



**HAL**  
open science

# Fiabilité et analyse de défaillance des tags RFID UHF passifs sous contraintes environnementales sévères.

Sanae Taoufik

► **To cite this version:**

Sanae Taoufik. Fiabilité et analyse de défaillance des tags RFID UHF passifs sous contraintes environnementales sévères.. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Normandie Université; Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 2018. Français. NNT : 2018NORMR009 . tel-01852572

**HAL Id: tel-01852572**

**<https://theses.hal.science/tel-01852572>**

Submitted on 2 Aug 2018

**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.



Normandie Université

# THÈSE EN CO - TUTELLE INTERNATIONALE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité **PHYSIQUE**

Préparée au sein de **Université de Rouen Normandie**  
et de **Université Abdelmalek Essaadi de Tetouan**

**Fiabilité et analyse de défaillance des tags RFID UHF passifs sous contraintes environnementales sévères.**

Présentée et soutenue par  
**Mme Sanae TAOUFIK**

Thèse soutenue publiquement le (date de soutenance)  
devant le jury composé de

Mr Yassin Laaziz	Professeur Université Abdelmalek Essaadi, ENSA de Tanger, Maroc	Rapporteur
Mr Pierre Lecoy	Professeur École centrale de Paris France	Rapporteur
Mr Ali El Moussati	Professeur Université Mohammed Premier, Oujda Maroc	Rapporteur
Mme Catherine Algani	Professeur CNAM Paris, France	Examinatrice
Mme Noura Aknin	Professeur Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc	Examinatrice
Mr Pascal Dherbécourt	Maître de conférence - HDR, Université de Rouen Normandie, France	Co-directeur France
Mr Ahmed El Oualkadi	Professeur ENSA de Tanger, Maroc	Co-directeur Maroc
Mr Farid Temcamani	Professeur ENSEA Paris, France	Co-encadrant France

## Thèse dirigée par

M. **Pascal Dherbécourt**  
M. **Ahmed El Oualkadi**  
M. **Farid Temcamani**

Université de Rouen Normandie  
Université Abdelmalek Essaadi Tetouan  
ENSEA de Cergy-Pontoise

Université de Rouen Normandie



Logo École Doctorale



Logo Laboratoire



Université Abdelmalek Essaadi



Logo Établissement



Logo École Doctorale

Centre des Etudes Doctorales :  
« Sciences et Techniques de l'Ingénieur »

Logo Laboratoire

LabTIC  
Laboratoire des Technologies  
de l'Information & de la Communication

code diplôme SISE	LIBELLE
4200001	MATHEMATIQUES
4200002	PHYSIQUE
4200003	CHIMIE
4200004	MATHEMATIQUES APPLIQUEES ET SCIENCES SOCIALES
4200005	SCIENCES DE L'UNIVERS
4200006	ASPECTS MOLÉCULAIRES ET CELLULAIRES DE LA BIOLOGIE
4200007	PHYSIOLOGIE ET BIOLOGIE DES ORGANISMES - POPULATIONS - INTERACTIONS
4200008	RECHERCHE CLINIQUE, INNOVATION TECHNOLOGIQUE, SANTÉ PUBLIQUE
4200009	SCIENCES AGRONOMIQUES, BIOTECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES
4200010	MEDECINE
4200011	ODONTOLOGIE
4200012	PHARMACIE
4200013	STAPS
4200014	MÉCANIQUE DES FLUIDES, ÉNERGÉTIQUE, THERMIQUE, COMBUSTION, ACOUSTIQUE
4200015	MÉCANIQUE DES SOLIDES, GÉNIE MÉCANIQUE, PRODUCTIQUE, TRANSPORT ET GÉNIE CIVIL
4200016	GENIE CIVIL
4200017	GENIE DES PROCEDES
4200018	INFORMATIQUE
4200019	GENIE ELECTRIQUE
4200020	ELECTRONIQUE, MICROÉLECTRONIQUE, OPTIQUE ET LASERS, OPTOELECTRONIQUE MICROONDES
4200021	SCIENCES ET TECHNOLOGIE INDUSTRIELLES
4200022	SCIENCES DU LANGAGE - LINGUISTIQUE
4200023	LANGUES ET LITTERATURES ANCIENNES
4200024	LANGUES ET LITTERATURES FRANCAISES
4200025	LITTERATURE GENERALE ET COMPAREE
4200026	ARTS PLASTIQUES, MUSICOLOGIE
4200027	FRANCAIS, LANGUE ETRANGERE
4200028	LANGUES ET LITTERATURES ETRANGERES
4200029	LANGUES ETRANGERES APPLIQUEES
4200030	CULTURES ET LANGUES REGIONALES
4200031	PHILOSOPHIE, EPISTEMOLOGIE
4200032	HISTOIRE, HISTOIRE DE L'ART ET ARCHEOLOGIE
4200033	GEOGRAPHIE
4200034	AMENAGEMENT
4200035	ARCHEOLOGIE, ETHNOLOGIE, PREHISTOIRE
4200036	SCIENCES RELIGIEUSES
4200037	PSYCHOLOGIE
4200038	SOCIOLOGIE, DEMOGRAPHIE
4200039	SCIENCES DE L'EDUCATION
4200040	SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION
4200041	SCIENCES JURIDIQUES
4200042	SCIENCES POLITIQUES
4200043	SCIENCES ECONOMIQUES
4200044	SCIENCES DE GESTION
4200045	ADMINISTRATION ECONOMIQUE ET SOCIALE (AES)
4200046	AUTOMATIQUE, SIGNAL, PRODUCTIQUE, ROBOTIQUE
4200047	SCIENCES DE LA VIE ET DE LA SANTE



## *Dédicaces*

*A MON TRÈS CHER MARI ADIL*

*Merci d'être toujours à mes côtés, par ta présence,  
par ton amour et ta compréhension.*

*Ton encouragement et ton soutien étaient ma batterie  
dans les moments pénibles et difficiles.*

*En témoignage de mon amour, de mon admiration et de ma grande affection, je te  
prie de trouver dans ce travail l'expression  
de mon estime et mon sincère attachement.*

*Puisse Dieu nous préserver du mal, nous combler de santé, de bonheur et nous  
procurer une longue vie pour le service de Dieu.*

*A MA PETITE PERLE JANA*

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...*

*Tous les mots ne sauraient exprimer l'amour....*

*Bref, tu es la joie de ma vie.*

*J'espère que ma thèse sera pour toi source de fierté et qu'elle sera un  
exemple à suivre.*

*Ta joie de vivre et ton sourire ont été pour moi le meilleur  
encouragement que je puisse avoir.*

*Que Dieu te garde et te protège.*

## *A MES TRÈS CHÈRES PARENTS*

*Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur  
juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte.*

*Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'études,  
de longs mois de distance de votre amour de votre tendresse, de  
longs jours d'apprentissage.*

*Loin de vous, votre soutien et votre encouragement m'ont  
toujours donné la force pour persévérer et pour prospérer  
dans la vie.*

*Chaque ligne de cette thèse chaque mot et chaque lettre vous  
exprime la reconnaissance, le respect, l'estime et le merci  
d'être mes parents.*

*Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain  
et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté  
et ne jamais vous décevoir.*

## *A MES FRÈRES ET SŒURS*

*Veillez trouvez dans ce travail un modeste témoignage de mon admiration et toute ma gratitude, de mon affection la plus sincère et de mon attachement le plus profond.*

## *A MES TRÈS CHÈRES BEAUX PARENTS*

*Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'avez offert depuis mon mariage, de tous les sacrifices que vous vous êtes imposés pour assurer notre vie de couple et notre bien être.*

*Vous restez pour moi le symbole d'un amour original et d'une parenté idéale.*

*J'espère toujours être à la hauteur de ce que vous attendez de moi, et ne jamais vous décevoir.*

## *À TOUTE LA FAMILLE TAOUFIK ET DALLLOULI*

*Je cite en particulier mon beau oncle et ma belle tante Abdellatif dallouli et bernadette dallouli.*

# Remerciements

Tout d'abord je voudrais remercier Mr Yassine Laaziz d'avoir accepté de juger mes travaux de thèse et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

J'exprime mes sincères gratitude à Mr Pierre Lecoy et Mr Ali Elmoussatti d'avoir accepté de relire cette thèse et d'en être rapporteurs. La version finale de ce mémoire a bénéficié de leur lecture très attentive et de leurs remarques précieuses.

Je remercie sincèrement Mme Catherine Algani et Mme Noura Aknin pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux en acceptant de les examiner et aussi d'avoir assister à ma soutenance.

Je voudrais remercier également Mr Abdellah Idrissi d'avoir accepté d'assister à ma soutenance et d'honorer par ses jugements mon travail de thèse.

Je remercie tout particulièrement mes directeurs de thèse Ahmed El Oualkadi et Pascal Dherbécourt, qui m'ont dirigé tout au long de ces années de thèse. Ils ont toujours été disponibles, à l'écoute de mes nombreuses questions, et se sont toujours intéressés à l'avancée de mes travaux. Les nombreuses discussions fructueuses que nous avons eues ainsi leurs conseils qui ont contribué au résultat final de ce travail. Leurs rigueurs, et leurs très nombreuses connaissances m'ont permis de progresser et ont répondu à plusieurs de mes préoccupations. Enfin, leurs nombreuses relectures et corrections de cette thèse ont été très appréciables. Cette thèse leur doit beaucoup. Pour tout cela merci.

Je remercie Farid Temcamani d'avoir co-encadré ce travail de thèse c'est également grâce à sa collaboration que j'ai eu la chance de bénéficier des ressources du laboratoire Quartz. Au cours de ce travail, il m'a consacré beaucoup de temps pour relire mes articles et ce mémoire, entre-autres pour s'occuper de l'organisation du jury de thèse coté France.

Je remercie également tous les thésards du laboratoire TIC de l'ENSAT de Tanger et ceux du GPM de Rouen et les autres membres des deux laboratoires, notamment ceux avec qui j'ai eu l'occasion de travailler et les autres simplement pour les bons moments partagés.

Pour tous mes amis qui m'ont apporté leur soutien moral pendant ces années d'études, je les en remercie sincèrement.

# Résumé

Ces dernières années, la technologie RFID (identification par radiofréquence) s'est fortement développée dans de nombreuses applications industrielles parmi lesquelles les secteurs de l'aéronautique et l'automobile où il y a une forte demande en systèmes d'auto-identification fonctionnant dans des environnements difficiles. Dans ce contexte, l'objectif de ces travaux de thèse est d'étudier les effets du stockage thermique sur la fiabilité des tags RFID UHF passifs. Pour ce faire nous avons adopté une méthodologie homogène contribuant de façon significative à atteindre nos objectifs. La première étape de cette méthodologie consistait à choisir le tag à tester, deux types de tags Web et Tagueos provenant de deux fabricants différents ont été soumis à des tests de vieillissement accélérés sous différentes températures. La deuxième étape était de définir les paramètres des tests de vieillissement et de caractériser les tags vieillis. À l'aide d'un banc de mesure dédié, la puissance réfléchie par l'ensemble des tags vieillis est mesurée après chaque phase de vieillissement en fonction de la distance entre l'antenne du tag et celle du lecteur RFID. La puissance réfléchie diminue considérablement après chaque phase de vieillissement avec différentes dynamiques de dégradation pour tous les tags vieillis. Cette dynamique de dégradation dépend du type de tag testé et de la température de test. La dernière étape de la méthodologie comportait l'analyse statistique et physique de défaillance, des différences claires dans les modes, les mécanismes et les temps de défaillance entre les tags Web et Tagueos ont été observées. L'analyse physique de défaillance par microscopie optique et MEB a révélé des fissures dans les conducteurs métalliques de l'antenne pour une partie des tags vieillis, cependant pour l'autre partie des tags, aucune défaillance de l'antenne n'a été observée. Des déformations au niveau de la matrice polymère de l'ACP ont été révélées, ce qui a modifié l'adaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne. Des simulations en utilisant le logiciel de modélisation multi-physique COMSOL a été mise en place dans le but de reproduire les mécanismes de défaillances révélés expérimentalement soit au niveau de l'antenne ou de la RFIC. Ces travaux de thèse ont démontré l'importance d'étudier les effets du stockage en haute température sur la fiabilité des tags RFID passifs. Les défaillances sont apparues plus rapidement et les tests ont coûté considérablement moins onéreux par rapport aux autres types de tests de vieillissement accélérés.

**Mots clés :** RFID, Tags passifs, Bande UHF, Fiabilité, Stockage thermique, Analyses statistiques. Analyses physique, Mécanismes de défaillance.

# Abstract

Nowadays, RFID has strongly developed in many industrial applications, including the aeronautics and automotive sectors, where there is a strong demand for auto-identification systems operating in severe environments. In this context, the objective of this thesis is to study the effects of thermal storage on the reliability of passive UHF RFID tags. To achieve this, we adopted a consistent methodology. The first step of this methodology was to choose the tag under test. Two types of tags Web and Tageos from two different manufacturers are aged under high temperatures. The second step was to define the parameters of the aging tests and to characterize the aged tags. Using a dedicated measurement bench, the reflected power is measured after each aging phase for all tested tags to determine the power loss caused by the high temperature storage. Reflected power decrease significantly after each aging phase with different dynamics of degradation for all aged tags. This dynamics of degradation depends on the temperature test and the type of tag. The final step involved statistical and physical failure analysis. Clear differences about modes, mechanisms and failure times between Web and Tageos tags have been observed, it seems that Tageos tags are more reliable than Web tags. Failure analysis of the samples, using an optical microscope and SEM, has revealed, cracks in the antenna metallic conductors on a part of the aged tags. In another part of the tags, no failures in the antenna have been seen, but clear deformations at the polymer matrix of the ACP have been observed, thus changing the impedance matching between the RFIC and the antenna. Simulations using the COMSOL multiphysics software have been implemented in order to reproduce the experimental failure mechanisms. This thesis work has demonstrated the importance of studying the effects of high temperature storage on the reliability of passive RFID tags. Failures appeared faster and tests cost considerably less than other types of accelerated aging tests.

**Key words:** RFID, Passive tags, Reliability, Accelerated life testing, Thermal storage, Statistical analysis, Physical analysis, Failure mechanisms.

# Table des matières

Liste des figures .....	6
Liste des tableaux.....	10
Liste des annexes.....	11
Acronymes.....	12
Introduction générale.....	19
Chapitre 1 : Utilisation de la technologie RFID dans des milieux extrêmes.	
Introduction.....	24
1. Contexte et applications.....	24
1.1. Historique et développement .....	24
1.2. Projection de la technologie RFID dans le futur.....	26
2. Présentation générale de la technologie RFID .....	29
2.1. Principe de fonctionnement des systèmes RFID.....	29
2.1.1. Tags actifs .....	31
2.1.2. Tags semi-actifs .....	32
2.1.3. Tags passifs .....	33
2.2 Expressions théoriques des puissances pour un système RFID UHF passif.....	34
2.3 Protocole de communication .....	37
2.3.1. Liaison montante .....	37
2.3.2. Liaison descendante .....	38
2.4. Fréquences et normes des systèmes RFID.....	39
2.4.1. Fréquences des systèmes RFID .....	40
2.4.2. Normes et protocole RFID .....	41
3. Tags RFID passifs dans un milieu extrême .....	44
3.1. Description et fonctionnement d'un tag passif .....	44
3.2. Composition d'un tag passif .....	46
3.3. Introduction à l'état de l'art .....	47
Conclusion .....	48
Références.....	49
Chapitre 2 : Fiabilité des tags RFID UHF passifs : généralités et méthodologie adoptée.	
Introduction	
1. Caractéristiques probabilistes de la fiabilité .....	54

1.1.	Historique et intérêt de la fiabilité.....	54
1.2.	Fonction de fiabilité .....	55
1.3.	Temps moyen de bon fonctionnement .....	58
1.4.	Facteur d'accélération.....	58
1.5.	Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité .....	59
1.5.1.	Loi log-normal (ou de Galton) .....	59
1.5.2.	Loi exponentielle .....	59
1.5.3.	Loi de Weibull .....	60
1.5.4.	Relation Arrhenius-Weibull .....	60
2.	Les tests de vieillissement accélérés .....	64
2.1.	Tests accélérés.....	64
2.2	État de l'art des tests accélérés sur la RFID.....	66
3.	Méthodologie du travail.....	69
3.1.	Choix du tag à tester .....	70
3.2.	Test en stockage thermique .....	74
3.3.	Analyse statistique et physique de défaillance .....	75
	Conclusion.....	75
	Références.....	77
Chapitre 3 : Développement expérimental : vieillissement et caractérisation.		
	Introduction.....	80
1.	Mise en place d'un banc de mesure de puissance.....	80
1.1.	Description du banc .....	80
1.2.	Mesures temporelles en communication lecteur / tag .....	82
2.	Mise en œuvre de vieillissement accéléré.....	83
3.	Analyse des temps de défaillance .....	84
3.1.	Première série de tests .....	84
3.2.	Analyse des résultats de la puissance réfléchie des tags Web.....	89
3.3.	Analyse des résultats de la puissance réfléchie des tags Tageos.....	94
4.	Analyse statistique des tags Web et Tageos .....	97
	Conclusion.....	104
	Références.....	106
Chapitre 4 : Analyse physique et modélisation des mécanismes de défaillances.		
	Introduction.....	108
1.	Mécanismes de défaillance .....	108

1.1.	Préparation des échantillons .....	108
1.1.1.	Découpe avec la scie à fil .....	109
1.1.2.	Enrobage .....	109
1.1.3.	Polissage manuel .....	111
1.2.	Analyse microscopique .....	111
1.2.1.	Endommagement de l'antenne .....	112
1.2.2.	Endommagement des joints entre l'antenne et le RFIC .....	112
1.2.3.	Endommagement de le RFIC .....	113
1.2.4.	Mécanismes de défaillance à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	113
2.	Modélisation des mécanismes de défaillances des tags .....	114
2.1.	Modélisation de l'endommagement de l'antenne .....	115
2.1.1.	Coefficient de réflexion dans le cas d'endommagement de l'antenne .....	117
2.1.2.	Impédance d'entrée et puissance rayonnée dans le cas d'endommagement de l'antenne .....	118
2.2.	Modélisation de l'endommagement du RFIC .....	120
2.2.1.	Coefficient de réflexion dans le cas d'endommagement du RFIC .....	120
2.2.2.	Impédance d'entrée et puissance rayonnée dans le cas d'endommagement du RFIC .....	122
	Conclusion .....	124
	Références .....	126
	Conclusion générale .....	128
	Annexe 1 : Liste de publications .....	131
	Annexe 2 : Puissance réfléchiée par les tags Web et Tagueos en fonction de la distance .....	132
	Annexe 3 : Puissance modélisée des tags Web et Tagueos en fonction de la distance .....	141
	Annexe 4 : Vues optiques et au MEB .....	147
	Annexe 5 : Définitions .....	150

# Liste des figures

Figure. 1.1. Identification des avions par la RFID durant la seconde guerre mondiale .....	24
Figure. 1.2. Prévision de l'évolution du marché de la RFID dans le monde .....	28
Figure. 1.3. Site de la mine d'or « Goldcorp ». .....	29
Figure. 1.4. Site du Bantrel en Alberta au nord du Canada.....	29
Figure. 1.5. Fonctionnement d'un système RFID .....	30
Figure. 1.6. Schéma de communication d'un tag RFID actif.....	32
Figure. 1.7. Principe de fonctionnement d'un tag passif.....	33
Figure. 1.8. Constitution d'un tag RFID UHF passif.....	34
Figure. 1.9. Codage PIE du protocole Gen 2 .....	38
Figure. 1.10. Modulation d'amplitude (ASK) avec le codage PIE.....	38
Figure. 1.11. Modulation On Off Keying (OOK) .....	39
Figure. 1.12. Fréquences utilisées par la RFID .....	40
Figure. 1.13. Découpage fréquentiel dans le monde pour un système RFID.....	42
Figure. 1.14. Format d'un code EPC 96 bits.....	44
Figure. 1.15. Tags imprimés sur un support papier avec une antenne en aluminium .....	45
Figure. 1.16. Tags dédiés à l'identification des animaux.....	45
Figure. 1.17. Tags RFID en miniature .....	46
Figure. 1.18. Schéma fonctionnel d'un tag RFID passif.....	46
Figure. 1.19. Structure interne d'un tag RFID passif.....	47
Figure 2.1. Fonction de défaillance .....	56
Figure 2.2. Fonction de fiabilité décroissante avec le temps .....	56
Figure 2.3. Évolution du taux de défaillance en courbe « baignoire ».....	57
Figure 2.4. Estimation des durées de vie en conditions normales .....	64
Figure 2.5. Courbes en baignoire avec et sans essais accélérés .....	65
Figure 2.6. Méthodologie de travail adoptée .....	65
Figure 2.7. Vue de tag Tageos .....	70
Figure 2.8. Vue de tag Web .....	70
Figure 2.9. Coupe transversale d'un tag neuf de type Web .....	70
Figure 2.10. Spectromètre des rayons-X d'un tag type Web .....	71
Figure 2.11. Spectromètre des rayons-X de l'ACP .....	72
Figure 2.12. Banc de vieillissement en stockage thermique .....	73

Figure 3.1. Banc de mesure développé (a) Position du tag et du lecteur et (b) les différentes composantes du banc .....	79
Figure 3.2. Mesure de la puissance réfléchie par les tags en fonction de la distance .....	80
Figure 3.3. Mesures temporelles de la communication lecteur/tag .....	82
Figure 3.4. Mesure de la dégradation de la puissance réfléchie par le tag W011 après vieillissement thermique .....	83
Figure 3.5. Mesure de la dégradation de la puissance réfléchie par le tag W014 après vieillissement thermique .....	84
Figure 3.6. Vue des tags Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C .....	85
Figure 3.7. (a) Support métallique (b) Tags classés dans le support .....	86
Figure 3.8. Mesure de la puissance réfléchie par les tags : (a) W0026 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) W1013 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C .....	86
Figure 3.9. Comparaison des mesures des tags collés sur du papier et sur l'époxy .....	87
Figure 3.10. Le banc de mesure monté dans la chambre semi anéchoïque .....	87
Figure 3.11. Comparaison des mesures de la puissance réfléchie par les tags pour les trois supports .....	88
Figure 3.12. Mesure de la puissance réfléchie par les tags : (a) W3001 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) W3011 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) W3008 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	90
Figure 3.13. Courbe de modélisation de la puissance du tag W3001 à $t_1=72$ heures avec $a/r^4$ distance .....	90
Figure 3.14. Courbe de modélisation de la puissance du tag W3001 à $t_1=72$ heures avec une exponentielle décroissante .....	91
Figure 3.15. Puissances modélisées des tags : (a) W3001 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) W3011 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) W3008 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	92
Figure 3.16. Puissances réfléchies par les tags vieillis à $d=60$ cm (a) à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	93
Figure 3.17. Mesure de la puissance réfléchie par les tags : (a) T3017 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) T3027 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) T3021 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	95
Figure 3.18. Puissances modélisées des tags : (a) T3017 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) T3027 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) T3021 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	96
Figure 3.19. Puissances réfléchies par les tags vieillis à $d=40$ cm (a) à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) à 180 ( $\pm 5$ ) °C .....	97
Figure 3.20. Dégradation de la puissance en fonction du temps de vieillissement pour les tags de type (a) Web et (b) Tageos . .....	99

Figure 3.21. Durée de vie en fonction de la température pour les tags de type : (a) Web et (b) Tageos .	100
Figure 3.22. Défiabilité en fonction du temps de vieillissement pour les tags de type : (a) Web et (b) Tageos .	101
Figure 3.23. Êta en fonction de bêta pour les tags de type : (a) Web (b) Tageos .	103
Figure 3.24. Facteur d'accélération en fonction de la température (a) pour les tags Web (b) pour les tags Tageos .	104
Figure 4.1. (a) Découpe d'un tag et (b) Résultat de découpe	109
Figure 4.2. (a) Fixation du tag sur un support métallique et (b) Tag sur le piston de la machine d'enrobage à chaud .	110
Figure 4.3. Tag dans le moule d'enrobage à froid .	111
Figure 4.4. Tag enrobé à froid	111
Figure 4.5. Vue optique avec grossissement de 20 d'un tag (a) neuf et (b) vieilli.....	112
Figure 4.6. Vue au MEB montrant la déformation observée au niveau des contacts entre Antenne/Bump et RFIC/Bump pour les tags vieillis à la température 160 ( $\pm 5$ ) °C de type : (a) Web (b) Tageos .	113
Figure 4.7. Vues au MEB du tag Web vieilli à la température 180 ( $\pm 5$ ) °C .	114
Figure 4.8. Modèle du tag RFID passif .	115
Figure 4.9. Schéma simplifié de la modélisation .	115
Figure 4.10. Tag RFID passif avec fissures (a) de dimension égale à 0,7 mm (b) de dimension égale à 0,7 mm (c) de dimension égale à 0,1 mm (d) de dimension égale à 0,1 mm .	116
Figure 4.11. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence .	117
Figure 4.12. Impédance d'entrée en fonction de la fréquence	118
Figure 4.13. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence	122
Figure 4.14. Impédance d'entrée en fonction de la fréquence	123
Figure A.2.1. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Web vieillis à ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3002 (b) W3003 (c) W3004 (d) W3005 .	134
Figure A.2.2. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3012 (b) W3013 (c) W3014 .	135
Figure A.2.3. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3006 (b) W3007 (c) W3009 (d) W3010 d'enrobage à chaud .	136
Figure A.2.4. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Tageos vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C : (a) T3016 (b) T3018 (c) T3020 .	138

Figure A.2.5. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Tageos vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C : (a) T3028 (b) T3029 d'enrobage à chaud .	139
Figure A.2.6. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Tageos vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C : (a) T3022 (b) T3023 (c) T3024 (d) T3025 .	140
Figure A.3.1. Puissance modélisée des tags de type Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3002 (b) W3003 (c) W3004 (d) W3005	141
Figure A.3.2. Puissance modélisée des tags de type Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3012 (b) W3013 (c) W3014	142
Figure A.3.3. Puissance modélisée des tags de type Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3006 (b) W3007 (c) W3009 (d) W3010	143
Figure A.3.4. Puissance modélisée des tags de type Tageos vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3016 (b) W3018 (c) W3020	144
Figure A.3.5. Puissance modélisée des tags de type Tageos vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3028 (b) W3029	145
Figure A.3.6. Puissance modélisée des tags de type Tageos vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3022 (b) W3023 (c) W3024 (d) W3025	146
Figure A.4.1. Vue optique d'un tag Web vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C pendant 168 heures	147
Figure A.4.2. Vue optique du RFIC d'un tag Web vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C	147
Figure A.4.3. Vue optique d'un tag Web vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C pendant 48 heures	147
Figure A.4.4. Vues optiques d'un tag Web vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C pendant 72 heures : (a) puce cassée (b) fissure sur l'antenne (c) coupe transversale	148
Figure A.4.5. Vues au MEB d'un tag Web vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C avec des défaillances artificielles sérieuses (a) puce cassé (b) contacts déformés	149
Figure A.4.6. Vue au MEB d'un tag Tageos vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C	149
Figure A.5.1. Modèles d'accélération utilisés par ALTA	151

# Liste des tableaux

Tableau. 1.1. Exemples d'applications de la RFID selon les fréquences de fonctionnement et les standards suivis (a) pour l'identification des personnes (b) pour l'identification des animaux et objets .....	26
Tableau. 1.2. Nombre des tags passifs UHF en millions 2013-2026 .....	27
Tableau. 1.3. Comparaison des différents types de système RFID .....	34
Tableau. 1.4. Comparaison des différents systèmes RFID à bande étroite .....	41
Tableau. 1.5. Normes techniques applicables à la RFID .....	43
Tableau. 2.1. Composition élémentaire d'un tag RFID passif .....	72
Tableau. 2.2. Composition élémentaire qualitative de l'ACP .....	72
Tableau. 3.1. Caractéristiques de signal envoyé par le lecteur .....	81
Tableau. 3.2. Moyenne de la perte en puissance après vieillissement .....	85
Tableau. 3.3. Écart-type entre les valeurs mesurées et modélisées pour les tags Web .....	91
Tableau. 3.4. Écart-type entre les valeurs mesurées et modélisées pour les tags Tagueos .....	96
Tableau. 3.5. Paramètres d'échelle et de forme de la distribution Weibull .....	102
Tableau. 4.1. Caractéristiques des défauts .....	117
Tableau. 4.2. Paramètres de performance du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation de l'antenne .....	118
Tableau. 4.3. Impédance d'entrée et puissance rayonnée du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation de l'antenne Figure .....	120
Tableau. 4.4. Caractéristiques des défauts créés sur le RFIC .....	121
Tableau. 4.5. Paramètres de performance du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation du RFIC .....	122
Tableau. 4.6. Impédance d'entrée et puissance rayonnée du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation du RFIC .....	123
Tableau 4.7. Mécanismes de défaillance de quelques tags de type Web et Tagueos .....	124

# Liste des annexes

Annexe 1 : Liste de publications.....	131
Annexe 2 : Puissance réfléchie par les tags Web et Tagueos en fonction de la distance.....	133
Annexe 3 : Puissance modélisée des tags Web et Tagueos en fonction de la distance.....	141
Annexe 4 : Vues optiques et au MEB.....	147
Annexe 5 : Définitions .....	150

# Acronymes

<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>RFID</b>	Radio-Frequency IDentification
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>ALTs</b>	Accelerated Life Tests
<b>IFF</b>	Identify Friend or Foe
<b>EAS</b>	Electronic Article Surveillance
<b>LF</b>	Low Frequency
<b>EPC</b>	Electronic Product Code
<b>PIRE</b>	Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente
<b>EIRP</b>	Equivalent Isotropic Radiated Power
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Key
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>OOK</b>	On Off Keying
<b>ISM</b>	Industrielles, Scientifiques et Médicales
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>JTC</b>	Joint Technical Committee
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Committee
<b>RFIC</b>	Radio Frequency Integrated Circuit
<b>ACP</b>	Anisotropic Conductive Paste
<b>FDP</b>	Fonction de Densité de Probabilité
<b>MTTF</b>	Mean Time To Failure
<b>FA</b>	Facteur d'Accélération
<b>E<sub>a</sub></b>	Énergie d'Activation
<b>RH</b>	Relative Humidity
<b>MEB</b>	Microscopie Électronique à Balayage

## Acronyms

---

<b>EDX</b>	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
<b>Si</b>	silicium
<b>Au</b>	Or
<b>Al</b>	Aluminium
<b>DUT</b>	Device Under Test
<b>TTF</b>	Time To Failure
<b>FR4</b>	Flame Resistant 4
<b>PEC</b>	Perfect Electrical Conductor

# Introduction générale

L'internet des objets ou bien IoT (Internet of Things) et toutes les nouvelles technologies de l'information et de la communication jouent un rôle fondamental dans le développement rapide de notre société moderne. Elles participent à la transformation de notre vie quotidienne pour la rendre plus simple et plus confortable.

Aujourd'hui, la présence des objets connectés est indispensable dans tous les domaines, et ils participent au partage de l'information et de la connaissance.

L'utilisation de ces technologies conduit ainsi à la croissance économique en facilitant l'échange et la diffusion des informations d'une manière plus rapide et fiable. Ce développement technologique inclut aussi les technologies d'identification. La RFID (l'identification par radiofréquence ou Radio-Frequency IDentification) est l'une des principales technologies d'identification sans contact existantes, elle permet non seulement d'associer un code numérique à un objet dans une modalité sans fil, mais permet également de capturer son état physique. C'est une technologie connue pour sa plus grande souplesse, rendant l'échange d'information nettement plus rapide et efficace.

Les premiers systèmes RFID qui ont vu le jour fonctionnent dans des bandes de fréquences limitées pour répondre à des besoins particuliers qui concernent plus le domaine militaire. Ces dernières années, un intérêt grandissant dans le domaine de l'industrie et de la recherche est porté sur la technologie RFID. Elle est aujourd'hui largement employée et fonctionne à des fréquences plus élevées.

La RFID UHF (Ultra High Frequency) passive est une avancée technologique qui révolutionne les méthodes d'identification et de traçabilité qui sont parmi les préoccupations majeures du monde industriel. Elle possède un mode de fonctionnement bien particulier. L'identification est réalisée par des tags qui sont associés aux biens. Ces derniers sont constitués d'une puce électronique et d'une antenne. Contrairement aux systèmes de communication classiques, ils sont alimentés à distance et ne possèdent aucune source propre d'émission radiofréquence d'où l'appellation : tags passifs. Cette technologie, par l'utilisation de ce principe dit de rétro-modulation présente l'une des technologies les plus performante et faible coût. Elle permet un moindre coût de fabrication des tags RFID. La réduction du coût

des tags est la clef vers l'identification individuelle des biens. En effet, l'investissement financier du système RFID doit représenter une part négligeable par rapport à ce qu'il permet d'identifier. Cela rend cette technologie largement utilisée dans différents domaines tels que la santé, l'environnement, ou bien encore la sécurité. Il est en effet important de suivre et identifier les produits visant à garantir la qualité et la sécurité pendant la fabrication, la distribution et l'expédition. La RFID est utilisée ainsi pour lutter contre la contrefaçon et pour le contrôle d'identité... En outre, les tags RFID passifs peuvent potentiellement être utilisés plus largement encore dans les domaines de l'automobile et l'aéronautique.

En raison des nombreuses applications, les tags RFID sont exposés à une variété de conditions environnementales, qui peuvent nuire à leur fiabilité et changer leurs propriétés, telles que la haute température, l'humidité et les vibrations mécaniques. Ce qui rend l'étude de la fiabilité de ce système dans des environnements hostiles cruciaux.

C'est sur ce fil conducteur que ces travaux de thèse ont été menés. L'objet de ce travail est ainsi l'étude de la fiabilité d'un système RFID UHF, orientée vers les tags passifs, qui permettrait une connaissance approfondie de ces mécanismes de défaillance sous contraintes à très haute température.

Cet objectif est réalisé par :

Le développement d'une méthodologie rigoureuse qui se base sur les tests de vieillissements accélérés (ALTS Accelerated Life Tests en anglais), qui sont largement utilisés pour étudier les effets des stress environnementaux sur la fiabilité des applications électroniques. Dans ALTs, les dispositifs sont soumis à des niveaux élevés de stress pour accélérer les défaillances et ces tests font l'objet de l'étude de la fiabilité des différents matériaux et structures. Cependant, si les tests de vieillissements sont excessivement accélérés, il existe un risque d'avoir des mécanismes de défaillance non répliquant dans l'environnement de fonctionnement réel. La méthodologie développée permet donc de réaliser un enchaînement d'étapes précis au cours de l'analyse de la fiabilité d'un système RFID UHF passif.

En outre, le choix des conditions de vieillissement pour les études de fiabilité doit être examiné attentivement. Dans ce contexte, nous avons examiné la fiabilité d'un système RFID UHF passif par de nombreux essais de vieillissements accélérés en stockage thermique aux hautes températures, il est reconnu dans le domaine de l'électronique que la haute température est une contrainte au rôle premier dans les défaillances de composants. Ces essais sont utiles

pour l'estimation des caractéristiques comportementales (loi de fiabilité, performances opérationnelles...) du système dans les conditions normales d'emploi à partir des conditions accélérées d'utilisation et cela dans des délais compatibles avec les contraintes calendaires associées à la phase de développement. Le passage des conditions accélérées aux conditions normales en ce qui concerne la durée de vie s'effectue à l'aide d'une loi d'accélération associée.

L'analyse physique des défaillances est un outil principal pour répondre à l'objectif de ces travaux de thèse. L'étape la plus critique dans l'assurance de la réussite de cette analyse est la préparation d'échantillon, il faut être prudent pour ne pas perdre le défaut ou générer de nouveaux qui pourraient gêner la détection du défaut initial. Une préparation d'échantillon réussie permet une caractérisation physique du défaut dans la zone localisée et donc de comprendre et de maîtriser le mécanisme de défaillance associé.

La synthèse de ces travaux de thèse est présentée dans ce mémoire divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre sera dédié à une présentation générale de la technologie RFID. Les différentes technologies RFID existantes seront introduites et l'intérêt d'étudier la fiabilité de la technologie RFID UHF passive dans des conditions thermiques difficiles sera mis en évidence.

Dans le second chapitre, les propriétés fondamentales et les caractéristiques probabilistes de la fiabilité seront exposées. Nous présenterons les équations et les méthodes les plus utilisées pour étudier la fiabilité d'un composant électronique. Et dans une deuxième section de ce chapitre, nous décrirons en détails la méthodologie adoptée pour cette thèse.

Le troisième chapitre concernera l'application de cette méthodologie, deux types de tags passifs issus de deux fabricants différents sont testés, en utilisant un banc de mesure de puissance, qui permet de mesurer la puissance réfléchiée par les tags en fonction de la distance. Pour l'ensemble des tags testés, la puissance réfléchiée sera mesurée après chaque phase de vieillissement pour analyser sa variation en fonction de la haute température.

Finalement, dans le quatrième chapitre, nous présenterons les démarches et les étapes techniques réalisées pour réussir la préparation de nos échantillons. Ensuite les résultats de l'analyse physique de la défaillance en utilisant la microscopie optique et MEB seront présentés. Dans une troisième section de ce dernier chapitre, nous effectuerons des

simulations en utilisant un logiciel de modélisation multi-physique pour reproduire les mécanismes de défaillances révélés expérimentalement au niveau de l'antenne et du RFIC.

# **CHAPITRE 1**

**Utilisation de la technologie RFID dans  
des milieux extrêmes.**

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter la technologie RFID et son utilisation dans des conditions environnementales sévères. Dans une première partie, une présentation générale de cette technologie est réalisée, tout en abordant son historique, ses applications et le développement du marché RFID dans le monde. Dans une deuxième partie, une description du principe de fonctionnement des systèmes RFID est effectuée, tout en présentant les différentes techniques d'identifications existantes, les protocoles de communications utilisés, les fréquences et les normes de cette technologie. La troisième partie, présente un état de l'art des systèmes RFID UHF passifs en présentant les différentes formes des tags passifs existants, leur architecture et leur composition. Tout en évoquant la relation de cette technologie UHF passive avec les environnements hostiles et l'importance de porter des études sur la fiabilité des tags en environnement sévère.

### 1. Contexte et applications

#### 1.1. Historique et développement

La mise en œuvre pratique de la RFID a vu le jour au cours de la seconde guerre mondiale (1940) et coïncide avec le développement des radars. Elle était utilisée par les anglais pour identifier et authentifier les avions pendant la guerre et vérifier si ceux-ci sont amis ou ennemis (IFF pour Identify Friend or Foe) (Figure 1.1).



Figure. 1.1. Identification des avions par la RFID durant la seconde guerre mondiale [1].

Le système IFF est un système de transpondeur radiofréquence permettant d'identifier les avions-amis des avions ennemis à l'aide de signaux codés. Le radar au sol envoie une impulsion (interrogation) vers le secteur qu'il regarde et l'avion équipé d'un IFF détecte l'impulsion et répond immédiatement par un signal qui comporte une information (le code). Le radar reçoit l'impulsion, il peut donc en déduire la distance de l'avion et peut aussi déchiffrer le message envoyé.

Durant les années 1970, l'utilisation de la RFID reste une technologie confidentielle et destinée à un usage militaire ou à la gestion de la sécurité par les systèmes antivols EAS (Electronic Article Surveillance) sur des sites sensibles tels que les centrales nucléaires [3]. Dans les années 1980, les recherches concernant la RFID n'ont cessé de se développer avec l'invention des microsystèmes et les différentes avancées technologiques. Chaque application nécessite des besoins et des performances spécifiques. Les contraintes varient fortement suivant l'environnement de fonctionnement ce qui a permis l'apparition du tag passif et le transfert de l'utilisation de la RFID vers les secteurs privés. Une des premières applications commerciales qui sera réalisée avec cette technologie est le marquage du bétail par des étiquettes d'oreilles fonctionnant essentiellement dans la bande basse fréquence (LF low frequency en anglais) [2-4]. Aujourd'hui les systèmes RFID sont présents quasiment dans tous les domaines de notre vie, les applications RFID s'enrichissent tous les jours avec des nouvelles idées. On les trouve souvent à certaines applications des « smart cards » pour le paiement électronique ou le contrôle d'accès, dans des applications en logistique relevant de la logistique et du « Supply Chain Management ». L'étiquetage RFID permet, bien mieux que le code à barre, d'assurer le suivi des produits en fabrication, en stock et en distribution. Aussi pour le contrôle de la qualité, en s'assurant que les outillages, les matières premières de qualité souhaitée et les composants requis sont disponibles. On rangera aussi dans cette catégorie la possibilité de lutter contre la contrefaçon de médicaments ou de billets de banque, ainsi que le contrôle de la qualité des services postaux par échantillonnage [5-10].

Le tableau 1.1 donne quelques exemples d'applications de la RFID en les répertorient selon leurs fréquences habituelles de fonctionnement et les standards et normes usuelles suivies.

Produits		Animaux		Véhicules	
Identification industrielle	Identification et traçabilité logistique	Autres applications	Animaux de compagnie	Animaux d'élevage	Immobilisateurs pour voiture, camion, deux-roues...
125 kHz 13,56 MHz	13,56 MHz UHF 2,45 GHz	125 kHz 13,56 MHz UHF 2,45 GHz	134,2 kHz	134,2 kHz	125 kHz
ISO 15693 ISO 18000-2 ISO 18000-3	ISO 15693 ISO 18000-3 ISO 18000-4 ISO 18000-6	ISO 15693 ISO 18000-2 ISO 18000-3 ISO 18000-4	ISO 11784 ISO 11785 ISO 14223-1 ISO 14223-2 ISO 14223-3	ISO 11784 ISO 11785 ISO 14223-1 ISO 14223-2 ISO 14223-3	Pas de standard et/ou système propriétaire

(a)

Identification des :			Personnes		
Type d'application	Carte d'identité, passeport, visa, permis de conduite	Porte-monnaie électronique	Contrôle titre de transport, de billetterie et de loisir	Pointage de contrôle et gestion du personnel	Contrôle d'accès des véhicules et des piétons
Fréquence la plus couramment utilisée	13,56 MHz	13,56 MHz	13,56 MHz	125 kHz 13,56 MHz	125 kHz 13,56 MHz
Standards et normes	ISO 10536 ISO 14443 ISO 15693	ISO 10536 ISO 14443	ISO 10536 ISO 14443 ISO 15693	ISO 14443 ISO 15693	ISO 10536 ISO 14443 ISO 15693

(b)

Tableau. 1.1. Exemples d'applications de la RFID selon les fréquences de fonctionnement et les standards suivis (a) pour l'identification des personnes (b) pour l'identification des animaux et objets [54].

Les systèmes RFID sont très connus pour la traçabilité, pour vérifier, par exemple, le parcours de livres en bibliothèque ou le respect de la chaîne du froid, ou bien encore l'origine et la non-péremption de produits spéciaux, tels que les poches de sang, ou le comportement de pneumatiques [11-12]. La maturité de cette technologie permet d'entrevoir de nouvelles applications et nouveaux défis et lui assure un marché au futur.

## 1.2. Projection de la technologie RFID dans le futur

Afin d'améliorer la qualité des services rendus par les industries dans plusieurs domaines, le recours aux solutions fournies par la technologie RFID est incontournable. Par exemple,

retrouver l'historique d'un bien ou d'une personne au moyen d'une identification enregistrée, est crucial. La RFID est utilisée dans différentes applications notamment le contrôle d'accès (péage, bâtiment, transport public...), la gestion de stock, le contrôle de bagages dans les aéroports, la distribution, la gestion de prêt, l'authentification... le tableau.1.2 indique l'augmentation de la fabrication des tags passifs UHF dans les années qui viennent. Pour chaque application on voit que le nombre des tags passifs UHF fabriqués et à fabriquer dans le futur augmente d'une façon exceptionnelle. La totalité des tags passifs fabriqués en 2013 atteint les 3029 millions alors qu'en 2026 le nombre devrait être multiplié par 20.

<b>Application (en millions)</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2026</b>
Vêtements / chaussures	2.250	3.000	3.750	4.600	5.500	6.650	8.500	11.000	15.000	25.000
Vente au détail- autres	25	50	90	200	500	1000	2500	4000	7000	25000
Logistique, transport	125	125	130	150	350	450	700	1100	1300	2500
Gestion des biens / inventaire	450	475	510	700	850	1200	1300	1500	1800	4000
Médical / Soins de santé	18	23	38	45	60	80	150	300	500	3000
Marquage des bagages	72	74	74	76	78	120	145	180	200	300
Contrôle d'accès / billetterie	1,5	2	3	5	8	12	18	30	50	85
Système embarqué	0,1	2	5	10	60	125	350	550	800	1500
Personnes	22	24	30	40	50	60	70	80	85	100
Autres	65	70	75	80	85	90	100	110	120	350
<b>Total</b>	<b>3.029</b>	<b>3.845</b>	<b>4.705</b>	<b>5.906</b>	<b>7.541</b>	<b>9.787</b>	<b>13.833</b>	<b>18.850</b>	<b>26.855</b>	<b>61.835</b>

Tableau. 1.2. Nombre des tags passifs UHF en millions 2013-2026 [13].

Au cours de l'année 2016, la totalité du marché de la RFID représente près de 15 Billions de dollars contre environ 5 Billions en 2011. La figure 1.2 présente les prévisions en 2021 du marché de la RFID dans le monde. En 2021, ce marché devrait progresser pour atteindre près de 2 fois ce qu'il représente en 2016. Le nombre de tags RFID est en augmentation continue grâce au développement de tags faibles coûts et aux infrastructures en place qui permettent un très large déploiement de cette technologie.

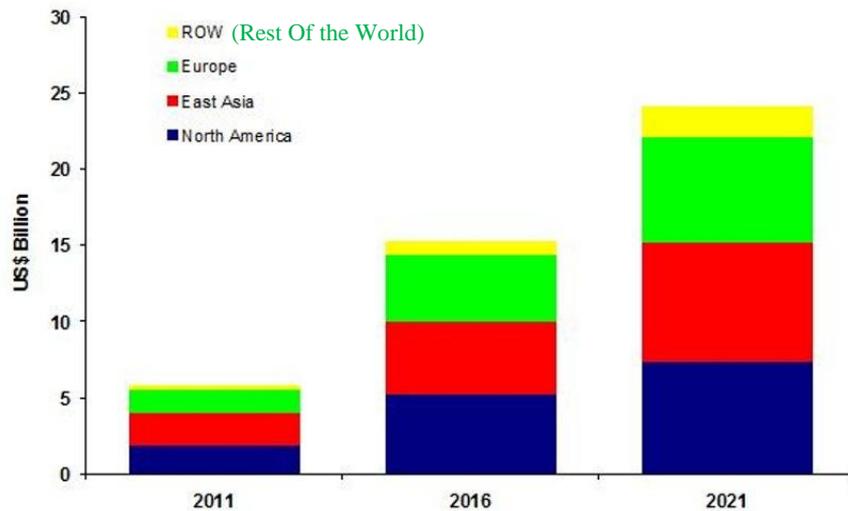


Figure. 1.2. Prédiction de l'évolution du marché de la RFID dans le monde [14].

Le marché RFID est un des secteurs d'activités qui présente la plus grande progression dans le monde. Cela est dû à l'augmentation vertigineuse de ses applications. La RFID présente une solution efficace dans plusieurs domaines et son utilisation dans des secteurs industriels de pointe tels que le nucléaire, la chimie / pétrochimie, l'aéronautique, l'automobile [15-19], impose aux fabricants des tags RFID deux défis majeurs, desquels dépend la rentabilité du marché. Ces défis sont : le faible coût de fabrication et la fiabilité des tags soumis à des contraintes environnementales fortes, d'habitude incompatibles avec les technologies sans fil. Ces conditions environnementales, telles que la haute et la basse température, l'humidité et les vibrations mécaniques, peuvent nuire à la fiabilité des systèmes RFID. Cela rend l'étude de la fiabilité de ce système dans des environnements hostiles cruciale [20].

Parmi les applications de cette technologie dans des milieux extrêmes on trouve la nouvelle mine d'or « Goldcorp », située au nord de Montréal. Les tags RFID sont utilisés pour la communication avec ses employés souterrains, ceux-ci vont porter des casques identifiables par des tags RFID (Figure 1. 3).



Figure. 1.3. Site de la mine d'or « Goldcorp » [19].

Citons aussi Bantrel, une filiale canadienne du géant américain de la construction Bechtel, qui a déployé une solution de suivi, par les tags RFID, pour localiser 70 000 pièces lors de la construction d'un projet de sables pétrolifères dans le nord du Canada, dans des conditions thermiques très difficiles (Figure 1.4).



Figure. 1.4. Site du Bantrel en Alberta au nord du Canada [19].

Ces différentes applications possibles de la RFID nécessitent des conditions environnementales spéciales, montrent les enjeux des études sur la fiabilité des tags RFID en environnement sévère.

## **2. Présentation générale de la technologie RFID**

### **2.1. Principe de fonctionnement des systèmes RFID**

Un système RFID permet d'identifier à distance des objets ou des individus, à l'arrêt ou en mouvement, et d'échanger avec eux des données en fonction des applications envisagées.

Malgré le nombre incroyable de variantes technologiques qui composent les systèmes RFID actuels, le principe de fonctionnement peut être décrit d'une manière générale. Pour transmettre les informations à un interrogateur (encore appelé « station de base » ou plus généralement « lecteur RFID »), une étiquette RFID est munie d'une puce électronique associée à une antenne. Cet ensemble, appelé « *inlay* », est ensuite packagé pour résister aux conditions dans lesquelles il est amené à évoluer. L'ensemble ainsi formé est appelé « tag », « label » ou encore « transpondeur ». La figure 1.5 présente les éléments principaux d'un système RFID : tag, lecteur et système hôte [9].

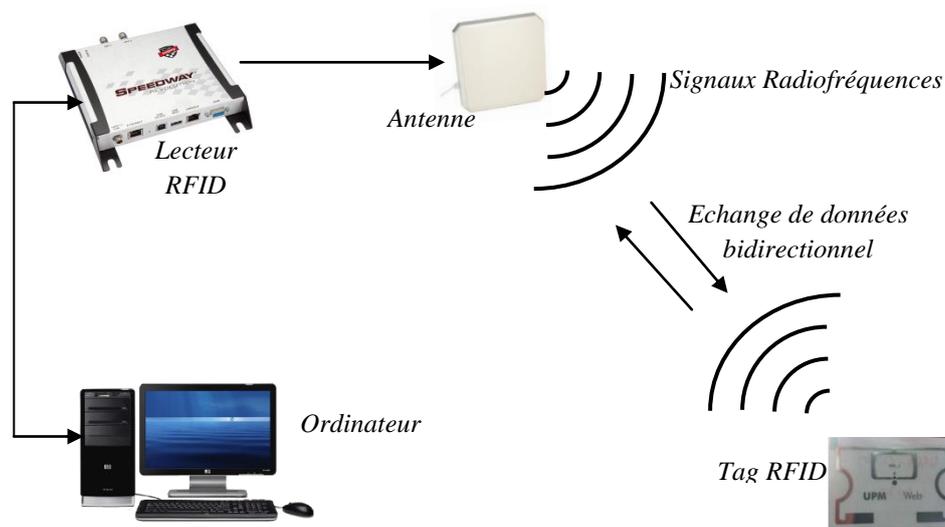


Figure. 1.5. Fonctionnement d'un système RFID.

Les principaux constituants de base qui interviennent dans une communication RFID sont :

- ✚ Le tag RFID, associé à l'élément à identifier. Il comprend une puce, dotée d'une mémoire, contenant un identifiant de type EPC (electronic product code) unique. Le RFIC est reliée à une antenne souvent constituée d'un motif métallique imprimé sur un circuit, pour transmettre les données stockées dans sa mémoire au lecteur suite a une demande venant de ce dernier, elle est conçue pour fonctionner dans une bande de fréquence donnée. Les évolutions technologiques ont permis de miniaturiser sa taille pour atteindre des dimensions de 0,15 mm × 0,15 mm pour une épaisseur de 7,5 µm [16].

Les tags RFID peuvent être classés en fonction de leur mode d'alimentation, de leur fréquence d'opération ou aussi de leur protocole de communication ou encore par la présence ou non d'une puce électronique.

- ✚ Le lecteur RFID a pour mission d'identifier le tag. Il est composé d'un transmetteur, d'un récepteur, d'un microprocesseur et d'une antenne qui envoie une onde électromagnétique porteuse d'un signal en direction de l'élément à identifier en fournissant aux tags passifs à courte distance l'énergie dont ils ont besoin. En retour, il reçoit les signaux, contenant l'information, provenant des tags. Le lecteur peut être fixe ou mobile, et son antenne peut prendre plusieurs formes.
- ✚ Un ordinateur de stockage et de traitement des informations recueillies par le lecteur. Cet ordinateur peut travailler en boucle fermée (cas des systèmes locaux) ou en boucle ouverte (connexion à un système de gestion de niveau supérieur).

Il existe plusieurs familles de système RFID dont les principes physiques mis en œuvre ne sont pas les mêmes. Ainsi les systèmes de RFID ont une très grande diversité leur permettant de répondre à de nombreux besoins. Dans les sections 2.1.1 et 2.1.2 et 2.1.3 nous introduisons les trois catégories de tags, que sont les tags actifs, les tags semi-passifs et les tags passifs, qui se différencient en fonction de leur source d'alimentation par la manière dont la réponse est renvoyée à la station de base.

### **2.1.1. Tags actifs**

Les tags RFID actifs sont utilisés lorsque les portées de lecture sont supérieures à 10 m, ils peuvent atteindre des portées de l'ordre de 50 à 100 m. Les applications les plus répandues par ce type de liaison répondent au besoin de distance de lecture importante, comme le contrôle d'accès des véhicules dans les péages autoroutiers avec des vitesses de passage de l'ordre de 30 km/h.

Le terme actif vient du fait que le tag emporte un module d'émission radiofréquence. Les tags actifs embarquent donc une batterie pour alimenter à la fois son électronique logique et son émetteur. Cela permet au tag de répondre aussi à des fréquences différentes de celle de la station de base ce qui rend possible une communication du type full duplex ainsi une communication directe entre deux tags (Figure 1.6).

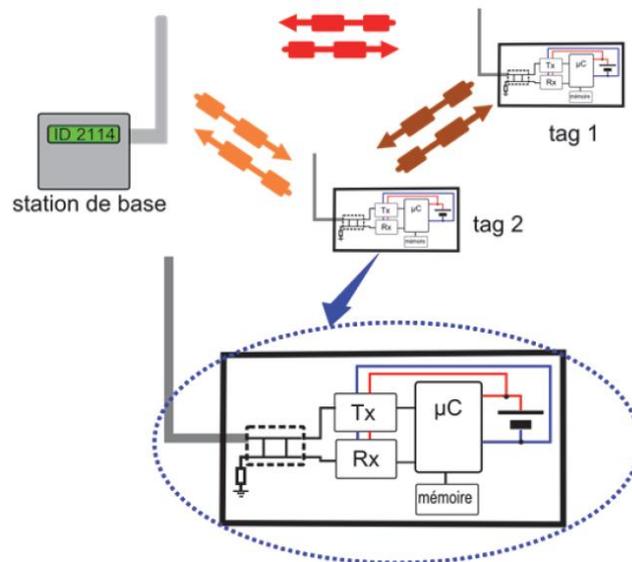


Figure. 1.6. Schéma de communication d'un tag RFID actif [53].

Cependant, cette émission active d'informations signale à tous les équipements (station de base et tags) la présence du tag et peut poser des problèmes de sécurité.

La présence d'une batterie permet également l'écriture de données, avec une mémoire atteignant jusqu'à 10 Kbits. Elles sont fournies vierges et pourront être écrites plusieurs fois, effacées, modifiées et lues. Le nombre de répétition de ces opérations peut dépasser les 500 000 ou 1 million. Les fréquences classiquement utilisées sont dans la bande 433 MHz ainsi que dans les bandes 2,45 GHz et 5,8 GHz. Le coût très élevé des tags actifs réduit leur utilisation. En dehors des péages autoroutiers, ils sont utilisés également pour la gestion des containers et les systèmes antivols pour les produits à forte valeur ajoutée [21-26].

### 2.1.2. Tags semi-actifs

Les tags semi-actifs ressemblent au fonctionnement des tags actifs puisqu'ils embarquent également une source d'énergie néanmoins ils n'utilisent pas leur batterie pour émettre des signaux. Ils agissent comme des tags passifs au niveau communication. Mais leur batterie leur permet, par exemple, d'enregistrer des données lors du transport des marchandises (changement de température ...). La technologie RFID semi-active s'avère plus appropriée dans le domaine de la traçabilité alimentaire et la traçabilité logistique. Le coût de ce type de tag est donc moins élevé. Il est compris entre 5 \$ et 40 \$. Ce type de tag est généralement d'une conception simple. Cependant on peut leur trouver plusieurs inconvénients :

- ✚ Leur fiabilité, il est impossible de savoir si leurs batteries sont encore opérationnelles.

- ✚ Leur coût, la connexion de leurs batteries avec leurs circuits augmente le coût comparativement à un tag passif.
- ✚ Leur impact environnemental, leur batterie contenant des substances très polluantes.

Cependant, ce type de tag présente quelques atouts, car leur coût est moindre que les tags actifs et leur distance de lecture est plus importante que les tags passifs [21-26].

### 2.1.3. Tags passifs

Depuis le début du développement de la RFID, les tags passifs répondent le plus aux besoins du marché. Les fréquences les plus habituellement utilisées pour ces systèmes se situent dans la bande UHF 860 et 960 MHz dont le mode de fonctionnement privilégié est le champ lointain qui peut atteindre une dizaine de mètres.

Les tags passifs contrairement aux tags actifs fonctionnent grâce à l'énergie fournie par le lecteur. Une antenne de type dipôle compose les tags UHF/SHF qui permet de capter le rayonnement électromagnétique provenant du lecteur. Ce dernier fournit au tag passif l'énergie suffisante pour lui permettre d'émettre à son tour son code d'identification unique. Cette réponse émise en reprenant le principe de modulation de charge est illustrée par la figure 1.7.

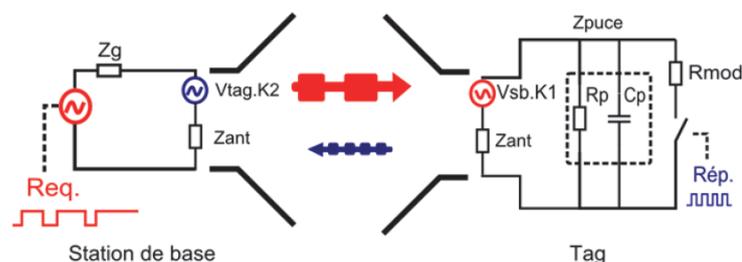


Figure. 1.7. Principe de fonctionnement d'un tag passif [53].

Ces tags passifs sont programmés avec des données non modifiables, pour une capacité de 32 à 128 bits. Ils permettent d'obtenir des coûts unitaires bien plus bas que les autres technologies. Dans la majorité des cas, ils sont fournis vierges à l'utilisateur, qui va écrire les données qui lui seront utiles lors de sa pose sur l'objet à tracer. Pendant la vie ultérieure du tag, cette information pourra être lue mais ne pourra être ni modifiée ni complétée. Les tags passifs sont bon marché et ont une durée de vie quasi illimitée. Ils montrent la progression la plus importante en termes d'unité vendue. Par contre, les distances de lecture de ce type de tag sont bien plus courtes que dans le cas des tags actifs ou semi-actifs, elles sont de 3 à

15 mètres en fonction de la puissance de transmission du lecteur RFID et la fréquence utilisée [21-26]. La figure 1.8 présente la constitution d'un tag RFID UHF passif.

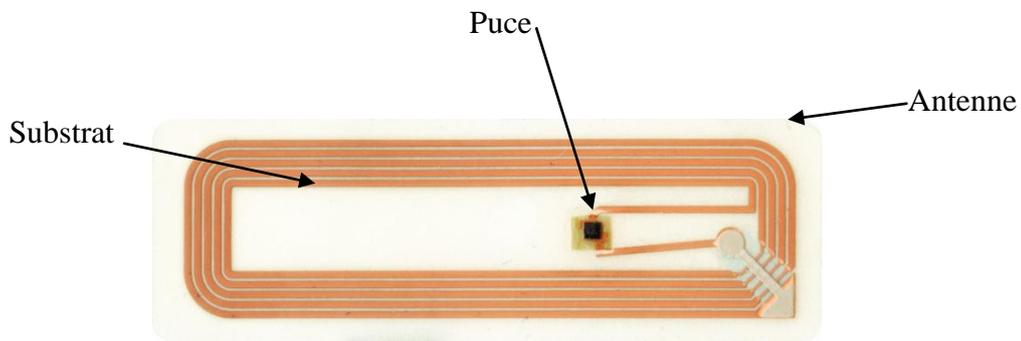


Figure. 1.8. Constitution d'un tag RFID UHF passif [27].

Le tableau 1.3 dresse un comparatif entre les systèmes actifs, semi actifs et passifs. On voit tout l'intérêt que présentent les systèmes passifs en termes de coût et de durée de vie.

Type	Distance	Données	Durée de vie	Coût
Actif	+++	+++	+	+++
Semi actif	++	++	++	++
Passif	+	+	+++	+

Tableau. 1.3. Comparaison des différents types de système RFID [9].

Aujourd'hui chacune de ces trois technologies RFID présente des avantages qui leur garantissent un marché. Cependant la technologie RFID passive est celle qui répond le mieux à la forte demande dans les domaines qui suscitent un réel intérêt pour le développement de tags RFID faible coût, fiable et performant en terme de débit, de distance de lecture et de rapidité de lecture sous différentes conditions environnementales.

## 2.2. Expressions théoriques des puissances pour un système RFID UHF passif

Comme nous avons vu dans la partie précédente, les antennes RFID peuvent être divisées en deux classes : l'antenne du tag et l'antenne du lecteur. L'antenne du tag transmet non seulement l'onde portant l'information stockée dans la mémoire du tag, mais doit également capter l'onde du lecteur pour fournir de l'énergie pour activer le tag. Comme le tag est souvent collé sur l'objet à identifié, sa taille doit être suffisamment petite devant la taille de son antenne. Dans la plupart des cas, cette antenne doit avoir un rayonnement omnidirectionnel.

L'antenne de lecteur transmet l'énergie électromagnétique pour activer ou réveiller le tag, réalise le transfert de données et envoie les instructions au tag. Simultanément, l'antenne du lecteur reçoit des informations renvoyées par le tag. Généralement, la position ou l'orientation de l'objet à identifier est aléatoire, et la manière d'attacher le tag à l'objet à identifier est non maîtrisée. Ainsi, l'antenne du lecteur doit être une antenne polarisée circulairement, afin d'éviter la perte de polarisation lorsque l'orientation de l'objet à identifier est modifiée. Pour certains lecteurs, les antennes devraient fonctionner sur plusieurs bandes. Dans certains cas particuliers, une technologie d'antennes multiples ou des réseaux d'antennes intelligentes pour le balayage de faisceaux sont utilisés. Cette technologie permet des configurations de lecture à des distances et volumes plus importants et aussi permet d'identifier un nombre important d'articles en même temps dans un plus grand volume en quelques secondes.

Dans le système RFID passif, l'énergie pour maintenir l'opération du tag provient de l'onde électromagnétique transmise par l'antenne du lecteur. Ici, le système passif est principalement discuté pour montrer l'impact des paramètres des antennes du tag et du lecteur sur la performance du système.

Dans un système de communication radio, comme la RFID, la puissance isotrope rayonnée équivalente PIRE (Equivalent Isotropic Radiated Power EIRP), est définie dans la direction de l'antenne où la puissance émise est maximale : c'est la puissance qu'il faudrait appliquer à une antenne isotrope pour obtenir le même champ dans cette direction. Pour une antenne connectée directement à l'émetteur on a :

$$\mathbf{EIRP} \text{ (dBm)} = \mathbf{radio\ power} \text{ (dBm)} + \mathbf{antenna\ gain} \text{ ( dBi)} - \mathbf{cable/connector\ loss} \text{ (dB)} \text{ [55].}$$

Où “radio power” est la puissance de transmission du lecteur RFID, elle dépend des normes et standards suivis, “antenna gain” est le gain de l’antenne en réception et “cable/connector loss” représente les pertes au niveau des connexions.

Donc dans cette expression le gain de l’antenne d’émission n’apparaît plus. En revanche, le gain de l’antenne en réception est toujours présent et constitue une variable d’ajustement du système.

La densité de puissance rayonnée par le tag pour un gain  $G_{lecteur}$  est donné par [28-30]:

$$S_1 = \frac{P_{EIRP}}{4\pi r^2} = \frac{P_t G_{lecteur}}{4\pi r^2} \quad (1-1)$$

Où  $P_{EIRP}$  représente puissance isotrope rayonnée, la  $P_t$  est la puissance transmise par le lecteur, le  $G_{lecteur}$  est le gain de l'antenne du lecteur, et  $r$  est la distance entre le lecteur et le tag.

La puissance reçue par le tag est définie par [28-30]:

$$P_{reçue1} = S_1 A_{tag} \quad (1-2)$$

Où  $S$  est la densité rayonnée est  $A_{tag}$  est l'aire effective de l'antenne du tag; elle exprime la capacité d'une antenne à capturer une onde électromagnétique.

L'aire effective de l'antenne est liée à son gain par la relation [28-30]:

$$A_{tag} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{tag} \quad (1-3)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $G_{tag}$  est le gain du tag.

On remplace les expressions (1.1) et (1.3) dans (1.2) pour obtenir l'expression de la puissance reçue par le tag :

$$P_{reçue1} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_{lecteur} G_{tag} P_t \quad (1-4)$$

On suit le même raisonnement pour obtenir l'expression de la puissance reçue par le lecteur.

La densité de puissance rayonnée pour l'onde de retour pour un gain  $G_{tag}$  est donné par :

$$S_2 = \frac{P_{reçue1} G_{tag}}{4\pi r^2} \quad (1-5)$$

$$A_{lecteur} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{lecteur} \quad (1-6)$$

Puis la puissance reçue par le lecteur est donnée par :

$$P_{reçue2} = S_2 A_{lecteur} \quad (1-7)$$

On remplace les expressions (1.5) et (1.6) dans (1.7), on obtient l'expression finale de la puissance reçue par le lecteur.

$$P_{reçue2} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^4 G_{lecteur}^2 G_{tag}^2 P_t \quad (1-8)$$

Où  $G_{lecteur}$  est le gain de l'antenne du lecteur,  $G_{tag}$  est le gain de l'antenne du tag,  $P_t$  est la puissance transmise par le lecteur.

La puissance reçue par le lecteur dépend principalement de la distance entre le lecteur et le tag, des gains des antennes (du tag et du lecteur RFID) et aussi de la puissance transmise par le lecteur au début de la communication. Les gains des antennes du lecteur et du tag influencent fortement la réponse du système RFID. L'état de l'antenne du tag est très important pour avoir une réponse fiable sous conditions environnementales difficiles.

### 2.3. Protocole de communication

Comme tout système de communication, dans un système RFID on trouve une liaison montante (forward link), du lecteur RFID (base station) vers le tag (transpondeur). Inversement, une liaison descendante (return link), du tag vers le lecteur.

Ces échanges se font suivants des normes dont on trouve EPC global Gen2 qui est le référentiel mondial pour le marquage RFID. Il fonctionne aussi bien en Europe, en Chine et aux Etats-Unis. C'est un standard libre de droit, reconnu par les normes ISO 18000-6c. La Gen2 est utilisé pour les lecteurs et les tags EPC principalement dans la bande UHF de 860 à 960 Mhz.

#### 2.3.1. Liaison montante

La liaison montante est par principe assurée par le lecteur RFID qui émet une onde radiofréquence, dont le but est double : de transporter de l'énergie vers le tag afin que celui-ci puisse assurer la tâche qui lui incombe ainsi d'envoyer les données du lecteur vers le tag.

Dans le sens montant, le lecteur RFID doit se faire comprendre par le tag au travers d'un codage numérique (binaire), d'un protocole de communication qui est souvent la Gen 2 et d'un système de modulation qui est pour la plupart des applications RFID une modulation en amplitude (Amplitude Shift Key ASK) avec le codage PIE (Pulse Interval Encoding).

La figure 1.9 montre le codage PIE du protocole Gen 2, où  $T_0$  est le temps de référence,  $PW$  est la largeur de l'impulsion.

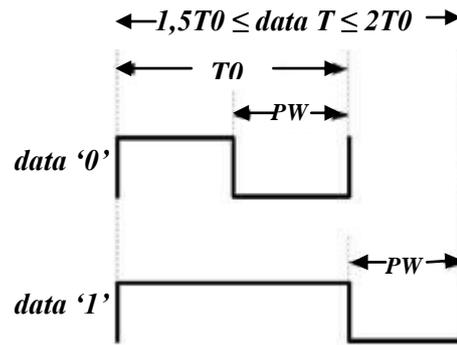


Figure. 1.9. Codage PIE du protocole Gen 2 [38].

Dans un codage PIE les bits "0" et "1" sont codés d'une manière différente, le bit "0" est codé 10 sa durée égale à  $T0$ , le bit "1" est codé 110 sa durée est comprise entre  $1,5T0$  et  $2T0$ .

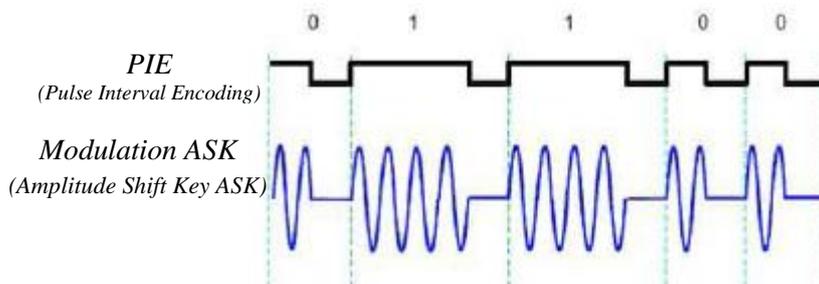


Figure 1.10. Modulation d'amplitude (ASK) avec le codage PIE [38].

Dans le protocole Gen 2, la modulation vient après le codage, et elle est souvent dans une communication RFID une modulation d'amplitude. La figure 1.10 illustre un exemple de cette modulation avec le codage PIE.

### 2.3.2. Liaison descendante

Le tag RFID ne peut pas se comporter comme un émetteur de signaux radiofréquences. Il ne dispose pas des mécanismes permettant d'émettre un signal RF au lecteur RFID. Il utilise dans une liaison descendante ce qu'on appelle la réflexion d'ondes pour pouvoir répondre au lecteur RFID.

La modulation utilisée par les tags RFID est une modulation différente des modulations usuelles de types PSK (Phase Shift Keying) et ASK, elle est nommée modulation de charge (Load Modulation) et consiste à faire varier la charge résistive du circuit du tag [31]. Cela va faire varier aussi l'intensité du courant circulant dans son circuit et donc l'intensité qui circule

dans l'antenne. Ces changements vont engendrer un changement de la consommation d'énergie présente dans le champ magnétique, par couplage magnétique, cela change l'intensité du courant dans l'antenne du lecteur RFID. De proche en proche, les signaux radiofréquences reçus par le lecteur RFID, qui sont réfléchis par le tag, permettent donc de transporter des réponses en faisant varier l'intensité du circuit du lecteur.

Il s'agit ici d'un procédé assez complexe qui repose à la base sur un modèle de modulation. Cette modulation de charge résistive à l'origine de la transmission de la réponse s'appuie sur une modulation courante appelée OOK (On Off Keying) qui correspond à une version modifiée de la modulation ASK "tout ou rien".

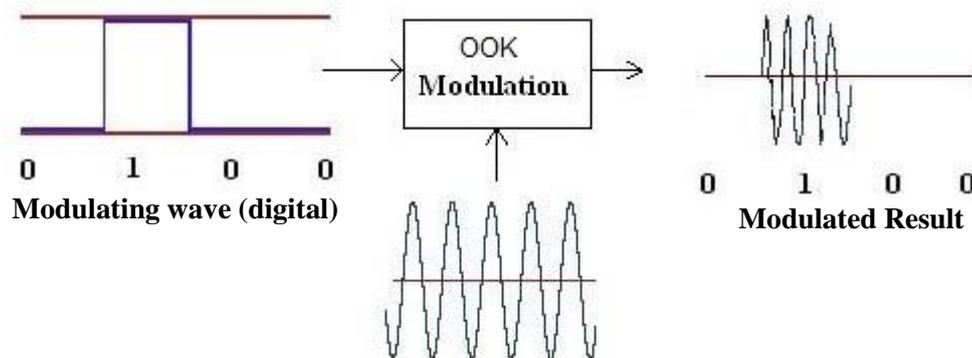


Figure 1.11. Modulation On Off Keying (OOK) [31].

La modulation OOK agit comme un interrupteur : la valeur binaire '0' correspond à 0V (on ne laisse passer aucun signal), la valeur binaire '1' permet de laisser passer le signal tel quel. La figure 1.11 représente la technique de modulation OOK, la porteuse est multipliée par 1 si le bit à transmettre est 1 ou par 0 si le bit à transmettre est 0.

## 2.4. Fréquences et normes des systèmes RFID

### 2.4.1. Fréquences des systèmes RFID

Le choix de la fréquence est dicté essentiellement par les exigences fonctionnelles telles que le choix du tag passif ou actif, ou bien encore le choix du couplage inductif ou radiatif ainsi les contraintes géométriques telles que la distance séparant le lecteur du tag RFID. D'autres facteurs techniques doivent cependant pris en compte, en particulier les problèmes de propagation, les basses fréquences ont l'avantage d'avoir un bon taux de pénétration dans l'eau et les matériaux non métalliques... Les caractéristiques de l'environnement dans lequel se propage une onde influent de façon différente en fonction de sa fréquence. Les bandes de

fréquences utilisées par les dispositifs RFID font partie des bandes non soumises à licence. Ces bandes, réservées aux applications ISM (Industrielles, Scientifiques et Médicales), sont néanmoins réglementées. La figure 1.12 synthétise les fréquences couramment utilisées pour les applications RFID [31-32].

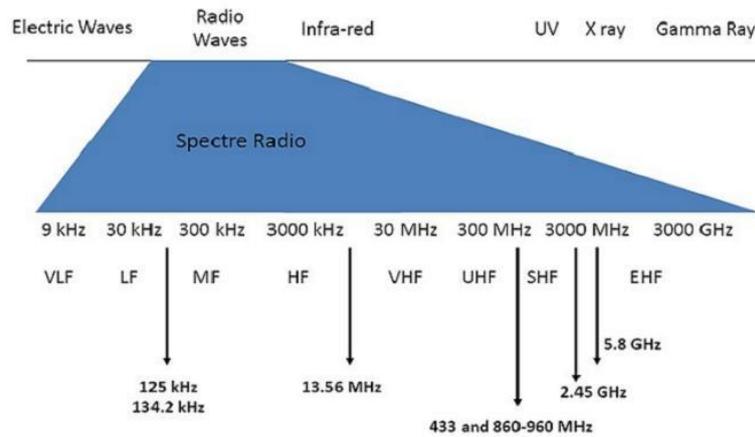


Figure. 1.12. Fréquences utilisées par la RFID [31].

Ces fréquences peuvent être classées en quatre groupes. Chacune possède des caractéristiques différentes, tant du point de vue fonctionnel (type de tag, distance de lecture, vitesse de communication) que vis-à-vis de son environnement (milieu perturbé, présence de métal...) ainsi son coût [31].

<b>Fréquence</b>	<b>125 KHz et 134,2 KHz</b>	<b>13,56 MHz</b>	<b>433 MHz et 860 MHz à 960 MHz</b>	<b>2,45 GHz et 5,8 GHz</b>
<b>Dénomination</b>	<b>Basses Fréquences</b>	<b>Hautes Fréquences</b>	<b>Ultra Hautes Fréquences</b>	<b>Micro-ondes</b>
<b>Fréquences les plus utilisées</b>	125 et 134,2 kHz	13,56 MHz	868 MHz (Europe) et 915 MHz (USA)	2,45 et 5,8 GHz
<b>Type de tag</b>	Passif	Passif	Passif ou actif	Actif
<b>Coût</b>	Élevé	Bas	Bas	Elevé
<b>Distance de communication [31]</b>	Portée faible (< 1m)	Portée moyenne (quelques mètres)	Portée longue (une dizaine de mètres entre 860 et 960 MHz et jusqu'à 100 m en 433 MHz)	Portée longue (<60 m)
<b>Transfert de données [31]</b>	Vitesse de communication faible (≈ 10 Kbits)	Vitesse de communication raisonnable (≈ 25 Kbits)	Vitesse de communication élevée (≈ 100 Kbits)	Vitesse de communication élevée (≈ 100 Kbits)
<b>Susceptibilité</b>	Métal	Métal	Métal, liquides	Métal, liquides
<b>Sensibilité aux perturbations électromagnétiques industrielles [7]</b>	Peu sensible	Peu sensible	Sensible	Fortement sensible
<b>Émission</b>	Perturbée par les masses métalliques. Peu sensible au milieu humide.	Perturbée par les masses métalliques. Atténuée en milieu humide	Atténuée par les masses métalliques. Atténuée en milieu humide	Atténuée par les masses métalliques. Perturbée en milieu humide

Tableau. 1.4. Comparaison des différents systèmes RFID à bande étroite.

On voit dans le tableau 1.4 que les technologies HF et UHF se démarquent en terme de coût. Mais la technologie UHF présente plus d'intérêts au niveau de la distance de communication et du débit de données.

Cette classification est basée sur des notions techniques et fonctionnelles, mais il existe une autre classification faite selon les régions du monde. Les bandes de fréquences utilisées par les systèmes RFID non soumises à licence, ou plus couramment dites bandes ouvertes, posent des vrais problèmes qui sont d'une part celui de leur encombrement, d'autre part celui de leur absence d'harmonisation au niveau international.

On trouve trois intervalles fréquentiels différents selon les régions du Monde [33] :

Amérique, Europe, Afrique, Asie (sauf Asie du Sud), Asie du Sud, Océanie.

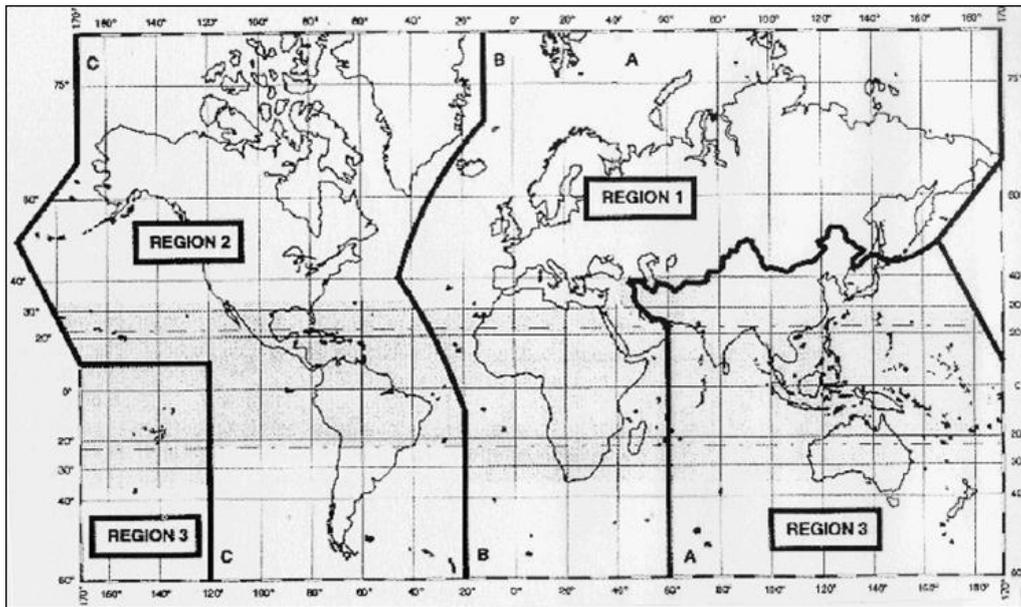


Figure. 1.13. Découpage fréquentiels dans le monde pour un système RFID [33].

Avec le découpage présenté en figure 1.13, il faut soigneusement vérifier quelles sont, dans un pays donné, les fréquences, le niveau de puissance et le gain maximum des antennes effectivement autorisés.

On mesure donc combien le problème des fréquences est complexe et peut constituer un obstacle au commerce international des produits étiquetés en RFID.

#### 2.4.2. Normes et protocole RFID

Comme tout dispositif émettant des ondes électromagnétiques, la première problématique concerne l'harmonisation de l'allocation des fréquences au niveau international. L'utilisation du spectre électromagnétique est réglementée et les différents acteurs de la RFID se doivent de respecter cette réglementation et se conformer à certaines exigences.

Pour chaque système RFID il y a une normalisation bien précise qui permet de fixer les fréquences permises de fonctionnement ou les niveaux de puissances émises autorisés. Pour des raisons d'interopérabilité, indispensable au développement de la RFID, il existe un nombre important de normes techniques ou applicatives dont certaines sont toujours au stade de projet ou en cours de révision. A ce jour, deux organisations proposent des normes pour les systèmes RFID : l'ISO (International Organization for Standardization) et l'EPCglobal (Electronic Product Code) [34-36].

### Normes techniques

Par normes techniques, nous entendons toutes les normes qui concernent la communication entre lecteurs RFID et tags ainsi que la gestion de données contenues dans les tags. Ces standards établissent les bases techniques d'un système d'identification automatique RFID en définissant les fréquences, les vitesses de transmission, les délais, les codifications et les protocoles. La rédaction des normes techniques a été confiée à un JTC (Joint Technical Committee) entre l'ISO (International Standard Organisation) et l'IEC (International Electrotechnical Committee). Les normes ISO 18000-X définissent les données essentielles de la couche physique et de protocole de communication permettant d'assurer les échanges entre interrogateur et transpondeur [34-36]. Ces normes sont déclinées par fréquence présentées dans le tableau 1.5.

Référence	Intitulé	Statut
18000-1 : 2008	Partie 1 : Architecture de référence et définition des paramètres à normaliser	Publiée le 13 Septembre 2004
18000-2 : 2009	Partie 2 : Paramètres de communications d'une interface d'air à moins de 140 kHz	Publiée le 13 Septembre 2004
18000-3 : 2010	Partie 3 : Paramètres de communications d'une interface d'air à 13,56 MHz	Publiée le 13 Septembre 2004
18000-4 : 2008	Partie 4 : Paramètres de communications d'une interface d'air à 2,45 GHz	Publiée le 21 Aout 2004
18000-5	Partie 5: Paramètres de communications d'une interface d'air à 5,8 GHz	Arrêtée faute de consensus
18000-6 : 2010	Partie 6: Paramètres de communications d'une interface d'air entre 860 MHz et 960 MHz	Publiée le 31 Aout 2004
18000-7	Partie 7 : Paramètres de communication d'une interface d'air à 433 MHz	Publiée le 12 décembre 2004

Tableau. 1.5. Normes techniques applicables à la RFID.

### Normes applicatives

Contrairement aux normes techniques bâties sur des propositions de fournisseurs de technologie, les normes applicatives relèvent de la volonté d'un certain nombre d'utilisateurs de créer un outil commun pour gérer leurs systèmes de traçabilité. Il existe donc des normes applicatives dédiées à certains secteurs d'activité. Parmi celles-ci, on peut citer les normes ISO 11784 et 11785 consacrées à l'identification des animaux ou encore les normes ISO 17363, 17364, 17635, 17366 et 17637 utilisées dans le domaine du fret et de la gestion logistique [33-35].

## **Standard de communication « EPC Global »**

EPCglobal est une organisation indépendante à but non lucratif. Elle a en charge le déploiement du système EPC à travers le monde. Le standard EPC (Electronic Product Code) est un système de codification permettant l'identification unique de tous les biens de la chaîne d'approvisionnement. Il permet de répondre aux besoins des entreprises pour l'échange et le partage d'informations : le suivi unitaire des objets grâce au code EPC, la capture à distance de l'information grâce à la RFID, le stockage et l'accès à l'information grâce aux standards ouverts d'internet [34-36].

Chaque objet peut donc être identifié par un code unique stocké dans un tag RFID. Un code EPC 96 bits s'écrit sous la forme présentée en figure 1.14.

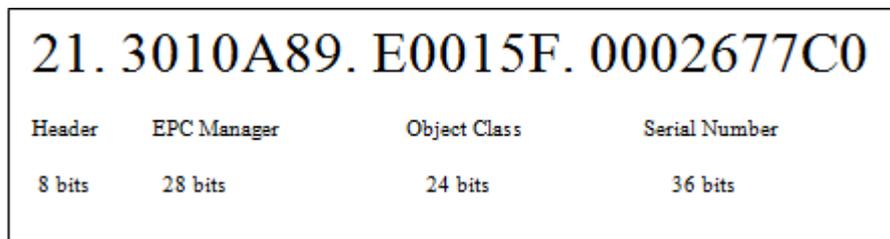


Figure. 1.14. Le format d'un code EPC 96 bits.

Header : version du standard EPC utilisé

EPC Manager : code du fabricant

Object Class : type de produit.

Serial Number : numéro unique attribué au produit.

Ce code permet de représenter un nombre d'objets différents de l'ordre de  $10^{18}$ .

### **3. Tags RFID passifs dans un milieu extrême**

#### **3.1. Description et fonctionnement d'un tag passif**

La technologie RFID UHF passive présente d'énormes intérêts comparativement aux autres technologies d'identifications. Ces intérêts sont résumés dans les parties précédentes. Dans un système RFID, le tag est l'élément qui s'expose le plus aux environnements difficiles vu qu'il est souvent collé sur l'objet à identifier. Dans ce paragraphe 3.1 nous allons nous consacrer au tag RFID passif à faible coût.

Il existe des tags RFID passifs de toutes formes et de toutes tailles afin de répondre aux spécificités et contraintes des diverses applications. En voici quelques uns, présentés aux figures 1.15, 1.16 et 1.17.

Des tags avec une antenne en aluminium imprimée sur un support papier, ils sont fins et souples, utilisés principalement dans le transport public, les cartes de paiements, le contrôle d'accès, E-ticket, gestion de bibliothèque. ils se différencient au niveau de la forme de l'antenne. Source : Top-tag (Figure 1.15).

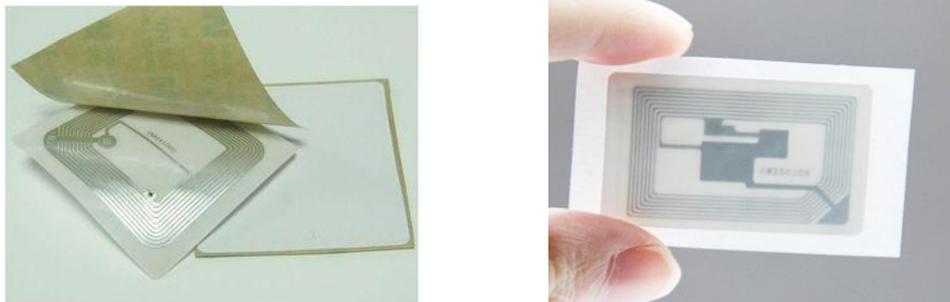


Figure. 1.15. Tags imprimés sur un support papier avec une antenne en aluminium.

Les tags pour l'identification des animaux, ils ont souvent une forme circulaire, éventuellement percés d'un trou pour mieux les fixer. Source : Shenzhen Smartech Ltd (Figure 1.16).



Figure. 1.16. Tags dédiés à l'identification des animaux.

Les tags RFID peuvent être miniaturisés à l'extrême. Ces tags mesurent environ 0.25 mm<sup>2</sup> ; ils sont pratiquement invisibles. Ils peuvent être utilisés pour les secteurs de la santé, de la pharmacie, de la logistique de détail et d'autres industries. Source : hitachi.com (Figure 1.17).

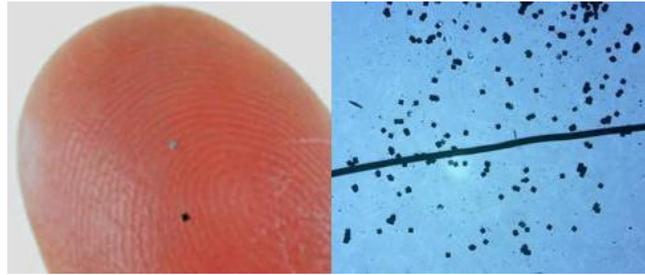


Figure. 1.17. Tags RFID en miniature.

Tous ces tags sont constitués d'une antenne et d'une puce électronique (Figure.1.18). On peut identifier dans cette dernière une partie radiofréquence (Front-end RF), et une partie numérique qui communique avec la mémoire contenant son code d'identification unique.

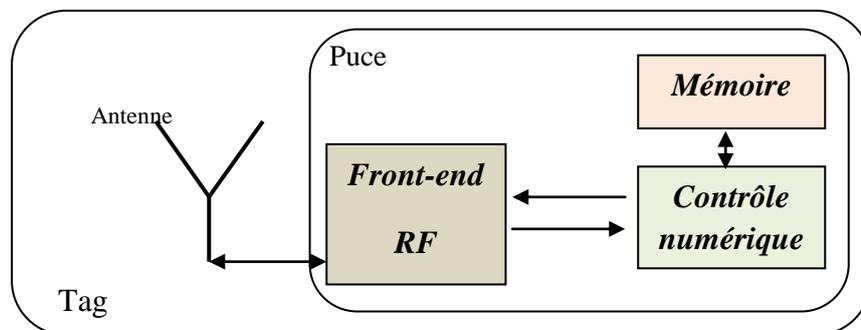


Figure. 1.18. Schéma fonctionnel d'un tag RFID passif.

La partie radiofréquence récupère l'énergie envoyée par le lecteur qui sert à alimenter le tag, elle récupère aussi le signal contenant l'instruction et rétro-module le signal à transmettre au lecteur. La partie numérique analyse les instructions reçues, elle code/décodes les informations et répond par l'envoi de ces données à la partie radio [37-38].

### 3.2. Composition d'un tag passif

La fabrication des tags RFID se fait par une technique de liaison "flip-chip" utilisant la thermo-compression pour connecter la puce ou RFIC (en anglais Radio Frequency Integrated Circuit), les contacts (électrodes conductrices) et l'antenne, électriquement et mécaniquement. Cette technique se déroule en quatre étapes [39-42] :

1. distribuer un adhésif sur le substrat,
2. aligner le RFIC avec les contacts et l'antenne,
3. connecter le RFIC avec les contacts,

4. durcir l'adhésif distribué par thermo-compression.

L'ACP (Anisotropic Conductive Paste) est l'adhésif le plus utilisé pour la RFID, il est composé d'une matrice polymère adhésive et des particules conductrices qui fournissent respectivement des connexions mécaniques et électriques.

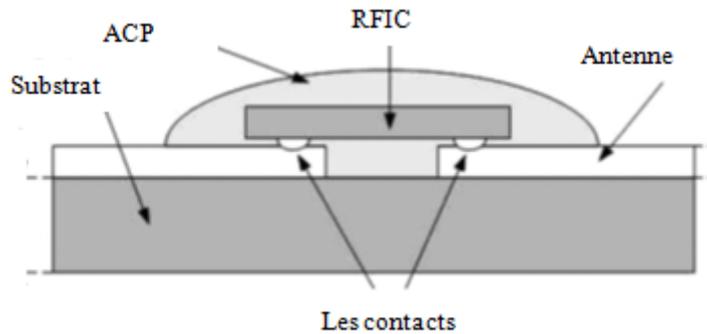


Figure. 1.19. Structure interne d'un tag RFID passif.

La figure 1.19 présente la micro structure d'un tag RFID. La connexion entre l'antenne et la RFIC se fait par l'intermédiaire des contacts et de l'ACP. Dans ce sens, les matériaux qui composent l'antenne, les contacts et l'adhésif sont des facteurs importants pour déterminer la qualité de la connexion électrique [38-41].

### 3.3. Introduction à l'état de l'art

Comme évoqué précédemment, la technologie RFID connaît un développement remarquable qui impose aux fabricants l'obligation de garantir une fiabilité dans des conditions environnementales sévères. La résistance des matériaux composants les tags est une contrainte importante pour mener à bien ce défi.

Dans ce contexte, plusieurs articles ont étudié la fiabilité des tags RFID, plus particulièrement les tags UHF passifs [43-52]. Ces travaux ont montré l'effet de la haute température et de l'humidité sur la fiabilité des différents composants d'un tag RFID UHF passif en utilisant le cyclage comme test de vieillissement accéléré (ces travaux seront détaillés dans § 2.2 du chapitre 2).

Le cyclage thermique est une méthode efficace pour faire apparaître les défaillances sur un composant électronique mais reste parfois difficile à mettre en œuvre. Au contraire des tests de stockage permettent de déterminer les effets de la contrainte de vieillissement sur la réponse des composants vieillis d'une façon plus simple. C'est une méthode qui semble plus

proche de ce qui se passe en réalité vue qu'elle détermine aussi l'effet du temps pendant les tests de vieillissement. À ce jour, on ne trouve pas dans la bibliographie de travaux sur la fiabilité des tags RFID UHF passifs en stockage, ce qui rend cet axe promoteur.

Le déploiement d'un système RFID réussi dans des environnements difficiles nécessite des connaissances et des considérations spécifiques, qui permettent de mieux cartographier les besoins et de faire le bon choix de tag pour chaque cas d'utilisation particulière et de choisir le bon système RFID pour un large éventail d'applications, y compris les applications de pointe.

La nécessité économique d'utiliser des tags bas coût pose la problématique du vieillissement prématuré et de la dégradation des performances.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté l'historique des différentes applications de la technologie RFID, les perspectives pour les années à venir. Cela montre l'intérêt grandissant des études sur la fiabilité des tags en environnements difficiles. Ensuite, nous avons présenté les avantages des tags RFID UHF passifs par rapport aux deux autres types de tags actifs et semi-actifs. Des expressions théoriques les plus utilisées dans une communication RFID décrivent les puissances émises et reçues par un tag RFID sont évoquées. De plus, nous avons exposé les modulations et les codages utilisés habituellement lors des liaisons montante et descendante tout en respectant les protocoles et les références mondiales. Cela nous a conduit à détailler davantage la technologie RFID passive avec l'intérêt qu'elle suscite. Enfin, pour conclure, un état de l'art de l'étude de la fiabilité des tags RFID passifs sous contraintes difficiles est présenté.

## Références

- [1] "Le RFID et le protocole Modbus" [http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2012/RFID\\_Modbus/RFID/histoire.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2012/RFID_Modbus/RFID/histoire.html), (consulter le 19/02/2018).
- [2] J. Landt, "The History of RFID", IEEE Potentials, vol. 24, no. 4, pp. 8-11, Oct.-Nov. 2005.
- [3] N. Seriot "Les systèmes d'identifications radio (RFID) - fonctionnement, applications et dangers. ", 25 p. [http://seriot.ch/resources/talks\\_papers/rfid/rfid.pdf](http://seriot.ch/resources/talks_papers/rfid/rfid.pdf), 13 janvier 2005.
- [4] J. Landt, B. Catlin, "Shrouds of Time the history of RFID". The Association for Automatic Identification and Data Capture Technologies (AIM), 2001.
- [5] K. Finkenzone, "RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification", John Wiley & Sons, Second Edition, 2003.
- [6] K. Finkenzone, "RFID Handbook: Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications." , Wiley, Second Edition, 2004.
- [7] K. Domdousis, B. Kumar, and C. Anumba, "Radio-frequency identification (RFID) applications: A brief introduction ", Adv. Eng. Inf., vol. 21, no. 4, Oct. 2007.
- [8] M. Schubler, C. Damm, M. Maasch, R. Jakoby, "Performance Evaluation of Left-Handed Delay Lines for RFID Backscatter Applications", IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2008), Atlanta, 15-20 June 2008.
- [9] D. Paret, "RFID at ultra and super high frequencies: theory and application". Wiley. 2009.
- [10] K. Finkenzone "RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication". Wiley. 2010.
- [11] F. Guidi, D. Dardari, C. Roblin, A. Sibille, " Backscatter communication using ultrawide bandwidth signals for RFID applications ". The Internet of Things, pp.251-261, 2010.
- [12] AFSSET "Les systèmes d'identification par radiofréquences (RFID) - Évaluation des impacts sanitaires". Maisons-Alfort, DECID Edition, pp 153, janvier 2009.
- [13] CNRFID "Les solutions RFID existantes dans le secteur de l'énergie et autres applications industrielles", Cnrfid de l'innovation au déploiement de solutions sans contact.
- [14] "wireless sensor networks energy harvesting and rfid in asia" <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/2490/wireless-sensor-networks-energy-harvesting-and-rfid-in-asia>, (consulter le 19/02/2018)
- [15] S. Hu, C. Law, W. Dou, "A Balloon-Shaped Monopole Antenna for Passive UWB-RFID Tag Applications", Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 15 July 2008.

- [16] M. Fairley, "RFID Smart Labels – A 'How to' Guide to Manufacturing and Performance for the Label Converter", Labels and Labeling, second edition, 2007.
- [17] D. Dardari, R. Derrico, C. Roblin, A. Sibille, M. Win, "Ultrawide bandwidth rfid: the next generation? ". Proceedings of the IEEE, vol. 98, pp.1570-1582, 2010.
- [18] Z. Zhuo, "Impulse radio uwb for the internet-of-things:a study on uhf/uwb hybrid solution ". KTH, Sweden. 2011.
- [19] "harsh environments news" <http://www.rfidjournal.com/harsh-environments>, (consulter le 19/02/2018).
- [20] " RFID for High Temperatures and Demanding Applications " [www.xerafy.com](http://www.xerafy.com) RFID for High Temperatures and Demanding Applications.
- [21] C. Tetelin " Systèmes et techniques RFID. " Editions T.I., 10 novembre , 2010.
- [22] D.Konstantinos, K. Bimal, A. Chimay "Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction. " Editions Elsevier, pp 6, Septembre 2006.
- [23] V. Hunt, A. Puglia, M. Puglia "Guide to Radio Frequency Identification." Wiley-interscience, pp 241, 2007.
- [24] EPCglobal France "L'identification par Radio Fréquence Principe et applications, " version 4.01 mars 2004.
- [25] RFIDcanada, "Understanding RFID (Radio Frequency Identification) (Passive RFID), " Second Edition, November 2012.
- [26] P. Hauet, "L'Identification par Radiofréquence (RFID) Techniques et Perspectives", article invité, REE No.10, Novembre 2006.
- [27] "RFID trong quản lý kho" <https://www.linkedin.com/pulse/rfid-trong-qu%E1%BA%A3n-l%C3%BD-kho-lan-thi-phuong-bui>, 2 avril 2016.
- [28] P.V. Nikitin, K.V.S. Rao, " Theory and measurement of backscattering from RFID tags ", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Volume: 48, Issue: 6, Dec. 2006.
- [29] Z. Ming-Tao, J. Yong-Chang, Zh. Fu-Shun., W. Wu-Tu., " Design of Antennas for RFID Application", Development and Implementation of RFID Technology, Book edited by: Cristina TURCU,ISBN 978-3-902613-54-7, pp. 554, , I-Tech, Vienna, Austria, February 2009.
- [30] M. Zahra'a, M.Al Haider, "Limitations of Forward and Return Links in UHF RFID with Passive Tags", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 5 Number 5 -Nov 2013
- [31] M.Ward, R. Van Kranenburg RFID: "Frequency, standards, adoption and innovation. JISC Technology and Standards Watch.", pp 36, May 2006.

- [32] " Les gammes de fréquences RFID" [http:// www.centrenational-rfid.com/ les-gammes-de-frequences-rfid-article-16-fr-ruid 17.html](http://www.centrenational-rfid.com/les-gammes-de-frequences-rfid-article-16-fr-ruid-17.html), (consulter le 19/02/2018).
- [33] " RFID (Radio Frequency IDentification)" [http:// www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/mmadegar\\_rfid/generalites.html](http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/mmadegar_rfid/generalites.html), (consulter le 19/02/2018).
- [34] G. Dessenne " RFID : Règlements et standards. " *Veille technologique*, n° 32, pp. 20-23 , Sep/Oct 2005.
- [35] O. Heyer "RFID et réglementation européenne" <http://www.filrfid.org/article-29966729.html>, (consulter le 19/02/2018).
- [36] STMicroelectronics, "XRAG2 – 432-bit UHF, EPCglobal Class 1 Generation2 and ISO 18000-6C, Contactless Memory Chip 96 with User Memory", Datasheet, April 2008.
- [37] P. Nikitin, K. Rao, "Performance limitations of passive uhf rfid systems. " *Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Symposium*, pp.1011-1014, 2006.
- [38] EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.2.0, October 2008.
- [39] W. Kawai, "OMRON Technology to Produce RFID Tags", white paper, OMRON Corporation, RFS-05001, June 2005.
- [40] J. Kim " Thermal degradation of anisotropic conductive film joints under temperature" fluctuation. *Int J Adhes*; 28:pp 314–20, 2008.
- [41] H. Chu, B. An, F. Wu, Y. Wu, "RFID Tag Packaging with Anisotropically Conductive Adhesive, *Electronic Packaging Technology*", 7th International Conference on Electronic Packaging Technology, Shanghai, 26-29 August 2006.
- [42] L. Frisk, "Study of Structure and Failure Mechanisms in ACA Interconnections Using SEM", Chapter in *Scanning electron microscopy* · March 2012.
- [43] J. Liu et Z. Lai, "Reliability of Anisotropically Conductive Adhesive Joints on a Flip-Chip/FR-4 Substrate. *Journal Of Electronic Packaging*", Vol. 124, September 2002.
- [44] A. Seppälä, E. Ristolainen, "Study of adhesive flip chip bonding process and failure mechanisms of ACA joint". *Microelectron Reliab*;44:pp 639–48, 2004.
- [45] K. Woon-Seong, Y. Myung-Jin, P. Kyung-Wook, H. Suk-Jin, L. Soon-Bok "Thermal Cycling Reliability and Delamination of Anisotropic Conductive Adhesives Flip Chip on Organic Substrates With Emphasis on the Thermal Deformation. *Electronic and Photonic Packaging Division*", Vol. 127, June 2005.
- [46] L. Frisk, K. Kokko "The effects of chip and substrate thickness on the reliability of ACA bonded flip chip joints. " *Solder Surf Mount Technol*;18:pp 28–37, 2006.

- [47] YC. Lin, J. Zhong, "A review of the influencing factors on anisotropic conductive adhesives joining technology in electrical applications." *J Mater Sci*; pp 43–93, 2008.
- [48] J. Kim, "Thermal degradation of anisotropic conductive film joints under temperature fluctuation." *Int J Adhes*; pp 14–20, 2008.
- [49] K. Saarinen, L. Frisk, L. Ukkonen. "Effect of cycling humidity on the performance of RFID tags with ACA joints. " *IEEE T Reliab*; pp 23–31. 2012.
- [50] K. Saarinen, T. Björninen, L. Ukkonen, L. Frisk "Reliability analysis of RFID tags in changing humid environment". *IEEE Trans Comp Pack*; pp 77–85. 2014.
- [51] S. Lahokallio, K. Saarinen, L. Frisk "Effects of different test profiles of temperature cycling tests on the reliability of RFID tags". *Microelectron Reliab*, pp 93–100. 2015.
- [52] K. Saarinen, S. Lahokallio, L. Frisk "Effects of different anisotropically conductive adhesives on the reliability of UHF RFID tags". *International Journal of Adhesion & Adhesives* 64, pp 52–59. 2016.
- [53] V. Arnaud, E. Perret, S. Tedjini "La RFID sans puce théorie, conception, mesures". collection réseaux et télécommunications série l'identification sans fil au-delà de la RFID. Décembre 2010.
- [54] D. Paret "RFID en ultra and super hautes fréquences: Théorie et mise en oeuvre". Collection : Technique et Ingénierie, Dunod, mars 2008.
- [55] A. Ghasemi " Propagation Engineering in Wireless Communications ". chapitre 2 basic principles in radiowave propagation, Springer Science + Business Media, LLC 2011.

## **CHAPITRE 2**

### **Fiabilité des Tags RFID UHF passifs : généralités et méthodologie adoptée.**

## **Introduction**

Avant de se consacrer à l'étude de la fiabilité des tags RFID UHF passif, il est important de maîtriser les paramètres fondamentaux de la fiabilité. Pour ce faire, dans une première partie de ce chapitre nous présenterons l'intérêt de la fiabilité et définirons les relations statistiques liées aux différents stades de la vie d'un composant, puis nous décrirons les caractéristiques probabilistes que nous allons utiliser dans les chapitres suivants lors de l'analyse statistique. Ensuite, dans une seconde partie, nous définirons les tests de vieillissement accélérés leur principe et leurs avantages en arrivant un état de l'art sur l'application de ce type de tests accélérés sur les systèmes RFID, et nous mettrons, alors, en évidence le besoin d'exploiter le vieillissement en stockage thermique pour faire apparaître les mécanismes de défaillance sur un système RFID passif. Enfin dans une dernière partie, nous présenterons la méthodologie du travail adoptée pour répondre à l'objectif de ce travail de thèse.

### **1. Caractéristiques probabilistes de la fiabilité**

#### **1.1. Historique et intérêt de la fiabilité**

La fiabilité a connu un essor depuis la deuxième guerre mondiale, son concept a été tracé à travers les différentes étapes de l'histoire de l'industrie (automobile, électronique, aéronautique.) [1]. Elle est devenue une science à part entière dans les applications appartenant à de nombreux domaines. À titre d'exemple, la sûreté de fonctionnement a été une science très utile lors du développement du programme nucléaire dans les années 70 [2].

Cette croissance a permis à la fiabilité d'être un paramètre important de la qualité et d'aider à la décision dans l'étude de la plupart des composants électroniques et mécaniques, alors qu'à l'origine, la fiabilité ne concernait que les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial) [3]. L'analyse de la fiabilité constitue donc une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement.

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

Dans le domaine de l'électronique, l'analyse de la fiabilité se présente comme un outil indispensable pour caractériser le comportement des composants dans les différentes phases

de vie, pour mesurer l'effet des modifications de conception sur l'intégrité de produit, aussi pour qualifier un nouveau produit et démontrer ses capacités à fonctionner, sous des conditions spécifiques d'environnement. Comme nous l'avons exposé dans le chapitre 1, la RFID est une technologie en progression continue. En effet, son utilisation dans des domaines critiques nécessite d'être validée par l'analyse de la fiabilité, afin de garantir ses performances dans des conditions environnementales difficiles.

## 1.2. Fonctions de la fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pendant une durée donnée, elle est exprimée par la probabilité qu'elle accomplisse la fonction pour laquelle elle a été conçue [4]. Ainsi, la durée de vie d'un système est utilisée pour mesurer la quantité de service rendu. D'une manière générale, on mesure la durée de vie d'un système par le nombre d'heures durant lesquelles il a effectivement fonctionné [5]. La durée de vie ( $T$ ) d'un système est une variable aléatoire non négative, à partir de laquelle la loi de dégradation du système peut être déterminée. L'équation (2.1) exprime la probabilité que la durée de vie  $T$  du système soit comprise entre  $t$  et  $t+dt$ , ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre  $t$  et  $t+dt$  [6-11].

$$f(t) = \text{Prob}(t < T < t + dt) \quad (2-1)$$

Avec  $f(t)$  la fonction de densité de probabilité (FDP) associée aux durées de vie.

On appelle fonction de défaillance ou distribution cumulée la fonction  $F$  définie pour tout  $t \geq 0$  par :

$$F(t) = \text{Prob}(T < t) = \int_0^t f(u) du \quad (2-2)$$

La fonction  $F(t)$  représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant  $t$ . La figure 2.1 donne l'allure de cette fonction.

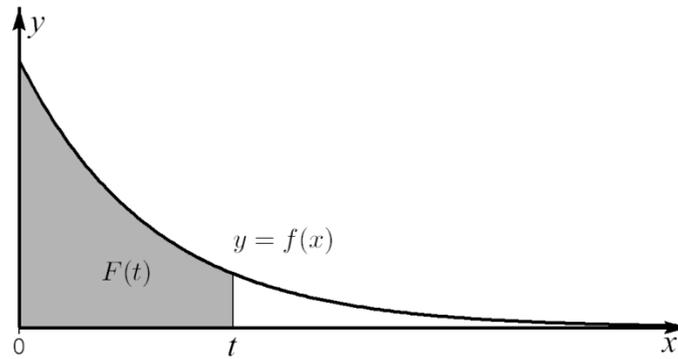


Figure 2.1. Fonction de défaillance.

Quant à la distribution des durées de vie (fonction de défaillance)  $F(t)$  et la fonction de fiabilité  $R(t)$ , elles sont reliées par l'équation (2.3) [3] [6-9].

$$R(t) = \text{Prob}(T > t) = 1 - F(t) \quad (2-3)$$

La fonction  $R(t)$  représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant  $t$ . C'est une fonction décroissante dans le temps (Figure 2.2), de telle manière que  $R(t_1) > R(t_2)$  si  $t_1 < t_2$ .

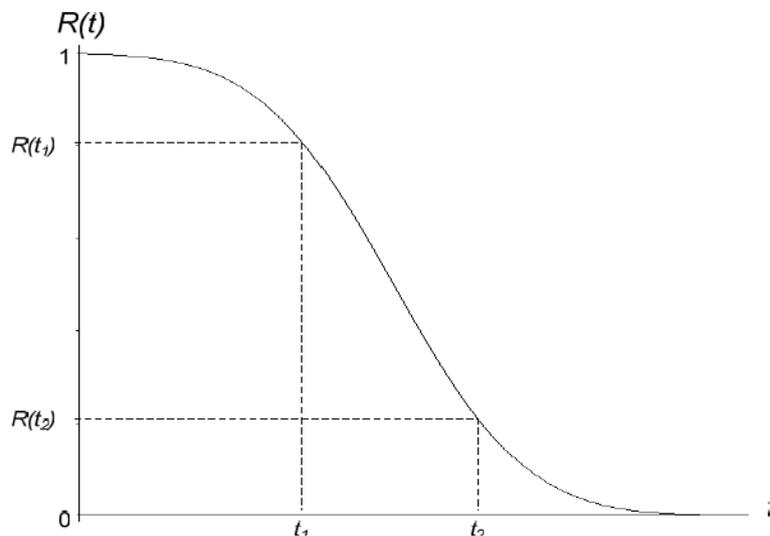


Figure 2.2. Fonction de fiabilité décroissante avec le temps [3].

Le taux de panne ou de défaillance  $r(t)$ , est la quatrième fonction permettant de caractériser la loi de dégradation d'un système. Il s'agit de la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps d'un système ayant survécu jusqu'à  $t$ .

L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant  $t$  est la suivante :

$$r(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \quad (2-4)$$

Il signifie la probabilité qu'un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donnée.

Le taux de défaillance d'un dispositif à l'instant t est donc défini par [6-11] :

$$r(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2-5)$$

Cependant, la loi de dégradation d'un système est complètement définie par la connaissance d'une seule de ces 4 caractéristiques [3] [6-9].

Le comportement temporel du taux de panne est représenté par la courbe « en baignoire » de la figure 2.3. Cette courbe comporte trois phases pour lesquelles on détaille les causes potentielles et les actions à entreprendre pour améliorer le comportement du système.

La première phase appelée phase de jeunesse se caractérise par un taux de défaillance décroissant, il est élevé au début de la vie du composant, après il diminue rapidement en fonction du temps. Ensuite, il se stabilise, dans la deuxième phase, à une valeur basse (peu de pannes), cette phase définit la période de vie active du composant généralement très longue. A la fin, dans la troisième phase, le taux de défaillance remonte avec les effets de vieillissement, cette phase est appelée donc phase de vieillissement.

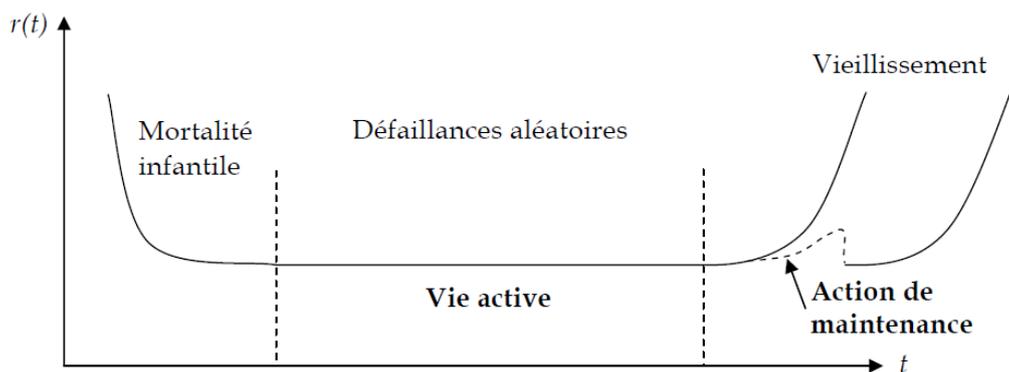


Figure 2.3. Évolution du taux de défaillance en courbe « baignoire » [27].

Selon le type de produit (électronique ou mécanique), l'allure de la courbe peut changer.

En général, pour des composants électroniques la courbe représentant le taux de défaillance en fonction du temps, a la même forme que la courbe baignoire présentée sur la figure 2.3.

Elle est composée de trois phases : phase de jeunesse, vie active et phase de vieillissement. Alors que pour les composants mécaniques, on n'a pas forcément la même allure. Ils sont soumis dès le début au phénomène de vieillissement, et la phase de vie active est réduite ou n'existe pas [6-9].

### 1.3. Temps moyen de bon fonctionnement

Le temps moyen de bon fonctionnement (ou de défaillance ou de panne) correspond à l'espérance de la durée de vie  $T$ , on le note MTTF (en anglais Mean Time To Failure) [6-11] :

$$MTTF = E [T] = \int_0^{+\infty} t f(t) dt = \int_0^{+\infty} R(u) du \quad (2-6)$$

Le MTTF signifie la durée de vie moyenne du système.

### 1.4. Facteur d'accélération

On utilise le terme « facteur d'accélération » noté FA, pour désigner le rapport de la durée de vie réelle (du niveau opérationnel) et la durée de vie en test (du niveau supérieur de la contrainte), cela permet de prédire la durée de vie réelle d'un composant à partir de sa durée de vie sous contrainte. Il est défini pour une durée de vie  $\tau_1$  pour une température  $T_1$  d'utilisation et une durée de vie  $\tau_2$  pour une température  $T_2$  de test selon la relation (2-7) [3] [6-9] :

$$FA = \frac{\tau_1}{\tau_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (2-7)$$

Où  $E_a$  est l'énergie d'activation (en eV) et  $k$  est la constante de Boltzmann ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K).

Pour effectuer des études de fiabilité ou de robustesse, il faut accélérer le temps, ou augmenter le niveau de contrainte, ce qui amène à définir des facteurs d'accélération thermique, le facteur d'accélération traduit donc la cinétique du mécanisme de dégradation. Il est utilisé afin de dimensionner la durée des essais en fonction d'un profil de mission du produit à évaluer. Le profil de mission d'un produit regroupe l'ensemble des contraintes qu'il va subir tout au long de son utilisation.

### 1.5. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

Dans ce paragraphe, nous présenterons quelques distributions de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse des données de vie et qui sont communes à plusieurs disciplines. Nous traiterons en particuliers des lois continues. Nous énoncerons les principales propriétés de ces lois (densité de probabilité, fonctions fiabilité et taux de défaillance).

#### 1.5.1. Loi log-normal (ou de Galton)

Une variable aléatoire continue et positive  $T$  est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est largement utilisée pour modéliser des données de vie, en particulier les défaillances par fatigue en mécanique [8].

La densité de probabilité d'une loi log-normale de paramètres positifs  $\mu$  et  $\sigma$  est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right)^2}, \quad t > 0 \quad (2-8)$$

La fonction fiabilité :

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (2-9)$$

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad (2-10)$$

$\phi$ : Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

Le domaine de définition n'étant jamais négatif, il n'y a aucune limitation à l'emploi de la distribution log-normale en fiabilité. Le taux de défaillance est croissant dans le début de vie puis décroissant en tendant vers zéro et la distribution est très dissymétrique.

#### 1.5.2. Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines.... C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales [8].

La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre  $r$  s'écrit :

$$f(t) = r \cdot e^{(-\lambda t)} \quad (2-11)$$

La fonction fiabilité :

$$R(t) = e^{(-r.t)} \quad (2-12)$$

Le taux de défaillance est constant dans le temps :

$$h(t) = r \quad (2-13)$$

La durée moyenne de bon fonctionnement :

$$MTTF = \frac{1}{r} \quad (2-14)$$

### 1.5.3. Loi de Weibull

C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,...). Elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement [9]. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants :  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$ . Le mathématicien suédois Waloddi Weibull a défini en 1937 que la formule de la fiabilité, définie par la fonction de survie, pouvait s'exprimer par [10-11] :

$$R(t) = e^{-(\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta} \quad (2-15)$$

Tel que :

- $\gamma$  : paramètre de position (qu'on appelle aussi d'origine des temps). Ce paramètre donne des indications sur le retard de la fonction  $f(t)$  ; ( $f(t)$  est la FDP de la loi de Weibull qui a pour expression [10-11]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-(\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta}, \quad t \geq \gamma \quad (2-16)$$

- $\gamma < 0 \Rightarrow$  une probabilité de défaillance est déjà présente lors de l'installation du système

- ✚  $\gamma=0 \Rightarrow$  une probabilité de défaillance sera présente dès la mise en service du système
- ✚  $\gamma > 0 \Rightarrow$  La probabilité de défaillance dans les premières utilisations du système est nulle.

Ce paramètre prend en compte le fait que les composants étudiés sont neufs ou ont été déjà utilisés avant l'essai, avec ou sans remplacement. « Lorsqu'on n'a utilisé que des composants neufs,  $\gamma = 0$  : La formule de Weibull est dite à deux paramètres ».

- $\eta$  : paramètre d'échelle représente la durée pour laquelle on a 63% de morts.
- $\beta$  : paramètre de forme représente la cinétique du mécanisme de défaillance (vitesse d'usure) c'est-à-dire, qu'il définit le type de phénomène de dégradation en cause. Le paramètre de forme  $\beta$  varie de 0 à 4 et présente des valeurs particulières :
  - ✚  $\beta < 1 \Rightarrow$  panne de jeunesse (taux de défaillance décroissant). Le composant est dans sa période infantile ou de défauts de jeunesse. Certains composants d'un lot sont moins robustes que les autres (mauvaise fabrication, mauvais stockage, mauvais montage) ; leur défaillance se manifeste pour des contraintes plus faibles.
  - ✚  $\beta = 1 \Rightarrow$  taux de défaillance constant (loi exponentielle). La période est dite de vie utile ou de panne fortuite. Les composants suivent une loi exponentielle -2P:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2-17)$$

- ✚  $\beta > 1 \Rightarrow$  phénomène d'usure (taux de défaillance croissant).
- ✚  $\beta = 3,45$  : usure. Pour cette valeur de  $\beta$ , la loi représentative du phénomène est la loi normale. À partir de  $\beta = 3$ , on assimile la loi à une loi normale, la loi de Weibull étant toujours applicable [10-11].

#### 1.5.4. Relation Arrhenius-Weibull

##### a. Modèle d'Arrhenius

Modèle d'Arrhenius est utilisé lorsque le mécanisme d'endommagement est accéléré par des contraintes thermiques. Il décrit l'accélération produite par la température d'un mécanisme particulier. La vitesse moyenne de dégradation d'un mécanisme sensible à la température est donnée par la loi [10-11] :

$$v = A \cdot e^{\left(\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (2-18)$$

Avec :

- ✚ A' : constante positive propre à l'essai.
- ✚ T : température absolue en K.
- ✚ E<sub>a</sub> : énergie d'activation en eV, elle présente la quantité minimale d'énergie nécessaire à l'activation d'un procédé.
- ✚ k : constante de Boltzmann.

La relation d'Arrhenius modélise la durée de vie moyenne t d'un produit en fonction du niveau de la température T selon la relation 2-19 :

$$L(T) = C \cdot e^{\left(\frac{E_a}{kT}\right)} \quad (2-19)$$

Avec C une constante propre à l'essai, elle est estimée à partir des résultats du test.

On pose  $B = \frac{E_a}{k}$ , donc :

$$L(T) = C \cdot e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (2-20)$$

B est traité comme un autre paramètre du modèle qu'il faut déterminer, il a les propriétés de l'énergie d'activation. C'est une mesure de l'effet que la contrainte (Température) a sur la durée de vie.

### **b. Modèle Arrhenius-Weibull**

Le modèle Arrhenius-Weibull est obtenu en prenant le paramètre d'échelle égal à la loi d'Arrhenius :

$$\eta(T) = C \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (2-21)$$

Pour obtenir la FDP du modèle Arrhenius-Weibull on remplace le paramètre d'échelle  $\eta$  exprimé par 2-21 dans l'expression de la FDP de la loi de Weibull exprimée par 2-16, on obtient :

$$f(t, T, E_a, \beta, \gamma) = \left( \frac{\beta}{C \cdot e^{\frac{E_a}{KT}}} \right) \cdot \left( \frac{t - \gamma}{C \cdot e^{\frac{E_a}{KT}}} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left( \frac{t - \gamma}{C \cdot e^{\frac{E_a}{KT}}} \right)^\beta}, \quad t \geq \gamma \quad (2-22)$$

Cette fonction de densité de probabilité dépend de la température T de l'énergie d'activation  $E_a$  et des deux paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  (paramètre de forme et paramètre de position).

Aussi la fonction fiabilité de ce modèle peut être calculée en remplaçant le paramètre d'échelle du modèle Arrhenius-Weibull  $\eta$  dans l'expression de la fonction de la fiabilité de la loi de Weibull exprimée par 2-15, on obtient :

$$R(t, T, E_a, \beta, \gamma) = e^{-\left( \frac{t - \gamma}{C \cdot e^{\frac{E_a}{KT}}} \right)^\beta} \quad (2-23)$$

Cette fonction dépend également des quatre paramètres T,  $E_a$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .

Ces lois de probabilité d'Arrhenius-Weibull permettent de combiner la loi Arrhenius et la distribution Weibull, pour caractériser le comportement d'un composant, vieilli sous contrainte thermique. Ce procédé est réalisé dans ses trois phases de vie (jeunesse, vie active et vieillissement).

Aujourd'hui, il existe différents outils d'analyse permettant d'estimer les lois de la fiabilité d'un système donné d'une façon fiable et rapide. Parmi ces outils, on trouve le logiciel ALTA de ReliaSoft (voir l'annexe 5).

## 2. Les tests de vieillissement accélérés

Le test du niveau de la fiabilité et la caractérisation de la vie d'un composant dans les conditions d'utilisation normale doivent faire face à une problématique principale qui est la durée des tests. En effet il faut un minimum de X années pour garantir une durée de vie de X années. Les essais accélérés ou Tests de Vie Accélérée (en anglais Accelerated Life Testing ALT) présentent une approche pour remédier à ce problème. Aussi il est nécessaire de définir la vie du composant avec des outils statistiques, qui nous permettront de situer le composant dans une phase de sa vie.

## 2.1. Les tests accélérés

D'une manière générale, l'accélération des essais est réalisée par des conditions d'essais plus sévères ou d'environnement amplifiées par rapport à celles prévues par le constructeur pour le composant en application. Elle est utilisée pour faire apparaître les défaillances plus rapidement que lors d'une utilisation dans les conditions nominales du produit [12]. L'accélération des essais a pour but l'estimation des caractéristiques comportementales (loi de fiabilité, performances opérationnelles, ...) du produit dans les conditions normales d'emploi à partir des conditions accélérées d'utilisation et cela dans des délais compatibles avec les contraintes calendaires associées à la phase de développement [13].

Lors d'un test de vieillissement accéléré, le taux de défaillance augmente et la fiabilité diminue [14]. Les tests de vieillissement accélérés donnent des durées de vie « accélérées ». La contrainte du test peut être une température, une tension ou des vibrations mécaniques ; sa valeur est plus élevée que celle de la contrainte nominale que le produit doit supporter dans une utilisation normale.

Après accélération on obtient des durées de vie moyennes en fonction du niveau de contrainte (Figure 2.4). Le passage des conditions accélérées aux conditions normales en ce qui concerne la durée de vie s'effectue à l'aide de la loi d'accélération. Une courbe ajuste ces données, ce qui permet d'extrapoler la durée de vie nominale, calculée à partir du niveau de contrainte pour lequel le produit a été conçu [15].

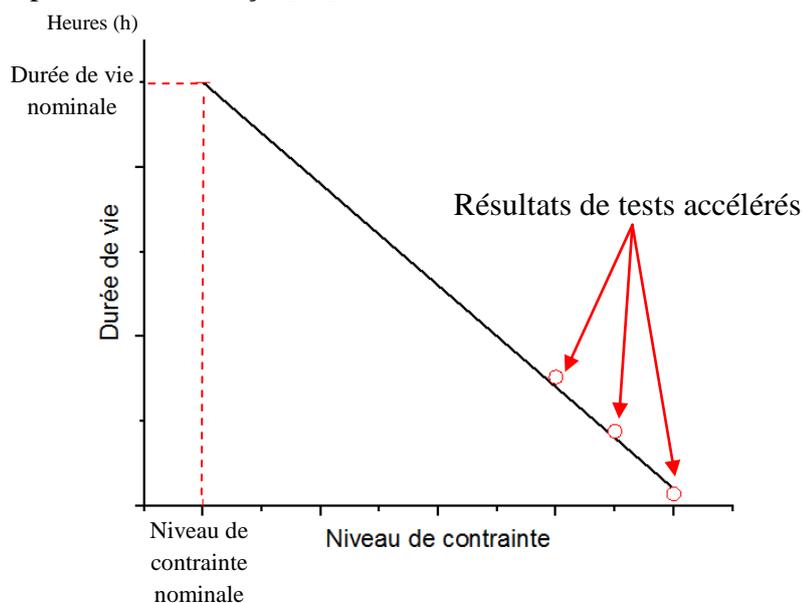


Figure 2.4. Estimation des durées de vies en conditions normales [5].

Pour réaliser des essais accélérés dans de bonnes conditions, il faut généralement respecter quatre règles essentielles. La première concerne le choix de la contrainte (température, humidité, vibrations mécanique...) ainsi sa valeur qui doit rester inférieure à la valeur limite technologique. La deuxième règle est de bien connaître les mécanismes de défaillances provoqués, ceux-ci doivent être reproduits dans les conditions de fonctionnement normales. La troisième règle consiste à apprécier la loi d'accélération qui va relier la vitesse de dégradation à l'amplitude de la contrainte appliquée. Enfin le dernier point consiste à connaître la valeur des paramètres intervenant dans les modèles estimés [16].

De plus, Le nombre de tests accélérés doit être suffisamment grand pour pouvoir faire une extrapolation précise. Celle-ci n'est pas forcément linéaire comme dans le cas de la Figure 2.4. Pour le cas où le mode de défaillance dépend de la température comme étant une contrainte de vieillissement, c'est l'équation d'Arrhenius, définie dans la partie 1.6.4, qui permet de déterminer la relation entre contrainte nominale et contraintes accélérées [12].

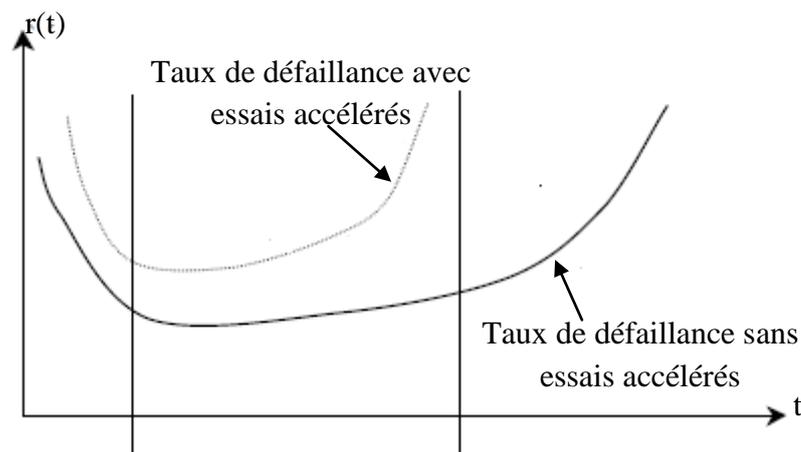


Figure 2.5. Courbes en baignoire avec et sans essais accélérés [14].

Les essais accélérés ne permettent pas seulement de réduire la durée pour obtenir la fiabilité opérationnelle du produit (voir la figure 2.5) mais aussi de mesurer l'impact des contraintes d'utilisation et d'environnement sur le produit. Dans ce sens plusieurs essais accélérés ont été réalisés pour étudier l'influence de l'environnement sévère sur la fiabilité des tags RFID UHF passifs.

## 2.2. État de l'art des tests accélérés sur la RFID

Aujourd'hui, le développement rapide de la RFID et son utilisation dans plusieurs applications dans différents domaines conduit les chercheurs à étudier la fiabilité de ce système et chercher l'impact de l'environnement sur sa robustesse.

Dans la bibliographie, de nombreux articles ont étudié particulièrement la fiabilité des joints ACP, utilisés dans les tags RFID passifs. Différents types d'ACP ont été soumis à des essais de fiabilité en humidité et en cyclage thermique sur des durées de tests diverses [19-22]. L'extrapolation des lois de la fiabilité et ses caractéristiques probabilistes est un point clé dans ces travaux de recherche. Ainsi l'analyse de l'influence des contraintes environnementales (température, pression, humidité...) sur la fiabilité des joints ACP reste un axe de recherche prometteur. Les résultats de ces tests accélérés dépendent forcément du choix du type des tests de vieillissement accélérés.

Au fil des années, les chercheurs commencent à s'intéresser de plus en plus à l'étude de la fiabilité du système RFID et plus particulièrement les tags RFID passifs. Dans [23], une étude des effets de l'évolution des conditions d'humidité sur la performance des tags RFID UHF passifs a été effectuée. Les tags ont été testés en cyclage d'humidité où l'humidité variait de 85% RH (Relative humidity) à 10% RH, et la température de 85 ( $\pm 5$ ) °C à 25( $\pm 5$ ) °C. Quatre séries de tags avec des paramètres différents ont été testés. Des différences significatives dans la fiabilité entre les quatre séries ont été observées. Les résultats ont également été comparés avec les résultats d'un autre test où l'humidité était fixe égale à 85% HR et la température était de 85 ( $\pm 5$ ) °C. Plusieurs mécanismes de défaillance ont été observés avec des temps de vieillissement différents. Selon cette étude, il est important d'étudier les effets du cyclage d'humidité mais le test où l'humidité est constante ne peut pas être remplacé par le test du cyclage d'humidité rapide.

En 2014 Kirsi Saarinen a publié [24] pour compléter les travaux faits dans [23] par des simulations électromagnétiques d'antennes. Les simulations avaient comme but d'étayer l'analyse des mécanismes de défaillance. Une variation dans l'adaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne a été trouvée, afin que le mécanisme de défaillance soit le plus probable. L'adaptation d'impédance peut changer en raison de fissures formées dans l'antenne pendant l'essai ou en raison de changements chimiques et mécaniques dans les joints ACP. Il a été observé dans cette étude que plusieurs facteurs de défaillance pourraient agir simultanément.

Ce travail a été basé sur les mêmes tests de [23] dont les contraintes de vieillissement étaient l'humidité et la température en cyclage.

En 2015 Sanna Lahokallio [25], a étudié les effets de différents profils du cyclage thermique en modifiant les plages de températures, les températures extrêmes, les temps de transition... Les résultats de ce travail ont montré une nette différence au niveau des temps de défaillance pour chaque test. Le test avec le temps de transition le plus rapide était le test qui a fait apparaître les dégradations dans les plus brefs délais. Il a été observé également que les différents profils du cyclage thermique affectent les mécanismes de défaillance détectés. Des fissures sur l'antenne ont été constatées avec des températures extrêmes plus basses ou des temps de transition plus courts. Cependant, avec des temps de transition plus longs, des fissures ont été remarquées dans les interconnexions RFID. Les deux cas ont entraîné des changements dans l'adaptation de l'impédance et, par conséquent, des défaillances. Les résultats globaux de ce travail ont montré que dans un test du cyclage thermique les mécanismes de défaillance apparaissent mais le choix des paramètres d'essai est primordial, sans compter que le risque d'obtenir des mécanismes de défaillance non reproduits à l'état nominale augmente.

Un an plus tard, Kirsi Saarinen-Pulli a publié un article qui englobe en même temps la fiabilité de l'ACP et de la RFID [26]. L'article présente une étude des comportements des interconnexions des tags RFID UHF passifs avec quatre différents types de l'ACP. À des fins de comparaison, les ACP ont été caractérisées en utilisant plusieurs techniques. La fiabilité des interconnexions a été étudiée à l'aide de tests en cyclage thermique combinés avec des tests en humidité constante. Des différences en temps de défaillance entre les quatre types d'ACP ont été observées. De plus, différents environnements ont eu des effets différents sur la fiabilité des interconnexions des tags. Les résultats globaux de ce travail ont montré que les propriétés de l'ACP influencent la fiabilité des tags dans des environnements difficiles. De plus le choix de l'ACP doit être soigneusement considéré pour des tags dédiés à des applications précises.

Dans la majorité des articles publiés portés sur l'étude de la fiabilité des tags RFID UHF passifs, les contraintes considérées sont souvent la haute température et l'humidité et la combinaison entre les deux. Le fait de combiner deux ou plusieurs contraintes réduit la possibilité de déterminer l'impact des contraintes et de définir le paramètre ou la contrainte qui a réellement contribué à la dégradation. L'apport de l'un des paramètres de test est peut-

être négligeable ou l'ensemble des paramètres ont peut-être contribué à parts égales dans la dégradation.

Le type de test joue un rôle fondamental dans la détermination des mécanismes de défaillance, le cyclage thermique reste le test le plus classique et le plus adopté dans les tests de vieillissement accélérés, mais il présente le risque d'engendrer des mécanismes de défaillance non reproduits dans l'état nominal. Le stockage thermique est une alternative importante qui demande un temps de test plus important comparé au cyclage thermique cependant, le risque d'engendrer des mécanismes de défaillance incorrects est moindre. Aussi le stockage thermique permet de déterminer l'effet du temps sur la réponse des composants vieillis, Cela rend ce type de test plus proche de la réalité. Pour cela nous avons choisi d'effectuer des essais accélérés en stockage thermique avec des températures allant jusqu'à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

La loi d'Arrhenius est adoptée comme loi d'accélération (voir chapitre 3) afin d'extrapoler la valeur des taux de défaillance vers des températures inférieures à celles de l'essai.

### **3. Méthodologie du travail**

Nous avons adopté une méthodologie précise basée sur les tests de vieillissement accélérés en stockage thermique, pour étudier les effets de la haute température sur la fiabilité des tags RFID passifs et pour faire apparaître les modes de défaillance et de déterminer les mécanismes.

La méthodologie proposée se compose principalement de trois étapes essentielles (figure 2.6). La première concerne le choix des tags à vieillir et leurs caractérisations à l'état neuf (puissance réfléchie et portée), la deuxième étape s'intéresse à la définition des paramètres d'essai (choix de la température de vieillissement et la durée des tests) ainsi qu'à la caractérisation physique et électrique de l'ensemble des tags vieillis. Cette caractérisation se fait après chaque phase de vieillissement, dans le but est d'évaluer les changements de performance de ces tags. La dernière étape de cette méthodologie concerne l'analyse statistique et physique de défaillances. Pour identifier les mécanismes de défaillance, les tags vieillis sont analysés à l'aide d'un microscope optique et d'une microscopie électronique à balayage (MEB).

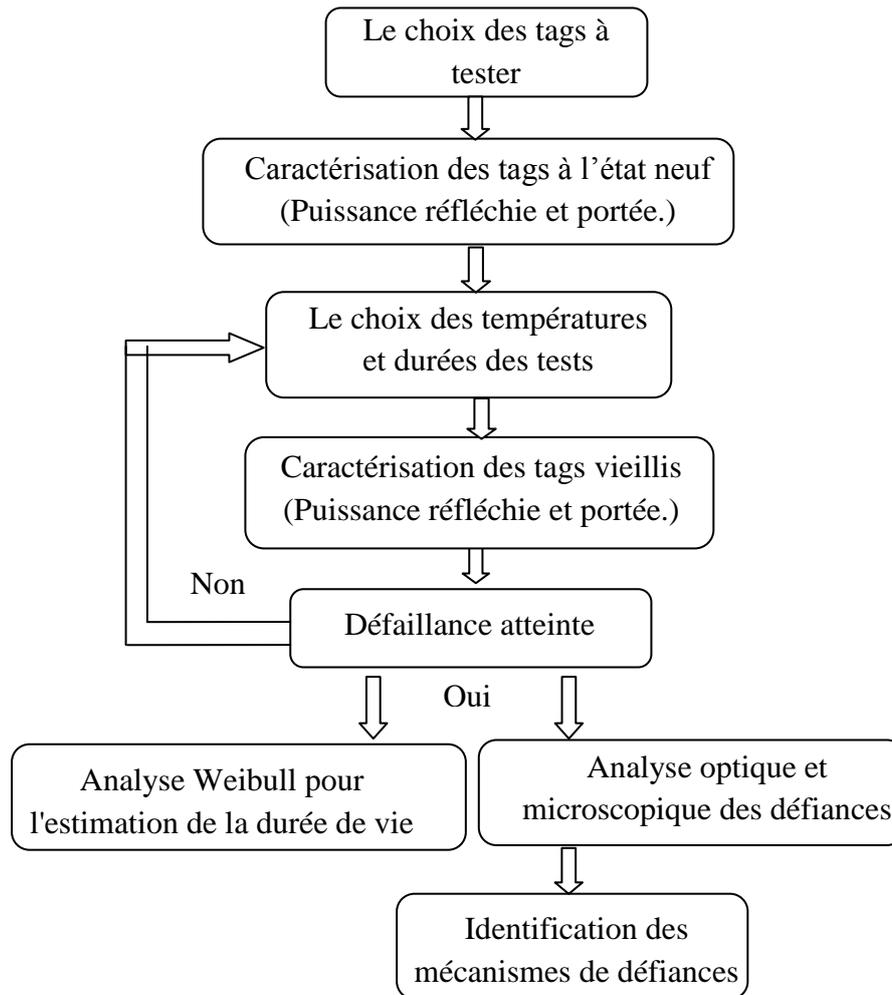


Figure 2.6. Méthodologie de travail adoptée.

### 3.1. Choix du tag à tester

La première phase consiste à choisir les tags à tester. Dans le chapitre 1, nous avons présenté les avantages des tags RFID UHF passifs. Pour réaliser notre travail, nous avons opté pour deux types de tags RFID UHF passifs à faible coût issus de deux fabricants différents Web et Tageos capables de communiquer avec un lecteur de commerce. Les deux tags sont de deux types de fabrications différentes. La production des tags Tageos est basée sur une production 100 % papier, elle ne contient aucune couche plastique contrairement aux tags Web. Cette différence va permettre de les comparer et de choisir le type le plus résistant à des hautes températures.

Les figures 2.7 et 2.8 présentent les photographies des tags choisis Web et Tageos. Les dimensions des deux tags Web et Tageos sont respectivement de 40 mm sur 54 mm et 30 mm sur 50 mm, ils se collent facilement sur l'objet à identifier. Les deux types de tags possèdent

une antenne attachée à une puce mémoire intégrée contenant son identifiant unique dont l'espace mémoire est de 96 bits.

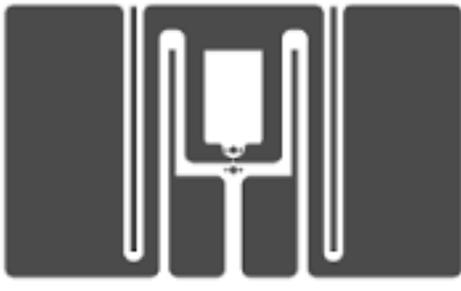


Figure 2.7. Vue de tag Tageos.

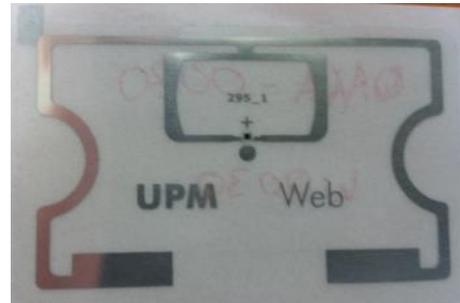


Figure 2.8. Vue de tag Web.

Les tags Web et Tageos répondent à la norme EPC Class 1 Gen 2 ISO 18 000-6C (voir chapitre 1 normes et protocoles). Ils fonctionnent dans la bande de fréquence allant de 860 MHz jusqu'au 960 MHz. Les deux types de tags ont une plage de température de fonctionnement garantie par le constructeur comprise entre  $-40 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $85(\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

Une caractérisation physique et électrique de l'ensemble des tags est nécessaire, après avoir choisi les tags à vieillir, afin d'identifier le changement de leurs performances (puissance réfléchie, portée...) pendant les tests.

Dans le but d'analyser la structure interne des tags, nous avons effectué une coupe transversale. La figure 2.9 présente une vue microscopique de cette coupe pour le type Web.

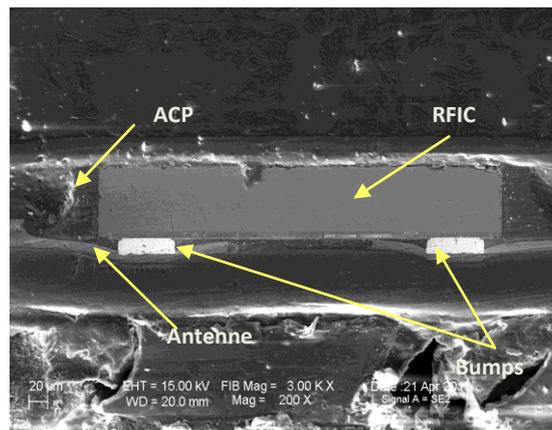


Figure 2.9. Coupe transversale d'un tag neuf de type Web.

Les tags se composent d'un circuit intégré RFIC (Radio Frequency Integrated Circuits) de dimensions de  $760 \mu\text{m} \times 760 \mu\text{m}$ , elle est attachée à une antenne en aluminium par quatre

contacts en or placés dans les coins de le RFIC, chaque contact appelé Bump a un diamètre de 65  $\mu\text{m}$ .

Dans le but d'obtenir la composition élémentaire qualitative du tag et de faire ressortir par cartographie la distribution latérale d'éléments issus de la zone numérisée sous forme d'image, nous avons utilisé la spectroscopie des rayons-X à dispersion d'énergie (EDX : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). C'est une faculté analytique couplée avec la microscopie électronique par balayage (SEM). Elle permet de donner l'analyse élémentaire sur des surfaces très petites de l'ordre de nanomètre. L'impact du faisceau d'électrons, pour l'identification des éléments chimiques, sur l'échantillon produit des rayons X qui sont caractéristiques des éléments présents sur l'échantillon.

La figure 2.10 présente la cartographie du tag de type Web.

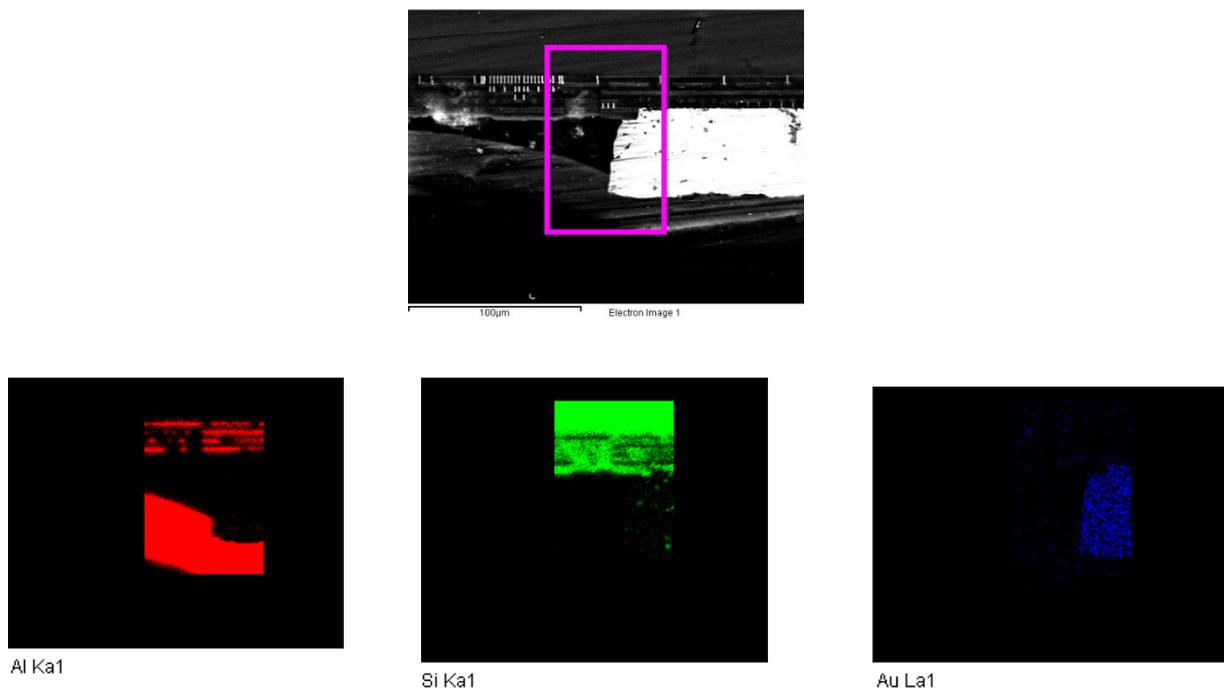


Figure 2.10. Spectromètre des rayons-X d'un tag type Web.

Nous avons appliqué l'EDX sur quatre surfaces du tag qui sont le RFIC, le contact et l'antenne ainsi l'ACP.

Le RFIC se compose principalement du silicium, le contact (bump) est de l'or et l'antenne est de l'aluminium. Le tableau 2.1 résume la composition élémentaire du tag de type Web :

Élément	Matériau
RFIC	Si (silicium)
Contact (Bump)	Au (Or)
Antenne	Al (aluminium)

Tableau 2.1. Composition élémentaire d'un tag RFID passif.

Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 1, les différents éléments composants un tag RFID est assemblé par l'adhésif ACP. L'EDX de l'ACP d'un tag de type Web est présenté sur la figure 2.11.

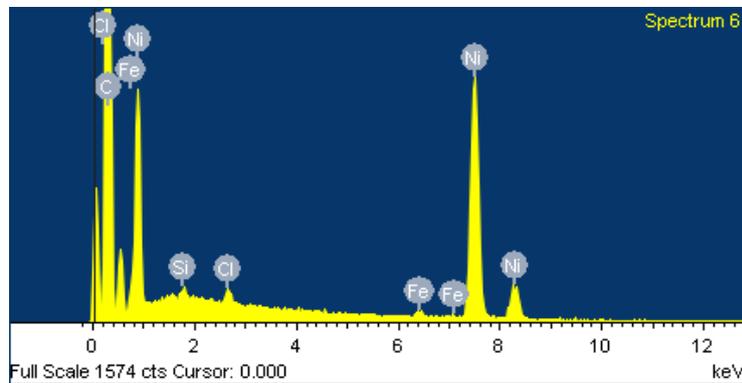


Figure 2.11. Spectromètre des rayons-X de l'ACP.

Le tableau 2.2 résume la composition élémentaire qualitative de cette matière.

Élément	%	Atomic %
C	77,03	94,17
Si	0,17	0,09
Cl	0,23	0,09
Fe	0,28	0,07
Ni	22,28	5,57

Tableau 2.2. Composition élémentaire qualitative de l'ACP.

La concentration des particules nickel est importante, elles ont pour rôle l'établissement de la connexion entre l'antenne et le RFIC.

Cette analyse en EDX nous a permis l'identification de différents matériaux composants le tag du type Web, ce qui va nous permettre de justifier la réaction du tag après vieillissement thermique selon la résistance de chaque matériau à la haute température.

### 3.2. Définition des paramètres d'essais

Le choix des températures des tests est effectué après plusieurs essais. La température de départ a été réglée à  $100 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  correspondant à un dépassement égal à 20 % de la valeur maximale préconisée par le constructeur. Puis, le pas d'incrémentation choisi est de  $20 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . A des températures égales à  $100 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $120 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  aucune dégradation significative n'est mesurée. Par conséquent, nous avons dû augmenter la température pour faire apparaître les premières dégradations. Les températures sélectionnées égales à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ ,  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  répondant à la norme JEDEC (voir annexe 5) de durée de stockage à haute température (Conditions A et B) [28].

Quinze tags de chaque type Web et Tagueos sont soumis à des hautes températures, en stockage thermique à des intervalles réguliers, dans un four qui assure la stabilité de la température pendant le processus de vieillissement, présenté en photographie sur la figure 2.12.



Figure 2.12. Banc de vieillissement en stockage thermique.

Afin d'évaluer les changements dans les performances des tags testés, des mesures de reprises sont effectuées après chaque phase de vieillissement au niveau de la puissance réfléchie et de la portée maximale, la puissance réfléchie mesurée est de l'ordre d'une dizaine de nW. Les tags vieillis donc sont sortis du four et déposés sur le banc pour les mesurer. La puissance réfléchie est mesurée à l'aide du banc présenté dans § 1.1 du chapitre 3, en faisant varier la distance en l'antenne du tag est celle du lecteur.

### **3.3. Analyse statistique et physique de défaillance**

Des analyses statistiques sont effectuées, par les outils de calcul de fiabilité prévisionnelle de type Weibull++. Ces analyses permettent de collecter et explorer des données sur les caractéristiques comportementales des deux tags testés (durées de vie, taux de défaillance,...) afin de vérifier la conformité du produit avec la spécification contractuelle et d'estimer des caractéristiques de sûreté de fonctionnement (estimation de la loi de fiabilité).

Des analyses physiques de défaillance des échantillons sont effectuées pour en déterminer les mécanismes. En premier lieu, les tags sont examinés visuellement pour détecter les emplacements des défauts physiques engendrés par les tests. Puis l'attachement de l'antenne sur le substrat est examiné en microscopie optique. Finalement, après avoir faire une coupe transversale, les contacts entre le RFIC et l'antenne sont analysés par microscopie électronique à balayage (MEB).

Une conception et une mise en place d'une procédure de vieillissement et d'un banc de mesure et de caractérisation sont une étape indispensable avant de commencer la méthodologie présentée.

Nous allons commencer le chapitre 3 par décrire le banc de mesure, et en suite nous allons appliquer la méthodologie tout en présentant les résultats des tests en stockage thermique effectués auparavant.

## **Conclusion**

Nous avons énoncé, dans ce chapitre, les différentes caractéristiques probabilistes de la fiabilité, la statistique associée et les différents modèles permettant à l'aide d'essais accélérés de déterminer la durée de vie d'un composant, tout en montrant l'intérêt de la fiabilité dans les diverses applications.

Nous avons ensuite développé l'aspect des essais accélérés définissant un plan de qualification normatif. Par la suite, nous avons décrit l'état de l'art des tests de vieillissement accélérés sur les systèmes RFID passifs, les modes associées et les essais utilisés pour faire apparaître leurs mécanismes de défaillance . Nous avons montré comment nous envisageons d'utiliser les tests accélérés pour mettre en place de nouvelles méthodes de qualification plus rapides et plus précises sur deux types de tags RFID passifs issus de deux fabricants.

Cette démarche va être explorée à l'aide d'un banc de mesure dédié et des tests en stockage thermique différents, que nous tâcherons de décrire et développer dans le chapitre suivant.

## Références

- [1] A. Hahnel, Lemaire, M. Rieuneau, F. Petit, "Machines and mechanisms design for reliability." 12th IFToMM World Congress, 2007.
- [2] D. Ait-Kadi, "Fiabilité des systèmes. " Notes de cours / Université Laval, département de génie / mécanique Québec, 2002.
- [3] M. Corazza, "Technique mathématiques de la fiabilité prévisionnelle des systèmes." Cepad, Toulouse FRANCE, 1975.
- [4] Afnor .Recueil de normes françaises : " Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité. " Ed Afnor- Ute, NF X 060-010 ,1991.
- [5] E. Lewis, "Introduction to Reliability Engineering. " John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [6] A. Lannoy, H. Procaccia, " L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement." Ed. TEC&DOC, 2001.
- [7] Afnor .Recueil de normes françaises : " Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité. " Ed Afnor- Ute, 1988.
- [8] B. Ayyub, R. Mccuen,. " Probability, Statistics & Reliability for engineers. " CRC Press New York, 1997.
- [9] J. Drosbeke, B. Fichet, P. Tassi, "Analyse statistique des durées de vie, association pour la statistique et ses utilisations. " Economica, 1989.
- [10] T. Fan, W. Wang, "Accelerated life tests for weibull series systems with masked data," IEEE Trans. Reliability, pp. 13, 2011.
- [11] G. Yang, " Life cycle reliability engineering. " Wiley , Sons HOBOKEN, NEW JERSEY, USA, 2007.
- [12] M. Shooman, "Probabilistic Reliability: An Engineering Approach." 2nd edn, Robert E. Krieger Publishing Compagny, Malabar, Florida, 1990.
- [13] V. Bagdonavicius, , L. Gerville-Reache, , V. Nikoulina, , M. Nikoulin, " Expériences accélérées : analyse statistique du modèle standard de vie accélérée. " Revue de Statistique Appliquée, vol 48, pp 5–38, 2000.
- [14] V. Bagdonavicius, M. Nikulin. "Mathematical models in the theory of accelerated experiments. " World Scientific Publishing Co, 2001.
- [15] O. Tebbi, , F. Guerin, , B. Dumon, "Estimation de la fiabilité par les essais accélérés. " Revue Mécanique et Industries, Volume 6, pp 2-21 April, 2005.

- [16] O. Tebbi, F. Guerin, B. Dumon, "Plan d'essai avec endommagement préalable accéléré appliqué aux composants mécanique." *Revue Statistique Appliquée*, Volume: 53, Issue: 3, pp 63-90, 2005.
- [17] A. Vassilious, A. Mettas, "Understanding accelerated lifetesting analysis." In *IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Tutorial notes, USA, 2001.
- [18] G. Yang, "Accelerated life test plans for predicting warranty cost, " *IEEE Trans. Reliability*, vol. 59, no. 4, pp 628–634, 2010.
- [19] YC. Lin, J. Zhong, "A review of the influencing factors on anisotropic conductive adhesives joining technology in electrical applications. " *J Mater*, pp 72–93, 2008.
- [20] L. Frisk, K. Kokko "The effects of chip and substrate thickness on the reliability of ACA bonded flip chip joints. " *Solder Surf Mount Technol*;18:pp 28–37, 2006.
- [21] A. Seppälä, E. Ristolainen, "Study of adhesive flip chip bonding process and failure mechanisms of ACA joint. " *Microelectron Reliab*, pp 39–48, 2004.
- [22] J. Kim "Thermal degradation of anisotropic conductive film joints under temperature fluctuation." *Int J Adhes*, pp 14–20, 2008.
- [23] K. Saarinen, L. Frisk, L. Ukkonen, "Effect of cycling humidity on the performance of RFID tags with ACA joints. " *IEEE T Reliab*, pp 23–31, 2012.
- [24] K. Saarinen, T. Björninen, L. Ukkonen, L. Frisk, "Reliability analysis of RFID tags in changing humid environment." *IEEE Trans Comp Pack*, pp 77–85, 2014.
- [25] S. Lahokallio, K. Saarinen, L. Frisk "Effects of different test profiles of temperature cycling tests on the reliability of RFID tags. " *Microelectron Reliab*, pp 93–100, 2015.
- [26] K. Saarinen, S. Lahokallio, L. Frisk, Effects of different anisotropically conductive adhesives on the reliability of UHF RFID tags. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 64, pp 52–59, 2016.
- [27] D. Ait-Kadi, "Fiabilité des systèmes", Notes de cours, département de génie mécanique, Université Laval, 2007.
- [28] JEDEC standard, "High temperature storage life," *JESD22-A103D* (Revision of *JESD22 A103C*, November 2004) December, 2010.

# **CHAPITRE 3**

**Développement expérimental :  
vieillesse et caractérisation.**

## Introduction

Après avoir présenté les principaux paramètres fondamentaux de la fiabilité, et exposé la méthodologie de travail adoptée pour cette thèse, ce chapitre a pour objectifs : l'utilisation de cette méthodologie, le développement des résultats de mesure, et l'analyse statistique. Dans une première partie, une présentation du banc de mesure développé est effectuée. Dans une deuxième partie, un développement de chaque étape de la méthodologie des tests est mise en œuvre avec une identification préliminaire des tags à tester. La troisième partie est consacrée à l'analyse des résultats des tests de vieillissement accélérés et le temps de défaillance pour les deux types de tags Web et Tageos. Enfin dans la dernière partie, les résultats des analyses statistiques par les outils de calcul de fiabilité "Weibull" seront exposés et analysés, avec une comparaison des résultats des tags de type WEB et Tageos.

### 1. Mise en place d'un banc de mesure de puissance

#### 1.1. Description du banc

Un banc de mesures composé de plusieurs blocs a été développé et mis en place. Il permet d'analyser les mécanismes de vieillissement et d'étudier la robustesse et la fiabilité des tags passifs sous contraintes environnementales sévères. La figure 3.1 représente des photographies de ce banc.



(a)

(b)

Figure 3.1. Banc de mesure développé (a) Position du tag et du lecteur et (b) les différentes composantes du banc.

Le banc de mesure développé est composé d'un lecteur commercial de type SPEEDWAY [1]. Il est piloté par un ordinateur (PC). Le lecteur est relié à une antenne de gain égal à 6 dBi,

placée sur un plateau rotatif sur 360°. Le tag à tester est placé sur un support disposé sur un rail coulissant sur une distance atteignant 2 mètres. Ce banc de mesure répond aux normes Européennes [3], il fonctionne à quatre fréquences dans la bande UHF égales à 866,3 MHz, 866,9 MHz, 867,5 MHz ou 865,7 MHz, la valeur maximale de la puissance émise par le lecteur est de 30 dBm présentant la valeur maximale autorisée dans les normes et standards RFID [2].

L'ensemble des composants du banc est placé dans un environnement dégagé de tout obstacle. Un oscilloscope Agilent Infinium de bande passante de 6 GHz, permet d'enregistrer des mesures temporelles en captant à l'aide d'une antenne le signal envoyé par le lecteur RFID.

Une vérification de la réponse des tags, de même type dans les mêmes conditions, et la validation du banc sont nécessaires avant de commencer les mesures sur les tags vieillis et analyser l'effet de la haute température sur la réponse de ces tags. Pour ce faire nous avons effectué quelques tests sur des tags passifs neufs. La fréquence choisie est égale à 865,7 MHz (les quatre fréquences utilisées par le banc sont proches, elles donnent sensiblement la même réponse). Le lecteur produit un signal de fréquence radio transmis par un câble coaxial à l'antenne, le tag soumis au test est placé sur un rail. La distance peut être ajustée dans une plage de 200 cm. Le tag reçoit le signal et renvoie son code d'identification, la puissance réfléchie est mesurée et affichée sur l'écran du PC connecté au lecteur RFID.

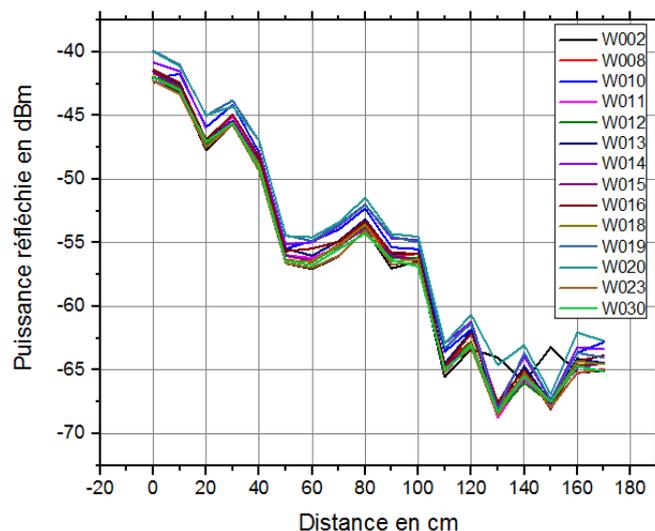


Figure 3.2. Mesure de la puissance réfléchie par les tags en fonction de la distance.

Pour obtenir des valeurs représentatives, quatorze tags neufs ont été testés. Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure 3.2. La puissance émise par le lecteur est fixé à 27 dBm

selon les normes européennes [2]. Les mesures ne révèlent aucune variation significative de la puissance réfléchie. L'écart-type est égale à 2,07 %. Il est calculé par l'expression suivante :

$$Ecart - type = \sqrt{\frac{\sum_0^n (x_i - \overline{x_i})^2}{n}} \quad (3-1)$$

Où  $x_i$  représente la mesure brute à une distance  $d_i$ ,  $\overline{x_i}$  est la valeur modélisée à la même distance  $d_i$  et  $n$  le nombre des points de mesures.

Pour les différents tags, nous avons relativement la même allure de puissance, montrant un comportement similaire des différents tags du même type.

Ces résultats montrent que le banc est opérationnel pour répondre à notre besoin d'étudier la fiabilité des tags passifs aux hautes températures, le banc permet des relevés de la puissance réfléchie par le tag en fonction de la distance entre l'antenne du lecteur et celle du tag.

### 1.2. Mesures temporelles en communication lecteur / tag

A l'aide du banc de mesure exposé précédemment, nous pouvons relever grâce à l'oscilloscope, le chronogramme correspondant au signal envoyé par le lecteur SPEEDWAY au cours de la communication avec un tag passif. Cette mesure va nous permettre d'étudier le comportement fonctionnel d'un système RFID UHF passif et de vérifier si notre système répond aux normes européennes.

Le signal relevé est un signal modulé en DSB-ASK (Amplitude Shift Keying), le débit de transmission de données est de 30 kbps conformément aux normes européennes [3], la durée d'envoi d'une pulsation est de 13,5  $\mu$ s.

Le tableau 3.1 résume les caractéristiques du signal :

Format de Modulation	Débit (Kbits/sec)	Fréquence (MHz)	Durée d'une pulsation ( $\mu$ s)	% Tbit
DSB-ASK	30	865,7	13	0,4

Tableau 3.1. Caractéristiques du signal envoyé par le lecteur.

La figure 3.3 présente le chronogramme relevé, la partie A du signal présente le signal continu qui sert à alimenter les tags, alors que la partie B présente l'instruction ou l'information envoyée aux tags.

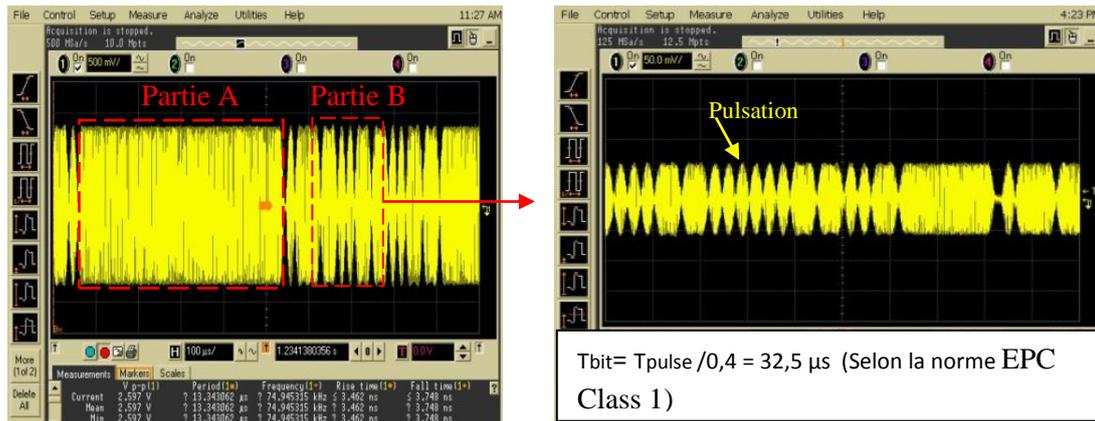


Figure 3.3. Mesures temporelles de la communication lecteur/tag.

Conformément à ce que nous avons vu théoriquement dans le chapitre 1, le chronogramme présente un signal composé de deux phases, une phase de réveil du tag dans laquelle le lecteur envoie une onde électromagnétique pour alimenter le tag, et d'une phase d'instruction dans laquelle le lecteur envoie une instruction au tag. Cette transmission se réalise sur une porteuse à la fréquence de fonctionnement du banc (865,7 MHz).

Les valeurs calculées à partir du chronogramme correspondent aux valeurs décrites dans la norme EPC Classe 1 Génération 2 [3], cela montre que le banc développé fonctionne selon cette norme.

## 2. Mise en œuvre de vieillissements accélérés

Une caractérisation préliminaire des tags à l'état neuf est nécessaire, après la validation du banc de mesure et le choix des tags à tester présentés dans le chapitre 2. Cette caractérisation va nous permettre d'identifier les tags vieillis pendant les tests et d'étudier la variation de la puissance réfléchie après chaque phase de vieillissement.

Les tags sont fournis vierges avec possibilité d'écrire un code, de 96 bits, qui va servir à les identifier par la suite. Ce code pourra être lu mais ne pourra être ni modifié ni complété.

Nous commençons la mesure de la puissance réfléchie, par le positionnement du tag sur le rail coulissant qui doit être centré avec le plateau rotatif (voir la description du banc figure 3.1). La distance initiale entre les deux antennes de tag et du lecteur est de 15 cm.

La puissance réfléchie est mesurée en fonction de la distance entre l'antenne du lecteur et celui du tag. Pour modifier la distance entre les deux antennes il suffit de déplacer le tag sur le rail coulissant. Les valeurs de la puissance réfléchie par les tags s'affichent sur l'écran de l'ordinateur qui pilote le lecteur RFID.

### 3. Analyse des temps de défaillance

#### 3.1. Première série de tests

Nous avons commencé nos premiers tests de vieillissements accélérés en stockage thermique après l'identification préliminaire d'un lot de quatre tags de type Web notés par la suite W0011, W0012, W0013 et W0014. Nous avons effectué les tests dans un four à stockage thermique permettant d'assurer une stabilité de la température pendant la durée des tests (voir chapitre 2).

La température du stockage a été fixée au départ à 120 ( $\pm 5$ ) °C répondant à la norme JEDEC de durée de stockage à haute température [4], puis, le pas d'incrémentation choisi est de 20 °C, la durée de stockage est de 72 heures par pas de température.

Des mesures ont été prises chaque 24 heures, pour les tags vieillis à la température la plus élevée égale à 180 ( $\pm 5$ ) °C.

Afin d'identifier les changements des performances des tags (puissance réfléchie, et portée) au cours des essais, nous avons mesuré la puissance réfléchie par les tags vieillis, après chaque phase de vieillissement thermique, en faisant varier la distance entre le tag et l'antenne du lecteur sur une plage maximum comprise entre 0 et 200 cm.

La figure 3.4 représente les résultats obtenus pour le tag W011, les paramètres de performance du tag vieilli (puissance réfléchie et portée) ont varié de manière significative pendant les essais. La puissance réfléchie par l'ensemble des échantillons diminue après chaque essai ce qui exerce une forte influence sur la portée du tag. Ce phénomène s'est reproduit de manière comparable pour les tags W012 et W013.

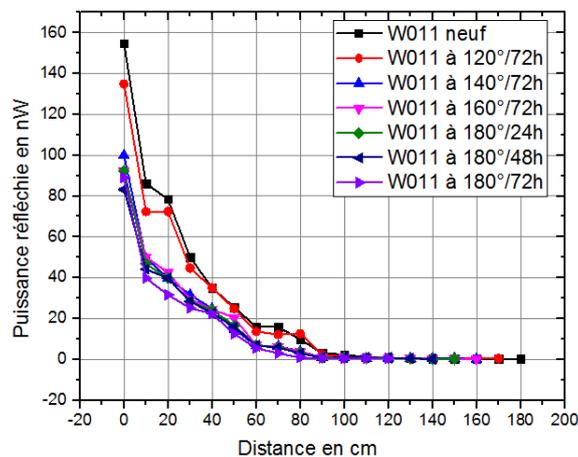


Figure 3.4. Mesure de la dégradation de la puissance réfléchie par le tag W011 après vieillissement thermique.

La puissance affichée sur l'écran du PC qui pilote notre lecteur RFID est mesurée en dBm, sur l'ensemble des figures nous avons tracé la puissance en nW en fonction de la distance.

$$P_{(mW)} = 1 \text{ mW} \cdot 10^{(P(\text{dBm})/10)} \quad (3-2)$$

La figure 3.5 représente les résultats obtenus pour le W014. Différemment au comportement des tags W011, W012, et W013, le tag W014 a subi une défaillance catastrophique suite au vieillissement à 180 (±5) °C pendant 24 heures.

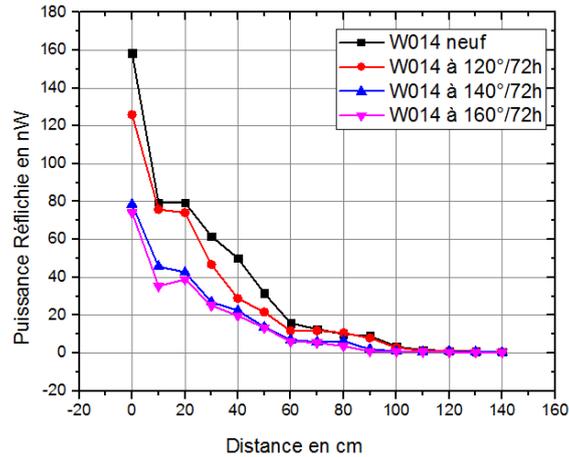


Figure 3.5. Mesure de la dégradation de la puissance réfléchie par le tag W014 après vieillissement thermique.

Une chute de la puissance réfléchie au cours du vieillissement est observée, pour l'ensemble des échantillons. Le tableau 3.2 présente la moyenne de la perte en puissance pour les quatre échantillons. Elle est calculée par :

$$P_{moy} = \frac{\sum (P_{i+1} - P_i)}{n} \quad (3-3)$$

Avec  $P_i$  la puissance réfléchie à la phase de vieillissement  $i$ ,  $n$  le nombre de phases de vieillissement.

L'analyse du tag W014 indique un vieillissement plus rapide expliquant sa défaillance prématurée.

Tags	Moyenne de la perte en puissance après vieillissement (dB)
W011	$P_{\text{moy}} = 3,64$ après vieillissement à $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$
W012	$P_{\text{moy}} = 2,55$ après vieillissement à $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$
W013	$P_{\text{moy}} = 2,17$ après vieillissement à $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$
W014	$P_{\text{moy}} = 4,22$ après vieillissement à $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$

Tableau 3.2. Moyenne de la perte en puissance après vieillissement.

Les tags passifs ont été soumis à des températures différentes sur des durées déterminées. Des dégradations significatives ont été observées au cours du vieillissement. Pour ces premières séries de test, nous avons utilisé les échantillons sous leurs formats d'usine, collés sur du papier.

Après vieillissement les tags ont été déformés, le support papier sur lequel les tags étaient collés n'a pas résisté à des températures supérieures à  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . La figure 3.6 présente une photographie des tags vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .



Figure 3.6. Vue des tags Web vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

La déformation des tags vieillis collé sur du papier peut produire des fausses mesures. La forme de l'antenne a changé ce qui peut modifier son diagramme de rayonnement qui représente les variations de la puissance réfléchiée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. D'où l'idée de coller les tags sur un support solide non métallique et qui résiste à des hautes températures.

Nous avons effectué plusieurs tests dans le but de choisir le support adapté qui répond à nos contraintes.

Le premier support testé était l'époxy FR4 (Flame Resistant 4), c'est un support solide non métallique qui résiste à des hautes températures. Pour pouvoir mettre les tags collés sur

l'époxy au four dans les meilleures conditions, nous avons fabriqué un support métallique résistant à des hautes températures. La figure 3.7 présente une photographie de ce support.

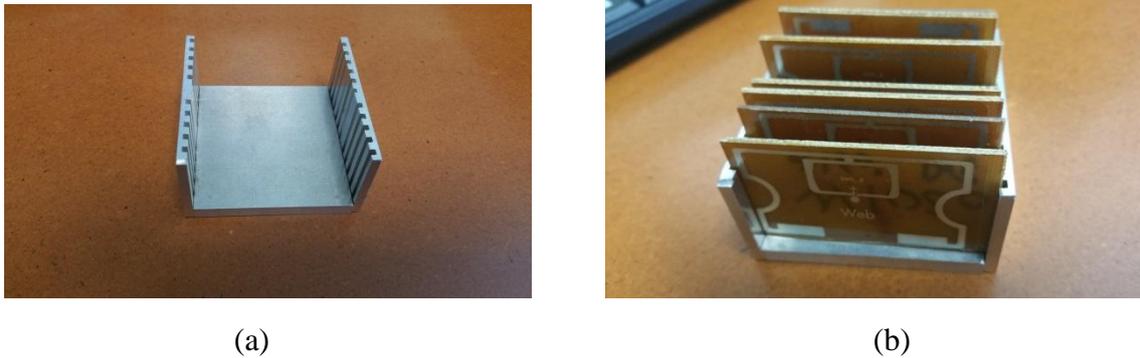


Figure 3.7. (a) Support métallique (b) Tags classés dans le support.

Les températures de test sont égales à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ , elles répondent à la norme JEDEC (Conditions A et B) [4]. Des mesures de la puissance réfléchiée en fonction de la distance ont été prises sur des durées différentes.

Les résultats obtenus pour les tags notés W0026 et W1013 vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  respectivement sont présentés sur la figure 3.8.

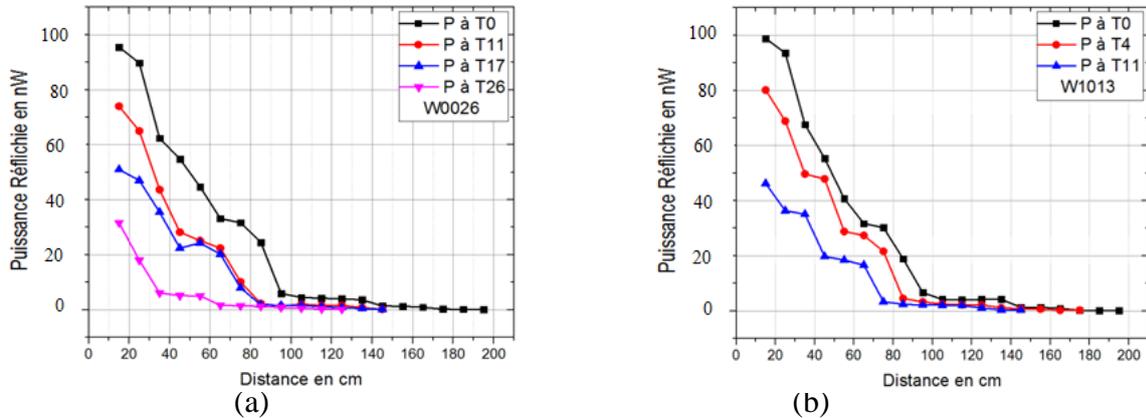


Figure 3.8. Mesure de la puissance réfléchiée par les tags : (a) W0026 vieilli à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et (b) W1013 vieilli à  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

Les puissances réfléchiées par les tags vieillis à deux températures égales à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  ont changé de manière significative pendant les essais. La puissance réfléchiée par l'ensemble des échantillons diminue après chaque essai ce qui produit une forte influence sur la portée du tag.

En comparant la réponse des tags collés sur l'époxy et celle des tags collés sur du papier, avant et après vieillissement, nous avons remarqué qu'il y a une différence manifeste figure 3.9. Cela signifie que l'époxy change la caractéristique des tags (puissance réfléchie).

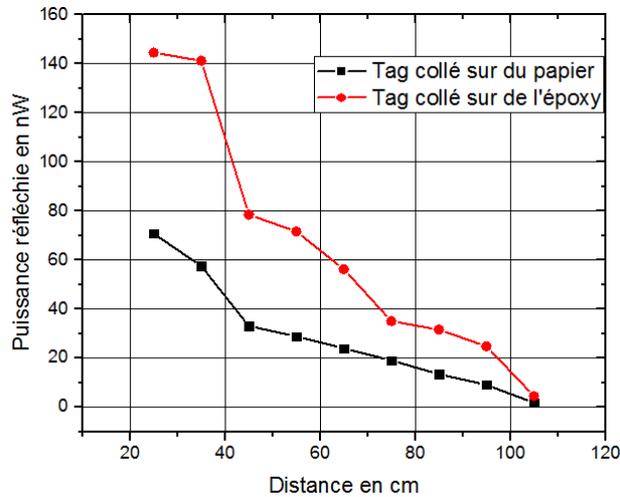


Figure 3.9. Comparaison des mesures des tags collés sur du papier et sur l'époxy.

Nous avons décidé alors de reprendre les mesures dans une chambre semi anéchoïque du même tag collé à la fois sur du papier, de l'époxy et du carrelage pour pouvoir choisir le support qui répond le mieux à nos contraintes et qui ne change pas la réponse du tag (figure 3.10).



Figure 3.10. Le banc de mesure monté dans la chambre semi anéchoïque.

La caractérisation s'est réalisée sur trois étapes :

- ✚ Mesure de la puissance réfléchie par le tag collé sur un support papier (tag neuf) en fonction de la distance entre l'antenne du lecteur et le tag de test.

- ✚ Collage du même tag sur l'époxy et mesure de la puissance réfléchie en gardant les conditions initiales du test (même environnement).
- ✚ Collage du tag sur du carrelage et mesure de la puissance réfléchie en fonction de la distance.

Nous avons tracé les données issues des trois mesures de la puissance réfléchie en fonction de la distance sur la même figure 3.11.

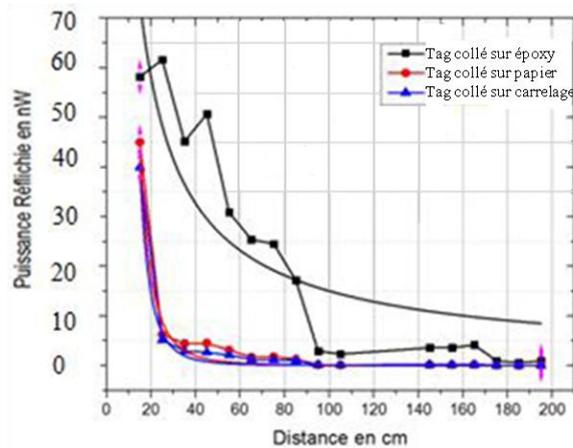


Figure 3.11. Comparaison des mesures de la puissance réfléchie par les tags pour les trois supports.

Pour les tags collés sur du papier et du carrelage, nous avons obtenu une réponse similaire. L'allure de la courbe de la puissance réfléchie est voisine (figure 3.11). Pour le tag collé sur l'époxy, nous avons une réponse différente des deux autres. Le fait d'utiliser l'époxy comme support modifie les caractéristiques du tag, il est probable que la permittivité  $\epsilon$  de l'époxy intervient et modifie la réponse de l'antenne du tag. Cela signifie que le carrelage est le support le plus adapté à nos contraintes. C'est un support solide, non métallique, résiste à des hautes températures et qui ne change pas la réponse des tags.

Nous avons lancé par la suite une série de test pour des tags collés sur du carrelage, dans le but d'étudier l'effet de la haute température sur leur fiabilité.

### 3.2. Analyse des résultats de la puissance réfléchie des tags Web

Nous avons lancé une série de test pour les tags de types Web collés sur du carrelage suivant la méthodologie présentée dans le chapitre 2 (figure 2.6). Les tags testés sont placés dans un four en stockage thermique sous trois températures différentes égales à 140 ( $\pm 5$ ) °C, 160 ( $\pm 5$ ) °C et 180 ( $\pm 5$ ) °C, ces températures répondent à la norme JEDEC (Conditions A et B) [4]. Cinq échantillons sont vieillis pour chaque température du test, ce qui nous a fait un

total de quinze tags vieillis. Ce nombre d'échantillonnage répond à nos contraintes pratiques (temps de test, place au four...).

A des intervalles réguliers, des mesures de reprises sont effectuées au niveau de la puissance réfléchie et de la portée maximale.

Nous mesurons la puissance réfléchie du composant sous test (DUT), après chaque phase de vieillissement thermique, en faisant varier la distance entre le tag et l'antenne du lecteur.

La figure 3.12 représente les résultats obtenus pour le tag W3001 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C, le tag W3011 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et le tag W3008 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C (pour les autres tags nous avons tracés les puissances réfléchies en fonction de la distance voir l'annexe 2). Une chute significative de la puissance réfléchie est observée après chaque phase de vieillissement pour l'ensemble des essais avec des vitesses de dégradation différentes pour les trois températures. À 140 ( $\pm 5$ ) °C les tags de type Web se dégradent moins rapidement qu'à 160 ( $\pm 5$ ) °C et beaucoup moins rapidement qu'à 180 ( $\pm 5$ ) °C.

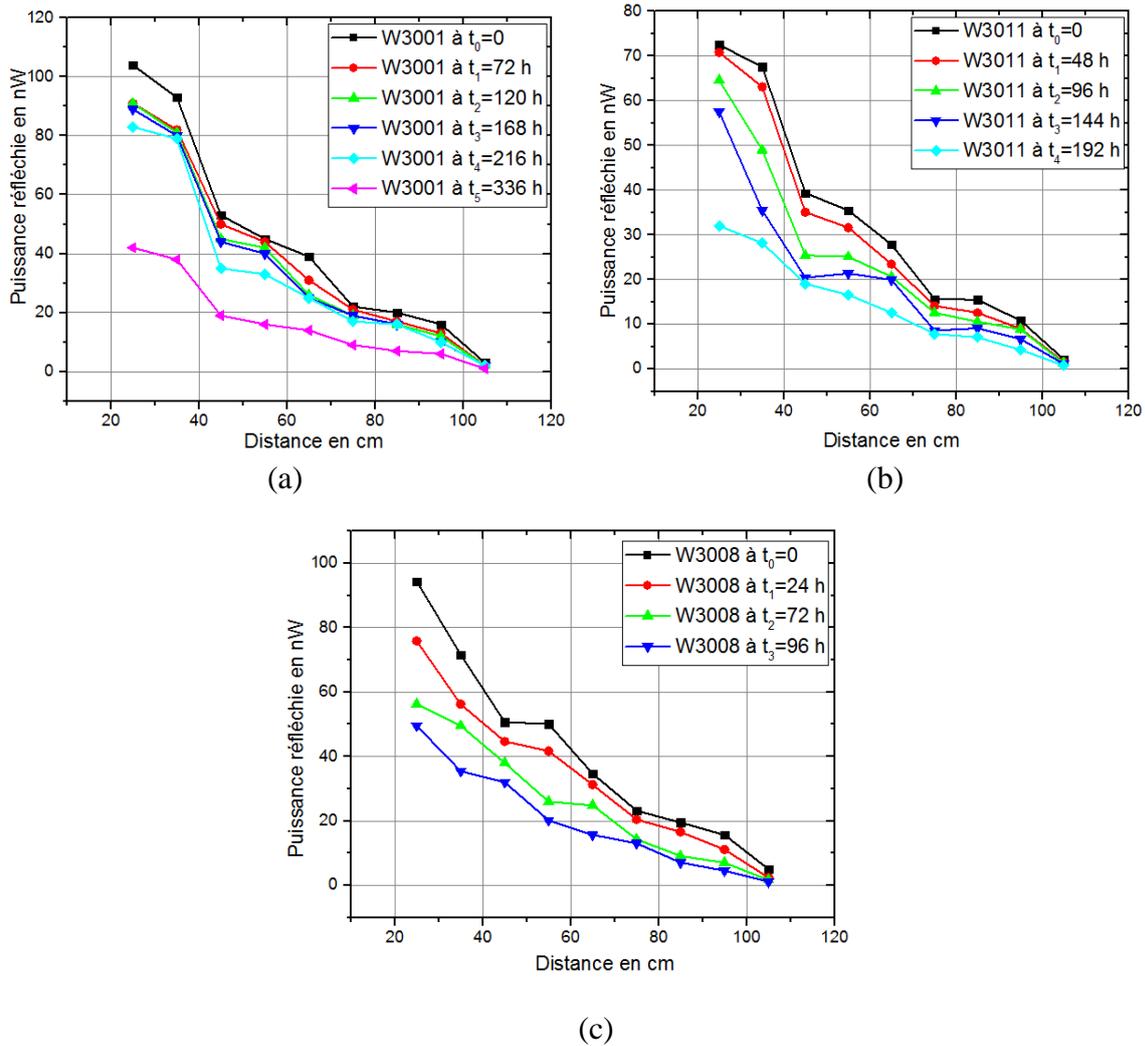


Figure 3.12. Mesure de la puissance réfléchié par les tags : (a) W3001 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) W3011 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) W3008 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C.

A partir de ces mesures non traitées, des essais de modélisation avec l'équation de propagation (1-8) n'ont pas fourni des résultats satisfaisants, l'écart-type entre les valeurs mesurés et celles modélisées dépasse les 39 % (figure 3.13).

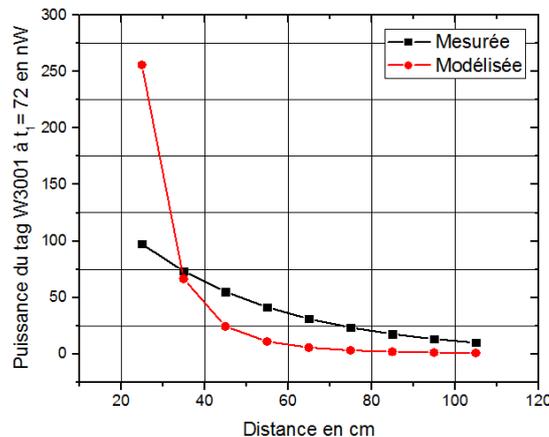


Figure 3.13. Courbe de modélisation de la puissance du tag W3001 à  $t_1=72$  heures avec  $a/r^4$ .

Nous avons donc adopté un modèle mathématique en fonction exponentielle décroissante (3-4), qui semble bien adapté à la forme de la courbe de la puissance en fonction de la distance (figure 3.14).

$$P_{\text{exp}} = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d) \quad (3-4)$$

Avec  $P_{\text{exp}}$  est la puissance modélisée,  $P_0$  la puissance mesurée à la distance initiale et  $d$  la distance entre l'antenne du tag et celle du lecteur.

Le tableau 3.3 résume les valeurs de l'écart-type entre les mesures brutes et les courbes modélisées. Il est calculé par l'équation (3-1).

Tag vieilli à 140 (±5) °C	Écart-type en %	Tag vieilli à 160 (±5) °C	Écart-type en %	Tag vieilli à 180 (±5) °C	Écart-type en %
W3001 à t <sub>0</sub>	3,13	W3011 à t <sub>0</sub>	3,04	W3008 à t <sub>0</sub>	2,04
W3001 à t <sub>1</sub>	3,01	W3011 à t <sub>1</sub>	2,97	W3008 à t <sub>1</sub>	3,19
W3001 à t <sub>2</sub>	3,87	W3011 à t <sub>2</sub>	2,63	W3008 à t <sub>2</sub>	3,21
W3001 à t <sub>3</sub>	2,17	W3011 à t <sub>3</sub>	4,14	W3008 à t <sub>3</sub>	2,15
W3001 à t <sub>4</sub>	4,52	W3011 à t <sub>4</sub>	3,51		
W3001 à t <sub>5</sub>	2,91				

Tableau 3.3. Écart-type entre les valeurs mesurées et modélisées pour les tags Web.

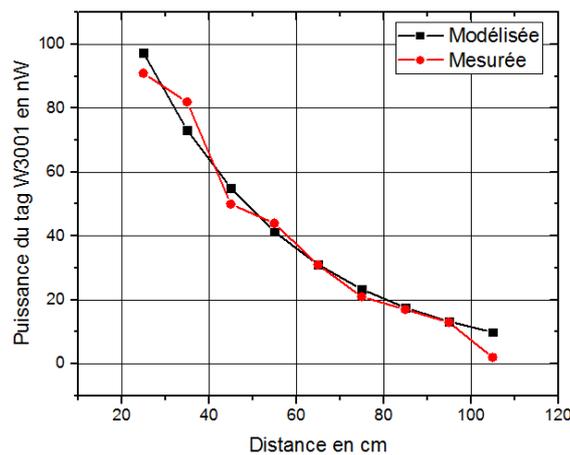


Figure 3.14. Courbe de modélisation de la puissance du tag W3001 à t<sub>1</sub>=72 heures avec une exponentielle décroissante.

La figure 3.14 présente un exemple de cette modélisation pour le tag W3001 à t<sub>1</sub>= 72 heures. La modélisation est satisfaisante avec un écart-type égale à 3,01 nW.

Après modélisation, les tracés sont présentés sur la figure 3.14 :

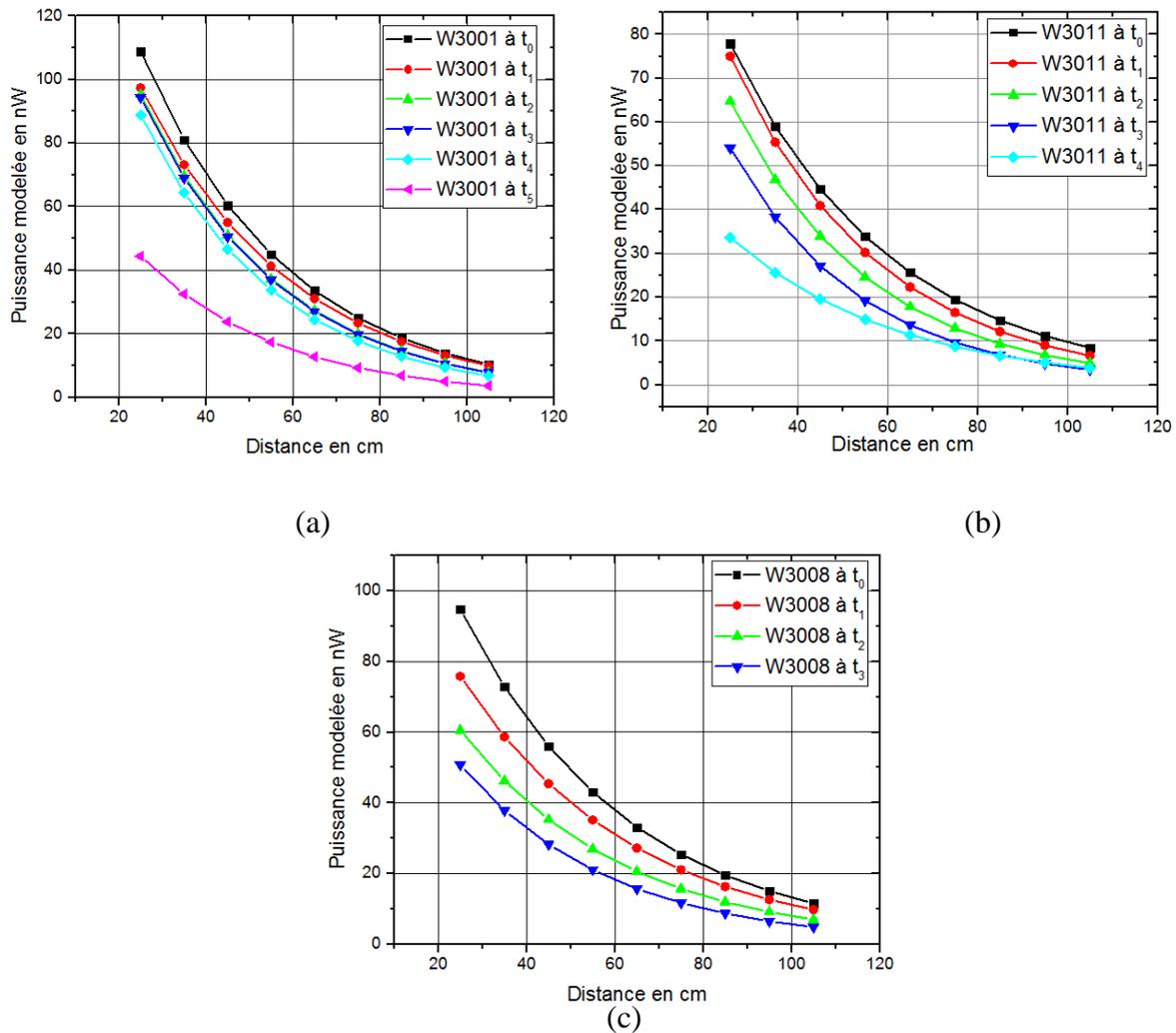


Figure 3.15. Puissances modélisées des tags : (a) W3001 vieilli à 140 (±5) °C et (b) W3011 vieilli à 160 (±5) °C et (c) W3008 vieilli à 180 (±5) °C.

Ces courbes représentent les mesures de vieillissement accéléré pour les tags Web W3001, W3011 et W3008 (pour la modélisation des autres tags voir l'annexe 3). Le modèle exponentiel décroissant adopté va nous permettre d'estimer la loi de fiabilité dans les conditions nominales. Pour ce faire nous avons élaboré une équation d'accélération traduisant la vitesse de dégradation selon la température choisie. A une distance fixe, l'équation d'accélération est une droite qui s'écrit :

$$P_d = a \cdot T_v + b \quad (3-5)$$

Où «  $P_d$  » est la mesure de la puissance réfléchie par le tag à une distance  $d$  fixe, «  $T_v$  » est le temps de vieillissement, et «  $a$  » représente la pente des droites, ce coefficient est négatif traduisant la perte de puissance réfléchie.

La figure 3.16 représente les puissances mesurées après modélisation pour l'ensemble des tags aux trois températures 140 (±5) °C, 160 (±5) °C et 180 (±5) °C, à une distance d=60 cm où les résultats sont plus significatifs.

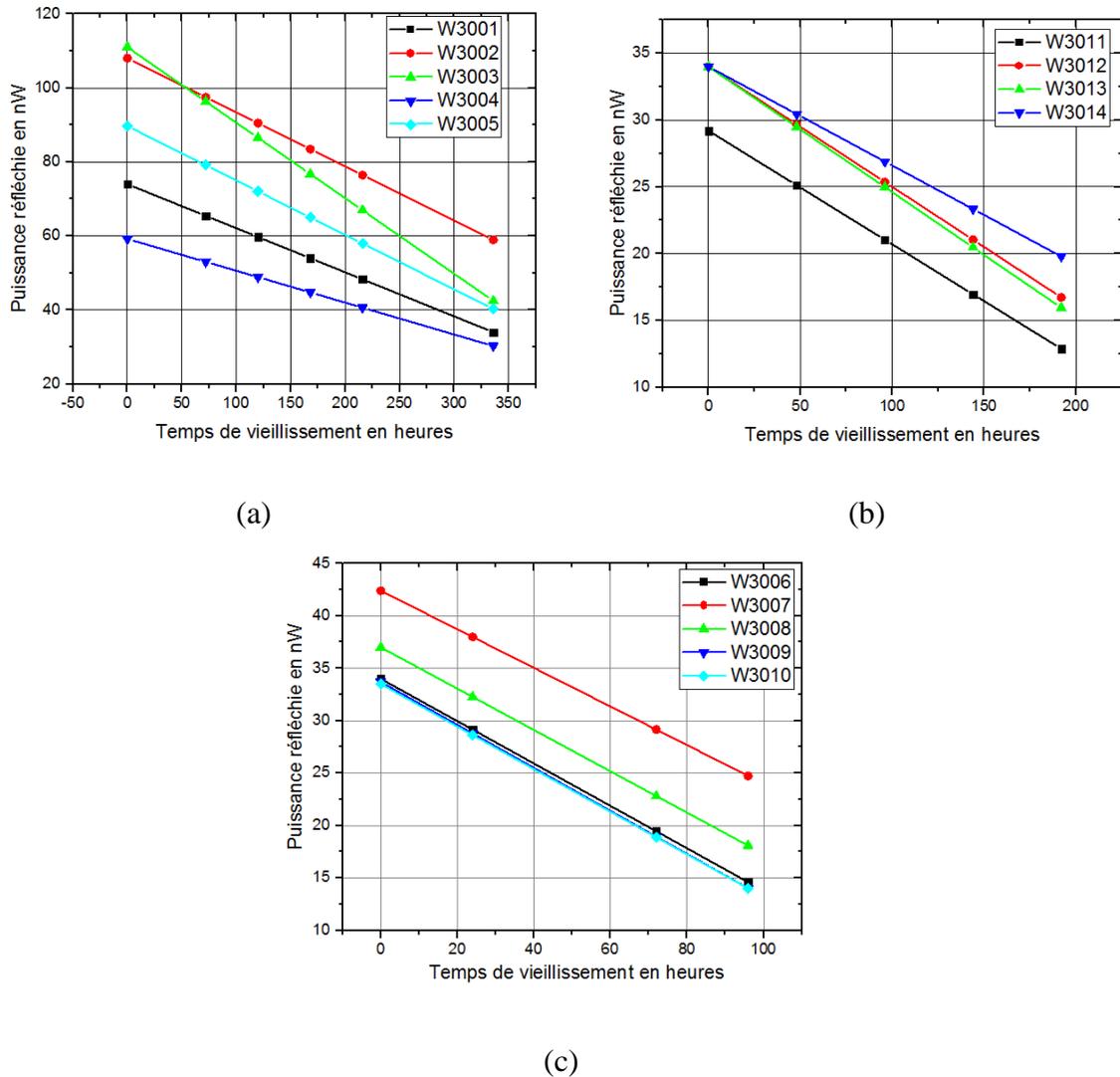


Figure 3.16. Puissances réfléchies par les tags vieillis à d=60 cm (a) à 140 (±5) °C et (b) à 160 (±5) °C et (c) à 180 (±5) °C.

L'indicateur de la puissance perdue aux différents instants  $t_0$  (tag neuf, valeur initiale),  $t_1$ ,  $t_2 \dots$ , soit à un instant  $t_i$  est défini par :

$$\Delta P_d(t_i) = (P_d(t_0) - P_d(t_i)) / P_d(t_0) \quad (3-6)$$

Où  $P_d(t_0)$  et  $P_d(t_i)$  sont respectivement les valeurs de la puissance réfléchie à une distance  $d$  du même tag à l'instant  $t_0=0$  et l'instant  $t_i$ .

La valeur de cet indicateur  $\Delta P_{60}(t_i)$  en fonction du temps de vieillissement sera tracée et interprétée dans la partie analyse statistique.

### **3.3. Analyse des résultats de la puissance réfléchie des tags Tageos**

Nous avons suivi pour les tags passifs de type Tageos, la même méthodologie présentée dans le chapitre 2 (figure 2.6) appliquée précédemment aux tags de type Web. Quinze échantillons sont testés pour trois températures égales à 140 ( $\pm 5$ ) °C, 160 ( $\pm 5$ ) °C et 180 ( $\pm 5$ ) °C répondant à la norme JEDEC [4]. La puissance réfléchie par les composants, après chaque phase de vieillissement thermique, est mesurée en faisant varier la distance entre le tag et l'antenne du lecteur.

La figure 3.17 représente les résultats obtenus pour le tag T3017 vieilli à 140 ( $\pm 5$ ) °C, le tag T3027 vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C et le tag T3021 vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C.

Le phénomène de la dégradation de la puissance réfléchie, après les phases de vieillissement, observé sur les tags de type Web s'est reproduit pour les tags de type Tageos. La puissance réfléchie diminue significativement pour l'ensemble des essais avec des vitesses de dégradation différentes. Le temps de test, à la même température, pour les tags de type Web est plus grand que celui des tags de type Tageos. À 140 ( $\pm 5$ ) °C les tags Web résistent plus que 330 heures alors que les tags Tageos ne dépassent pas les 170 heures de vieillissement.

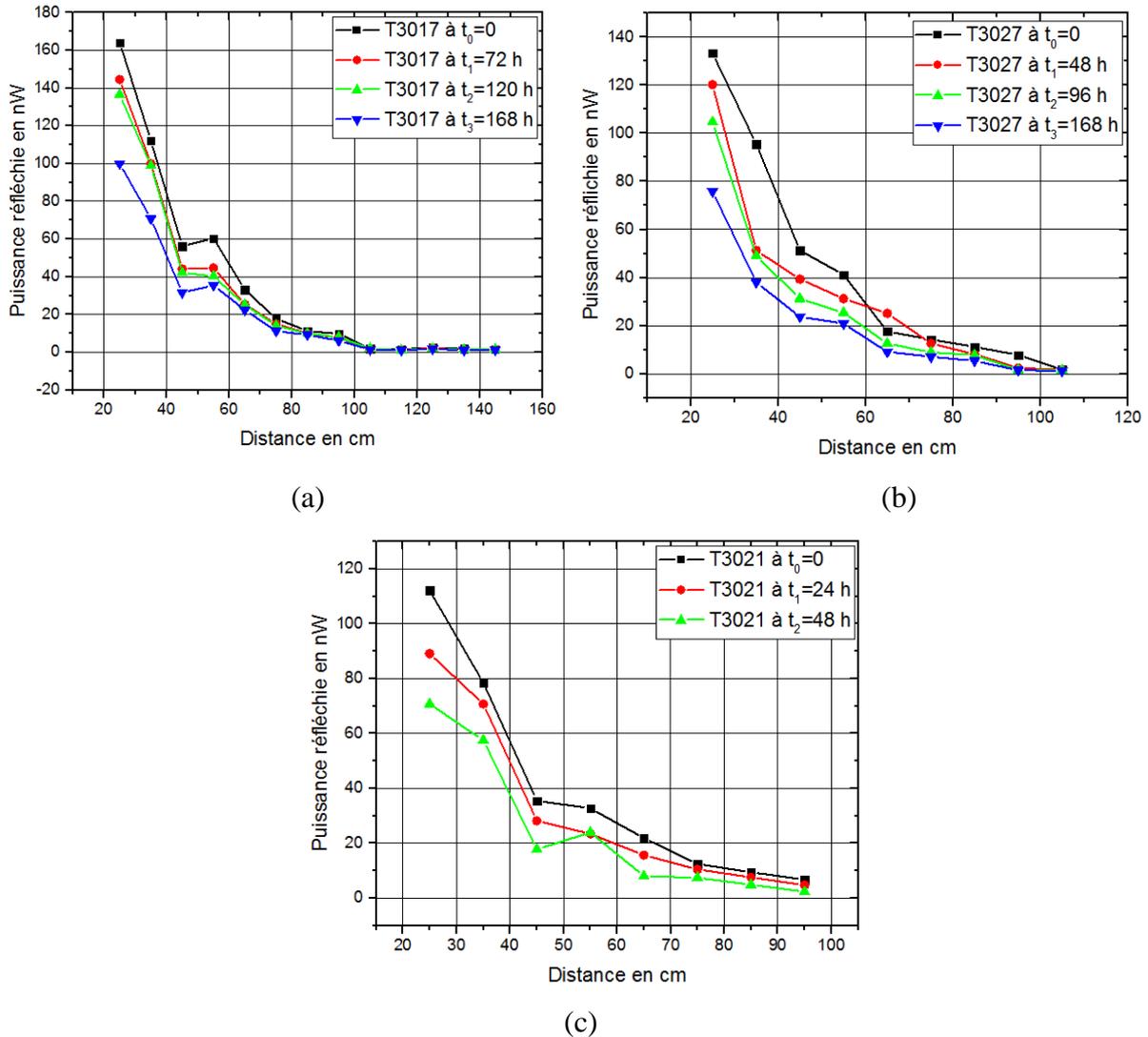


Figure 3.17. Mesure de la puissance réfléchie par les tags : (a) T3017 vieilli à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et (b) T3027 vieilli à  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et (c) T3021 vieilli à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

Les paramètres de performance (puissance réfléchie et portée) de l'ensemble des tags vieillissants ont changé de manière marquante pendant les essais. La puissance réfléchie (par l'ensemble des échantillons) diminue après chaque phase de vieillissement ce qui atténue fortement la portée du tag.

A partir des mesures brutes, nous avons adopté le même modèle mathématique en exponentielle décroissante que celui employé pour les tags de type Web. Le tableau 3.4 résume les valeurs de l'écart-type entre les mesures brutes et les courbes modélisées.

Tags	Écart-type en %	Tags	Écart-type en %	Tags	Écart-type en %
T3017 à $t_0$	3	T3027 à $t_0$	2,13	T3021 à $t_0$	2,64
T3017 à $t_1$	2,32	T3027 à $t_1$	2,11	T3021 à $t_1$	2,33
T3017 à $t_2$	2,81	T3027 à $t_2$	1,57	T3021 à $t_2$	2,70
T3017 à $t_3$	1,80	T3027 à $t_3$	1,95		

Tableau 3.4. Écart-type entre les valeurs mesurées et modélisées pour les tags Tageos.

Après modélisation, les tracés sont présentés sur la figure 3.18 pour les tags Tageos :

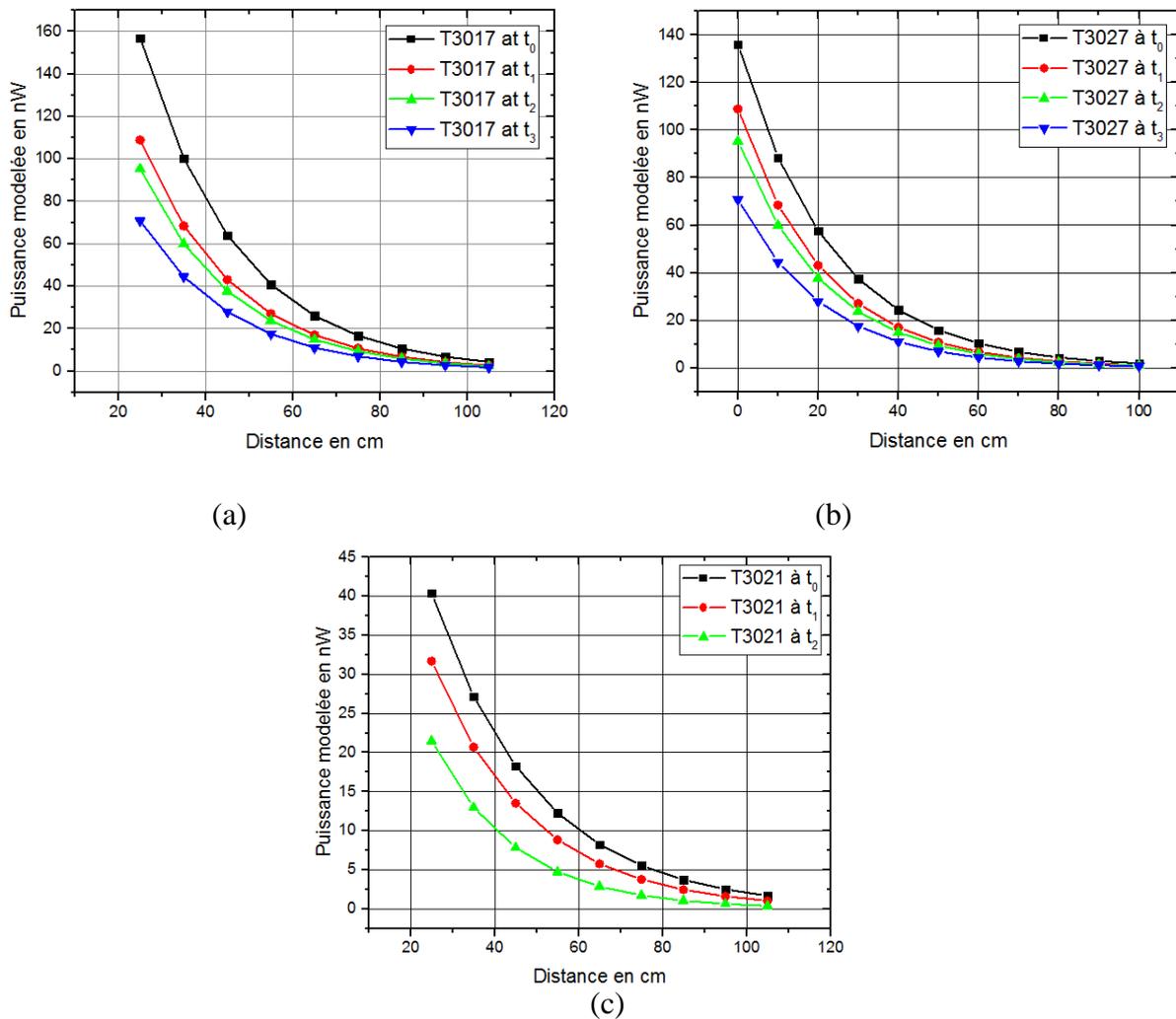


Figure 3.18. Puissances modélisées des tags : (a) T3017 vieilli à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et (b) T3027 vieilli à  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et (c) T3021 vieilli à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

L'équation d'accélération traduisant la vitesse de dégradation pour les Tageos selon la température choisie. A une distance fixe, est aussi une droite qui s'écrit sous la forme (3-5).

La figure 3.19 représente les puissances mesurées après modélisation pour l'ensemble des tags de type Tageos aux trois températures 140 ( $\pm 5$ ) °C, 160 ( $\pm 5$ ) °C et 180 ( $\pm 5$ ) °C à une distance fixe  $d=40$  cm (les résultats à 40 cm sont plus significatifs, pour les Tageos, par rapport à la distance choisi pour les Web égal à 60 cm. Cela est dû à la portée initiale de chaque type de tag).

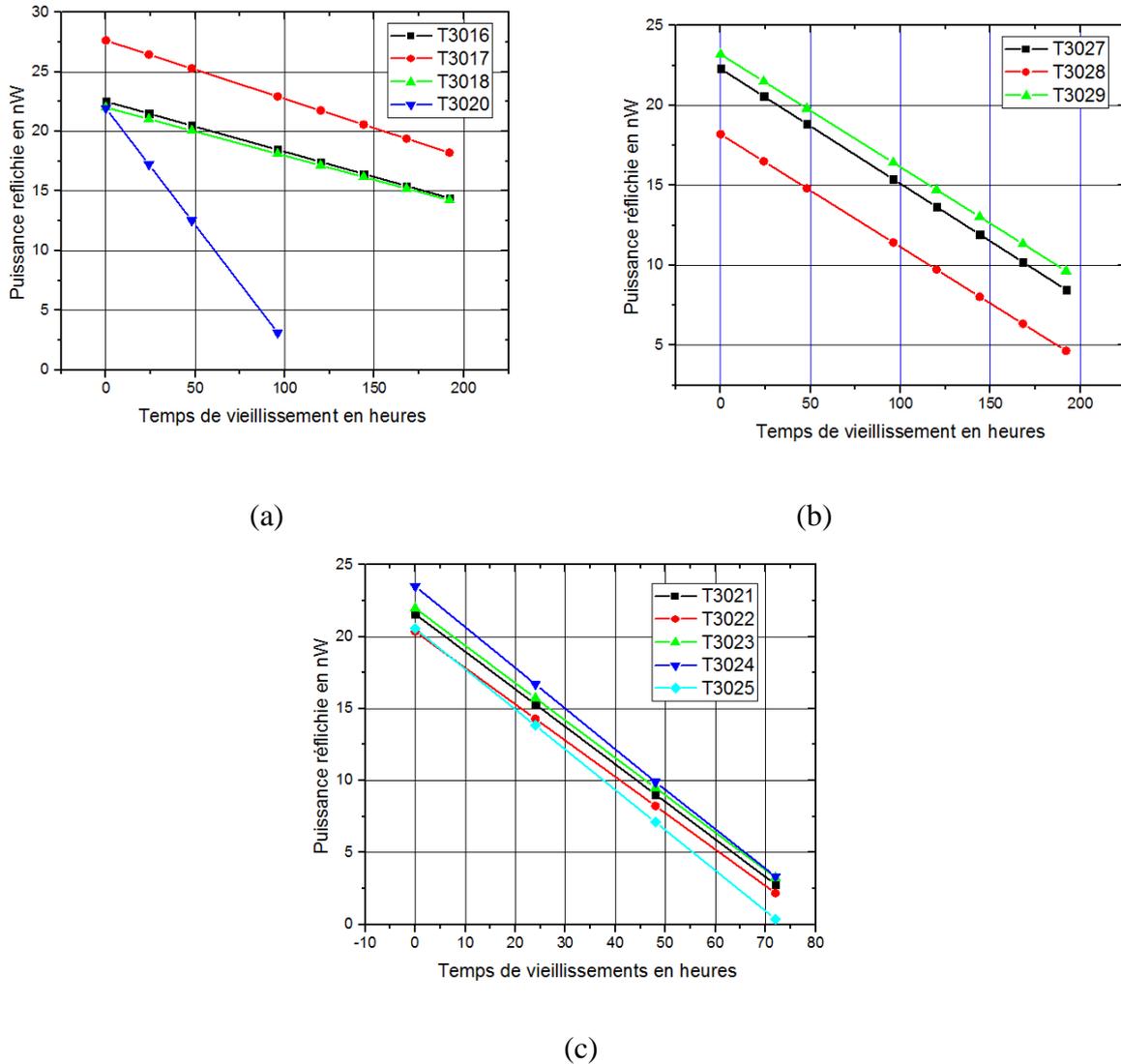


Figure 3.19. Puissances réfléchies par les tags vieillis à  $d=40$  cm (a) à 140 ( $\pm 5$ ) °C et (b) à 160 ( $\pm 5$ ) °C et (c) à 180 ( $\pm 5$ ) °C.

On observe une dégradation régulière des performances avec des dynamiques comparables pour les cinq échantillons vieillis à la même température. La variation de puissance mesurée en pourcentage est définie précédemment en (3-6).

Elle sera tracée en fonction du temps de vieillissement à une distance fixe et représentative  $d=40$  cm pour la série des 15 tags de types Tageos sous test et pour les trois températures dans la partie analyse statistique.

#### 4. Analyse statistique des tags Web et Tageos

Nous avons utilisé le logiciel ALTA de Reliasoft (présenté dans le chapitre 2) pour analyser statistiquement les données issues des tests de vieillissement accélérés exposés dans les parties précédentes.

La première étape dans l'analyse consiste à saisir les relevés de dégradations dans une feuille de données du logiciel. Ainsi la valeur de dégradation critique, qui présente le niveau de dégradation pour lequel le tag est considéré comme étant défaillant.

La deuxième étape consiste à choisir la distribution de vie la plus appropriée par l'application de la méthode du maximum de vraisemblance, dans notre cas la distribution Weibull à deux paramètres est la distribution qui caractérise le mieux la dégradation des tags. Ceci est une méthode statistique polyvalente qui a été utilisée pour étudier la fiabilité des connexions ACP dans plusieurs travaux de recherche [5, 6].

Pour ces deux paramètres de la distribution Weibull, la fonction densité de probabilité est donnée par (4) :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (3-7)$$

Où  $\eta$  est le paramètre d'échelle représente la durée pour laquelle nous avons 63% de défaillance.  $\beta$  est le paramètre de forme. Il représente la cinétique du mécanisme de défaillance (vitesse d'usure), cela vaut dire que  $\beta$  définit le type de phénomène de dégradation en cause (voir chapitre 2).

Ensuite nous avons choisi la relation liant la durée de vie et le stress. Notre contrainte (stress) est la haute température donc nous avons choisi l'équation d'Arrhenius qui permet de déterminer la relation entre contrainte nominale et contraintes accélérées dans le cas où le mode de défaillance dépend de la température [7].

Puis, il faut spécifier le modèle de dégradation. Pour notre cas d'étude, nous avons une dégradation qui dépend de la température et elle est linéaire, pour les deux types de tags.

Le logiciel ALTA résout l'équation (3-8) et détermine les paramètres du modèle a et b, pour chaque tag :

$$y = a.x + b \quad (3-8)$$

Avec « y » la mesure de dégradation (dégradation de la puissance) et x le temps de vieillissement

Le paramètre « a » représente la pente des droites, il est positif pour toutes les unités, ce qui revient à dire que la dégradation des tags est croissante en fonction du temps.

Un autre procédé pour calculer les temps de défaillance des tags est la méthode analytique : Le modèle de dégradation étant linéaire, alors  $x = (y-b)/a$ . Donc, pour une valeur donnée de y, on retrouve les temps de défaillance ( $TTF = x_{crit}$ ) correspondant à chaque unité.

✓ Dégradation en fonction du temps

Nous avons représenté à la figure 3.20, les valeurs de ces indicateurs  $\Delta P_{60}(t_i)$  et  $\Delta P_{40}(t_i)$  en fonction du temps de vieillissement afin de visualiser la dégradation de la puissance dans le temps, chaque tag est représenté par une couleur différente.

La dynamique de dégradation des puissances réfléchies varie d'un tag à un autre. Cela traduit la contrainte d'accélération (de la haute température) appliquée à chaque tag. La dynamique de dégradation croît avec la température. En effet, les deux graphes sont divisés en 3 parties. Une partie englobe les tags vieillis à une température de  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . Une deuxième résume le lot de tags vieillis à  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ , alors que la troisième partie représente le lot des tags vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et cela s'applique pour les deux types de tags Tagueos et Web.

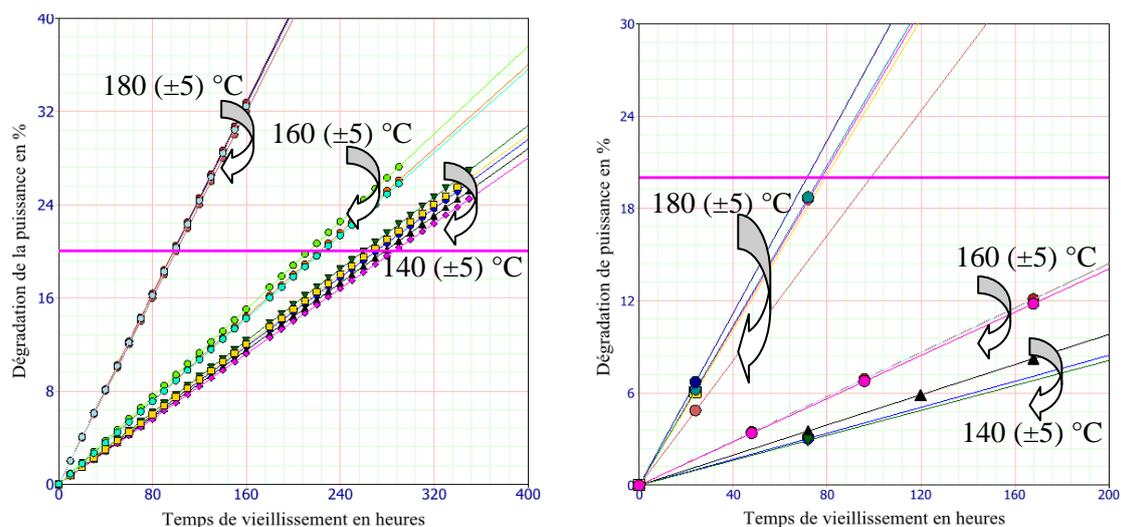


Figure 3.20. Dégradation de la puissance en fonction du temps de vieillissement pour les tags de type (a) Web et (b) Tagueos.

Sur la figure 3.20, nous pouvons voir également deux lignes horizontales parallèles à l'axe des abscisses. Ces lignes représentent la ligne de dégradation critique (fixé au début de l'analyse), qui est la valeur à partir de laquelle on considère que le tag est défaillant, elle correspond à 20 % de perte en puissance. A partir de cette droite, les temps de défaillances de chaque tag peuvent être extraits graphiquement en faisant une projection sur l'axe des abscisses, des points d'intersection de cette droite avec les droites de dégradation.

✓ Durée de vie en fonction de la température

La méthode contrainte-résistance est une méthode d'essais visant principalement à qualifier la fiabilité d'un système, pour ce faire il suffit d'intégrer la fiabilité par rapport à la résistance [8]. C'est une approche statistique qui permet de relier la durée de vie (résistance) d'un produit aux sollicitations (contraintes) auxquelles il est soumis. Elle correspond au modèle de vie accéléré défini auparavant par une droite.

Dans notre cas d'étude, l'endommagement des tags est accéléré par la haute température. Le modèle utilisé est le modèle Arrhenius. Donc nous avons appliqué la loi d'Arrhenius-Weibull (voir chapitre 2, équation 2.22).

Il est nécessaire de fixer une valeur présentant la température de fonctionnement nominal pour pouvoir tracer la durée de vie en fonction de la température sur le logiciel ALTA. Pour notre étude nous avons fixé 80 °C (les tags testés ont une plage de température comprise entre -40 °C et 80 °C).

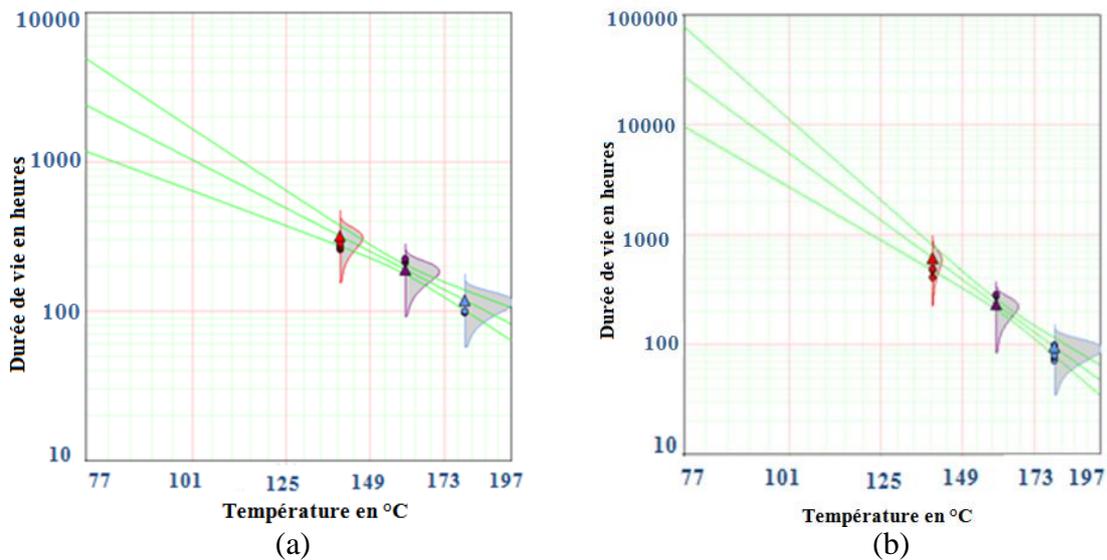


Figure 3.21. Durée de vie en fonction de la température pour les tags de type :  
(a) Web et (b) Tagoes.

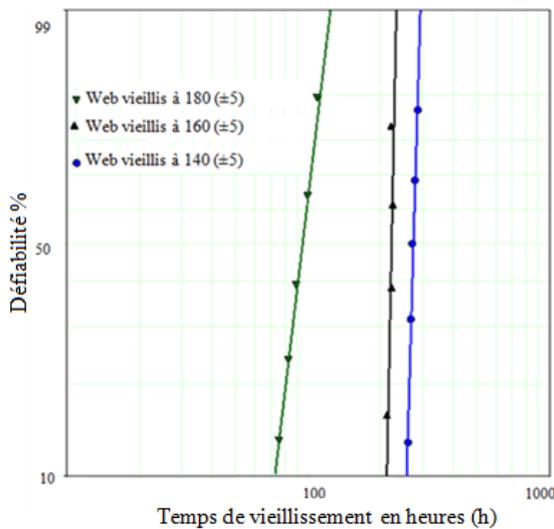
Sur la figure 3.21 on peut visualiser le tracé d'Arrhenius où la ligne verte représente la ligne d'êta représentant la durée de vie en heures, avec les bornes de confiance minimum et maximum.

La durée de vie peut être également calculée analytiquement en utilisant les relations mathématiques présentées dans le chapitre 2 (équation 2.6), ou bien plus simplement utiliser le moteur de calcul du logiciel Reliasoft qui se base sur les mêmes équations mathématiques.

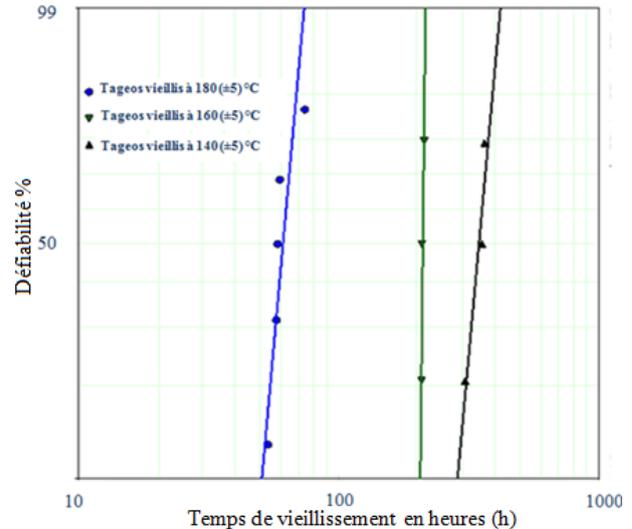
✓ Probabilité de défaillance et tracé du contour

La probabilité Weibull est tracée sur un "papier de probabilité Weibull" qui affiche le temps sur l'axe x utilisant une échelle logarithmique, et la probabilité de défaillance sur l'axe y utilisant une échelle log-log réciproque. On peut obtenir à partir de ce tracé la probabilité de défaillance à un moment donné ou vice versa pour chaque température.

La figure 3.22 affiche respectivement les lignes des trois températures pour les tags de type Web et les Tageos.



(a)



(b)

Figure 3.22. Défiabilité en fonction du temps de vieillissement pour les tags de type :

(a) Web et (b) Tageos.

Tests	$\beta$	$\eta$ en heures
Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C	40,19	276
Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C	42,12	223
Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C	123,74	98,91
Tageos vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C	9,9	359,7
Tageos vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C	83	211
Tageos vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C	10,05	63,38

Tableau 3.5. Paramètres d'échelle et de forme de la distribution Weibull.

Les résultats du tableau 3.5 montrent une différence importante entre les tests faits sur les tags de type Web et Tageos. En comparant le paramètre d'échelle  $\eta$ , les tags Tageos semblent plus résistants que les tags Web, les tags Tageos vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C ont un paramètre d'échelle d'environ 360 heures (la durée pour laquelle nous avons 63% de morts) alors que les tags Web vieillis à la même température ont un paramètre d'échelle égal à 276 heures. Les résultats obtenus montrent aussi une différence au niveau du paramètre de forme  $\beta$  qui donne une information sur la cinétique de mécanisme de défaillance. Différentes valeurs de  $\beta$  signifient l'existence de plusieurs mécanismes de défaillance. Sur la figure 3.22 (a) présentant la défiabilité des tags de type Web, nous remarquons que les lignes des températures 140 ( $\pm 5$ ) °C et 160 ( $\pm 5$ ) °C sont parallèles ce qui peut être traduit par le fait que nous sommes en présence du même mécanisme de défaillance, alors que la ligne de température 180 ( $\pm 5$ ) °C n'est pas parallèle aux deux autres températures de vieillissement, cela signifie qu'une température égale à 180 ( $\pm 5$ ) °C peut engendrer d'autres mécanismes de défaillance. Pour les tags Tageos nous sommes en présence de mécanismes de défaillances différents pour chaque température. Les trois lignes de températures ne sont pas parallèles (figure 3.22 (b)).

Un autre paramètre qui peut nous aider à déterminer les différents types de mécanismes de défaillance existants pour chaque type de tags est le tracé d' $\eta$  en fonction de  $\beta$  (appelé tracé du contour sur le logiciel ALTA).

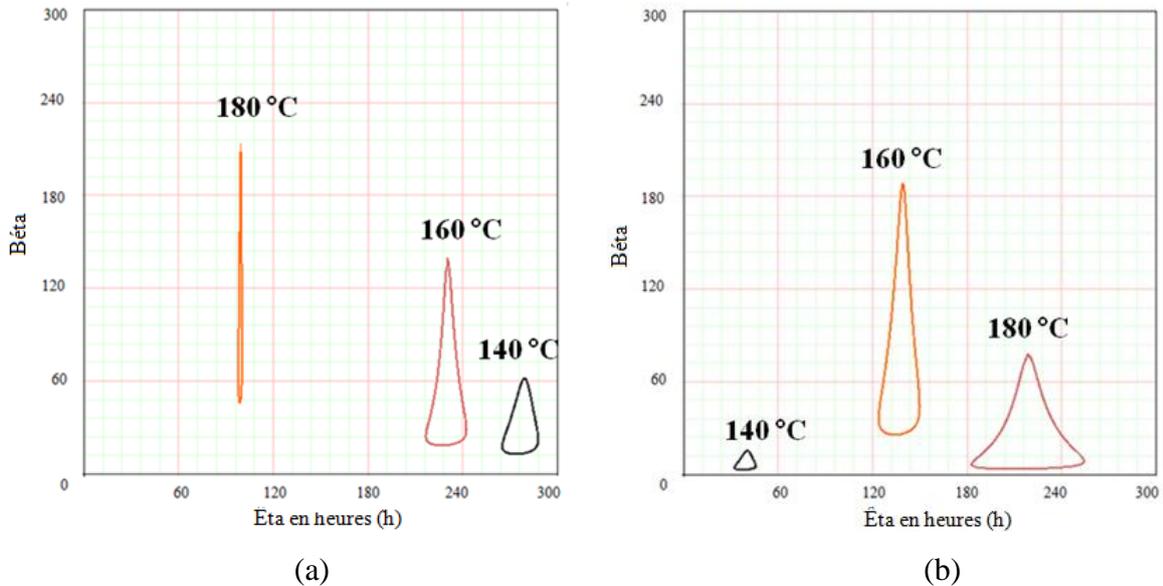


Figure 3.23. Êta en fonction de bêta pour les tags de type : (a) Web (b) Tageos.

Le tracé de contour pour les tags Web présenté sur la figure 3.23 (a) montre que les deux ensembles  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  sont comparables au niveau de confiance égale à 90%, tandis que l'ensemble  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  apparaît différent des deux autres. Ceci est dû au fait que les tags vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  ont le même mécanisme de défaillance et le même phénomène de vieillissement, alors que le  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  a subi d'autres mécanismes et d'autres phénomènes de vieillissement [9].

Sur le tracé, des tags Tageos présenté sur la figure 3.23 (b), nous remarquons trois formes différentes du contour pour les différentes températures, à un niveau de confiance égale à 90 % ce qui peut signifier la présence de différents mécanismes de défaillance.

✓ Facteur d'accélération

Comme il a été défini dans le chapitre 2, équation 2.7, le facteur d'accélération est un paramètre qui traduit la dynamique de dégradation d'un composant. Ce paramètre permet de calculer la durée des essais en fonction de la contrainte.

La figure 3.24 présente le tracé du facteur d'accélération en fonction de la température pour les tags Web et Tageos. Ce paramètre augmente au delà d'une température égale à  $127 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  pour les tags Web, et au delà de  $87 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  pour les tags Tageos. Ces températures présentent la limite pour laquelle les tags ne sont pas qualifiés et à partir de laquelle la cinétique et les mécanismes de dégradation sont révélés.

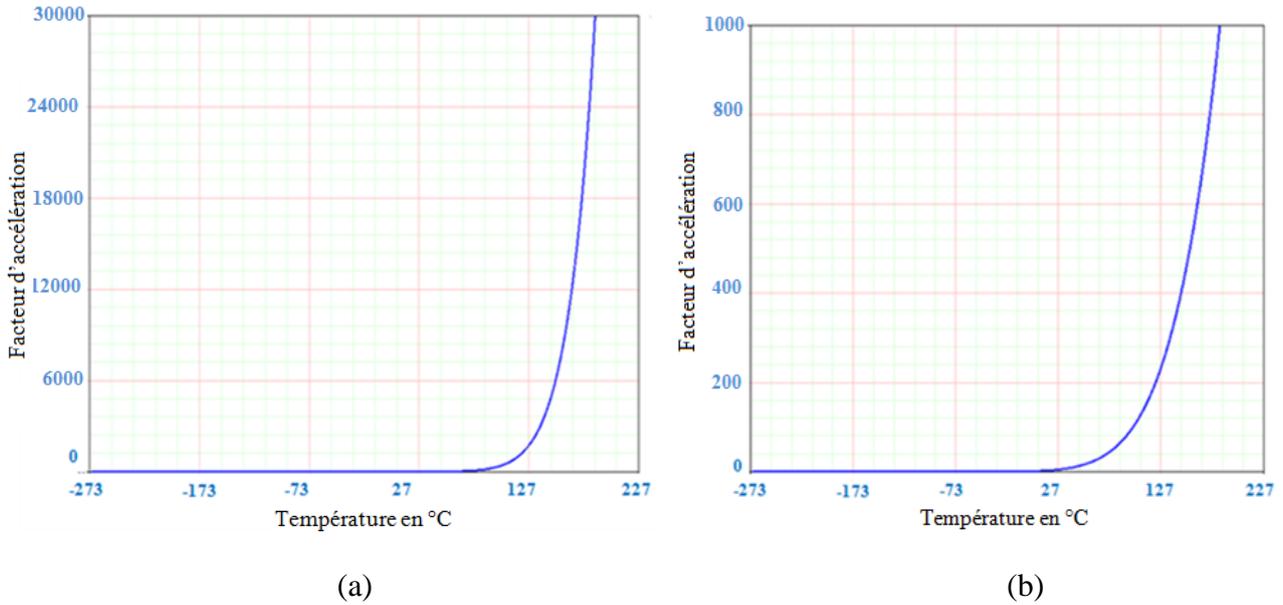


Figure 3.24. Facteur d'accélération en fonction de la température (a) pour les tags Web (b) pour les tags Tagueos.

Les facteurs d'accélération calculés confirment que les tests basés sur les tags Web accélèrent plus rapidement les défaillances que les tests basés sur les tags Tagueos. À une température égale à  $145 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  le facteur d'accélération pour les Web égale à 6000 tandis que pour la même température le facteur d'accélération pour les Tagueos égale à 360 [9].

Suivant la méthodologie présentée dans le chapitre 2 (figure 2.6), l'étape qui doit suivre cette analyse statistique consiste en une analyse des mécanismes de défaillance par microscopie optique et au MEB qui fera l'objet du chapitre 4.

## Conclusion

La méthodologie que nous avons adoptée a contribué de façon significative à atteindre notre objectif d'étudier les effets du stockage en haute température sur la performance des tags UHF RFID passives pour les trois températures  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ ,  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . Dans ce chapitre nous avons appliqué les deux premières étapes de la méthodologie. Le choix des paramètres de tests (températures, support...) ont été effectués après plusieurs essais. Les tags testés sont des tags UHF passifs issues de deux fabricants différents et qui ont deux structures différentes permettant une comparaison significative.

À l'aide d'un banc de mesure dédié, la puissance réfléchie a été mesurée après chaque phase de vieillissement pour les trente tags testés de deux type Web et Tagueos. Les performances

diminuent considérablement après chaque phase de vieillissement avec différentes dynamiques de dégradation pour tous les tags vieillis. Cette dynamique de dégradation dépend de la température de test et du type de tag. Des différences claires dans les modes, les mécanismes et les temps de défaillance entre les tags Web et Tageos ont été observées. Les tags Tageos semblent plus résistants que les tags Web, ils ont une résistance à la température meilleure que celle des Web.

Dans le chapitre suivant nous allons procéder à la dernière étape qui est l'analyse physique pour déterminer les mécanismes de défaillance apparaissant sur les tags de type Web et Tageos et qui vont nous permettre de donner des explications aux résultats de l'analyse statistique.

## Références

- [1] "UHF GEN 2 RFID, SpeedwayR installation and operations guide version" 5.2, Copyright © Impinj, Inc. All rights reserved, <http://www.impinj.com>, 2012-2014.
- [2] "EPC Radio-Frequency Identity Protocols, Class-1 Generation-2 UHF RFID, Protocol for Communications at 860-960 Mhz", Version 1.1.0, 17 December 2005.
- [3] "EPCglobal. Overview of the ultra-high frequency (UHF) regulations worldwide". <http://www.gs1.org/epcglobal/implementation>, 2017.
- [4] JEDEC standard, High temperature storage life, JESD22-A103D (Revision of JESD22 A103C, November 2004) December 2010.
- [5] J. Liu and Z. Lau, "Reliability of anisotropically conductive adhesive joints on a flip chip/FR-4 substrate," *J. Electron. Packag.*, vol. 124, no. 3, pp 240–245, 2002.
- [6] W. Kwon, M. Yim, K. Paik, S. Ham, and S. Lee, "Thermal cycling reliability and delamination of anisotropic conductive adhesives flip chip on organic substrates with emphasis on the thermal deformation," *J. Electron. Packag.*, vol. 127, no. 2, pp 86–90, 2005.
- [7] M. Shooman, "Probabilistic Reliability: An Engineering Approach". 2nd edn, Robert E. Krieger Publishing Compagny, Malabar, Florida, 1990.
- [8] E. Lewis, "Introduction to Reliability Engineering." John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [9] S. Taoufik, A. Oualkadi, F. Temcamani, B. Delacressonniere, P. Dherbécourt. "Reliability and Failure Analysis of UHF RFID Passive Tags under Thermal Storage ", *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Volume: 17 Issue: 3, 31, 2017.

# **CHAPITRE 4**

**Analyse physique et modélisation des  
mécanismes de défaillances.**

## **Introduction**

Dans le chapitre précédent nous avons présenté les résultats des tests de vieillissement accélérés ainsi les résultats de l'analyse statistique. L'analyse physique de défaillance vient pour compléter l'analyse statistique faite sur les tags Web et Tageos et donner des explications aux résultats obtenus et confirmer ou non les hypothèses avancées dans cette partie.

Dans ce dernier chapitre, une première partie fera l'objet d'un descriptif de la préparation de nos échantillons. Une deuxième partie sera consacrée à l'analyse physique des tags vieillis, en utilisant la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage (MEB). Dans une troisième et dernière partie, nous effectuerons des simulations en utilisant un logiciel de modélisation multi-physique afin de reproduire les mécanismes de défaillances révélés expérimentalement et de vérifier les hypothèses avancées dans la partie analyses physiques.

### **1. Mécanismes de défaillance**

#### **1.1. Préparation des échantillons**

La préparation des échantillons désigne les différentes manières ou méthodes par lesquelles un échantillon est traité avant son analyse.

La préparation d'échantillons peut à la fois prendre beaucoup de temps et être source d'erreurs, ce qui a un impact majeur sur le résultat de toute méthode analytique et sur la pureté de l'échantillon pour les analyses suivantes. Ainsi, le choix de la technique correcte de préparation d'échantillons est crucial, il doit être fait pour garantir des analyses en aval fiables. Dans le but de faire une analyse de défaillance structurale des tags neufs et vieillis au microscope optique et au MEB (Microscopie électronique à balayage), une préparation d'échantillons précise est obligatoire.

La préparation des tags a pour objectif, d'avoir le tag collé à un support conducteur pour pouvoir observer sa structure interne.

Pour se faire il faut passer par trois étapes fondamentales :

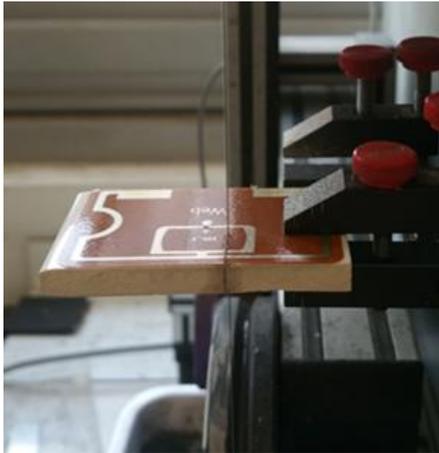
-  Découpe avec la scie à fil.
-  Enrobage.
-  Polissage.

Ces étapes seront détaillées par la suite.

### 1.1.1. Découpe avec la scie à fil

L'observation et la caractérisation d'un échantillon au microscope électronique à balayage nécessitent le plus souvent une préparation spécifique de sa surface.

La première étape de la préparation de nos échantillons consiste à réaliser un prélèvement ou une découpe autour du RFIC d'un tag vieilli, en utilisant une scie à fil, d'une façon précise pour ne pas abîmer le RFIC, et ne pas détacher l'antenne du support (figure 4.1).



(a)



(b)

Figure 4.1. (a) Découpe d'un tag et (b) Résultat de découpe.

### 1.1.2. Enrobage

L'enrobage des échantillons est dans la plupart des cas nécessaire avant l'opération de polissage. Il permet en effet de polir les échantillons trop petits pour être manipulés et d'assurer une bonne préparation des bords.

L'enrobage d'un échantillon dans une résine a deux objectifs principaux :

- ✚ Polissage manuel : faciliter la préhension de l'échantillon.
- ✚ Polissage automatique : réunir plusieurs échantillons dans un porte-échantillons dans des conditions optimales de serrage.

L'enrobage d'échantillon permet donc de limiter les effets de bords pendant l'étape de polissage.

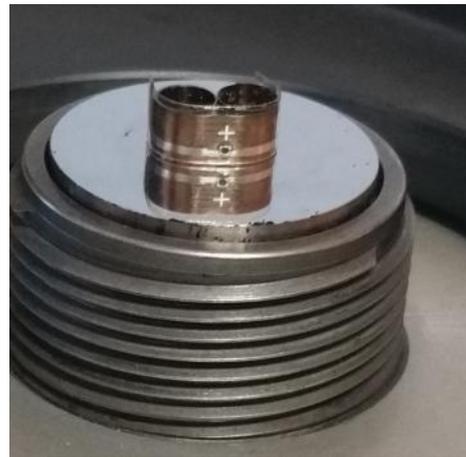
Nous avons utilisé pendant la préparation de nos échantillons deux types d'enrobage : enrobage à froid et à chaud.

L'enrobage à chaud exige le réglage de plusieurs paramètres selon le type de la résine utilisée (nous avons utilisé le Polyfast : une résine conductrice qui permet de visualiser

l'échantillon avec le MEB). Mais auparavant nous fixons l'échantillon sur un support en plastique ou bobine métallique (Figure 4.2).



(a)



(b)

Figure 4.2. (a) Fixation du tag sur un support métallique et (b) Tag sur le piston de la machine d'enrobage à chaud.

L'enrobage à froid, contrairement à l'enrobage chaud qui nécessite une température de 130 ( $\pm 5$ ) °C environ, se met en œuvre à une température ambiante (entre 10 et 20 ( $\pm 5$ ) °C).

L'échantillon est d'abord fixé sur un support en plastique ou bobine métallique, puis celui-ci est placé dans le moule avec la face à polir orientée vers le bas (figure 4.3).



Figure 4.3. Tag dans le moule d'enrobage à froid.

Le mélange d'enrobage, préparé avec des quantités précises de résine mécaprex IP et du durcissant représentant 10 % du mélange, est versé dans le moule, ensuite placé dans la boîte sous vide (figure 4.4).



Figure 4.4. Tag enrobé à froid.

### **1.1.3. Polissage manuel**

Après la découpe, les différentes étapes de polissage comportent le rodage, le polissage grossier, le polissage fin et la finition avec des grains de dimension variant entre 30  $\mu\text{m}$  et 14  $\mu\text{m}$ .

Toutes ces opérations permettent de placer des particules abrasives sur l'échantillon en présence d'un lubrifiant qui assure simultanément le transport des copeaux et le refroidissement de l'échantillon et de l'abrasif.

Le polissage manuel est une opération qui demande d'être prudent et d'utiliser progressivement les grains afin de conserver la planéité de l'échantillon.

### **1.2. Analyse microscopique**

La haute température provoque des pannes électroniques avec différentes correspondances. Elle accélère les réactions chimiques dans les matériaux, affaiblit les propriétés d'isolation et pourrait éventuellement causer une panne diélectrique [1]. Elle entraîne également des changements dans différents paramètres matériels, ce qui modifie le comportement de l'ensemble du dispositif [1]. Cela doit être pris en compte lorsque les tests de vieillissement accélérés sont utilisés pour obtenir des données de fiabilité pour l'électronique.

Les paramètres de performance des tags RFID UHF passifs vieillissent à des hautes températures ont changé d'une manière significative après chaque phase de vieillissement. Ce qui peut être expliqué par l'endommagement de l'antenne ou les joints entre l'antenne et le RFIC ou bien le RFIC [2].

Dans le but d'avoir une référence de joints, nous avons procédé à une coupe transversale de quelques tags non vieillis en utilisant le MEB. Les vues MEB des joints sans défaillance sont présentées sur la figure 2.10 du chapitre 2.

### 1.2.1. Endommagement de l'antenne

Une analyse de défaillance des échantillons a été effectuée, après les tests de vieillissement, pour déterminer les mécanismes de défaillance. D'abord, Les tags ont été examinés visuellement pour détecter les emplacements et les mécanismes défaillants. L'attachement de l'antenne sur le substrat a été examiné avec un microscope optique pour déterminer la présence des fissures qui pourraient affecter la performance des tags.

Cette analyse des tags vieillis par microscope optique, a révélé des fissures sur les antennes des tags de type WEB vieillis à  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . Un exemple de ces fissures est illustré sur la figure 4.5 (pour d'autres vues optique voir l'annexe 4), nous avons présenté sur la même figure 4.5 une vue optique du tag avant et après vieillissement.

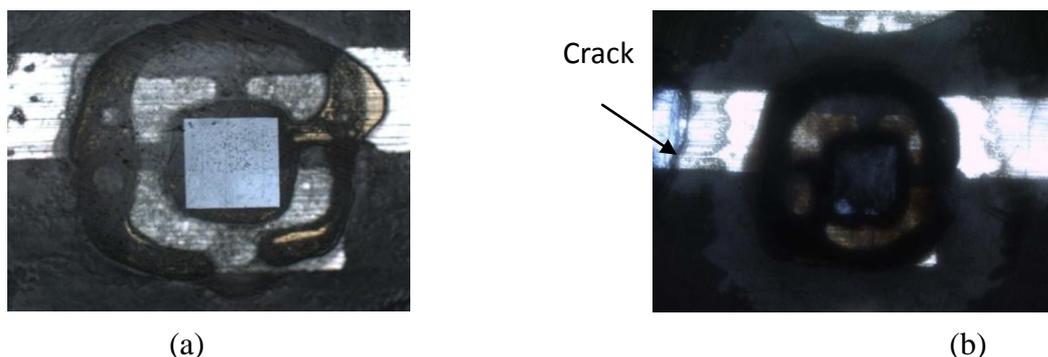


Figure 4.5. Vue optique avec grossissement de 20 d'un tag (a) neuf et (b) vieilli.

En outre, aucune défaillance sur les antennes n'a été observée pour les autres tags vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . Il est donc possible que les changements des performances des tags de types Web et Tagueos sont dus à des changements de l'adaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne occasionnés par des changements dans les joints, cela changera la puissance réfléchiée par les tags et leurs portée [3, 4].

### 1.2.2. Endommagement des joints entre l'antenne et le RFIC

Les joints entre le RFIC et l'antenne ont été analysés en utilisant un microscope électronique à balayage. Nous avons observé une déformation à la matrice polymère de l'ACP suite à l'examination des coupes transversales des tags vieillis à l'aide de MEB. Cette déformation

peut déloger les particules de nickel de l'ACP dans la zone de contact, ce phénomène est également signalé dans plusieurs articles scientifiques [3- 7]. En outre, les particules de nickel ont une taille très petite ce qui rend leur contact avec l'antenne et les bumps facilement perturbé [5,10].

La figure 4.6 montre des exemples de la structure interne des tags avec des défaillances pour les tags de type Web et les tags de type Tageos vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C (d'autres défaillances sont présentées dans l'annexe 4).

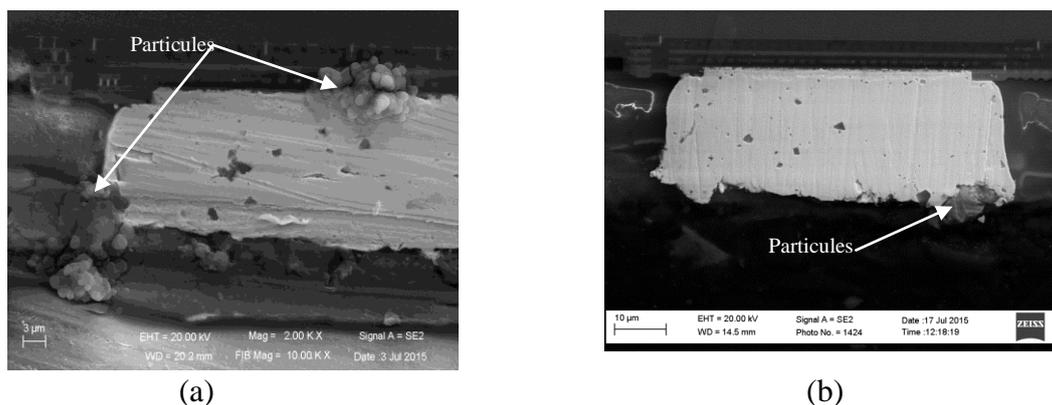


Figure 4.6. Vue au MEB montrant la déformation observée au niveau des contacts entre Antenne/Bump et RFIC/Bump pour les tags vieillis à la température 160 ( $\pm 5$ ) °C de type :

(a) Web (b) Tageos.

La déformation des contacts d'un tag passif pourrait changer la résistance des interconnexions [13-16]. Ainsi, les changements des paramètres de performance des tags vieillis en modifiant l'adaptation d'impédance entre l'antenne et le RFIC [2] [11-12].

### 1.2.3. Endommagement de le RFIC

Le RFIC est collée sur l'antenne dans une boîte noire, les défaillances qui peuvent se présenter à ce niveau sont des défauts macroscopiques dont l'accès se fait par la mesure. La structure interne de le RFIC n'est pas connue à un degré qui permet d'étudier les défaillances qui peuvent apparaître lors d'un vieillissement.

### 1.2.4. Mécanismes de défaillance à 180 ( $\pm 5$ ) °C

Nous avons observé un mode de défaillance particulier pour les tags vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C. Ce type de défaillance est caractérisé par des paramètres excessifs de test de vieillissement accéléré (haute température excessive). La figure 4.7 illustre l'exemple de la structure interne

des tags vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  avec défaillance. Des défaillances artificielles sérieuses sont apparues qui ne se produiraient jamais dans des conditions nominales pour les tags passives.

Ces résultats montrent que la température  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  dépasse la limite technologique pour ce type de tags. Cela peut conduire à de fausses interprétations et à ne pas reproduire les mécanismes de défaillance dans l'environnement d'exploitation réel [8].

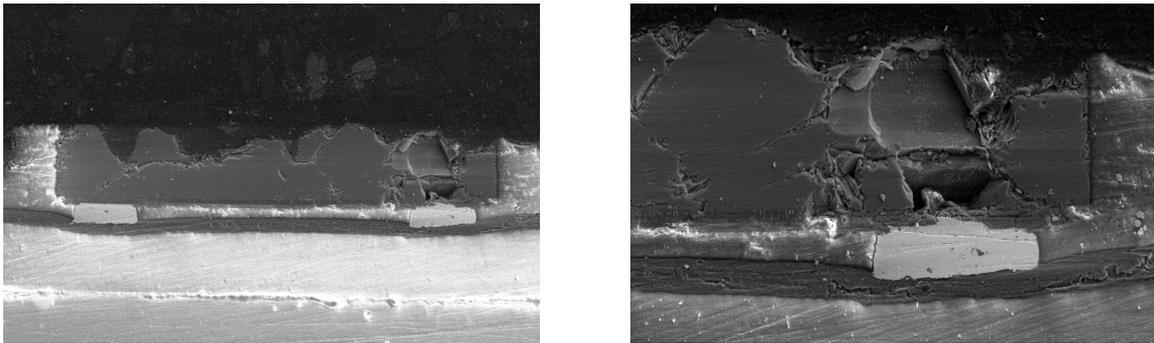


Figure 4.7. Vues au MEB du tag Web vieilli à la température  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ .

Les mesures de la puissance réfléchie montrent que le taux de dégradation des tags vieillis à la température  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  est beaucoup plus élevé que celui des tags vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . En outre, l'analyse statistique montre que les tags vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  présentaient un paramètre de forme trois fois plus grand que les tags vieillis à  $140 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  et  $160 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ , ce qui peut indiquer différents mécanismes de défaillance. Ces résultats sont en corrélation avec l'analyse physique, qui montre que les tags vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  présentent un mode particulier de vieillissement avec de graves défaillances artificielles.

Le comportement particulier des tags vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ , ainsi que les modes de défaillance non reproduits dans les conditions de fonctionnement réelles, ont donné une idée claire de la limite technologique de haute température pour ce type de tags RFID passifs.

La partie suivante a pour objectif la modélisation des mécanismes de défaillance d'un tag passif en utilisant un logiciel de modélisation multi-physique. Cette modélisation va nous permettre de reproduire les mécanismes de défaillances révélés expérimentalement et de vérifier les hypothèses avancées dans cette partie d'analyse physique.

## **2. Modélisation des mécanismes de défaillances des tags**

Dans les parties précédentes, nous avons effectué des tests de vieillissements accélérés en stockage thermique sur des tags RFID passifs, la puissance réfléchie et la portée des tags

vieillis ont changé expérimentalement. Grâce à des outils d'analyse microscopique, nous avons analysé les mécanismes de défaillance à différentes températures.

Dans cette section le logiciel de modélisation multi-physique COMSOL est employé afin de reproduire les mécanismes de défaillance observés dans la partie précédente de ce chapitre. Pour ce faire nous utilisons un modèle du tag RFID passif présenté dans la figure 4.8.

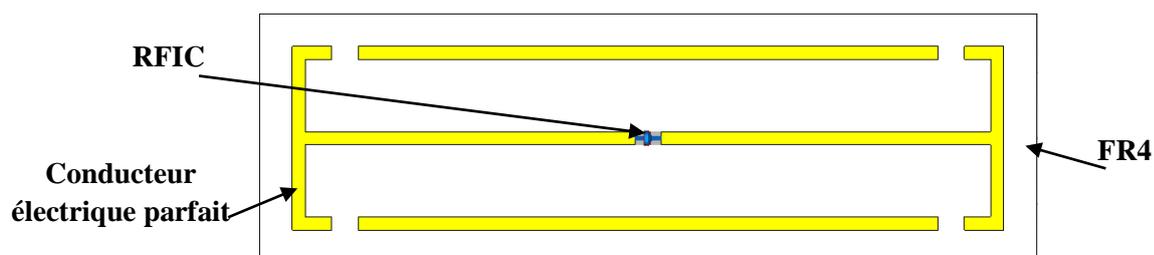


Figure 4.8. Modèle du tag RFID passif.

Nous avons choisi un tag de structure simple facile à modéliser. La forme de son antenne nous permettra de créer des fissures de différentes taille et à plusieurs emplacement. Il fonctionne dans la bande 860 à 960 MHz, à cette bande de fréquence, la partie métallique du tag RFID peut être modélisée comme un conducteur électrique parfait, déposé sur un substrat diélectrique FR4. Une source externe d'une impédance de  $50 \Omega$  est utilisée pour ce modèle pour exciter le tag (RFIC et antenne) et évaluer l'impédance d'entrée de l'ensemble (figure 4.9). Le RFIC est modélisé par un circuit RC parallèle avec  $R= 150 \Omega$  et  $C= 1,58 \text{ pF}$ .

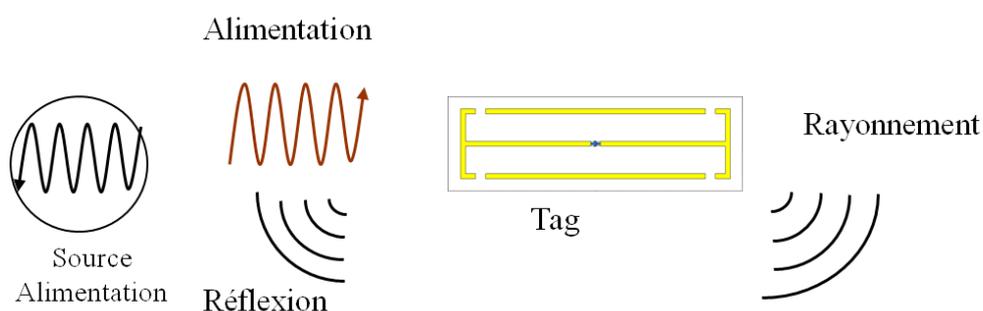


Figure 4.9. Schéma simplifié de la modélisation

La modélisation des mécanismes de défaillances en utilisant ce modèle sera effectuée sur deux étapes principales. La première étape consiste à simuler des défauts sur l'antenne du tag par la création des fissures de différentes tailles aux différents emplacements. La deuxième étape présente l'effet de la dégradation du RFIC sur le fonctionnement total du tag simulé.

## 2.1. Modélisation de l'endommagement de l'antenne

Nous avons simulé des fissures de différentes tailles et sur différents emplacements par rapport à le RFIC, pour étudier l'effet de la dégradation de l'antenne sur les performances du modèle de tag RFID. Nous avons réalisé quatre simulations :

- ✚ La 1<sup>ère</sup> avec une fissure de dimension égale à 0,7 mm, à une grande distance du RFIC égale à 35 mm.
- ✚ La 2<sup>ème</sup> avec une fissure de même dimension que la 1<sup>ère</sup> simulation mais plus proche à le RFIC à une distance égale à 19 mm, pour voir l'influence de l'emplacement de la fissure sur la réponse totale du tag.
- ✚ La 3<sup>ème</sup> avec une fissure créée sur le contact puce/ antenne, de dimension égale à 0,1 mm.
- ✚ La 4<sup>ème</sup> avec une fissure de même dimension que la 3<sup>ème</sup> simulation égale à 0,1 mm, très proche du RFIC à une distance égale à 2 mm.

La figure 4.10 présente le tag dans les quatre simulations.

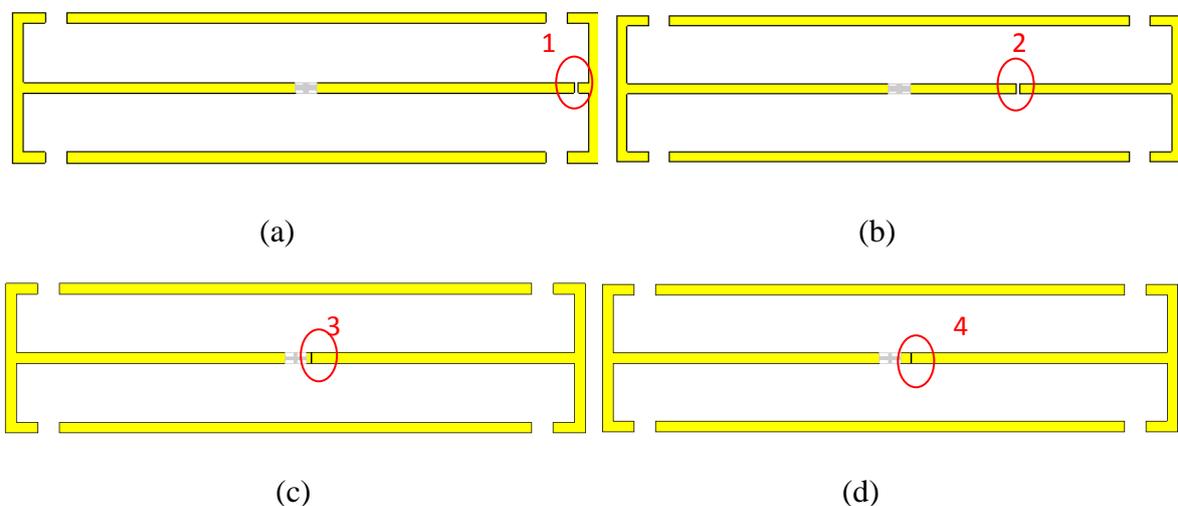


Figure 4.10. Tag RFID passif avec fissures (a) de dimension égale à 0,7 mm (b) de dimension égale à 0,7 mm (c) de dimension égale à 0,1 mm (d) de dimension égale à 0,1 mm.

Le tableau 4.1 résume les caractéristiques des fissures créés.

	Dimension	Emplacement par rapport à le RFIC
Défaut 1	0,7 mm	35 mm
Défaut 2	0,7 mm	19 mm
Défaut 3	0,1 mm	0,5 mm
Défaut 4	0,1 mm	2 mm

Tableau 4.1. Dimensions et emplacements des fissures.

La simulation est faite à une fréquence égale à 910 MHz sur une bande de 860-960 MHz. Le logiciel nous permet de calculer et de tracer différents paramètres du tag simulé (Coefficient de réflexion, impédance d'entrée, puissance rayonnée...). Les résultats de ces simulations sont présentés par la suite.

### 2.1.1. Coefficient de réflexion dans le cas d'endommagement de l'antenne

La largeur de bande où le coefficient de réflexion est inférieur à  $-10$  dB correspond à 90% de la puissance transmise. En-dehors de cette bande, la puissance émise par l'antenne diminue et les niveaux de réactance peuvent être trop élevés pour un fonctionnement normal.

Pour voir l'évolution de ce paramètre en fonction de la fissure créée, nous avons calculé et tracé par le logiciel COMSOL le coefficient de réflexion à l'état neuf, et après création de défaut.

La figure 4.11 présente le tracé du coefficient de réflexion pour les quatre simulations comparé à l'état neuf.

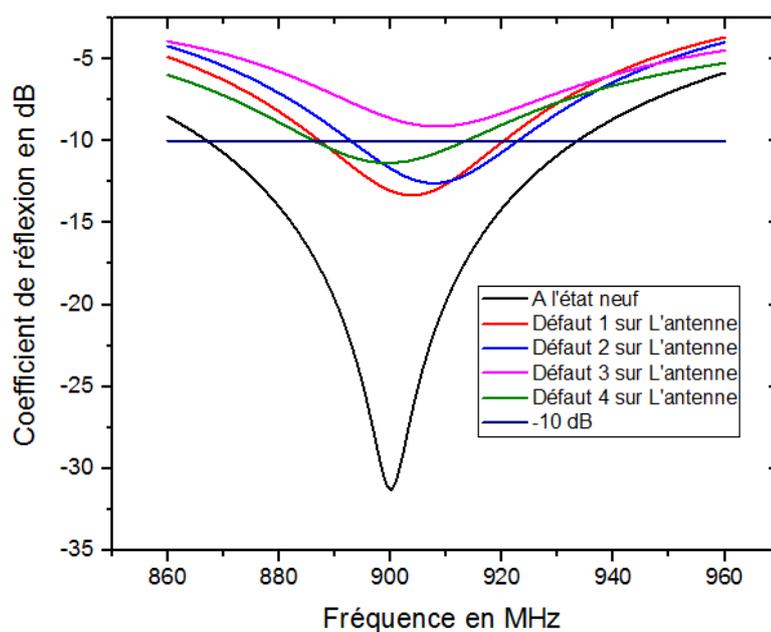


Figure 4.11. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Le coefficient de réflexion est défini comme le rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incidente [17]. L'augmentation de ce coefficient signifie l'augmentation de la puissance réfléchie vers le générateur, et donc la diminution de la puissance rayonnée par le tag.

La variation du coefficient de réflexion et la largeur de la bande est influencé par l'emplacement et de la fissure sur l'antenne, plus on s'approche du RFIC plus l'effet de la fissure augmente jusqu'à l'obtention d'un coefficient de réflexion de moins de -10 dB (défaut 3).

Le tableau 4.2 résume les résultats de ces simulations, en précisant le pourcentage de la bande interdite qui présente la bande où l'énergie communiqué n'est pas suffisante pour un fonctionnement normal de l'antenne (-10 dB).

	Coefficient de réflexion en dB	de Largeur de la bande en MHz	Bande interdite
L'état neuf	-19,8	66	44%
Défaut 1	-12,63	33	67%
Défaut 2	-12,49	30	70%
Défaut 3	-9,08	0	100%
Défaut 4	-10,51	15	85%

Tableau 4.2. Paramètres de performance du modèle de tag RFID à l'état neuf et avec défauts.

La réponse du tag en simulation est influencée par la dégradation de l'antenne. Le coefficient de réflexion à la fréquence de simulation est un paramètre important pour évaluer cette réponse.

Pour simuler le plus fidèlement possible les résultats de l'expérimentation présentés dans le chapitre 3, nous avons calculé et tracé d'autres paramètres qui sont l'impédance d'entrée et la puissance rayonnée par le tag.

### 2.1.2. Impédance d'entrée et puissance rayonnée dans le cas d'endommagement de l'antenne

Théoriquement la création des fissures sur l'antenne engendre une variation d'impédance d'entrée et par conséquent une désadaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne ce qui change forcément la puissance rayonnée par le tag.

Si on change l'adaptation d'impédance d'un tag (par vieillissement), le tag aura besoin d'une puissance reçue plus élevée pour s'alimenter donc il va rayonner une puissance plus faible [9].

En simulation nous avons calculé l'impédance d'entrée à l'état neuf et après création de défaut. La figure 4.12 présente le tracé de cette impédance en fonction de la fréquence.

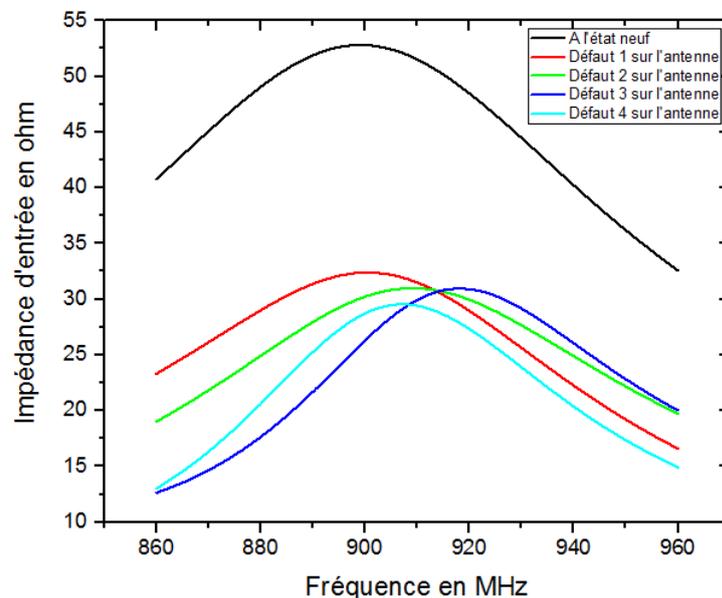


Figure 4.12. Impédance d'entée en fonction de la fréquence.

À la même fréquence de simulation égale à 910 MHz, l'impédance d'entrée diminue dans les cas où les antennes sont dégradées (fissures). Ce changement d'impédance conduit à une

désadaptation d'impédance entre l'antenne et le RFIC ce qui influence sur la puissance rayonnée par le tag simulé.

Le tableau 4.3 présente les valeurs de l'impédance d'entrée ainsi celles de la puissance rayonnée correspondante.

	Impédance d'entrée en $\Omega$	Puissance rayonnée en nW
L'état neuf	51,51	31,6
Défaut 1	31,49	21,1
Défaut 2	30,97	19,1
Défaut 3	29,92	17,4
Défaut 4	29,41	16,9

Tableau 4.3. Impédance d'entrée et puissance rayonnée du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation de l'antenne.

L'adaptation d'impédance change ce qui va nécessiter au tag une puissance plus élevée pour s'alimenter donc le tag rayonnera une puissance plus faible [9]. Les résultats de ces simulations confirment les hypothèses que nous avons avancées dans la partie mécanismes de défaillance qui disent que l'apparition des fissures sur l'antenne du tag vieilli a influencé sur la puissance rayonnée par le tag.

## 2.2. Modélisation de l'endommagement du RFIC

Après avoir simulé les défauts sur l'antenne du modèle du tag RFID passif, une simulation de dégradation du RFIC du tag est nécessaire pour compléter l'étude.

Le RFIC est modélisée par un circuit RC parallèle son impédance est calculée à partir de cette expression :

$$\underline{Z} = \frac{R}{1+(RC\omega)^2} - j \frac{R^2C\omega}{1+(RC\omega)^2} \quad (4-1)$$

Avec R la résistance, C la capacité et  $\omega$  la pulsation.

Pour engendrer des dégradations sur le RFIC il suffit de changer son impédance. Pour changer la valeur de  $Z$  soit on change la valeur de  $R$  ou de  $C$  ou bien on change les deux en même temps. Ce changement se fait par rapport aux valeurs de ces paramètres à l'état initial (tag neuf).

### 2.2.1. Coefficient de réflexion dans le cas d'endommagement du RFIC

Nous allons adopter la même démarche que celle du paragraphe 2.1 pour étudier l'influence de la dégradation du RFIC sur la réponse du modèle du tag simulé.

À cet effet nous avons créé quatre défauts sur le RFIC en changeant son impédance :

- ✚ Le 1<sup>er</sup> défaut consiste à diminuer les valeurs de  $R$  et  $C$ , ça signifie que la résistance et la capacité sont endommagées.
- ✚ Le 2<sup>ème</sup> défaut consiste à changer seulement  $C$ , ça signifie que seulement la capacité est endommagée.
- ✚ Le 3<sup>ème</sup> défaut consiste à changer seulement  $R$ , ça signifie que la résistance est endommagée.
- ✚ Le 4<sup>ème</sup> défaut consiste à diminuer la valeur de  $R$  et augmenter celle de  $C$ , et dans ce cas aussi la résistance et la capacité sont endommagées.

Le tableau 4.4 présente les valeurs de la résistance et de la capacité pour chaque défaut.

	Résistance en $\Omega$	Capacité en pF
À l'état neuf	150	1,58
Défaut 1	143,93	1,26
Défaut 2	150	0,7
Défaut 3	50	1,58
Défaut 4	100	2

Tableau 4.4. Caractéristiques des défauts créés sur le RFIC.

La figure 4.13 présente les tracés du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence des différents défauts créés sur le RFIC.

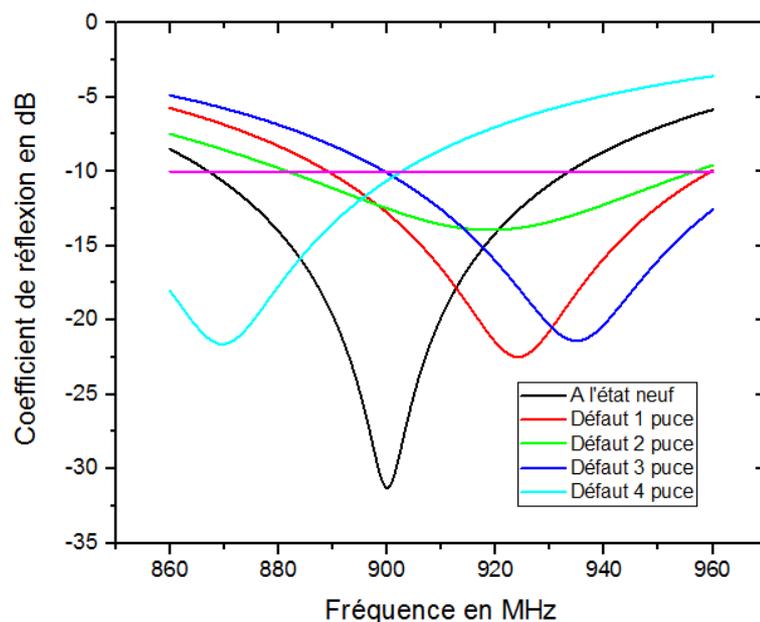


Figure 4.13. Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence.

Le coefficient de réflexion à la fréquence de simulation 910 Mhz a augmenté avec la dégradation du RFIC modélisée par le changement de l'impédance, ainsi une variation de la largeur de la bande est observée. L'augmentation du coefficient de réflexion signifie la diminution de la puissance rayonnée par le tag.

Le tableau 4.5 résume les résultats des quatre simulations en les comparant avec l'état neuf du modèle du tag RFID.

	Coefficient de réflexion en dB	Largeur de la bande en MHz	Bande interdite
L'état neuf	-19,8	66	34%
Défaut 1	-16,52	64	36%
Défaut 2	-13,55	74	26%
Défaut 3	-12,56	60	40%
Défaut 4	-8,53	0	100%

Tableau 4.5. Paramètres de performance du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation du RFIC.

La dégradation du RFIC, occasionnée par l'endommagement de la résistance et de la capacité, engendre une diminution de la puissance rayonnée par le tag.

### 2.2.2. Impédance d'entrée et puissance rayonnée dans le cas d'endommagement du RFIC

Le changement de l'impédance du RFIC du modèle du tag simulé peut engendrer une variation de l'impédance d'entrée de la part de l'antenne et un changement de la puissance totale rayonnée.

La figure 4.14 présente les tracés de l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence.

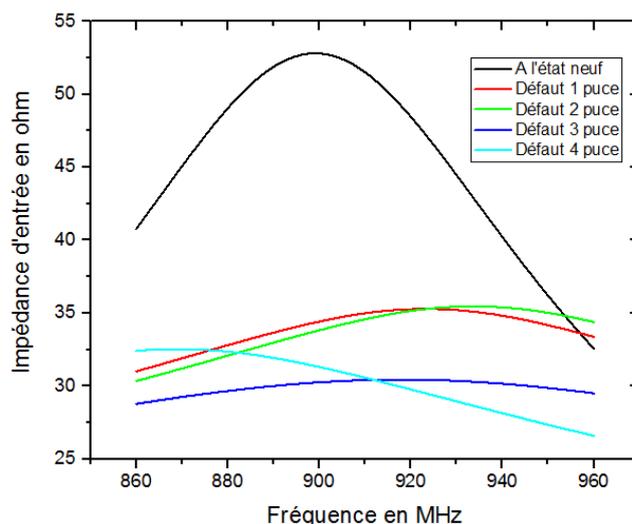


Figure 4.14. Impédance d'entrée en fonction de la fréquence.

L'impédance d'entrée a diminué avec les défauts créés, cela a modifié l'adaptation d'impédance entre l'antenne et le RFIC dégradée. Ce changement est visible sur la puissance rayonnée par notre modèle de tag RFID passif. On observe d'ailleurs une diminution de ce paramètre par rapport à l'état neuf.

Le tableau 4.6 résume les résultats pour les quatre simulations présentant les défauts et ceux à l'état neuf.

	R en $\Omega$	C en pF	L'impédance du RFIC en $\Omega$	Impédance d'entrée en $\Omega$	Puissance rayonnée en nW
L'état neuf	150	1,58	52,88-j71,66	51,51	31,6
Défaut 1	143,93	1,26	70-j71,94	34,98	30,3
Défaut 2	150	0,7	110-j66,19	34,58	28,9
Défaut 3	50	1,58	41,52-j18,75	30,40	17,8
Défaut 4	100	2	43,33-j49,55	30,57	13,2

Tableau 4.6. Impédance d'entrée et puissance rayonnée du modèle de tag RFID à l'état neuf et après dégradation du RFIC.

La variation de l'impédance du RFIC exerce une forte influence sur les performances du modèle de tag RFID passif. L'adaptation d'impédance a changé ce qui a modifié la réponse du tag RFID. Ce phénomène a été observé durant les tests de vieillissement thermique que nous avons accompli et présenté dans le chapitre 3.

Les résultats de la simulation sont cohérents avec ceux de l'expérimentation, la dégradation de l'antenne du tag RFID passif et le changement de l'adaptation de l'impédance modifient la réponse totale du tag et influence sur la puissance rayonnée.

Tag	Vieillessement	Mécanismes de défaillance	Microscope optique	MEB	Modélisation défaut antenne	Modélisation défaut RFIC
W3001	140 ( $\pm 5$ ) °C	Déformation de l'ACP. Désadaptation d'impédance.		Confirmé		Confirmé
T3017	140 ( $\pm 5$ ) °C	Déformation de l'ACP. Désadaptation d'impédance.		Confirmé		Confirmé
W3011	160 ( $\pm 5$ ) °C	Fissure sur l'antenne	Confirmé		Confirmé	
W3008	180 ( $\pm 5$ ) °C	Défaillances artificielles remarquables	Confirmé	Confirmé		
T3021	180 ( $\pm 5$ ) °C	Défaillances artificielles remarquables	confirmé	confirmé		

Tableau 4.7. Mécanismes de défaillance de quelques tags de type Web et Tagueos.

Sur le tableau 4.7, nous présentons des exemples de quelques tags de types Web et Tagueos, avec les mécanismes de défaillances observés. Ces défaillances sont confirmées par les analyses microscopiques et par la simulation physique.

### Conclusion

L'effet de la haute température sur les performances des tags RFID UHF passifs est étudié par l'analyse physique des défaillances par microscopie optique et MEB à différentes températures. Des différences claires dans les modes et les mécanismes de défaillance entre les Web et les Tagueos ont été observées. Deux mécanismes de défaillance différents ont été déterminés, des fissures dans les conducteurs métalliques de l'antenne ont été révélés sur une

partie des tags vieillis, pour une autre partie des tags, aucune défaillance de l'antenne n'a été observée, mais des déformations claires sur la matrice polymère de l'ACP ont été révélées, ce qui a modifié l'adaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne.

Les tags vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C ont présenté un mode de défaillance différent avec des défaillances artificielles sérieuses. Ce résultat se corrèle bien avec les résultats d'analyse statistique du chapitre 3 qui ont montré que le paramètre de forme des tags vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C est trois fois plus grand de celui des tags vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C et 160 ( $\pm 5$ ) °C. Le comportement particulier des tags RFID vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C, ainsi les modes de défaillance non reproduits dans les conditions de fonctionnement normales, ont révélé la limite technologique de haute température pour ces deux types de tags passifs.

Des simulations en utilisant le logiciel de modélisation multi-physique COMSOL a été mise en place dans le but de reproduire les mécanismes de défaillances révélés expérimentalement soit au niveau de l'antenne ou du RFIC. le fait d'étudier les deux composants (antenne et RFIC) séparément nous a permis de voir l'influence de chaque composant sur la réponse totale du tag. La dégradation de ces deux parties de tag a dévoilé que la variation de la valeur de l'impédance d'entrée de la part de l'antenne modifie l'adaptation d'impédance entre l'antenne et le RFIC, cela agit sur la réponse totale du tag vieilli.

La corrélation entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation confirment les hypothèses avancées dans l'analyse physique de défaillance. L'apparition des fissures sur l'antenne du tag RFID passif et l'endommagement des interconnexions de celui-ci modifient la réponse totale du tag et influence sur la puissance rayonnée.

## Références

- [1] P.Martin, "Electronic Failure Analysis Handbook", McGraw-Hill, New York, 1999.
- [2] WD. Brown "Advanced electronic packaging – with emphasis on multi chip modules." New York: IEEE Press, 1999.
- [3] K. Saarinen, L. Frisk, L. Ukkonen, "Effect of cycling humidity on the performance of RFID tags with ACA joints. " *IEEE Transaction Reliability*; 61:pp 23–31. 2012.
- [4] K. Saarinen, T. Björninen, L. Ukkonen, L. Frisk. "Reliability analysis of RFID tags in changing humid environment." *IEEE Trans Comp Pack*;4:pp 77–85. 2014
- [5] K. Saarinen, L. Frisk, "Reliability Analysis of UHF RFID Tags Under a Combination of Environmental Stresses. " *IEEE transactions on device and materials reliability*, vol. 13, no. 1, march 2013.
- [6] S. Lahokallio, K. Saarinen, L. Frisk. "Effects of different test profiles of temperature cycling tests on the reliability of RFID tags." *Microelectronic Reliability*; 55(1): pp 93–100. 2015.
- [7] K. Saarinen, S. Lahokallio, L. Frisk, "Effects of different anisotropically conductive adhesives on the reliability of UHF RFID tags." *International Journal of Adhesion & Adhesives* 64 pp 52–59. 2016
- [8] J. Lin, Y. Yuan, J. Zhou, J. Gao, " Methodology to Improve Design of Accelerated Life Tests in Civil Engineering Projects." *PLoS ONE* 9(8), 2014.
- [9] L. Ukkonen , L. Sydänheimo, "Performance characterization of passive UHF RFID tags, " in *The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications, Part 4*, pp 229–238, 2010.
- [10] Z. Lai and J. Liu, "Anisotropically conductive adhesive flip-chip bonding on rigid and flexible printed circuit substrates, " *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part B*, Vol. 19, No. 3, pp. 644-660, 1996.
- [11] YC. Lin, J. Zhong. "A review of the influencing factors on anisotropic conductive adhesives joining technology in electrical applications." *J Mater Sci*; pp 72–93, 2008.
- [12] L. Frisk, K. Kokko "The effects of chip and substrate thickness on the reliability of ACA bonded flip chip joints." *Solder Surf Mount Technol*;18: pp 28–37, 2006.

- [13] A. Seppälä, E. Ristolainen "Study of adhesive flip chip bonding process and failure mechanisms of ACA joint. " *Microelectron Reliab*; pp 39–48, 2004.
- [14] J. Kim "Thermal degradation of anisotropic conductive film joints under temperature fluctuation. " *Int J Adhes*, pp 14–20, 2008.
- [15] S. Taoufik, A. Oualkadi, F. Temcamani, B. Delacressonniere, P. Dherbécourt. " Reliability and Failure Analysis of UHF RFID Passive Tags under Thermal Storage ", *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Volume: 17 Issue: 3,31,2017.
- [16] J. Liu and Z. Lau, " Reliability of anisotropically conductive adhesive joints on a flip-chip/FR-4 substrate, " *J. Electron. Packag.*, vol. 124, no. 3, pp 240–245, 2002.
- [17] A.P. Malvino and J. Bates David , " 2. Principes d'électronique - 8e éd. - Cours et exercices corrigés Broché " 9 novembre 2016.

# Conclusion générale

Ces travaux de thèse présentés dans ce mémoire abordent l'étude de la fiabilité des tags RFID UHF passifs sous environnement thermique sévère. La technologie RFID passive connaît un développement prodigieux dans le domaine de l'identification, et exige pour répondre au développement de son marché une robustesse et résistance aux conditions d'environnement sévères. Les effets du stockage en haute température sur les performances des tags RFID UHF passifs sont étudiés sous trois hautes températures égales à 140 ( $\pm 5$ ) °C, 160 ( $\pm 5$ ) °C et 180 ( $\pm 5$ ) °C répondant à la norme JEDEC.

La méthodologie adoptée a contribué de façon significative et efficace à atteindre nos objectifs. Le choix des paramètres de tests (tags, températures, support...) ont été effectués après plusieurs essais. Les tags testés sont des tags passifs issus de deux fabricants différents et qui ont deux structures différentes permettant une comparaison significative. À l'aide du banc de mesure développé, la puissance réfléchie a été mesurée après chaque phase de vieillissement pour les deux type de tags Web et Tageos. Les performances diminuent considérablement après chaque phase de vieillissement avec différentes dynamiques de dégradation pour tous les tags vieillis. Cette dynamique de dégradation dépend de la température de test et du type de tag. Les analyses statistiques et physiques ont montré des différences claires dans les modes, les mécanismes et les temps de défaillance entre les tags Web et Tageos. Les tags Tageos sont plus résistants que les tags Web. Des fissures sur des antennes ont été observées sur une partie des tags vieillis. Alors, pour une autre partie des tags, des déformations claires sur la matrice polymère de l'ACP ont été révélées. Cette déformation a modifié l'adaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne. Les tags vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C ont présenté un mode de défaillance différent avec des défaillances artificielles remarquables. Ce résultat est confirmé par les résultats d'analyse statistique qui ont montré que le paramètre de forme des tags vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C est trois fois plus grand de celui des tags vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C et 160 ( $\pm 5$ ) °C. Les modes de défaillance apparaissaient à 180 ( $\pm 5$ ) °C sont non reproduits dans les conditions de fonctionnement normales.

Des simulations en utilisant le logiciel de modélisation multi-physique COMSOL ont été mises en place dans le but de reproduire les mécanismes de défaillances révélés expérimentalement soit au niveau de l'antenne ou du RFIC. La dégradation de ces deux parties de tag a dévoilé que le changement de l'impédance d'entrée de la part de l'antenne

modifie l'adaptation d'impédance entre l'antenne et le RFIC, cela modifie la réponse totale du tag vieilli. Cette modélisation a confirmé les hypothèses avancées dans l'analyse physique de défaillances.

Nous avons montré par ces travaux que le stockage thermique est une méthode efficace, faible coût et plus simple à mettre en place que les autres méthodes de vieillissement thermique tel que le cyclage thermique.

Ces travaux de thèse ont démontré l'importance d'étudier les effets du stockage en haute température sur la fiabilité des tags RFID passifs. Les défaillances sont apparues plus rapidement et les tests sont considérablement moins onéreux que sur les autres types de tests de vieillissement accélérés.

Des perspectives de recherche se présentent avec la mise en œuvre des mesures de la résistance des interconnexions dans un tag RFID passif, et de l'adaptation d'impédance entre le RFIC et l'antenne. En outre, les mesures du diagramme de rayonnement de l'antenne semblent être une approche intéressante pour analyser l'impact des fissures sur le comportement de l'antenne.

# **Annexes**

# Annexe 1 : Liste de publications

## Chapitre dans un livre :

- **Sanae Taoufik**, Ahmed El Oualkadi, Farid Temcamani, Bruno Delacressonniere, Pascal Dherbécourt, « Simulation and experimentation of an RFID system in the UHF band for the reliability of passive tags », Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 380. Springer 2016.

## Articles dans des revues :

- **Sanae Taoufik**, Pascal Dherbécourt, Ahmed El Oualkadi, Farid Temcamani, « Reliability and Failure Analysis of UHF RFID Passive Tags under Thermal Storage », IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Volume: 17 Issue: 3, 31 juillet 2017.
- **Sanae Taoufik**, Ahmed El Oualkadi, Pascal Dherbécourt, Farid Temcamani, « Effects of excessively accelerated life tests on the reliability of RFID passive tags », Microelectronics Reliability. (soumis en 25 avril 2017).

## Communications dans des conférences internationales :

- **Sanae Taoufik**, Ahmed El Oualkadi, Pascal Dherbécourt, Farid Temcamani, Bruno Delacressonniere, « Reliability and Failure Analysis of UHF-RFID Tags for Harsh Environments Applications », The 4th Advanced Electromagnetics Symposium, AES 2016, 26 – 28 juillet, 2016, Malaga, Espagne.
- Ahmed El Oualkadi, **Sanae Taoufik**, Pascal Dherbécourt, Farid Temcamani, « Fiabilité et Analyse Physique des Défaillances des Tags RFID UHF », Actes du salon des industriels "Microwave & RF", 24 mars 2016, Paris, France.
- **Sanae Taoufik**, Ahmed El Oualkadi, Pascal Dherbécourt, Bruno Delacressonniere, Farid Temcamani, « Performances et fiabilité d'un système d'identification RFID en bande UHF », TELECOM 2015 & 9ème JFMMA, 13-15 Mai 2015, Meknès, Maroc.
- **Sanae Taoufik**, Ahmed El Oualkadi, Farid Temcamani, Bruno Delacressonniere, Pascal Dherbécourt, « Simulation and experimentation of an RFID system in the UHF band for the reliability of passive tags », Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies'2015, May 7-9, 2015, Saïdia, Morocco.

### **Communications dans des conférences nationales :**

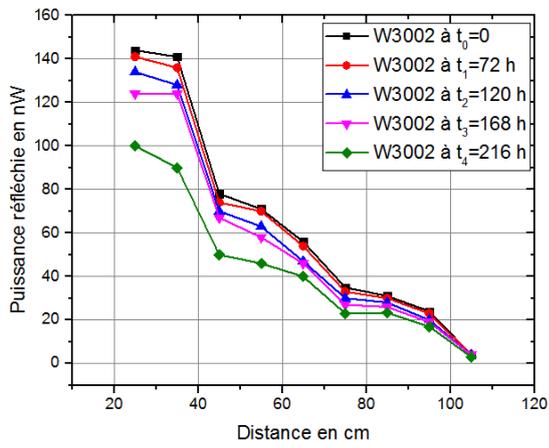
- Pascal Dherbécourt, **Sanae Taoufik**, Ahmed El Oualkadi, Farid Temcamani, Bruno Delacressonniere, « Vieillissements de tags uhf-rfid cou-plés à l’analyse physique des défaillances », Congrès National de la Recherche des IUT Institut Universitaire de Technologie, 8 – 9 juin, 2016, Nantes, France.
- **Sanae Taoufik**, Pascal Dherbécourt, Ahmed El Oualkadi, «Étude de la fiabilité des tags RFID pour la communication sans contact depuis des environnements extrêmes », journée des doctorants, Université de Rouen, 11 Juin 2015, Rouen, France.

## Annexe 2 : Puissance réfléchie par les tags Web et Tagueos en fonction de la distance

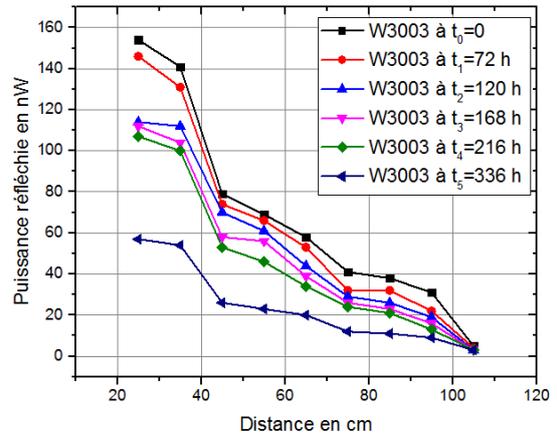
Tags	Température de vieillissement	Durée de vieillissement en heures
W3001	140 °C	336
W3002	140 °C	216
W3003	140 °C	336
W3004	140 °C	336
W3005	140 °C	336
W3011	160 °C	192
W3012	160 °C	192
W3013	160 °C	96
W3014	160 °C	144
W3015	160 °C	48 (défaillance catastrophique)
W3006	180 °C	24
W3007	180 °C	96
W3008	180 °C	96
W3009	180 °C	72
W3010	180 °C	96

Tableau récapitulatif des tags Web vieillis sous trois hautes températures 140 °C, 160 °C et 180 °C et la durée totale du vieillissement.

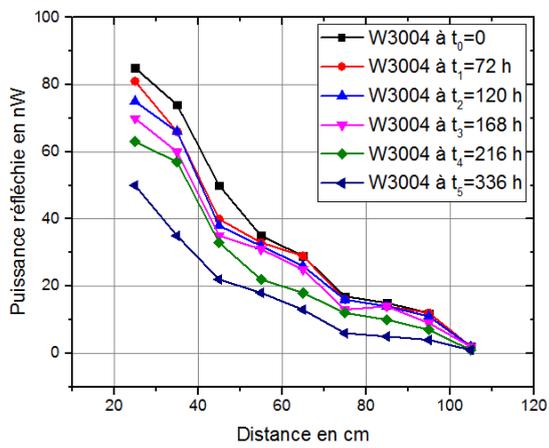
**Tags Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C :**



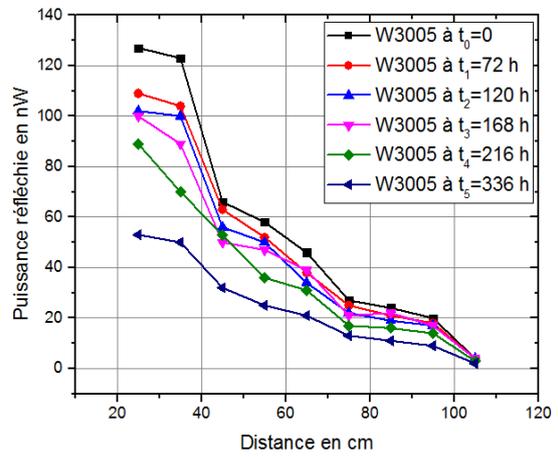
(a)



(b)



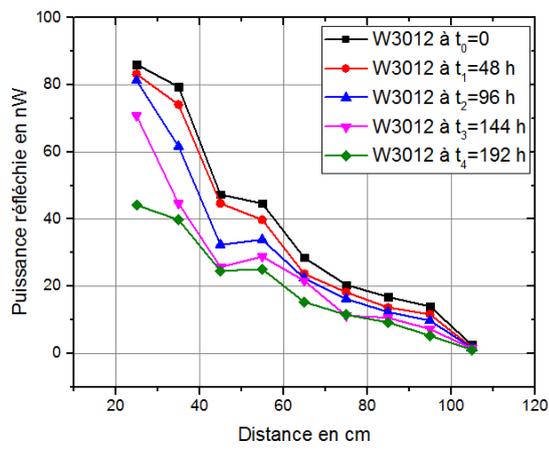
(c)



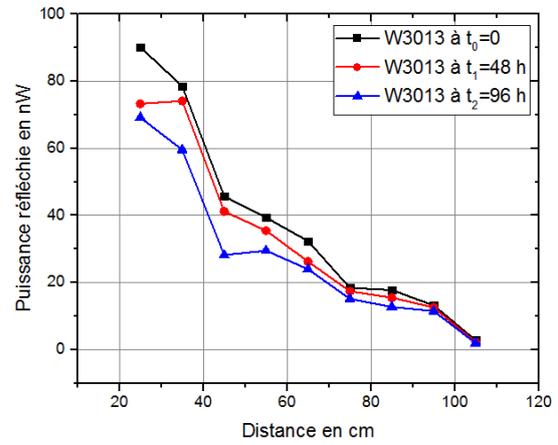
(d)

Figure A.2.1. Mesures de la puissance réfléchie par les tags de type Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3002 (b) W3003 (c) W3004 (d) W3005.

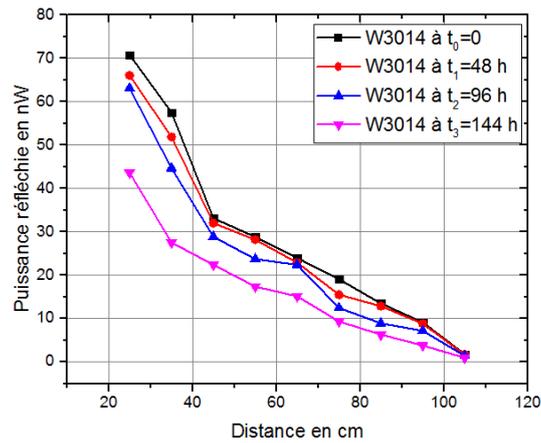
**Tags Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C :**



(a)



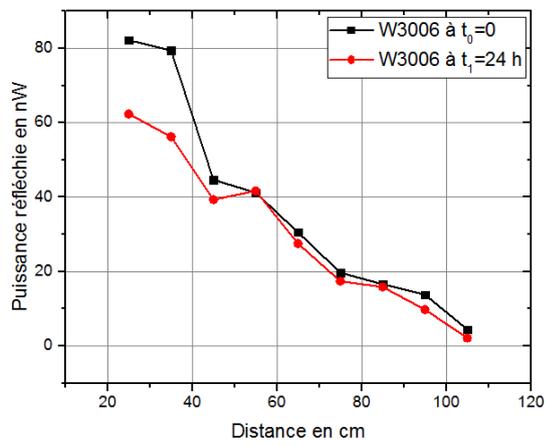
(b)



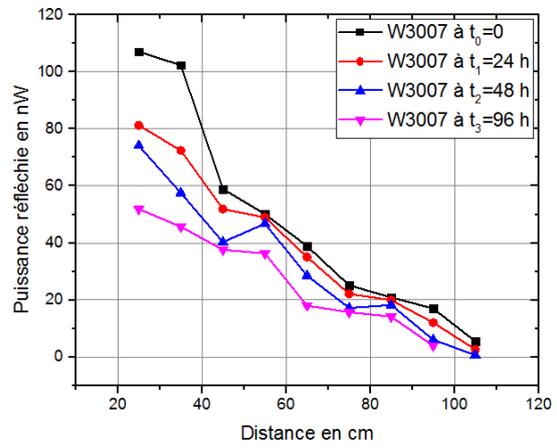
(c)

Figure A.2.2. Mesures de la puissance réfléchie par les tags de type Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3012 (b) W3013 (c) W3014.

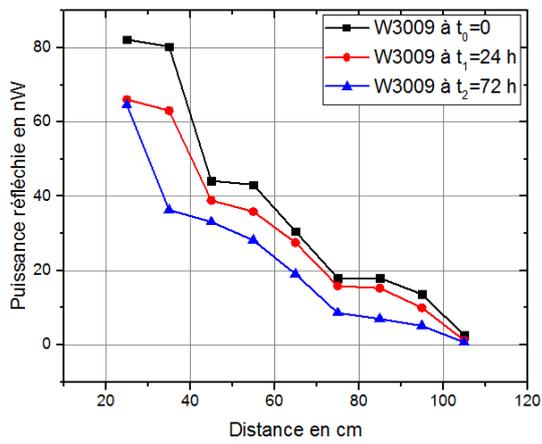
**Tags Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C :**



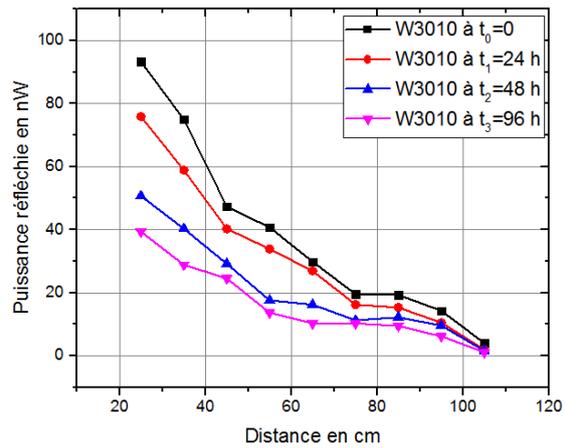
(a)



(b)



(c)



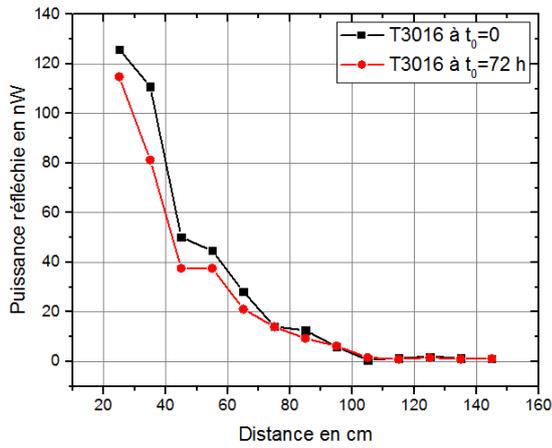
(d)

Figure A.2.3. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C : (a) W3006 (b) W3007 (c) W3009 (d) W3010.

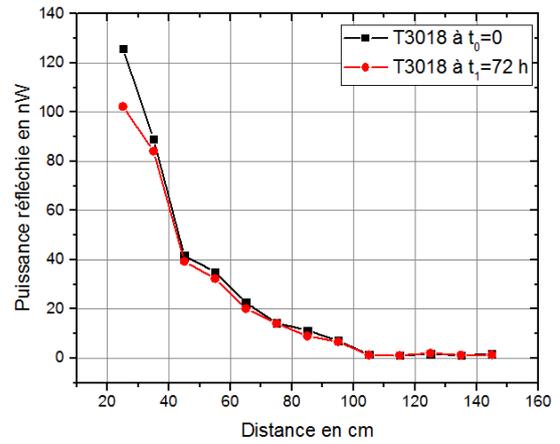
Tags	Température de vieillissement	Durée de vieillissement en heures
T3016	140 °C	72
T3017	140 °C	168
T3018	140 °C	72
T3019	140 °C	72 (Défaillance catastrophique)
T3020	140 °C	72
T3026	160 °C	48 (Défaillance catastrophique)
T3027	160 °C	168
T3028	160 °C	48
T3029	160 °C	168
T3030	160 °C	48 (Défaillance catastrophique)
T3021	180 °C	48
T3022	180 °C	24
T3023	180 °C	72
T3024	180 °C	24
T3025	180 °C	24

Tableau récapitulatif des tags Tageos vieillis sous trois hautes températures 140 °C, 160 °C et 180 °C et la durée totale du vieillissement.

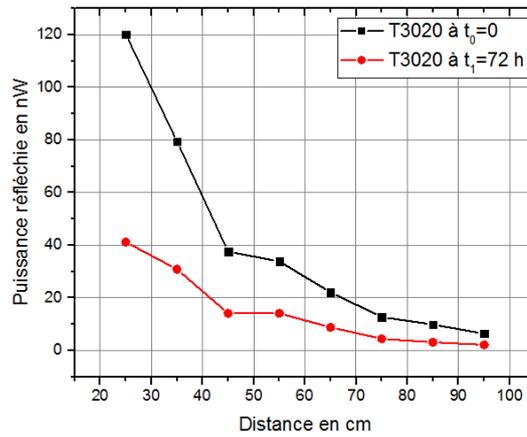
**Tags Tageos vieillis à 140 (±5) °C :**



(a)



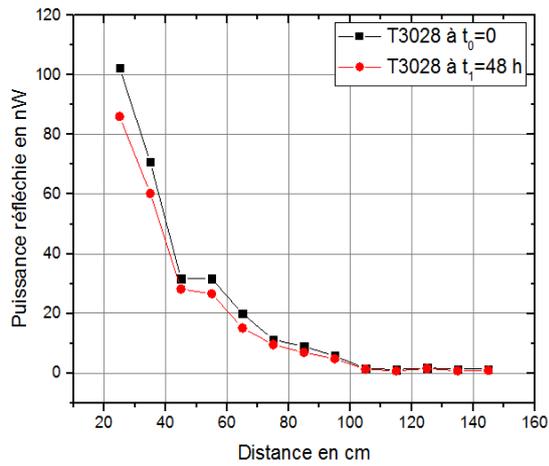
(b)



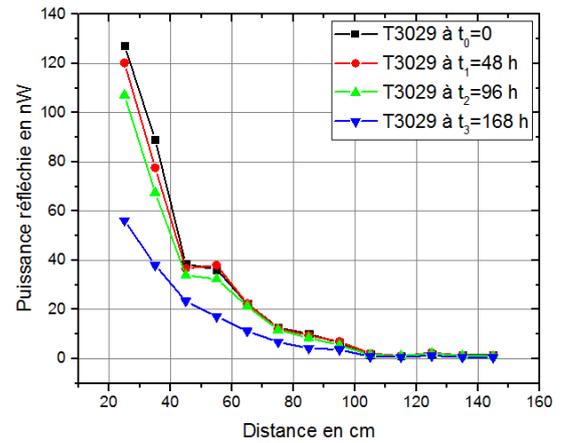
(c)

Figure A.2.4. Mesures de la puissance réfléchiée par les tags de type Tageos vieillis à 140 (±5) °C : (a) T3016 (b) T3018 (c) T3020.

**Tags Tageos vieilliss à 160 ( $\pm 5$ ) °C :**



(a)



(b)

Figure A.2.5. Mesures de la puissance réfléchie par les tags de type Tageos vieilliss à 160 ( $\pm 5$ ) °C : (a) T3028 (b) T3029.

**Tags Tagueos vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  :**

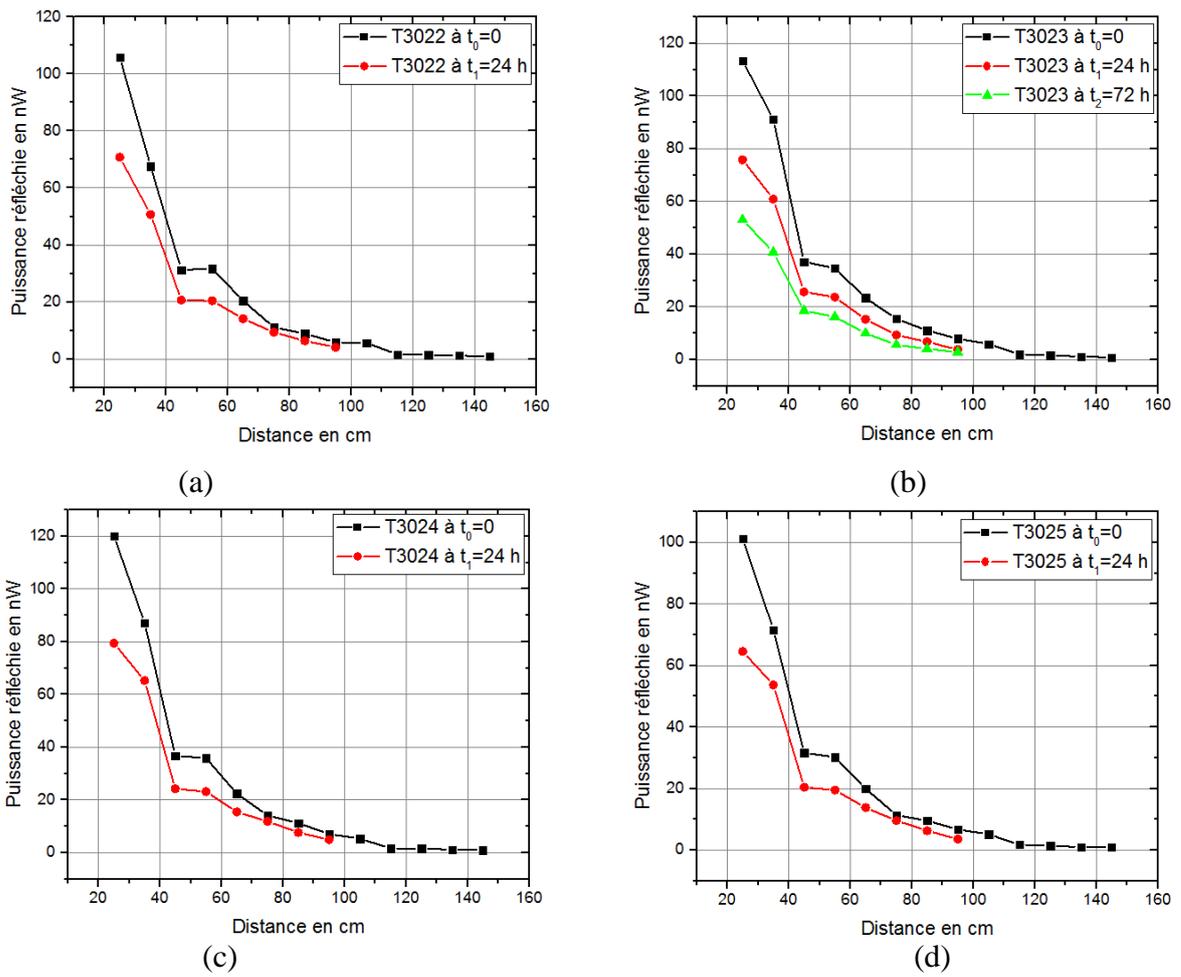
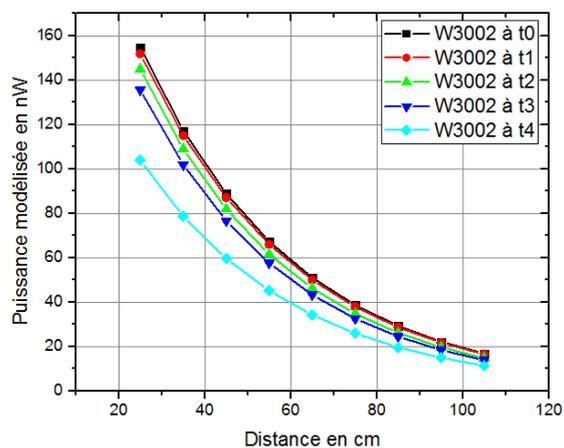


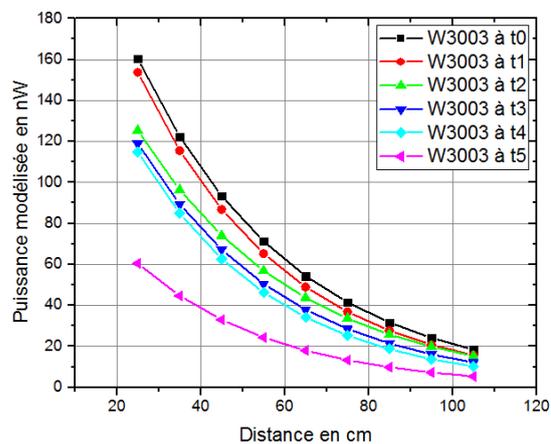
Figure A.2.6. Mesures de la puissance réfléchie par les tags de type Tagueos vieillis à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  : (a) T3022 (b) T3023 (c) T3024 (d) T3025.

# Annexe 3 : Puissance modélisée des tags Web et Tagueos en fonction de la distance

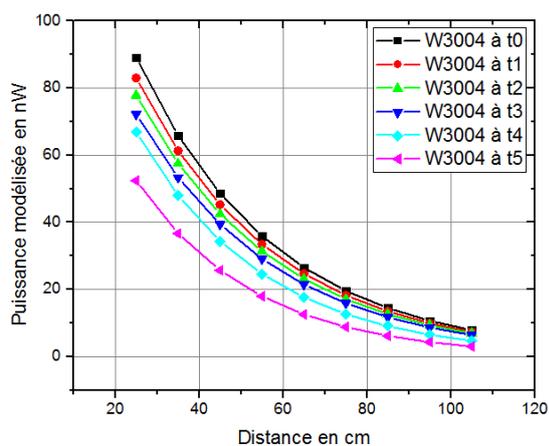
Tags Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C :



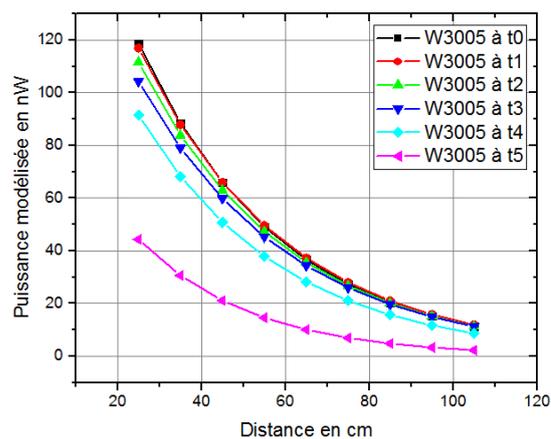
(a)



(b)



(c)

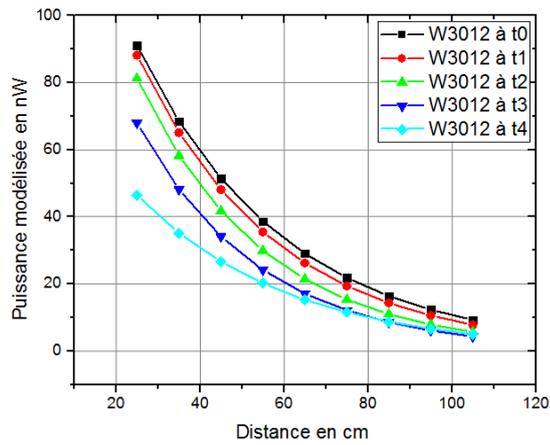


(d)

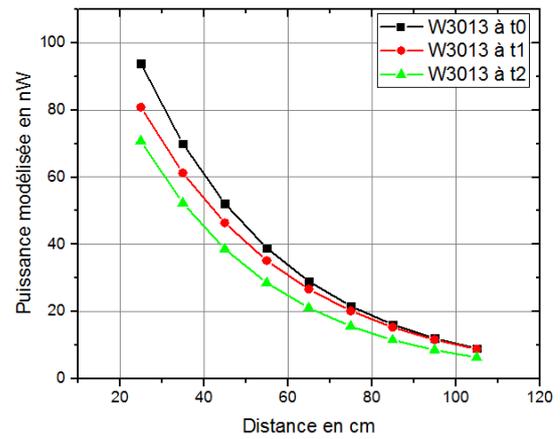
Figure A.3.1. Puissance modélisée des tags de type Web vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C :

(a) W3002 (b) W3003 (c) W3004 (d) W3005.

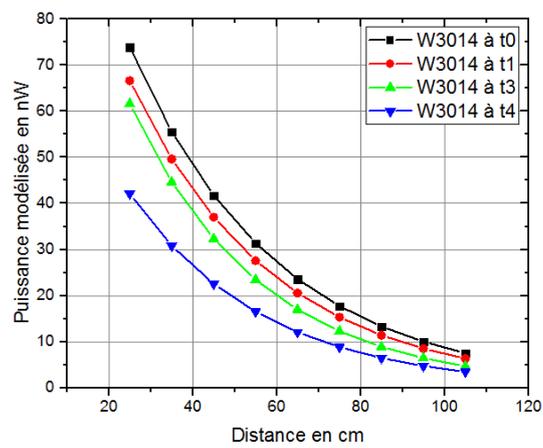
### Tags Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C :



(a)



(b)

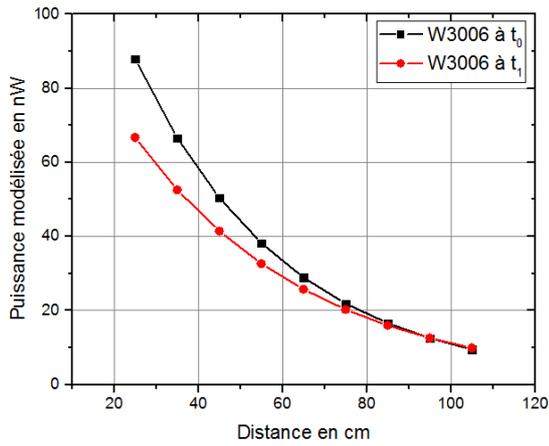


(c)

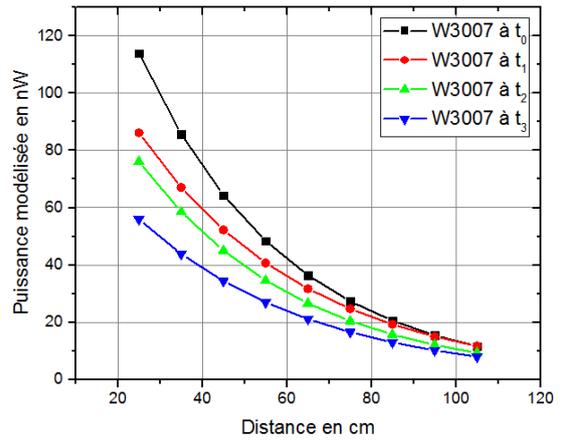
Figure A.3.2. Puissance modélisée des tags de type Web vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C :

(a) W3012 (b) W3013 (c) W3014.

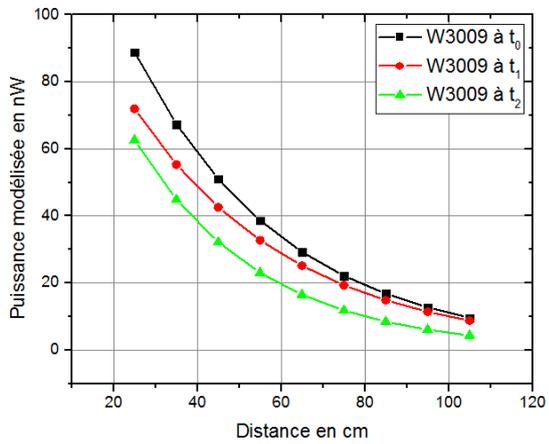
**Tags Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C :**



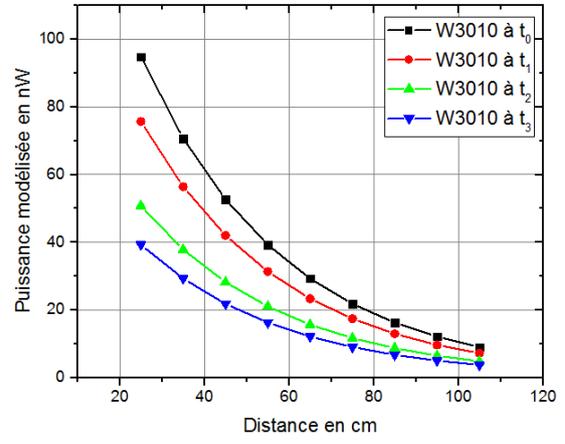
(a)



(b)



(c)

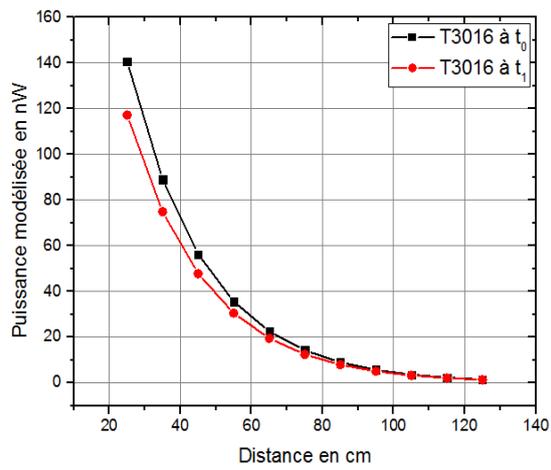


(d)

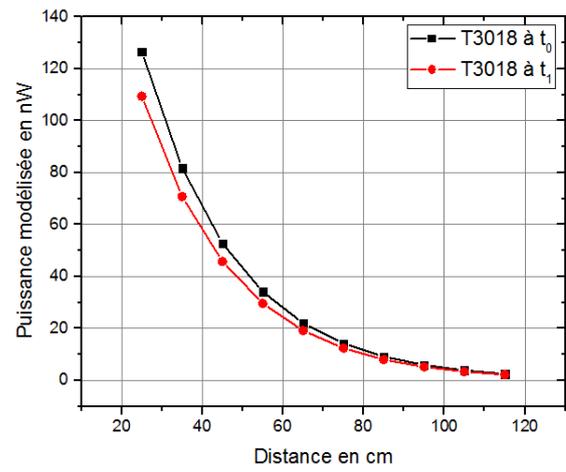
Figure A.3.3. Puissance modélisée des tags de type Web vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C :

(a) W3006 (b) W3007 (c) W3009 (d) W3010.

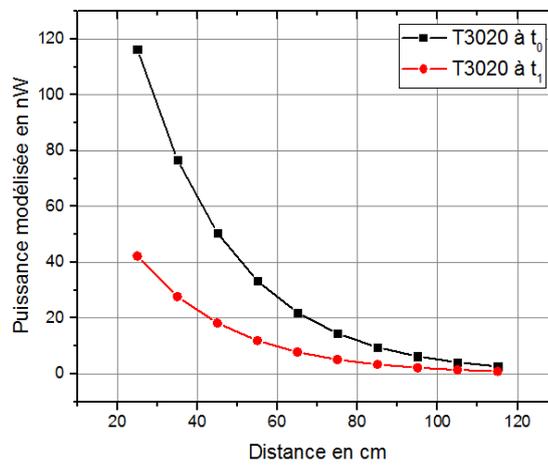
**Tags Tagueos vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C :**



(a)



(b)

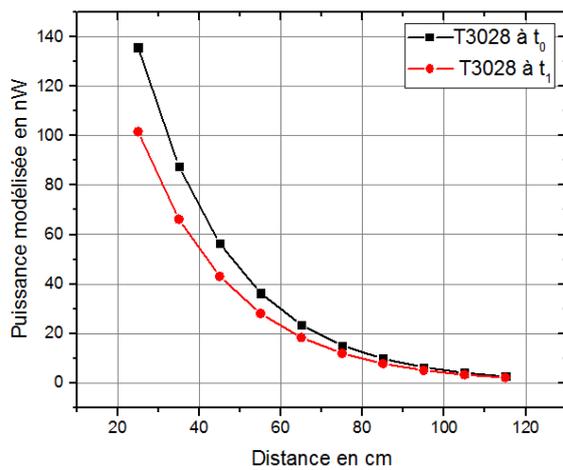


(c)

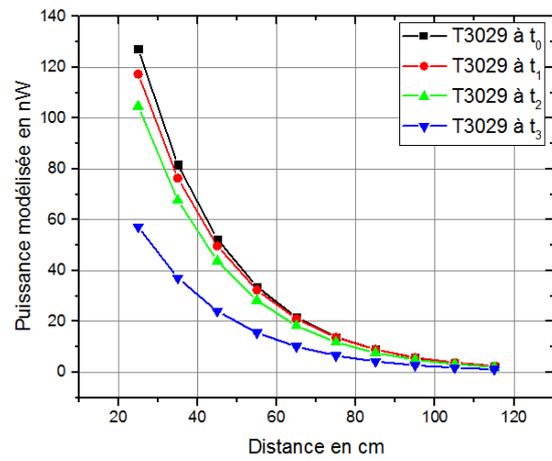
Figure A.3.4. Puissance modélisée des tags de type Tagueos vieillis à 140 ( $\pm 5$ ) °C :

(a) W3016 (b) W3018 (c) W3020.

**Tags Tageos vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C :**



(a)

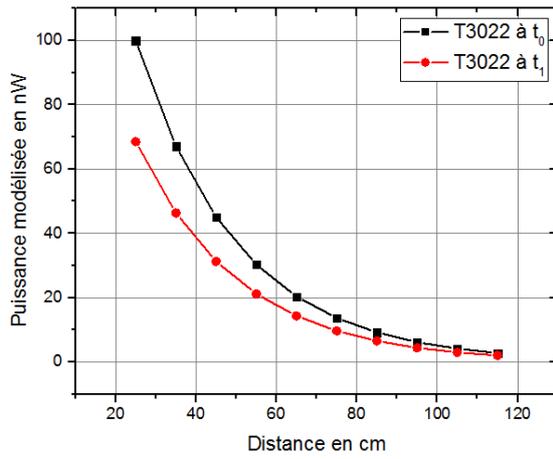


(b)

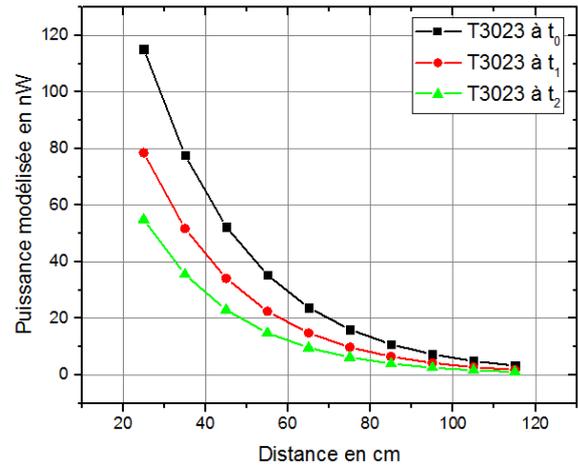
Figure A.3.5. Puissance modélisée des tags de type Tageos vieillis à 160 ( $\pm 5$ ) °C :

(a) W3028 (b) W3029.

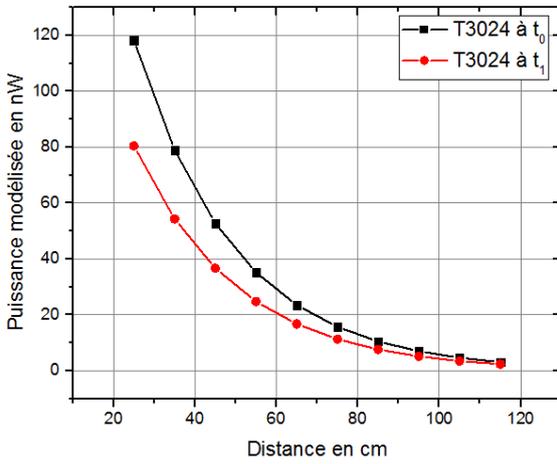
**Tags Tageos vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C :**



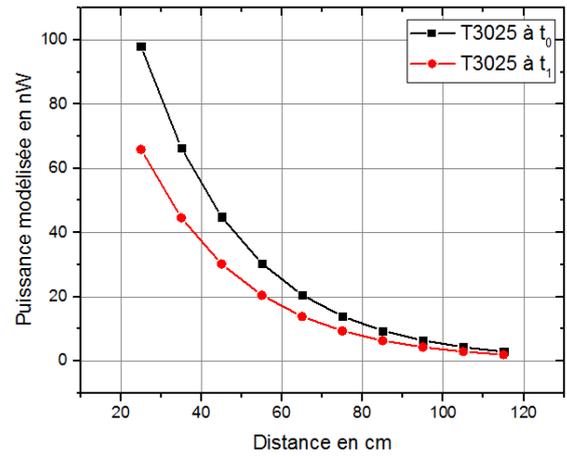
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure A.3.6. Puissance modélisée des tags de type Tageos vieillis à 180 ( $\pm 5$ ) °C :

(a) W3022 (b) W3023 (c) W3024 (d) W3025.

## Annexe 4 : Vues optiques et au MEB

### Vues optiques :

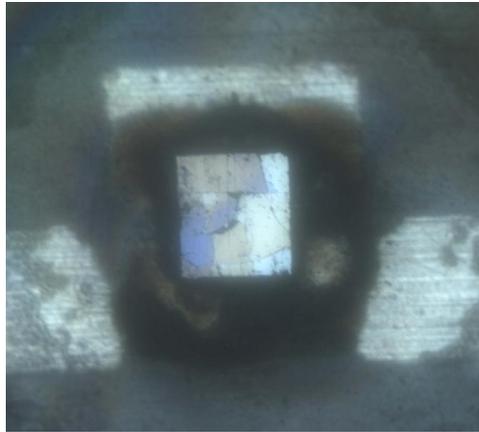


Figure A.4.1. Vue optique d'un tag Web vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C pendant 168 heures.



Figure A.4.2. Vue optique du RFIC d'un tag Web vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C.



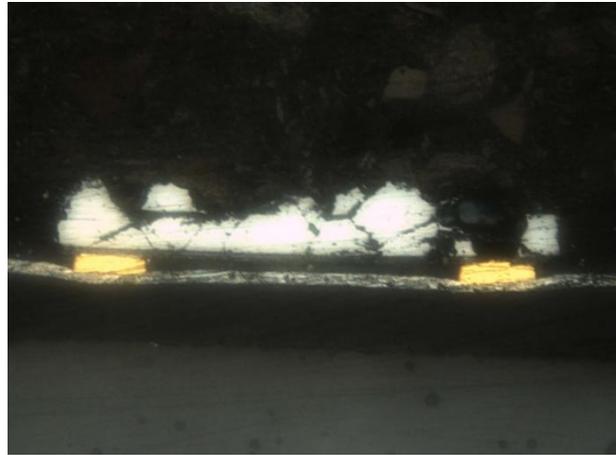
Figure A.4.3. Vue optique d'un tag Web vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C pendant 48 heures.



(a)



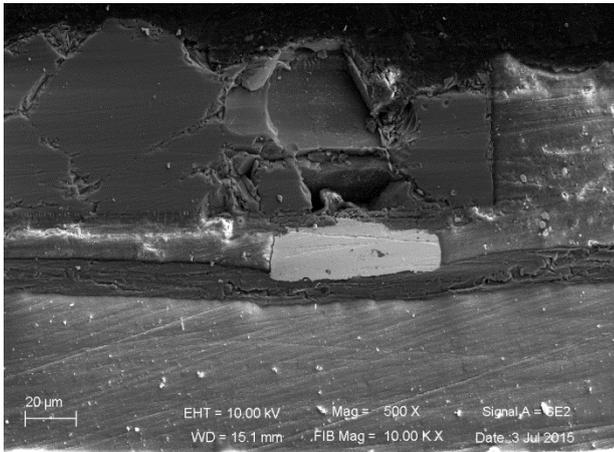
(b)



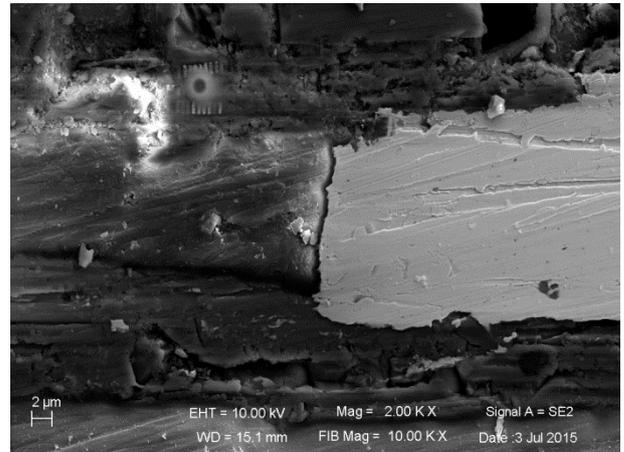
(c)

Figure A.4.4. Vues optiques d'un tag Web vieilli à  $180 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  pendant 72 heures : (a) puce cassée (b) fissure sur l'antenne (c) coupe transversale.

**Vues au MEB :**



(a)



(b)

Figure A.4.5. Vues au MEB d'un tag Web vieilli à 180 ( $\pm 5$ ) °C avec des défaillances artificielles sérieuses (a) puce cassé (b) contacts déformés.

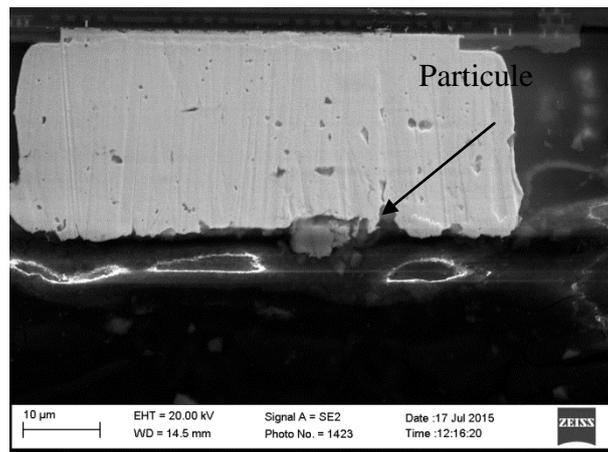


Figure A.4.6. Vue au MEB d'un tag Tageos vieilli à 160 ( $\pm 5$ ) °C.

# Annexe 5 : Définitions

## Le standard JEDEC

L'organisation JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council), fondée en 1958, fédère plus que 300 compagnies membres, elle propose des documents standards suivant des domaines et catégories de l'électronique et de ses systèmes.

Les standards JEDEC ont pour objectif de déterminer et décrire des méthodes et tests de qualification des systèmes et des composants électroniques à tester pour définir des tests de référence. Cette approche permet de comparer aisément les résultats des tests de qualifications menés.

Citons quelques exemples de standards de tests JEDEC :

- JESD22-A103D : High Temperature Storage Life ;
- JESD22-A108C : High Temperature Reverse Bias ;
- JESD22-A101C : Steady State Temperature Humidity Bias Life Test ;
- JESD22-A110D : Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test ;
- JESD22-A101-B : High-humidity, high-temperature reverse bias ;
- JESD22-A104D : Temperature Cycling ;
- JESD22-A122 : Power Cycling ;
- JESD22-A105C : Power and Temperature Cycling ;
- JESD22-A108D : Temperature, Bias, and Operating Life ;
- JEDEC JS-001-2010 : For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing Human Body Model (HBM) - Component Level ;
- JESD91A : Method for Developing Acceleration Models for Electronic Component Failure Mechanisms.

Tous ces tests de qualification ont pour vocation de démontrer la fiabilité et la robustesse des composants ou circuits intégrés après fabrication et d'en garantir un temps de fonctionnement.

## Le logiciel ALTA

Le logiciel ALTA de ReliaSoft permet d'exploiter des modèles mathématiques extrêmement complexes et puissants pour réaliser des analyses quantitatives de données issues d'essais de vie accélérés par le biais d'une interface intuitive et conviviale.

Les techniques d'essais de survie accélérés combinés aux puissantes méthodes d'analyse des données QALT fournissent aux ingénieurs en fiabilité et conception le pouvoir de grandement réduire les temps d'essai, ce qui peut également raccourcir le délai de commercialisation, et diminuer les coûts de développement du produit, ainsi que les coûts de garantie.

Alta offre un ensemble complet d'outils dédiés à l'analyse de données provenant d'essais accélérés, incluant des représentations graphiques et des comptes rendus, ainsi qu'un support pour tous les modèles courants de relation stress/durée de vie.

Pour obtenir la loi de fiabilité dans les conditions nominales, il est nécessaire d'utiliser un modèle de vie accélérée.

La première étape dans l'analyse de données de vie accélérés par ALTA consiste à choisir la distribution de vie la plus appropriée. Le logiciel utilise les 3 distributions classiques Weibull, Exponentiel et Log normal détaillées dans la partie précédente. La deuxième étape consiste à choisir la relation " Durée de vie-Stress ". Alta prend en charge les 8 modèles d'accélération les plus utilisés pour des stress à profil constants y compris le modèle Arrhenius.

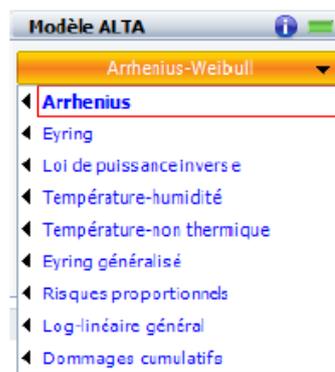


Figure A.5.1. Modèles d'accélération utilisés par ALTA.