat in China's Emerging RFID Ecosystems. Lux Research. Mars 2013.
- [34] : Produits de la RFID active en Chine [en ligne]. Shenzhen Academy of Aerospace Technology SZAAT. <http://szaatrfid.en.china.cn/op/CorpInfo/index.htm>
- [35] : UINT. News/Press [en ligne]. <http://uint.fr/Press/index.html>
- [36] : The folded dipole antenna. Antenna Theory [en ligne]. <http://www.antenna-theory.com/antennas/foldeddipole.php>
- [37] : Huchard M. Caractérisation et conception d'antennes isotropes miniatures pour objets communicants. Thèse de l'institut national de Grenoble. Février 2007.

- [38] : The Inverted-F Antenna. Antenna Theory [en ligne]. <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/ifa.php>
- [39] : Benveniste A, Damn W, Sangiovanni-Vincetelli A, Nickovic D, Passerone R, Reinkemeier P. Contracts for the Design of Embedded Systems Part I : Methodology and Use Cases. INRIA/IRISA, Rennes. 2012.
- [40] : Sun X. Compositional Design of Analog Systems Using Contracts. University of California of Berkeley. Mai 2011.
- [41] : Mohne T. Efficient Modelling and Simulation Methodology for the Design of Heterogeneous Mixed-Signal Systems on Chip. Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Avril 2011.
- [42] : Cenni F. Modélisation à haut niveau de systèmes hétérogènes interfaçage analogique/numérique. Thèse de l'Université de Grenoble. Avril 2012.
- [43] : Khouri R. Modélisation comportementale en VHDL-AMS du lien RF pour la simulation et l'optimisation des systèmes RFID UHF et micro-ondes. Thèse de l'INP de Grenoble. Mai 2007.
- [44] : Iguermia A, Nbahedda B. VHDL-AMS : Un Atout Pour la Conception des Systèmes Microélectroniques Analogiques – Numériques. Ecole Polytechnique de Montréal. 2003.
- [45] : Vachoux A. Modélisation de Systèmes Intégrés Analogiques et Mixtes, Introduction à VHDL-AMS. EPFL. 2002.
- [46] : GUIHAL D. Modélisation en langage VHDL-AMS des systèmes pluridisciplinaires. Thèse de l'Université Toulouse III. Mai 2007.
- [47] : Zenati A. Modélisation et simulation de microsystèmes multidomains à signaux mixtes : vers le prototypage virtuel d'un microsystème autonome. Thèse de l'Université Joseph Fournier de Grenoble. Octobre 2007.
- [48] : Boussetta H. Modélisation multi-physique et simulation globale de systèmes autonomes sur puce. Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble. Février 2010.
- [49] : Chen M, Rincon-Mora G. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance. IEEE Transactions of Energy Conversion. Volume 21. No 2. Juin 2006.
- [50] : Nikitin P, Normark E, Wakayama C, Shi R. VHDL-AMS modeling and simulation of BPSK transceiver system. University of Washington, Department of Electrical Engineering. 2004.
- [51] : Milet-Lewis N, Monnerie G, Fakhfakh A, Geoffroy D, Herve Y, Levi H, Charlot J-J. A VHDL-AMS Library of RF Blocks Models. IXL laboratory. Université de Bordeaux 1. 2002.
- [52] : Vidal J, de Lamotte F, Gogniat G, Soulard P, Diguët J.-P. Design MopCom : "A co-design approach for embedded system modeling and code generation with UML and MARTE". Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2009. DATE '09.
- [53] : Piel E, Ben Atitallah R, Marquet P, Meftali S, Niar S, Etien A, Dekeyser JL, Boulet P. GaspardII : "Gaspard2: from MARTE to SystemC Simulation".

# *Annexes*

---

**VHDL-AMS for SPI**

```

-----
-- SPI_PHY
-----
-- This entity serializes data sent to the bus and parallelizes data
-- received from the bus. It "talks" to other devices using standard
-- SPI protocol, however, bus arbitration must be handled elsewhere
-- (eg. SPI_Controller or other custom entity).
-----
-- KNOWN ISSUES:
-- * Currently only works for polarity=0, phase=1
-----

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_arith.all;
library lpm;
use lpm.lpm_components.all;

entity SPI_PHY is
generic
(
    data_width : positive := 8;
    rising_edge_triggered : positive := 1
);
port
(
    -- Control Signals
    clock, load : in std_logic;

    -- Data Register (put TX data in here before transmission,
    -- read RX data from here after transmission)
    dataTX : in std_logic_vector(data_width-1 downto 0);
    dataRX : out std_logic_vector(data_width-1 downto 0);

    -- SPI Data Interface
    MISO : in std_logic;
    MOSI, SCLK : out std_logic
);
end entity SPI_PHY;

architecture behaviour of SPI_PHY is
begin

    sync_clock : process(clock) is
    begin
        if rising_edge_triggered = 1 then
            SCLK <= clock AND NOT load;
        else
            SCLK <= NOT clock AND NOT load;
        end if;
    end process sync_clock;

    shift_register : lpm_shiftreg
        generic map
        (
            LPM_WIDTH => data_width
        )
        port map
        (

```

```

device          -- MISO - Receives and buffers data bit from slave
device          -- MOSI - Transmits buffered data bit to slave
device          -- LOAD - Load DATA into transmit buffer
                shiftin => MISO,
                load => load,
                data => dataTX,
                clock => clock,
                shiftout => MOSI,
                q => dataRX
                );
end architecture behaviour;

```

```

-----
-- SPI_CONTROLLER
-----
-- This entity passes device driver data to and from the SPI_PHY. It
-- also initializes the clock to synchronize transmission on the bus.
-----
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity SPI_Controller is
generic
(
    data_width : positive := 8
);
port
(
    clock : in std_logic;

    -- Device Driver Interface Signals
    ready : in std_logic;
    load, done : out std_logic;
    driver_tx_data : in std_logic_vector(data_width-1 downto 0);
    driver_rx_data : out std_logic_vector(data_width-1 downto 0);

    -- SPI Bus Control Signals
    SCLK : out std_logic;
    bus_tx_data : out std_logic_vector(data_width-1 downto 0);
    bus_rx_data : in std_logic_vector(data_width-1 downto 0)
    -- SS : out std_logic_vector(num_devices-1 downto 0)
);
end entity SPI_Controller;

```

```

architecture mixed of SPI_Controller is

    TYPE STATE_TYPE IS (wait_for_ready, set_SCLK_high,
                        set_SCLK_low, finished);
    SIGNAL state, next_cycle: STATE_TYPE;

begin

    bus_tx_data <= driver_tx_data;
    driver_rx_data <= bus_rx_data;

    Process_Transmission : process(clock) is

```



```

        variable count : integer;
begin
    IF ready = '0' THEN
        load <= '1';
        SCLK <= '0';
        done <= '0';
        state <= wait_for_ready;
    ELSIF rising_edge(clock) THEN
        CASE state IS
            -- Load Shift Registers and Prepare for
Transmission
            WHEN wait_for_ready =>
                count := 0;
                state <= set_SCLK_high;

            -- Initialize Clock (one extra clock added
for loading data)
            WHEN set_SCLK_high =>
                SCLK <= '1';
                -- Check if all data bits have been
sent
                IF count = data_width THEN
                    next_cycle <= finished;
                    -- If data bits remain send the next
bit
                ELSE
                    count := count + 1;
                    next_cycle <= set_SCLK_high;
                END IF;
                state <= set_SCLK_low;

            -- Inform Controller Transmission is complete
            WHEN finished =>
                done <= '1';

            -- Pull SCLK Low to Complete Clock Cycle
            WHEN set_SCLK_low =>
                SCLK <= '0';
                load <= '0';
                state <= next_cycle;

        END CASE;
    END IF;

end process;

end architecture mixed;

```

---

**VHDL-AMS for Battery**


---

```

ENTITY Battery_CHAR IS
GENERIC
(
    N          : REAL := 0.0 ; -- Nombre de cycles de charge /décharge
    V_soc_inti : REAL := 0.0 ; -- Etat de charge initial
);

PORT
(
    TERMINAL PLUS, MINUS : ELECTRICAL ;
    QUANTITY I_OC : OUT REAL := 0.0 ;
    QUANTITY VSOC_IN : In REAL := 0.0
);

END ENTITY Battery_CHAR ;

ARCHITECTURE arch_Battery_CHAR OF Battery_CHAR IS

    TERMINAL A, B, C : ELECTRICAL ;
    QUANTITY Voc ACROSS loc THROUGH A to MINUS ; -- 2
    QUANTITY V_R_series ACROSS I_R_series THROUGH B TO A ; -- 3
    QUANTITY V_transient_S ACROSS I_R_transient_S, I_C_transient_S THROUGH C TO B ; -- 5
    QUANTITY V_transient_L ACROSS I_R_transient_L, I_C_transient_L THROUGH PLUS TO C ; -- 7
    QUANTITY R_transient_S, R_transient_L := REAL := 0.0 ;
    QUANTITY C_transient_S, C_transient_L, R_series : REAL := 0.0 ;

BEGIN
--Initialisation des différentes capacités utilisées dans le modèle
    BREAK V_transient_S => 0.0 ;
    BREAK V_transient_L => 0.0 ;
--Calculs des paramètres dépendant de l'état de charge de la batterie
    Voc          == (-1.031 * EXP(-35.0*VSOC_IN)) + 3.6850 + 0.2156*VSOC_IN -
(0.1178*(VSOC_IN**2)) + (0.3201*(VSOC_IN**3)) ;
    R_series      == 0.1562 * EXP(-24.37*VSOC_IN) + 0.07446 ;
    R_transient_S == 0.3208 * EXP(-29.14*VSOC_IN) + 0.04669 ;
    C_transient_S == -752.9 * EXP(-13.51*VSOC_IN) + 703.6 ;
    R_transient_L == 6.603 * EXP(-155.2*VSOC_IN) + 0.04984 ;
    C_transient_L == -6056.0 * EXP(-27.12*VSOC_IN) + 4475.0 ;
--Calculs des tensions de capacités
    I_C_transient_S == C_transient_S * V_transient_S'DOT ;
    I_C_transient_L == C_transient_L * V_transient_L'DOT ;
--Les lois d'Ohm
    V_R_series == R_series * I_R_series tolerance « voltage_battery » ;

```

```
V_transient_S == I_R_transient_S * R_transient_S tolerance « voltage_transient » ;  
V_transient_L == I_R_transient_L * R_transient_L tolerance « voltage_transient » ;  
I_OC == IOC ;
```

```
END ARCHITECTURE arch_Battery_CHAR ;
```

---

```
ENTITY Battery_LIFE_TIME IS
```

```
GENERIC
```

```
(
```

```
    V_soc_init          : REAL := 0.0 ; --Etat de charge initial de la batterie  
    Rself_discharge     : REAL := 1.0 e 10 ; -- Resistance de décharge  
    N                   : REAL := 0.0 ; -- nombre de cycles de charge/décharge  
    CAPACITY            : REAL := 1.25 ;  
    f1                  : REAL := 1.0 ; -- coefficient de correction en fonction du nombre des  
cycles  
    f2                  : REAL := 1.0 ; -- coefficient de correction en fonction de la  
température  
);
```

```
PORT
```

```
(
```

```
    QUANTITY I_in       : IN REAL := 0.0 ;  
    QUANTITY V_SOC_OUT : OUT REAL := 0.0
```

```
);
```

```
END ENTITY Battery_LIFE_TIME ;
```

```
ARCHITECTURE arch_Battery_LIFE_TIME OF Battery_LIFE_TIME IS
```

```
    TERMINAL P1 : ELECTRICAL ;  
    QUANTITY V_soc ACROSS Icapacity, Ibatt TROUGH P1 ;  
    CONSTANT C_capacity : REAL := 3600.0*CAPACITY*f1*f2 ;  
    BEGIN  
        Break V_SOC => V_soc_init ;  
        Icapacity == C_capacity* V_SOC' dot ;  
        Ibatt == I_in ;  
        V_SOC_OUT == V_SOC ;
```

```
END ARCHITECTURE arch_Battery_LIFE_TIME ;
```

---

```
Librray ieee, work ;
```

```
    use ieee.electrical_systems.all ;  
    use ieee.fundamental_constants.all ;  
    use ieee.std_logic_1164.all ;
```

```
use ieee.math_real.all ;

entity battery_test is
end entity battery_test ;

architecture top of battery_test is
    terminal node1 : electrical ;
    Quantity V across Iload through node1 to ground ;
    QUANTITY IOC, VSOC : REAL := 0.0 ;
begin
    Iload == 0.08 ;

    bat1 : entity work.Battery_LIFE_TIME(arch_Battery_LIFE_TIME)
        port map (
            I_in => IOC,
            V_SOC_OUT => VSOC
        ) ;
    bat2 : entity work.Battery_CHAR(arch_Battery_CHAR)
        port map(
            PLUS => node1,
            MINUS => ground,
            I_OC => IOC,
            VSOC_IN => VSOC
        ) ;
end architecture top ;
```