

Année 2005

N° d'ordre : 2197

THÈSE

Présentée à l' ENSEEIHT

Pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

École doctorale : GÉNIE ÉLECTRIQUE, ÉLECTRONIQUE, TÉLÉCOMMUNICATION (GEET)

Spécialité : Électronique

Par : **M. Patrick PLAINCHAULT**

Ingénieur de l'ESEO

SÉCURISATION DE LA CONDUITE PAR COMMUNICATION VÉHICULE INFRASTRUCTURE A BASE DE TRANSPONDEURS

Soutenue le 10 février 2005 ; devant le jury composé de :

M.	Bernard DUBUISSON	Président
MM	Thierry BOSCH	Directeur de thèse
	Claude LAURGEAU	Rapporteur
	Serge TOUTAIN	Rapporteur
	Jacques EHRlich	Membre
	Dominique PARET	Membre

Avant propos

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Centre d'Études et de Recherche de l'ESEO. C'est pourquoi, je tiens à remercier Messieurs Victor Hamon et Jacky Charruault, directeurs successifs de l'ESEO, pour m'avoir permis de développer cette thèse en parallèle de mon activité professionnelle.

Je remercie également Monsieur Bernard Dubuisson, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je suis extrêmement reconnaissant envers Messieurs Claude Laurgeau et Serge Toutain pour avoir accepté la charge d'être rapporteur des travaux présentés.

Ces travaux ont été menés en collaboration avec le LIVIC représenté par Jacques Ehrlich que je remercie vivement, il saura transmettre ces remerciements à son équipe ainsi qu'à Jean Marc Blosseville, directeur du LIVIC.

Je tiens également à remercier Dominique Paret pour m'avoir fait découvrir et partager sa vision pour cette technologie de l'IDentification Radio Fréquence.

Que ces deux personnes, membre du jury, soient également remerciées pour leur écoute.

Ces travaux ont été dirigés par Monsieur Thierry Bosch. Son soutien, ses conseils et avis ont été constants durant ces années. C'est pourquoi je lui exprime toute ma gratitude.

Je tenais également à remercier Monsieur Le Président de l'I.N.P. Toulouse pour m'avoir permis, malgré mon parcours atypique, de me réinscrire afin de pouvoir soutenir ces travaux de recherche.

Un grand merci à Jean BERTRAND et à toute son équipe pour m'avoir permis de disposer et d'utiliser ses véhicules de test et plus particulièrement à Patrice Briand, le chauffeur avec lequel nous avons parcouru de nombreux kilomètres sur la route de Mozé et sur les pistes de Nantes.

A ces remerciements sont également associés mes collègues, Daniel, Damien, Samuel avec lesquels toute l'électronique a été réalisée.

A ma famille et mes amis proches. Je me réserve le privilège de les remercier de vive-voix.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	13
	Le contexte du travail	14
	Organisation du document	16
2	PROBLÉMATIQUE LIÉE À LA SÉCURISATION ROUTIÈRE	17
	Problématique	18
	2.1.1 Expression des besoins	20
	Les objectifs de la thèse	21
	Les techniques de localisation du véhicule	22
	2.1.2 Détecteur Infra Rouge	22
	2.1.3 Détecteurs piézo-électriques	25
	2.1.4 Caméra	26
	2.1.5 Filoguidage	26
	2.1.6 Boucles magnétiques	27
	2.1.7 Aimant ou Magnet	28
	2.1.8 Centrales inertielles	30
	2.1.9 Le GNSS	31
	2.1.10 Le Radar	33
	2.1.11 Le Lidar ou LADAR	33
	2.1.12 Autres techniques	35
	Les techniques de communication	36
	2.1.13 Les communications radio	36
	2.1.13.1 Les systèmes de radiodiffusion	36
	2.1.13.1.1 RDS	36
	2.1.13.1.2 DAB	37
	2.1.13.1.3 DVB	37
	2.1.13.2 Les systèmes cellulaires d'origine européenne	37
	2.1.13.2.1 GSM	37
	2.1.13.2.2 GPRS	38
	2.1.13.2.3 UMTS	38
	2.1.13.3 Les autres systèmes cellulaires	38
	2.1.13.3.1 DSRC	38
	2.1.13.4 Les réseaux privés sans fil	40
	2.1.13.4.1 Bluetooth : IEEE 802.15	40
	2.1.13.4.2 WIFI : 802.11	41
	2.1.14 Les communications optiques	41
	2.1.14.1 Code à barres	41
	2.1.14.2 Infra Rouge	42
	État de l'art concernant l'utilisation des transpondeurs	45
	2.1.15 Principe	45
	2.1.16 Classification des transpondeurs	46
	2.1.16.1 Utilisation du transpondeur en fonction des fréquences	46
	2.1.16.1.1 Applications 125 kHz	46
	2.1.16.1.2 Applications 13.56 MHz	48
	2.1.16.1.3 Applications 443, 886 et 9xxMHz	49
	2.1.16.1.4 Applications hyperfréquences 2.45 GHz ou 5.8 GHz	49
	2.1.16.2 Exemples de transpondeurs	49
	2.1.16.2.1 Transport	49
	2.1.16.2.2 Identification animale	53
	2.1.16.2.3 Les immobiliseurs	54
	2.1.16.2.4 La marine marchande	55
	2.1.16.2.5 Exploitation agricole	55
	2.1.16.3 Synthèse	56
	Bilan de la bibliographie	57
	2.1.17 La précision	57
	2.1.18 Bases de données	58
	2.1.19 Conditions climatiques	58
	2.1.20 Encombrement	59

TABLE DES MATIERES

2.1.21 Type de communication	59
3 TRANSPONDEURS : THÉORIE ET DÉVELOPPEMENT	61
Principes physiques du transpondeur	62
3.1.1 Champ magnétique.	62
3.1.1.1 La loi de Biot et Savart	62
3.1.1.2 Champ magnétique émis par une spire circulaire	63
3.1.1.3 Diamètre optimal de la bobine	65
3.1.1.4 Antenne circulaire ou rectangulaire ?	66
3.1.1.5 Effet de peau	67
3.1.2 Le couplage électromagnétique	68
3.1.2.1 Mutuelle induction M	69
3.1.2.2 Coefficient de couplage k	70
3.1.2.3 Tension induite dans le transpondeur	71
3.1.2.4 Champ magnétique de seuil minimal dans le cas du transpondeur accordé	75
3.1.3 Propagation en champ lointain	76
3.1.3.1 Puissance rayonnée maximale admissible	77
3.1.3.2 Résistance équivalente de rayonnement	78
Architecture du transpondeur	80
3.1.4 Fréquences possibles et permises	80
3.1.5 Évaluation de l'effet Doppler	81
3.1.6 L'échange des données	83
3.1.6.1 Du transfert d'énergie à la modulation.	84
3.1.6.2 Modulation, Démodulation et Spectre de fréquences	85
3.1.6.2.1 Modulation d'Amplitude	85
3.1.6.2.2 Modulation de fréquence	87
3.1.6.3 Codage Bit	87
3.1.6.3.1 Code Manchester	88
3.1.6.3.2 Autres codes	89
3.1.6.4 Modulation de charge dans le transpondeur	91
3.1.7 Antenne	93
3.1.8 Processeur	94
3.1.9 La mémoire interne	95
3.1.10 Gestion des collisions	96
3.1.11 Sécurisation de la transmission	97
3.1.12 Cryptage de l'information	98
3.1.12.1 Législation	98
3.1.12.2 Le chiffrement DES (Data Encryption Standard)	98
3.1.12.2.1 Résistance aux attaques	99
3.1.12.3 Conclusion	100
3.1.13 Correction d'erreur	100
3.1.13.1 Conclusion	101
Coté lecteur	104
Conclusion	105
4 ÉTUDE DE CAS ET VALIDATIONS EXPÉRIMENTALES	107
Essais préliminaires	108
4.1.1 Description du matériel utilisé	109
Positionnement de l'étude de cas	110
Quels seront les attributs de la chaussée?	111
4.1.2 Construction d'une route	111
4.1.2.1 Les types de routes	111
4.1.2.2 Le cercle	112
4.1.2.3 La clothoïde	114
4.1.2.4 Le profil en long	115
4.1.2.5 Le profil en travers	115
4.1.3 Classifications des attributs	116
L'application de guidage	117
4.1.4 Définition de la précision du positionnement longitudinal	119
4.1.5 Définition de la précision du positionnement latéral	121
Le réseau de transpondeurs	121

TABLE DES MATIERES

Étude du transpondeur	125
4.1.6 Schéma bloc du transpondeur adapté au cas d'étude	125
4.1.7 Dimensionnement des antennes du transpondeur	126
4.1.7.1 Caractéristiques mécaniques	126
4.1.7.2 Caractéristiques électriques	126
4.1.8 La mémoire du transpondeur	128
4.1.8.1 La mémoire morte	129
4.1.8.2 La mémoire vive	129
4.1.9 Le processeur	129
4.1.9.1 Reset	129
4.1.9.2 Alimentation	130
4.1.9.3 Le démodulateur	130
4.1.9.4 Le modulateur de charge	131
4.1.10 Caractéristiques principales du transpondeur	131
Étude du lecteur	133
4.1.11 Caractéristiques de l'antenne du lecteur	133
4.1.11.1 Caractéristiques mécaniques de l'antenne	133
4.1.12 Réalisation de l'antenne du lecteur	134
4.1.13 Champ rayonné par l'antenne du lecteur	136
4.1.13.1 Méthode de mesures	136
4.1.13.2 Mesures du champ rayonné.	137
4.1.13.3 Mesures du champ rayonné en présence d'enrobé sec	138
4.1.14 Tension induite dans le transpondeur	139
4.1.14.1 En statique	139
4.1.14.2 En dynamique	139
4.1.15 Caractéristiques principales du lecteur embarqué dans le véhicule.	143
4.1.16 Protocole de commande	144
Tests de validation	145
4.1.17 Test en mode écho	145
4.1.18 Utilisation de la commande \$15 : Dialogue Lecteur/Transpondeur	146
4.1.18.1 Protocole de test :	147
4.1.18.2 Méthode de contrôle	148
4.1.18.3 Résultats	148
Les applications envisageables	149
4.1.19 La sécurisation du suivi de trajectoire	150
4.1.20 L'estimation de l'interdistance entre véhicules	151
4.1.21 Détermination de la vitesse du véhicule	151
4.1.22 La communication véhicule-véhicule	152
4.1.23 L'activation automatique des indicateurs de direction	152
4.1.24 L'allumage ou l'extinction des codes	152
4.1.25 La détection de la circulation en contre sens	153
4.1.26 La limitation automatique de vitesse ou le gendarme couché	153
4.1.27 Flux de circulation	154
4.1.28 Le contrôle d'accès	154
4.1.29 Les conditions de déploiement	154
5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	157
Synthèse de la présente contribution	158
Perspectives	162
5.1.1 Le projet CHAKRA :	162
5.1.2 le projet INFRASURE	163
5.1.3 Valorisation industrielle	163
6 RÉFÉRENCES	165
7 ANNEXES	175
Annexe 1 : Définitions autour des trajectoires	176
Annexe 2 : Lexique	177
Annexe 3 : Les principales symbologies des codes à barres	180
Annexe 4 : Atténuation due aux gaz de l'atmosphère et à la pluie.	184
Annexe 5 : Génération d'un CRC.	185

TABLE DES MATIERES

Annexe 6 : Cryptage de l'information	186
7.1.1.1 Chiffrement symétrique à clef privée :	186
7.1.1.2 Chiffrement asymétrique	186
7.1.1.3 Chiffrement mixte avec une clef publique et une autre privée :	186
7.1.1.4 Le chiffrement DES (Data Encryption Standard)	186
7.1.1.4.1 Résistance aux attaques	186
7.1.1.5 Le triple DES (3DES)	187
7.1.1.6 Le choix de la clé	188
Annexe 7 : Algorithme de cryptage DES	189
7.1.2 Les P-Box :	189
7.1.3 Les S-Box :	189
7.1.4 L'expansion :	190
7.1.5 Algorithme du DES :	190
7.1.6 Détail de la fonction de confusion :	191
7.1.7 Les différentes tables	192
7.1.8 Algorithme de génération des clefs	193
Annexe 8 : Codes Correcteurs d'erreurs.	195
Annexe 9 : Synthèse du dialogue entre le lecteur et le transpondeur	202
Annexe 10 : Protocole des commandes PICOTAG	203
7.1.9 Lecture du numéro d'identification	203
7.1.10 Traitement de l'anticollision	204
7.1.11 Traitement de l'écriture	205
7.1.12 Traitement d'une lecture	206
Annexe 11 : Schémas électroniques	207
7.1.13 Schéma du lecteur	207
7.1.14 Schéma du démodulateur	208
7.1.15 Schéma du transpondeur	209
7.1.16 Schéma du transpondeur : Démodulateur et Modulateur de charge.	210
Annexe 12 : Réalisation du transpondeur	211
Annexe 13 : Table de codage des signaux DCF 77	212
Annexe 14 : Description des structures de données.	213
8 PRODUCTION SCIENTIFIQUE	214
Congrès Internationaux	214
8.1.1 ITSC'2003	214
8.1.2 IEEE Sensors'2003	214
8.1.3 ITSS'2003	214
Congrès nationaux	214
8.1.4 C2I2000	214
8.1.5 MEITO2001	214
Brevet 214	

Table des figures

Figure 0.1 Exemple d'architecture d'un système de communication [Wall 2003]	19
Figure 0.2 Modélisation du suivi de trajectoire	20
Figure 0.3 Diagramme schématique du dialogue véhicule infrastructure à base de transpondeur.	20
Figure 0.1 Détecteur Infra Rouge Actif.	23
Figure 0.2 Détecteur IR utilisés sur l'autoroute A13 pour une application de calcul du temps de parcours[Ferré 2003].	23
Figure 0.3 Architecture du système de sécurisation de carrefour à l'aide de balises IR [Hamba 2003].	24
Figure 0.4 Images IR d'un piéton et d'un cycliste [Marchal 2003].	25
Figure 0.5 Image IR de nuit par temps de pluie [Grueber 2003].	25
Figure 0.6 Guidage par un fil lumineux d'un véhicule minier de 50 tonnes [Automated Mining].	27
Figure 0.7 Suivi de ligne avec des magnets	28
Figure 0.8 Composante latérale du champ magnétique à +/- 50 mm.....	28
Figure 0.9 Composante verticale du champ magnétique +/- 50 mm.....	29
Figure 0.10 Constitution d'un gyromètre à gyroscope	31
Figure 0.11 Le réseau de satellite du système américain GPS [Constellation GPS].....	32
Figure 0.12 Architecture d'un LADAR.....	34
Figure 0.1 Portée effective en fonction du débit de l'information d'un DSRC.....	39
Figure 0.2 Zone de couverture obtenue avec les IRVD (Infrared Vehicle Detectors) au Japon [Tajima 2003].	43
Figure 0.3 Communication IR entre Camion et véhicule [Staudinger 2003a].	44
Figure 0.1 Architecture de principe d'un transpondeur.....	45
Figure 0.2 Architecture de principe de la base station ou lecteur	46
Figure 0.3 Identifiant d'un container	50
Figure 0.4 Utilisation des produits HYPER.ID de la société Ballogh pour la gestion de la gare routière de Toulouse.	51
Figure 0.5 Architecture d'un immobiliseur pour véhicule [Paret 2003][Finkenzeller 1999]	55
Figure 0.1 Portique supportant les lecteurs des transpondeurs et les caméras vidéo	59
Figure 0.1 Champ magnétique en un point M sur l'axe d'une antenne circulaire de rayon r	63
Figure 0.2 Variation du champ magnétique en fonction de la distance à rayon de la spire r constant.	64
Figure 0.3 Variation du champ magnétique en fonction de la distance à la spire suivant l'axe de l'antenne pour trois valeurs de rayon d'antenne.	65
Figure 0.4 Variation du champ magnétique en fonction du rayon de la spire pour une distance de lecture d de 10, 25 et 55cm.....	66
Figure 0.5 Circuits couplés non accordés.	69
Figure 0.6 Cas réel, seule une partie du flux généré par l'antenne du primaire passe dans le secondaire.....	70
Figure 0.7 Évolution du coefficient de couplage en fonction de la distance séparant les antennes de la base station et du transpondeur.....	71
Figure 0.8 Valeur de la tension induite dans le cas du circuit couplé.....	72
Figure 0.9 Variation de la tension induite u_2 dans le transpondeur et du facteur de qualité Q en fonction de la variation de l'inductance de l'antenne du transpondeur. La fréquence de résonance de 13,56 MHz est constante.	73
Figure 0.10 Valeur du champ en fonction de la fréquence d'interrogation pour un transpondeur accordé à 13.56 MHz.	74
Figure 0.11 Variation de la distance de dialogue induite par une dérive de la fréquence de la porteuse.....	75
Figure 0.12 Variation du champ H minimal pour un transpondeur de 8 cm x 4 cm.	76
Figure 0.1 Évaluation de l'effet Doppler dans le cas d'une source mobile animée d'une vitesse v (l'antenne de la base station) vue d'un point d'observation fixe (le transpondeur).	82
Figure 0.2 Variation de la fréquence de la porteuse par effet Doppler due au déplacement de la source.	83
Figure 0.3 Modulation d'amplitude en DSB-LC porteuse à 13.56 MHz.....	86
Figure 0.4 Principaux codages bit rencontrés dans les systèmes RFID	88
Figure 0.5 Comparaison des densités spectrales des codes NRZ, RZ et Manchester	90
Figure 0.6 Variation de l'impédance de l'antenne du lecteur en fonction de la modulation de la charge du transpondeur et fonction du coefficient de couplage.	93
Figure 0.7 Collision : plusieurs transpondeurs dans le champ de l'antenne.....	96
Figure 0.1 Variation de la puissance électrique dans l'antenne du lecteur en fonction du champ au centre de l'antenne	105
Figure 0.1 Véhicule de test équipé de l'antenne du lecteur	108
Figure 0.2 Positionnement de l'antenne du lecteur sous le châssis du véhicule de test.....	108
Figure 0.3 Test du principe de dialogue véhicule-infrastructure à base de transpondeurs	108
Figure 0.4 Exemples de transpondeurs industriels à 125 KHz et 13,56 MHz.	108
Figure 0.5 Chaîne d'expérimentation des transpondeurs INSIDE	109
Figure 0.1 Représentation des forces en présence.	113
Figure 0.1 Géométrie de braquage sans glissement latéral	117
Figure 0.2 Modèle du bicycle	118
Figure 0.3 Détermination de l'écart de trajectoire en fonction de la distance parcourue.	120

Table des figures

Figure 0.4 Pour les conditions de confort adaptées aux différentes vitesses, variation de l'écart par rapport à la trajectoire rectiligne en fonction de la distance parcourue sur une trajectoire circulaire.....	121
Figure 0.1 Réseau de N transpondeurs tous les 10 mètres.....	122
Figure 0.2 Schéma de principe du transpondeur adapté à l'application de guidage.....	123
Figure 0.1 Schéma bloc du transpondeur adapté à l'application de guidage.....	125
Figure 0.2 Antenne imprimée du transpondeur	126
Figure 0.3 Signal binaire issu du transistor de démodulation	131
Figure 0.1 Évolution de la section apparente entre les antennes du transpondeur et du lecteur.....	134
Figure 0.2 Banc de mesure du champ magnétique avec (b) et sans enrobé (a).....	136
Figure 0.3 Mesure du champ rayonné par l'antenne 28 x 34 à différentes distances du centre de l'antenne.....	137
Figure 0.4 Mesure du champ rayonné par l'antenne 28 x 34 cm à différentes distances du centre de l'antenne.....	137
Figure 0.5 Mesure du champ rayonné par l'antenne 28 x 34 à différentes distances du centre de l'antenne.....	138
Figure 0.6 Mesure de la tension induite dans le transpondeur en fonction de la distance entre l'antenne du lecteur et le transpondeur. La mesure est réalisée dans l'axe central de l'antenne du lecteur.....	139
Figure 0.7 Allure du module de la tension secondaire en fonction du temps de parcours, ici la vitesse du véhicule est de 40m/s.....	140
Figure 0.8 Tension induite véhicule à 140 Km/h.....	141
Figure 0.9 Tension induite véhicule à 90 Km/h.....	141
Figure 0.10 Description du protocole de communication entre le lecteur et le transpondeur.....	144
Figure 0.1 Chronogramme du tet en mode écho.....	145
Figure 0.2 Chronogramme du dialogue dans le cas de la commande \$15. Durée 10 ms.....	147
Figure 0.1 Schéma d'application du transpondeur.....	149
Figure 0.2 Disposition des transpondeurs pour l'application de suivi de trajectoire.....	150
Figure 0.3 Transpondeur dans sa version 6 antennes.....	150
Figure 0.1 Atténuation en dB/km par les gaz de l'atmosphère en fonction de la fréquence de la porteuse.....	184
Figure 0.2 Monogramme permettant le calcul de l'atténuation due à la pluie.....	184
Figure 0.1 Exemple de programmation d'un CRC616 en C.....	185
Figure 0.1 Algorithme de génération des clés de codage du DES	194
Figure 0.1 Représentation en treillis des états possibles du codeur.....	201
Figure 0.1 Transmission vers le transpondeur de l'information \$53.....	202
Figure 0.2 Réponse du tag par modulation de charge de l'information \$A6.....	202
Figure 0.1 Protocole de la lecture du numéro d'identification	203
Figure 0.2 Protocole de la lecture du numéro d'identification en cas d'absence Tag	203
Figure 0.3 Protocole de gestion de l'anticollision	204
Figure 0.4 Protocole pour le cycle d'écriture Tag	205
Figure 0.5 Protocole pour le cycle de lecture dans le Tag	206
Figure 0.1 Schéma électronique du lecteur.....	207
Figure 0.2 Schéma électronique du démodulateur du lecteur	208
Figure 0.3 Schéma électronique du transpondeur	209
Figure 0.4 Démodulateur et Modulateur de charge du transpondeur.....	210
Figure 0.1 Le transpondeur et ses deux antennes centrales	211
Figure 0.2 Le transpondeur dans sa configuration 6 antennes.....	211

Liste des tableaux

Tableau 0.1 Comparaison des précisions du système GPS	32
Tableau 0.1 Comparaison des caractéristiques entre les bandes utilisées par les systèmes de transports intelligents ...	39
Tableau 0.1 Principales caractéristiques des transpondeurs en fonction de la fréquence de la porteuse	56
Tableau 0.2 Principales caractéristiques des transpondeurs en fonction de la fréquence de la porteuse (suite).....	56
Tableau 0.1 Comparaison entre les différentes technologies sans fil	60
Tableau 0.1 Limite entre champ proche champ et le champ lointain en fonction de la fréquence du signal.....	62
Tableau 0.2 Épaisseur de peau à différentes fréquences pour l'eau de mer et l'eau pure.....	68
Tableau 0.3 Notations utilisées dans ce chapitre	68
Tableau 0.1 Bandes de fréquences utilisables pour le RFID.	81
Tableau 0.2 Détermination de la bande passante en fonction de la vitesse de transfert pour le code Manchester	88
Tableau 0.3 Densité spectrale de puissance et bande passante des codes classiques.....	89
Tableau 0.4 Évolution de la valeur moyenne du code modulant	90
Tableau 0.5 Temps de transaction pour les composants MIFARE Philips SC	95
Tableau 0.6 Exemple de durée d'exécution sur des microcontrôleurs classiques	99
Tableau 0.7 Rendement de différents codes.	102
Tableau 0.8 Nombre d'erreurs pouvant être corrigées en fonction du type de codage.	102
Tableau 0.9 Nombre de bits de données + bits ajoutés pour les différents codes.....	103
Tableau 0.10 Évaluation du temps d'encodage pour une architecture PIC 16F876.....	103
Tableau 0.11 Évaluation du temps de décodage pour une architecture PIC 18F242.....	103
Tableau 0.1 Temps d'exécution des principales commandes de dialogue avec un transpondeur 13.56 MHz.	110
Tableau 0.1 Caractéristiques des différents types de routes.....	112
Tableau 0.2 Limitation des vitesses en fonction du type de routes.....	112
Tableau 0.3 Rayon minimum en fonction de la vitesse et du dévers.	113
Tableau 0.4 Les différents rayons R_m , R_{dm} , et R_{nd} en fonction du type de route.	114
Tableau 0.5 Accélération transversale en fonction du type de route respectant la condition de confort dynamique. .	114
Tableau 0.6 Rayons minimaux de jour et de nuit respectant le confort dynamique des usagers pour le profil en long.	115
Tableau 0.7 Classification des attributs en fonction du type de routes.	116
Tableau 0.1 Valeur d'inductance en fonction de ses caractéristiques mécaniques.....	127
Tableau 0.2 Valeur de la capacité d'accord.....	127
Tableau 0.3 Facteur de qualité correspondant à la bande passante maximale $Q=45$	128
Tableau 0.4 Synthèse des principaux paramètres caractéristiques du transpondeur.	132
Tableau 0.5 Synthèse paramètres induits par les choix des paramètres principaux du transpondeur.	132
Tableau 0.1 Mesures des paramètres R et L des antennes du lecteur.....	135
Tableau 0.2 Synthèse des principaux paramètres caractéristiques du lecteur.....	143
Tableau 0.3 Synthèse des paramètres induits par les choix des paramètres principaux du lecteur.....	143
Tableau 0.4 Format des mots de commande	144
Tableau 0.1 Taux d'erreurs en statique, distance séparant les antennes du transpondeur et du lecteur 23cm.....	146
Tableau 0.2 Résultats de la journée du 30 septembre	148
Tableau 0.1 Synthèse des conditions de déploiement en fonction de l'application visée.	155
Tableau 0.1 Temps nécessaire à une attaque systématique en fonction de la longueur de la clé.....	187
Tableau 0.2 Liste des clés faibles à ne pas utiliser comme clé de chiffrement	188
Tableau 0.1 Table de la permutation initiale.....	192
Tableau 0.2 Table de la permutation initiale Inverse	192
Tableau 0.3 Table d'expansion.....	192
Tableau 0.4 Table de la P-Box.....	192
Tableau 0.5 Table S-Box S5	193
Tableau 0.6 Table S-Box S2	193
Tableau 0.7 Table S-Box S3	193
Tableau 0.8 Table S-Box S4	193
Tableau 0.9 Table S-Box S5	193
Tableau 0.10 Table S-Box S6	193
Tableau 0.11 Table S-Box S7	193
Tableau 0.12 Table S-Box S8	193
Tableau 0.13 Tableau des décalages de bits en fonction de l'étage de calcul.....	194
Tableau 0.14 Table de permutation PC-1	194
Tableau 0.15 Table de permutation PC-2	194
Tableau 0.1 Table de décodage des signaux DCF 77 de l'horloge de Frankfurt.....	212
Tableau 0.1 Caractéristiques statiques de la prochaine section de route.....	213
Tableau 0.2 Informations temps réel caractéristiques du véhicule	213

1 INTRODUCTION

Le contexte du travail

De nombreux travaux de recherche à travers le monde traitent de l'aide à la conduite sur route pour garantir une sécurité optimale. L'automobiliste peut être partiellement assisté ou bien le véhicule évolue complètement seul dans le cadre de la route automatisée. Dans ce contexte, tous les constructeurs, équipementiers et organismes de recherche travaillent sur l'amélioration de la sécurité des conducteurs par une meilleure interaction avec l'infrastructure (Les centres de décision, les routes, les balises locales...).

De nombreux programmes de recherche sont le reflet de cette activité :

- Le projet européen **CHAUFFEUR** se propose de développer un système de conduite de camion sans chauffeur [Fritz 1999].
- Les projets **CYBERCAR**, **CYBERMOVE**, développés entre autres par l'équipe **IRAMA** (Informatique, Mathématique et Automatique pour la Route Automatisée) de l'INRIA (Institut National pour la Recherche en Informatique et Automatique) ont pour ambition de concevoir des véhicules urbains autonomes dont la direction et le freinage seront complètement pilotés par ordinateur [CYBERCAR 2004]. Des trains de véhicules évoluant sur des routes automatisées pourront alors voir le jour.
- Le projet **LAVIA** (Limiteur s'Adaptant à la Vitesse Autorisée) a pour objectif de développer un Limiteur de vitesse adaptatif [Ehrlich 2003].
- **ARCOS** (Action de Recherche pour une COnduite Sécurisée) développe et évalue des systèmes d'aide à la conduite tels que : la gestion d'inter-distance entre véhicules, la prévention des collisions avec des objets fixes, la prévention vis-à-vis des véhicules sur les bas-côtés, la transmission d'alerte suite à un accident ou incident [Blosseville 2003].
- **SARI** (Surveillance Automatisée de l'état des Routes pour Informer les gestionnaires et les conducteurs) se propose de travailler sur la lisibilité de la route afin de rendre celle ci plus prévisible.
- **SURE** (Sécurité des Usagers sur les Routes Existantes) engagé depuis 2001 vise à assurer une meilleure sécurité des usagers sur le réseau routier français.
- **SAPECS** (Secured Architecture & Protocols for Enhanced Car Safety), ce projet européen a pour objectif d'examiner les différents protocoles et architectures de communication destinés à être intégrés dans les "bus véhicules".
- **SAFEMAP** (Socio economic assessment of a dedicated digital map for road safety application), ce projet DEUFRACO vise à développer une base de données intégrant des

données relatives à la sécurité implémentée dans un système de navigation. La phase 1 est une étude de faisabilité économique en cours avec le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.)

- Le projet **MUSIKA** (MUlti-Source termInal Kernel Application) était centré sur la fonction de positionnement multi-sources appliquée aux transports terrestres et aériens. Il proposait un ensemble d'outils logiciels adaptés au prototypage et au développement rapide de systèmes hybrides utilisant de multiples signaux d'origines diverses. Son but était de fournir la meilleure solution à un problème spécifique de localisation de véhicule et ceci quel que soit l'environnement. Ce projet n'a pas été financé, mais le besoin reste d'actualité.

Au travers de ces différents projets, il est mis en évidence le rôle de l'infrastructure. "*La maîtrise de l'infrastructure dans la sécurité routière*" est l'une des orientations prioritaires du LCPC. Il est bon de rappeler quelques chiffres concernant la France : 500 milliards de kilomètres parcourus par 30 millions de véhicules sur un réseau d'un million de kilomètres; 7 500 morts, 160 000 blessés dont 27000 blessés graves (statistiques de l'année 2003). Devant les évolutions des véhicules qui sont de plus en plus sophistiqués et avec l'arrivée de la télématique embarquée, il devient nécessaire de rendre la route intelligente et donc à la fois interactive et communicante. Cette route intelligente devra être capable de transmettre au véhicule ses principales caractéristiques : son tracé, sa géométrie, son niveau d'adhérence, ses particularités. Elle devra donner des informations sur les conditions de conduite liées au climat (pluie, vent, neige, verglas, brouillard) ou liées au trafic. Elle interagira avec les systèmes d'aide à la conduite dont le véhicule sera équipé. Par exemple, actuellement il faut attendre que l'une des roues se bloque pour que l'ABS (Anti Bloquing System) relâche l'effort de freinage. Ne serait-il pas plus efficace de pouvoir anticiper un tel phénomène ? La route deviendra donc prédictible, prévisible et devra permettre au conducteur de corriger des erreurs ou des écarts et éviter ainsi des issues aujourd'hui fatales.

Parmi les statistiques précédentes, il faut rappeler que 2/3 des accidents ont lieu en milieu rural sur route nationale ou départementale, la moitié est due à des pertes de contrôle qui se produisent sans tiers donc véhicules seuls. Ceci représente 2 500 tués sur les 7 500.

Le concept de route interactive, c'est-à-dire d'interactivité avec le véhicule ainsi qu'avec le conducteur ne pourra pas être développé sans la connaissance du positionnement du véhicule sur la chaussée ni sans la possibilité de recevoir ou de transmettre des informations entre le véhicule et l'infrastructure.

Les méthodes de communication véhicule-infrastructure sont au cœur de différents projets développés entre autres par le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules Infrastructure

Conducteur.) unité mixte de recherche entre le LCPC et l'INRETS (Institut Nationale de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.) L'objectif de cette thèse est d'étudier les potentialités et les limites de la communication véhicule-infrastructure à base de transpondeurs pour la sécurisation du suivi de trajectoires. Il s'agit ici de proposer une architecture de transpondeur adaptée à cette communication. Sur un plan scientifique, la finalité de cette thèse est de cerner les notions régissant ses possibilités de communication à courte distance entre le véhicule et l'infrastructure et d'établir une méthodologie de développement d'un transpondeur.

Organisation du document

Ce mémoire comporte cinq parties principales bâties autour des chapitres 2 à 5 dont l'organisation est la suivante :

- Le chapitre 2 situe le contexte général des travaux et présente un tour d'horizon des différentes techniques de positionnement et de communication utiles aux systèmes de transport intelligent en mettant l'accent sur la problématique du suivi de trajectoire donc de la localisation d'un mobile. Un état de l'art centré sur le monde des transpondeurs viendra compléter cette première partie.
- Le chapitre 3 est centré sur la théorie du développement des transpondeurs utilisant principalement l'induction magnétique. A partir des principes physiques de base régissant ces phénomènes, les principaux paramètres tels que portée, fréquence, modulation, cryptage, débit d'information, permettront de définir l'architecture d'un transpondeur. Ceci justifiera les choix techniques et technologiques pris pour traiter l'étude de cas.
- A l'aide des éléments théoriques présentés lors du chapitre précédent, le chapitre 4 dédié au cas d'étude envisagé montrera un exemple de développement d'un transpondeur spécifique dédié à la communication courte distance et à la localisation d'un véhicule roulant jusqu'à des vitesses de 150 km/h. Il présentera également les principaux résultats expérimentaux obtenus lors de différents essais notamment sur la piste d'essais du LCPC de Nantes.
- Enfin le chapitre 5 conclura l'ensemble de ces travaux et présentera les perspectives qui seront développées dans les projets INFRASURE (INFRAstructure, Simulation, Usage, et Recherche en Environnement maîtrisé) du LCPC ou SARI liés au développement d'un observatoire des trajectoires permettant l'analyse du comportement des conducteurs.

2 PROBLÉMATIQUE LIÉE À LA SÉCURISATION ROUTIÈRE

Ce chapitre a pour objectif de situer les travaux réalisés par rapport au contexte général des systèmes de transports intelligents et plus particulièrement à la problématique liée à la sécurisation routière. Il sera montré pourquoi il est nécessaire de disposer d'un outil capable de supporter les fonctions de positionnement et de communication véhicule-infrastructure. C'est pourquoi la recherche bibliographique sera tournée à la fois sur les différents systèmes ou capteurs permettant une localisation d'un véhicule mais aussi sur les différentes techniques de communication sans fil pouvant assurer une communication véhicule-infrastructure. Elle s'achèvera sur une présentation de l'état de l'art des transpondeurs.

A l'issue de cette analyse, une expression des besoins sera proposée concernant l'élaboration d'un dispositif de communication véhicule-infrastructure à base de transpondeur dont la conception sera l'objet du chapitre 3.

Problématique

Dans le cadre de la route automatisée et devant le développement de l'ensemble des ITS (Intelligent Transport System), il est nécessaire de présenter l'architecture candidate d'un tel système Figure 0.1 [Wall 2003].

Les éléments constitutifs de cette architecture sont :

1. Un poste central (Traffic Management Centre) ayant un accès via Internet aux différentes unités de gestion du trafic.
2. Un système de diffusion large de type 'broadcast' transmettant des informations à destination de l'ensemble des usagers via le DAB (Digital Audio Broadcasting.)
3. Un système de transmission d'informations localisées ne concernant que certains usagers, cas d'un ralentissement par exemple, par un accès WIFI (Wireless Fidelity.)
4. Dans le véhicule, les applicatifs auront besoin d'une géolocalisation par GPS (Global Positioning System) et d'une communication avec les organes du véhicule au travers du réseau CAN (Controller Area Network) ou BLUETOOTH.
5. Un système de transmission privé permettant au véhicule de récupérer des informations concernant son environnement immédiat grâce à un GPS couplé à une base de données embarquée.
6. Et enfin pour assurer la communication véhicule à véhicule : un dispositif de communication sans fil et sans architecture définie tel un réseau ad-hoc.

Dans cette architecture, il manque un aspect de communication spécialisée entre un unique véhicule et l'infrastructure ce qui permettrait, entre autres, le développement d'une application de sécurisation de la conduite, notamment sur route rurale, en autorisant une meilleure anticipation de la trajectoire du véhicule et en prenant en compte des paramètres ou des attributs de l'infrastructure.

Dans la suite des travaux, l'infrastructure désignera tout ce qui est en relation immédiate et proche avec le véhicule donc principalement la bande de roulement, éventuellement des équipements logés sur le bas-coté de la chaussée.

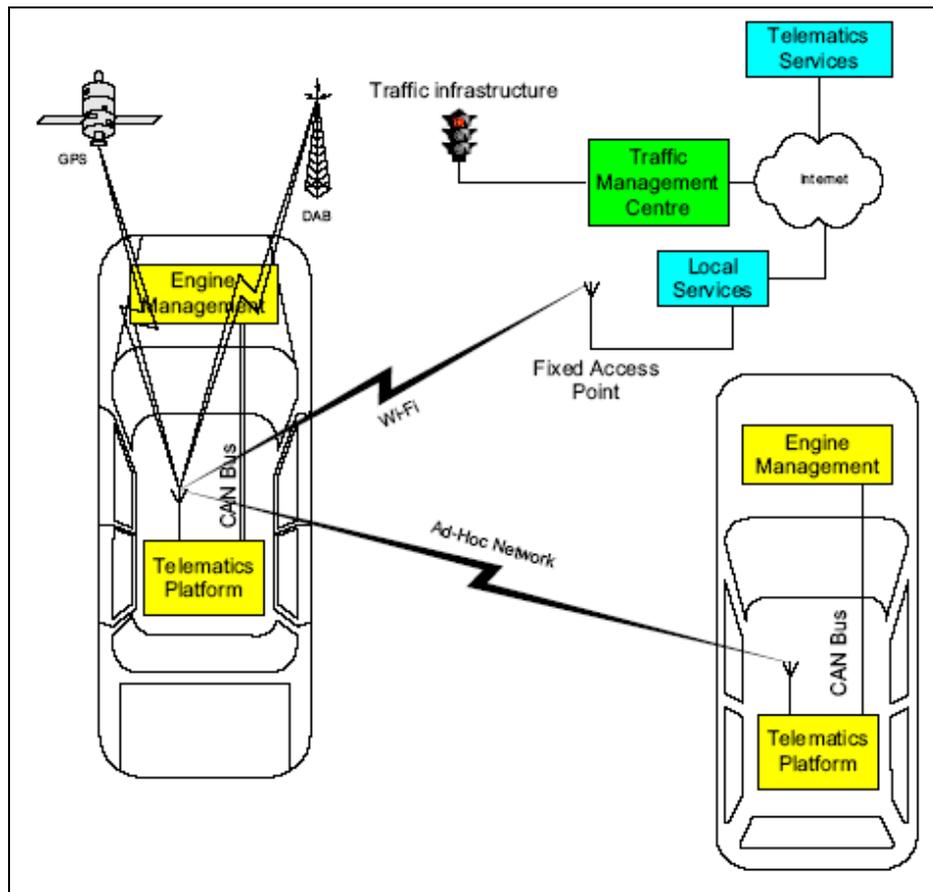


Figure 0.1 Exemple d'architecture d'un système de communication [Wall 2003]

De tels attributs peuvent être (Figure 0.2) :

- Stables (caractéristiques du tracé, profil en long § 4.1.2.4, profil en travers § 4.1.2.5.)
- Lentement évolutifs (texture du revêtement, modifications temporaires pour travaux, etc.)
- Très évolutifs ou temps réels (adhérence mobilisable du véhicule, conditions météo, etc.)

Ces attributs, liés à la route, pourraient être mémorisés et transmis au véhicule par **un moyen de communication**.

Par ailleurs, combinés aux paramètres propres du véhicule (charge, vitesse, états des pneumatiques, répartition de la charge dans le véhicule etc.) et à un modèle de comportement de celui-ci, ces attributs permettraient d'élaborer des recommandations, des indices de risque encouru ou des consignes à l'intention d'automatismes embarqués ou d'un système d'aide à la conduite.

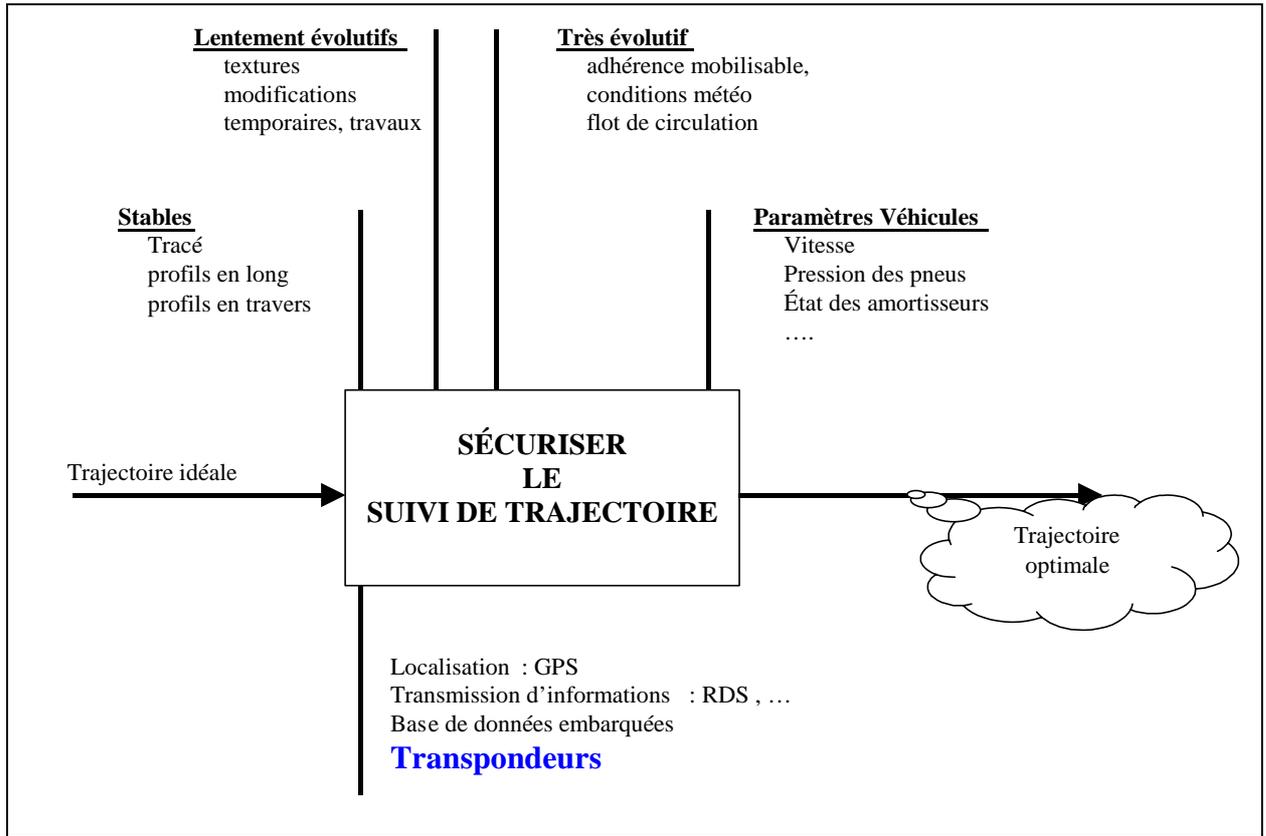


Figure 0.2 Modélisation du suivi de trajectoire

2.1.1 Expression des besoins

Il est alors possible de concevoir un tel dispositif à l'aide de transpondeurs logés dans l'infrastructure et dialoguant avec le véhicule lors du passage de ce dernier au-dessus du transpondeur (Figure 0.3.)

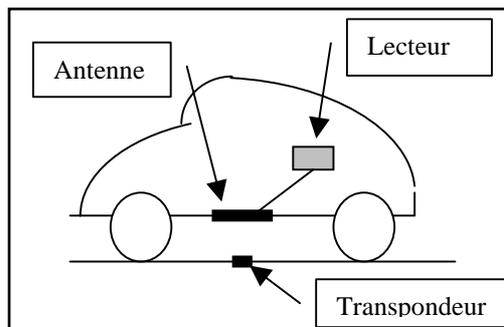


Figure 0.3 Diagramme schématique du dialogue véhicule infrastructure à base de transpondeur.

Cette thèse évoquera l'étude théorique et le développement de ce dispositif dont les principaux critères seront :

1. Disposer d'un système peu encombrant (par rapport aux portiques,...), discret.
2. Ne pas avoir besoin d'énergie pour être localisé par exemple dans l'infrastructure.
3. Permettre une identification du véhicule au passage de ce dernier.
4. Assurer la localisation du véhicule en positionnement latéral et longitudinal dont la précision latérale pourrait être de l'ordre de 10 cm fonctionnant en toutes conditions de circulation : en ville, dans les canyons urbains, dans les parkings ou tunnels, en campagne, en forêt.
5. Pouvoir communiquer des données à jour caractérisant l'infrastructure.
6. Ne pas être perturbé par les conditions climatiques : pluie, brouillard, neige, vent, glace, et températures froides / chaudes ou par des problèmes de propagation des ondes, éviter les réflexions parasites.
7. Et autoriser un dialogue avec le véhicule se déplaçant à une vitesse de 144 km/h^{1 2}.

Les objectifs de la thèse

L'objectif général de cette thèse portera donc sur :

1. L'analyse, le développement et l'expérimentation d'un système de stockage et de transmission des attributs de la trajectoire à base de transpondeurs.
2. Et la définition du réseau de transpondeurs disposés sur (ou dans) l'infrastructure, dans lesquels ces attributs seront stockés et interrogés au passage des véhicules.

Cette étude tiendra compte entre autres paramètres de la quantité d'informations à échanger entre le véhicule et l'infrastructure, la vitesse de transmission des informations, la portée, la possibilité d'une interrogation dynamique au passage du véhicule, de la puissance nécessaire, de la normalisation en vigueur, des bandes de fréquences utilisables, des possibilités de télé-alimentation et de la sécurité de la transmission.

A partir des performances du couple transpondeur – lecteur, il s'agira d'identifier à priori les champs des applications envisageables et pour chacune d'elles les contraintes de nature technique, économique ou de déploiement.

¹ 40 mètres par seconde.

L'expression de besoins présentée précédemment, bien que non hiérarchisée, montre que ce système doit disposer des fonctions de **localisation** du mobile et de **communication** de véhicule avec l'infrastructure, voire de véhicule à véhicule. C'est pourquoi un tour d'horizon des différentes techniques actuellement développées permettant d'assurer les fonctions de base de cette route automatisée ou d'une façon plus générale d'un système de transport intelligent sera réalisé.

Cet état de l'art s'appuiera sur des articles consacrés à l'automobile [Turner 2000] ou aux transports en commun dans le cadre d'une mise en œuvre d'un système de priorité pour les bus circulant à Toronto [Greenough 1999]. Nous regarderons dans un premier temps les techniques actuelles de positionnement, puis les techniques de communication. Afin d'illustrer ces techniques, des exemples de mise en œuvre issus de la bibliographie ou d'applications industrielles seront également proposés.

Les principales technologies évoquées concernent : l'infra rouge et les ondes électromagnétiques, les caméras vidéo, les boucles inductives, des systèmes de communication, les transpondeurs actifs ou passifs, le laser, la localisation par satellite. La mise en œuvre de ces techniques permet alors d'imaginer différentes applications telles que : le télépéage, le suivi des mouvements d'un bus, la sécurisation du passage d'un carrefour, le croisement entre véhicules, l'optimisation de l'entrée des véhicules dans le trafic ou la détection des usagers à risque tels des piétons ou cyclistes, etc.

Les techniques de localisation du véhicule

2.1.2 Détecteur Infra Rouge

Un détecteur Infra Rouge (IR) consiste en un système optique focalisant l'énergie infrarouge de l'émetteur vers un transducteur, généralement une céramique pyroélectrique située derrière une fenêtre sensible aux rayonnements dans le domaine des longueurs d'onde de 6-14 μm . Cette substance pyroélectrique est caractérisée par une polarisation électrique spontanée qui est fonction de la température. La bande retenue correspond au pic d'émission de la plupart des moteurs des

² Vitesse certes supérieure à la limite légale, mais il faut quand même continuer à dialoguer avec le véhicule.

véhicules et du rayonnement thermique humain. Le principe d'application de ce capteur est présenté en Figure 0.1. Il est généralement placé sur un support au-dessus de la circulation.

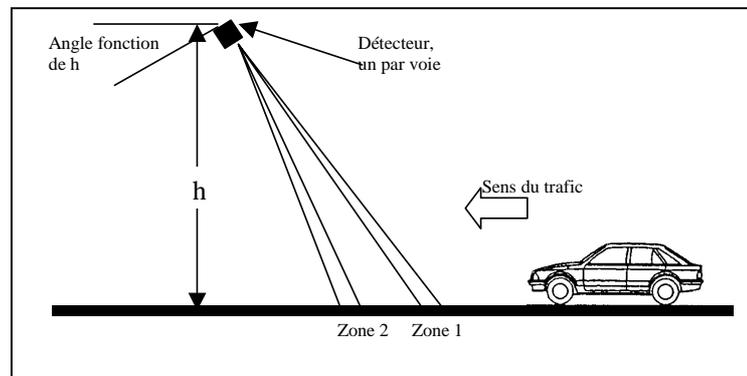


Figure 0.1 Détecteur Infra Rouge Actif.

Le détecteur IR détecte uniquement le mouvement à l'intérieur de la zone de couverture. L'application majeure de ces capteurs IR est la détection du passage d'un véhicule, utilisée par exemple, dans le cadre du calcul du temps de parcours. Une telle application analyse le trafic PARIS-Normandie sur l'autoroute A13 [Ferré 2003]. La Figure 0.2 montre la mise en œuvre de ces capteurs sur un passage supérieur.



Figure 0.2 Détecteur IR utilisés sur l'autoroute A13 pour une application de calcul du temps de parcours[Ferré 2003].

Cette technique est largement utilisée au Japon. En effet devant l'engorgement du trafic automobile dans la majorité des villes du Japon (77 millions de véhicules), chaque carrefour a été équipé de balises IR (35 000 unités) principalement utilisées pour le calcul des temps de parcours [Numata 2003]. Ces balises sont également usitées pour détecter l'arrivée des véhicules d'urgence (pompiers,

police, ambulance) et permettre ainsi le contrôle des feux de circulation afin de favoriser et d'accélérer le passage de ces véhicules d'urgence dans les carrefours [Nakatsukasa 2003].

Du fait du déploiement de ces balises sur l'infrastructure routière japonaise, de nombreux projets et articles relatent l'exploitation de ces balises dans différentes applications. Par exemple, Figure 0.3, une utilisation de cette infrastructure de balises est présentée dans le cas d'un système de sécurisation du franchissement des principaux carrefours à risques. Ces balises sont également utilisées pour supporter la communication IR avec les véhicules afin d'indiquer aux conducteurs la présence de piétons, d'obstacles et/ou d'un éventuel accident dans le carrefour [Hamba 2003].

D'autres pays utilisent également cette technique. Ainsi en Italie, l'utilisation de ces capteurs associés à une caméra vidéo sur la "Piazza Galvani" permet de détecter le passage de véhicules dans des voies réservées [Claroni 2003].

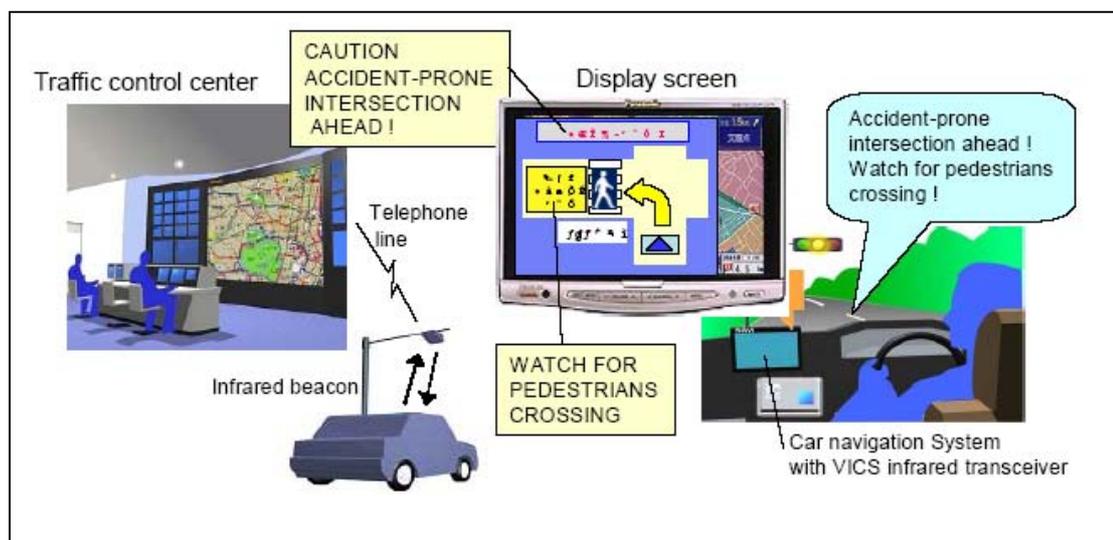


Figure 0.3 Architecture du système de sécurisation de carrefour à l'aide de balises IR [Hamba 2003].

Une caméra Infra rouge peut être réalisée à partir de ces capteurs. Un exemple d'application consiste en l'utilisation d'une telle caméra pour la détection des usagers vulnérables tels que les piétons ou les cyclistes [Marchal 2003].



Figure 0.4 Images IR d'un piéton et d'un cycliste [Marchal 2003].

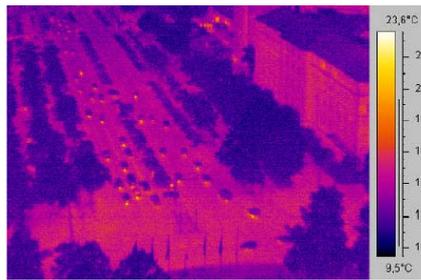


Figure 0.5 Image IR de nuit par temps de pluie [Grueber 2003].

Ces caméras IR peuvent fonctionner dans le noir, en cas de chutes de pluie (Figure 0.5) ou de neige et même en cas de brouillard léger mais en aucun cas dans les nuages [Grueber 2003].

Les images IR sont également utilisées pour développer des applications de suivi de trafic [Grueber 2003] et [Makino 1999].

2.1.3 Détecteurs piézo-électriques

Le phénomène de piézoélectricité consiste en l'apparition d'une polarisation électrique dans certains diélectriques naturels ou artificiels lorsqu'ils sont déformés sous l'effet d'une force de direction convenable. Par exemple si un condensateur est réalisé à partir d'un dépôt métallique sur les deux faces opposées d'une lame piézoélectrique, sous l'influence d'une force, il apparaît des charges sur les armatures opposées et donc une différence de potentiel, proportionnelle à la force appliquée. Un tel dispositif permet la mesure des forces et des grandeurs physiques capables de s'y ramener : pressions, accélérations, vibrations.

Un câble piézo-électrique a été utilisé pour réaliser un détecteur de passage des essieux de véhicules pour des applications de classification du type de véhicule et de surveillance de vitesse [Turner 1999]. Le système utilisé, très sensible, permet le comptage de véhicules routiers, de motocyclistes et de cyclistes circulant même à très faible vitesse. Ce détecteur utilise l'effet piézo-électrique obtenu suite à la pression exercée par les roues sur le matériau piézo-électrique contenu dans le câble. L'utilisation de cette technique est principalement dédiée au comptage d'essieu [Ramon 2003], [Novo Rebollo 2003].

Ce dispositif peut autoriser une localisation longitudinale discrète mais en aucun cas une localisation latérale.

2.1.4 Caméra

Sur la puce de silicium, les photodétecteurs, de technologie MOS, organisés en lignes ou en matrice délivrent chacun une charge électrique proportionnelle à l'éclairement de son photosite et à la durée d'exposition. L'ensemble des charges ainsi stockées est transféré vers des registres à décalages qui, grâce au convertisseur charge / tension, donne l'image à la chaîne de traitement.

Un dispositif de contrôle latéral et longitudinal utilisant entre autres une caméra CCD est utilisé pour développer un système de suivi pour camions dans le cadre du projet européen CHAUFFEUR [Fritz 1999]. Un motif réalisé à base de diodes IR est dessiné sur la bâche arrière de la remorque du premier camion. Le camion suiveur possède deux caméras, l'une pour un champ lointain, l'autre pour la vision proche. Le dispositif d'analyse d'images reconnaît le motif et en déduit la distance entre les deux camions avec un temps de cycle de 80 ms. L'article présente également les automatismes développés pour contrôler automatiquement l'accélération (ou décélération) du camion suiveur.

Une application originale est en test depuis septembre 2003 en Italie sur 200 véhicules de police. Cette application concerne la reconnaissance automatique des plaques d'immatriculation obtenue grâce à la miniaturisation de caméras qui peuvent être montées sur les équipements d'origine des véhicules, dans les phares, les bandeaux de signalisation et à un éclairage IR pulsé. Ce dispositif permet la reconnaissance de 25 plaques par seconde avec un taux de reconnaissance supérieur à 90% jusqu'à une vitesse de 110 km/h [Garibotto 2003].

2.1.5 Filoguidage

Un fil rectiligne conducteur parcouru par un courant alternatif d'environ 10 kHz émet un champ magnétique détecté par des capteurs placés en général à l'avant du mobile, au-dessus et perpendiculairement au fil. La mesure des différences de tensions induites dans les antennes des capteurs permet de connaître le positionnement du véhicule par rapport à ce guide continu et d'élaborer une commande pour corriger la trajectoire. Le dispositif est souvent couplé à des marqueurs magnétiques ou aimants pour coder de l'information (cf. § 2.1.7 Aimant ou Magnétique.)

Des chariots automatiques FW-S30PMXZ déplaçant des charges de 300 kg à une vitesse de 6 à 40 m/min ont été utilisés pour transporter du matériel médical [Panasonic].



Figure 0.6 Guidage par un fil lumineux d'un véhicule minier de 50 tonnes [Automated Mining].

Le filoguidage électrique a été testé à l'OSU pour des véhicules automobiles [Fenton 1976] et par Daimler-Benz et MAN en Allemagne pour les bus [Darenberg 1987].

Le système Magnétoglisser est réalisé à partir d'une voie incrustée dans le sol permettant le déplacement de petits véhicules électriques, les capsules Serpentime, à une vitesse de 18km/h et sans chauffeur. Cette ligne transmet l'énergie électrique sans contact par induction, assure le guidage par détection du champ magnétique, celui-ci étant uniquement actif lors du passage des capsules et peut communiquer des informations numériques [Serpentime].

Les applications précédentes exploitent le filoguidage magnétique, mais il peut être également optique. Un consortium canadien expérimente le guidage de véhicules miniers de 50 tonnes à partir d'un fil lumineux placé au plafond de la mine [Automated Mining].

Des bandes de peinture ou des bandes magnétiques ont également été utilisées pour ce type d'application.

2.1.6 Boucles magnétiques

Un système de détection à base de boucles magnétiques consiste à installer un fil sous forme d'une boucle parcourue par un courant sinusoïdal sur les voies de circulation. Le circuit électronique associé détecte la variation de l'inductance due au passage d'un véhicule. La présence de la masse métallique que représente le véhicule modifie le coefficient de perméabilité de la boucle. A vide, le

circuit électronique attaque la boucle sur sa fréquence de résonance. Le passage du véhicule provoque la décroissance de l'inductance, donc une désadaptation du circuit d'accord. Une boucle à verrouillage de phase (PLL) est généralement utilisée pour cette détection; elle permet une sensibilité de détection élevée. Cependant, si les véhicules passent trop lentement sur la boucle, cette sensibilité élevée introduit des erreurs de comptage [Kim 1999].

Ces boucles magnétiques peuvent également être utilisées pour du positionnement longitudinal, mais elles sont surtout développées pour effectuer du comptage de véhicule [Shin 1999], [Pooran 1999] et pour mesurer sa vitesse.

Contrairement au détecteur IR qui détecte uniquement le mouvement à l'intérieur de la zone de couverture, la boucle magnétique détecte la présence du véhicule.

2.1.7 Aimant ou Magnet

C'est un cylindre de matériau magnétique disposé dans la bande de roulement de la chaussée. A partir du champ magnétique rayonné et détecté par un magnétomètre embarqué sur le véhicule au passage au-dessus des marqueurs magnétiques (Figure 0.7), il est normalement possible de remonter au positionnement latéral du véhicule.

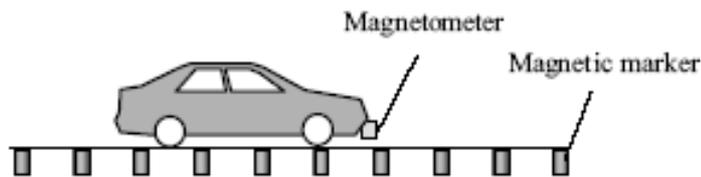
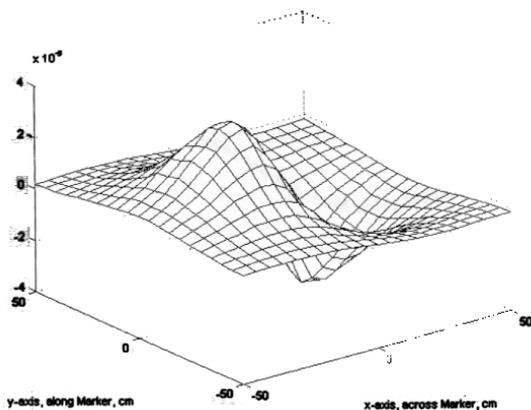


Figure 0.7 Suivi de ligne avec des magnets

Figure 0.8 Composante latérale du champ magnétique à +/- 50 mm



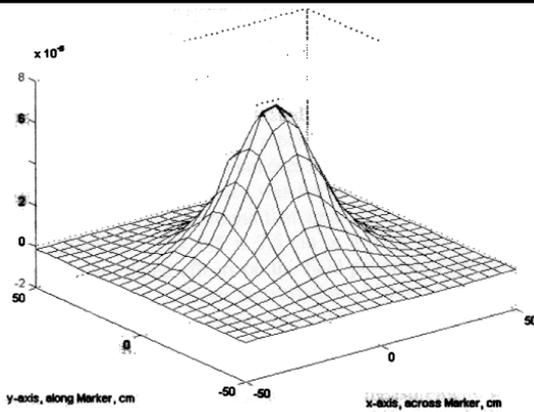


Figure 0.9 Composante verticale du champ magnétique +/- 50 mm

Les premières études sur les marqueurs magnétiques ont été réalisées par l'université de Berkeley en Californie dans le cadre du programme PATH [Zhang 1990]. L'application principale concerne le positionnement des engins de déneigement sur une chaussée enneigée [Lasky 1998]. Les magnets sont logés dans le centre de la chaussée et espacés de 1,2 mètre. Ils permettent d'obtenir une précision sur le positionnement latéral de 5 mm (moyenne quadratique), et 5 cm sur le positionnement longitudinal [Zhang 1998]. Le projet final a été présenté dans l'article de [Tan 1999a]. Cette technologie a été reprise dans le cadre du développement en Chine d'un système de contrôle du suivi de traces [Chunyan 2001].

Ces marqueurs ont été exploités pour asservir le positionnement latéral et longitudinal d'un camion-tracteur de 20 mètres à la vitesse de 65 km/h sur une distance de 2200m dans le but d'obtenir un véhicule expérimental sans chauffeur [Hingwe 1998] et [Robotis 1998].

De plus, ces marqueurs magnétiques ont été évalués pour caractériser les performances d'un système de guidage dans les trois conditions suivantes :

1. Au passage d'un magnétomètre au-dessus du marqueur "peak-mapping".
2. En utilisant deux magnétomètres, le magnet étant au centre de la paire de détecteurs (méthode dite du " vector ratio".)
3. L'algorithme dit "differetial peak mapping" compare le champ magnétique mesuré à deux endroits différents.

Ces différentes techniques permettent un positionnement latéral avec une précision du centimètre avec un pourcentage d'erreur de 0.1 % à 90 mi/h [Tan 1999b].

Cette technologie permet également un codage d'informations numériques en exploitant la polarité du champ magnétique émis par les marqueurs. Il faudra avoir parcouru 8 mètres pour obtenir un octet d'information [Guldner 1997]. L'utilisation de 25 marqueurs sur 35 mètres de long pour coder un message binaire nécessite 1 seconde de temps de lecture à 100 km/h [Zhang 1998].

Ces marqueurs ont également été utilisés pour assurer le positionnement d'un bus ou d'un taxi à l'approche d'une zone d'embarquement. La précision obtenue est de 1,5 cm, la variation du positionnement est de 5 mm, ce qui est invisible pour l'œil humain [Tan 1998].

Pour terminer sur ce sujet, un projet financé par l'organisme américain "Naval Architecture and Ocean Engineering", a pour objet l'étude de faisabilité de l'automatisation du déplacement des navires par l'intermédiaire de plate-formes semi-immersées [Misener 1998].

2.1.8 Centrales inertielles

Les centrales inertielles sont construites autour de trois gyroscopes mécaniques ou optiques.

Dans le premier cas, le gyroscope élémentaire est formé d'un rotor entraîné par un moteur tournant à grande vitesse (10^4 tr/mn) autour de son axe de rotation et monté dans un cadre. Si une rotation perpendiculaire au cadre est appliquée au gyroscope, sa vitesse entraîne un couple tendant à faire tourner le cadre. Ce couple est alors équilibré par un couple de rappel dont la mesure permet de convertir l'angle de rotation du cadre en un signal électrique au moyen d'un potentiomètre.

Dans le second cas, c'est la différence de trajet d'une onde lumineuse se propageant dans le milieu en mouvement qui est utilisée pour faire la mesure [Asch 1998].

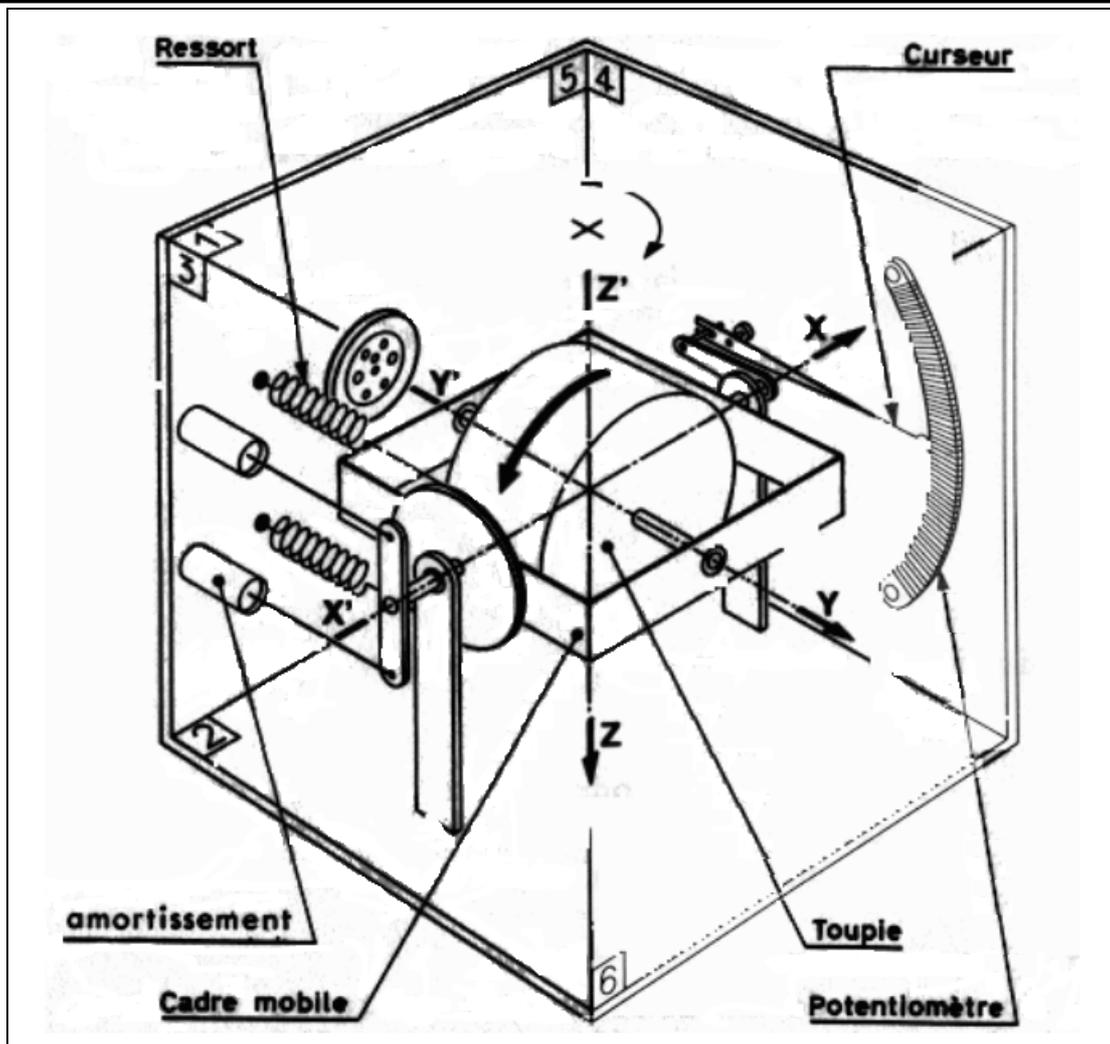


Figure 0.10 Constitution d'un gyromètre à gyroscope

2.1.9 Le GNSS

A ce jour deux systèmes globaux de navigation par satellites GNSS (Global Navigation Satellite Service) sont opérationnels : le GPS (Global Positioning System) et GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System). Les Européens pour l'année 2008 auront déployé le système GALILEO.

Le GPS est le système de positionnement déployé par le département de la Défense des USA pour satisfaire les besoins de l'armée, même si aujourd'hui la plupart des applications sont civiles. Les données GPS sont obtenues à partir des signaux codés issus d'au moins 4 satellites. Le récepteur peut en extraire la position en trois dimensions du lieu d'observation et des informations temporelles.

Le système GPS est basé sur une constellation de 24 satellites tournant autour de la terre en 12 heures. Les satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux de 4 satellites inclinés de 55° par rapport au plan de l'équateur, et décalés en longitude de 60° , de sorte que l'observateur terrestre puisse voir au moins cinq à huit satellites en n'importe quel point [Constellation GPS]. Chaque satellite émet un ensemble d'informations sous forme de trames permettant de l'identifier. Une trame complète est obtenue toutes les 12,5 minutes sous forme de sous-trames émises toutes les 30 secondes.

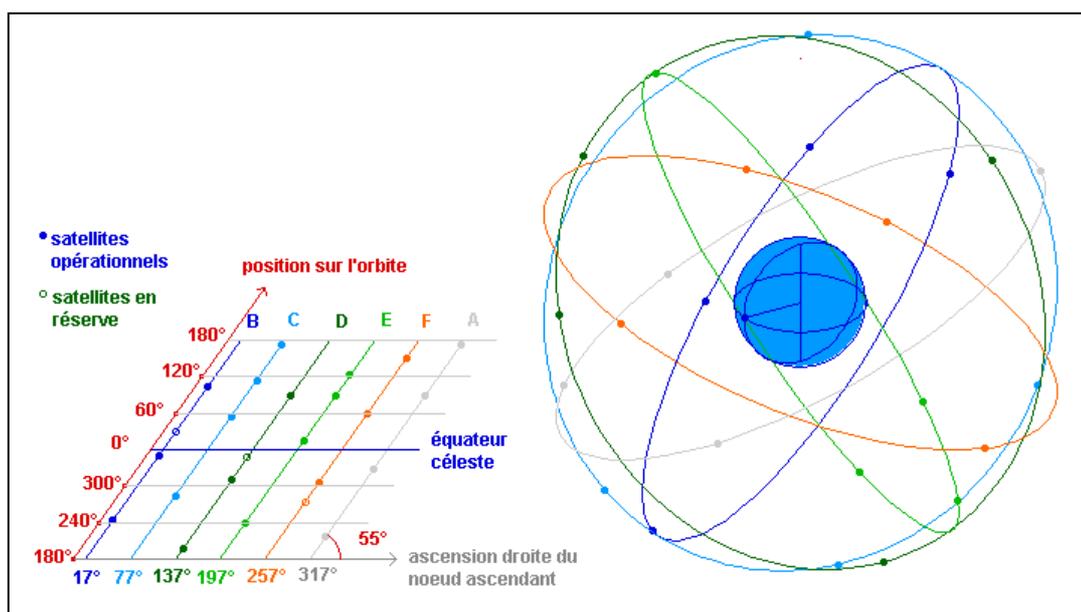


Figure 0.11 Le réseau de satellite du système américain GPS [Constellation GPS]

Le gouvernement américain spécifie deux types de services de positionnement :

1. Le positionnement précis PPS (Precise Positioning Service) pour les applications militaires.
2. Le positionnement standard SPS (Standard Positioning Service) pour les applications civiles.

Précision	PPS	SPS
Horizontale	22 m	100 m
Verticale	27.7 m	156 m
Temps	100 ns	340 ns

Tableau 0.1 Comparaison des précisions du système GPS

En utilisant les coordonnées connues d'un point de référence, il est alors possible de compenser les retards de propagation des signaux issus des satellites au passage dans l'ionosphère. Avec cette

correction différentielle ou DGPS (Differential Global Positioning System.), la précision peut alors atteindre 2 à 3 mètres en mode SPS. La précision obtenue avec le DGPS peut même atteindre une précision centimétrique à condition qu'il soit couplé avec une centrale gyroscopique [Ishigami 1999], [Sinko 1999].

Le système de navigation satellitaire de la Russie GLONASS est sur le principe très peu différent de celui des Américains [Upton 1999]. En associant les deux systèmes de navigation (GPS et GLONASS), la constellation de satellites passe alors à 40 satellites. Un utilisateur situé n'importe où sur la terre, voit pendant plus de 95% du temps au moins 4 satellites.

La dégradation des performances est essentiellement due à la perte de visibilité des satellites notamment en zone urbaine à cause des réflexions possibles sur les immeubles ou du masquage des satellites, en forêt ou dans les tunnels. De nombreux articles font état des problèmes de précision non suffisante obtenue avec le GPS et du développement d'algorithmes de compensation [Koike 2003].

2.1.10 Le Radar

La technique utilisée consiste à exploiter la réflexion d'une onde électromagnétique émise par le faisceau du radar sur un objet réfléchissant. Les fréquences utilisées sont de l'ordre de quelques dizaines de Giga Hertz. La fréquence de l'onde réfléchie dépend de la vitesse du véhicule puisqu'elle subit l'effet Doppler. Pour mémoire, dans la bande X (10.587 GHz) un véhicule se déplaçant à 50 Km/h entraînera une variation de fréquence par effet Doppler de 1 kHz.

L'OSU (Ohio State University in the U.S.) a étudié la technique de réflexion radar sur la barrière de sécurité pour connaître le positionnement latéral d'un véhicule [Mayhan 1982].

Pour le projet européen PROTECOR concernant la détection de piéton, les camions MAN utilisent des radars à 24 GHz pour la détection de proximité des obstacles [Cicilloni 2003]. Dans ce projet, le camion voulant tourner à droite, le chauffeur est averti si un obstacle est situé de 30 à 200 cm sur son bord latéral droit.

2.1.11 Le Lidar ou LADAR

Le LADAR (Laser radar) est constitué d'une émission laser, d'une photo diode et d'un scanner optique pouvant déplacer le faisceau laser en deux dimensions. Le scanner optique est par exemple composé d'un miroir polygonal pour le déplacement horizontal, le déplacement vertical est obtenu par l'oscillation de l'ensemble.

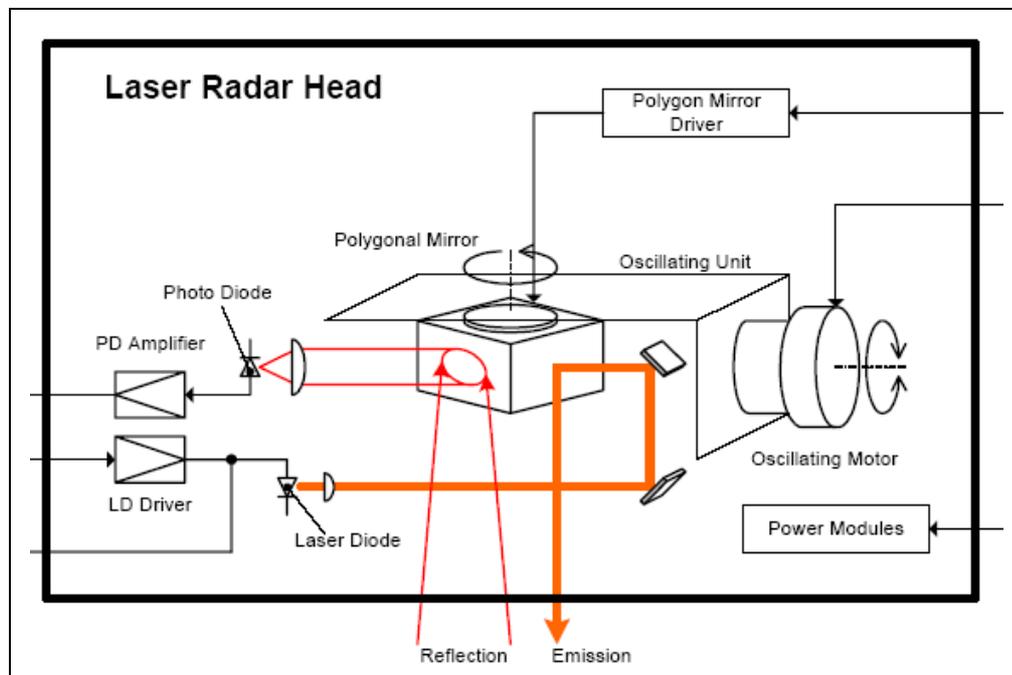


Figure 0.12 Architecture d'un LADAR.

Un exemple d'utilisation d'un LADAR embarqué dans un camion ou dans un avion pour des applications militaires de reconnaissance de tanks, fantassins, armements, antennes etc. a été présenté [Verly 1996].

Un lidar a aussi été développé pour une application à la mesure de distances entre véhicules automobiles. La plage de détection dans le plan horizontal est de ± 4 m en latéral pour une distance maximale de 200 m. Cependant, cette technique nécessite que l'arrière des véhicules soit équipé d'un rétro-rélecteur. Par ailleurs, la distance maximale susceptible d'être détectée est réduite de 30% en cas de mauvaises conditions atmosphériques (pluie, par exemple) ou de dégradation de l'état de surface du rétro-rélecteur [Sekine 1992].

Des systèmes de détection de croisements ACC (Automatic Cruise Control) de gestion d'interdistances et d'anticollision sont actuellement en cours de développement et d'évaluation dans le cadre du projet ARCOS. Ces différents systèmes utilisés pour la détection d'obstacles ou de véhicules, sont assez efficaces tant que l'objet à détecter reste dans le champ de vision du lidar. La connaissance de sa position latérale est importante. Pour résoudre cette difficulté des projets utilisent [Wybo 2003] simultanément : un radar, une caméra digitale et un système GNSS. Le

système GNSS prévient de l'arrivée d'un virage et donne approximativement les coordonnées du virage. Puis l'algorithme de traitement d'images donne une position plus précise du virage.

2.1.12 Autres techniques

Les réseaux de capteurs à fibres optiques (RCFO) sont souvent utilisés pour la mesure de contraintes dans les matériaux avec des applications diversifiées, par exemple, dans le domaine du génie civil, de la sauvegarde du patrimoine culturel ou encore du contrôle qualité en aéronautique [Ferdinand 1992]. Les fibres optiques à réseau de Bragg, photo-inscrites au cœur des fibres, ont initialement été développées pour des applications en télécommunications (démultiplexage en WDM, stabilisation en longueur d'ondes pour la transmission dans systèmes multicanaux, ...). Une telle fibre agit comme un miroir sélectif en longueur d'onde, en fonction du pas du réseau de Bragg. L'utilisation en instrumentation est récente. Cependant, la société Blue Road (USA) a développé un capteur basé sur l'utilisation de 26 fibres optiques à réseau de Bragg intégrées ou collées sur la structure d'un pont. La détection spectroscopique des faisceaux laser rétrodiffusés par les réseaux de Bragg est effectuée par CCD. Ce capteur multipoints permet ainsi de déterminer les déformations dues aux véhicules et aux piétons circulant sur le pont. La sensibilité du dispositif ($0,2 \mu\epsilon$) permet de différencier le passage d'un camion, d'un utilitaire léger, d'une voiture, d'un marcheur ou encore d'un joggeur. Ainsi, la santé de la structure du pont est-elle mesurée en permanence. Par ailleurs, comme pour les boucles magnétiques, ces capteurs, s'ils peuvent être utilisés pour du positionnement longitudinal, sont surtout développés pour contrôler la vitesse des véhicules mais aussi la charge des poids lourds. Un autre exemple similaire a été mis en application en Corée du Sud. Un RCFO a ainsi été intégré dans la chaussée, perpendiculairement à la bande de roulement. Chaque fibre comprend 20 réseaux de Bragg identiques, distribués tous les 10 cm. Une mesure différentielle entre deux détecteurs, constitués chacun d'un réseau de Bragg, permet de détecter une variation en longueur d'ondes et d'en déduire la répartition de charge par essieux ainsi que les vitesses des véhicules [Turpin 2001].

Un réseau de capteurs sans contact a été développé par l'université de Berkeley et commercialisé par la startup Sensys Networks. Le capteur VSN240 logé sur la couche de roulement permet la détection, le comptage, l'estimation de la vitesse et la classification des véhicules passant au-dessus du capteur [Sensysnetwork]

Les techniques de communication

Un système de communication ou réseau désigne tous les éléments capables de véhiculer de l'information (de la voix, des données informatiques ou la vidéo) d'une source vers la destination. Depuis les années 90 ces réseaux passent de la communication analogique filaire vers des réseaux numériques sans fil [Pujole 2001]. Les paragraphes suivants permettent de faire le point sur les différentes techniques de communication et leurs caractéristiques. Ces techniques en liaison avec notre thématique touchent principalement deux domaines : les communications radio et les communications optiques.

2.1.13 Les communications radio

2.1.13.1 Les systèmes de radiodiffusion

2.1.13.1.1 RDS

Le RDS (Radio Data System) est un système de diffusion de données par la radio permettant d'envoyer des informations, transportées en plus du signal audio normal en modulation de fréquence grâce à une sous-porteuse de la FM. Les services RDS actuellement disponibles sont :

- 1) AF (Fréquence Alternative) : Sélectionne automatiquement la fréquence qui offre la meilleure réception du programme écouté.
- 2) EON : En cas de diffusion d'un message (TA), l'autoradio passe automatiquement d'une station n'émettant pas d'informations routières sur une station de radioguidage.
- 3) PTY (Program Type) : Cette fonction est de plus en plus utilisée par les stations de radiodiffusion. Elle permet la recherche des stations en fonction d'un type de programme présélectionné (p.ex. informations, rock, sport etc.)
- 4) RT (Radiotexte) : Informations complémentaires de la station concernant le programme diffusé (p.ex. titre de l'émission, nom de l'interprète etc.)
- 5) TA (Traffic Announcement) diffuse des informations routières au volume pré réglé, même si vous êtes à l'écoute d'une autre source sonore (CD-changeur Aux) ou si la radio est mise en veille.
- 6) TP (Traffic Program) désigne une station offrant le radioguidage.

2.1.13.1.2 DAB

Le monde de la diffusion effectue également sa mutation de l'analogique vers le numérique grâce aux deux systèmes DAB (Digital Audio Broadcasting) et DVB (Digital Video Broadcasting.)

Le système EUREKA 147-DAB est un système de transmission du son numérique. Il supplantera le système analogique de modulation de fréquence. Une fréquence de multiplexage unique autorisera la transmission de données, d'images, de vidéos et autorisera des développements d'application multimédia avec un débit de 1.7 Mbit/s [Ishigami 1999].

Les bandes passantes passent de 9.6 kbps pour le GSM à 384 kbps pour l'UMTS (Universal Mobile Communication System.) Le WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) quant à lui permettra un taux de transfert de 2 Mbps.

2.1.13.1.3 DVB

Les spécifications de la norme du DVB définissent un ensemble de moyens permettant la diffusion de tous types de données, accompagnées d'informations les concernant sur tous types de médias. Par exemple le DVB-S pour le DVB par satellite, le DVB-C pour le câble, le DVB-T pour la partie télévision terrestre hertzienne.

Le DVB est basé sur le codage MPEG-2 (Motion Picture Expert Group) qui autorise des flux d'informations de 1.5 Mbit/s pour la télévision pouvant atteindre 10 Mbits/s.

Ce standard est essentiellement destiné à la télévision numérique de demain.

2.1.13.2 Les systèmes cellulaires d'origine européenne

2.1.13.2.1 GSM

Le GSM (Global System for Mobile Communication), norme de téléphonie mobile Européenne, est devenu de facto un standard mondial, plus d'une centaine de pays l'ayant adopté à travers le monde. Il utilise 2 fréquences, 900 MHz et 1,8 GHz (1,9 GHz aux USA) et peut transmettre des données Internet à une vitesse de 9,6 kbit/seconde (56 kbit/seconde pour un modem de base Internet). Il peut aussi transmettre des messages SMS (Short Message Service).

2.1.13.2.2 GPRS

Le GPRS (General Packet Radio Service) est une évolution des réseaux GSM avant le passage à la troisième génération. En terme d'architecture, les deux réseaux fonctionnent en parallèle : le premier pour le transport des données, le second la voix. Ils utilisent les mêmes équipements. La différence réside dans l'ajout au GSM de routeurs de paquets de données dédiés à la gestion des mobiles. L'interface radio utilise les mêmes bandes de fréquence que son prédécesseur.

2.1.13.2.3 UMTS

Fin 2000, le GSM compte 380 millions d'utilisateurs pour une couverture quasi mondiale. C'est la troisième génération de téléphone mobile ou 3G, annoncé avec un débit de 2 Mbps, l'UMTS permettra de surfer sur Internet à haut débit à partir de téléphones mobiles, en autorisant notamment la transmission d'images vidéo. Il est prévu 2 milliards d'utilisateur à l'horizon 2010.

2.1.13.3 Les autres systèmes cellulaires

2.1.13.3.1 DSRC

Le DSRC (Dedicated Short Range Communication) est un standard de diffusion d'informations par l'intermédiaire des ondes radar d'une largeur de bande de 75 MHz à 5.9 GHz allouée par US FCC (Federal Communications Commission) pour augmenter la sécurité et la productivité des systèmes de transport. Le DSRC est une variante de la technologie IEEE 801.11a [802.11 1999] et [802.11a 1999] permettant la communication entre un ou plusieurs objets en mouvement et un site fixe principalement pour de la communication véhicule à véhicule et véhicule bord de route. Le Tableau 0.1 et la Figure 0.1, extraits du site officiel américain consacré au DSRC, donnent les principales caractéristiques de la bande de fréquence 5.850 à 5.925 MHz en comparaison avec la bande 900 MHz . Le lecteur doit se rappeler que seules les normes américaines permettent l'utilisation de cette bande de fréquence avec une telle puissance.

Paramètres	902 - 928 MHz	5850 - 5925 MHz
Spectre	12 MHz (909.775 à 921.75 MHz)	75 MHz
Débit de l'information	0.5 Mbps	6 Mbps - 27 Mbps
Couverture	Une seule communication dans la zone	
Interférence	Téléphone portable 900 MHz Radar Rail Car AEI Readers Spread Spectrum Devices	Radar Militaires qlq satellites
Portée max.	100m à 30 dBm	1000m
Portée usuelle		100 à 300m
Nbr de canaux	1 à 2	7
Puissance liaison descendante	40 dBm (10W)	33 dBm (2W)
Puissance liaison montante	6 dBm (4mW)	33 dBm (2W)

Tableau 0.1 Comparaison des caractéristiques entre les bandes utilisées par les systèmes de transports intelligents

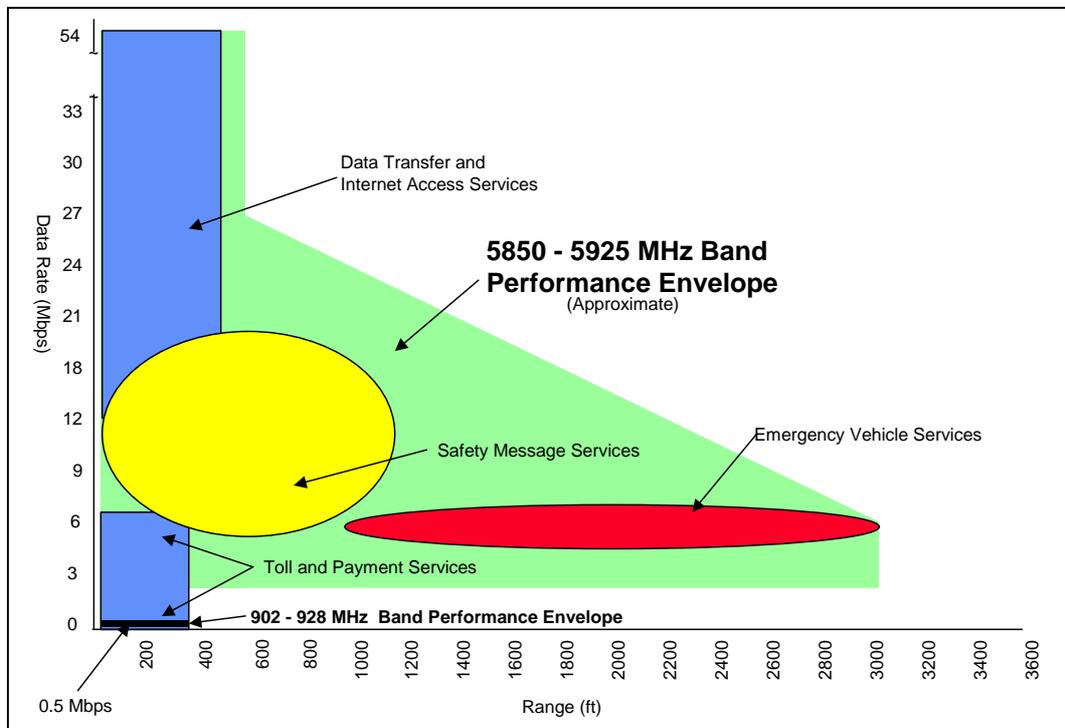


Figure 0.1 Portée effective en fonction du débit de l'information d'un DSRC.



En Europe le DSRC est notamment utilisé pour le télépéage à 5,7 GHz.

Il est utilisé au Japon pour de la communication véhicule à véhicule [Xu 2002][Xu 2003][Xu 2004].

Un dispositif DSRC acoustique a été décrit par [Sabounghi 1999]

2.1.13.4 Les réseaux privés sans fil

2.1.13.4.1 Bluetooth : IEEE 802.15

Le groupe IEEE 802.15 intitulé WPAN (Wireless Personal Area Networks) a été mis en place en mars 1999 pour normaliser des réseaux d'une portée d'une dizaine de mètres avec pour objectif de réaliser des connexions entre PC portable, téléphone portable, et PDA (Personal Digital Assistant.) Au sein d'un véhicule il sera utilisé pour établir des communications avec l'ordinateur de bord de l'automobile.

Bluetooth exploite la bande des 2,45 GHz sans licence d'utilisation. La bande est divisée en 79 canaux de 1MHz à partir des 2,45 GHz. En France, seuls 23 canaux sont accessibles. Le nombre de machines connectées est limité à seize, le temps de connexion étant d'une seconde. Le débit entre deux machines est de 433,9 kbit/s en communication bidirectionnelle, 732.2 kbit/s et 57.6 kbit/s pour des communications déséquilibrées. La puissance d'émission est d'une 100 milliwatt, elle peut être réduite à 2mW pour des communications sur 1mètre. Il existe cependant un risque non négligeable d'interactions possibles avec les futurs systèmes de communication sans fil installés par les constructeurs automobiles.

2.1.13.4.2 WIFI : 802.11

En 2001 le premier standard international pour les réseaux locaux sans fil WLAN (Wireless Local Area Network), l'IEEE 802.11, est publié. C'est la norme du standard de communication WIFI (Wireless Fidelity) [802.11 1999] basée sur un réseau de bornes radio autorisant entre autre une connexion à Internet à très haut débit.

Les fréquences utilisées sont dans la gamme 2,45 GHz sans licence d'exploitation. Le débit est de 11 Mbit/s. La norme affiche des portées de 150m dans un environnement de bureau, 600m sans obstacle et 1,5 km avec une antenne extérieure. Les principales évolutions de la norme vers le 802.11a et 802.11b concernent le passage à l'utilisation de la bande des 5,2 GHz ce qui autorisera des débits de 6 à 54 Mbit/s [802.11a 1999] [802.11b 1999].

Le WIFI va concurrencer l'UMTS, grâce à une infrastructure qui pourrait rapidement équiper des lieux publics (gares, aéroports) et qui sera compatible avec les PDA et les ordinateurs portables actuels.

Pour des raisons de confidentialité, encore peu d'articles consacrés au transport intelligent font état de validations expérimentales d'utilisation du WIFI pour de la communication. Il est évoqué par Renault dans le cadre de la maintenance et du service après-vente [Ségarra 2003].

2.1.14 Les communications optiques

2.1.14.1 Code à barres

Le code à barres à été inventé et breveté aux USA en 1949 sans application pratique. A ce jour, il existe plus de 40 typologies différentes construites à partir de barres sombres, parallèles, séparées par des espaces dont le nombre, la largeur, l'espacement et l'arrangement définissent la structure modulaire d'un caractère.

Le code à barres présente de nombreux avantages par rapport à d'autres techniques de communication ou d'identification automatique:

1. La redondance, la même information existe sur toute la hauteur du code, il est très résistant aux défauts d'impression et aux conditions d'utilisation.
2. La fiabilité de la lecture est d'une erreur pour 2 millions³.
3. Grâce aux lecteurs Laser, une lecture au vol est possible à quelques mètres pour un déplacement de plusieurs mètres par seconde.

4. Le prix de revient demeure faible.

Différentes normes métiers ont été développées : les produits de grandes consommations répondent à la norme EAN (European Article Number), les fournitures automobiles à GALIA, les produits pharmaceutiques au standard CIP, etc... De nombreuses symboliques (cf. Annexe 3 : Les principales symbologies des codes à barres page 180) parmi lesquelles il est parfois difficile de faire son choix ont été élaborées en fonction de critères variés tels que la densité d'impression, la dimension du symbole, le code numérique ou alphanumérique.

Pour résumer, le code 16K permet l'encodage de 80 caractères, le DATAMATRIX permet, quant à lui, l'encodage de 1759 caractères ASCII.

Certains produits mixtes présentent à la fois des étiquettes à code à barres et un transpondeur (produit intellitag [Intermec_2004].)

Ce code à barres peut paraître anecdotique mais il a été utilisé pour réaliser un train de camions dans le cadre du projet européen CHAUFFEUR. Le code à barres est situé sur la bâche arrière du premier camion conduit de façon traditionnelle, le second à l'aide d'une camera et d'un ensemble d'algorithmes de reconnaissance de forme peut s'y accrocher et réguler son allure sur celle du véhicule situé devant lui [Schulze 1997]. L'analyse d'images utilisée pour l'expérimentation autorise une distance entre les véhicules entre 5 et 15 mètres [Stiller 1999].

Dernièrement un constructeur automobile français a fait état de l'utilisation de codes à barres peints sur la chaussée pour communiquer au chauffeur des informations de communications routières. Ces codes utilisent 4 ou 5 bandes blanches disposées en travers de la chaussée et lues par des capteurs optiques placés sur le pare-choc du véhicule [Citroën_2004]. Ces capteurs sont également utilisés pour réaliser un système de "Surveillance de Trajectoire Latérale" notamment pour autoroute et voie rapide.

2.1.14.2 Infra Rouge

La lumière infra rouge a quasiment les mêmes propriétés que la lumière visible. Elle peut être facilement focalisée ou au contraire rendue diffuse. Elle est largement utilisée par les différentes télécommandes de téléviseur, lecteur de CD, la communication entre ordinateurs IrDA (Infrared Data Association) etc. A ce jour, il est possible de transmettre un signal jusqu'à 300 mètres avec un débit de données de l'ordre de 35 Mégabits par seconde avec moins de 50 mW de consommation.

³ Pour comparaison, une saisie clavier génère 2 à 3 % d'erreur.

Un véhicule a été équipé d'un système de communication par IR pour l'analyse et la gestion du trafic [Tajima 2003]. La communication avec le véhicule est possible jusqu'à 70 Km/h. Elle permet une vitesse de transmission de 1.024 kbps (10 ko) sur la liaison descendante et 64 kbps (256 octets) pour la montante. La zone de couverture obtenue est présentée en Figure 0.2.

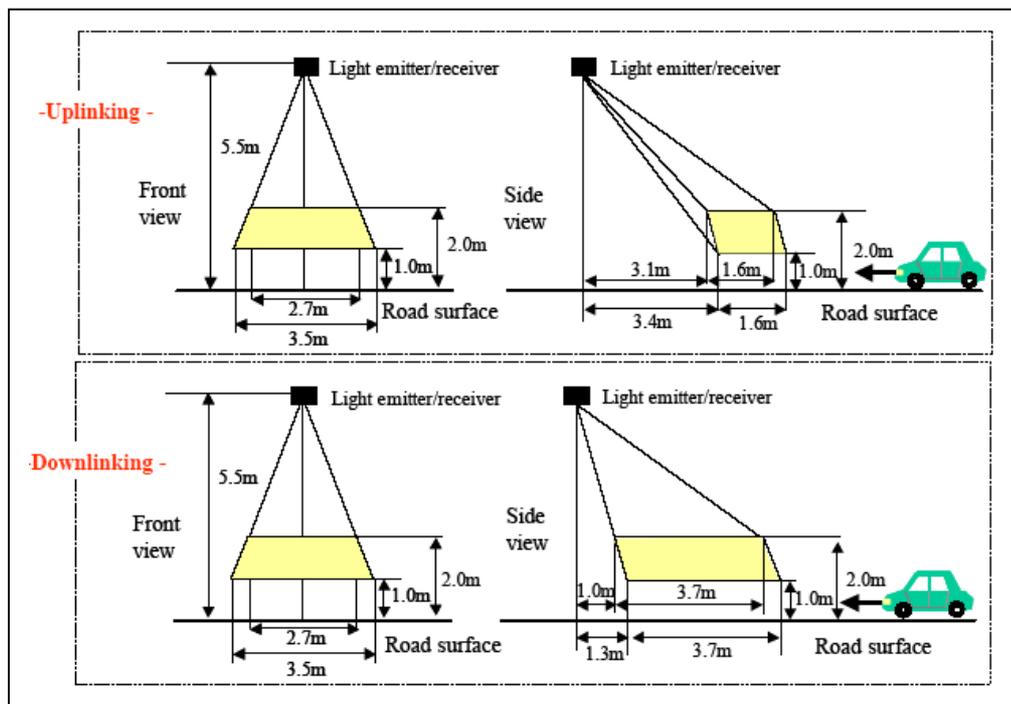


Figure 0.2 Zone de couverture obtenue avec les IRVD (Infrared Vehicle Detectors) au Japon [Tajima 2003].

Un ensemble d'applications de communication de véhicule à véhicule, de véhicule-infrastructure permettant l'identification du véhicule ou de son propriétaire, a été développé à partir de cette technologie par exemple paiement automatique de parking [Staudinger 2003b].

Les caractéristiques de communication entre un système broadcast FM et Infra-rouge ont par ailleurs été analysées [Miyata 2003].

Sur le réseau allemand, cette technique est utilisée pour permettre la communication entre des 1 million de camions et 278 véhicules légers [Staudinger 2003a].



Figure 0.3 Communication IR entre Camion et véhicule [Staudinger 2003a].

État de l'art concernant l'utilisation des transpondeurs

2.1.15 Principe

Ce sont des dispositifs électroniques de type TRANSMetteur/rÉPONDEUR utilisant une communication sans contact entre l'élément fixe (le lecteur ou base station) et l'élément déporté (le Transpondeur). D'une façon générale, ces dispositifs sont principalement utilisés pour des applications d'identification, d'antivol, et de suivi de production. Ils portent alors les noms de RFID (Radio Frequency Identification) ; TAG pour étiquette électronique sans contact ou carte à puce.

L'architecture de ces dispositifs, rappelée dans l'article [IBM 1999b], est constituée d'un étage de modulation/démodulation du signal support de la communication, d'un étage de mémorisation des informations transmises par le signal modulant ou des informations stockées localement et d'une intelligence locale dévolue à un microcontrôleur. Le transpondeur peut être actif ou passif suivant qu'il est alimenté ou non. Dans le deuxième cas, il devra alors être auto-alimenté par le signal véhiculant l'information.

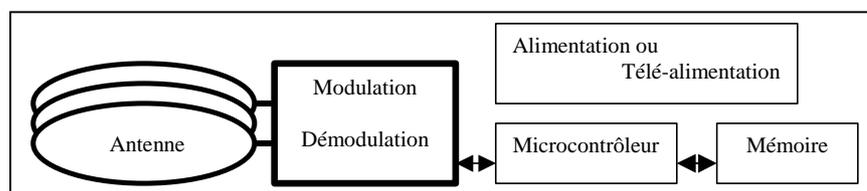


Figure 0.1 Architecture de principe d'un transpondeur

Le transpondeur communique avec la base station qui aura en charge la gestion de l'application avec le système hôte. Le lecteur sera généralement constitué d'une partie analogique regroupant :

- 1) Un oscillateur local accordé sur la fréquence d'émission du signal informatif.
- 2) Un modulateur-démodulateur pour transmettre ou recevoir les messages numériques.
- 3) Un amplificateur de puissance adapté à l'antenne d'émission réception.

Puis d'une section numérique composée :

- 1) D'un microcontrôleur pour la gestion des protocoles de communication, des collisions, du cryptage décryptage des informations, et de l'application elle-même
- 2) Des interfaces de communication avec le système hôte : I2C (Inter Integrated Circuit), CAN (Controller Area Network), Ethernet [Perdriau 2000].
- 3) Et d'une mémoire locale.

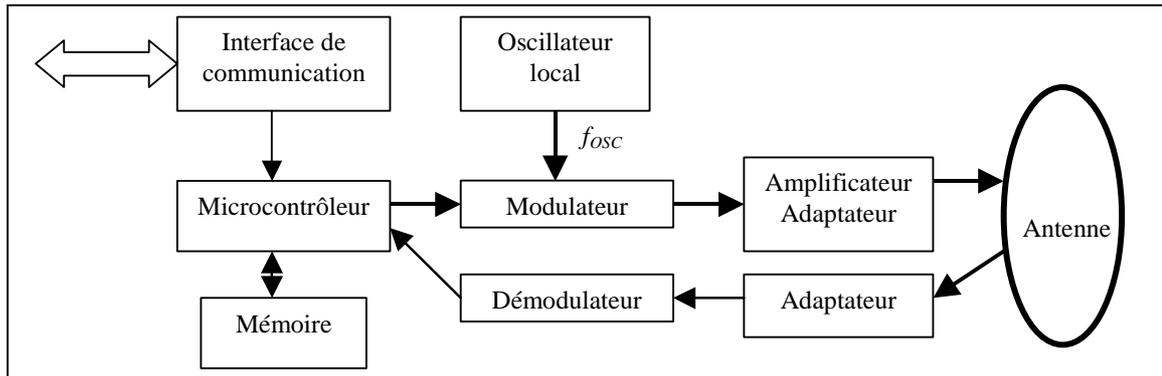


Figure 0.2 Architecture de principe de la base station ou lecteur

La communication entre le transpondeur et le lecteur s'effectue par couplage électromagnétique entre les antennes.

2.1.16 Classification des transpondeurs

L'utilisation des transpondeurs sous sa forme étiquettes intelligentes RFID peut être recensée dans de nombreux domaines d'application. La classification de ces derniers est délicate car de nombreux paramètres pourraient être utilisés pour effectuer ce classement : la fréquence, le type de données, le type de modulations, les passifs ou les actifs, etc.

Dans un premier temps seront présentés des exemples d'application basée autour des fréquences : - 125 kHz; -13.56 MHz; -443, 886 et 9xxMHz; -et enfin à 2.45 ou 5.8 GHz voire 60 GHz [Paret 2001]. Il est évident qu'avec ce seul critère, certaines applications peuvent se retrouver dans plusieurs classes.

Puis dans un deuxième temps seront détaillées quelques caractéristiques de transpondeurs mises en jeu dans ces applications.

2.1.16.1 Utilisation du transpondeur en fonction des fréquences

2.1.16.1.1 Applications 125 kHz

a) Secteur automobile

La première utilisation concerne l'antidémarrage du véhicule grâce aux immobiliseurs directement intégrés dans la clé de contact ou avec la télécommande HF permettant l'ouverture du véhicule. A

titre d'exemple, les systèmes entrée et démarrage mains libres, RKE (Remote Keyless Entry) PKE (Passive Keyless Entry) et PKS (Passive Keyless Start) ont été développés par Renault.

Issue d'autres domaines applicatifs, celui des cartes en tous genres (de fidélité, de maintenance, de service), la première carte de santé du véhicule à été développée lors du programme de R&D ESPRIT MONOLIN EP 6936 de Renault [Ségarra 1996a] ayant comme support le démonstrateur "PISEME Plate-forme d'Intégration et de validation SÉrvices par Mémoire Embarquée" [Lonc 1996], [Ségarra 1996b] et [Plainchault 2000]. Des dispositifs de mesure de pression directement intégrés aux pneumatiques utilisent également cette technique.

De nombreuses applications sont également développées dans le cadre des systèmes de transports intelligents. Des applications comme :

1. L'identification du véhicule par son VIN (Vehicle Identification Number);
2. Le contrôle de trafic,
3. La détection du non arrêt au feu rouge,
4. La mesure de la vitesse,
5. Le paiement automatique

peuvent être envisagées avec cette technique du RFID et ont été répertoriées dans un article prospectif [IBMC 1999a].

b) Applications industrielles

Les principales applications concernent les systèmes d'alarme et ou d'antivol pour magasin EAS (Electronic Alarm Surveillance), les dispositifs d'identification animale pour réaliser des systèmes de suivi de consommation d'alimentation, de production de lait, de respect de la chaîne du froid. Les industriels de la Blanchisserie utilisent ces étiquettes pour identifier l'origine des draps d'hôtels ou de vêtements professionnels. Tous les arbres de la ville de Paris sont sous surveillance à l'aide de transpondeurs, ceux-ci sont utilisés par les agents de la municipalité pour connaître les différents opérations réalisées (arrosage, traitement, etc...). De plus, de nombreuses applications de localisation ont été développées. Des produits TIRIS ont été utilisés afin de faciliter la navigation à pied des agents EDF, des postes etc. [Kato 1999a] et [Kato 1999b].

Bien évidemment cette étiquette est largement utilisée dans le domaine du contrôle d'accès : accès aux immeubles, parkings, zones de sécurité, aéroports ...

Le marché du livre s'est également approprié l'utilisation des tags [Hicks 1999]. En effet chaque ouvrage étant identifié par son ISBN (International Standard Book Number) stocké dans le transpondeur lui-même noyé dans la couverture de l'ouvrage, il est alors envisageable de gérer les mouvements d'entrées/sorties des oeuvres en bibliothèque. Grâce aux antennes disposées

directement dans les rayonnages, il est alors possible de faire rapidement l'inventaire, de connaître ou d'indiquer le positionnement des ouvrages sur les étagères.

Le suivi de palettes, repérage de bouteilles de gaz grand public (butane, propane) et professionnel (médical, azote liquide); l'identification d'objets d'art, de tableaux, de meubles, de paires de skis neuves ou en location; le suivi de documents, de chariots, de bagages, de containers 19 pieds; le codage des produits présents dans un supermarché sont également des applications utilisant ces étiquettes électroniques.

La lutte contre les contrefaçons et le marché parallèle des produits de luxe sont des secteurs mettant à profit ces composants miniatures d'identification.

2.1.16.1.2 Applications 13.56 MHz

C'est la bande ISM (Instrumentation Scientific Medical) largement utilisée pour des applications telles que :

a) La Carte à puce sans contact

- Porte-monnaie électronique (pré paiement parking), le "pay par view" TV.
- Applications Télécom : les publiphones en Extrême-Orient, l'identification des droits d'accès à des données personnelles dans les GSM.
- Transport, des cartes multi-application principalement utilisées pour la gestion de la billetterie ou comme des cartes pour des billets d'avion, des forfaits de stations de sports d'hivers ou encore pour autobus (cf. les démonstrateurs du projet européen DISTINCT Deployment an Integration of Smart Card Technology and information Networks for Cross Sector Telematics, déployé à Thessaloniki en Grèce [Mustafa 1999].)
- Contrôle d'accès : le projet de la poste supprime l'usage des passes "T25" et les remplace par un badge sans contact infalsifiable qui doit être rechargé avant chaque vacation du facteur [VIGIK].

b) Suivi, traçabilité

Quelques applications : suivi de paquets, de flotte de véhicule (locations, Poste, camion de société..), de bagages d'avion, identification d'objet pour grande surface, contrôle de flux, surveillance électronique, antivol de sortie de magasin [IBMC 2000].

c) Papiers officiels

Cartes nationales d'identité, passeports, permis de conduire, cartes grises, cartes santé, cartes de fidélité auront dans la trame du papier des transpondeurs sans contact permettant entre autres d'enregistrer des caractéristiques biométriques telles que le fond de rétine, empreintes digitales des propriétaires.

2.1.16.1.3 Applications 443, 886 et 9xxMHz

Les applications suivantes peuvent être évoquées:

- Système de télécommande RKE pour ouverture centralisée de portière, de portail.
- Identification à grande distance.
- Pression des pneumatiques.

2.1.16.1.4 Applications hyperfréquences 2.45 GHz ou 5.8 GHz

La principale application dans cette bande de fréquence concerne le télépéage autoroutier.

Une application de communication vers des mobiles est présentée par [Konishi 1999] en s'appuyant sur les travaux de conception d'antennes à 5.8 GHz [Kago 1998].

L'application de paiement à partir du transpondeur installé sur le véhicule (560 000 en fin 2003) est généralisée sur la voie 407 au nord de Toronto [Nassereddine 2003]. Il permet une identification automatique du véhicule au passage du portique d'accès à l'autoroute. En cas de défaut, un dispositif de reconnaissance des numéros de la plaque minéralogique vient permettre l'identification. Paradoxalement l'article est centré sur les dispositifs imaginés pour lutter contre la fraude.

Enfin la fréquence de 60 GHz a récemment été utilisée pour interroger un transpondeur par un radar [Sato 2003].

2.1.16.2 Exemples de transpondeurs

2.1.16.2.1 Transport

a) "*Fahrsmart*" et "*Fahrsmart II*"

Sous l'impulsion du ministère de l'éducation et de l'industrie dans les années 1990/91 un premier projet d'utilisation des étiquettes intelligentes est déployé en Allemagne dans les transports publics : le projet pilote "*Fahrsmart*". Ce premier projet sera poursuivi en 1996 par le projet "*Fahrsmart II*", basé sur l'utilisation de la technologie MIFARE de la société Philips. L'objectif principal de ce

projet est d'identifier les habitudes de transport des usagers (parcours, heures d'utilisation, ...) afin d'optimiser le trafic et la facturation. De retour au dépôt, toutes les informations collectées par l'ordinateur embarqué dans les bus sont automatiquement fournies au serveur pour exploitation par l'intermédiaire d'une liaison infrarouge.

Dans la même année, à Séoul en Corée du Sud, un important système électronique de gestion de la billetterie AFC (Automatic fare collection) a été déployé.

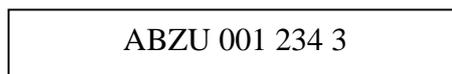
b) Eurobalise S21

Concernant le transport ferroviaire européen, les différents pays possèdent leurs propres systèmes de contrôle et d'identification des wagons et locomotives. L'Union européenne a donc décidé de développer un système unique de contrôle et d'identification des trains : ETCS (European Train Control System) qui doit permettre l'interopérabilité des différents matériels ferroviaires et ainsi accroître la compétitivité du réseau ferroviaire européen.

En janvier 1995, après de nombreux essais, les spécifications ont été arrêtées : l'alimentation est assurée par un couplage magnétique à 27.115 MHz. Les données sont transférées à 4.24 MHz, entre le transpondeur logé entre les rails et le lecteur présent sur la locomotive. Le système permet de lire des données en modulation FSK à la vitesse maximale de 500 km/h.

c) Transport international de containers

Les containers de fret pour le transport international sont identifiés par un code alphanumérique peint sur un coté du container.



ABZU 001 234 3

Figure 0.3 Identifiant d'un container

30% des codes des 7millions de containers marqués sont erronés [Siedelmann 1997].

Des transpondeurs sont maintenant utilisés pour identifier les containers. Numéro d'identification, poids, longueur, largeur, hauteur, type de container, ces informations sont normalisées depuis 1991 (ISO 10374). Les transpondeurs sont des transpondeurs actifs dont la batterie a une durée de vie de 10 ans.

128 bits en 2ms et à 13 mètres peuvent être lus à partir du transpondeur.

d) Gestion de la gare routière de Toulouse

Dans le cadre de la gestion de la gare routière de Toulouse, l'utilisation d'étiquettes HYPER.ID de la société BALLOGH permet d'assurer les fonctions :

- de détection des emplacements occupés du parking de la gare routière,
- d'identifier les bus sur leurs emplacements,
- d'annoncer les arrivées des bus aux voyageurs



Figure 0.4 Utilisation des produits HYPER.ID de la société Ballogh pour la gestion de la gare routière de Toulouse.

2.1.16.2.2 Identification animale

L'identification des animaux existe depuis plus de vingt ans et a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Elle est obtenue grâce à l'utilisation de transpondeur afin d'optimiser, et ceci de façon individuelle, les consommations de fourrage ou encore de calculer la quantité de la production de lait. Ces systèmes peuvent aussi servir pour les contrôles vétérinaires en cas d'épidémie, contribuer à la mise en place des procédures d'assurance qualité, et assurer la traçabilité des origines de l'animal [Artmann 1999].

En 1996 les normes ISO 11784 et ISO 11785 régissent l'utilisation des transpondeurs ou étiquettes électroniques pour l'identification radio fréquence des animaux. Cette normalisation permet à n'importe quel lecteur de lire n'importe quel transpondeur. Ainsi, l'article [Jansen B. 1999] présente les résultats du groupe de travail international ISO/TC23/SC19/WG3 ayant eu en charge l'élaboration de ces normes. Cet article décrit notamment les différentes formes de transpondeur pouvant être utilisées et satisfaisant toutes les exigences de sécurité nécessaires à cette utilisation :

- A fixer sur un collier.
- Sous forme d'une capsule de verre 1.2 à 3.8 mm de diamètre et de 12 à 32 mm de long pouvant être injecté dans l'oreille de l'animal.
- La version bol alimentaire pouvant être ingéré par un bovin. Dans ces deux dernières formes, le transpondeur ne pourra être extrait de l'animal qu'après une intervention chirurgicale
- L'étiquette d'oreille dans laquelle se trouve le transpondeur et sur laquelle est également disposé le code à barres d'identification du troupeau.

La description du code 64 bits et de ses caractéristiques techniques, permettant d'exploiter ces transpondeurs à 134,2 kHz, a été largement publiée dans la littérature [Kampers 1999].

Des transpondeurs sont également utilisés dans le domaine de la colombophilie. En effet les pigeons sont tracés par une bague située sur la patte gauche. Cette bague contient un transpondeur dans lequel pourront être lus les coordonnées du site et le numéro d'identification du pigeon. Pendant les courses, ce numéro permettra de multiples applications telles que l'enregistrement de l'animal, le calcul du temps de parcours, l'ouverture de la cage, etc.

L'étude des mouvements des tortues dans le désert en Californie est réalisée depuis 1994. Ces tortues passent par des couloirs bien identifiés et spécialement aménagés [Boarman 1994]. Des transpondeurs passifs, situés sur la carapace des tortues, ont été utilisés pour surveiller le

déplacement de ces tortues et pour vérifier qu'elles utilisaient bien ces zones de passages aménagées sous l'autoroute [Boarman 1998].

Des transpondeurs passifs ont aussi été utilisés pour une meilleure compréhension du comportement des saumons en milieu naturel [Armstrong 1996].

Des études ont montré la bio-compatibilité du transpondeur sur l'animal. Une étude a été menée sur 15 chiens et pendant 16 semaines par radiographie. Cette étude consistait à analyser la migration des différentes capsules contenant des transpondeurs en fonction du lieu d'implantation et de la technologie de la capsule [Jansen J.A. 1999]. Les résultats montrent que le déplacement est principalement fonction du lieu initial d'injection et indépendant du type de capsule. Les zones subissant de fortes contraintes mécaniques (colonnes, dos, membres) ne doivent pas être utilisées pour recevoir les injections sinon les transpondeurs se déplaceront.

2.1.16.2.3 Les immobiliseurs

Les constructeurs automobiles sont les plus grands utilisateurs de dispositifs d'antidémarrage pour véhicules automobiles. Le transpondeur est logé dans le corps de la clé de contact. L'antenne du lecteur est disposée autour du barillet à l'intérieur d'une bague de ferrite (Figure 0.5). Lorsque le conducteur insère la clé dans le dispositif de blocage, le transpondeur baigne dans le champ magnétique concentré par la ferrite. Le système de contrôle peut alors lire le code d'identification. Après authentification, il autorisera ou non le démarrage du moteur. Cette phase de communication doit être terminée lorsque le conducteur a fini de tourner la clé de contact. Il ne doit pas y avoir de période d'attente entre l'arrivée en butée de la clé et le démarrage du moteur.

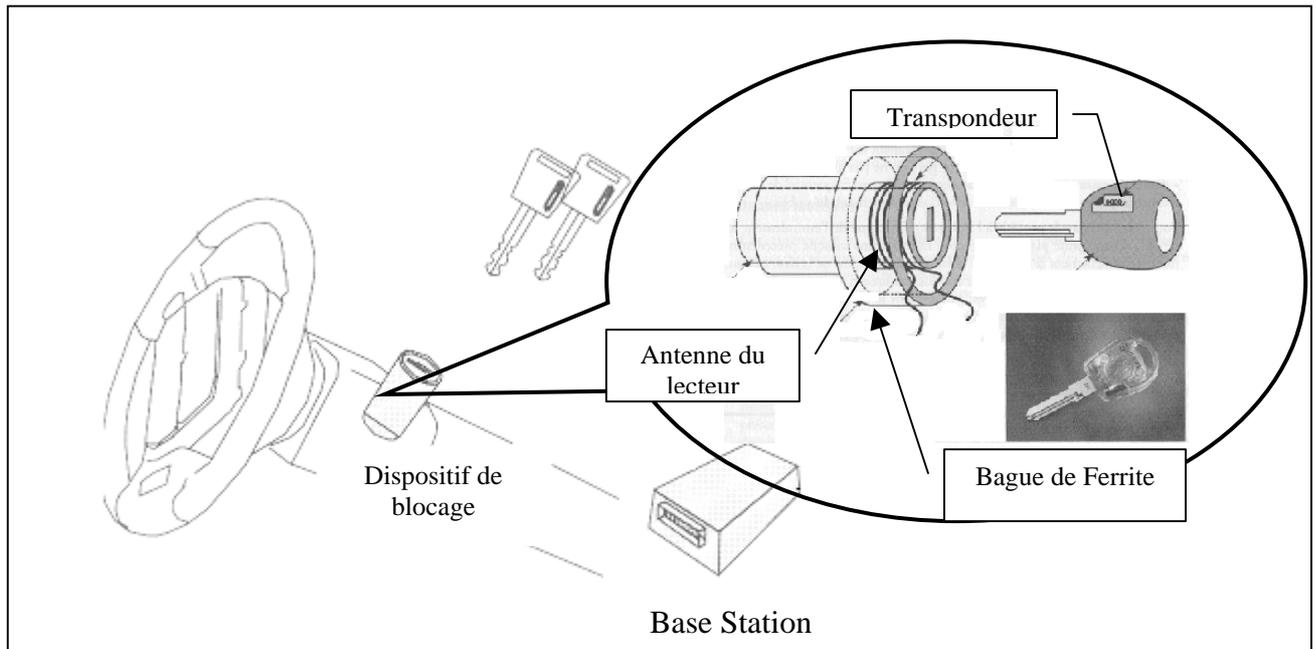


Figure 0.5 Architecture d'un immobiliseur pour véhicule
[Paret 2003][Finkenzeller 1999]

2.1.16.2.4 La marine marchande

Officiellement le Ministère des transports du Royaume-Uni a annoncé le 19 novembre 1996 l'utilisation de transpondeurs pour permettre une identification automatique des bateaux notamment pour les navires citernes naviguant au large de la côte Nord de l'Écosse et transportant des matières dangereuses ou polluantes [Heah 1996].

2.1.16.2.5 Exploitation agricole

Dans le domaine de l'agriculture intensive, des transpondeurs TIRIS de Texas Instrument ont été utilisés pour réduire les coûts d'exploitation de la récolte de la canne à sucre au Brésil [Lane 1997]. 9.3 millions de tonnes de sucre et 11 billions de litres d'alcool sont dérivés de ce produit. Cette production se déroule pendant six mois de l'année, 24heures/24 et 7jours/7. Les données de gestion sont directement relevées dans les champs, dans les stations de pesage et durant le déchargement des camions. Par exemple, le fait de pouvoir identifier les camions à l'aide d'étiquettes RFID permet, entre autres, un gain de sept minutes à chaque rotation des camions. Initialement, il fallait compter 10 minutes et six codes à barres pour effectuer cette opération.

2.1.16.3 Synthèse

Le Tableau 0.1 et le Tableau 0.2 résument les principales caractéristiques techniques et de mise en œuvre des transpondeurs industriels [Plainchault 2001].

Technologie	Etiquette Radio Active	Etiquette radio Passive			
		125 KHz	13,56 MHz		2,48 GHz
Fréquence	UHF & Hyper	125 KHz	13,56 MHz		2,48 GHz
Application	Etiquettes industrielles	Etiquettes industrielles	Etiquettes industrielles	Etiquette souple	Etiquette souple
Source d'énergie	Pile ou batterie intégrée dans l'étiquette	Courant induit	Courant induit	Courant induit	Onde Radio
Capacité mémoire	qlq octets à plusieurs kilo	64 bits à 4 ko	64 bits à 8 ko	256 à 512 bits	1024 bits
Distance de lecture	1 à 10 m	1cm à 50 cm	1cm à 50 cm	1cm à vol 1 m3	10 cm à 1 m (dérogation ART)
Format de l'étiquette	boîte d'allumette	tous types de packaging	timbre poste à boîte d'allumettes	carte de visite	timbre poste à carte de visite
Coûts /100000	qlq 15 €	> 1 €	>2 €	> 0,10 €	> 7,5 €

Tableau 0.1 Principales caractéristiques des transpondeurs en fonction de la fréquence de la porteuse

Et

Caractéristiques/ Fréquences	125 kHz à 150 kHz	13,56 MHz	800 / 900 MHz	2,45 GHz
Technologie d'antenne	<i>Bobine aérienne</i> Boucle sur Ferrite	Boucle Imprimée, Perforée, Gravée	<u>Boucle Imprimée, Perforée, Gravée</u>	Antenne Imprimée,
Distance de lecture et écriture	<u>> 1m sur ferrite</u> <u>sinon qlq cm</u>	<u>Europe : Max 1 m</u> <u>US > 0,8</u>	<i>Europe non utilisable (GSM)</i> <i>US de 1m à 10 m</i>	France < 0.5m (1m avec dérogation) US > 1m
Vitesse de transfert	<u>< 10 kb/s</u>	<u>> 100 kB/s</u>	<u>> 100 kB/s</u>	<u>> 200 kB/s</u>
Influence du métal	<i>Espace > 50 mm</i> <u>= 90%</u>	<u>Espace > 50 mm</u> <u>= 90%</u>	<u>Espace 10 mm</u> <u>= 100%</u>	<u>Espace 5 à 7 mm</u> <u>= 100%</u>
Influence de l'eau	Aucune	<u>Atténuation</u>	<u>Atténuation</u>	<i>Perturbation</i>
Influence du corps humain	Aucune	<u>Atténuation</u>	<u>Atténuation</u>	<i>Perturbation</i>

Légende *Médiocre* Bon **Excellent**

Tableau 0.2 Principales caractéristiques des transpondeurs en fonction de la fréquence de la porteuse (suite)

Ces tableaux montrent que :

- Dès que la distance de dialogue doit être supérieure au mètre, les transpondeurs doivent être alimentés.
- En Europe, la puissance autorisée pour la fréquence de 2,45 GHz, ne permet qu'une portée de 50cm.
- A 13,56 MHz le débit peut être de l'ordre de 100 kb/s.
- L'influence du métal ou de l'eau dépend de la fréquence de la porteuse. Pour le métal et pour une porteuse à 13,56MHz, la présence d'un objet métallique à 50 mm du transpondeur entraîne une atténuation de 90% du signal. Pour une fréquence de 2.45 GHz, si du métal est situé de 5 à 7 mm, l'atténuation est totale.

Bilan de la bibliographie

2.1.17 La précision

Les besoins de précisions en fonction du type d'application ont été décrits et précisent que pour des applications de guidage latéral, de maintenance de l'état de surface de la chaussée les précisions doivent être de 1 cm à 50 cm [Tremlett 2003].

Cette précision ne pourra jamais être obtenue avec un GNSS seul. Le projet GALLANT (Galileo for safety of Life Application of driver assistance in road Transport) aura pour intérêt d'évaluer la qualité et la précision de la localisation latérale et longitudinale qui pourront être obtenues avec un système global de navigation [Lilli 2003] couplé avec différents capteurs embarqués dans le véhicule : tachymètre, odomètre, et gyroscope [Jordàn 2003]. En effet, pendant la perte du signal des satellites, dans les tunnels, les parkings couverts, en ville, la localisation sera assurée par les informations issues de ces différents capteurs. Cette fusion de données issues de capteurs multiples couvre aujourd'hui un large domaine de recherche. Pour les raisons évoquées ci-dessus, il semblerait que la meilleure solution pour le positionnement soit l'utilisation d'un capteur inertiel combiné au positionnement par satellites GNSS [Ubeda 2003]. Mais cette solution reste très onéreuse.

Pour des applications uniquement centrées sur le secteur urbain telles que la gestion de flotte dans les villes, la localisation est moins facile même avec un DGPS notamment à cause des réflexions sur les immeubles ou bien le masquage des satellites, il a été montré que l'utilisation du DGPS

n'était pas suffisante pour réaliser un système de guidage dynamique performant [Zhaosheng 1999]. Il est alors nécessaire d'utiliser des bases de données embarquées [Parent 2002] et [Awasthi 2003]. Pour conclure sur ce sujet, Bouygues Télécom imagine actuellement l'utilisation d'un système hybride GNSS et de positionnement cellulaire pour assurer un service de base performant et peu onéreux [Sansone 2003].

2.1.18 Bases de données

Les bases de données embarquées couplées à un système de localisation ne sont pas suffisamment précises et rapides pour permettre un suivi de trajectoire. Elles sont actuellement utilisées pour de la navigation, la précision de 10 mètres étant suffisante. Une nouvelle base de données va être réalisée en Finlande sur 500 000 Km avec une précision de 1 à 3 mètres [Juslén 2003]. Le délai de remise à jour de la base est imposé et doit être au maximum de 1 à 3 mois. Pour obtenir des nouveaux modèles de base de données plus précises et plus rapides, de nouveaux capteurs devront être développés pour atteindre cet objectif [Baum 2003].

2.1.19 Conditions climatiques

Les conditions climatiques peuvent venir perturber le bon fonctionnement des différents capteurs. Comme l'a présenté l'article [Kurata 2003], la qualité des images IR sera excellente tant que le temps restera beau ou couvert. En présence de pluie ou de brouillard, le contraste entre le véhicule et la route ne sera plus suffisant pour permettre une analyse de l'image. De même, la caméra vidéo ne sera plus utilisable en cas de mauvaise visibilité occasionnée par le brouillard, la neige ou la pluie.

Autre exemple, les radars fonctionnant à 60 GHz verront la propagation de leur faisceau très atténuée par la présence d'oxygène dont le spectre d'absorption est maximal pour cette bande de fréquence [Sato 2003]. En "Annexe 4 : Atténuation due aux gaz de l'atmosphère et à la pluie." sont présentées deux figures donnant les atténuations en dB/km dues aux gaz atmosphériques et à la pluie en fonction de la fréquence de propagation [Fernandez 1991]. Curieusement, l'influence de la température ambiante n'est pas évoquée dans aucuns des différents articles observés.

2.1.20 Encombrement

La littérature fait état d'un certain nombre de dispositifs et services centrés sur l'identification des véhicules nécessitant une mise en œuvre d'une infrastructure lourde à déployer : des portiques et des mats support. Le paiement automatique en est un parfait exemple. Un tel système est implanté sur l'autoroute 407 et développé dans les années 1980-1990 à Toronto. Les deux portiques légèrement encombrants sont disposés à chacune des rampes d'entrée et de sortie de l'autoroute (Figure 0.1), [Nassereddine 2003].



Figure 0.1 Portique supportant les lecteurs des transpondeurs et les caméras vidéo

Il est également présenté les systèmes imaginés pour résister aux attaques de malveillance que subissent ces différents matériels!

2.1.21 Type de communication

Le Tableau 0.1 présente une comparaison entre les différents outils de communication sans fil [Jiménez 2003]. La technologie WI-FI permet un débit maximum de 54 Mbps libre de droit sans licence. Par contre il y aura un compromis entre le débit et la portée.

Nom d'usage	3G	Bluetooth	WI-FI	WI-Max	Mobile-FI
Nom officiel	WCDMA CDMA 2000		802.11	802.16	802.20
Vitesse de transfert (Mbps)	2	0.72	54	10 à 100	16
Licence	Oui	Non	Non	Les deux	Oui
Avantages	La portée		Très bon marché, meilleure vitesse	Longue portée	Mobile
Inconvénients	Relativement lent et onéreux	Très courte portée (10m), Interférence avec d'autres équipements	Portée trop courte (100, 300m sans obstacles, vitesse véhicule lente	Interférence avec d'autres équipements	Trop onéreux

Tableau 0.1 Comparaison entre les différentes technologies sans fil

Sans reprendre la théorie de la propagation des ondes micrométriques, il faut se rappeler que la transmission des ondes micrométriques est principalement caractérisée par le taux de réflexion au niveau des interfaces ou changement, c'est à dire le rapport entre les ondes transmises ou réfléchies [Sato 2003].

Le chapitre suivant portera sur l'expression des principaux aspects théoriques nécessaires au développement d'un transpondeur tels les principes physiques liés à la communication par induction magnétique, l'optimisation des couplages et l'identification des paramètres déterminant la qualité de la transmission.

3 TRANSPONDEURS : THÉORIE ET DÉVELOPPEMENT

Le chapitre précédent a montré la nécessité, pour de nombreuses applications liées à la route communicante et aux systèmes de transport intelligents, de pouvoir localiser les véhicules et de communiquer avec ces derniers. Ces objectifs peuvent être atteints en déployant dans l'infrastructure un outil permettant la communication locale avec le véhicule : *le transpondeur*.

Ce chapitre 3 a pour objectif :

- De présenter les différents principes, techniques et paramètres régissant le fonctionnement d'un transpondeur. L'étude portera principalement autour de l'utilisation d'un transpondeur dans la bande ISM à 13,56 MHz pour les raisons qui seront évoquées plus avant. Quelques considérations concernant le lecteur du transpondeur seront abordées en fin de ce chapitre.
- Et de mettre en place tous les outils nécessaires à la résolution de l'étude de cas qui sera abordée au chapitre 4.

Remarque: dans la suite de ce manuscrit, les courbes ont été tracées à l'aide de simulations Matlab, les schémas électroniques ont été saisis à l'aide d' ORCAD et si nécessaire simulés avec SPICE.

Principes physiques du transpondeur

L'étude de la propagation des ondes électromagnétiques distingue deux cas : le champ proche ou le champ lointain. La distinction est donnée en regard de la distance d séparant la source de rayonnement du point de mesure et la longueur d'onde λ du signal utilisé.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (0.1)$$

avec $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ la vitesse de la lumière

et f la fréquence d'émission en Hertz.

La limite entre le champ proche et le champ lointain est donnée par le rapport : $\lambda/(2\pi)$.

f	MHz	0,125	13,56	2450
λ	m	2400	22,12	0,12
Limite champ proche; champ lointain : $\lambda/(2\pi)$	m	382,2	3,5	0,02

Tableau 0.1 Limite entre champ proche champ et le champ lointain en fonction de la fréquence du signal.

3.1.1 Champ magnétique.

3.1.1.1 La loi de Biot et Savart

Considérons un circuit filiforme C orienté, parcouru par un courant permanent d'intensité I . Il crée en un point M de l'espace une induction magnétique \mathbf{B} . Si dl est un élément du circuit au point P , la loi de Biot et Savart permet de calculer \mathbf{B} par l'intégrale curviligne :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I \vec{dl} \wedge \vec{u}}{R^2} \text{ en Tesla} \quad (0.2)$$

avec $R = PM$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ et $\vec{u} = \frac{PM}{R}$.

Le champ magnétique est donné par la relation : $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ H en A/m.

3.1.1.2 Champ magnétique émis par une spire circulaire

Le champ ou l'induction magnétique émis par une antenne de N spires (l'épaisseur des N spires doit rester très inférieure au rayon de cette dernière) sont exprimées à l'aide de la loi de Biot et Savart (0.2)

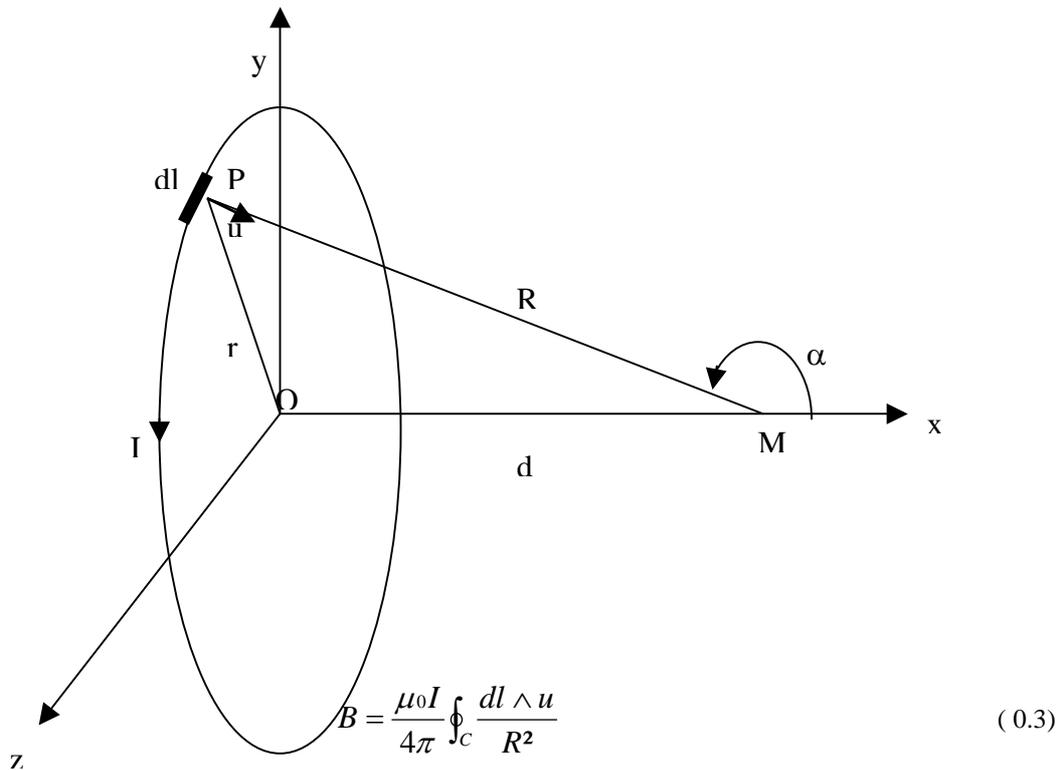


Figure 0.1 Champ magnétique en un point M sur l'axe d'une antenne circulaire de rayon r.

Considérons en P l'élément dl parcouru par le courant I . Le champ magnétique obtenu en M est l'intégrale curviligne sur l'ensemble de la spire.

Soit sur l'axe de la spire :

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{dl \wedge R}{R^3} \tag{0.4}$$

R est une constante lors de l'intégration

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^3} \oint_C dl \wedge R \tag{0.5}$$

avec $R = PM = PO + OM$

$$\oint_C dl \wedge R = \oint_C dl \wedge PO + \oint_C dl \wedge OM \quad (0.6)$$

$$\oint_C dl \wedge PO = r \oint_C dl \quad (0.7)$$

$$r \oint_C dl = 2\pi r \quad (0.8)$$

$$\oint_C dl \wedge OM = 0 \quad (0.9)$$

D'où

$$B = \frac{\mu_0 N I r^2}{2R^3} \quad (0.10)$$

En posant

$$r = R \sin \alpha \quad (0.11)$$

$$B = \frac{\mu_0 N I \sin^3 \alpha}{2 r} \quad (0.12)$$

Ou sous une autre forme :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2} \frac{r^2}{(r^2 + d^2)^{3/2}} \quad (0.13)$$

Induction magnétique B exprimée en Tesla.

En prenant $N = 1$, $I = 0,5A$, nous montrons que le champ au milieu de l'antenne sera plus intense pour un rayon faible (Figure 0.2.) Par contre pour établir une communication à distance, il sera nécessaire d'utiliser une antenne d'un plus grand rayon.

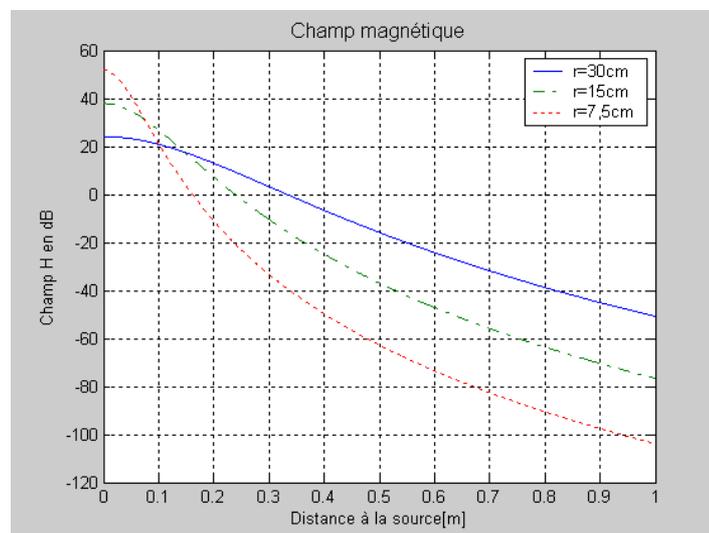


Figure 0.2 Variation du champ magnétique en fonction de la distance à rayon de la spire r constant.

La Figure 0.3 présente la variation du champ magnétique pour trois valeurs de rayon d'antenne 30, 15 et 7,5 cm. Dans chaque cas, le nombre de conducteurs et le courant sont les mêmes.

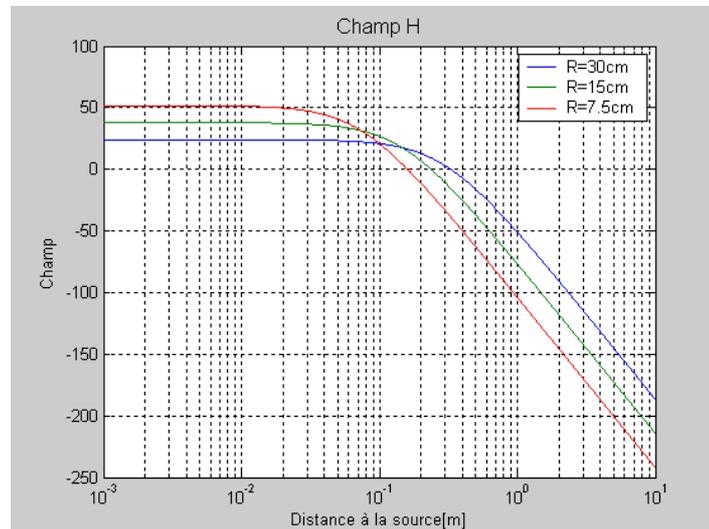


Figure 0.3 Variation du champ magnétique en fonction de la distance à la spire suivant l'axe de l'antenne pour trois valeurs de rayon d'antenne.

3.1.1.3 Diamètre optimal de la bobine

En dérivant l'équation (0.13), nous pouvons montrer qu'il existe, à rayon fixe, une distance optimale d pour laquelle ce champ magnétique est maximal. La Figure 0.4 illustre cette variation du champ magnétique en fonction du rayon de la spire de l'antenne. Ce champ passe par un maximum pour :

$$r = d \cdot \sqrt{2} \quad (0.14)$$

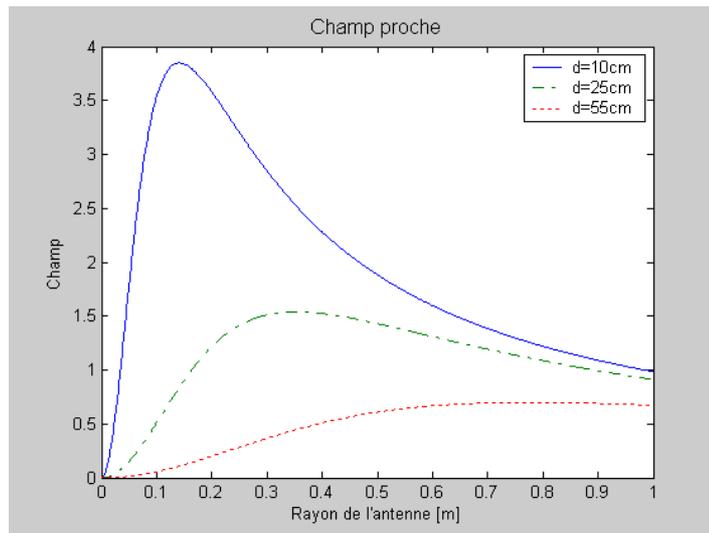


Figure 0.4 Variation du champ magnétique en fonction du rayon de la spire pour une distance de lecture d de 10, 25 et 55cm.

3.1.1.4 Antenne circulaire ou rectangulaire ?

Pour des raisons de mise en œuvre, il est parfois plus simple de réaliser une antenne rectangulaire de dimension a, b . L'expression du champ magnétique devient :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot ab}{4\pi \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + d^2}} \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + d^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + d^2} \right] \quad (0.15)$$

Pour identifier la meilleure forme possible, il faut minimiser les pertes par effet Joule dans la résistance ohmique de l'antenne. Il doit donc être obtenu une surface la plus grande possible pour un périmètre minimum. Nous avons montré que la forme la mieux adaptée est alors le cercle (0.16) [Plainchault 2000].

$$\left(\frac{\text{Surface}}{\text{Périmètre}} \right)_{\text{cercle}} = \frac{r}{2} \qquad \left(\frac{\text{Surface}}{\text{Périmètre}} \right)_{\text{carré}} = \frac{a}{4} \quad (0.16)$$

A surface égale, $\pi \cdot r^2 = a^2$

$$\left(\frac{\text{Surface}}{\text{Périmètre}} \right)_{\text{carré}} = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \cdot r < \left(\frac{\text{Surface}}{\text{Périmètre}} \right)_{\text{cercle}}$$

3.1.1.5 Effet de peau

Le champ se propageant dans les matériaux bitumeux s'affaiblit exponentiellement suivant une loi

en $\exp\left(-\frac{z}{\delta}\right)$ dans laquelle $\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega \cdot \mu}}$ est l'épaisseur de peau du signal à la fréquence f se

propageant dans le conducteur [Latrach 2003].

La composition des matériaux de chaussées, en particulier celle des enrobés bitumineux, comporte une forte densité de granulats et une proportion négligeable de vide. Dans les conditions de laboratoire, ces matériaux sont quasi secs. Le comportement diélectrique de ces matériaux de chaussée a été caractérisé par des travaux du LCPC dans une bande de fréquence de 0,2 à 30 GHz [Fauchard 2001]. Sur cette bande de fréquences le comportement s'apparente à celui des roches sèches pour lesquelles une loi⁴ empirique relie la permittivité effective réelle à la densité de la roche $\epsilon'_e = (1.91)^\rho$ où ρ est la densité du matériau [Olhoeft 1979].

Pour les matériaux de chaussée :

1. La permittivité relative ϵ_r réelle varie de 4,68 à 6,12.
2. La conductivité σ est de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} S/m.

⁴ Cette loi se base sur la mesure de 114 échantillons lunaires, 261 minéraux et 367 roches.

	Conductivité s/m σ	Fréquence MHz f	Épaisseur de peau m δ
Eau de mer	4	0,01	4,46
		0,1	1,41
		13,56	0,12
		2450	0,01
Eau pure	2,66E-05	0,01	1730,07
		0,1	547,10
		13,56	46,98
		2450	3,50
Matériaux bitumeux	0,01	13,56	2,42
		2450	0,18

Tableau 0.2 Épaisseur de peau à différentes fréquences pour l'eau de mer et l'eau pure.

Le Tableau 0.2 montre qu'une onde électromagnétique à la fréquence de 2,45 GHz ne peut se propager que dans 1 cm d'eau salée contre 12 cm pour une fréquence 13,56 MHz. Pour de l'eau pure, cette distance de propagation passe à 3,5m. Enfin que cette onde hyperfréquence ne peut se propager que sur 18 cm à l'intérieur des matériaux bitumeux.

Après ces considérations physiques du couplage magnétique, il est nécessaire de regarder le comportement électrique des antennes.

3.1.2 Le couplage électromagnétique

Dans la suite de la présentation, nous utiliserons les notations des différents paramètres synthétisés dans le Tableau 0.3 ci-dessous.

Paramètre	Notation	Unité
Rayon de l'antenne	r	m
Résistance antenne lecteur	R_1	Ω
Inductance antenne lecteur	L_1	H
Courant dans l'antenne du lecteur	i_1	A
Tension d'excitation de l'antenne	u_1	V
Mutuelle inductance	M	sans unité
Coefficient de couplage	k	sans unité
Résistance antenne TRanspondeur	R_2	Ω
Inductance antenne TRanspondeur	L_2	H
Courant dans le transpondeur	i_2	A
Tension induite dans le transpondeur	u_2	V

Tableau 0.3 Notations utilisées dans ce chapitre

3.1.2.1 Mutuelle induction M

Lorsqu'un circuit électronique est parcouru par un courant électrique, il crée un champ magnétique H et une induction magnétique B dépendants des propriétés électromagnétiques du milieu (0.2). Cette induction provoque un flux magnétique Φ dans une surface S :

$$\Phi = BS \quad (0.17)$$

Si le champ varie, il induit une différence de potentiel dans la boucle égale à :

$$u(t) = -d\Phi / dt \quad (0.18)$$

Lorsque le flux magnétique créé par la bobine du primaire parcourt celle du secondaire, la mutuelle inductance M est déterminée dans un circuit non accordé par (Figure 0.5) :

Au primaire :
$$V_1 - jM\omega I_2 = I_1(R_1 + jL_1\omega)$$

et au secondaire :
$$-jM\omega I_1 = I_2(R_2 + jL_2\omega)$$

Soit

$$M = \sqrt{L_2 L_1} \quad (0.19)$$

Le transfert maximal d'énergie a lieu pour :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} \quad (0.20)$$

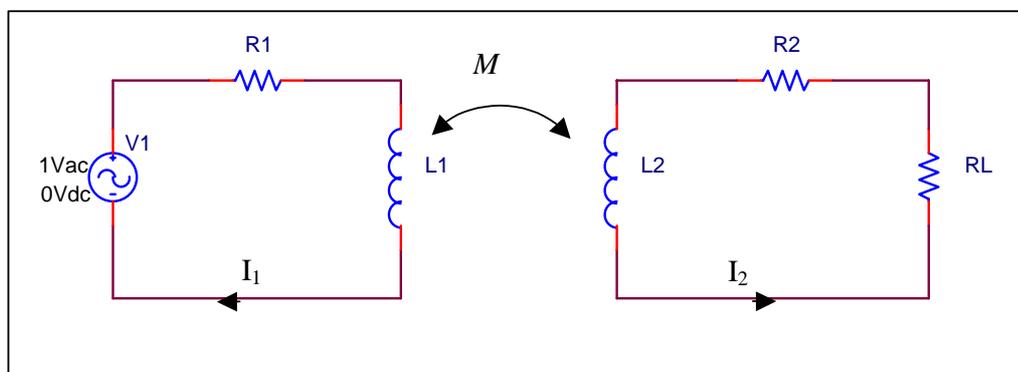


Figure 0.5 Circuits couplés non accordés.

3.1.2.2 Coefficient de couplage k

Dans le cas réel, le flux total généré par la bobine du primaire ne passe pas en totalité dans la bobine du secondaire. Il existe un rapport entre le flux utile et le flux total : c'est le **coefficient de couplage k** en %. Il est alors possible de définir une nouvelle mutuelle induction M' telle que :

$$k = \frac{\phi_{utile}}{\phi_{total}} = \frac{M'}{M} = \frac{M'}{\sqrt{L_1 L_2}} = g(d, r) \quad (0.21)$$

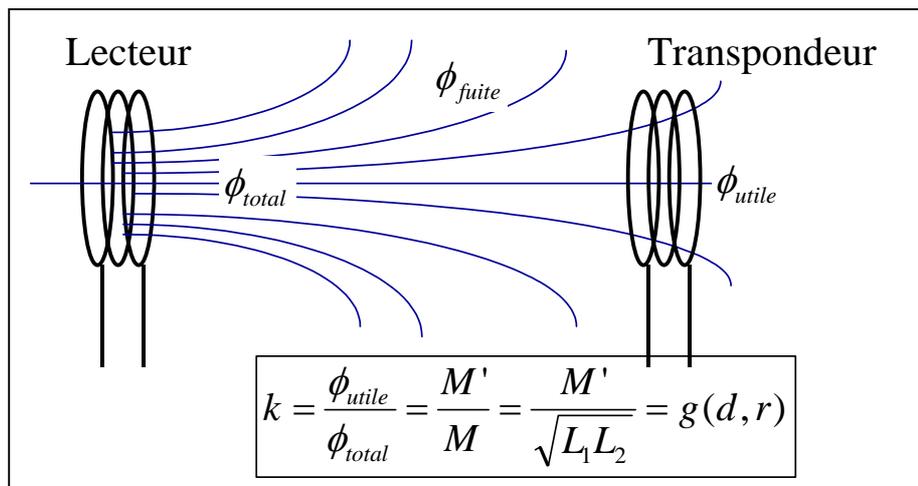


Figure 0.6 Cas réel, seule une partie du flux généré par l'antenne du primaire passe dans le secondaire.

Si N_1 et N_2 sont respectivement les nombres de tour des bobines du primaire (la base station) et du secondaire (le transpondeur), la nouvelle valeur de la mutuelle induction M' donne :

$$M' I_1 = N_2 \Phi_2 = N_2 B S_2 \quad (0.22)$$

Elle peut alors être exprimée (0.13) en fonction du rayon r de l'antenne du lecteur et de la distance d entre les antennes :

$$M' = N_2 \left| \frac{\mu N_1}{2} \frac{r^2}{(r^2 + d^2)^{3/2}} S_2 \right| \quad (0.23)$$

Soit en revenant à l'expression (0.21) :

$$k = \mu \frac{r^2}{2(r^2 + d^2)^{3/2}} N_1 N_2 S_2 \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Qui peut s'écrire sous la forme :

$$k = \mu \frac{r^2}{2(r^2 + d^2)^{3/2}} S_2 \sqrt{\frac{N_1^2 N_2^2}{L_1 L_2}}$$

(0.24)

Ce qui fait apparaître les valeurs d'inductance par tour L_{01} au primaire et L_{02} au secondaire. En posant :

$$L_1 = L_{01} N_1^2 \text{ et } L_2 = L_{02} N_2^2$$

Dans le cas d'antennes circulaires et si le rayon de l'antenne du transpondeur est plus petit que celui de l'antenne de la base station, l'expression (0.24) peut s'écrire de la façon suivante :

$$k(d) \approx \frac{r_{Transp}^2 \cdot r_{Base}^2}{\sqrt{r_{Transp} \cdot r_{Base}} \cdot \left(\sqrt{d^2 + r_{Base}^2}\right)^3}$$

(0.25)

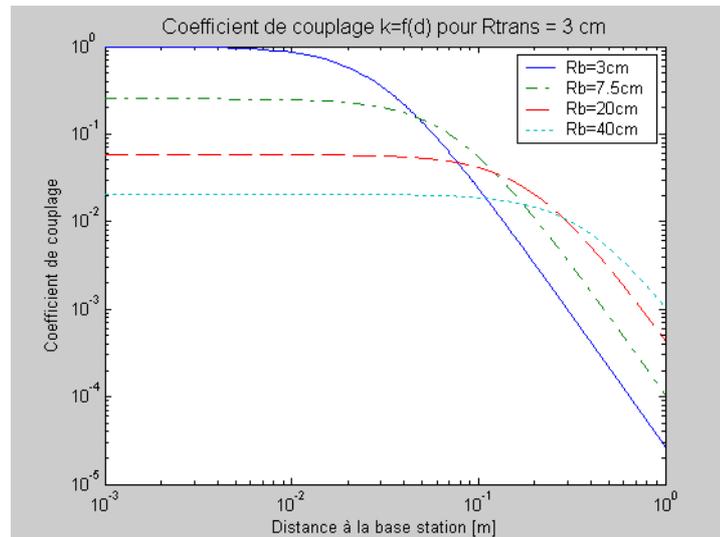


Figure 0.7 Évolution du coefficient de couplage en fonction de la distance séparant les antennes de la base station et du transpondeur.

Au regard de l'équation (0.24) et la Figure 0.7 nous montrons qu'une fois les caractéristiques des antennes de la base station et du transpondeur déterminées, le **coefficient de couplage dépendra uniquement de la distance** entre ces deux antennes.

3.1.2.3 Tension induite dans le transpondeur

Le circuit secondaire est maintenant accordé grâce à la capacité d'accord C_2 (Figure 0.8) sur une fréquence de résonance correspondant à celle de la porteuse telle que :

$$L_2 C_2 \omega_0^2 = 1 \quad (0.26)$$

La capacité C_2 sera en fait composée de la capacité parasite C_P au montage et de la véritable capacité d'accord C'_2 .

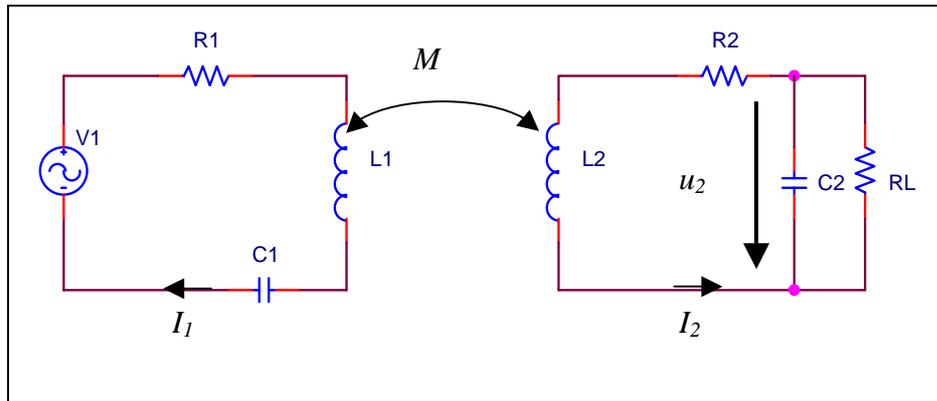


Figure 0.8 Valeur de la tension induite dans le cas du circuit couplé.

La tension secondaire u_2 peut s'exprimer par :

$$u_2 = \frac{j\omega M \cdot i_1}{1 + (j\omega L_2 + R_2) \cdot \left(\frac{1}{R_L} + j\omega C_2 \right)} \quad (0.27)$$

En tenant compte de la relation (0.21):

$$u_2 = \frac{j\omega k \sqrt{L_1 L_2} \cdot i_1}{1 + (j\omega L_2 + R_2) \cdot \left(\frac{1}{R_L} + j\omega C_2 \right)} \quad (0.28)$$

Soit l'expression du module :

$$|u_2| = \frac{\omega k \sqrt{L_1 L_2} \cdot |i_1|}{\sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2 \right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L} \right)^2}} \quad (0.29)$$

La Figure 0.9 présente la variation de la tension induite dans le transpondeur ainsi que celle du facteur de qualité Q en fonction de la variation de l'inductance de l'antenne du transpondeur. Pour

chaque valeur d'inductance L_2 , la fréquence de résonance est maintenue à 13,56 MHz. Les courbes ont été tracées pour des valeurs suivantes : $i_1 = 0.5 \text{ A}$; $R_L = 2 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 1\Omega$; $L_1 = 1\mu\text{H}$.

A l'aide de ces tracés nous montrons que :

1. La tension induite dans le transpondeur est maximale pour une certaine valeur de l'inductance de la bobine du transpondeur bien que ce dernier soit toujours accordé sur la fréquence de résonance retenue.
2. Toujours dans ces mêmes conditions d'accord, il existe une valeur de cette inductance maximisant le coefficient de qualité Q .

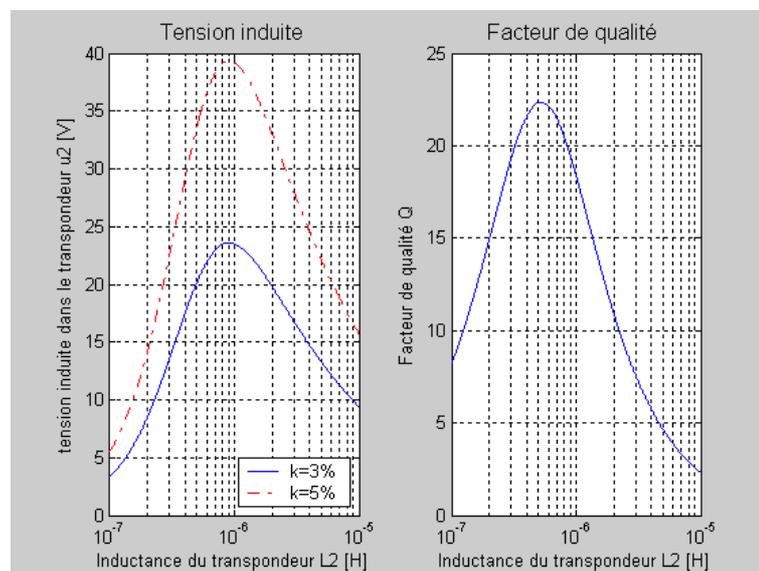


Figure 0.9 Variation de la tension induite u_2 dans le transpondeur et du facteur de qualité Q en fonction de la variation de l'inductance de l'antenne du transpondeur. La fréquence de résonance de 13,56 MHz est constante.

Du fait des propriétés d'un circuit accordé, il existe alors une valeur minimale du champ magnétique correspondant à cette fréquence de résonance.

La tension induite dans la bobine du transpondeur est donnée par :

$$u_2 = \mu \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \omega \cdot H$$

En reportant dans l'équation (0.27) car $u_2 = j\omega M' i_1$:

$$u_2 = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot H}{1 + (j\omega L_2 + R_2) \cdot \left(\frac{1}{R_L} + j\omega C_2 \right)} \quad (0.30)$$

Ce qui donne l'expression du module du champ magnétique en fonction de la tension induite:

$$H = \frac{u_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2\right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L}\right)^2}}{\omega \cdot \mu \cdot N_2 \cdot S_2}$$

(0.31)

Le circuit est accordé sur la fréquence de la porteuse (0.26) par exemple à 13.56 MHz, $i_1 = 0.5$ A; $N_1 = 1$; $r_1 = 20$ cm, $N_2=4$, $S_2 = 5$ cm*8cm, $R_L = 2$ k Ω ; $R_2 = 1\Omega$; $L_2 = 1\mu$ H et $u_2 = 3$ V.

Nous montrons alors La Figure 0.10 que :

1. si la fréquence de la porteuse évolue très légèrement,
2. ou bien si la fréquence d'accord du transpondeur vient à évoluer,

il sera nécessaire de disposer d'un champ plus intense pour compenser cette dérive.

De même, l'influence de la valeur de la charge du transpondeur est mise en évidence sur cette figure. Plus la charge est faible, plus le champ à la fréquence d'accord doit être important.

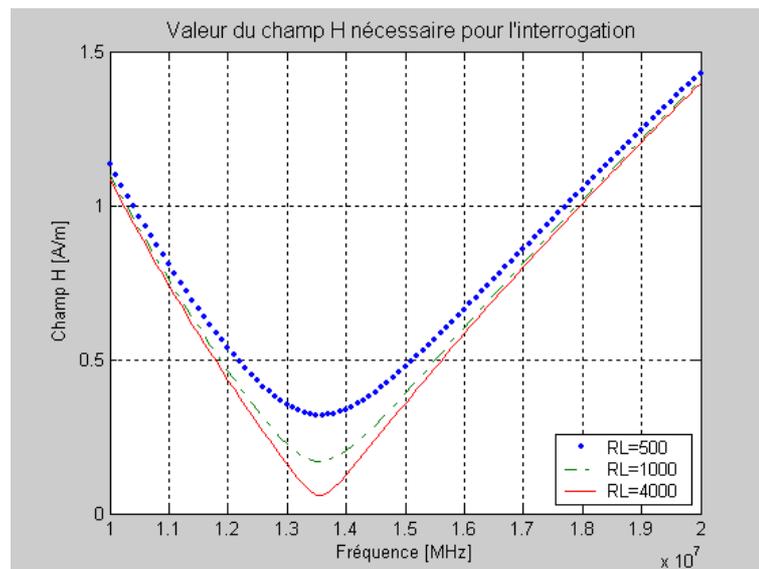


Figure 0.10 Valeur du champ en fonction de la fréquence d'interrogation pour un transpondeur accordé à 13.56 MHz.

Les différents points précédents se traduisent alors par une diminution de la distance de dialogue entre la source et le transpondeur. En effet, en tenant compte de (0.13) et (0.31), il est alors possible d'exprimer la distance correspondante au champ nécessaire.

$$d = \sqrt[3]{\left(\frac{i_1 \cdot N_1 \cdot r_1^2}{2 \cdot H}\right)^2 - r_1^2} \quad (0.32)$$

Nous montrons par exemple que pour une charge de 500Ω , la portée ne sera que de 35cm (Figure 0.11.)

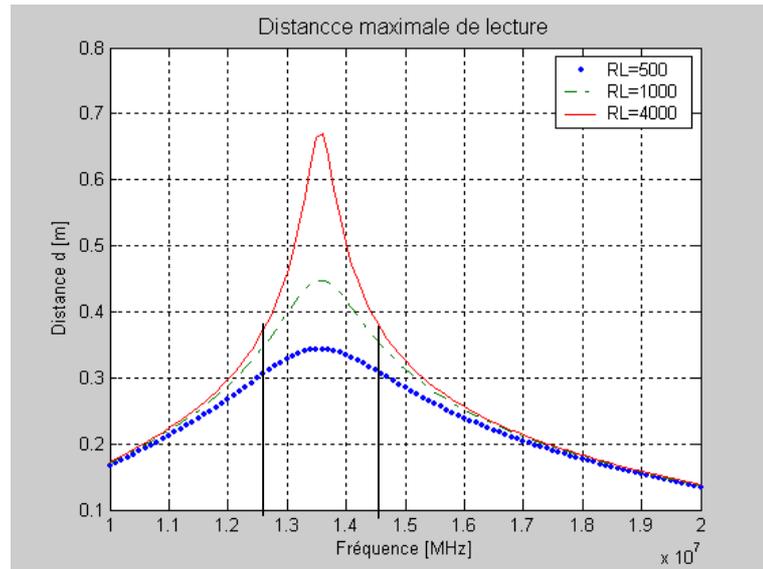


Figure 0.11 Variation de la distance de dialogue induite par une dérive de la fréquence de la porteuse.

Pour une charge de $4 \text{ k}\Omega$, une variation de 100 kHz autour de la fréquence de la porteuse entraîne une perte de 30 cm de distance de dialogue entre le lecteur et le transpondeur alors que pour une charge de 500Ω la perte sera seulement de 5 cm .

3.1.2.4 Champ magnétique de seuil minimal dans le cas du transpondeur accordé

En reprenant l'équation (0.31) et comme $\omega^2 L_2 C_2 = 1$

$$H = \frac{u_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{R_2}{R_L}\right)^2 + \frac{1}{L_2 C_2} \left(\frac{L_2}{R_L} + R_2 C_2\right)^2}}{\omega \cdot \mu \cdot N_2 \cdot S_2}$$

Et en utilisant la représentation parallèle équivalente du transpondeur, l'expression du champ H est alors :

$$H = \frac{1}{\omega \cdot \mu \cdot N_2 \cdot Q_p \cdot S_2} \quad (0.33)$$

En se plaçant dans le cas d'un transpondeur accordé à 13,56 MHz de dimensions d'antenne égales à 8cm x 4cm pour lequel on souhaite une tension induite de 3,3 V, la courbe montre qu'il n'est pas nécessaire de chercher à augmenter le facteur de qualité⁵.

Un facteur de qualité compris entre **30 et 40** nous semble être un bon compromis.

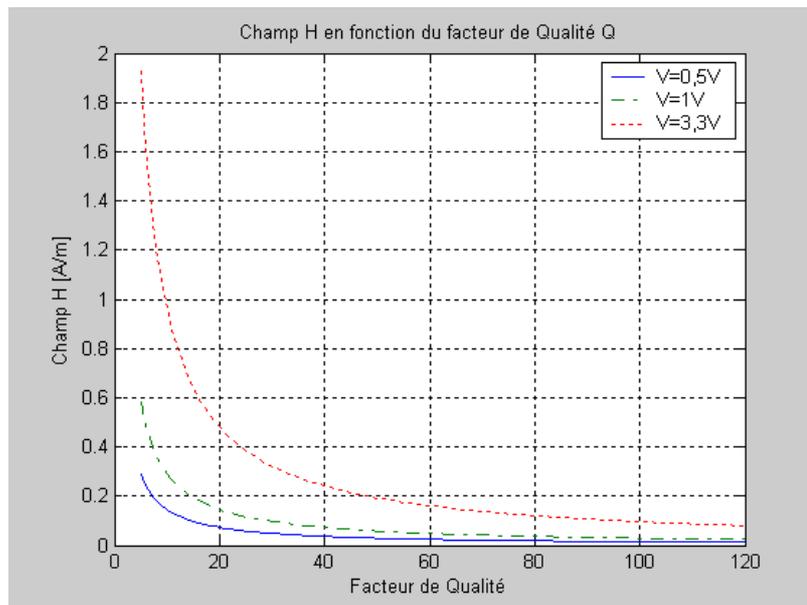


Figure 0.12 Variation du champ H minimal pour un transpondeur de 8 cm x 4 cm.

3.1.3 Propagation en champ lointain

Dès que la distance à la source d sera supérieure à $\frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$ soit **3,5m** pour une fréquence porteuse à **13,56 MHz** (Tableau 0.1), la loi de Biot et Savart n'est plus utilisable. Elle ne décrit que les phénomènes physiques en champ proche.

En champ lointain, l'onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s). Cette propagation est régie par la loi générale de propagation en champ libre dont l'atténuation est donnée par "l'équation des télécommunications". Soient P_a , P_R , G_E et G_R respectivement, la

⁵ du fait de l'allure hyperbolique

puissance de l'émetteur, du récepteur, le gain de l'antenne de l'émetteur et celle du récepteur, l'équation d'atténuation s'exprime par [Fernandez 1991]:

$$P_R = P_a \cdot G_E \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2$$

Soit :

$$a = 10 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2$$

$$a = 32,4 \text{ dB} + 20 \log(d(\text{km})) + 20 \log(f(\text{MHz}))$$

$$a = -147,6 \text{ dB} + 20 \log(d(\text{m})) + 20 \log(f(\text{Hz}))$$

(0.34)

Cette équation montre que les champs E et H varient en $1/d$.

Avec la relation entre les champs H et E :

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120 \cdot \pi \approx 377 \Omega$$

3.1.3.1 Puissance rayonnée maximale admissible

La norme française impose un champ magnétique rayonné à 10 mètres [EN 300 330 1994] :

$$H_{10m} = 42 \text{ dB}\mu\text{A/m. ou } H_{10m} = 125 \mu\text{A/m}^6.$$

(0.35)

Cette valeur de champ magnétique (0.35) peut être convertie en une valeur de champ électrique équivalente⁷ par :

$$E_{10m} = H_{10m} + 51,5 \text{ dB en dB } \mu\text{V/m}$$

Soit

$$E_{10m} = 93,5 \text{ dB } \mu\text{V/m}$$

$$E_{10m} = 47,4 \text{ mV/m}$$

⁶ $H(\text{dB}\mu\text{A/m}) = 20 \text{Log} \frac{H(\text{A/m})}{10^{-6}}$

⁷ $20 \log(120 \pi) = 51,5 \text{ dB}$

(0.36)

Le champ mesuré à la distance d , émis par une antenne dont le signal développe une puissance P_a est :

$$E \approx \frac{7 \cdot \sqrt{P_a}}{d} \quad (0.37)$$

En tenant compte de la valeur du champ E à 10 mètres, la puissance maximale émise par l'antenne compatible avec la norme est :

$$\boxed{\begin{aligned} P_{a \max} &\approx \left(\frac{E \cdot d}{7} \right)^2 \\ P_{a \max} &\approx 4,585 \text{mW} \end{aligned}} \quad (0.38)$$

Pour mémoire le champ magnétique maximal créé au centre de l'antenne et autorisé dans des applications dites longues distances a pour valeur [IEC 15693-1 1999], [IEC 15693-2 1999] :

$$\boxed{\begin{aligned} H_0 &= 5 \text{A/m} \\ B_0 &= \mu_0 \cdot H_0 \\ B_0 &= 20 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 33,79 \mu\text{Teff} \end{aligned}} \quad (0.39)$$

3.1.3.2 Résistance équivalente de rayonnement

Afin de satisfaire les normes, il est nécessaire de connaître la puissance émise par l'antenne de la base station fournissant cette puissance à 10 mètres : 4,585mW.

La puissance électrique devant être délivrée par la base station dans l'antenne représentée par sa résistance de rayonnement équivalente. Cette résistance représente la puissance "perdue" par rayonnement.

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot R_{ant} I_1^2$$

Avec dans le cas du dipôle magnétique [Latrach 2003b]:

$$P_a = \frac{4}{3} \pi^3 \cdot \left(N_1 \cdot \frac{S_1}{\lambda_p^2} \right)^2 \cdot I_1^2 Z$$

$$R_{ant} = \frac{320 \cdot \pi^4}{\lambda_p^4} \cdot (N_1 \cdot S_1)^2$$

(0.40)

Avec :

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_a \cdot c^4}{320 \cdot \pi^6 \cdot N_1^2 \cdot r^2 \cdot F_P^4}}$$

R_{ant} : Résistance de rayonnement équivalente.

I_1 : Le courant traversant cette résistance équivalente.

N_1 : Nombre de spires de l'antenne du lecteur.

S_1 : La surface de l'antenne du lecteur.

λ_p : la longueur d'onde de la porteuse

Architecture du transpondeur

3.1.4 Fréquences possibles et permises

Pour des applications de transpondeur RFID, il existe peu de bandes de fréquences libres :

- Quelques dizaines de kilohertz pour des applications antivol.
- La bande allant de 100 kHz à 135 kHz est réservée aux applications industrielles type courant porteur et pour l'identification animale.
- La bande ISM de 433 MHz

Dans le domaine des fréquences UHF et SHF, par exemple 2,45 GHz, la législation européenne impose une puissance d'émission inférieure à 10 mW contre 4 W aux USA! (Tableau 0.1). Il est rappelé qu'au Japon aucune puissance n'est autorisée dans la bande UHF.

La bande de fréquences UHF et SHF ne sera pas retenue dans la suite des travaux du fait :

1. De l'absorption par l'eau à ces fréquences : le facteur d'absorption dans l'eau à 100 kHz est 100 000 fois plus faible qu'à 1 GHz [Schürmann 1994].
2. De l'effet de peau
3. D'une puissance d'émission très faible n'autorisant pas la téléalimentation, ce qui oblige alors de disposer d'une source d'alimentation dans le transpondeur notamment pour l'oscillateur local. Ainsi pour disposer de 10 μ W dans le transpondeur, une communication à 10 mètres correspond à une atténuation de 60 dB, il faudrait une puissance de l'émetteur de 10 Watts.

La bande SHF nécessite l'utilisation d'une source d'alimentation; donc **elle ne sera pas retenue**.

La bande de 100 à 135 KHz est également rejetée car elle offrirait un débit d'information trop faible.

Le choix s'est donc porté sur l'utilisation de **la fréquence de la porteuse à 13,56 MHz**.

Ceci impose de respecter la législation française représentée par ART (Autorité de Régulation des Télécommunications) concernant l'usage des dispositifs SRD (Short Range Device) fonctionnant dans la bande ISM de 13,56 MHz. La contrainte principale concerne la non-pollution du spectre radiofréquences. Cette dernière est décrite dans la norme [EN 300 330 1994]. En respectant les

conditions de mesure indiquées, le champ magnétique **rayonné à 10 m** ne doit pas excéder **42 dBμA/m**.

Bande de fréquences	Remarque	Champ magnétique autorisé / Puissance transmise
< 135 kHz	Basse fréquence, couplage inductif	72 dBμA/m
6.765.. 6.795 MHz	Fréquence moyenne (ISM) couplage inductif	42 dBμA/m
7.400.. 8.800 MHz	Fréquences moyennes utilisées uniquement pour de la surveillance électronique d'article EAS	9 dBμA/m
13.553.. 13.567 MHz	Fréquences moyennes (13.56 MHz, ISM), couplage inductif, Largement utilisées pour Cartes sans contact (ISO 14443, MIFARE, LEGIC, ...), Étiquettes électroniques (ISO 15693, Tag-It, I-Code, ...) (ISO 18000-3).	42 dBμA/m
26.957 .. 27.283 MHz	Fréquences moyennes (ISM), couplage inductif, uniquement pour des applications spéciales	42 dBμA/m
433 MHz	UHF (ISM), backscatter coupling, rarement utilisé pour RFID	10.. 100 mW
868 .. 870 MHz	UHF (SRD), backscatter coupling, Bande à utiliser, en développement	500 mW uniquement en Europe
902 .. 928 MHz	UHF (SRD), backscatter coupling,, Nombreux systèmes	4 W USA/Canada uniquement
2.400 .. 2.483 GHz	SHF (ISM), backscatter coupling, Nombreux systèmes, (Identification de véhicule: 2.446.. 2.454 GHz)	4 W, USA/Canada uniquement 500 mW, Europe
5.725 .. 5.875 GHz	SHF (ISM), backscatter coupling, rarement utilisé pour RFID	4 W USA/Canada 500 mW Europe

Tableau 0.1 Bandes de fréquences utilisables pour le RFID.

3.1.5 Évaluation de l'effet Doppler

Lorsqu'une source et un observateur sont en mouvement, à faible vitesse par rapport à la célérité de la lumière ($\ll c$), l'effet principal observé est le décalage de la fréquence reçue par rapport à celle émise : c'est l'effet Doppler-Fizeau. Dans le cas général d'une source S et d'un observateur O se déplaçant suivant des droites aux vitesses v_S et v_O , la fréquence observée s'écrit [Rossi 1986] et [Bruneau 1998] :

$$f_o = f_s \frac{c - v_o \cos \theta_o(t)}{c - v_s \cos \theta_s(t)} \quad (0.1)$$

Dans notre cas (Figure 0.1), considérant le transpondeur au point fixe O d'une vitesse v_o nulle et l'émetteur au point S animé d'une vitesse v_s supposée constante, plus exactement ne variant pas

pendant le temps de passage du mobile au-dessus du transpondeur. Cette source se déplace sur une parallèle au plan de la chaussée. Le signal sera perçu par le transpondeur uniquement lorsqu'il sera dans le champ magnétique de l'antenne ce qui limite la variation de l'angle $\theta_s(t)$ à θ_{smin} et θ_{smax} .

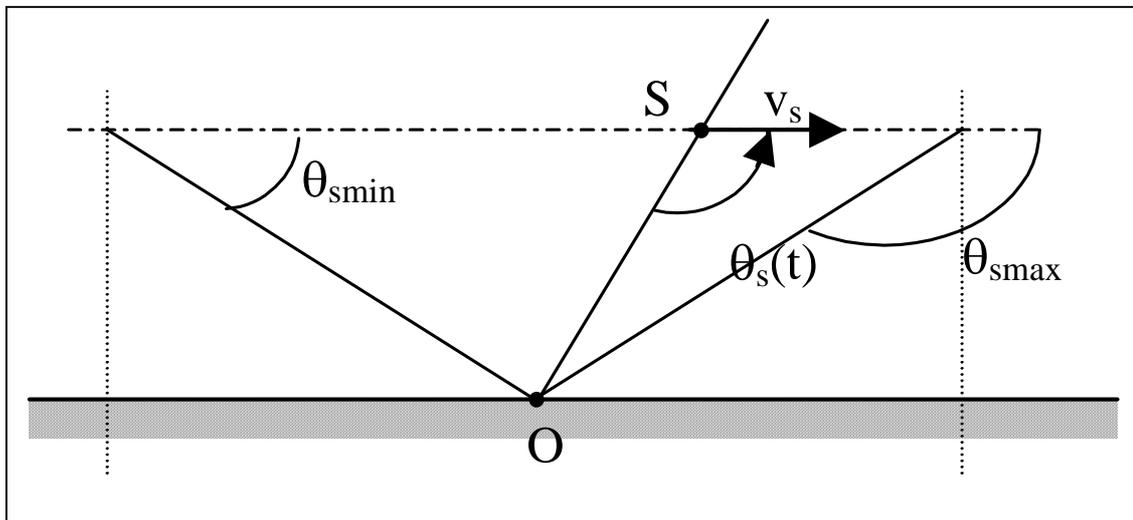


Figure 0.1 Évaluation de l'effet Doppler dans le cas d'une source mobile animée d'une vitesse v (l'antenne de la base station) vue d'un point d'observation fixe (le transpondeur).

La source émet un signal sinusoïdal de fréquence pure $f_s = 13,56$ MHz. La vitesse maximale de déplacement est de 150 km/h. Le récepteur au point O voit une fréquence f_o qui par effet doppler est différente de celle de l'émetteur. Le décalage en fréquence dû à l'effet Doppler est donné par : $\Delta f = f_o - f_s$. En tenant compte du modèle ci dessus, et de l'équation générale (0.1), la fréquence du signal au point O s'exprime par :

$$f_o = \frac{f_s}{1 - \frac{v_s}{c} \cos \theta_s(t)} \quad (0.2)$$

avec $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

La valeur maximale de la fréquence est obtenue pour $\theta_s(t) = \pi/2$. La valeur minimale est atteinte pour $\theta_s(t)=0$ lorsque la source s'approche de O, ou lorsque la source s'en éloigne $\theta_s(t)=\pi$. En valeur absolue :

$$|\Delta f|_{\max} = f_s \cdot \frac{v_s}{c - v_s} \quad (0.3)$$

Soit ici :

$$|\Delta f|_{\max} = 1,9 \text{ Hz} \quad (0.4)$$

Nous pouvons alors tracer l'évolution de la fréquence en fonction du déplacement du mobile (Figure 0.2). Nous pouvons observer que cette variation est effectivement très faible. Elle n'aura aucune incidence au moment de la démodulation du signal informatif qui pourra être véhiculé par la porteuse. Une variation plus importante aurait pu être une source d'erreur.

En conclusion **l'influence de l'effet Doppler est ici négligeable.**

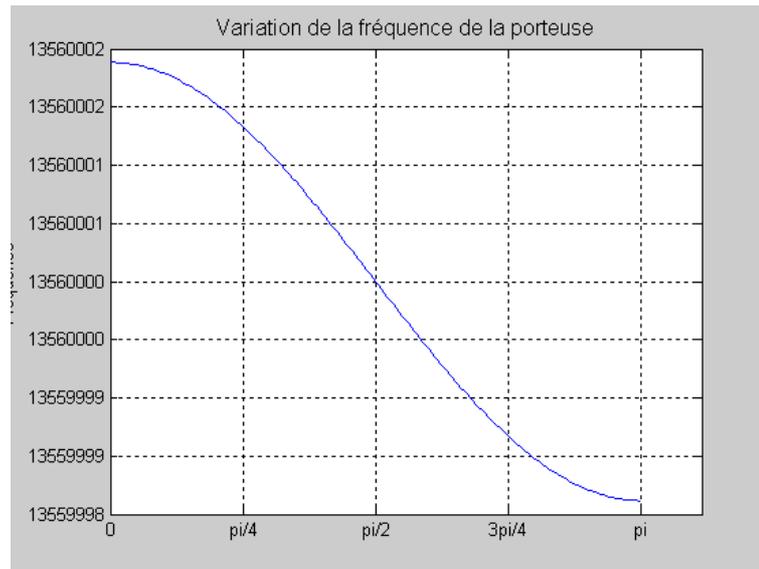


Figure 0.2 Variation de la fréquence de la porteuse par effet Doppler due au déplacement de la source.
L'effet est négligeable.

3.1.6 L'échange des données

Les paragraphes précédents étaient centrés sur la propagation de la porteuse pure⁸, l'objectif est de pouvoir communiquer de l'information entre la base station et le transpondeur et réciproquement. Il est maintenant nécessaire de définir quels seront les taux de transfert possibles sans oublier dans cette réflexion la question de la télé-alimentation du transpondeur.

Remarque : Il n'y a pas encore de consensus sur le vocabulaire, dans la suite des propos la communication entre lecteur vers le transpondeur sera dénommée **liaison descendante**, la communication inverse sera désignée par **liaison montante**. Un moyen mnémotechnique pour

⁸ ce qui en soit ne présente qu'un intérêt purement académique.

retenir cette définition est de se rappeler que dans notre cas d'étude, l'antenne du lecteur sera située au-dessus du transpondeur.

3.1.6.1 Du transfert d'énergie à la modulation.

L'énergie est transmise via l'induction magnétique B émise par l'antenne du lecteur.

Elle engendre une tension d'induction fonction :

1. des caractéristiques électroniques du transpondeur et de l'antenne (0.30),
2. de la distance (donc du couplage) les séparant (0.24),
3. des caractéristiques dimensionnelles de ces deux antennes (0.25),
4. de la fréquence utilisée Figure 0.10.
5. et des facteurs de qualité des différents circuits d'antennes .(0.33)

Du fait de la communication de l'information, l'énergie pourra être transmise soit de façon **non simultanée** (d'abord l'énergie, puis les données) ou bien de **façon simultanée** (les deux en même temps). Ces notions ne sont pas à confondre avec le mode HDX **Half duplex** dans lequel le transpondeur émet de l'information lorsque le lecteur a terminé son émission, contrairement au mode FDX **Full duplex**, mode dans lequel la source et le récepteur peuvent échanger simultanément des données.

Cette notion de transfert d'énergie, pendant la communication, oblige à regarder les modes de modulation démodulation de l'information sous un angle différent de celui utilisé en radiocommunication. En effet en télécommunication le récepteur ne tire pas sa propre énergie du signal reçu. Alors que pour les transpondeurs dits passifs (qui n'ont pas de source d'alimentation), ils assureront leur énergie du signal reçu. Par opposition, les transpondeurs actifs possèdent une source d'énergie sous forme d'une pile lithium, batterie ou autre. C'est le cas notamment des transpondeurs travaillant en hyperfréquences au-dessus de 2.45 GHz. En effet ces transpondeurs ont un oscillateur local qui doit rester alimenté pour permettre un temps de réaction court au moment de son interrogation. Quoi qu'il en soit, lors des communications à longue distance, l'atténuation du signal nécessite une amplification qui ne peut se faire qu'à partir d'une source d'énergie locale.

Pendant la liaison descendante, le codage de l'information doit être tel qu'il pourra assurer la fourniture de l'énergie. Pour cela le signal de la porteuse doit être présent le plus longtemps possible et communiquer l'information utile.

Pendant la liaison montante, le lecteur est à l'écoute du signal provenant du transpondeur⁹, qui peut être à une distance importante (60 cm) donc fortement atténué et bruité.

Il faut alors répondre à la question suivante qui du type de modulation et du type de codage de l'information détermine l'autre ?

Il semble nécessaire de faire un rappel rapide de ces deux notions.

3.1.6.2 Modulation, Démodulation et Spectre de fréquences

Les techniques classiques utilisées pour effectuer le transfert des informations pour les systèmes de communication RFID sont :

1. La modulation d'amplitude : ASK (Amplitude shift keying) 100% ou ASK 10%
2. La modulation de fréquence : FSK (Frequency shift keying),

Les autres techniques sont peu employées car elles nécessitent une électronique de démodulation plus complexe ce qui engendre une surconsommation dans le transpondeur.

3.1.6.2.1 Modulation d'Amplitude

Le signal est de la forme

$$\phi(t) = f(t) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (0.5)$$

Le terme $\cos(\omega_c t)$ dans l'équation (0.5) est la porteuse et $f(t)$ le signal modulant. Le signal résultant $\phi(t)$ est le signal modulé.

La densité spectrale est obtenue en appliquant une transformée de Fourier à l'équation (0.5)

⁹ qui n'est pas un émetteur.

$$\Phi(t) = \frac{1}{2} F(\omega + \omega_c) + \frac{1}{2} F(\omega - \omega_c) \quad (0.6)$$

Cette modulation d'amplitude transpose le spectre fréquentiel du signal d'une valeur égale à $\pm \omega_c$ rad/s. La largeur de bande est donc doublée et la porteuse n'est plus présente dans le spectre. Ce type de modulation est nommé DSB-SC (Double-Sideband, Suppressed-Carrier.)

L'électronique de démodulation, du fait de l'absence de la porteuse, est relativement complexe à mettre en œuvre, alors qu'il est possible de transmettre la porteuse. Ce type de modulation est communément connu en radiodiffusion sous le nom de modulation d'amplitude AM ou DSB-LC (Double-Sideband, Large-Carrier.)

$$\phi_{AM}(t) = f(t) \cdot \cos(\omega_c t) + A \cdot \cos(\omega_c t) \quad (0.7)$$

La densité spectrale de ce signal est alors :

$$\Phi_{AM}(t) = \frac{1}{2} F(\omega + \omega_c) + \frac{1}{2} F(\omega - \omega_c) + \pi A \cdot \delta(\omega + \omega_c) + \pi A \cdot \delta(\omega - \omega_c) \quad (0.8)$$

La densité spectrale de ce signal est la même que pour le DSB-SC (0.5) avec en plus une impulsion à $\pm \omega_c$. Une représentation du signal modulé en amplitude est donnée en Figure 0.3.

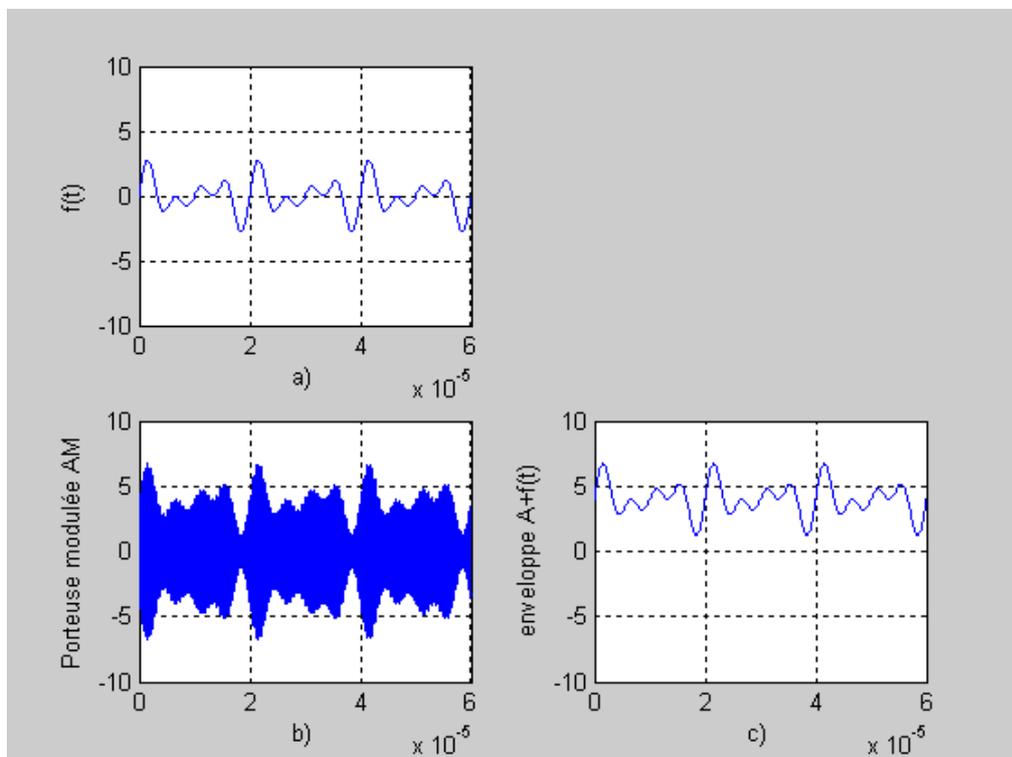


Figure 0.3 Modulation d'amplitude en DSB-LC porteuse à 13.56 MHz
a) signal modulant, b) porteuse modulée par le signal modulant,
c) enveloppe du signal modulé

c) enveloppe du signal modulé récupérée après démodulation.

Il est défini un coefficient de modulation m tel que

$$m = \frac{\textit{amplitude}_{\max} \textit{signal modulée}}{\textit{amplitude}_{\max} \textit{porteuse}}$$

La modulation d'amplitude à 100% sera retenue pour la liaison descendante, car elle sera plus facile à détecter au niveau du transpondeur.

3.1.6.2.2 Modulation de fréquence

Cette technique de modulation est utilisée dans certaines applications de type RFID. Nous ne la retiendrons pas ici. En effet la mise en œuvre du démodulateur présent dans le transpondeur entraînera une surconsommation, alors que la démodulation d'amplitude exige un seul transistor pour récupérer le message de la base station donc une consommation négligeable.

3.1.6.3 Codage Bit

Le codage du bit de l'information à échanger est important pour un système à base de transpondeur. Il aura une influence sur le transfert d'énergie, la récupération de la porteuse pour une éventuelle synchronisation, sur le spectre de fréquences, le débit numérique etc. Les principaux codages sont présentés en Figure 0.4.

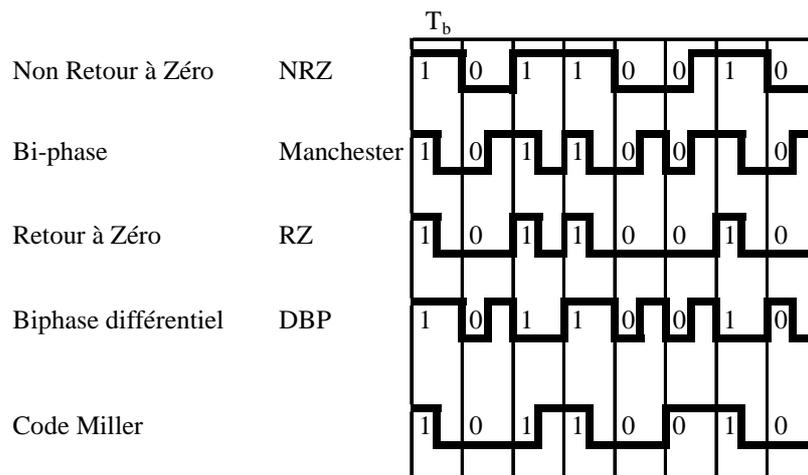


Figure 0.4 Principaux codages bit rencontrés dans les systèmes RFID

3.1.6.3.1 Code Manchester

A la moitié du temps bit, une transition négative représente un 1 binaire, une positive un 0.

$$f1(t) = \begin{cases} -A & 0 < t < \frac{T_b}{2} \\ A & \frac{T_b}{2} < t < T_b \end{cases}$$

En prenant le cas d'un équiprobabilité entre le 1 ou le 0, la densité spectrale de puissance peut s'écrire [Stremler 1990] :

$$S_y(\omega) = A^2 T_b \cdot \text{Sinc}^2(\omega T_b / 4) \cdot \sin^2(\omega T_b / 4). \tag{0.9}$$

La bande passante à -3 dB est :

$$B_{-3dB} \approx \frac{1,16}{T_b}$$

Temps Bit	μs	104	52	26	13
Flux	Bps	9600	19200	38400	76800
Bande Passante	kHz	11,1	22,3	44,5	89,1

Tableau 0.2 Détermination de la bande passante en fonction de la vitesse de transfert pour le code Manchester

3.1.6.3.2 Autres codes

Les principaux autres codes utilisés sont :

1. Le code **NRZ** : c'est le code binaire pur.
2. Le code **RZ** : le 1 binaire est représenté par un niveau haut pendant le premier ½ temps bit.
Le 0 est représenté par un niveau constant nul pendant le temps bit
3. Le code **Miller** : Le 1 est représenté par une transition au milieu du temps bit. Le 0 reste au niveau bas.

Les caractéristiques spectrales de ces principaux codes sont synthétisées dans le Tableau 0.3. Le code NRZ est uniquement utilisé avec une modulation de fréquence. Le tracé de ces densités spectrales de puissance montre que le code NRZ occupe une bande passante plus restreinte que le codage Manchester.

Codage bit Code	Densité spectrale de puissance	B_{-3dB}
Non Return-to-Zero NRZ	$S_y(\omega) = A^2 T_b \cdot \text{Sinc}^2(\omega T_b / 2)$	$\frac{0,44}{T_b}$
RZ	$S_y(\omega) = \frac{A^2 T_b}{16} \cdot \text{Sinc}^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right) + \frac{\pi A^2}{8} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sinc}^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T_b}\right)$	$\frac{0,88}{T_b}$
Split-Phase Manchester	$S_y(\omega) = A^2 T_b \cdot \text{Sinc}^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right)$	$\frac{1,16}{T_b}$
Bipolar Return-to-Zero BRZ	$S_y(\omega) = \frac{A^2 T_b}{4} \cdot \text{Sinc}^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\omega T_b}{2}\right)$	$\frac{0,71}{T_b}$
Delay Modulation Miller	$S_y(\omega) = \frac{A^2 T_b}{4} \cdot \text{Sinc}^2\left(\frac{\omega T_b}{4}\right)$	$\frac{0,43}{T_b}$

Tableau 0.3 Densité spectrale de puissance et bande passante des codes classiques

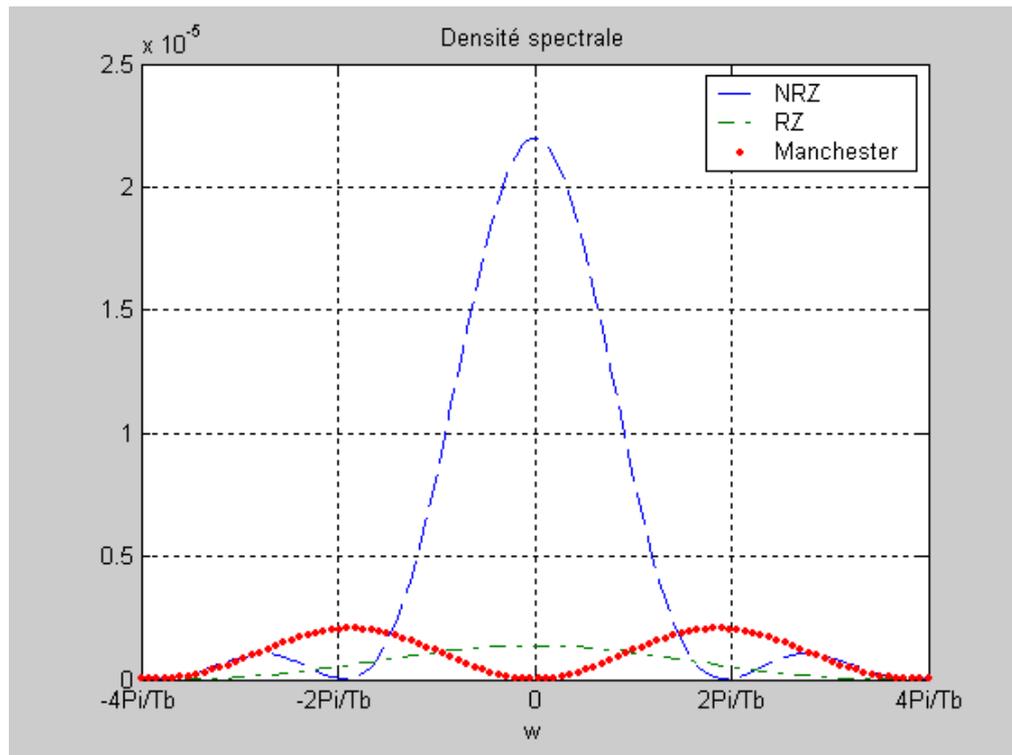


Figure 0.5 Comparaison des densités spectrales des codes NRZ, RZ et Manchester

Il ne faut cependant pas oublier que le signal modulé doit transporter le plus d'énergie possible vers le transpondeur pour en assurer son alimentation.

Il est alors important de connaître l'évolution de la valeur moyenne du signal modulant (Tableau 0.4)

Codage bit	Valeur moyenne du code	Dépendant du code binaire
Non Return-to-Zero : NRZ	0 à 100 %	Oui
RZ	0 à 50%	Oui
Split-Phase : Manchester	50%	Non
Delay Modulation : Miller	0 à 50%	Oui
Modified Miller	0 à 75%	Oui

Tableau 0.4 Évolution de la valeur moyenne du code modulant

Pour terminer sur ce sujet, d'autres types de codage peuvent être exploités tels que du codage de largeur de répétition :

1. Codage de position par nombre d'impulsions.
2. Codage par modulation de position de l'impulsion.
3. Codage d'octet par position.
4. Codage de position "1 parmi 256", "1 parmi 4".

Ces types de codage peuvent aboutir à des débits d'informations binaires relativement faibles. Par contre, ils offrent la possibilité de télé-alimentation très intéressante

En résumé :

Pour la liaison descendante, la modulation de la porteuse en modulation d'amplitude à 10 % surtout sur une longue portée, est bien adaptée car elle assure un transfert d'énergie maximum et une réduction des bandes latérales du signal modulé.

Dans le cas d'une modulation à 100%, il faudra veiller à utiliser un code favorisant la présence de la porteuse, le code Manchester par exemple ou bien un codage par position.

Pour limiter le nombre de fonctions électroniques, et comme la démodulation est beaucoup plus simple à mettre en œuvre donc moins consommatrice d'énergie, nous retiendrons la solution de **la modulation d'amplitude à 100%**. Le choix du codage se portera sur le **Manchester**, plutôt que sur le codage par position. Le codage Manchester autorisera un débit d'informations plus élevé.

Dans tous les cas cependant, l'influence du facteur de qualité des circuits d'antennes et donc de la bande passante sera importante sur les temps de transition des signaux modulés et sur les valeurs des amortissements.

3.1.6.4 Modulation de charge dans le transpondeur

Comment le transpondeur peut-il transmettre de l'information vers "la base station" puisque ce n'est pas un émetteur?

Pour répondre à cette question, il faut exprimer l'impédance d'entrée du système couplé accordé (Figure 0.8) :

$$\begin{aligned}u_1 &= Z_1 \cdot I_1 + j \cdot M \cdot \omega \cdot I_2 \\u_2 &= Z_2 \cdot I_2 + j \cdot M \cdot \omega \cdot I_1\end{aligned}$$

Avec

$$Z_e = \frac{V_1}{I_1}$$

$$Z_u = -\frac{V_2}{I_2}$$

L'impédance d'entrée au primaire du système couplé accordé peut s'exprimer par :

$$Z_e = Z_1 - \frac{(j.M.\omega)^2}{Z_U + Z_2}$$

Soit

$$Z_e = R_1 + jL_1\omega - \frac{(j.M.\omega)^2}{Z_U + \left(R_2 + jL_2\omega - \frac{1}{jC_2\omega} \right)}$$

(0.10)

En insérant les coefficients de qualité Q_1 de l'antenne et Q_2 du transpondeur et le coefficient de couplage k , cette expression devient :

$$|Z_e| = R_1 \cdot \left(\left(1 + jQ_1 \right) + \frac{k \cdot Q_1 \cdot Q_2}{1 + \frac{Z_u}{R_2}} \right)$$

(0.11)

Nous montrons alors que la variation de la charge dans le transpondeur se traduit par une variation de l'impédance équivalente au primaire du circuit couplé donc dans le lecteur (0.11). La charge du transpondeur sera considérée comme purement résistive $Z_u = R_L$ évoluant entre 0Ω et R_L .

Une modulation d'amplitude apparaît dans le lecteur comme une variation du module de Z_e avec la charge Z_u .

Nous présentons cette variation de l'impédance d'entrée au primaire du système couplé pour $Q_1=Q_2=30$ et $R_1=R_2=500 \Omega$ (Figure 0.6). Nous montrons que pour une modulation de charge de 0Ω à 500Ω au secondaire et pour un coefficient de couplage de 3%, la variation de l'impédance d'entrée sera uniquement de $3 K\Omega$.

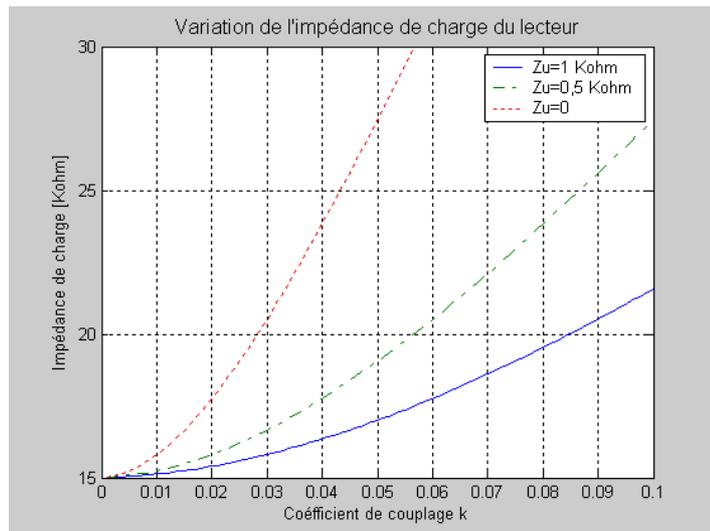


Figure 0.6 Variation de l'impédance de l'antenne du lecteur en fonction de la modulation de la charge du transpondeur et fonction du coefficient de couplage.

3.1.7 Antenne

Plusieurs technologies peuvent être utilisées pour réaliser les antennes de la base station et du transpondeur :

1. L'antenne bobinée dans l'air ou sur bâtonnet de ferrite permettant de concentrer les lignes du champ magnétique.
2. L'antenne gravée réalisée sur circuit imprimé rigide ou souple.
3. L'antenne imprimée réalisée à l'aide d'un dépôt d'encre conductrice.

Quelle que soit la technologie, nous modéliserons l'antenne par un circuit électrique R, L, C (C pour tenir compte des capacités parasites) série ou parallèle.

Dont la fréquence propre de résonance est $L_1 \cdot C_1 \cdot \omega^2 = 1$,

Et le facteur de qualité propre de l'antenne : $Q_{L_1} = \frac{L_1 \cdot \omega}{R_1}$.

Généralement, ce facteur de qualité sera trop important (donc le circuit trop sélectif) au regard du débit numérique souhaité et de la bande passante nécessaire. Nous disposerons alors une résistance en série avec l'antenne d'une valeur telle que Q_l étant la valeur du facteur de qualité souhaité :

$$R_{add} = \frac{L_1 \cdot \omega}{Q_1} \quad (0.12)$$

Nous avons montré dans les développements précédents, l'importance des choix techniques dans la réalisation de l'antenne. Ces choix auront des influences sur :

1. Les valeurs électriques inductance, résistance et capacité parasite donc le facteur de qualité intrinsèque de l'antenne Q_i .
2. Le champ magnétique rayonné en fonction de la forme de l'antenne, du rayon, du courant circulant dans l'antenne donc de la tension d'excitation de cette dernière.
3. La tension minimale au niveau du transpondeur pour assurer l'apport énergétique nécessaire au bon fonctionnement des composants électroniques présent dans le transpondeur.
4. Le choix des modulations.
5. Le respect des normes.
6. Le coefficient de couplage entre les deux antennes celle du lecteur et du transpondeur.

3.1.8 Processeur

Il aura en charge le traitement des requêtes issues de la base station et notamment d'élaborer le message binaire en réponse à cette dernière. Ce message ira par la suite commander la modulation de la charge du transpondeur pour remonter l'information vers la base.

Quelles sont alors les principales caractéristiques à prendre en compte pour la conception du transpondeur?

La réponse à cette question n'est pas unique, puisqu'elle dépend de l'application finale. Cependant, les paramètres suivants vont avoir une influence :

1. La consommation autorisera ou non la télé-alimentation du transpondeur.
2. La tension minimale de fonctionnement dimensionnera la distance maximale de travail du transpondeur.
3. La tension maximale conditionnera la distance minimale ou le champ maximum pouvant être supporté sans destruction du tag ou bien il faudra disposer d'un circuit de régulation de la tension induite.
4. Le temps de réveil fixera le temps nécessaire à l'application évoluant dans le processeur pour commencer à recevoir des messages venant du lecteur.

5. La fréquence de travail, aura une influence sur le temps de traitement des requêtes, le débit maximum des données sur la liaison montante ou descendante.
6. La possibilité de crypter ou non les données.
7. La possibilité d'assurer une authentification par clé pour permettre les accès à ses propres ressources.
8. La gestion des collisions entre différents transpondeurs.

Pour fixer les idées, nous avons pu mettre en œuvre et mesurer des temps de transaction dans le cas de l'utilisation des produits MIFARE de Philips Semiconductors fonctionnant à 13,56 MHz, avec un débit de 106 kbits/s et à une distance de 3cm entre le lecteur et le transpondeur (Tableau 0.5).

Fonctions	Temps passé pour effectuer la fonction
	ms
Reset	5
Anticollision	3
Sélection	2
Authentification	2
Lecture de 16 Octets	2,5
Ecriture de 16 Octets + relecture	9

Tableau 0.5 Temps de transaction pour les composants MIFARE Philips SC

3.1.9 La mémoire interne

Elle aura en charge la mémorisation des informations données par le lecteur ou préalablement inscrites dans le transpondeur. Cette mémoire est de technologie classique : RAM (Random Access Memory), FRAM (Ferroelectric RAM), EEPROM (Electrical Effaceable programmable Read Only Memory.) Elle est généralement intégrée au microcontrôleur et d'une capacité raisonnable (une dizaine de bits à quelques kilo-octets). Mais attention, plus la capacité mémoire sera importante, plus la puce sera gourmande en énergie. Elle permettra des accès en lecture (parfois uniquement) et quelquefois en écriture.

Pour des applications sécuritaires, il est nécessaire de relire ce qui vient d'être écrit afin de vérifier l'intégrité de l'information stockée dans la mémoire. Ces temps définiront le temps minimal de la transaction.

Dans le cas où l'application souhaite écrire de l'information, les constructeurs spécifient un maximum de cycles d'écritures notamment pour les mémoires de type EEPROM à 100 000 écritures avec un temps de 5 à 10 ms pour effectuer l'écriture [Atmel 2002].

3.1.10 Gestion des collisions

Avant d'évoquer l'anticollision, il est nécessaire de développer la notion de collision. Cette collision peut intervenir lorsque plusieurs transpondeurs se trouvent dans le champ de l'antenne du lecteur. La base station devra alors être en mesure de pouvoir sélectionner de façon individuelle chaque transpondeur afin d'entamer la transaction qui convient.

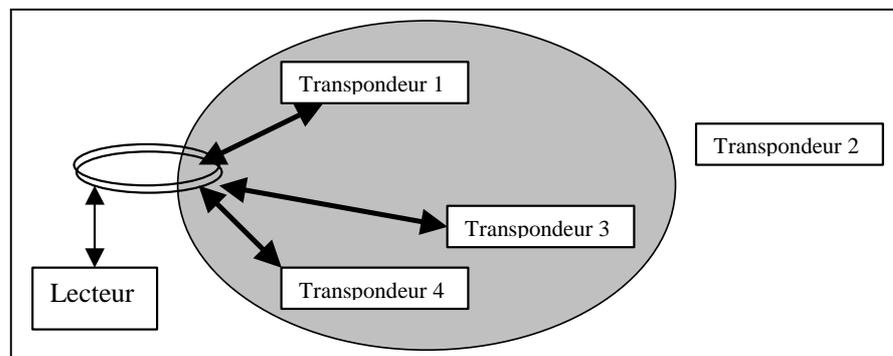


Figure 0.7 Collision : plusieurs transpondeurs dans le champ de l'antenne.

La première étape consiste pour la base station à connaître quels sont les transpondeurs présents dans le champ de l'antenne en envoyant une requête d'identification. Évidemment tous les transpondeurs présents vont répondre et pratiquement de façon synchrone, c'est le cas de gestion des collisions le plus simple à gérer.

Mais en fonction :

1. De la distance du transpondeur, l'amplitude du signal reçue par le lecteur ne sera pas la même, faible pour le transpondeur éloigné, fort pour le plus proche.
2. De l'asynchronisme des réponses.
3. De l'effet de masque entre les transpondeurs.
4. Et de l'effet de mutuelle induction entre les antennes.

Il peut se faire que le transpondeur le plus éloigné soit rendu aveugle ce qui va augmenter le temps de gestion de la collision.

Différentes méthodes présentes dans la littérature sont utilisées pour réaliser cette fonction d'anticollision [Finkenzeller 1999] [Paret 2001]. Elles peuvent être spatiales, temporelles ou fréquentielles.

1) Gestion de l'anticollision dans le domaine spatial.

L'objectif est ici d'utiliser la directivité des antennes surtout en micro-ondes pour réduire le champ de dialogue à un seul transpondeur. Cette méthode a été utilisée pour le 101e marathon de Boston.

2) Gestion de l'anticollision dans le domaine fréquentiel.

Le dialogue est réalisé par un multiplexage fréquentiel. Ce type de gestion de l'anticollision est rarement déployé pour des raisons de coûts de mise en oeuvre. Elle a été validée dans le cadre de la gestion de tags pour bagages dans un aéroport. L'alimentation du tag était obtenue par couplage magnétique à 125 kHz, la réponse est générée sur une fréquence comprise entre 2.7 et 4.2 MHz [Finkenzeller 1999].

3) Gestion de l'anticollision dans le domaine temporel.

C'est de loin la méthode retenue par tous les constructeurs de transpondeurs. Les techniques utilisées sont : la technique du time slot, du temps de réponse aléatoire

Dans notre cas d'étude, la gestion des collisions va essentiellement se traduire par une augmentation du temps de traitement par transpondeur : 3ms (Tableau 0.5 Temps de transaction pour les composants MIFARE Philips SC.)

3.1.11 Sécurisation de la transmission

Les techniques classiques de sécurisation de la transmission numérique peuvent être mises en oeuvre au sein du transpondeur. La plus simple étant la parité (émission d'un nombre pair ou impair de 1). Les plus efficaces peu consommatrices de temps sont la technique des mots complétés (transmission d'un mot et de son complément) et le CRC (Cyclic Redundancy Check.)

Le calcul du checksum ou CRC peut très facilement être implémenté dans des circuits logiques (cf. Annexe 5 : Génération d'un CRC.)

Ces techniques ne permettent pas de corriger une éventuelle erreur survenue pendant la transmission de l'information mais de détecter cette éventuelle erreur.

Nous devons trouver un compromis entre la sécurité et le temps de traitement, donc le débit de l'information utile.

3.1.12 Cryptage de l'information

Le chiffrement est la transformation d'une information appelée texte clair en une autre information incompréhensible par une personne étrangère. Il est appelé texte chiffré le résultat du chiffrement ou encore cryptogramme. Il existe plusieurs types de chiffrements : Symétrique à clef privée; Asymétrique à clef publique et privée et Mixte. Nous présentons un ensemble de notions relatives au cryptage de l'information sur le chiffrement symétrique à clef privée, le chiffrement asymétrique en annexe 0.

Mais rappelons dans un premier temps la législation en vigueur.

3.1.12.1 Législation

En France, les opérations de chiffrements sont réglementées et définies par les décrets n° 99-199 et 99-200 du 17 mars 1999 [LegiFrance]. Toute utilisation de clefs symétriques supérieures à 40 bits et inférieures à 128 bits est autorisée mais doit être déclarée. Pour les clefs de plus de 128 bits ou séquestres, elles doivent être déposées chez un tiers de confiance ou alors il faut fournir à l'administration le moyen de retrouver les clefs.

3.1.12.2 Le chiffrement DES (Data Encryption Standard)

Le principal algorithme de chiffrement est le chiffrement DES dont le principe est donné en 7.1.1.4. Nous nous sommes fixés comme objectif principal l'évaluation de la durée d'exécution d'un tel algorithme en fonction de son implémentation.

Plusieurs solutions sont possibles pour implémenter cet algorithme de chiffrement :

1. Avec de la logique (registres, OU exclusif, CPLD (Complex Programmable Logic Device), FPGA (Field Programmables Gates Arrays)...)
2. Utiliser un circuit spécialisé (ASIC (Application Specific Integrated Circuit), puce spécialisée ...)
3. Un micro-contrôleur ou un microprocesseur (PIC, 68000, 8051...)
4. Un processeur de traitement du signal DSP (Digital Signal Processor)

Les deux dernières solutions nécessitent le développement d'un code source logiciel en C, C++, Java ou assembleur. Le DES étant destiné à la base pour être implanté directement dans une architecture matérielle, il est moins rapide et performant lorsqu'il est réalisé par logiciel. Un circuit spécialisé peut crypter jusqu'à 1Gigabit/s, alors qu'un logiciel ne dépassera pas 1 Mégabit/s.

Nous avons implanté dans un microcontrôleur Microchip de référence PIC 16F84 cadencé à 20Mhz l'algorithme correspondant au simple DES (Tableau 0.6).

Fonction	Performance avec un PIC16F84 à 20 MHz		
	Nombre de cycles	temps	bits par seconde
Calcul des clefs	156	31.2 μ s	n/a
Chiffrement	5694	1.14 ms	56.2 Kb/s
Déchiffrement	5784	1.16 ms	55.3 Kb/s

Tableau 0.6 Exemple de durée d'exécution sur des microcontrôleurs classiques

Nous ne pourrions pas espérer dépasser un flux de données de plus de 55 kbps avec ce composant. Ces chiffres ont été validés par une étude similaire [Smith 2000].

3.1.12.2.1 Résistance aux attaques

Nous avons montré dans cette même annexe qu'avec de gros moyens informatiques, le DES peut être cassé en trois jours. La véritable question à se poser est de savoir si le temps de validation de l'information est inférieur au temps de décryptage avec les moyens que l'attaquant est capable de déployer. Si oui, alors le DES reste suffisant si non il faut trouver un autre moyen de chiffrement.

Le triple DES est une réponse simple à cette question puisqu'il suffit de cascader trois étages DES avec 2 clefs différentes, le temps de cassage est alors multiplié par 2^{56} .

3.1.12.3 Conclusion

- Le choix de l'implémentation du cryptage de l'information à stocker dans le transpondeur entraînera une **diminution du flux** d'informations entre le lecteur et le transpondeur Tableau 0.6. Environ 55 K b/s pour un processeur à 20 MHz.
- Le cryptage et le décryptage de l'information ne doivent se faire qu'au niveau du lecteur. Il n'est pas nécessaire de l'implémenter dans le transpondeur.
- L'algorithme 3DES peut être utilisé pour réaliser ce cryptage. Si la décision était prise de sécuriser davantage les informations stockées dans le transpondeur, depuis 1998, il existe un nouveau standard AES (Advanced Encryption Standard) pour lequel il n'est pas connu de type d'attaque à ce jour. Il utilise une clé de 128 bits (ou plus), c'est l'algorithme Rijndael conçu par Daemen et Rijmen [Ward 2003].

3.1.13 Correction d'erreur

L'idée de base d'un code correcteur d'erreurs $C(n,k)$ est d'introduire de l'information redondante dans le message envoyé à partir du message original de taille k et de taille n une fois codé par ce code. Cette information $n-k$ bits de redondance ($k < n$) doit permettre de reconstituer le message, même si le message reçu est erroné. Pour cela, il est construit un vocabulaire dont les mots contiennent de l'information redondante, à partir de tous les messages qui peuvent être envoyés dans le canal de transmission. Les mots du vocabulaire doivent être les plus distants possibles. Ainsi, si une erreur se glisse dans le message envoyé, le message original sera celui dont la distance est la plus proche. La borne de Varshamov-Gilbert indique qu'il existe des codes de paramètres $C(n,k,d)$ si n , k et d vérifient :

$$\sum_{i=0}^{d-2} \binom{n-1}{i} < 2^{n-k}$$

Il existe une autre formulation de ce théorème définissant le minimum de bits à ajouter par bits de donnée en fonction du bruit du canal. Si p est la probabilité de transmettre un bit avec une erreur dans le canal, alors par bit il faudra transmettre $\frac{1}{1-H(p)}$ bits, $H(p)$ étant l'entropie de p .

Ainsi, si un canal a la probabilité d'erreurs de 1% il faudra alors transmettre 1.09bits pour un bit de donné, pour 5% 1.4bits, 25% 5.3bits, et 45% 138.4bits.

Nous faisons un tour d'horizon des codes les plus utilisés en annexe 0. Mais comme pour le chiffrement de données, ce qui conduit notre analyse, c'est le temps nécessaire pour exécuter les algorithmes de détection et de correction des erreurs (Tableau 0.10 et Tableau 0.11).

3.1.13.1 Conclusion

- Devant le nombre de codages différents, le choix peut être difficile. Il dépend en fait du type de transmission et surtout du taux d'erreurs possibles du canal de transmission. S'il y a peu d'erreurs possibles et très peu fréquemment alors les codes de Hamming ou de double parité peuvent suffire. Si, au contraire, le canal est bruité avec un taux d'erreurs en bloc fort alors les codes RS s'appliquent. Si les erreurs sont plutôt de type isolé mais fréquentes, alors les codes BCH et convolutifs s'appliquent. Si le canal est vraiment très bruité, alors on choisira un code de Goppa ou une combinaison de code correcteur.
- Le **facteur rendement** peut être lui aussi un facteur de choix (cf. Tableau 0.7). En effet, pour des applications embarquées la taille de mémoire, donc la taille de code sera limitée. Il faudra choisir un code en faisant un compromis entre taille du code et capacité de correction (Tableau 0.8). Les plus adaptés étant les codes RS.
- Le **taux d'expansion** du code correcteur est également à prendre en compte. Il aura une incidence directe sur le flux de données utiles (Tableau 0.9).

Nombre de bits de donnée	RENDEMENT				
	Hamming	BCH	RS	Convolutif	Goppa
3	0,429	0,375	0,375	0,333	0,375
4	0,571	0,4	0,4	0,25	0,4
5	0,333	0,417	0,417	0,2	0,417
6	0,4	0,4	0,4	0,1666	0,4
7	0,467	0,412	0,412	0,143	0,412
8	0,533	0,4	0,4	0,125	0,4
9	0,6	0,409	0,409	0,111	0,409
10	0,667	0,417	0,417	0,1	0,417
11	0,733	0,407	0,407	0,09	0,407
12	0,387	0,414	0,414	0,084	0,414
15	0,484	0,417	0,417	0,066	0,417
20	0,645	0,417	0,417	0,05	0,417
24	0,774	0,414	0,414	0,0417	0,414

Tableau 0.7 Rendement de différents codes.

Nombre de bits de donnée	Hamming	BCH	RS
3	1	2	2
4	1	2	3
5	1	3	3
6	1	4	4
7	1	4	5
8	1	5	6
9	1	6	6
10	1	6	7
11	1	7	8
12	1	8	8
15	1	10	10
20	1	13	14
24	1	16	17

Tableau 0.8 Nombre d'erreurs pouvant être corrigées en fonction du type de codage.

Nombre de bits de donnée + bits ajoutés

Nombre de bits de donnée	Hamming	BCH	RS	Convolutif	Goppa
3	7 (m=3)	8	8	Sans objet Codage au vol	8
4	7 (m=3)	10	10		10
5	15 (m=4)	12	12		12
6	15 (m=4)	15	15		15
7	15 (m=4)	17	17		17
8	15 (m=4)	20	20		20
9	15 (m=4)	22	22		22
10	15 (m=4)	24	24		24
11	15 (m=4)	27	27		27
12	31 (m=5)	29	29		29
15	31 (m=5)	36	36		36
20	31 (m=5)	48	48		48
24	31 (m=5)	58	58		58

Tableau 0.9 Nombre de bits de données + bits ajoutés pour les différents codes.

- Ensuite vient le choix de l'algorithme de décodage qui est une phase très critique. Le codage en lui-même n'est qu'une multiplication de matrices, mais le décodage est beaucoup plus compliqué puisqu'il doit retrouver les erreurs et les corriger à partir des informations fausses reçues. Une nouvelle fois, le choix de l'algorithme dépend des ressources à disposition : mémoire, processeur, temps...(Tableau 0.10 et Tableau 0.11).

Architecture	RS	BCH
	n=15, k=9, t=3, m=4	n=15, k=9, m=4
PIC 16F876 @20MHz	1,5ms (~6 000 instructions)	0,5ms (~2 300 instructions)
	n=16, k=9, t=4, m=4	n=16, k=9, m=4
PIC 16F876 @20MHz	2,2ms (~10 000instructions)	0,52ms (~2 600 instructions)

Tableau 0.10 Évaluation du temps d'encodage pour une architecture PIC 16F876.
Le décodage n'est pas possible pour cette architecture pour des raisons de mémoire RAM insuffisante.

Architecture	RS	BCH
	n=15, k=9, t=3, m=4	n=15, k=9, m=4
PIC 18F242 @20MHz	4ms (~29 000 instructions)	3,6ms (~18 000 instructions)
	n=16, k=9, t=4, m=4	n=16, k=9, t=4, m=4
PIC 18F242 @20MHz	7ms (~44 200instructions)	6,5ms (~34 000 instructions)

Tableau 0.11 Évaluation du temps de décodage pour une architecture PIC 18F242.

Concrètement dans le cas d'un code RS pour transmettre 6 bits avec la possibilité d'en corriger 4, nous devons transmettre 15 bits. Avec un microcontrôleur PIC 18F242 à 20 MHz, il faut 4 ms pour décoder et 1,5ms pour coder ce qui autorise **un débit maximal de 4 kbps**.

Coté lecteur

Considérant la puissance rayonnée connue P_a , il est alors possible de déterminer les caractéristiques électriques et de rayonnement magnétique de l'antenne circulaire du lecteur. Cette puissance rayonnée est dissipée dans la résistance équivalente de rayonnement de l'antenne équation (0.40) :

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot R_{ant} \cdot I_a^2$$

$$P_a = \frac{320 \cdot \pi^4}{\lambda_p^4} \cdot \pi^2 \cdot N_1^2 \cdot r_1^4 \cdot I_a^2$$

En tenant compte de l'induction magnétique au centre de l'antenne pour $\alpha = \pi/2$ dans l'équation (0.12), l'expression de la puissance devient :

$$P_a = \frac{320 \cdot \pi^6 \cdot \mu_0^4}{\lambda_p^4} \cdot \frac{N_1^6}{(2 \cdot B_0)^4} \cdot I_a^6$$

A la résonance, la puissance dissipée dans la charge est

$$P_1 = \frac{L_1 \cdot \omega_p}{Q_1} \cdot I_a^2$$

D'où la relation entre la puissance électrique fournie à l'antenne et la puissance équivalente rayonnée :

$$P_1 = \frac{L_1 \cdot \omega_p}{Q_1 \cdot N_1^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_a}{320 \cdot \pi^6} \cdot \left(2 \frac{B_0}{\mu_0}\right)^4} \text{ en W.}$$

(0.1)

ou le courant devant être fournie par l'amplificateur du lecteur de :

$$I_1 = \frac{1}{N_1} \cdot \sqrt[6]{\frac{P_a}{320 \cdot \pi^6} \cdot \left(2 \frac{B_0}{\mu_0}\right)^4} \text{ en A eff.}$$

(0.2)

Avec pour un transpondeur fonctionnant à 13,56 MHz:

$$\frac{320 \cdot \pi^6 \cdot \mu_0^4}{\lambda_p^4} = \frac{320 \cdot \pi^6 \cdot \mu_0^4 \cdot F_p^4}{c^4} = 3,2022 \text{ e} - 24 \quad (0.3)$$

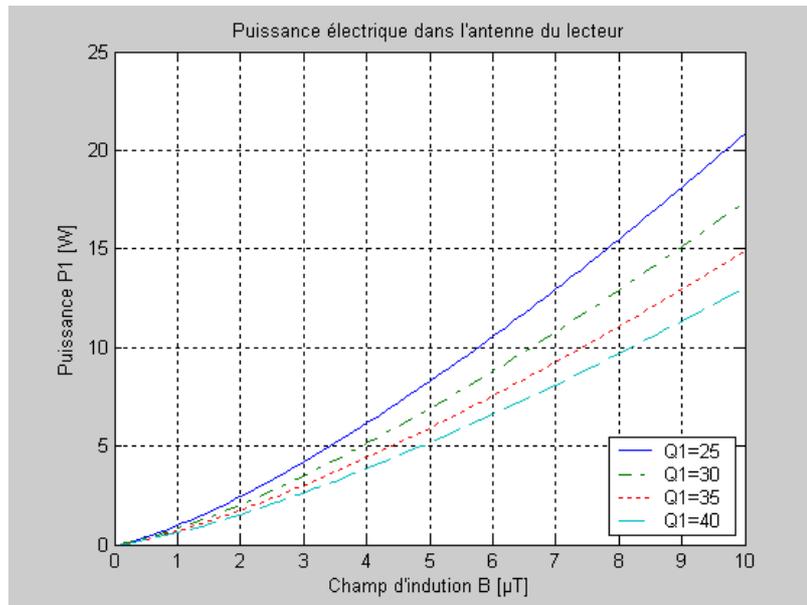


Figure 0.1 Variation de la puissance électrique dans l'antenne du lecteur en fonction du champ au centre de l'antenne

Pour 4 valeurs de facteur de qualité, à puissance rayonnée maximale autorisée $P_a=4,585 \text{ mW}$, $F_p=13,56 \text{ MHz}$, $L_1=1\mu\text{H}$, $N_1=1$.

Nous avons montré qu'en fonction du coefficient de qualité retenu, il existait un champ H minimal assurant la tension nécessaire au fonctionnement de l'électronique du transpondeur (Figure 0.12, Équation (0.33)). Pour obtenir 0.4 A/m, nous devons disposer d'un champ au centre de 0,5 μT soit une puissance d'émission de 1 Watt.

Conclusion

Pour mémoire, nous synthétisons en annexe 0 le dialogue entre le lecteur et le transpondeur dans le mode descendant (Figure 0.1) et le mode montant (Figure 0.2).

Nous retiendrons des principaux développements de ce chapitre 3 que :

- L'induction magnétique en champ proche varie en $1/d^3$
- Le rayon optimal de l'antenne est : $d = r/\sqrt{2}$, d la distance de dialogue.
- Pour des matériaux bitumeux mouillés avec de l'eau salée l'épaisseur de peau est de 1cm pour une fréquence de propagation de 2,45GHz.
- La puissance rayonnée maximale compatible avec la norme [EN 300 330 1994] est de 4,58 mW.

Nous avons alors montré que:

- Le coefficient de couplage ne dépend que de la distance entre les deux antennes.
- La fréquence retenue sera de 13,56 MHz.
- Pour cette fréquence de 13,56 MHz, l'inductance du transpondeur doit être autour de $1\mu\text{H}$, la charge équivalente doit être autour de $1000\ \Omega$.
- Le facteur de qualité doit être entre 30 et 40.
- L'influence de l'effet Doppler est négligeable.
- Pour la liaison descendante, une modulation d'amplitude à 100% d'un signal codé Manchester est un bon compromis.
- Pour la liaison montante, une modulation de charge par le signal binaire peut être utilisée.
- Les gestions des collisions, du cryptage et de la détection d'erreurs seront consommatrices de temps. Pour l'application visée, il faudra s'affranchir de la détection des collisions.
- Pour le cryptage, un DES peut être envisagé mais les expérimentations ont montré que le taux de transfert sera limité à 55 kbps.
- Pour la détection d'erreurs, le minimum est un checksum, un code de Hamming pourrait éventuellement être utilisé mais au détriment du taux de transfert. Nous avons montré par exemple que le code RS 6 bits utiles permettant 4 corrections ne permettra qu'un taux de transfert de 4 kBps avec les microcontrôleurs utilisables dans notre application.

Dans le chapitre suivant nous présenterons la mise en œuvre d'un transpondeur adapté à notre étude de cas, à savoir la communication véhicule infrastructure.

4 ÉTUDE DE CAS ET VALIDATIONS EXPÉRIMENTALES

Le contexte général du cas d'étude, (Figure 0.2 Modélisation du suivi de trajectoire) porte sur l'utilisation d'un dispositif de localisation et de communication véhicule infrastructure à base d'un transpondeur dont les principales caractéristiques ont été présentées au paragraphe 2.1.1 "Expression des besoins". L'une des fonctions de ce dispositif a pour optique de communiquer des données à jour caractérisant l'infrastructure. Dans une étape préliminaire, nous présenterons les résultats obtenus lors de tests effectués sur des transpondeurs standards industriels dont les résultats ont amené à la décision de se lancer dans l'étude et la conception d'un nouveau transpondeur.

Dans un premier temps, nous détaillerons ce qui est entendu par attributs afin de permettre un chiffrage du volume d'informations devant être stockées dans le transpondeur.

Puis dans un second temps, nous décrirons l'architecture du transpondeur adaptée à ce cas d'étude respectant les différentes notions à prendre en compte et évoquées au chapitre 3 Transpondeurs : Théorie et Développement.

Nous relaterons enfin les expérimentations mises en œuvre pour valider les différents concepts théoriques ayant permis la communication véhicule infrastructure à base du transpondeur.

En fin de chapitre, nous dévoilerons les principales applications et utilisations possibles de ce nouveau composant.

Essais préliminaires

Les premiers essais ont permis de valider le concept de dialogue véhicule-infrastructure à partir de transpondeurs standards industriels à faible vitesse.

Le véhicule de test a été équipé d'une antenne de dimension 34 x 28 cm à une hauteur de 24 cm de la chaussée. L'objectif de cette expérimentation était de déterminer le temps de passage envisageable au-dessus des Tags, la distance minimale entre deux Tags consécutifs, la vitesse maximale de dialogue avec le TAG (Figure 0.1 à Figure 0.4). Les transpondeurs utilisés lors de cette expérimentation sont des transpondeurs au format carte de crédit PICOTAG de la Société INSIDE Technology répondant à la norme ISO 15693 déposés sur l'enrobé.



Figure 0.1 Véhicule de test équipé de l'antenne du lecteur



Figure 0.3 Test du principe de dialogue véhicule-infrastructure à base de transpondeurs



Figure 0.2 Positionnement de l'antenne du lecteur sous le châssis du véhicule de test



Figure 0.4 Exemples de transpondeurs industriels à 125 KHz et 13,56 MHz.

Le respect de cette norme assure à l'utilisateur de ce composant qu'il sera lisible avec n'importe quel lecteur ISO 15693.

4.1.1 Description du matériel utilisé

Nous avons développé une application de dialogue avec le lecteur conforme aux recommandations du constructeur. Cette application évolue sur un micro-ordinateur PC relié au lecteur par une liaison série Figure 0.5. La chaîne de test constituée du PC et du lecteur est présente dans l'habitacle du véhicule. Le lecteur raccordé à l'antenne du véhicule pilote les différents dialogues avec le Tag en respectant le protocole de communication dont les commandes principales : identification du Tag, lecture Tag, écriture Tag, gestion de l'anticollision sont rappelées en "Annexe 10 : Protocole des commandes PICOTAG"

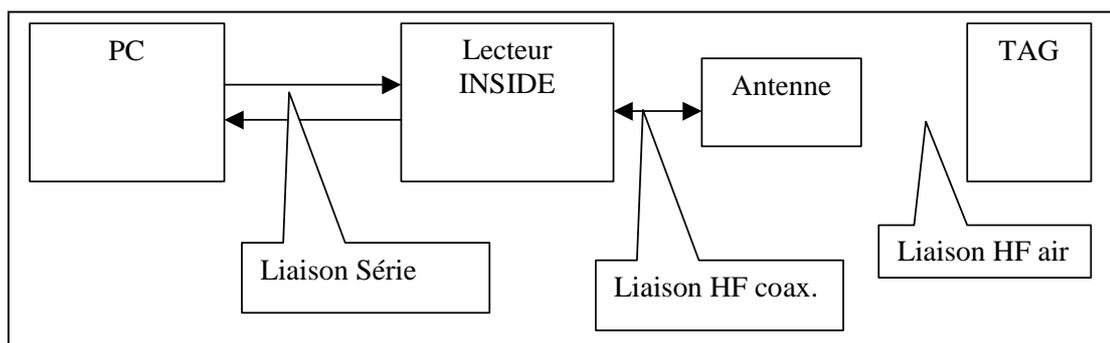


Figure 0.5 Chaîne d'expérimentation des transpondeurs INSIDE

Nous avons mis en évidence avec ces expérimentations que (Tableau 0.1) :

1. Le temps d'identification du Tag est relativement long : 24,5ms.
2. Les cycles de lecture ou d'écriture sont très lents respectivement 303, 105 ms.
3. La phase de gestion de l'anticollision est relativement longue 104 ms pour 2 tags.

Ce qui exclut l'utilisation de ce transpondeur¹⁰ car dans le cas d'étude, le temps de transfert de l'information est de 10ms pour une vitesse véhicule de 40 m/s.

¹⁰ et ceux des autres constructeurs dont les temps moyens spécifiés sont comparables.

Type de commande	Temps d'exécution (ms)
Identification du Tag	24,5
Traitement de l'anticollision entre deux Tags	104
Écriture	105
Lecture	303
Distance entre deux tags	55

Tableau 0.1 Temps d'exécution des principales commandes de dialogue avec un transpondeur 13.56 MHz.

Positionnement de l'étude de cas

Rappelons brièvement les principales revendications de l'expression de besoin mentionnée au § 2.1.1 à partir du diagramme schématisant le principe du dialogue véhicule infrastructure (Figure 0.3). Le lecteur embarqué dans le véhicule assure par couplage magnétique :

1. La communication avec le transpondeur placé sur ou dans la bande de roulement de la chaussée,
2. La télé-alimentation du transpondeur,
3. Et la localisation du véhicule en positionnement latéral et longitudinal.

A partir de ce diagramme de premier niveau, nous pouvons décliner certaines exigences concernant les caractéristiques essentielles de ce moyen de communication :

1. La distance de dialogue doit être comprise entre 20 et 40 cm¹¹.
2. La communication doit être établie pour toutes les conditions climatiques.
3. La vitesse de déplacement du véhicule à 144 km/h^{12 13}.
4. Un temps de passage au-dessus du transpondeur de 10 ms¹⁴.
5. Concevoir une architecture du transpondeur compatible avec la télé-alimentation de ce dernier.

Avant de proposer une architecture candidate, il est nécessaire de définir la notion d'attributs de la chaussée et quels seront ces attributs.

¹¹ Une estimation sera faite de la portée maximale possible

¹² 40 mètres par seconde.

¹³ Rappel vitesse supérieure à la limite légale, mais il faut quand même continuer à dialoguer avec le transpondeur.

Quels seront les attributs de la chaussée?

Les attributs seront donnés par la trajectoire de référence élaborée à partir du tracé et de la géométrie des routes dans le but de maximiser le confort de l'usager par la limitation du jerk¹⁵ afin d'obtenir la trace de référence.

4.1.2 Construction d'une route

Nous présentons ci dessous les principaux principes régissant la construction des routes en France [ICTAAL 1985]et [Glaser 1999].

4.1.2.1 Les types de routes

En France, il existe trois types de routes principales interurbaines : **R** (Route multifonctionnelle), **T** (Transit) et **L** (Liaison). Le type R sert de liaison à courte ou moyenne distance dans un milieu rural, les types T ou L effectuent une liaison à moyenne ou longue distance en étant isolés de leur environnement (Tableau 0.1.)

Un type de route doit être conservé au moins sur une portion de 10 km. A chaque type de route sont associés des minimums pour les rayons de courbures, des maximums pour les dévers.

Les figures géométriques que l'on retrouve pour la construction des routes sont : la ligne droite, le cercle et la clothoïde¹⁶.

¹⁴ A moduler en fonction des performances

¹⁵ Dérivée de l'accélération

¹⁶ Assure le raccord entre le cercle et la ligne droite

Types de route	R		T	L
	Routes	Artères urbaines	Routes express	Autoroutes
Nbr de chaussées	1	2	1	2
Carrefours	plans ou giratoires	giratoires ou plans plans sans traversée du TerrePleinCentral	dénivelés	dénivelés
Traversées d'agglomérations	possible		non	non
Catégories	R60 ou R80		T80 ou T100	L100 ou L120
Traffic à terme	moyen	fort	moyen	fort

Tableau 0.1 Caractéristiques des différents types de routes

A chacun des sous types de route correspond une vitesse de référence qui diffère de celle pratiquée par les utilisateurs (V_{85} , vitesse qui n'est dépassée que par 15 % des usagers)

Catégories	R60	R80, T80	T100	L80	L100	L120
Limitations	90	90/110	90	90/110	110/130	130

Tableau 0.2 Limitation des vitesses en fonction du type de routes

4.1.2.2 Le cercle

Pour un véhicule dans un virage de dévers δ , est soumis à

$$\text{Son poids : } P = Mg$$

$$\text{Et la force centrifuge : } F = \frac{MV^2}{R}$$

V la vitesse du véhicule et R le rayon de courbure de la trajectoire et comme le dévers est inférieur à 7%, on a les simplifications suivantes : $\sin(\delta) = \tan(\delta) = (\delta)$ et $\cos(\delta) = 1$

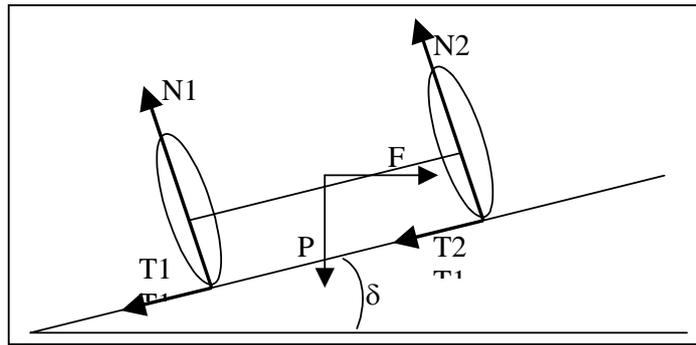


Figure 0.1 Représentation des forces en présence.

$$N_1 + N_2 = P + \delta F \quad (0.1)$$

$$T_1 + T_2 = F - \delta P \quad (0.2)$$

$$T_1 = K\alpha N_1 \text{ et } T_2 = K\alpha N_2$$

soit en remplaçant F et P par leur expression :

$$K\alpha = \frac{\frac{V^2}{gR} - \delta}{1 + \frac{\delta V^2}{gR}} \quad (0.3)$$

Or $\frac{\delta V^2}{gR} \ll 1$, on obtient la formule simplifiée :

$$R = \frac{V^2}{g(\delta + K\alpha)} \quad (0.4)$$

Le coefficient $K\alpha$ dépend de la vitesse, noté $f(v)$ et aussi d'une notion de confort, il est proportionnel à l'accélération transversale non reprise par le dévers. Il est possible de le calculer en fonction du dévers et de la vitesse le rayon minimum R_m :

V en km/h	40	60	80	100	120	140
$f(v)$	0.25	0.16	0.13	0.11	0.10	0.09
dévers en %	7	7	7	7	7	6.5
R_m	40	120	240	425	665	1000

Tableau 0.3 Rayon minimum en fonction de la vitesse et du dévers.

Les normes prévoient trois types de rayons minimum en plan :

Le **rayon minimum** R_m : il est calculé pour un dévers maximum.

Le **rayon au dévers minimum** R_{dm} : il est calculé pour un dévers de 2.5%.

Le **rayon non déversé** R_{nd} : c'est le rayon à partir duquel la route n'a plus à être déversée.

Catégories	R60	R80, T80, L80	T100, L100	L120
R_m	120	240	425	665
R_{dm}	450	650	900	1500
R_{nd}	600	900	1300	1800

Tableau 0.4 Les différents rayons R_m , R_{dm} et R_{nd} en fonction du type de route.

4.1.2.3 La clothoïde

Son rôle est de raccorder le cercle et la ligne droite en introduisant progressivement l'accélération transversale. Elle peut être parcourue à vitesse constante en tournant le volant à vitesse constante. C'est une spirale dont l'équation intrinsèque est : $A^2 = RL$. Le choix des longueurs de raccordement doit respecter les trois conditions suivantes :

La **condition de confort dynamique** : c'est la condition qui permet de limiter la variation de l'accélération transversale. Elle dépend du type de routes (cf. Tableau 0.5 ci-dessous.) L'accélération transversale s'exprime par :

$$\gamma_t = \frac{V^2}{R} - g\delta \quad (0.5)$$

Pour l'autoroute

$$\frac{\Delta\gamma_t}{\Delta t} < \frac{g}{50} \quad (0.6)$$

Or à l'entrée de la clothoïde : $t = 0$ et $\gamma = 0$, et à sa sortie $t = \frac{L}{V}$, on obtient :

$$L \geq 50V \left(\frac{V^2}{gR} - \delta \right) \quad (0.7)$$

Catégories	Autoroutes : $g/50$ par seconde	Routes : $g/(0,2V)$, V en km/h		
		50	90	110
Accélération transversale	0,20	0,98	0,55	0,45

Tableau 0.5 Accélération transversale en fonction du type de route respectant la condition de confort dynamique.

La **condition de gauchissement** : pour limiter la variation du dévers à 2% par seconde de parcours.

La **condition de confort optique** : pour être perceptible, un raccordement doit correspondre à un changement de plan d'au moins 3°, ce qui correspond à $L > \frac{R}{9}$.

4.1.2.4 Le profil en long

Les rayons minimaux pour les angles saillants et rentrants sont fixés relativement à la visibilité :

- 1) de jour pour le rayon minimum en angle saillant R_{vm} ,
- 2) de nuit (faisceau des phares) pour le rayon minimum en angle rentrant $R_{vm'}$
- 3) au confort dynamique des usagers limitation de l'accélération verticale à : $\frac{g}{40}$. On obtient

les rayons suivants :

Catégories	R60	R80, T80, L80	T100, L100	L120
R_{vm}	1500	3000	6000	1000
$R_{vm'}$	1500	2200	3000	4200

Tableau 0.6 Rayons minimaux de jour et de nuit respectant le confort dynamique des usagers pour le profil en long.

4.1.2.5 Le profil en travers

En plus de la chaussée, zone roulable, la construction routière prévoit deux zones pour la sécurité des voyageurs :

La **zone de récupération** permet de supporter les manœuvres de freinage et de redirection. Pour les autoroutes c'est la bande d'arrêt d'urgence. Pour les autres routes, une surlageur de 0.25m identique à la chaussée supportant le marquage et une partie stabilisée. Elle doit permettre la récupération de trajectoire et l'évitement de véhicules.

La **zone de sécurité** est constituée de la zone de récupération et d'une zone sans obstacle. Elle vaut 4m dans le cas des routes existantes, 7m pour les nouveaux aménagements du type R ou T, 8.5m pour R110 et 10m pour les autoroutes.

4.1.3 Classifications des attributs

Les attributs stables ont une variation attendue supérieure à quelques jours. Les lentement évolutifs ont une durée de vie de quelques heures à quelques jours. Pour les attributs temps réel, la variation des paramètres va de la seconde à quelques heures. Le tableau ci-dessus tente une classification des attributs en fonction du type de routes.

	Autoroutes	Routes nationales
Stables	La trace Le profil en travers Les accès L'uni	La trace Le profil en travers le type d'intersection L'uni la signalisation verticale
lentement évolutifs	L'adhérence Le profil de vitesse Les positions des travaux	L'adhérence Le profil de vitesse Les positions des travaux Les caractéristiques des feux durées des verts, dates des prochains cycles Les temps de parcours
temps réel	Le profil de vitesse Incidents La visibilité Informations relatives aux véhicules	Le profil de vitesse proche d'une intersection Incidents La visibilité Informations relatives aux véhicules Les caractéristiques des feux adaptatifs, l'état des feux, les deux derniers cycles Les longueurs des files d'attente, temps d'attente aux feux

Tableau 0.7 Classification des attributs en fonction du type de routes.

Pour faire une estimation du volume d'information, nous pouvons évaluer que les données pourront être codées sur un mot de 16 bits.

Les données suivantes devront impérativement être présentes dans la structure

1. Abscisse curviligne
2. Dévers
3. Rayon de courbure
4. Vitesse maximale
5. Type de route
6. Texture
7. Adhérence
8. Sens de circulation

Soit une dizaine de mots de 16 bits.

L'application de guidage

Après avoir présenté la notion d'attributs, il est nécessaire d'estimer le rythme de présentation de ces paramètres. Pour cela, plaçons-nous dans le cadre de l'application de guidage sur route ou autoroute. Définissons le modèle à partir duquel il sera possible de justifier l'organisation des transpondeurs dans lesquels les attributs seront mémorisés.

Prenons pour hypothèse qu'il n'y a pas de glissement latéral pendant le virage de rayon R suivi par un véhicule de longueur L et de largeur B [Wong 1993][Gillespie 1992] (Figure 0.1.)

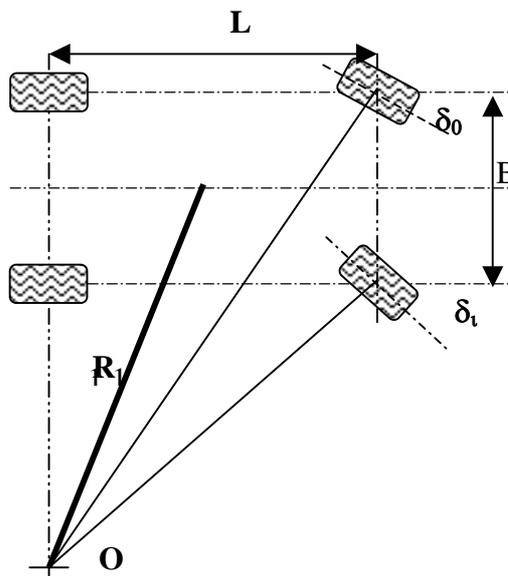


Figure 0.1 Géométrie de braquage sans glissement latéral

Il existe entre l'angle de braquage de la roue interne et de la roue externe la relation suivante :

$$\cot \delta_0 - \cot \delta_i = B / L$$

Pour tenir compte de la force centrifuge, de la répartition des masses à l'intérieur du véhicule, des forces de traction et de freinage, il est nécessaire de faire apparaître des angles de glissements sur les roues arrière et avant. Le modèle précédent peut être ramené au modèle du bicyclette (Figure 0.2.)

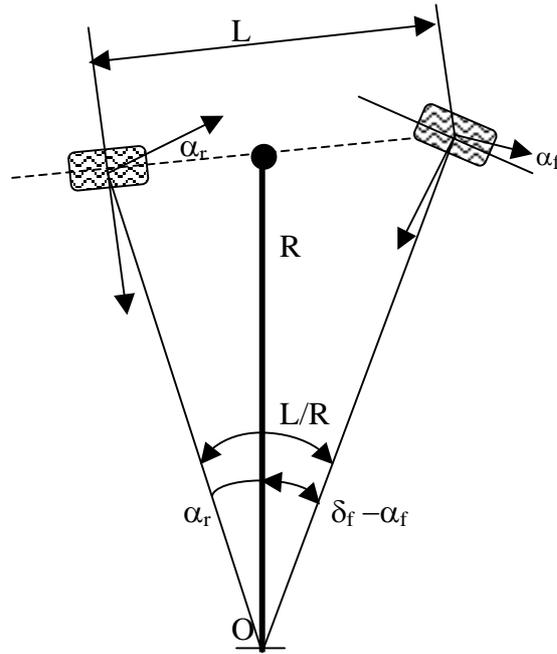


Figure 0.2 Modèle du bicycle

Avec :

$$\delta_f - \alpha_f + \alpha_r = L/R$$

En considérant les angles faibles, W_f et W_r le poids sur les roues avant et arrière, l'équation précédente devient :

$$\delta_f = \frac{L}{R} + \left(\frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}} \right) \frac{V^2}{gR} \quad (0.1)$$

En exprimant les angles de glissement [Wong 1993]:

$$\alpha_f = \frac{F_{yf}}{2C_{af}} = \frac{W_f}{C_{af}} \frac{V^2}{gR} \quad (0.2)$$

$$\alpha_r = \frac{F_{yr}}{2C_{ar}} = \frac{W_r}{C_{ar}} \frac{V^2}{gR} \quad (0.3)$$

Avec, C_{af} et C_{ar} les coefficients de raideur latérale avant et arrière.

L'équation (0.1) devient :

$$\delta_f = \frac{L}{R} + K_{us} \frac{V^2}{gR}$$

$$\delta_f = \frac{L}{R} + K_{us} \frac{a_y}{g} \quad (0.4)$$

K_{us} : coefficient de survirage et a_y accélération latérale. Dans le cas d'un véhicule neutre $K_{us} = 0$. L'accélération latérale est obtenue à partir de la vitesse longitudinale v [Plainchault 2003a].

$$\delta = \frac{L}{v^2} a_{cc} \quad (0.5)$$

D'après la condition de confort dynamique, l'accélération ne doit pas dépasser 0,2 g. soit 2m.s⁻² sur autoroute (Tableau 0.5 Accélération transversale en fonction du type de route respectant la condition de confort dynamique.) Ce qui nous donne le rayon de courbure maximum :

$$R = \frac{V^2}{a_{cc}} \quad (0.6)$$

4.1.4 Définition de la précision du positionnement longitudinal

En fonction de la vitesse longitudinale, il reste à définir la distance S parcourue par le véhicule lorsqu'il aura atteint la déviation maximale d rattrapable par l'automatisme de suivi de trajectoire par rapport à sa trajectoire rectiligne initiale qu'il devait suivre (Figure 0.3.)

Supposons que le véhicule suive alors une trajectoire circulaire de rayon R (0.6) à vitesse constante V . Cette distance devra correspondre à la valeur maximale pouvant être corrigée par les correcteurs embarqués.

$$x^2 + \left(y - \frac{V^2}{a_{cc}} \right)^2 = \frac{V^4}{a_{cc}^2}$$

La longueur L sera assimilée égale au segment S parcouru par le mobile du fait d'un rayon de courbure R très grand devant la distance de déviation d .

$$s = Vt = R\omega t \approx L$$

$$d = R(1 - \cos \omega t)$$

$$d = R\left(1 - \cos \frac{L}{R}\right)$$

(0.7)

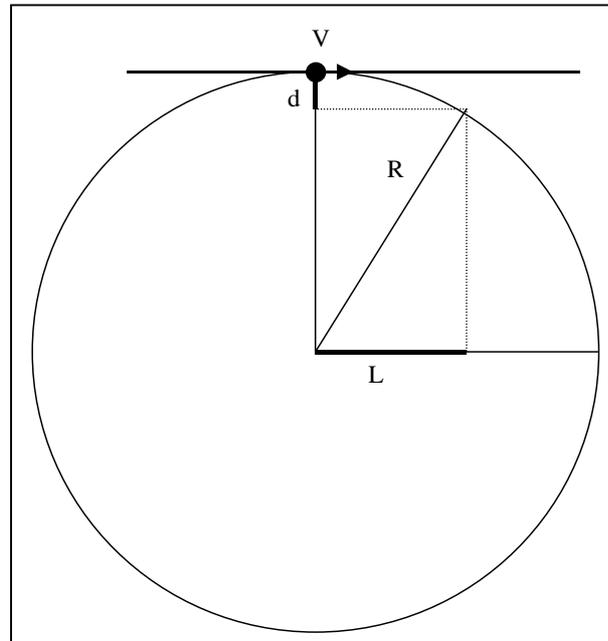


Figure 0.3 Détermination de l'écart de trajectoire en fonction de la distance parcourue.

Nous montrons que pour la condition de confort adaptée à l'autoroute, donc pour un rayon de courbure de l'ordre de 800 mètres et à une vitesse de 130 km/h, le véhicule aura parcouru 10 mètres avant de s'être écarté de 8 cm de sa trajectoire rectiligne, et ceci en 0,28 seconde (Figure 0.4.)

En d'autres termes, sur autoroute, il faut exécuter tous les 10 mètres un recalage de la trajectoire du véhicule si le correcteur est effectivement capable de corriger 8 cm d'écart.

Il faut donc disposer longitudinalement **tous les 10 mètres** le dispositif capable de donner le positionnement latéral du véhicule.

Par contre en ville, ce dispositif devra être présent **tous les 6 mètres**.

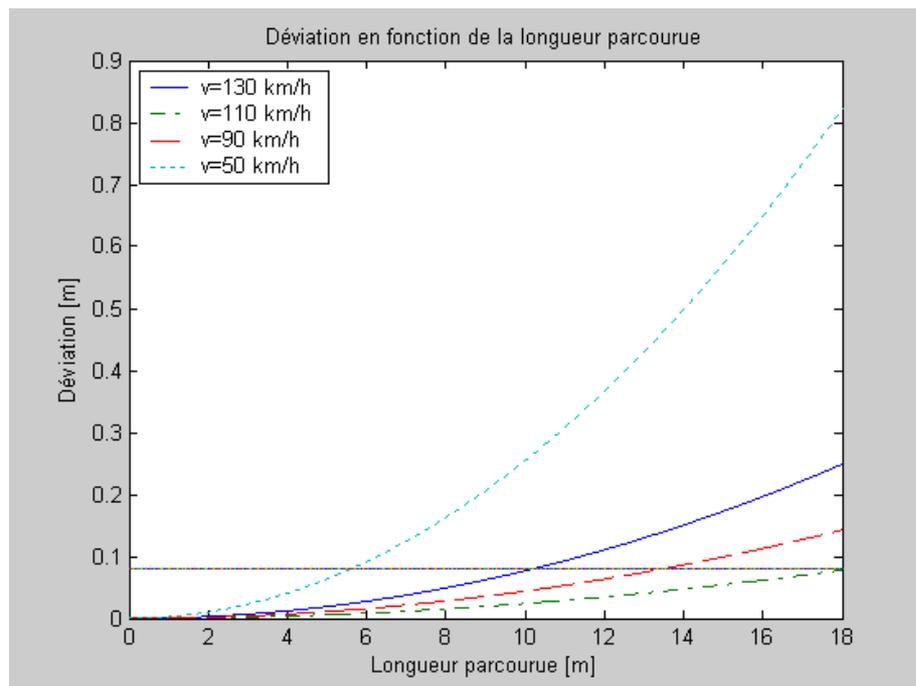


Figure 0.4 Pour les conditions de confort adaptées aux différentes vitesses, variation de l'écart par rapport à la trajectoire rectiligne en fonction de la distance parcourue sur une trajectoire circulaire.

4.1.5 Définition de la précision du positionnement latéral

La précision sur le positionnement latéral dépend uniquement de la capacité dynamique du correcteur de trajectoire à rattraper l'écart maximal entre la trajectoire suivie et la trajectoire idéale. Concernant notre cas d'étude, le correcteur disponible au LIVIC peut effectivement rattraper jusqu'à 8 centimètres. Nous pouvons ainsi définir le réseau de transpondeurs à déployer.

Le réseau de transpondeurs

Pour assurer le positionnement latéral, nous logeons dans l'infrastructure un ensemble de transpondeurs disposés transversalement à l'axe de la chaussée, espacés tous les 8 cm et se répétant

tous les 10 mètres (Figure 0.1.). Ainsi, tous les dix mètres, le véhicule peut connaître sa position latérale avec une précision de 8cm.

Le véhicule, équipé d'une base station dont l'antenne de communication est logée sous le bas de caisse, passant au droit des transpondeurs activerait certains transpondeurs par exemple les 3, 4 et 5 à l'aide du champ magnétique rayonné par son antenne (Figure 0.1). Les transpondeurs, ainsi réveillés, pourraient retourner à la base station leur numéro d'identification, ce qui permettrait ainsi au lecteur de connaître sa position latérale et longitudinale.

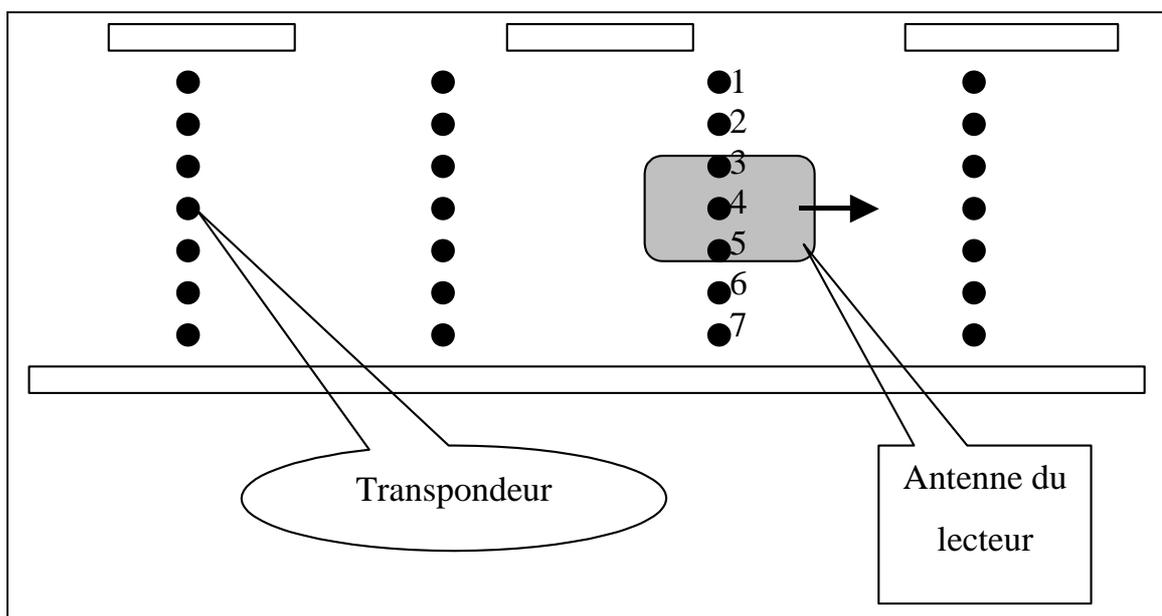


Figure 0.1 Réseau de N transpondeurs tous les 10 mètres.

Cette solution présente comme avantage de permettre une localisation latérale et longitudinale mais nécessite :

1. Un nombre important de transpondeurs.
2. Une gestion des collisions qui est consommatrice de temps (cf. § 3.1.10)
3. Une impossibilité au véhicule d'écrire dans les transpondeurs. En effet il serait impossible d'assurer la cohérence des écritures. Dans l'exemple ci-dessus, toute écriture dans les transpondeurs 3, 4 et 5 ne pourrait pas être dupliquée vers les transpondeurs 1, 2, 6 et 7 puisqu'ils ne sont pas dans le champ de l'antenne, donc non alimentés.

L'utilisation des transpondeurs est-elle alors totalement exclue ?

Non, nous avons développé une nouvelle architecture adaptée aux besoins spécifiques de cette étude de cas. La solution mise en œuvre a fait l'objet du dépôt de brevet français dont la revendication principale porte sur l'invention d'un dispositif à n transpondeurs et p antennes avec $p > n$ [Plainchault 2002] (Figure 0.2).

En un point repère de la chaussée, nous logeons un seul transpondeur connecté à un ensemble d'antennes disposées transversalement dans la bande de roulement. Cette architecture de principe permet au véhicule d'écrire ou de lire des informations dans la mémoire du transpondeur, indépendamment de sa position latérale sur la chaussée. Par exemple, lorsqu'il passe sur les antennes 1-2-3 ou 4-5-6, la tension induite dans les antennes activera un seul et même transpondeur.

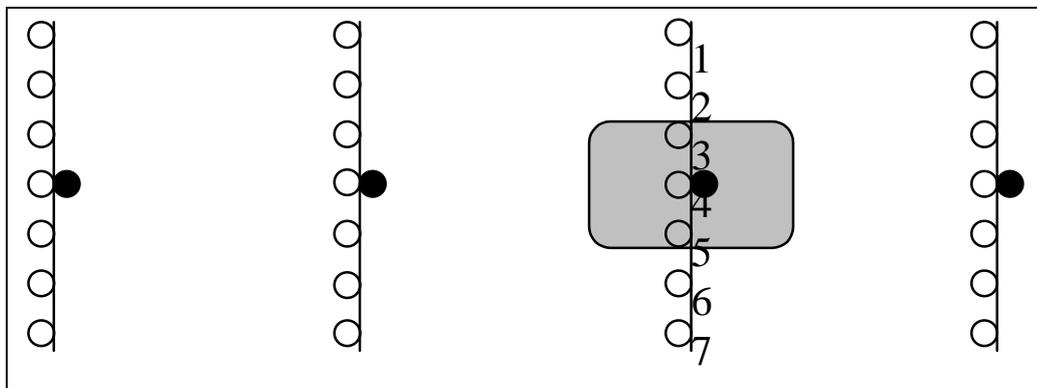


Figure 0.2 Schéma de principe du transpondeur adapté à l'application de guidage

Par construction de la chaussée, supposons que l'antenne n° 4 soit placée au centre de la voie de circulation. Le transpondeur pourra déduire la position latérale du véhicule en regardant quelles sont les antennes présentant une tension induite. Par exemple sur la figure précédente, les antennes 3, 4 et 5 sont activées, nous pouvons en déduire que le véhicule est au centre de la voie de circulation.

En fonction de la précision latérale voulue, il suffira d'utiliser plus ou moins d'antennes puisqu'elle sera uniquement fonction de l'écart entre les antennes du transpondeur. Dans la mise en œuvre pratique, les antennes ont été placées tous les 8 cm. Pour limiter l'influence des mutuelles inductions entre deux antennes successives, elles pourront au mieux être situées tous les 3cm.

La précision latérale maximale sera de 3 cm.

Cette organisation permet alors, comme nous l'avons mise en œuvre dans l'application "boîte aux lettres", d'assurer l'écriture de données dans la mémoire du transpondeur quelle que soit la position

latérale du véhicule. Autrement dit, que l'antenne du véhicule soit sur l'antenne 1 ou 7 du transpondeur, nous pourrions assurer la cohérence des informations présentes dans le transpondeur.

Il est alors maintenant possible de décliner la conception de l'architecture du transpondeur adapté au cas d'étude.

Étude du transpondeur

4.1.6 Schéma bloc du transpondeur adapté au cas d'étude

En reprenant les hypothèses de travail des paragraphes 0 et 0, le schéma bloc du transpondeur Figure 0.1, il est possible d'identifier les antennes dont les caractéristiques seront détaillées au § 4.1.7 . Ces antennes auront pour rôle de permettre la télé-alimentation, la récupération du message émis par l'antenne du lecteur et de fournir la réponse du transpondeur à la base station par modulation de charge.

Le microcontrôleur assurera la prise en compte des commandes issues du démodulateur, l'identification des antennes recevant un champ magnétique, la fourniture du message binaire dont le code d'identification du transpondeur, l'écriture ou la lecture dans la FRAM.

Le signal binaire issu du microcontrôleur sera mis en forme par le modulateur de charge pour remonter au lecteur la réponse du transpondeur.

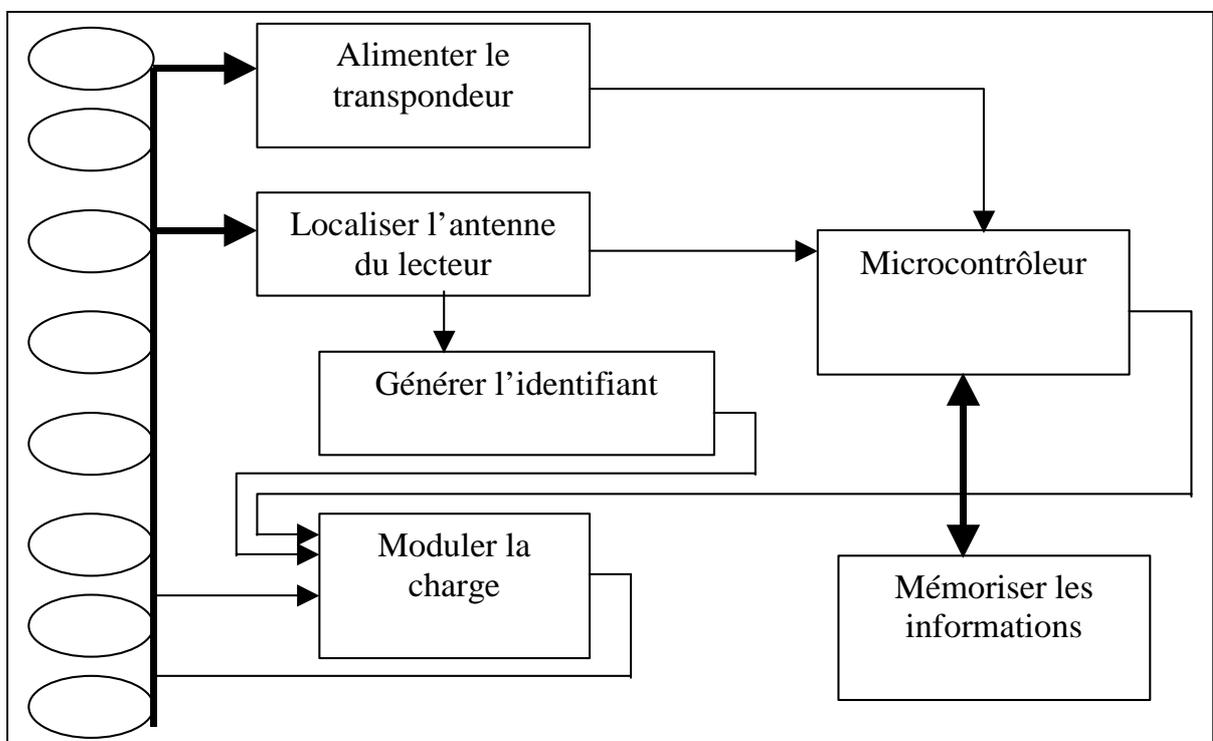


Figure 0.1 Schéma bloc du transpondeur adapté à l'application de guidage

4.1.7 Dimensionnement des antennes du transpondeur

4.1.7.1 Caractéristiques mécaniques

Pour assurer la précision latérale de 8 cm, il faut utiliser un ensemble d'antennes espacées les unes des autres de 8 cm. Pour des raisons de facilité de réalisation, ces antennes seront conçues sur circuit imprimé d'une largeur de 4,5 cm et d'une longueur de 7,5 cm.

4.1.7.2 Caractéristiques électriques

Les principales caractéristiques électriques d'une telle antenne sont [Paret 2003]:

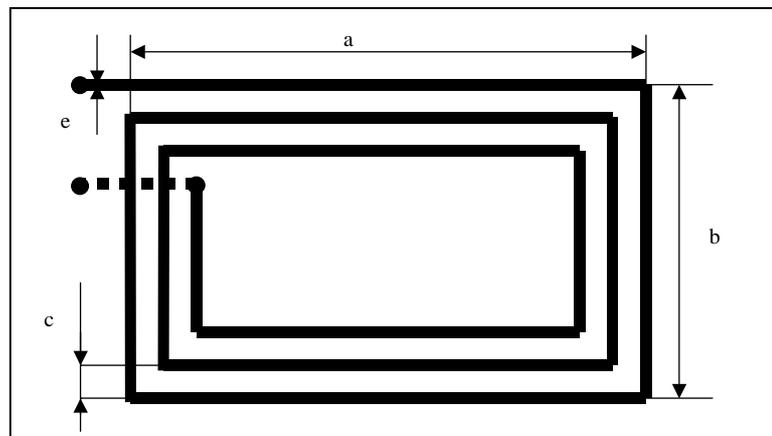


Figure 0.2 Antenne imprimée du transpondeur

$$L = 2 \cdot l \left[\ln \left(\frac{l}{e} \right) - k \right] N^P$$

$$L = L_0 N^P$$

(0.1)

L = inductance totale de la bobine (en nH)

L_0 = inductance d'une spire

l = circonférence ($2\pi r$) ou longueur ($2 \cdot (a+b)$) d'une spire de l'antenne (en cm)

e = diamètre du fil ou largeur de la piste (en cm)

N = Nombre de tours

k = facteur de correction fonction de la géométrie de l'antenne

= 1,04 pour les antennes rectangulaires format carte ISO

= 1,07 à 1,16 pour les antennes circulaires proche de $\ln(\pi)$

= 1,47 pour les antennes carrées

P = exposant dépend de la technologie du bobinage.

= 2 si le couplage est de 100% entre les tours

= 1,8 à 1,9 pour les antennes en fil

= 1,7 à 1,85 pour les antennes gravées

= 1,5 à 1,75 pour les antennes imprimées.

Pour le cas d'étude nous retiendrons $k = 1,04$ et $P = 1,7$.

Il est alors possible en fonction du nombre de tours N , de la largeur e de la piste gravée sur du cuivre de $35 \mu\text{m}$ d'épaisseur, de résistivité $\rho = 1,72 \cdot 10^{-2} \mu\Omega\cdot\text{m}$ de déterminer le facteur de qualité propre de l'antenne Q et sa résistance série r_s .

			Dimension de l'antenne				s du conducteur		k	p	r_s	Q
L	L_0	N	a	b	l					$\rho \cdot lN/S$	1,36E+07	
μH	nH		cm	cm	cm	N^P	μ	μ		Ω		
0,2	234	1	7	4,5	23,0	1,0	500	35	1,04	1,7	0,23	88,0
0,8	234	2	7	4,5	23,0	3,2	500	35	1,04	1,7	0,45	143,0
1,5	234	3	7	4,5	23,0	6,5	500	35	1,04	1,7	0,68	189,9
2,5	234	4	7	4,5	23,0	10,6	500	35	1,04	1,7	0,91	232,3
3,6	234	5	7	4,5	23,0	15,4	500	35	1,04	1,7	1,13	271,6
4,9	234	6	7	4,5	23,0	21,0	500	35	1,04	1,7	1,36	308,5
2,1	200	4	7,2	4,2	22,8	10,6	1000	35	1,04	1,7	0,45	400,5
0,2	169	1	7,2	4,2	22,8	1,0	2000	35	1,04	1,7	0,06	255,6
0,5	169	2	7,2	4,2	22,8	3,2	2000	35	1,04	1,7	0,11	415,2
1,1	169	3	7,2	4,2	22,8	6,5	2000	35	1,04	1,7	0,17	551,5
1,8	169	4	7,2	4,2	22,8	10,6	2000	35	1,04	1,7	0,22	674,5
2,6	169	5	7,2	4,2	22,8	15,4	2000	35	1,04	1,7	0,28	788,6

Tableau 0.1 Valeur d'inductance en fonction de ses caractéristiques mécaniques

D'après l'équation (0.29) et Figure 0.9 la valeur de l'inductance doit être d'environ de $L_2=1 \mu\text{H}$.

La fréquence retenue pour la porteuse étant de 13.56 MHz (§ 3.1.4), la capacité d'accord a pour valeur équation (0.26) :

L (μH)	F (MHz)	w (rad/s)	C (pF)
1,00	13,56	8,52E+07	138

Tableau 0.2 Valeur de la capacité d'accord

Pour la liaison descendante, il est souhaitable de disposer d'un code dont la valeur moyenne est indépendante du message à transmettre et maximisant le transfert d'énergie.

Nous utilisons donc le **code Manchester** (Tableau 0.4).

Le débit possible dépendra de la bande passante et des normes applicables. En Europe, la norme applicable¹⁷ autorise pour une porteuse à 13,56 MHz \pm 7 kHz d'un niveau de 84 dB μ V/m, une bande passante de \pm 150 kHz à 50,5 dB μ V/m, les mesures étant effectuées à 30 mètres [EN 300 330 1994]. La restriction FCC 47¹⁸ impose 29,5 dB μ V/m.

Pour le code Manchester, le temps bit théorique maximal est $T_b = 1,16/B_p$ (Tableau 0.3) ce qui permet d'espérer pour une bande passante de 300 kHz un taux de transfert maximal de : **257 kBps**.

Taux de transfert [kBps]	F (MHz)	Q
300,00	13,56	45

Tableau 0.3 Facteur de qualité correspondant à la bande passante maximale **Q=45**

Cette valeur reste compatible avec le facteur de qualité compris entre 30 et 40 obtenue suivant la condition du champ H minimal (Figure 0.12).

Il faut donc diminuer le facteur de qualité de l'antenne en plaçant une résistance en série¹⁹ avec l'inductance dont la valeur sera :

$$R_{ext} = \frac{L_2 \cdot \omega}{Q} - r_s$$

4.1.8 La mémoire du transpondeur

¹⁷ EN 300-330.

¹⁸ Pour les États Unis.

¹⁹ Ou son équivalent parallèle.

4.1.8.1 La mémoire morte

Nous utiliserons la mémoire de type EEPROM présente dans le microcontrôleur. Elle sera utilisée pour stocker les données statiques telles que le numéro d'identification du transpondeur codé sur 64 bits.

4.1.8.2 La mémoire vive

Le transpondeur sera auto alimenté uniquement lorsqu'il sera dans le champ magnétique de l'antenne du lecteur, la mémoire devra assurer la rétention des informations, même en cas d'absence du champ magnétique. Il faudra disposer d'une mémoire vive non volatile par exemple une EEPROM. Pour cette technologie, le nombre de cycles d'écriture est limité à 100 000 (§3.1.9).

Pour les paramètres stables ou lentement évolutifs ne nécessitant pas plus de 2 écritures par jour pendant 5 ans, cette technologie peut être retenue. Par contre, pour les paramètres temps réels, tels que des paramètres inscrits par chaque véhicule, il faut tenir compte du flux moyen de véhicule. Sur le périphérique, par exemple, ce flux est de 2 000 véhicules par heure ce qui permet uniquement 50 heures d'utilisation !

Cette technologie EEPROM **n'est donc pas exploitable** pour cette application, la seule solution restante consiste à utiliser une **FRAM**.

La capacité de cette mémoire est de 2 k octets. La mémoire dialogue avec le processeur suivant protocole I2C.

Elle nécessite une tension d'alimentation d'au moins 2,7 V.

4.1.9 Le processeur

4.1.9.1 Reset

Il a été vu précédemment que le temps de passage au-dessus du transpondeur est très bref environ 10 ms pour une vitesse de 144 Km/h (Figure 0.1). C'est pourquoi il sera nécessaire de mettre en jeu un processeur ayant un temps d'initialisation **le plus court possible** afin de laisser le plus possible de temps au dialogue avec la base station. Les microcontrôleurs les plus classiques ont des temps de reset de 1 à 10 ms.

Nous avons retenu le processeur MSP430C11F1 du constructeur Texas Instrument qui offre un temps de réveil parmi les plus courts du marché : 600 μ s. En fonction de l'initialisation interne, l'application peut commencer à échanger des données avec le lecteur au bout de 0.9 ms.

4.1.9.2 Alimentation

Le processeur doit pouvoir fonctionner sur une large plage de variation de la tension d'alimentation tout en présentant une consommation la plus faible possible.

Le MSP 430 tolère une plage de fonctionnement de 1,8 V à 3,6V.

Sa consommation est fonction de la fréquence de travail.

$$I_{AM} = I_{AM[1MHz]} \times f_{system} \quad (0.2)$$

Ce qui donne pour une fréquence de 2 MHz, un courant de consommation en mode actif de 400 μ A.

Nous avons fixé cette fréquence pour nous permettre un transfert maximal de données de 76 kbps.

4.1.9.3 Le démodulateur

Les signaux transmis par le lecteur sont des signaux en modulation d'amplitude dont la fréquence de la porteuse est à 13,56 MHz et la modulation à 100%. L'information binaire est codée Manchester afin de permettre la téléalimentation.

Le décodage est très simplement réalisé par un détecteur de crête au travers de la jonction base émetteur d'un transistor d'adaptation (transistor Q2 Figure 0.4). Le signal issu de ce transistor est ensuite appliqué vers le microcontrôleur.

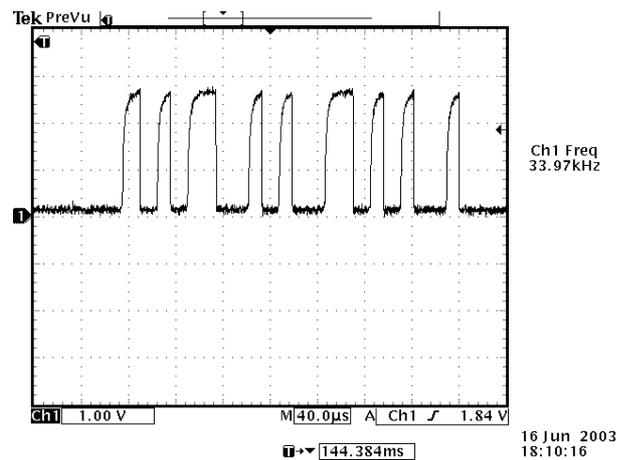


Figure 0.3 Signal binaire issu du transistor de démodulation

4.1.9.4 Le modulateur de charge

La modulation de charge est également très simplement mise en œuvre. Elle consiste à venir court-circuiter l'antenne de réception du transpondeur (par un transistor Q_1 , Figure 0.4) ce qui fait que la charge évolue entre 0Ω et 3900Ω . Cette valeur de 3900Ω représente la charge équivalente à l'ensemble du transpondeur. Cette variation de charge se répercute en une modulation d'amplitude au niveau du lecteur (0.11).

4.1.10 Caractéristiques principales du transpondeur

Nous donnons dans le tableau ci-dessous la synthèse des principales caractéristiques du transpondeur développé (Tableau 0.4 et Tableau 0.5).

Les schémas électroniques du transpondeur sont en annexe 7.1.15.

Le lecteur visualisera le transpondeur en annexe 0, Figure 0.1 et Figure 0.2.

Transpondeur				
Paramètres	Symbole	Valeur	Unités	Références
Dimensions de l'antenne				Figure 0.2
Longueur	a	7	cm	
largeur	b	4,5	cm	
Nombre d'antennes		16		
Distance entre deux antennes		8	cm	
		3 min	cm	
Fréquence de la porteuse	F_p	13,56	MHz	§ 3.1.4
Type de codage		Manchester		Tableau 0.4
Coefficient de qualité	Q	Entre 30 et 40		Figure 0.12
Taux de transfert Maximal		257	kBps	Tableau 0.3; [EN 300 330 1994]
Inductance de l'antenne du transpondeur	L_2	1	μ H	Figure 0.9
Résistance de charge de l'antenne du transpondeur	R_L	1000	Ω	Figure 0.11
Fréquence du processeur	f	2	MHz	
Mémoire morte EERPOM			Ko	
Mémoire vive FRAM		2	Ko	

Tableau 0.4 Synthèse des principaux paramètres caractéristiques du transpondeur.

Transpondeur				
Paramètres Induits	Symbole	Valeur	Valeur	Unités
Surface d'une antenne	S_T	a x b	31,5	cm^2
Pulsation de la porteuse	ω_p	$2.\pi.F_p$	$85,2 \cdot 10^6$	Rad/sec
Capacité totale d'accord	C_2	$1/L_2.\omega_p^2$		pF
Tension induite à 23 cm	u	3,5	v	
Consommation	I_{AM}	800	μ A	
Taux de transfert Réel		38 Kbps en Manchester		
		76 Kbps en binaire		

Tableau 0.5 Synthèse paramètres induits par les choix des paramètres principaux du transpondeur.

Étude du lecteur

4.1.11 Caractéristiques de l'antenne du lecteur

Les principales caractéristiques à prendre en compte pour dimensionner l'antenne du lecteur (§0) sont :

1. La distance entre le transpondeur et cette antenne entre 20 et 40 cm.
2. Le temps de passage de l'ordre de 10 ms à 140 km/h.
3. Le respect des normes notamment sur la puissance d'émission et le spectre en fréquence [EN 300 330 1994].

4.1.11.1 Caractéristiques mécaniques de l'antenne

Le temps de passage et les dimensions des antennes du transpondeur (longueur 7cm et largeur 4,5 cm) vont permettre de spécifier les dimensions de l'antenne du lecteur. La longueur sera dans l'axe de la chaussée.

Le passage de l'antenne du lecteur au-dessus du transpondeur va entraîner trois phases liées à la notion de section d'antenne apparente :

1. La première phase (Figure 0.1 b) est caractérisée par le fait que le transpondeur entre dans le champ magnétique rayonné par l'antenne du lecteur. La section apparente de l'antenne va évoluer de 0 à la surface maximale du transpondeur(0.17). Cette évolution va se traduire par une montée croissante de la tension induite u_2 dans le tag jusqu'à ce que ce dernier baigne complètement dans le champ d'induction (0.18).
2. Pendant la deuxième phase (Figure 0.1 c) l'antenne du transpondeur est présente dans le champ de l'antenne du lecteur.
3. Et enfin la troisième phase (Figure 0.1 d), symétrique de la première étape, correspond à la décroissance de cette tension puisque la section apparente de l'antenne du transpondeur évoluera de 31,5 cm² à 0.

Sans oublier les phases pendant lesquelles le transpondeur n'est pas dans le champ de l'antenne du lecteur (Figure 0.1 a et d). Cette représentation réductrice doit évidemment tenir compte de la

notion de seuil minimal de champ magnétique permettant l'induction de la tension nécessaire au bon fonctionnement du transpondeur (Equation (0.31), Figure 0.10).

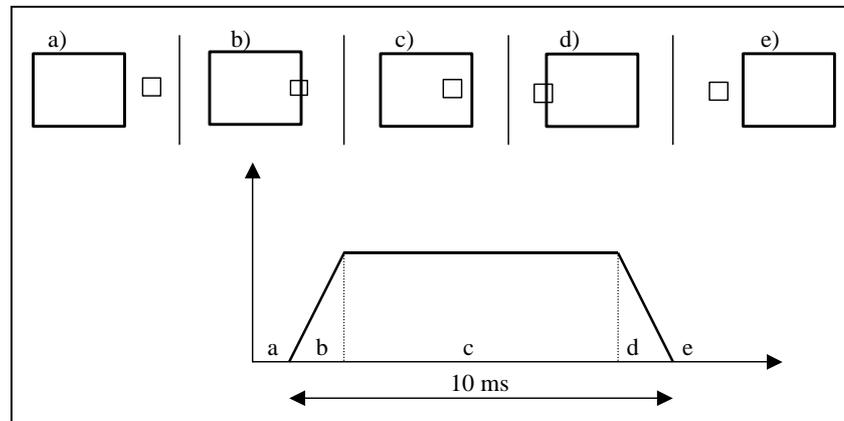


Figure 0.1 Évolution de la section apparente entre les antennes du transpondeur et du lecteur.

Cependant, pour une vitesse de 40 m/s, la distance parcourue en 10 ms est de 40 cm. La longueur ou le diamètre de l'antenne du lecteur doit être de l'ordre de **30 cm**.

Nous avons montré que la distance optimale à l'antenne est de : $d = R\sqrt{2}$ équation (0.14) et (Figure 0.4). Soit ici **d = 21 cm**.

Pour atteindre les 40 cm souhaités, il faudra :

- Soit doubler la taille de l'antenne, ce qui permettra un temps de passage de 20 ms.
- Soit augmenter la puissance d'émission à condition qu'elle reste compatible avec le maximum légal.

4.1.12 Réalisation de l'antenne du lecteur

Pour des raisons de réalisation pratique, nous avons conçu des antennes rectangulaires de dimensions 28 cm x 34 cm et 15 cm x 80 cm pour tester une autre configuration. Les caractéristiques électriques ont été relevées à l'aide d'un analyseur de réseau HP 8753 (Tableau 0.1.).

Antenne 28x34 cm				Antenne 15x80 cm			
Essai	$Z_1 \Omega$	$R_{1S} \Omega$	$L_1 \mu\text{H}$	Essai	$Z_1 \Omega$	$R_{1S} \Omega$	$L_1 \mu\text{H}$
1	74,3	1,270	0,872	1	108,2	2,258	1,270
2	74,2	1,270	0,871	2	108,2	2,211	1,270
3	74,2	1,227	0,871	3	108,1	2,270	1,269
4	75,1	1,270	0,870	4	108,4	2,344	1,272

 Tableau 0.1 Mesures des paramètres R et L des antennes du lecteur.

Nous retiendrons pour l'antenne 28x34 les caractéristiques du schéma équivalent série :

$$R_{1S} = 1,27 \Omega$$

$$L_{1S} = 0,87 \mu\text{H}$$

Ce qui donne pour la fréquence de 13,56 MHz un facteur de qualité Q_1 de :

$$Q_1 = \frac{L_{1S}\omega}{R_{1S}}$$

$$Q_{1S} = 58,34$$

Ou suivant la transformation série parallèle et avec $Q_{1S} \gg 1$, une résistance parallèle de :

$$L_{1P} = L_{1S} = 0,87 \mu\text{H}$$

$$Q_{1S} = Q_{1P} = \frac{R_{1P}}{L_{1S}\omega}$$

$$R_{1P} = 4\,322 \Omega$$

Pour obtenir le facteur de qualité dont la valeur réelle $Q_1 = 40$, il faut placer :

une résistance série externe à l'inductance
d'une valeur égale à :

$$R_{1extS} = \frac{L_{1S}\omega}{Q_1} - R_{1S}$$

Soit

$$R_{1extS} = 0,58 \Omega$$

Ou une résistance parallèle totale de :

$$R_{1totP} = 2\,963 \Omega$$

D'où la valeur de la résistance externe
parallèle à ajouter :

$$\frac{1}{R_{1extP}} = \frac{1}{R_{1totP}} - \frac{1}{R_{1P}}$$

$$R_{1extP} = 9\,265 \Omega$$

4.1.13 Champ rayonné par l'antenne du lecteur

4.1.13.1 Méthode de mesures

L'antenne 28x34 est placée au sol et excitée par le lecteur de l'application. Nous déplaçons le plateau transparent aux ondes électromagnétiques, notamment pour la fréquence 13,56 MHz (Figure 0.2). Sur ce plateau est réalisé un quadrillage de 10cm x 10 cm qui nous permettra de localiser l'antenne du transpondeur. Le plateau peut ensuite être éloigné de l'antenne jusqu'à une distance de 70 cm.

Nous pouvons ainsi repérer dans l'espace l'ensemble des points de mesures. Pour chaque point, nous relevons la tension induite dans l'antenne du transpondeur.

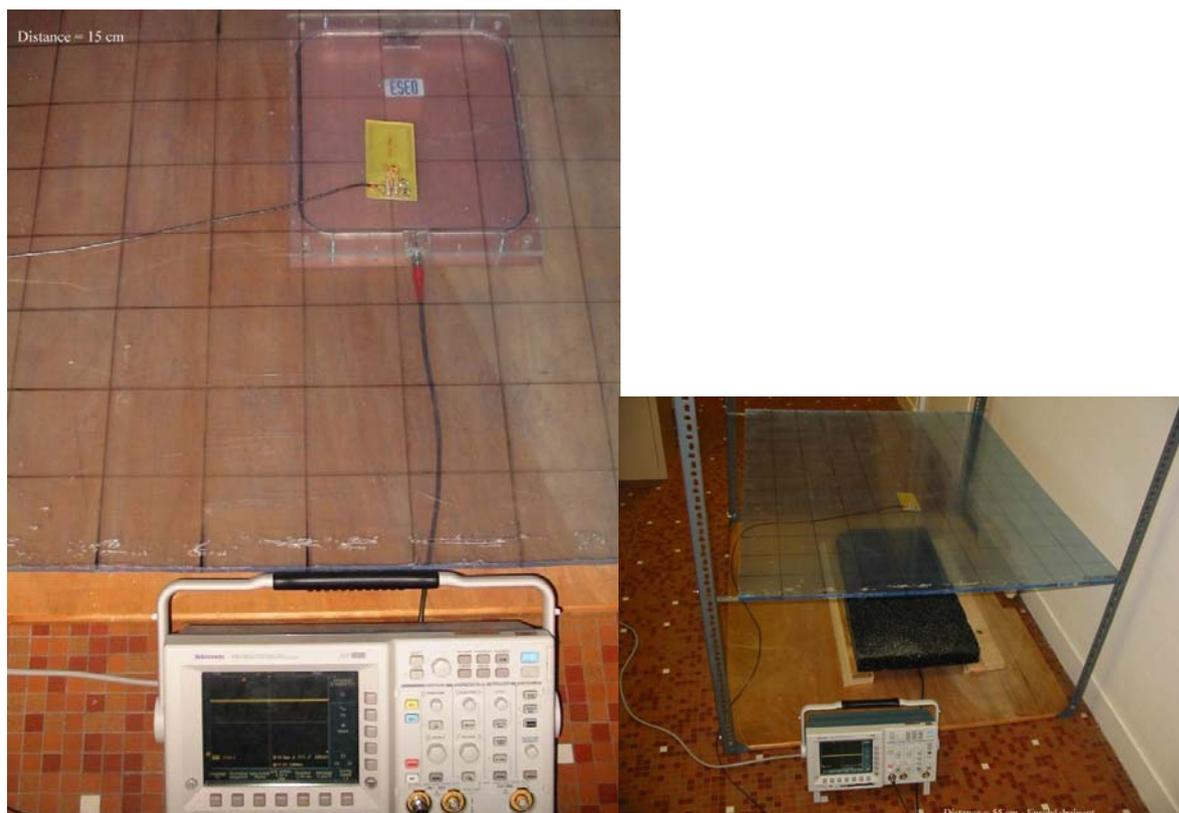


Figure 0.2 Banc de mesure du champ magnétique avec (b) et sans enrobé (a)

4.1.13.2 Mesures du champ rayonné.

Les mesures du champ rayonné par l'antenne 28x34 parcourue par un courant de 0.5A efficace (Figure 0.3 et Figure 0.4) montrent que ce dernier provoque une induction utile lorsque le transpondeur entre dans un volume de base 28 x 34 et de hauteur 25cm.

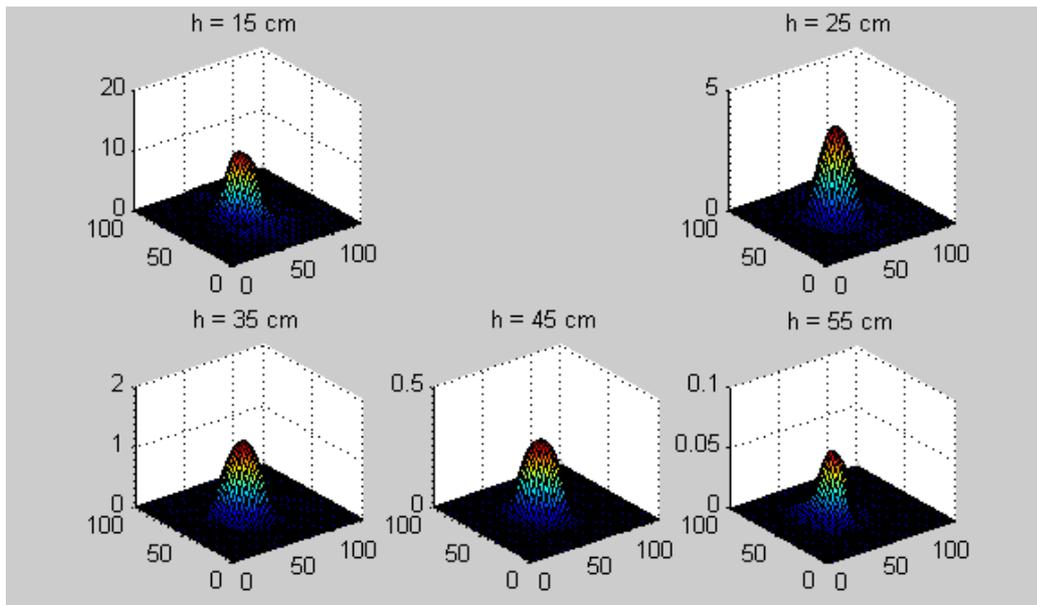


Figure 0.3 Mesure du champ rayonné par l'antenne 28 x 34 à différentes distances du centre de l'antenne. H =15, 25, 35, 45 et 55 cm.

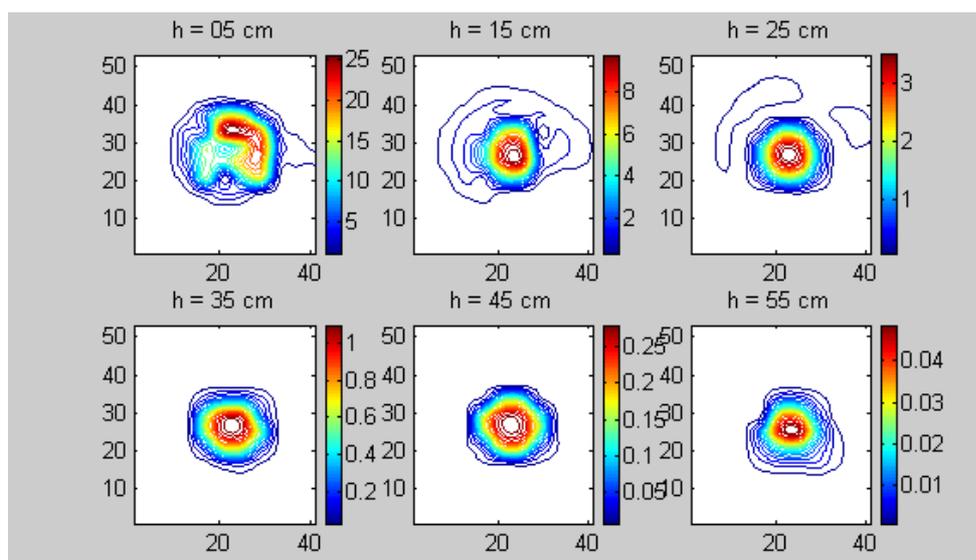


Figure 0.4 Mesure du champ rayonné par l'antenne 28 x 34 cm à différentes distances du centre de l'antenne. H =15, 25, 35, 45 et 55 cm.

4.1.13.3 Mesures du champ rayonné en présence d'enrobé sec

Des mesures ont également été réalisées en insérant des éprouvettes d'enrobé classique et drainant d'une épaisseur de 6cm, de dimensions de 40cm x 40cm, entre le transpondeur et l'antenne. Le transpondeur est situé sous l'enrobé (Figure 0.5).

Nous constatons qu'il n'y a pas d'atténuation due à l'enrobé. Pour sans persuader, il suffit d'accroître l'épaisseur de la couche de 6 à 24 cm à l'aide des 4 plaques à notre disposition. Nous ne pouvons pas mesurer de variation de la tension reçue par le transpondeur.

Visuellement, il est difficile de comparer la Figure 0.3 et la Figure 0.5, mais à partir des données brutes, les écarts des tensions relevées restent inférieurs à 1% avec un enrobé de 6 cm. Il en est de même avec 12, 18 ou 24 cm d'enrobé.

L'enrobé sec n'atténue pas la propagation du champ magnétique à 13,56 MHz.

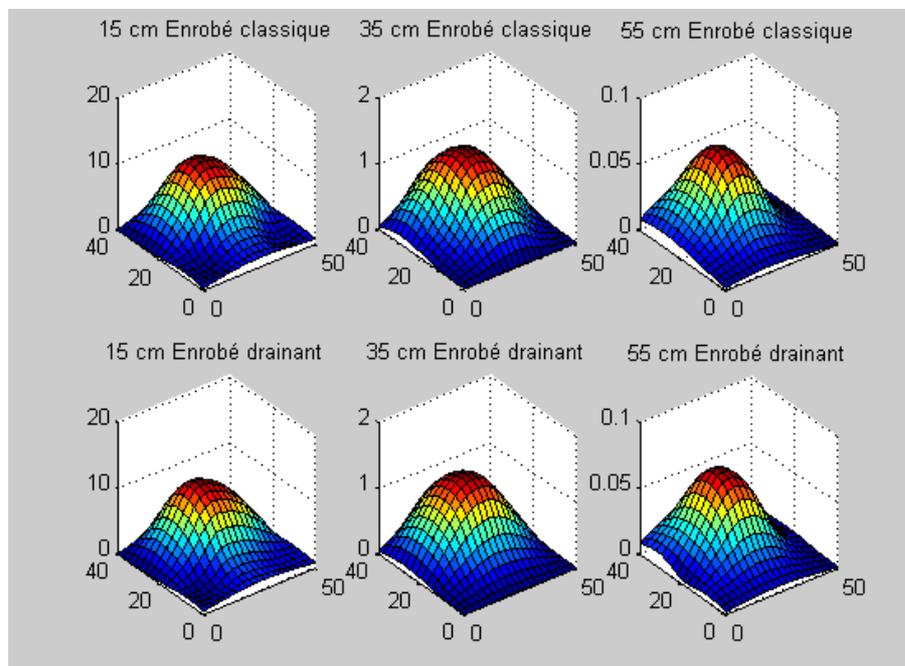


Figure 0.5 Mesure du champ rayonné par l'antenne 28 x 34 à différentes distances du centre de l'antenne. Au travers de 6 cm d'enrobé classique et drainant.

4.1.14 Tension induite dans le transpondeur

4.1.14.1 En statique

Nous mesurons la tension induite dans le transpondeur en plaçant ce dernier dans l'axe central de l'antenne du lecteur et en s'éloignant de l'antenne. Nous pouvons à nouveau mettre en évidence que pour obtenir une tension induite utile de 2 V, il ne faut pas s'éloigner de plus de 25 cm.

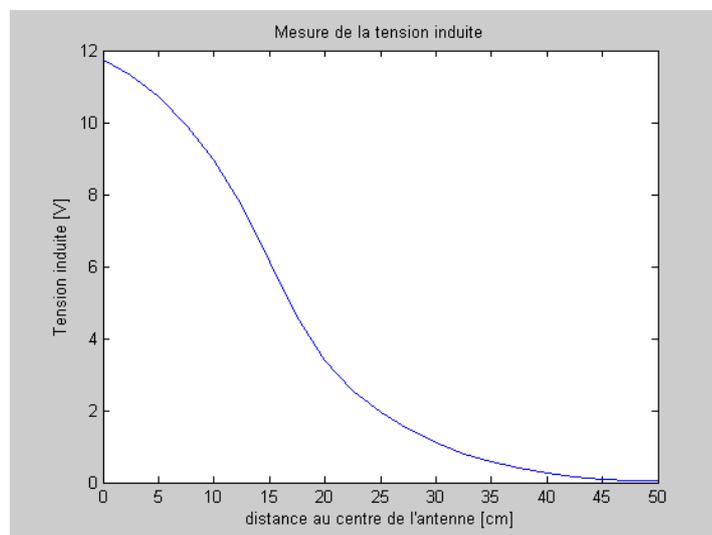


Figure 0.6 Mesure de la tension induite dans le transpondeur en fonction de la distance entre l'antenne du lecteur et le transpondeur. La mesure est réalisée dans l'axe central de l'antenne du lecteur.

4.1.14.2 En dynamique

Comme le coefficient de qualité de l'antenne du lecteur est supérieur à 10, $Q_1 = \frac{L_1 \omega}{R_1} \gg 1$, alors

$R_1^2 \ll (L_1 \omega)^2$. En se plaçant à la fréquence d'accord pour les circuits primaire et secondaire, la tension induite dans le secondaire peut être exprimée en fonction du coefficient de couplage par :

$$|u_2| = |u_1| \cdot k \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot Q_2$$

En reprenant l'expression de k à partir de l'équation (0.24), il est possible d'exprimer cette tension secondaire en fonction des caractéristiques principales de l'étude de cas :

La distance de dialogue d , le rayon de l'antenne du lecteur r , son inductance, son nombre de spires N_1 , sa tension d'excitation u_1 pour l'antenne du transpondeur, son nombre de spires N_2 , la surface S_2 et son facteur de qualité Q_2 : $u_2 = F(r, d, N_1, u_1, N_2, S_2, Q_2)$

$$|u_2| = |u_1| \cdot \mu \cdot \frac{r^2}{2(r^2 + d^2)^{3/2}} \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{N_1^2 N_2^2}{L_1^2}} \cdot Q_2$$

(0.1)

En tenant compte de l'évolution de la section apparente de l'antenne du transpondeur, en fonction de la vitesse supposée constante V du véhicule au passage au-dessus du transpondeur, nous pouvons tracer la variation de la tension induite dans l'une des antennes du transpondeur (Figure 0.7).

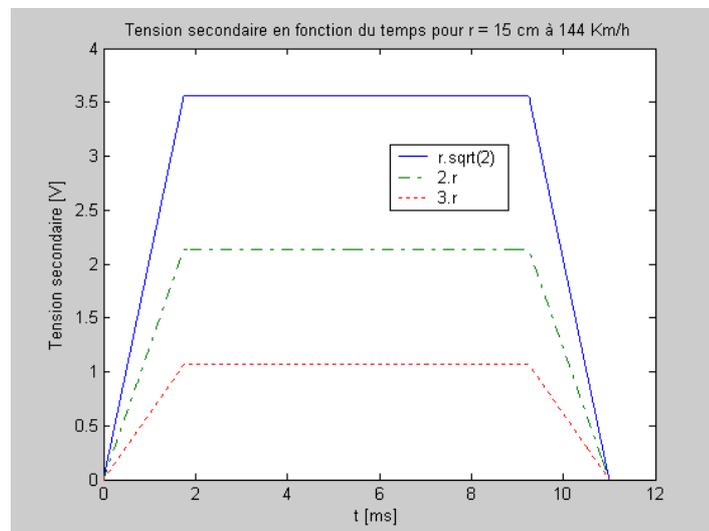


Figure 0.7 Allure du module de la tension secondaire en fonction du temps de parcours, ici la vitesse du véhicule est de 40m/s.

Pour $r = 15\text{cm}$, $d = 23\text{cm}$, $N_1=1$, $L_1=1\mu\text{H}$, $u_1=30\text{ V}$, $N_2=4$, et $Q_2=30$.

Nous relevons cette tension induite dans le transpondeur pour des vitesses de déplacement du véhicule respectivement égales à 140 Km/h (Figure 0.8) et 90 Km/h (Figure 0.9). Les relevés expérimentaux confirment l'expression théorique de l'équation ci-dessus.

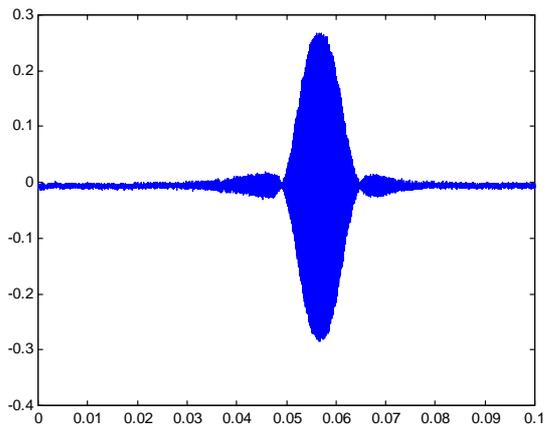


Figure 0.8 Tension induite véhicule à 140 Km/h.

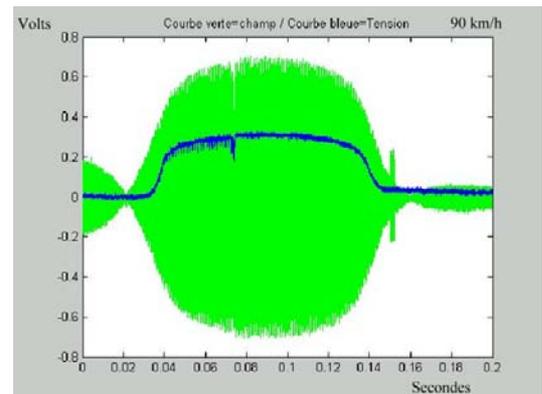


Figure 0.9 Tension induite véhicule à 90 Km/h

Ces deux courbes relevées à des dates différentes (en septembre 2003 pour la première et septembre 2004 pour la seconde) confirment la constance temporelle de la réponse de l'antenne du transpondeur et témoignent du peu de temps accordé pour la transaction lorsque le véhicule évolue à 140 Km/h.

L'augmentation de la valeur de la tension induite est due uniquement au nouveau dessin de l'antenne du transpondeur

4.1.15 Caractéristiques principales du lecteur embarqué dans le véhicule.

Nous donnons dans le tableau ci-dessous la synthèse des principales caractéristiques du lecteur développé (Tableau 0.4 et Tableau 0.5).

Les schémas électroniques du lecteur et de son démodulateur sont respectivement en annexe 7.1.13 et 7.1.14.

Lecteur				
Paramètres	Symbole	Valeur	Unités	Références
Temps de passage				
Dimensions de l'antenne Diamètre	$2.r$	30	cm	Figure 0.1
Fréquence de la porteuse	F_p	13,56	MHz	§ 3.1.4
Type de codage		Manchester		Tableau 0.4
Puissance antenne max.	P_{amax}	4,585	mW	Équation (0.38); [EN 300 330 1994]
Coefficient de qualité	Q_1	Entre 30 et 40		Figure 0.12

Tableau 0.2 Synthèse des principaux paramètres caractéristiques du lecteur.

Lecteur				
Paramètres Induits	Symbole	Valeur	Valeur	Unités
Surface de l'antenne du lecteur	S_1	πr^2		cm^2
Pulsation de la porteuse	ω_p	$2.\pi.F_p$	$85,2 \cdot 10^6$	Rad/sec
Inductance de l'antenne du lecteur véhicule	L_1		0,820	μH
Capacité totale d'accord	C_1	$1/L_1.\omega_p^2$		pF
Distance optimale de dialogue	d	$d = R \cdot \sqrt{2}$	21,2	cm
Distance maximale de dialogue (actif)	d		40	cm
Distance maximale de dialogue (passif)	d		21	dc
Courant maximal	I_1	$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_a \cdot c^4}{320 \cdot \pi^6 \cdot N_1^2 \cdot r^2 \cdot F_p^4}}$	N1 = 1 5.5 N1 = 2 2.7	A
Champ magnétique au centre	H_0	$N_1 I_1 / 2r$	qlqN1 175	A/m
Resistance d'antenne équivalente	R_a	$R_{ant} = \frac{320 \cdot \pi^4}{\lambda_p^4} \cdot (N_1 \cdot S_1)^2$		

Tableau 0.3 Synthèse des paramètres induits par les choix des paramètres principaux du lecteur.

4.1.16 Protocole de commande

Le transpondeur exécute un ensemble de requêtes transmises par le lecteur. Ces requêtes comportent principalement un code commande suivi de données (Figure 0.10.).

Nous avons codé les différentes commandes sur 4 bits avec un bit de Start (à 1 en Manchester). Ces commandes pourront permettre aux différentes applications d'accéder aux ressources de type mémoire du transpondeur telles la mémoire EEPROM du microcontrôleur ou la mémoire vive FRAM (Tableau 0.4.).

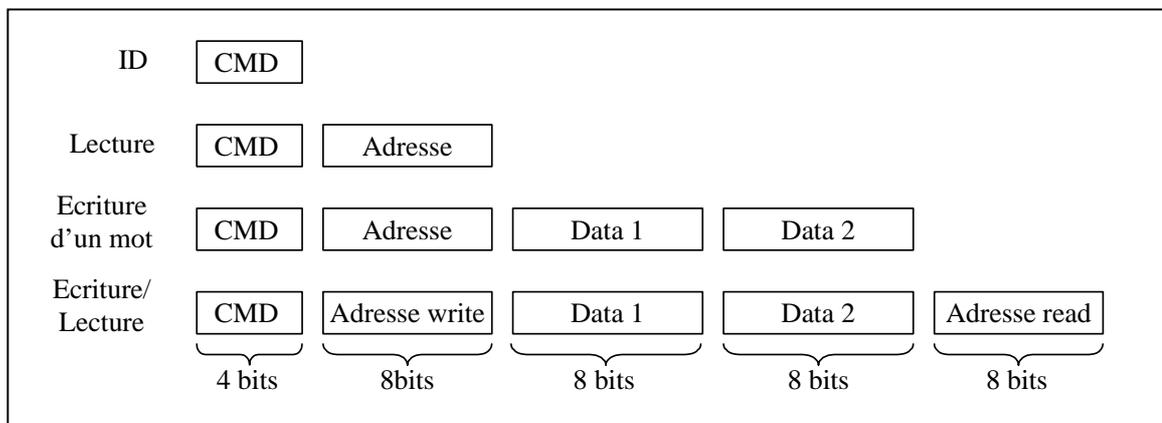


Figure 0.10 Description du protocole de communication entre le lecteur et le transpondeur

10000	Lecture Identificateur
10001	Lecture octet
10010	Écriture octet
10011	Lecture mot
10100	Écriture mot
10101	Dialogue Lecteur/Transpondeur
10110	Lecture N mots en flash du MSP430
10111	Écriture N mots en flash du MSP430
11000	Lecture N mots en FRAM
11001	Écriture N mots en FRAM
11010	Synchronisation des trames pour les dialogues

Tableau 0.4 Format des mots de commande

Tests de validation

4.1.17 Test en mode écho

Pour valider le fonctionnement de la chaîne de transmission du lecteur vers le transpondeur et transpondeur vers lecteur, nous réalisons la séquence suivante :

Répéter

Le lecteur transmet un octet (codé en Manchester) de valeur N.

Le transpondeur retourne l'octet reçu.

Le lecteur compare l'octet reçu avec celui transmis.

Il comptabilise alors le nombre d'erreurs et le nombre de bonnes transmissions.

Puis nous recommençons avec la valeur N+1

Sortir quand Jamais

Cette séquence permet de transmettre un octet par 1,2milliseconde (Figure 0.1).

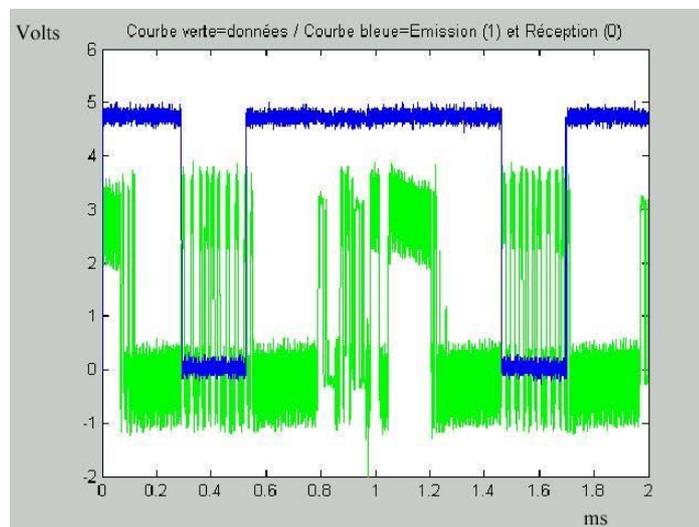


Figure 0.1 Chronogramme du tet en mode écho

Nous réalisons ces mesures sans code correcteur d'erreurs et pour une distance de 23cm entre les antennes du transpondeur et du lecteur (Tableau 0.1). Le **taux d'erreurs** est de l'ordre de **32 par million**.

Nbr d'octets	Nbr d'erreurs	Taux d'erreurs pour 1 million
100 000	3	30,00
200 000	5	25,00
2 600 000	81	31,15
3 800 000	121	31,84
11 300 000	368	32,57

Tableau 0.1 Taux d'erreurs en statique, distance séparant les antennes du transpondeur et du lecteur 23cm.

4.1.18 Utilisation de la commande \$15 : Dialogue Lecteur/Transpondeur

Pour tester le bon fonctionnement du transpondeur, nous utilisons la commande \$15.

Remarque : ce protocole permet également le dialogue avec des transpondeurs alimentés.

Après la synchronisation nécessaire entre le lecteur et le transpondeur, la séquence suivante, vue coté transpondeur, est enclenchée :

1. Émission des caractères d'identification du tag (zone2).
2. Réception des 9 octets de données dynamiques qui seront à écrire dans la FRAM (zone3).
3. Émission de 10 octets de données statiques et lecture des 9 octets en FRAM (zone4).
4. Émission de 2 octets statiques et des 9 octets dynamiques lus de la FRAM pendant l'écriture des 9 octets envoyés par le lecteur (zone5).
5. Émission de 9 octets de données statiques (zone5).

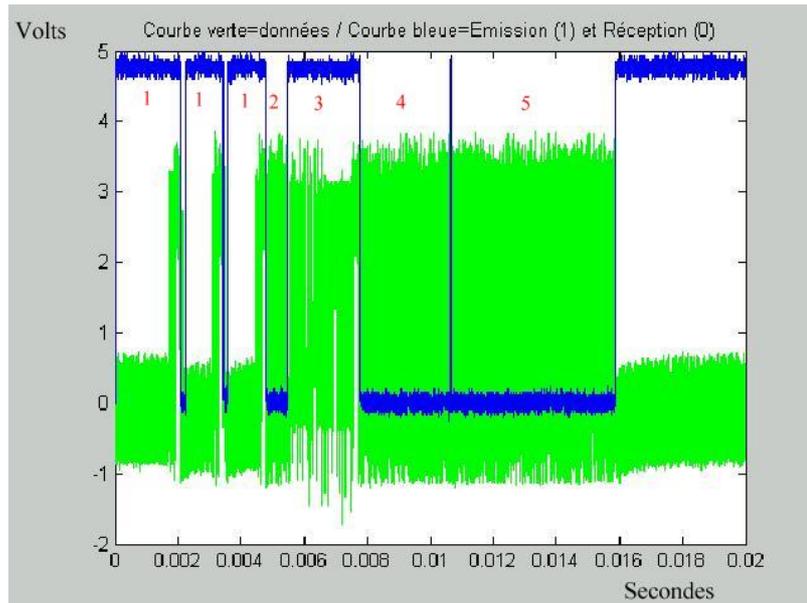


Figure 0.2 Chronogramme du dialogue dans le cas de la commande \$15. Durée 10 ms.

La durée d'exécution de cette commande a volontairement été fixée à 10 ms et correspond à l'échange de 39 octets (312 bits).

4.1.18.1 Protocole de test :

Nous utilisons le véhicule de type Master, mis à disposition par le LRPC, équipé de l'antenne 28x34cm, située à 24 cm du sol et reliée au lecteur logé en cabine.

Les 4 transpondeurs sont placés sur l'enrobé, espacés de 1,50 m.

Le véhicule effectue des rotations en passant au-dessus des transpondeurs à vitesse constante stabilisée par le chauffeur.

L'interface couplée au lecteur permet de contrôler les messages échangés entre les transpondeurs et le lecteur.

Les derniers essais ont été réalisés sur la route de Mozé en Maine-et-Loire le 30 septembre 2004. Route sur laquelle, nous pouvons atteindre en toute sécurité les 90 Km/h. La vitesse maximale (à peine raisonnable) que nous avons pu tester sur cette route est de 110 Km/h.

4.1.18.2 Méthode de contrôle

Le contrôle est réalisé visuellement sur l'interface de dialogue du lecteur. A chaque passage, le lecteur nous visualise le contenu des informations échangées avec les transpondeurs. Nous pouvons ainsi vérifier que les octets écrits dans la FRAM au passage N-1 peuvent être correctement lus au passage N.

4.1.18.3 Résultats

Les résultats montrent que sur l'essai du 30 septembre 2004, 8209 octets ont été échangés correctement sur les 8229.

Ces essais devront être poursuivis sur les pistes du LCPC à Nantes pour nous permettre d'atteindre des vitesses de 140 Km/h en toute sécurité.

Vitesse Km/h	Nbr de passage	Nbr de tags	Nbr d'octets corrects échangés	Nbr cumulé d'octets	Nbr total
30	15	15	585	585	585
50	15	60	2340	2925	2925
70	15	60	2340	5265	5265
90	15	60	2320	7585	7605
110	4	16	624	8209	8229

Tableau 0.2 Résultats de la journée du 30 septembre

D'autres essais en dynamique seront également réalisés aux LIVIC.

Les applications envisageables

Nous rappelons pour mémoire l'utilisation typique de cette technologie de transpondeurs autorisant la communication locale entre le véhicule et la chaussée (Figure 0.1). Le lecteur est embarqué dans le véhicule, le transpondeur ou Tag est logé dans l'enrobé.

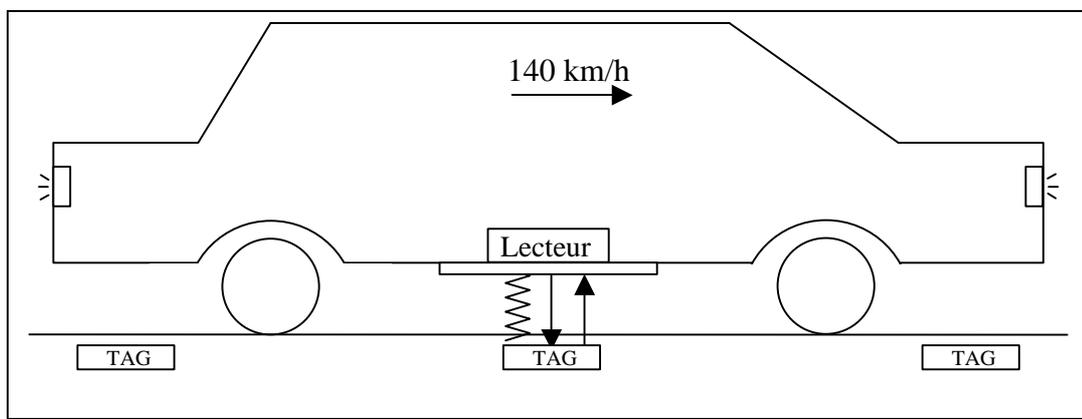


Figure 0.1 Schéma d'application du transpondeur.

A partir de ce schéma de principe, nous avons identifié un ensemble d'applications de cette technologie des transpondeurs [Plainchault 2003b]. Nous pouvons par exemple envisager :

- La sécurisation du suivi de trajectoire.
- L'estimation de l'interdistance entre véhicules.
- La communication véhicule-véhicule.
- L'activation automatique des indicateurs de direction.
- L'allumage ou l'extinction des codes.
- La détection de la circulation en contresens.
- Le gendarme couché.
- La limitation automatique de vitesse.
- La mesure du flux de circulation.
- Contrôle d'accès.

4.1.19 La sécurisation du suivi de trajectoire

Nous rappelons ici les principaux résultats de cette application qui a largement été décrite dans les pages précédentes (Figure 0.2). Le principe réside dans l'utilisation d'un transpondeur particulier, équipé de 18 antennes espacées de 8 cm, disposées tous les 10 mètres. Au moment du passage du véhicule au-dessus des antennes du transpondeur, ce dernier retourne, entre autres, la position latérale et longitudinale. La répartition du réseau de transpondeurs permet la correction d'un écart de 8 cm par rapport à la trajectoire initiale.

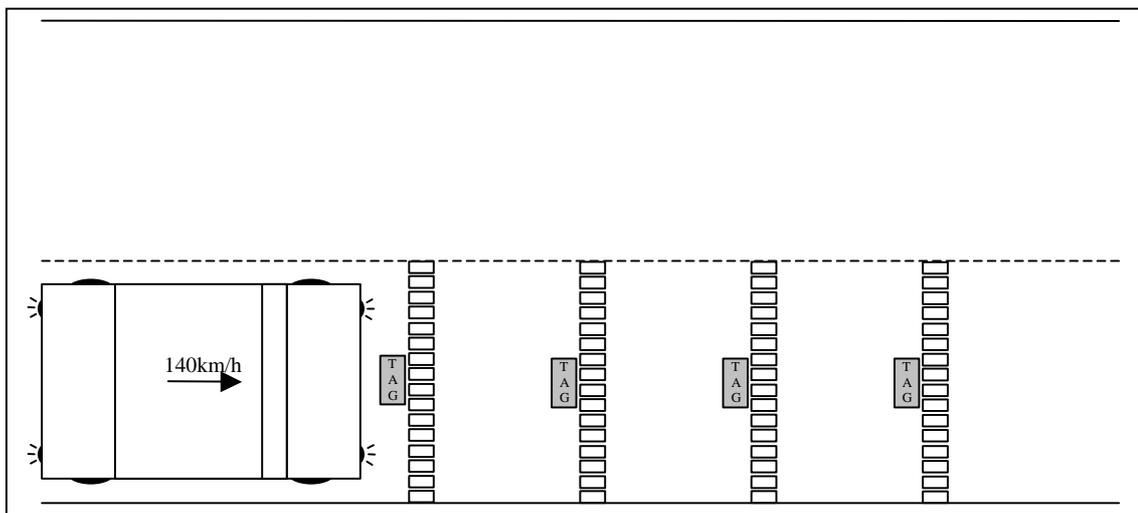


Figure 0.2 Disposition des transpondeurs pour l'application de suivi de trajectoire.

La figure ci-dessous illustre le transpondeur dans sa réalisation 6 antennes

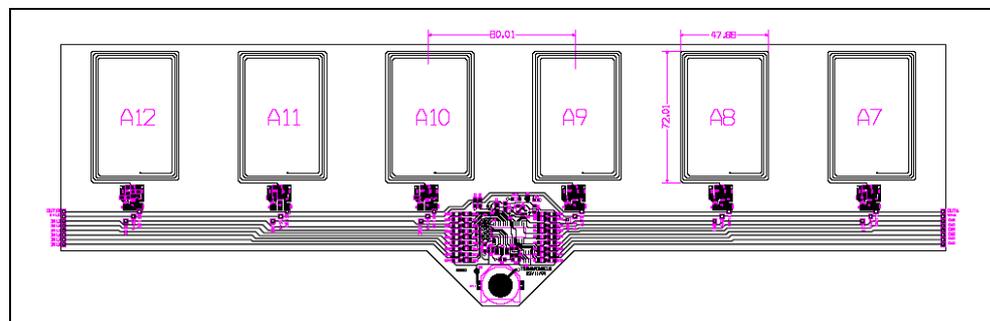


Figure 0.3 Transpondeur dans sa version 6 antennes

4.1.20 L'estimation de l'interdistance entre véhicules

Nous avons placé dans le lecteur présent dans le véhicule un module de réception DCF 77 qui permet de recevoir les signaux de l'émetteur de Frankfort en Allemagne. La portée nominale de ce signal est de 1500 Km. La porteuse à 77,5 KHz est modulée en amplitude.

Les informations temporelles sont fournies sous forme d'une séquence de 59 bits émis au rythme de la seconde. Il faut donc 1 minute pour recevoir tout le message car pendant la dernière seconde aucun bit n'est émis ce qui permet la synchronisation de la réception de la trame.

Les bits du premier (N°0) au dernier (N°58) permettent de récupérer minute, heure et date (Annexe 0). Ce chrono-télégramme représente toujours l'heure qu'il sera précisément au moment du premier front montant de l'impulsion qui suit la période où aucune impulsion n'est émise.

Chaque lecteur peut ainsi initialiser sa propre horloge temps réelle.

Toutes les horloges des lecteurs seront ainsi synchronisées avec une précision de l'ordre de la milli-seconde.

Au passage du véhicule, ce dernier peut écrire dans le transpondeur son heure de passage (Tableau 0.2) [Plainchault 2003a].

Le véhicule suiveur peut récupérer la dernière heure de passage et, **par différence, en déduire le temps séparant les deux véhicules** avec une précision de l'ordre de la milli-seconde.

4.1.21 Détermination de la vitesse du véhicule

A partir des informations de localisation lues dans le transpondeur, nous pouvons en extraire l'abscisse curviligne (Tableau 0.1). Nous pouvons alors calculer la vitesse réelle du véhicule à chaque passage de ce dernier au-dessus d'un transpondeur. Nous pouvons calculer cette vitesse tous les 10 mètres. La précision obtenue est fonction de la précision temporelle de l'horloge temps réel du lecteur et de la précision de pose des transpondeurs par les finisseurs. En supposant la précision temporelle égale à : 10^{-3} s et celle de la pose de l'ordre de 10^{-2} m, nous obtenons alors une **précision sur la vitesse de l'ordre de 0,1 m/s soit 0,4 km/h.**

4.1.22 La communication véhicule-véhicule

Dans le protocole retenu, des informations venant du véhicule sont écrites dans la mémoire vive FRAM du transpondeur (Tableau 0.2). Nous avons imaginé, en plus de l'heure du passage, d'inscrire des informations dans le mot d'état du véhicule de 16 bits telles que :

- ABS défectueux.
- Feu stop droit ou gauche allumé ou éteint.
- Indicateur de direction gauche ou droit allumé ou éteint.
- Feu de détresse allumé ou éteint.
- Etc...
-

Ces informations pourront renseigner le véhicule suiveur sur l'état de fonctionnement du véhicule situé devant lui.

A chaque passage d'un nouveau véhicule, ces informations seront écrasées et rafraîchies par les informations propres du nouveau véhicule.

4.1.23 L'activation automatique des indicateurs de direction

Lors de la récupération de la position latérale, lorsque les 3 premières antennes ou les trois dernières antennes sont activées, il est alors possible d'activer de façon automatique les indicateurs de direction droit ou gauche. Le module lecteur, équipé d'une interface CAN, pourra alors transmettre la trame CAN, assurant la commande des indicateurs, vers le calculateur du véhicule en charge de cette fonction.

4.1.24 L'allumage ou l'extinction des codes

A l'entrée d'un tunnel, d'une forêt, dans un parking, il est possible de commander automatiquement l'allumage des codes ou l'extinction de ces derniers à la sortie du tunnel.

4.1.25 La détection de la circulation en contre sens

Toujours à partir des informations récupérées : le numéro du transpondeur et le bit direction, nous pouvons détecter la circulation du contresens à partir du moment où le véhicule est passé au-dessus de deux transpondeurs.

Pour ce faire nous procédons en deux étapes :

1. Au moment de l'initialisation des transpondeurs, après le compactage, les transpondeurs seront numérotés d'un côté dans l'ordre croissant, le bit de sens sera alors positif, et de l'autre côté dans le sens décroissant, le bit de signe sera négatif.
2. En circulation, le lecteur récupère le numéro du transpondeur courant et soustrait le numéro du transpondeur précédent.

Si le sens de circulation est correct, le signe du résultat de cette soustraction sera le même que celui lu dans le bit "sens de circulation".

Si le véhicule évolue à contresens, **le signe du résultat de cette soustraction ne sera pas le même que celui lu dans le bit "sens de circulation"**.

Un message à l'intention du conducteur peut alors être généré, tout comme nous pouvons imaginer faire clignoter les phares pour avertir les usagers arrivant en face du véhicule à contresens.

La précision de la détection dépend uniquement de l'écart entre deux transpondeurs successifs. Nous pouvons imaginer placer deux transpondeurs séparés d'un mètre, à toutes les entrées d'autoroute, entrée-sortie des zones de repos, dans les carrefours etc. ...

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que quelle que soit la vitesse du véhicule, même à 288 km/h, nous devrions toujours être capables de récupérer les informations statiques caractérisant la prochaine section de route, dans lesquelles se trouvent "*l'abscisse curviligne*" et "*la direction*" (Tableau 0.1).

Hélas ce point n'a pu être validé, le LCPC n'ayant pas prévu l'investissement d'une Ferrari F40 pour ce test.

4.1.26 La limitation automatique de vitesse ou le gendarme couché

Grâce aux informations récupérées, nous pouvons connaître la vitesse maximale autorisée pour la prochaine section de route. Un dispositif embarqué de limitation automatique de vitesse peut alors

recupérer ces informations pour, si nécessaire, limiter la vitesse du véhicule et jouer ainsi le rôle du gendarme couché. Ainsi aux entrées d'agglomérations, les zones 30 Km/h pourront être signalées et les vitesses maximales respectées.

4.1.27 Flux de circulation

A chaque passage d'un véhicule, nous incrémentons cinq compteurs embarqués dans le transpondeur. A chaque nouvelle minute, le compteur horaire le plus ancien est effacé.

A partir de ces informations, nous pouvons connaître le flux de véhicules sur les cinq dernières minutes. Ces compteurs peuvent être utilisés pour contribuer à réaliser une application embarquée d'estimation du temps de parcours.

D'autres technologies ont été décrites permettant cette estimation [Von Grol 1999], [Whittaker 1994] Lindveld 1999.

4.1.28 Le contrôle d'accès

Grâce au code d'identification contenu dans le transpondeur, l'application de contrôle d'accès du véhicule peut ou non permettre l'ouverture d'une barrière...

4.1.29 Les conditions de déploiement

En fonction du type d'application visée, nous pouvons identifier au moins trois situations de déploiement des transpondeurs dans l'infrastructure (Tableau 0.1) :

1. **La répartition ponctuelle** : un ou deux transpondeurs suffisent à l'application.
2. **La répartition en zones** : plusieurs transpondeurs sont nécessaires sur une distance de l'ordre d'une centaine de mètres.
3. **La répartition généralisée** : cette répartition nécessite la présence de transpondeurs sur plusieurs kilomètres du réseau routier.

Nous mettons en évidence que de nombreuses applications peuvent être facilement déployées puisqu'elles ne nécessitent qu'un seul transpondeur. Toutes les applications peuvent être au moins réalisées sur zones puis sur des sections de quelques kilomètres dans des endroits fortement accidentogènes.

Dans tous les cas, il faut bien évidemment que les véhicules soient équipés d'un lecteur, de son antenne et des logiciels nécessaires à la gestion des différentes applications.

Nous devons alors nous poser la question du fonctionnement en mode dégradé. Nous pouvons affirmer qu'il est déjà acquis puisqu'il correspond au mode de fonctionnement actuel. Nous devons uniquement assurer que le dysfonctionnement du lecteur et/ou du transpondeur ne viendra pas perturber l'intégrité de fonctionnement du véhicule et la sécurité du conducteur.

Application	Répartition des transpondeurs		
	Ponctuelle	Sur zone	Généralisée
La sécurisation du suivi de trajectoire		X	X
L'estimation de l'inter-distance entre véhicules	X	X	X
La communication véhicule-véhicule.	X	X	X
L'activation automatique des indicateurs de direction		X	X
La détection de la circulation en contresens.	X	X	X
L'allumage ou l'extinction des codes	X		
Le gendarme couché.	X	X	
La limitation automatique de vitesse	X	X	X
La mesure du flux de circulation.	X	X	X
Contrôle d'accès	X		

Tableau 0.1 Synthèse des conditions de déploiement en fonction de l'application visée.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Synthèse de la présente contribution

L'objectif général de la présente thèse est le développement d'un transpondeur assurant la communication véhicule/infrastructure et pouvant être utilisée dans différentes applications telles que :

- La sécurisation du suivi de trajectoire
- L'estimation de l'interdistance entre véhicules
- La communication véhicule-véhicule.

Pour mettre au point cette communication, nous avons exploré les différentes composantes entrant dans l'élaboration d'un transpondeur :

- L'architecture interne.
- Le choix des modulations.
- Le type de fréquence à utiliser.
- La caractérisation de la liaison de communication dans le respect des normes applicables.

Nous avons montré la démarche à suivre permettant la conception d'un transpondeur. Cette démarche peut être utilisée pour développer de nouvelles applications.

Nous savons depuis Biot et Savart que :

- L'induction magnétique en champ proche varie en $1/d^3$

Nous avons alors exprimé que :

- Le rayon optimal de l'antenne est : $d = r/\sqrt{2}$, d la distance séparant l'antenne du lecteur et celles du transpondeur.
- Le coefficient de couplage du transformateur à air que représentent l'antenne du lecteur et les antennes du transpondeur, ne dépend que de la distance entre les deux antennes.

Et nous avons pu calculer :

- L'expression de la tension induite dans le transpondeur en fonction des paramètres électriques et mécaniques des antennes. Les principaux paramètres définissant cette tension sont : la distance entre les antennes, les inductances, les résistances d'enroulement, le nombre de spires des antennes, les surfaces, le courant dans l'antenne du lecteur, les coefficients de qualité et la charge équivalente au transpondeur.

Nous avons développé une architecture de transpondeurs qui permet d'assurer la cohérence des informations transcrites et mémorisées dans le transpondeur quel que soit le positionnement latéral du véhicule. Pour ce faire, nous avons montré que le transpondeur devait être équipé de plusieurs antennes disposées transversalement à la chaussée. Cette particularité a fait l'objet du dépôt d'un brevet.

Au passage du véhicule, le lecteur embarqué peut établir la communication grâce au couplage électromagnétique qui s'établit entre l'antenne du lecteur et celles du transpondeur présentes dans le champ électromagnétique.

Nous avons montré qu'il existe alors :

- une distance maximale entre l'antenne du lecteur et celles du transpondeur, au-delà de laquelle la tension induite dans le transpondeur ne sera plus suffisante pour permettre un bon fonctionnement de ce dernier.
- et une distance minimale à partir de laquelle il est nécessaire de prévoir une régulation dans le transpondeur sous peine de détruire ce dernier, car la tension induite sera supérieure à la tension maximale de fonctionnement autorisée par l'électronique du transpondeur.

Ces distances sont principalement fonction de la puissance d'émission et de la dimension géométrique des antennes du lecteur et du transpondeur.

Le choix de la fréquence à 13,56 MHz est principalement motivé par la possibilité de télé-alimenter le transpondeur grâce à l'énergie transmise par l'antenne du lecteur. Cette particularité nous permet alors de placer le transpondeur dans la bande de roulement sans avoir à changer les piles ou accumulateurs d'alimentation. Ceci ne serait pas possible avec une porteuse dans la bande des 2,45 GHz. En effet, pour assurer des temps de réaction du transpondeur compatible avec les temps de passage du véhicule, il faudrait pouvoir disposer d'une source d'énergie au niveau l'oscillateur local. De plus nous avons rappelé que ces signaux ne traversent pas plus de 1cm d'eau salée. Ce point interdit toute utilisation de ce dispositif en hiver pendant les périodes de salage des routes verglacées. Pour une fréquence de 125 kHz, le débit d'informations serait limité à environ une dizaine de bits pour les 10 ms de transaction. C'est pourquoi, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de cette fréquence de 13,56 MHz qui représente le meilleur compromis entre le taux de transfert et l'auto-alimentation du transpondeur.

Nous avons alors vérifié et mesuré que la porteuse à 13,56 MHz n'était absorbée :

- Ni par l'enrobé classique ou drainant.
- Ni par l'eau pure ou salée.

Nous avons rappelé que :

- Le dispositif devait être conforme à la norme [EN 300 330 1994], ce qui limite la puissance d'émission à 4,585 mW.

Nous avons alors développé les lois d'inductions magnétiques et celles régissant un circuit magnétique couplé pour montrer que :

- L'inductance du transpondeur devait être autour de 1 μ H.
- La charge équivalente du transpondeur devait avoir une valeur de l'ordre de 1000 Ω .

Nous avons déterminé qu'il était nécessaire de :

- Disposer d'un circuit accordé sur 13,56 MHz dont le facteur de qualité devait être compris entre 30 et 40 ce qui permet de minimiser l'influence d'une éventuelle variation de distance entre les antennes du lecteur et du transpondeur.

Le choix de la fréquence de la porteuse arrêté, le coefficient de qualité des antennes fixé, la bande passante maximale pourrait être de 330 kbps.

Nous avons défini le type de modulation à employer pour assurer la communication descendante entre le lecteur et le transpondeur, et la montante dans le sens inverse. Parmi les différents choix, nous avons retenu :

- Pour la liaison descendante, une modulation d'amplitude à 100% d'un signal codé Manchester. Ce code assurera le transfert d'énergie dont la valeur sera indépendante du message binaire à transmettre.
- Pour la liaison montante, une modulation de charge par le signal binaire.

Nous avons également pu vérifier que :

- L'influence de l'effet Doppler était négligeable.

L'analyse des mécanismes de gestion des collisions devant être utilisés lorsque plusieurs transpondeurs sont dans le champ de l'antenne d'un lecteur, nous a montré que :

- L'anticollision est consommatrice de temps.

Il faut donc imaginer une structure de transpondeur nous permettant de nous affranchir de cette gestion des collisions.

Nous avons pu évaluer sur des microcontrôleurs Microchip, PIC 16Fxxx, des algorithmes standards de cryptage et de détection et correction d'erreurs

- Un cryptage DES limitera le taux de transfert à 55 kbps.

- Un code de détection et correction d'erreur RS 6 bits ne permettra qu'un taux de transfert de 4kbps.

Nous implémenterons uniquement un calcul de checksum associé aux informations échangées.

Les résultats ont mis en évidence que nous pouvions obtenir une communication locale entre le véhicule et l'infrastructure en logeant, dans l'enrobé, le transpondeur, objet de ces travaux.

A 144 Km/h, avec respectivement une antenne de 28 cm x 34 cm située sous le bas de caisse du véhicule et des antennes 4cm x 8cm pour le transpondeur, la communication peut s'établir pendant 10 ms. Avec la fréquence de la porteuse à 13,56 MHz et suivant le type de modulation retenu, le débit des informations numériques est compris entre 30 et 70 kbps. Ce qui autorise un échange entre 300 et 700 bits.

Des essais statiques ont permis de déterminer que le taux d'erreurs lors de la communication transpondeur-lecteur est de l'ordre de 35 pour 1 million pour une distance les séparant de 23 cm.

Nous avons alors montré qu'il était possible avec ce dispositif de stocker des informations statiques caractérisant la section à venir, dévers, rayon de courbure, vitesse maximale, point kilométrique, position latérale et longitudinale, type de route, sens de circulation.... Nous réalisons ainsi une base de données répartie sur toute l'infrastructure routière pouvant être mise à jour si nécessaire par un véhicule traceur.

Des informations dynamiques peuvent également être mémorisées. Celles lentement évolutives telles l'annonce de travaux, de chicanes... ou bien des informations temps réel déposées au passage d'un véhicule telles l'heure de passage, l'état du véhicule...

L'exploitation de ces différentes caractéristiques permet de prévoir des applications diverses et variées, nous pouvons citer :

1. Le suivi de trajectoire.
2. Le calcul de l'interdistance entre deux véhicules successifs.
3. La détection de l'engagement à contresens sur une voie de circulation.
4. L'allumage automatique des indicateurs de direction.
5. L'allumage et extinction automatique des feux de route en entrée et sortie de tunnel.
6. La limitation automatique de la vitesse maximale.
7. La caractérisation des zones 30 Km.
8. Le remplacement des gendarmes couchés.
9. Le contrôle d'accès

Perspectives

A court terme, en plus de la finalisation des expérimentations liées à la validation des transpondeurs, nous développerons les applications citées précédemment.

A moyen et long terme, les travaux en cours se poursuivront dans deux directions complémentaires : la recherche et l'axe industriel.

5.1.1 Le projet CHAKRA :

"Comportements Humains et Aménagements : vers une Circulation Routière Améliorée"

Ce développement s'inscrit dans le cadre des actions de recherche sur la caractérisation du suivi de trajectoire des véhicules. Nous participerons à l'élaboration d'un observatoire des trajectoires afin d'étudier trois risques visuels liés à des situations routières interurbaines : les carrefours, les virages et les hauts de côte en ligne droite.

Le programme de travail a été élaboré pour parvenir à développer une méthodologie et des outils de diagnostic le long d'un itinéraire routier, de manière à proposer un ensemble de solutions permettant de réduire la dangerosité de sites potentiellement accidentogènes. L'objectif de ces outils est de pouvoir qualifier la perception visuelle offerte par un environnement routier selon trois axes distincts : d'une part en terme de visibilité/lisibilité de l'environnement, d'autre part, en terme de trajectoires des véhicules et enfin en terme d'analyse de scène routière à l'approche d'une difficulté.

Ce programme de recherche de trois ans, a été soumis à l'appel d'offre SARI du PREDIT (Programme de Recherche et D'Innovation dans les Transports terrestres) le 15 novembre 2004, au sein d'un consortium de 17 acteurs dont les Conseils Généraux des Côtes-d'Armor et du Maine-et-Loire.

Nous aurons en charge le développement et la validation expérimentale de l'observatoire des trajectoires dans le cas des hauts de côte en ligne droite. Les travaux seront menés en collaboration avec le LRPC (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées) d'Angers et l'équipe de INRETS MSIS (L'équipe Modélisation, SIMulation et Simulateur de conduite). Pour atteindre cet objectif, nous

développerons un ensemble de capteurs répartis (transpondeurs, boucles magnétiques et fibres optiques) à partir duquel nous pourrions remonter à l'analyse du comportement du conducteur par l'analyse des trajectoires du véhicule. Cet ensemble sera testé sur un site d'expérimentation, la D961 à Marans, proposé par le CG49. Ce site caractéristique des routes secondaires du Maine-et-Loire sera l'objet d'une expérimentation avant et après modifications.

5.1.2 le projet INFRASURE

INFRAstructure, Simulation, Usage, et Recherche en Environnement maîtrisé.

La réalisation d'un site d'essai de la route et des véhicules intelligents, le projet INFRASURE du LCPC, montre la volonté de posséder un outil de connaissance des trois composantes d'une situation de conduite : le conducteur, le véhicule et la route [Infrasure 2004].

Pour mener à bien une partie des études, nous devons connaître avec une précision centimétrique les trajectoires suivies par les véhicules roulant sur la piste d'essais. Ce projet aura, entre autres, pour objectif d'évaluer les différentes techniques candidates parmi lesquelles nous retrouverons l'utilisation des transpondeurs. Plus généralement, les aspects de communication locale avec les véhicules obtenus par cette technique seront également qualifiés.

5.1.3 Valorisation industrielle

Concernant le volet valorisation industrielle nous travaillerons sur deux axes.

En fonction des résultats des tests de qualification que nous allons poursuivre au cours de l'année 2005, nous devons travailler avec les industriels du compactage pour étudier une méthode de "pose automatique" des transpondeurs au moment de la réalisation de la couche supérieure de la chaussée. Indépendamment de cette automatisation, nous devons également vérifier que, du fait de la mise en place tous les 10 mètres de ce dispositif, il n'y a pas de dégradation des caractéristiques de la chaussée qui s'évaluent en termes d'uni, de texture, de rugosité, d'alignement du profil en long et en travers de la voie. Autrement dit, il faudra vérifier qu'il n'y a pas de modifications de la densité de la

couche de "noir" obtenue par compactage. En effet, nous savons que 1% de densité en moins entraîne une perte de durabilité de 10 % pour la couche de roulement.

Nous entrevoyons dès à présent les défis technologiques que devront relever les transpondeurs lors du chantier "noir" :

- Respecter le bon alignement des transpondeurs déposés par le finisseur.
- Résister au gradient de température dû à la dépose de la couche d'enrobé en sortie de table du finisseur.
- Supporter le poids des rouleaux vibrants lourds, des compacteurs à pneus ou mixtes utilisés pour les chantiers routiers et autoroutiers dont les poids s'échelonnent entre 8 et 20 tonnes.
- Assurer l'initialisation et la personnalisation des transpondeurs.

Parallèlement à cette étude, nous sommes également dans la dynamique de création d'entreprise dont l'objet serait le développement, la fabrication et la commercialisation de cette technologie de transpondeurs et des applications associées.

Conscient du fait que l'accès au marché innovant correspondant aux applications décrites dans ces travaux de thèse sera long, nous exploiterons le travail de foisonnement qui nous a permis d'entrevoir plus de 60 applications de cette technologie. Certaines permettront un développement rapide du marché afin d'assurer à la structure une partie de sa capacité à autofinancer les actions de recherche et développement. Notamment pour permettre de déployer les utilisations de ces transpondeurs liées à la route intelligente.

6 RÉFÉRENCES

1. [802.11 1999] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications ", IEEE Std 802.11, 1999
2. [802.11a 1999] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band ", IEEE Std 802.11a, 1999
3. [802.11b 1999] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer Extension in the 2.45 GHz Band ", IEEE Std 802.11b, 1999
4. [Armstrong 1996] Armstrong J.D., Braithwaite V.A. Rycroft P., "A flat-bed passive integrated transponder antenna array for monitoring behaviour of Atlantic salmon parr and other fish", *Journal of Fish Biology*, **48**, pp 539-541, The fisheries Society of the British Isles, 1996
5. [Artmann 1999] Artmann R., "Electronic identification systems: state of the art and their further development", *Computer and electronics in Agriculture*, N° 24, pp 2-26, Ed. Elsevier Science, 1999
6. [Asch 1998] Ash Georges ., "Les capteurs en instrumentation industrielle", pp 427-444, éd. Dunod, Paris, ISBN 2-10-003773-0, 1998
7. [Atmel 2002] http://www.atmel.com/dyn/corporate/view_detail.asp?FileName=10152002.html
8. [Automated Mining] MacDonald Dettwiler company, Automated Mining Systems, <http://www.automatedmining.ca/guidance.html>
9. [Awasthi 2003] Awasthi A., Benabid S, talamoua A., Parent M., 'Centralized Fleet Management for CTS', *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, November, 2003
10. [Baum 2003] Baum G., "The Infrastructure and Evolution of Mapmaking", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
11. [Blosseville 2003] Blosseville J.M., Hoc J.M., Riat J.C., Wautier D., Bourdonnaye A., Tournié E., Narduzzi C., Gerbenne E., "A French contribution to the functional analysis of 4 key active safety functions - ARCOS Project", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
12. [Boarman 1994] Boarman W.I., Sakati M., "Methods for measuring the effectiveness of tortoise-proof fences and culverts along Highway 58, California", *Proceedings of 1987-1991 Desert Tortoise Council Symposium*, pp 284-291, Ed K. R. Beaman, California, 1994
13. [Boarman 1998] Boarman W.I., Beigel M.L., Goddlett G.C., Sakati M., "A passive integrated transponder system for tracking animal movements", *Wildlife Society Bulletin*, N° 26(4), pp 886-891, 1998
14. [Bruneau 1998] Bruneau M., "Manuel d'acoustique fondamentale ", pp 500-502, éd. Hermes, Paris, ISBN 2-86601-712-9, 1998
15. [Chan 2002] Chan C. Y., "Magnetic Sensing as a Position Reference System for Ground Vehicle Control", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, N° 1, pp 43-52, February 2002
16. [Chunyan 2001] Chunyan W., Chaozhong W., Fendtian C., Xiaojing W., "Design & Implementation of control system for Lane-Following ", 2001
17. [Cicilloni 2003] Cicilloni R, Deustchle S. J., Oltersdorf K. M., "results of vulnerable road user protection systems in PROTECTOR", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
18. [Citroën_2004] http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/actualites/tmp_innovation_details_a.php?id=75

19. [Claroni 2003] Claroni C., Armandi M., "Automatic control system for reserved lanes", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
20. [Constellation GPS] <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Planetes/GPS.html>
21. [CYBERCAR 2004] <http://www.cybercars.org/>, "Cybercars final project présentation", juin 2004.
22. [Darenberg 1987] Darenberg W., "Automatische Spurführung von Kraftfahrzeugen", *Automobil-Industrie*, pp 155-159, 1987
23. [Daviet 1996] Daviet P., Parent M., "Platooning technique for empty vehicles distribution in the PRAXITEL Project", 4th IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation, Maleme, Krete, Greece, p 101-106, 1996
24. [Ehrlich 2003] Ehrlich J., Marchi M., Saad F., Sauvagnac P., Salesse L., Jarri P., "Limitation Adaptative de vitesse : le projet LAVIA", *Congrès International ATEC*, Paris, 2003
25. [EN 300 330 1994] IETS, "Radio Equipment and Systems (RES); Short Range Devices (SRDs) Technical characteristics and test methods for radio equipment in the frequency range 9 kHz to 25 MHz and inductive loop systems in the frequency range 9 kHz to 30 MHz", ETSI, Sophia Antipolis, 1994
26. [Estibals 2002] Estibals B., Alonso C., Salles A., Schanen JL., Perret R. "*Validation d'outils de simulation d'éléments inductifs pour convertisseur statique intégré*", EPDF, Électronique de Puissance du Futur, pp 227-232, Montpellier, Novembre, 2002
27. [Fauchard 2001] Fauchard "Utilisation de radars très hautes fréquences. Application à l'auscultation non destructive des chaussées", thèse de doctorat de l'Université de Nantes, Octobre 2001.
28. [Fenton 1976] Fenton R. E., Melocik G. C. Olson K.W., "On the steering of automated vehicles: Theory and experiment", *IEEE Trans. Automation Control*, vol 21, pp 306-315, Mar. 1976
29. [Ferdinand 1992] "Capteurs à fibres optiques", éd. Lavoisier 1992.
30. [Fernandez 1991] Fernandez E., Mathieu M., "Les faisceaux hertziens analogiques et numériques", pp 93-138, ed. Dunod, ISBN 2-04-018737-5, 1991
31. [Ferré 2003] Ferré J., "The Generation and Dissemination of Travel Times - the SAPN approach", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
32. [Finkenzeller 1999] Finkenzeller K., "*RFID Handbook Radio-frequency Identification Fundamental and Applications*", ed. John Wiley & Sons, 1999, ISBN 0-471-98851-0
33. [Fritz 1999] Fritz H., "Longitudinal and Lateral Control of Two Electronically Coupled Heavy-Duty Trucks in the CAUFFEUR project", *ITS'99 Conference*, Toronto, 1999
34. [Garibotto 2003] Garibotto G. B., Castello P., Del Ninno E., Borghero G., Pedrazzi P., Zan G., "Auto-Detector: high-performance Mobile License Plate Recognition System", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
35. [Gillespie 1992] Gillespie T.D., "Fundamentals of Vehicle Dynamics", pp 195-231, Ed. Society of Automotive Engineers, ISBN 1-56091-199-9, 1992
36. [Glaser 1999] Glaser S., "Attributs de trajectoires et calcul de fonction de risque", *Rapport de stage de ENTPE*, Août 1999

-
37. [Gordon 1996] Gordon R.L., Reiss R. A., Haenel H., Case E.R., French R.L., Mohaddes A., Wolcott R. "Traffic Control systems handbook", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Feb., 1996
38. [Greenough 1999] Greenough J.C., Noehammer R.A., "ITS Technology solving bus transit priority needs – The Bette Way Gets Better", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
39. [Grueber 2003] Grueber B., Holz A., Fisher P., "Survey of remote sensing methods used for traffic monitoring - A comparison between optical, infrared and radar", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
40. [Guldner 1997] Guldner J., S. Patwardhan, Tan H.-S. Zhang W.-B., "Coding of magnetic markers for demonstration or automated highway systems", *inpreprints Transportation Research Board Annu Meeting, Washinton.*, 1997
41. [Hamba 2003] Hamba N., Kurata K., Tajima T., "Evaluation of driving safety support system (DSSS) for accident-prone intersections", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
42. [Harris 1999] Harris R. J., "Computerised License Plate Reading Systems", ITS'99 Congress, Toronto, 1999
43. [Heah 1996] Captain Heah Mark., "VTS Transponder System – An operational perspectives ", *8th International Vessel Traffic Services Conference*, Rotterdam, April, 1996
44. [Hicks 1999] Hicks P., "RFID and The Boock Trade", *Publishing Research Quartely* / summer, 1999
45. [Hingwe 1998] Hingwe P., "Automating Commercial Heavy Vehicles : Lateral control ", *Intellimotion, Research Updates in Intelligent Transportation Systems*, V 7, N°4, pp 4;6;7;14, 1998
46. [IBMC 1999a] "RFID for Traffic Control", Disclosed by International Business Machines Corporation, N° 421, May, 1999a
47. [IBMC 1999b] "Smart RFID Tag", Disclosed by International Business Machines Corporation, N° 427, November, 1999b
48. [IBMC 2000] "Method of assembling customized items using RFID", Disclosed by International Business Machines Corporation, N° 431, March, 2000
49. [ICTAAL 1985] Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison, *Rapport Technique*, Service d'étude technique des routes et autoroutes, Octobre 1985
50. [IEC 15693-1 1999] IEC, "Contactless integrated circuits cards – Vicinity cards: Part 1 Physical characteristics " ISO/IEC15693-1, 1999
51. [IEC 15693-2 1999] IEC, "Contactless integrated circuits cards – Vicinity cards: Part 2 Radio frequency power and signal interface" ISO/IEC15693-2, 1999
52. [IEC 15693-3 2000] IEC, "Contactless integrated circuits cards – Vicinity cards: Part 3 Anticollision and Transmission protocols" ISO/IEC15693-3, 2000
53. [Infrasure 2004] Infrasure. "Cahier des charges fonctionnel de INFRASURE ", Séminaire INFRASURE du LCPC, Mars 2004
54. [INRIA-INRETS 2002] Parent D., "les véhicules intelligents" Dossier de presse symposium IV'2002 ,2002 [Demain l'automobileInretsInria.pdf]
55. [Intermec_2004] <http://www.intermec.com/eprise/main/Intermec/Content/Search/Results>
56. [Interscan] <http://www.interscan>
57. [Ishigami 1999] Ishigami T., Utsui Y., Ozaki M., Nakahori I., "Multiple Sensor Fusion for a Vehicle Positioning System", ITS'99 Conference, Toronto, 1999

-
58. [Jansen B. 1999] Jansen B., Eradus W., "Future developments on devices for animal radiofrequency identification", *Computer and electronics in Agriculture*, N° 24, pp 109-117, Ed. Elsevier Science, 1999
59. [Jansen J.A. 1999] Jansen J. A., Van der Waerden J. P. C. M., Gwalter R.H., Van Rooy S. A. ,B., "Biological and migrational characteristics of transponders implanted into beagle dogs", *The veterinary Record*, **145**, pp 329-333, 1999
60. [Jiménez 2003] Jiménez J., "Wireless communication systems for Local Controllers and Outstations", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
61. [Jordàn 2003] Jordàn J., Soriano F., Català P., Montes S., "A study of road Pricing Systems based on GNSS/CN", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, November, 2003
62. [Juslén 2003] Juslén J. Horimatsu T., Fujise M., " National road database and ITS development in Finland ", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
63. [Kago 1998] Kago Y., Kasuga Y., Hirayana M., "5.8 GHz Electronic Toll Collection Systems Antennas", ITS'98 Congress, Seoul, October 1998
64. [Kampers 1999] Kampers F.W.H., Rossing W., Eradus W.J., "The ISO standard for radiofrequency identification of animals", *Computer and electronics in Agriculture*, N° 24, pp 27-43, Ed. Elsevier Science, 1999
65. [Kato 1999a] Kato M., "A Position Information Acquisition System by Means of IC Tag Its Application to Pedestrian Navigation System", 58th Conference of Information Processing Society of Japan, 4S-1, Mars 1999a
66. [Kato 1999b] Kato M., "A Position Information Acquisition System by Means of IC Tag Its Application to Pedestrian Navigation System", ITS'99 Conference, Toronto, 1999b
67. [Kern 1997] Kern Ch., "Tierkennzeichnung – Einsatz elektronischer Kennzeichnung systeme in der intensiven und extensiven Rinderhaltung am Beispiel von Deutschland und Australien", *Landtechnik* Vol. 3, 1997
68. [Kim 1998] Kim S.W. Eun Y., Kim H., Ko J.I., Jung W. J., Choi Y.G., Cho Y.G. and D., "Performance Comparison of Loop/Piezo and Ultrasonic Sensor-based Detection Systems for Collection Individual Vehicle Information", 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, Seoul, Korea, October 1998
69. [Kim 1999] Kim S.W. Ko J.I., Kim H., Cho I. and D., "A new Loop-Detector Circuit for Improving Low-Speed Performance", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
70. [Koike 2003] Koike M., 'Improvement in positioning accuracy of GPS receiver', *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, November, 2003
71. [Konishi 1999] Konishi Y., Toyama K., Sakurai T., "CEN Compliant ETC System Tag Development", ITS'99 Congress, Toronto, 1999
72. [Kurata 2003] Kurata, Ryouichi, " Evaluation of detection characteristics of road sensors under poor visibility conditions ", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
73. [Lane 1997] Lane G., "Radio frequency identification helps cane production in Brazil: Automatic recording of cane loading and transport", *INT. Sugar Journal*, vol 99 N° 1179, pp129-131, 1997

-
74. [Lane 1997] Lane G., "Radio frequency identification helps cane production in Brazil: Automatic recording of cane loading and transport", INT. Sugar Journal, vol 99 N° 1179, pp129-131, 1997
75. [Lasky 1998] Lasky T., "Advanced Snomplom Program on the Road ", Intellimotion, Research Updates in Intelligent Transportation Systems, V 7, N°4, pp 8-9,1998
76. [Latrach 2003] Latrach M., " Propagation Guidée Circuits Hyperfréquences", pp13-25,2003
77. [Latrach 2003b] Latrach M., "Introduction aux antennes", Cours de 3ème année ESEO, pp 35-39,2003.
78. [LegiFrance] Site officiel de lois : <http://www.legifrance.gouv.fr>
79. [Lilli 2003] Lilli F., Damiani S., Gutiérrez-Lanza S., GALLANT Pilot Project Galileo for safety road application', *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, November, 2003
80. [Lindveld 1999] Lindveld Ch.D.R., Thijs R., "On-line travel time estimation using inductive loop data: the effect of instrumentation peculiarities", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
81. [Livre_Gencode] [www.eannet-france.org/download/nonprotege/d6 recherchez une documentation/](http://www.eannet-france.org/download/nonprotege/d6_recherchez_une_documentation/), "Le petit livre du code à barres".
82. [Lonc 1996] Lonc B., Bajic E., "Design and Exploitation of communicating Escort Memories for Automobile Applications ", International conference on Advanced Microsystems for automotive applications, VDI-VDE-IT, Berlin, Germany, December 1996
83. [Makino 1999] Makino S., Yamaguchi M. Kitamura T., Tajima T., "Advanced Trial Application of the Interactive CDRG in UTMS", ITS'99 Congress, Toronto, 1999
84. [Marchal 2003] Marchal P., Gavrilu D., Letellier L., Meineke M.M., Richard M., Töns M., "Save-U: an innovative sensor platform for vulnerable road user protection ", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
85. [Mayhan 1982] Mayhand R. J., Bishel R. A., "A two-frequency radar for vehicle automatic control", IEEE Trans. Vehicle Technology, vol 31, pp 32-35, Jan. 1982
86. [Misener 1998] Misener J., Empey D., "Control Design For a Floating Offshore Airbase ", Intellimotion, Research Updates in Intelligent Transportation Systems, V 7, N°3, pp 4;5;11;15,1998
87. [Miyata 2003] Miyata S., Nakagawa H., Hoshi T., "Advance on traffic information processing for mobile communication media", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
88. [Mustafa 1996] Mustafa M. Blythe P., "Managing Urban Road-Space:Employing Smart Cards and Transponder-based Systems: The ADEPT Approach", Conf. On International Smart Card Application in Transport", ICM Conference, London November 1996
89. [Mustafa 1999] Mustafa M., Giannopoulos G.A., Nikolaou K. Toskas G., "Using Smart Cards for Integrated Telematics Services:the DISTINCT Approach in Thessaloniki", ITS'99 Conference, Toronto, 1999

-
90. [Nakatsukasa 2003] Nakatsukasa T., Takayuki Y. , Oda T., "Fast emergency vehicle preemption systems", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
 91. [Nassereddine 2003] Nassereddine I., "A tolling enforcement program for an open access Electronic Toll Collection system", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
 92. [Novo Rebollo 2003] Novo Rebollo Novo A. "ITS and free flow system for the central highway in Santiago de Chile", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
 93. [Numata 2003] Numata N., "Verification test of upgraded technique to measure travel time and OD volume", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
 94. [Olhoeft 1979] Olhoeft G., "Electrical Properties of Rocks and Applications to Geophysical and Geological Problems" -, U.S. Geological Survey, Octobre 1979.
 95. [Panasonic] Panasonic, NDC, Mechanical industry research laboratory : http://www.mirle.com.tw/EN/p4_asrs/3_agv.htm
 96. [Parent 2002] Parent M., Gallais G., 'Intelligent Transportation in Cities with CTS', *ITSC'2002 Intelligent Transport Systems*, Singapore, September, 2002
 97. [Paret 2001] Paret D., "Identification radiofréquence et carte à puce sans contact Description", Dunod, Paris, 2001
 98. [Paret 2003] Paret D., "Application en identification radiofréquence et cartes à puce sans contact", Dunod, Paris, 2003
 99. [Perdriau 2000] Perdriau R., Plainchault P., "*Réseaux de capteurs/actionneurs : la solution Ethernet/IP*", C2I Colloque Interdisciplinaire en instrumentation, Paris, 2000
 100. [Plainchault 2000] Plainchault P., Marciniak D., Lonc B., Bajic E., "*La traçabilité après vente en secteur automobile : Utilisation de la Mémoire Embarquée*", C2I Colloque Interdisciplinaire en instrumentation, Paris, 2000
 101. [Plainchault 2001] Plainchault P., "*Traçabilité : Pensez étiquettes électroniques : État de l'art* ", Journée technologique de la MEITO, Octobre 2001
 102. [Plainchault 2002] Plainchault P., Ehrlich J., "Dispositif à transpondeur", Demande de brevet d'invention N° 02 04 450, 10 avril, 2002,
 103. [Plainchault 2003a] Plainchault P., Ehrlich J., Bertrand J., Foret S., "13.56 MHz Transponders Use for Vehicles Infrastructure Communication", *ITSC'2003 IEEE Intelligent Transportation Systems Council*, Shanghai, Octobre 2003a
 104. [Plainchault 2003b] Plainchault P., Ehrlich J., Bertrand J., "13.56 MHz Transponders design for Vehicles/Infrastructure communications", *IEEE Sensors 2003* , Toronto, Octobre 2003b
 105. [Plainchault 2003c] Plainchault P., Ehrlich J., Bosch T., "A new transponder design for car/infrastructure communication", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Novembre 2003c
 106. [Pooran 1999] Pooran F. J., Andrews C., Gartner N., "Implementation of the OPAC Adaptive Control System in RT-TRACS", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
 107. [Pujolle 2001] Pujolle Guy, Al Agha Khaldoum, Vivier Guillaume., "*Réseaux de mobiles & réseaux sans fil* ", pp 500-502, éd. Eyrolles, Paris, ISBN2-212-11018-9,2001

-
108. [Ramon 2003] Ramon J.G., "Image detection systems by the Barcelona Municipality", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
109. [Robotis 1998] Robotis A., Tan Y., Kanellakopoulos I., "Automating Commercial Heavy Vehicles : Longitudinal control ", *Intellimotion, Research Updates in Intelligent Transportation Systems*, V 7, N°4, pp 5;10;11;15,1998
110. [Rossi 1986] Rossi M., "Électroacoustique", 1^{ère} édition, Vol XXI, pp 85, éd. Presses Polytechniques romandes, Lausanne, ISBN 2-88074-061-4, 1986
111. [Ruf 1999] Ruf M. J., "DAB-Based Multimedia ITS services", *ITS'99 Conference*, Toronto, 1999
112. [Sabounghi 1999] Lewis Sabounghi R., Allen F. "Intelligent transportation system Application for Acoustic Dedicated Short range communication", *ITS'99 Congress*, Toronto, 1999
113. [Sansone 2003] Sansone F., Gibeaux M. Riba J., 'Innovative hybridised GNSS and Cellular Positioning Technology for Hight performance location based sservice', *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, November, 2003
114. [Sato 2003] Sato K. Horimatsu T., Fujise M., "Joint research project on millimeter-wave communication system for inter-vehicle communication at Yokosuka Research Park", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
115. [Schulze 1997] Schulze M., "CHAUFFEUR - The european way towards an automated highway system", *Proceedings of 4th World Congress on Intelligent Transportation System* , Cd Rom I, N°2311, Oct, 1997
116. [Schürmann 1994] Schürmann J. "Einführung in die Hochfrequenz Identification technologie, in GME Technical report N°13, Identifikationssysteme und kontaktlose Chipkarte, vde-verlag, Berlin, 1994
117. [Ségarra 1996a] <http://www.experts.renault.com/segarra/projects>
118. [Ségarra 1996b] G. Ségarra « Escort Memories : A key technology supporting the automobile Life Cycle Processes » Titre de la conf et page Convergence, Detroit, October 1996b.
119. [Ségarra 2003] Ségarra G., "Distributed, Integrated Environment for cars telematics Configuration Management (DIECoM IST project)", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
120. [Sekine 1992] M. Sekine, T. Senoo, I. Morita, H. Endo, "Design method for an automotive laser radar system and future prospects for laser radar", *IEEE Proc. of International Symposium on the intelligent vehicle*, , pp 120-125, 1992.
121. [Sensysnetwork] <http://sensysnetworks.com>
122. [Serpentine] <http://www.serpentine.ch>
123. [Shin 1999] Shin S.W., Namkoong S., Choi J.U., "Analysis of Congested Traffic Flows on Highway Based on CA Simulation and Hydrodynamic Model", *ITS'99 Conference*, Toronto, 1999
124. [Siedelmann 1997] Siedelmann C., "*Funkwellen für Container – Automatische Identifizierung im kombinierten Verkehr*", 4/1997, Umschau Zeitschriftenverlag, Frankfurt
125. [Sinko 1999] Sinko J. W., Galijan R. C., Nguyen T.M., "Centimeter-Level GPS for Highway systems", *ITS'99 Conference*, Toronto, 1999
126. [Smith 2000] Smith Eric , <http://www.brouhaha.com/~eric/crypto/>

-
127. [Staudinger 2003a] Staudinger M., "Mobile enforcement in the German truck tolling system", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003a
128. [Staudinger 2003b] Staulinger M., "Electronic Vehicle Identification Using Active Infrared Light Transmission ", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003b
129. [Stiller 1999] Stiller C., Lorei M., "Sensor System for Truck Coupling", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
130. [Stremler 1990] Stremler Ferrel G., "Introduction to Communication Systems", Third edition, pp 281-321, Ed. World Student Series Edition ,Addison-Whesley series in Electrical Engineering, 1990
131. [Tajima 2003] Tajima T., Sugawara T., "Our tackling on further advancement of information uplinking function", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
132. [Tan 1998] Tan h.-S., Bougler B., Pham H., Empey D., "Precision Docking Demonstration at Houston", *Intellimotion, Research Updates in Intelligent Transportation Systems*, V 7, N°3, pp 6-7, 1998
133. [Tan 1999a] Tan H.S., Bougler B., "A snowplow steering guidance system using roadway markers-Problem formulation and solution concept", *Veh. Syst. Dynam.*, Vol. 32, N°1 , pp 3-22, July 1999a
134. [Tan 1999b] Tan H.S., Guldner J. Patwardhan S., Chen C., Bougler B., "Development of an Automated Steering Vehicle Based on Roadway Magnets-A case Study of Mechatronics System Design", *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 4 N°3, pp 258-271, September 1999b
135. [Tremlett 2003] Tremlett R., "ROSETTA: Radio Navigation - A new age for land-based mobility - New users, new opportunities, a new perspective ", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
136. [Turner 1999] Turner J.D., Hill M., "Instrumentations for Engineers & Scientists", Oxford University Press, 1999
137. [Turner 2000] Turner J.D., Austin L., "Sensors for automotive telematics", *Meas. Sci. Technol.*, **11**, pp 58-79, 2000
138. [Turpin 2001] " Capteurs à réseaux de Bragg fibrés ", éd. Aratem, 2001.
139. [Ubeda 2003] Ubeda B., Skarmeta A., Zamora A., Canovas J. P., Perez J., 'An Evaluation of Ueuropean SBAS, EGNOS, complementet with SISNET-GPRS within urban areas', *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, Spain, November, 2003
140. [Upton 1999] Upton P., Rooney E., Last A., "GLONASS: Integrated Benefits to the Mobile User", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
141. [Verly 1996] Verly J.G., Delanoy R. L. "Model-Based Automatic Target Recognition (ATR) System for Forwardlooking Groundbased and Airbone Imaging Laser Radars (LADAR)", *Proceedings of IEEE*, Vol 84, N°2, February, 1996
142. [VIGIK] <http://www.vigik.com/frames.html>
143. [Von Grol 1999] Von Grol H., Lindveld Ch., Manfredi S., Danech-Pajouh M., "DACCORD: online travel time estimation/prediction results", ITS'99 Conference, Toronto, 1999
144. [Wall 2003] Wall N., "Traffimatics - An open telematics platform for vehicle-to-vehicle and infrastructure communications", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003

-
145. [Ward 2003] Ward R.W., Molteno. "A CPLD Coprocessor for Embedded Cryptography", Proceedings of ENZCon'03, University of Waikato, NZ, September 2003
146. [Watanabe 1994] Watanabe K., "Multiple Sensor Fusion for navigation systems", IEEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference, pp 575/578, Yokohama, September, 1994.
147. [Whittaker 1994] Whittaker J., Garside S., Lindveld Ch., "Specification of the statistical model. In: DYNA Annual review report, part B, section 1, Workpackage C.2, September 1994
148. [Wong 1993] Wong J.Y., "Theory of ground vehicle", 2nd edition, pp 281-321, Ed. Wiley Interscience, ISBN 0-471-52496-4, 1993
149. [Wybo 2003] Wybo S., Khammari A., Nashashibi F., Laugeau C. "Improved environment understanding using geolocalization", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003
150. [Xu 2002] Qing Xu, Karl Hedrick, Raja Sengupta, Joel VanderWerf, "Effects of Vehicle-vehicle / roadside-vehicle Communication on Adaptive Cruise Controlled Highway Systems", *IEEE VTC Fall 2002*
151. [Xu 2003] Qing Xu, Raja Sengupta, Daniel Jiang, "Design and Analysis of Highway Safety Communication protocol in 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication Spectrum", *IEEE VTC Spring 2003*
152. [Xu 2004] Qing Xu, Tony Mak, Jeff Ko, and Raja Sengupta, "**Vehicle-to-Vehicle Messaging in DSRC**", *First ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks VANET, 2004*.
153. [Zhang 1990] Zhang W.-B., Pearsons R. E., "An intelligent roadway reference system for vehicle lateral guidance/control", in *Proc. American Control Conf.*, San Diego, CA, pp 281-286, 1990
154. [Zhang 1998] Zhang W.-B., Shladover S., Tan H.-S., "The PATH Magnetic Guidance System", *Intellimotion, Research Updates in Intelligent Transportation Systems*, V 7, N°4, pp 8-9, 1998
155. [Zhaosheng 1999] Zhaosheng Y., Lianyu C. "A Study on The Locally-Determined Dynamic Route Guidance System in China", *ITS'99 Conference*, Toronto, 1999

7 ANNEXES

Annexe 1 : Définitions autour des trajectoires

- Trace** c'est la projection sur l'espace roulable de la trajectoire qui est décrite avec un maximum de confort et de sécurité. Sa matérialisation sur l'infrastructure correspond à la signalisation horizontale.
- Trajectoire de référence** c'est la trajectoire calculée pour le véhicule de référence dont les caractéristiques sont bien définies (capacité d'accélération, de freinage) dans des conditions extérieures de référence (chaussée sèche). Cette trajectoire doit être un optimum de confort et de sécurité.
- Trajectoire cible** c'est la trajectoire que souhaite décrire un véhicule donné en fonction de ses capacités (accélération, freinage). Dans cette trajectoire, sont définies la position, la vitesse, l'accélération.
- Trajectoire effective** c'est la trajectoire suivie par le véhicule en fonction des commandes qui lui sont appliquées.

Annexe 2 : Lexique

§	Paragraphe
ABS	Anti Bloquing System
ACC	Automatic Cruise Control
ADAS	Advanced Drive Assistance System
AES	Advanced Encryption Standard
AFC	Automatic fare collection
ARCOS	Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée
ART	Autorité de Régulation des Télécommunications
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASK	Amplitude shift keying
CAN	Controller Area Network
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique ou Consultative Committee for International Telegraph and Telephone
CHAKRA	Comportements Humains et Aménagements : vers une Circulation Routière Améliorée
CPLD	Complex Programmable Logic Device
CRC	Cyclic Redundancy Check
DAB	Digital Audio Broadcasting
DECT	Digital European Cordless Telephone
DES	Data Encryption Standard
DGPS	Differential Global Positioning System
DISTINCT	Deployment an Integration of Smart Card Technology and information Networks for Cross Sector Telematics
DSB-LC	Double-Sideband, Large-Carrier
DSB-SC	Double-Sideband, Suppressed-Carrier
DSP	Digital Signal Processor
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DVB	Digital Video Brodcasting
EAN	European Article Number
EAS	Electronic Alarm Surveillance
EEPROM	Electrical Effaceable programmable Read Only Memory
ENTPE	École Nationale des TPE
ESEO	École Supérieure d'Électronique de l'Ouest
ETCS	European Train Control System
ETR	Electronic Toll Road
FCC	Federal Communications Commission
FDX	Full-Duplex
FPGA	Field Programmables Gates Arrays
FRAM	Ferroelectric RAM
FSK	Frequency shift keying
GALILEO	
GALLANT	Galileo for sfety of Life Application of driver assistaNce in road Transport
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite Service
GPRS	General Packet Radio Service

GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HDX	Half Duplex
I2C	Inter Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical Engineers
INFRASURE	INFRAstructure, Simulation, Usage, et Recherche en Environnement maîtrisé.
INRETS MSIS	L'équipe Modélisation, SIMulation et Simulateur de conduite
INRETS	Institut Nationale de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
INRIA	Institut National pour la Recherche en Informatique et Automatique
IRAMA	Informatique, Mathématique et Automatique pour la Route Automatisée
IrDA	Infrared Data Association
IRVD	Infrared Vehicle Detectors
ISBN	International Standard Book Number
ISM	Instrumentation Scientific Medical
ITS	Intelligent Transport System
LADAR	Laser radar
LAVIA	Limiteur s'Adaptant à la Vitesse Autorisée
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussés
LIVIC	Laboratoire sur les Interactions Véhicules Infrastructure Conducteur
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
MEITO	Mission pour l'Électronique, l'Informatique et les Télécommunications dans l'Ouest
MPEG-2	Motion Picture Expert Group
MUSIKA	MUlti-Source termInal Kernel Application
NSA	National Security Agency
OSU	Ohio State University in the U.S.
OTCC	Ontario Transportation Capital Corporation, 1998, Highway 407 ETR web site, part of the Ontario Ministry of Transportation Web site, http://www.407etr.com
PDA	Personal Digital Assistant
PKE	Passive Keyless Entry
PKS	Passive Keyless Start
PPS	Precise Positioning Service
PREDIT	Programme de Recherche et D'Innovation dans les Transports terrestres
PSK	Phase shift keying
RAM	Random Access Memory
RCFO	Réseaux de capteurs à fibres optiques
RDS	Radio Data System
RFID	Radio Frequency Identification
RKE	Remote Keyless Entry
SAFEMAP	Socio economic assessment of a dedicated digital map for road safety application
SAPECS	Secured Architecture & Protocols for Enhanced Car Safety
SARI	Surveillance Automatisée de l'état des Routes pour Informer les gestionnaires et les conducteurs
SMS	Short Message Service
SPS	Standard Positioning Service
SRD	Short Range Device
SURE	Sécurité des Usagers sur les Routes Existantes
UMTS	Universal Mobile Communication System

UTI	Union Internationale des Télécommunications - standardisation des Télécommunications
VIN	Vehicle Identification Number
WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIFI	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Networks

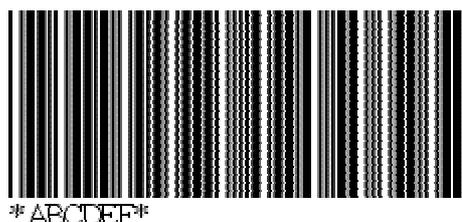
Annexe 3 : Les principales symbologies des codes à barres

La liste ci-dessous présente les principaux codes-barres, ceux régulièrement utilisés dans les applications industrielles [Interscan], [Livre_Gencode].

1. Code 39

Le code 39 est un code alphanumérique permettant de coder 43 caractères, les chiffres de 0 à 9, les lettres de A à Z, 6 symboles y compris l'espace, plus le caractère de début et fin de message. En version étendue, les 128 caractères du jeu ASCII peuvent être symbolisés. Sa structure est de 3 parmi 9. Chaque caractère du jeu de base est représenté par 9 éléments 5 barres et 4 espaces parmi lesquels 1 large (1 binaire) et 6 étroits (0 binaire). Les espaces entre caractères ne sont pas significatifs.

CODE 39



2. Code 2 parmi 5 entrelacé

Code numérique très dense, mais dont la moins bonne fiabilité intrinsèque oblige à l'utiliser soit en longueur fixe, soit avec une clé de contrôle (voir annexe). Le code 2 parmi 5 entrelacé utilise la même codification des caractères que le code 2 parmi 5 à savoir que sur un total de 5 éléments, 2 sont toujours larges mais en entrelaçant les caractères deux par deux. Le premier caractère est codé avec les barres, tandis que le deuxième utilise les espaces de la même zone, et ainsi de suite.

2 parmi 5 entrelacé



3. Code 128

Code alphanumérique haute densité, permettant comme de coder le jeu ASCII complet. Deux densités différentes sont obtenues suivant que les caractères encodés sont numériques ou

alphanumériques. Une clé de contrôle est toujours utilisée. Comme les autres codes haute densité, le code 128 est un code continu. Chaque caractère est symbolisé au moyen de onze modules (sauf le caractère de début et de fin qui en comprend treize). Chaque caractère est composé de 3 barres et 3 espaces (4 et 3 pour le caractère de début/Fin). Les barres représentent toujours un nombre pair de modules et les espaces un nombre impair.

128 ALPHANUMERIQUE



128 NUMERIQUE



4. Code Monarch ou CODABAR

Code numérique, également dénommé CODABAR, utilisé dans les applications de transfusion sanguine, d'analyse médicale et de traitement photographique. Chaque caractère est représenté par un groupe de 4 barres et 3 espaces

Code MONARCH



5. Code EAN 13 ou GENCOD

Code numérique très dense spécifié par le GENCOD pour les applications de la grande distribution. Les symboles EAN codent 12 ou 8 chiffres, le cas le plus normal étant 12 caractères (toujours numériques).

Code EAN 13

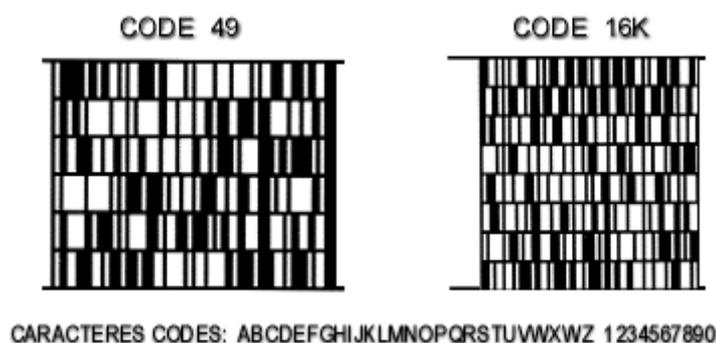


6. Code 49

Code alphanumérique ASCII complet bi-dimensionnel extrêmement dense. L'encodage des informations utilise le même principe que pour les autres symbologies, mais il est réalisé en deux dimensions: ceci permet de réduire notablement l'espace requis pour l'encodage des données.

7. Code 16K

Code bi-dimensionnel à très haute densité, de caractéristiques et domaines d'utilisation proches du code 49. L'encodage des informations de chaque étage est similaire à celui du code 128. On peut dire que le code 16 K est pratiquement un code 128 à étages.



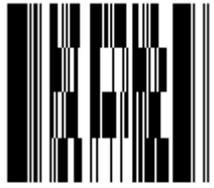
8. Code DATAMATRIX ou code 1

Code alphanumérique ASCII complet bi-dimensionnel extrêmement dense. L'encodage des informations utilise le même principe que pour les autres symbologies mais il est réalisé en deux dimensions: ceci permet de réduire notablement l'espace requis pour l'encodage des données.



9. Code PDF417

La symbologie PDF 417 est en fait intermédiaire entre les codes à étages (comme le 16K ou le 49) et les symbologies matricielles comme le code 1. En effet, le PDF utilise des étages qui sont lus individuellement. Cependant, ces étages étant de très faible hauteur, il est possible de scanner un étage et les étages adjacents afin de ne pas imposer à l'opérateur un alignement de trop grande précision qui rendrait la lecture quasi impossible



PDF 417

Annexe 4 : Atténuation due aux gaz de l'atmosphère et à la pluie.

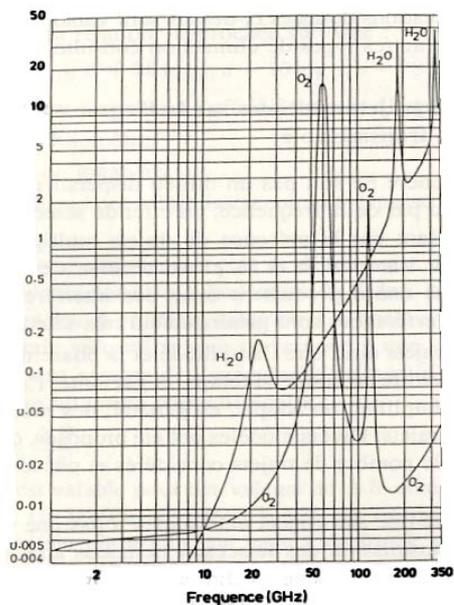


Figure 0.1 Atténuation en dB/km par les gaz de l'atmosphère en fonction de la fréquence de la porteuse.
Un signal à 60 GHz est dans le pic d'absorption du dioxygène : 15 dB/km.

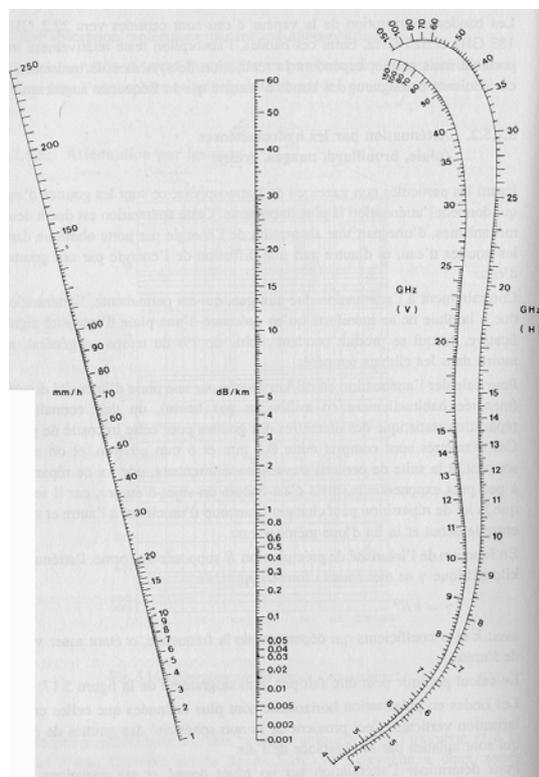


Figure 0.2 Monogramme permettant le calcul de l'atténuation due à la pluie.

En France, la région des Pays de la Loire est sur le contours de pluviométrie de 30 mm/h [Fernandez 1991]. Soit 0.02 dB/km à 2.5 GHz.

Annexe 5 : Génération d'un CRC.

Les algorithmes de calcul de CRC utilisent des polynômes générateurs à partir desquels il suffit d'effectuer des opérations logiques très simple : AND et décalages de bits, dont les plus classiques sont :

1. CRC-8 $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
2. CRC-16 utilisé par les contrôleurs de disques informatiques $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
3. CRC-16 / générateur polynomial du CCITT²⁰ (Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique) $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$

Un exemple de programmation en C du CRC-16 est donné ci dessous.

```

// Update the CRC for transmitted and received data using
// the CCITT 16bit algorithm (X^16 + X^12 + X^5 + 1).

unsigned char ser_data;
static unsigned int crc;

crc = (unsigned char)(crc >> 8) | (crc << 8);
crc ^= ser_data;
crc ^= (unsigned char)(crc & 0xff) >> 4;
crc ^= (crc << 8) << 4;
crc ^= ((crc & 0xff) << 4) << 1;
```

Figure 0.1 Exemple de programmation d'un CRC16 en C

²⁰ Le CCITT n'existe plus, il est remplacé par l'UITI (Union Internationale des Télécommunications.)

Annexe 6 : Cryptage de l'information

7.1.1.1 Chiffrement symétrique à clef privée :

Une seule clef est utilisée pour le chiffrement et déchiffrement. Cette clef est secrète et connue uniquement des utilisateurs. L'algorithme à clef privée est environ 100 à 1000 fois plus rapide en exécution car il est plus simple, et surtout les clefs sont 10 fois plus petites.

7.1.1.2 Chiffrement asymétrique

Dans ce mode, deux clefs sont nécessaires. La première est publique et donc connue de tous pour le chiffrement, la seconde est privée pour le déchiffrement. Il utilise des clefs de l'ordre de 1024 bits, ce qui rend l'algorithme lourd mais très difficilement "cassable".

7.1.1.3 Chiffrement mixte avec une clef publique et une autre privée :

Les algorithmes à clé publique sont lents. La méthode généralement pour les rendre plus rapide est de tirer au hasard une clé secrète, chiffrer le message avec un algorithme à clé privée donc plus rapide, puis chiffrer cette clé elle-même avec la clé publique du destinataire. Ceci permet d'avoir la sécurité des systèmes à clé publique, avec la performance des systèmes à clé privée.

7.1.1.4 Le chiffrement DES (Data Encryption Standard)

Le principe de cet algorithme est donné en annexe 0.

L'évaluation de la durée d'exécution d'un tel algorithme en fonction de son implémentation a été donnée au § 3.1.12.2 Le chiffrement DES (Data Encryption Standard).

7.1.1.4.1 Résistance aux attaques

Le fait de coder la clef sur 56 bits offre $7.2 \cdot 10^{16}$ clefs possibles. Le premier type d'attaque dont peut être victime un chiffrement, et la plus simple, c'est l'attaque exhaustive. Toutes les clefs possibles sont essayées jusqu'à obtenir la bonne.

Sur un ordinateur, nous avons besoin de 500 cycles pour chiffrer avec un DES soit environ 106 opérations DES à la seconde. En prenant un Pentium cadencé à 500 Mhz, il faut 1 000 années pour casser ce code (Tableau 0.1). Une conclusion rapide laisserait entendre que ce code est performant même avec une clé de 56 bits.

Longueur de la clé	Temps d'attaque
40 bits	6 jours
56 bits	1 000 ans
70 bits	20 millions d'années

Tableau 0.1 Temps nécessaire à une attaque systématique en fonction de la longueur de la clé.

Cependant, il n'en est rien. En multipliant le nombre de machines, par exemple avec 12 000 ordinateurs, un mois suffit à décrypter l'algorithme. En 1998, le DES a été "cassé" en trois jours par l'association, Electronic Frontier Foundation. L'agence américaine NSA (National Security Agency) annonce qu'elle peut décrypter ce code en 3 à 11 heures.

La véritable question à se poser est de savoir si le temps de validation de l'information est inférieur au temps de décryptage avec les moyens que l'attaquant est capable de déployer. Si oui, alors le DES reste suffisant si non il faut trouver un autre moyen de chiffrement.

7.1.1.5 Le triple DES (3DES)

Le triple DES est une réponse simple à cette question puisqu'il suffit de cascader trois étages DES avec 2 clefs différentes, le temps de cassage est alors multiplié par 2^{56} .

Le premier étage est calculé à l'aide de la clef 1, le deuxième est un DES inverse calculé avec une autre clef et le dernier étage est identique au premier. Cela représente en fait une clé unique de 128 bits. Il est possible d'utiliser trois clés différentes pour chaque étage soit l'équivalent d'une clé unique de 168 bits.

Son implémentation est très simple puisqu'il suffit de cascader 3 fois la même fonction de chiffrement ou déchiffrement.

En reprenant l'exemple précédent du Pentium à 500 MHz effectuant 106 opérations DES à la seconde, le temps nécessaire pour casser le code serait de : $1000 * 2^{56} = 7200$ milliards d'années !

7.1.1.6 Le choix de la clé

Le choix de la clé est aussi important si ce n'est plus que le choix de l'algorithme de chiffrement utilisé. Il existe plusieurs façons de procéder :

1. Soit, il est choisi une clé fixe qui sera toujours utilisée pour le chiffrement et déchiffrement.
2. Soit, un nombre fixe de clés alternativement utilisées.
3. Soit enfin, elle est générée de façon aléatoire et à chaque transmission d'information la clé est différente.

Quelle que soit la méthode retenue, il existe des **clés faibles** qu'il ne faut pas utiliser (Tableau 0.2).

Ces clés ont la particularité :

1. De posséder une clé duale qui permet quand même de déchiffrer le texte crypté.
2. Ou de redonner le texte en clair s'il est chiffré deux fois avec la même clé. (c'est le cas des quatre dernières clés de la liste).

Ces clés sont connues et voici leur liste :

Clé	Clé duale
E001E001F101F101	01E001E001F101F1
FE1FFE1FFE0E0E0E	1FFE1FFE0E0E0E0E
E01FE01FF10EF10E	1FE01FEO0EF10EF1
01FE01FE01FE01FE	FE01FE01FE01FE01
011F011F010E010E	1F011F010E010E01
E0FEE0FEF1FEF1FE	FEE0FEE0FEF1FEF1
0101010101010101	0101010101010101
FEFEFEFEFEFEFEFE	FEFEFEFEFEFEFEFE
E0E0E0E0F1F1F1F1	E0E0E0E0F1F1F1F1
1F1F1F1F0E0E0E0E	1F1F1F1F0E0E0E0E

Tableau 0.2 Liste des clés faibles à ne pas utiliser comme clé de chiffrement

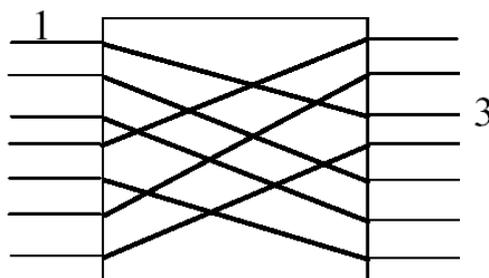
De plus, la résistance au cassage sera réduite si des groupes identiques sont utilisés dans la clé. Par exemple une clé construite avec 8 répétitions d'un même groupe de 7 bits identiques.

Pour générer une clé il faut au maximum éviter la répétition de symboles dans cette clé. Le mieux est de choisir aléatoirement les bits de la clé avec un minimum de répétitions de symboles et en vérifiant qu'elle n'est pas une clé faible.

Annexe 7 : Algorithme de cryptage DES

Les DES ont été construits pour être facilement implantés au niveau matériel. Il repose sur des opérations simples sur des bits à partir d'outils standards :

7.1.2 Les P-Box :



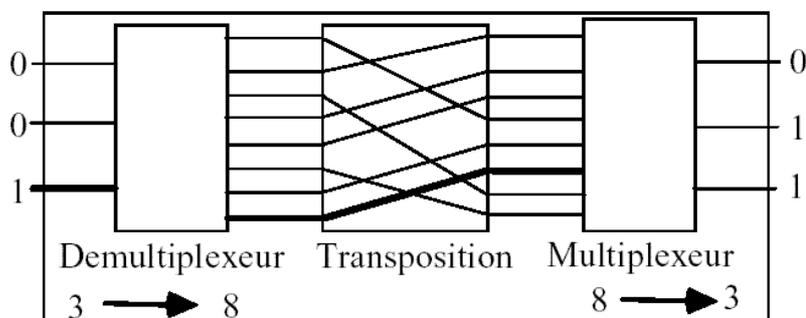
Les P-Box sont des boîtes de permutation; elles permutent les bits.

Exemple sur 7 bits : Le bit 1 sort en position 3, le bit 2 en position 5.

Elles sont réalisables par un câblage direct ou par une table de correspondance.

7.1.3 Les S-Box :

Les S-Box sont des boîtes de substitution; elles remplacent n bits par n' bits différents. Exemple sur 3 bits :

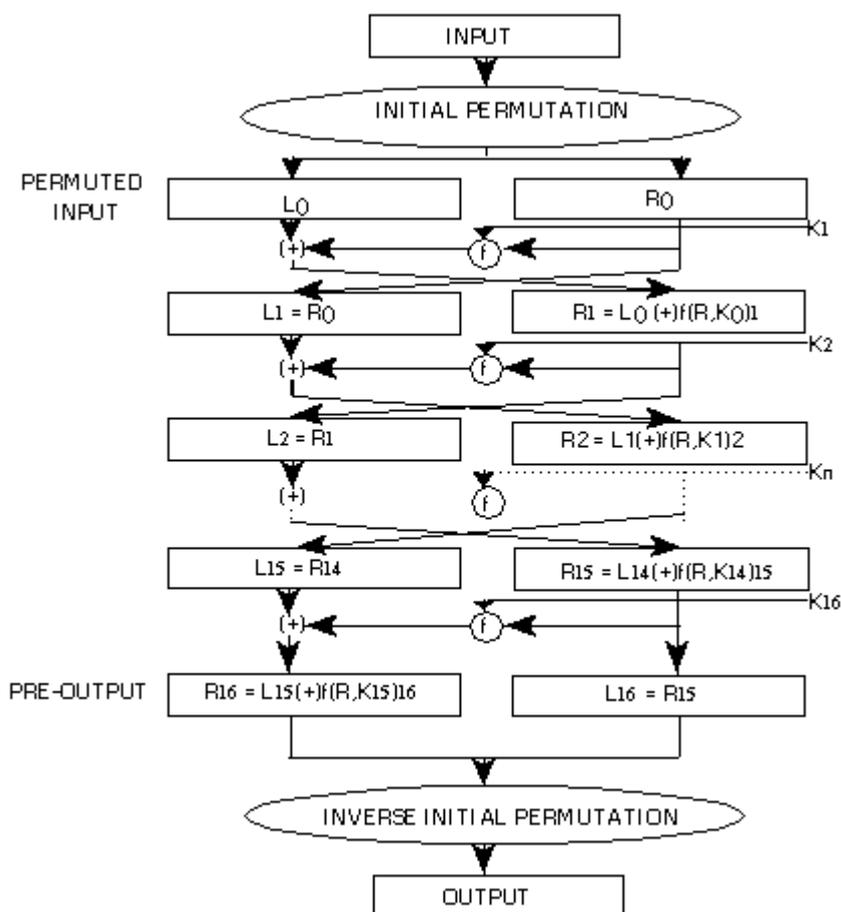


Comme pour les P-Box, elles sont réalisables matériellement avec des multiplexeurs et par câblage ou avec une table de correspondance.

7.1.4 L'expansion :

Elle permet d'augmenter le nombre de bits en en clonant certains à partir du mot original. Dans le DES, elle permet de passer de 32 bits à 48 bits. Elle est sous forme elle aussi de table.

7.1.5 Algorithme du DES :



Étapes du DES :

- 1) Un mot de 64 bits arrive en entrée; il est alors permuté (IP)
- 2) Ensuite il est divisé en deux mots de 32 bits, le premier va à gauche (L_i) et l'autre à droite (R_i)
- 3) R_i passe dans la fonction de confusion (cypher function en Anglais) qui dépend de la clef K_i
- 4) Le résultat f(K_i,R_i) et L_i sont passés dans un OU exclusif
- 5) L_{i+1} reçoit R_i, et R_{i+1} reçoit le résultat de la précédente opération

- 6) On répète cette opération 16 fois avec 16 clefs différentes calculées à partir de la clef initiale de 56 bits
- 7) Au dernier étage on effectue l'opération inverse de la permutation initiale (IP-1)

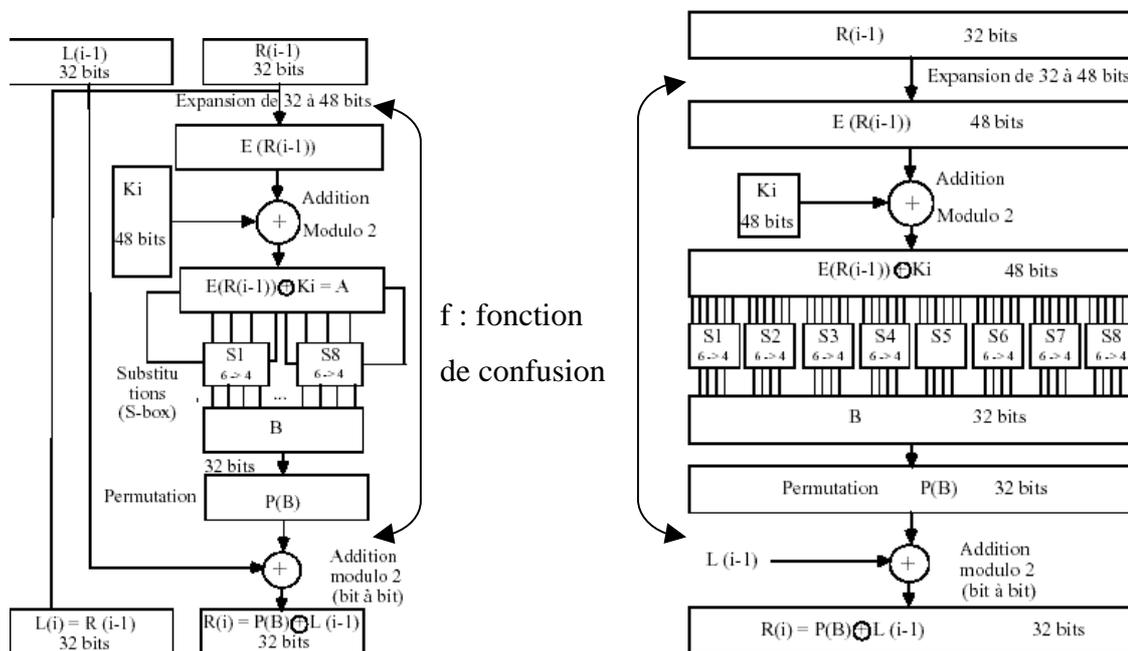
L'algorithme du DES est en fait basé sur l'utilisation des cellules de Feistel au nombre de 16. Ces cellules ont l'avantage d'être facilement inversibles. Ce qui rend le déchiffrement facile. Il faut juste reprendre l'algorithme du DES mais dans le sens inverse en commençant par la clef 16.

Déchiffrement :

$$R_i = L_{i+1} \text{ et } L_i = R_{i+1} + f(L_{i+1})$$

7.1.6 Détail de la fonction de confusion :

Détail d'un étage :



Dans un premier temps le mot de 32 bits entrant est expansé à 48 bits, ensuite il est ajouté (OU exclusif) à la clef de 48 bits de l'étage. Puis le mot de 48 bits obtenu est divisé en 8 blocs de 6 bits, chacun passant dans une S-Box. Enfin le mot de 32 bits résultant est alors passé dans une P-Box.

7.1.7 Les différentes tables

L'algorithme du DES étant public les tables des différentes étapes sont connues. Dans ces tables les nombres indiquent le numéro du bit d'entrée. Ainsi pour la première table IP le bit qui à la position 58 en entrée sera en position 1 en sortie et ainsi de suite.

Table de la permutation initiale : **IP**

58	50	42	34	26	18	10	2
60	52	44	36	28	20	12	4
62	54	46	38	30	22	14	6
64	56	48	40	32	24	16	8
57	49	41	33	25	17	9	1
59	51	43	35	27	19	11	3
61	53	45	37	29	21	13	5
63	55	47	39	31	23	15	7

Tableau 0.1 Table de la permutation initiale

Table de la permutation initiale inverse : **IP⁻¹**

40	8	48	16	56	24	64	32
39	7	47	15	55	23	63	31
38	6	46	14	54	22	62	30
37	5	45	13	53	21	61	29
36	4	44	12	52	20	60	28
35	3	43	11	51	19	59	27
34	2	42	10	50	18	58	26
33	1	41	9	49	17	57	25

Tableau 0.2 Table de la permutation initiale Inverse

Table d'expansion

32	1	2	3	4	5
4	5	6	7	8	9
8	9	10	11	12	13
12	13	14	15	16	17
16	17	18	19	20	21
20	21	22	23	24	25
24	25	26	27	28	29
28	29	30	31	32	1

Tableau 0.3 Table d'expansion

Table de la P_Box : **P**

16	7	20	21
29	12	28	17
1	15	23	26
5	18	31	10
2	8	24	14
32	27	3	9
19	13	30	6
22	11	4	25

Tableau 0.4 Table de la P-Box

Tables des 8 S-Box

Le fonctionnement du codage par les S-Box peut être explicité à partir de la table S8. Sur un mot de 6 bits qui entre dans la S-Box, le premier et le dernier bit codent un chiffre entre 0 et 3. Ce sera donc le numéro de la ligne utilisée, les quatre bits du milieu donnent un chiffre entre 0 et 15. Ce sera la colonne.

Ainsi à la réception de **110101**, on prend l'élément (3,**10**) soit 9 qui donne en binaire 1001 qui est la sortie de la S-Box 8.

Table S-Box : **S1**

14	4	13	1	2	15	11	8	3	10	6	12	5	9	0	7
0	15	7	4	14	2	13	1	10	6	12	11	9	5	3	8
4	1	14	8	13	6	2	11	15	12	9	7	3	10	5	0
15	12	8	2	4	9	1	7	5	11	3	14	10	0	6	13

Tableau 0.5 Table S-Box **S5**Table S-Box : **S2**

15	1	8	14	6	11	3	4	9	7	2	13	12	0	5	10
3	13	4	7	15	2	8	14	12	0	1	10	6	9	11	5
0	14	7	11	10	4	13	1	5	8	12	6	9	3	2	15
13	8	10	1	3	15	4	2	11	6	7	12	0	5	14	9

Tableau 0.6 Table S-Box **S2**Table S-Box : **S3**

10	0	9	14	6	3	15	5	1	13	12	7	11	4	2	8
13	7	0	9	3	4	6	10	2	8	5	14	12	11	15	1
13	6	4	9	8	15	3	0	11	1	2	12	5	10	14	7
1	10	13	0	6	9	8	7	4	15	14	3	11	5	2	12

Tableau 0.7 Table S-Box **S3**Table S-Box : **S4**

7	13	14	3	0	6	9	10	1	2	8	5	11	12	4	15
13	8	11	5	6	15	0	3	4	7	2	12	1	10	14	9
10	6	9	0	12	11	7	13	15	1	3	14	5	2	8	4
3	15	0	6	10	1	13	8	9	4	5	11	12	7	2	14

Tableau 0.8 Table S-Box **S4**Table S-Box : **S5**

2	12	4	1	7	10	11	6	8	5	3	15	13	0	14	9
14	11	2	12	4	7	13	1	5	0	15	10	3	9	8	6
4	2	1	11	10	13	7	8	15	9	12	5	6	3	0	14
11	8	12	7	1	14	2	13	6	15	0	9	10	4	5	3

Tableau 0.9 Table S-Box **S5**Table S-Box : **S6**

12	1	10	15	9	2	6	8	0	13	3	4	14	7	5	11
10	15	4	2	7	12	9	5	6	1	13	14	0	11	3	8
9	14	15	5	2	8	12	3	7	0	4	10	1	13	11	6
4	3	2	12	9	5	15	10	11	14	1	7	6	0	8	13

Tableau 0.10 Table S-Box **S6**Table S-Box : **S7**

4	11	2	14	15	0	8	13	3	12	9	7	5	10	6	1
13	0	11	7	4	9	1	10	14	3	5	12	2	15	8	6
1	4	11	13	12	3	7	14	10	15	6	8	0	5	9	2
6	11	13	8	1	4	10	7	9	5	0	15	14	2	3	12

Tableau 0.11 Table S-Box **S7**Table S-Box : **S8**

13	2	8	4	6	15	11	1	10	9	3	14	5	0	12	7
1	15	13	8	10	3	7	4	12	5	6	11	0	4	9	2
7	11	4	1	9	12	14	2	0	6	10	13	15	3	5	8
2	1	14	7	4	10	8	13	15	12	9	0	3	5	6	11

Tableau 0.12 Table S-Box **S8**

7.1.8 Algorithme de génération des clefs

Il ne reste plus qu'à savoir comment générer les 16 clefs des 16 étapes de chiffrement à partir de la clef principale.

En fait, cela se résume à des décalages de bits à partir de la clef principale, plus une permutation.

Numéro d'itération	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Nombre de décalage à gauche	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1

Tableau 0.13 Tableau des décalages de bits en fonction de l'étage de calcul

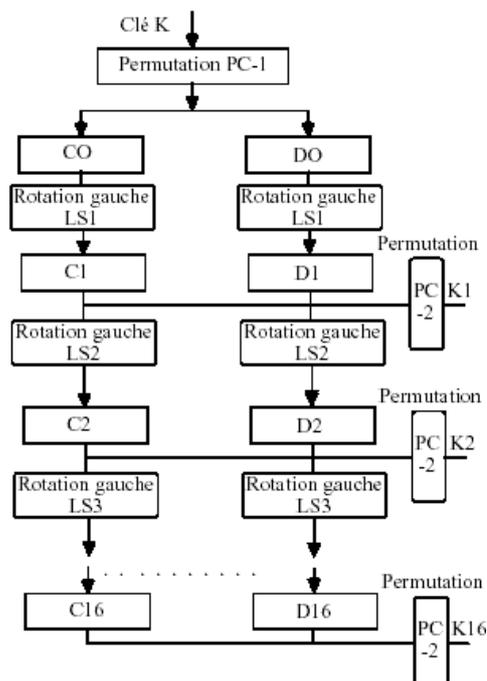


Figure 0.1 Algorithme de génération des clés de codage du DES

Par exemple, pour obtenir la clef 8, l'élément C7 et D7 du Tableau 0.13 indique qu'il faut effectuer une rotation de 2 bits vers la gauche et une permutation PC-2 sur les 28 bits résultants.

Table de permutation **PC-1**

57	49	41	33	25	17	9
1	58	50	42	34	26	18
10	2	59	51	43	35	27
19	11	3	60	52	44	36
63	55	47	39	31	23	15
7	62	54	46	38	30	22
14	6	61	53	45	37	29
21	13	5	28	20	12	4

Tableau 0.14 Table de permutation **PC-1**

Table de permutation **PC-2**

14	17	11	24	1	5
3	28	15	6	21	10
23	19	12	4	26	8
16	7	27	20	13	2
41	52	31	37	47	55
30	40	51	45	33	48
44	49	39	56	34	53
46	42	50	36	29	32

Tableau 0.15 Table de permutation **PC-2**

Annexe 8 : Codes Correcteurs d'erreurs.

Il existe aussi une définition mathématique de ce qu'est un code. Soit un corps Ω , E_k un Ω -espace vectoriel de dimension k et F_n un Ω -espace vectoriel de dimension n . Un code C est alors une application injective de E_k dans F_n .

1. Entropie

L'entropie d'une variable aléatoire X à n valeurs (n pouvant être infini) et de loi de probabilité (p_1 ,

p_2, p_3, \dots, p_n) est définie par
$$H(X) = \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

2. Mot du code

On appelle mot du code, la suite de n bits obtenue après un codage $C(k, n)$. Le nombre n de bits qui composent un mot du code est appelé la longueur du code. La dimension k étant la longueur initiale des mots.

3. Poids de Hamming

Poids de Hamming est le nombre de bit à 1 dans un mot.

4. La distance de Hamming

La distance de Hamming entre 2 mots est le nombre de bits qui les différencie.

Exemple : distance de Hamming(01001100, 01010101) = 3

Cela revient à faire l'addition des 2 mots et à calculer le poids de Hamming du mot résultant.

La distance de Hamming d'un code est la plus petite distance possible entre 2 mots de ce code.

5. Le syndrome

Un syndrome est le résultat de la multiplication du mot reçu du canal de transmission multiplié par la matrice de contrôle. Le syndrome est révélateur des erreurs contenues dans le message reçu.

6. Capacité de correction

Capacité de correction d'erreur d'un code : $\text{Cap_Corr} = (\text{dist_Ham} - 2) / 2$.

7. Taux de codage

Taux de codage $\Rightarrow R=n/k$, il définit le rendement du code.

Le borne de Singleton indique en fait la capacité limite d'un code. Il prouve que $d \leq n-k+1$ comme la capacité d'un code à corriger des erreurs dépend de la distance, cela équivaut à dire qu'un code avec n et k fixés ne corrigera pas plus de $((n-k+1)-2)/2$ fautes.

8. Les codes simples : Calcul de parité

Le contrôle de parité est un code simple, il ne détecte que des erreurs en nombre impair mais il ne permet pas de faire de la correction. En effet si deux bits sont inversés, cela ne change pas la parité. Pour autoriser une correction d'erreurs, il faut organiser le message en une matrice et déterminer la parité sur chaque ligne et colonne

Exemple :

Lettre	Code ASCII	Mot codé(parité paire)	Mot codé (<i>parité impaire</i>)
E	1010001	101000 11	101000 10
V	0110101	011010 10	011010 11
A	1000001	100000 10	100000 11

Pour faire de la correction d'erreurs avec un code simple, il faut utiliser deux bits de parité.

Pour cela, on ordonne le message à transmettre dans une matrice et on calcule la parité verticalement et horizontalement sur chaque ligne et colonne.

Ainsi, à la réception, on re-calcule les parités et s'il y a une erreur, c'est-à-dire si les bits de parité envoyés et ceux calculés à la réception ne sont pas égaux, c'est qu'il y a une erreur que l'on peut localiser.

1	0	1	Parité de la première ligne : 1
0	0	0	
1	0		Parité de la deuxième ligne : 0

Parité de la deuxième colonne : **0**

Parité de la première colonne : **1**

Si un bit de donnée est modifié, il affecte alors deux bits de parité et peut être retrouvé

1	0	1
0	1	0
1	0	

9. Les codes en blocs (algébriques)

Ce sont des codes pour lesquels le codage/décodage d'un bloc dépend uniquement des informations de ce bloc.

10. Les Codes linéaires et de Hamming

Ce sont des codes dont le mot résultant (noté cg) est obtenu après une transformation linéaire du message original (noté c). Un code est linéaire parce que tous les mots de code s'obtiennent par combinaison linéaire des bits de données. Ces codes sont caractérisés par leur matrice génératrice G . Les lignes représentent en fait une base du code. Elle sera toujours de taille $k \times n$ et de rang k pour un code $C(k,n)$. Ils se caractérisent aussi par leur matrice de contrôle H , qui permet à la réception du message (noté r) de savoir si celui-ci est issu du code original ou non.

H dépend de G , il faut que : $G * H^T = 0$ ainsi :

$$r * H^T = (cg) * H^T = (c * G) * H^T = c * (G * H^T) = 0 \quad (0.1)$$

Le résultat $r * H^T$ est appelé syndrome. Donc, si le syndrome est nul alors le mot reçu est correct. Sinon il comporte des erreurs, il faut alors les corriger.

Le code de Hamming est un code linéaire dont la capacité de correction est d'une erreur et celle de détection de 2 ou plus. C'est un code $C(2^m - m - 1, 2^m - 1)$.

Le syndrome calculé à la réception du message donne directement la position de l'erreur. S'il est nul, il n'y a pas d'erreur, sinon, il suffit d'inverser le bit dont la position est le syndrome.

Ce code est facile à implémenter, il peut être intéressant de le mettre en œuvre pour une transmission où les erreurs sont rares.

Exemple le plus connu $C(4,7)$. Les lignes de G forme une base de Z_2^7 .

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

On a envoyé 1000011, le mot 1000 codé avec $C(4,7)$

On a reçu le message 1100011

$$H \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le syndrome est non nul et vaut 2 en décimal donc le deuxième bit est faux, il faut l'inverser.

Le message devient 100011 et comme C(4,7) est systématique²¹ on enlève directement les bits de redondances pour obtenir la donnée : 1000.

11. Code polynomial

Un code polynomial est un code linéaire qui génère un vocabulaire dont les mots sont des multiples d'un polynôme générateur (noté $g(x)$). Ce qui implique que les lignes de la matrice génératrice sont aussi engendrées par ce même polynôme puisque tout polynôme peut se représenter sous un vecteur qui contient les coefficients des puissances de X . Le choix de $g(X)$ fixe les propriétés du code (pouvoir correcteur, distance minimale, ...) et les algorithmes de codage/décodage.

Le degré du polynôme fixe la capacité de détection et correction. En effet, si un polynôme a deux coefficients non-nuls (i.e. il ne divise pas x^i) alors il détecte une erreur, s'il en a trois (i.e. il ne divise pas x^i ni x^{i+1}) alors il peut détecter 3 erreurs...

Donc un code polynomial détecte un nombre d'erreurs inférieur à son degré. La probabilité de ne pas détecter d'erreur est très faible : $2^{-(n-k)}$.

Les codes polynomiaux sont très efficaces si le polynôme générateur est bien choisi. Mais il n'y a pas vraiment de méthode pour choisir un bon polynôme. Le plus simple est de procéder par tâtonnement. Le polynôme est choisi, puis il faut vérifier la distance du code qu'il génère et si sa capacité de correction est bien celle attendue. Ils ont aussi l'avantage de coder des données avec des tailles variables, dans la mesure où la longueur de la donnée n'excède pas celle du code.

a) Codage

²¹ Car G est de la forme : $[Id(k), P(k, n-k)]$ (Id =matrice identité)

Soient $M(x) = x_0 + x_1 * x^1 + \dots + x_{k-1} * x^{k-1}$ la donnée, $y(x) = Q(x) * G(x)$ le mot à émettre qui est forcément un multiple du code donc de $G(x)$, et $G(x) = g_0 + g_1 * x^1 + \dots + g_r * x^r$, le polynôme générateur.

Si on calcule $x^r * M(x)$, qui est de degré $k+r-1=n-1$, on obtient :

$$x^r * M(x) = Q(x) * G(x) + R(x)$$

Comme une addition et une soustraction en modulo 2 sont équivalentes on peut écrire :

$$y(x) = Q(x) * G(x) = x^r * M(x) + R(x)$$

Le codage est en fait une division polynomiale.

Exemple ,

avec comme polynôme générateur $G(x) = 1 + x + x^3$, et la donnée $M(z) = x_0 + x_1z + x_2z^2 + x_3z^3$ à envoyer.

La division de $x^r X(z)$ par $H(z)$ donne :

$$Q(z) = x_3z^3 + x_2z^2 + (x_1 + x_3)z + x_0 + x_2 + x_3$$

$$R(z) = (x_1 + x_2 + x_3)z^2 + (x_0 + x_1 + x_2)z + x_0 + x_2 + x_3$$

$$Y(z) = x_3z^6 + x_2z^5 + x_1z^4 + x_0z^3 + (x_1 + x_2 + x_3)z^2 + (x_0 + x_1 + x_2)z + x_0 + x_2 + x_3$$

Au final on enverra $(x_3 \ x_2 \ x_1 \ x_0 \ a_2 \ a_1 \ a_0)$ avec

$$a_2 = x_1 + x_2 + x_3$$

$$a_1 = x_0 + x_1 + x_2$$

$$a_0 = x_0 + x_2 + x_3$$

b) Décodage

A la réception, chaque mot reçu $M'(x)$ est divisé par le polynôme générateur $g(x)$.

Le syndrome $s(x) = m'(x) \text{ mod}(g(x))$ est nul si il n'y a eu aucune erreur lors de la transmission, et si le code est systématique une simple troncature suffit à retrouver la donnée, ou alors $(M'(x))/G(x) = Q(x)$ et avec $Q(x)$ on retrouve $M(x)$.

Sinon il subsiste un reste qui est un polynôme révélateur de l'erreur.

A partir de ce polynôme plusieurs algorithmes existent pour retrouver la position des erreurs et les corriger.

12. Les codes en treillis (convolutifs)

Ce sont des codes pour lesquels le codage/décodage d'un bloc dépend des informations d'autres blocs (généralement de bloc précédemment transmis). Chaque mot du code de n éléments dépend des k éléments binaires en entrée mais aussi des m blocs de k éléments binaires précédents.

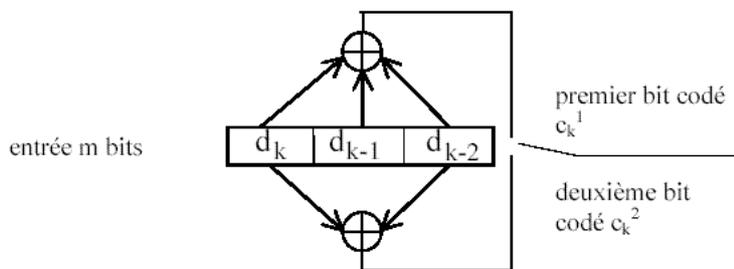
On les appelle aussi codes convolutifs car le codage est équivalent à une filtration avec un FIR.

On appelle $m+1$ la longueur de contrainte.

Le codage s'effectue par une succession de décalages et de OU exclusif. Le codage s'effectue par une succession de décalage et de OU exclusif.

Exemple avec un registre de 3 bits et deux ou exclusif et $k=1$:

d_k = bit d'entrée et d_{k-1} , d_{k-2} les deux bits précédemment stockés



bit d'entrée	état du registre $d_{k-1}d_{k-2}$	contenu du registre	bits de sortie
0	00	000	00
1	00	100	11
0	01	001	11
1	01	101	00
0	10	010	10
1	10	110	01
0	11	011	01
1	11	111	10

La représentation la plus commune et la plus claire pour le décodage est celle en treillis.

Sont répertoriés, tous les états du codeur possible (vocabulaire du code) et placés sur des nœuds. Si $k=1$ il y en a $2^{(m-1)}$, sinon il y en a $2^{(m-1)*k}$. La transition entre deux nœuds dépend du ou des bits qui arrivent.

Reprenons l'exemple avec $k=1$ les mots possibles sont : 00,01,10,11.

Dans notre exemple, partant de l'état 00 l'arrivée d'un 0 mène le codeur à l'état 00 et un 1 vers l'état 10. Sur chaque branche on place le mot codé.

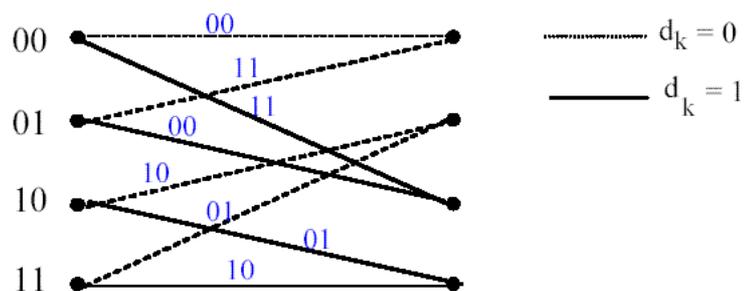


Figure 0.1 Représentation en treillis des états possibles du codeur.

13. Les codes graphiques

Inventés en 1963 par Mr Gallager, ils insèrent des bits de parités "au hasard". Les codes de Goppa dits géométrico-algébriques font partie de cette catégorie.

En utilisant la courbe de Klein $x^3y + y^3 + y = 0$ qui a 24 solutions dans le corps à 8 éléments, il peut être construit un code $C(3,24)$ qui permet de corriger jusqu'à 10 erreurs dans un mot.

Annexe 9 : Synthèse du dialogue entre le lecteur et le transpondeur

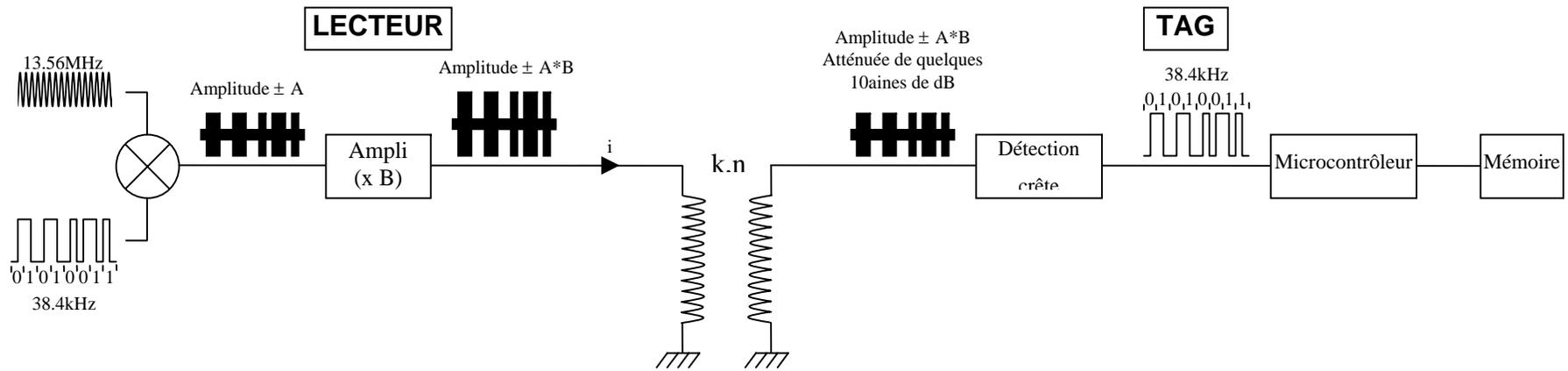


Figure 0.1 Transmission vers le transpondeur de l'information \$53

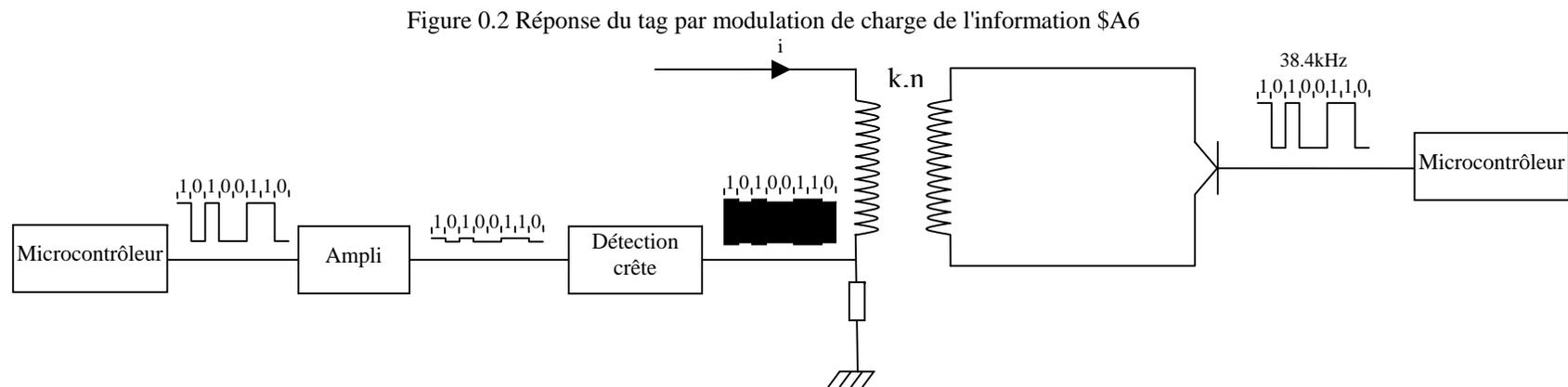


Figure 0.2 Réponse du tag par modulation de charge de l'information \$A6

Annexe 10 : Protocole des commandes PICOTAG

7.1.9 Lecture du numéro d'identification

Cette lecture nécessite d'effectuer la séquence de commandes suivante :

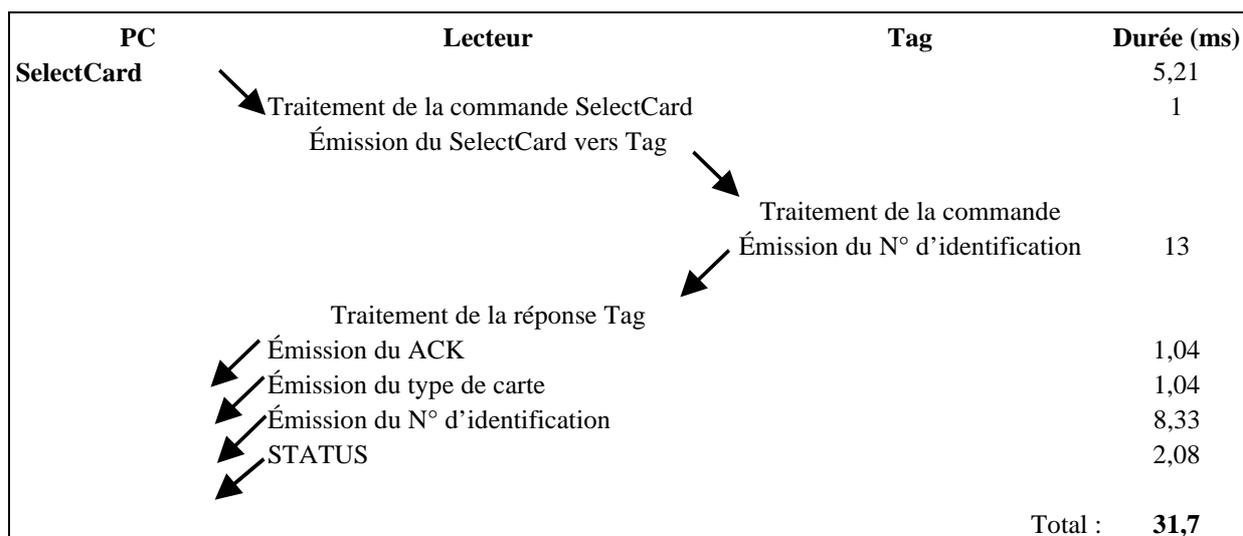


Figure 0.1 Protocole de la lecture du numéro d'identification

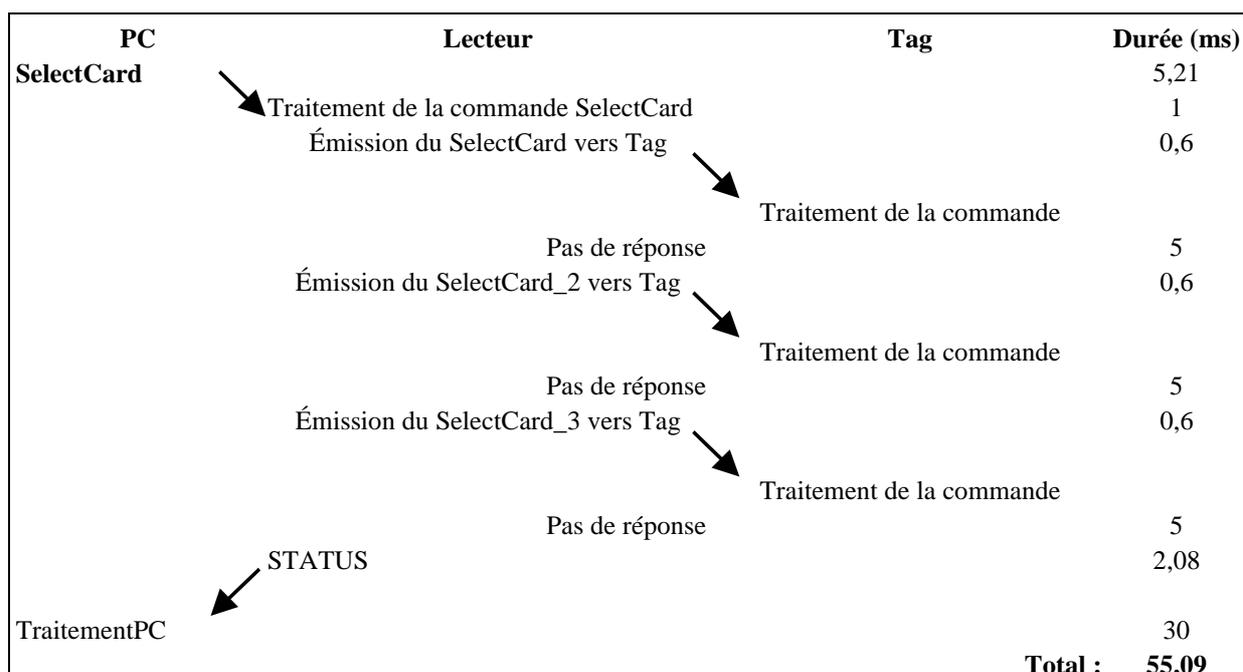


Figure 0.2 Protocole de la lecture du numéro d'identification en cas d'absence Tag

7.1.10 Traitement de l'anticollision

La succession de commandes est la suivante :

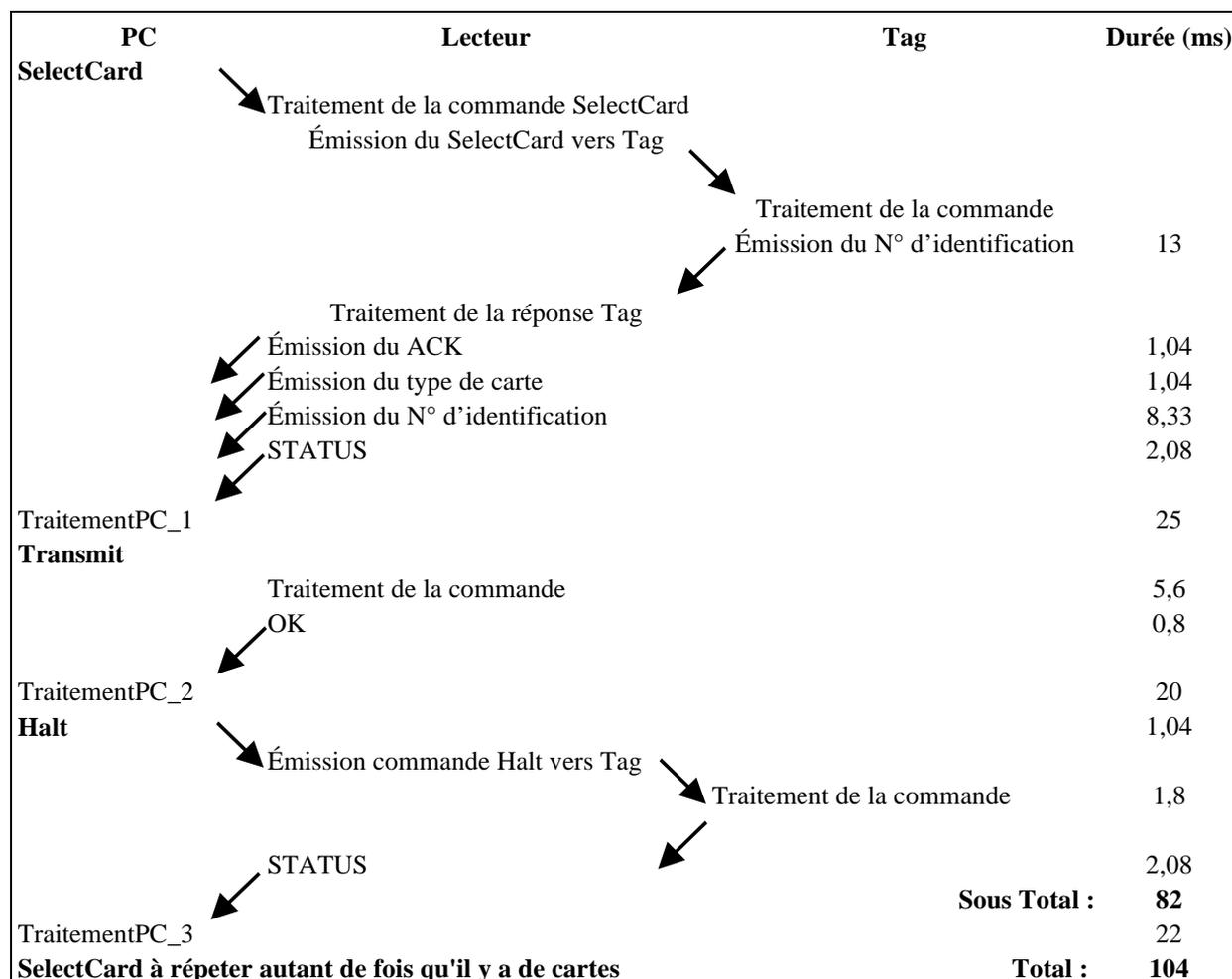


Figure 0.3 Protocole de gestion de l'anticollision

La succession des commandes est identique tant qu'il existe des cartes dans le champ.

7.1.11 Traitement de l'écriture

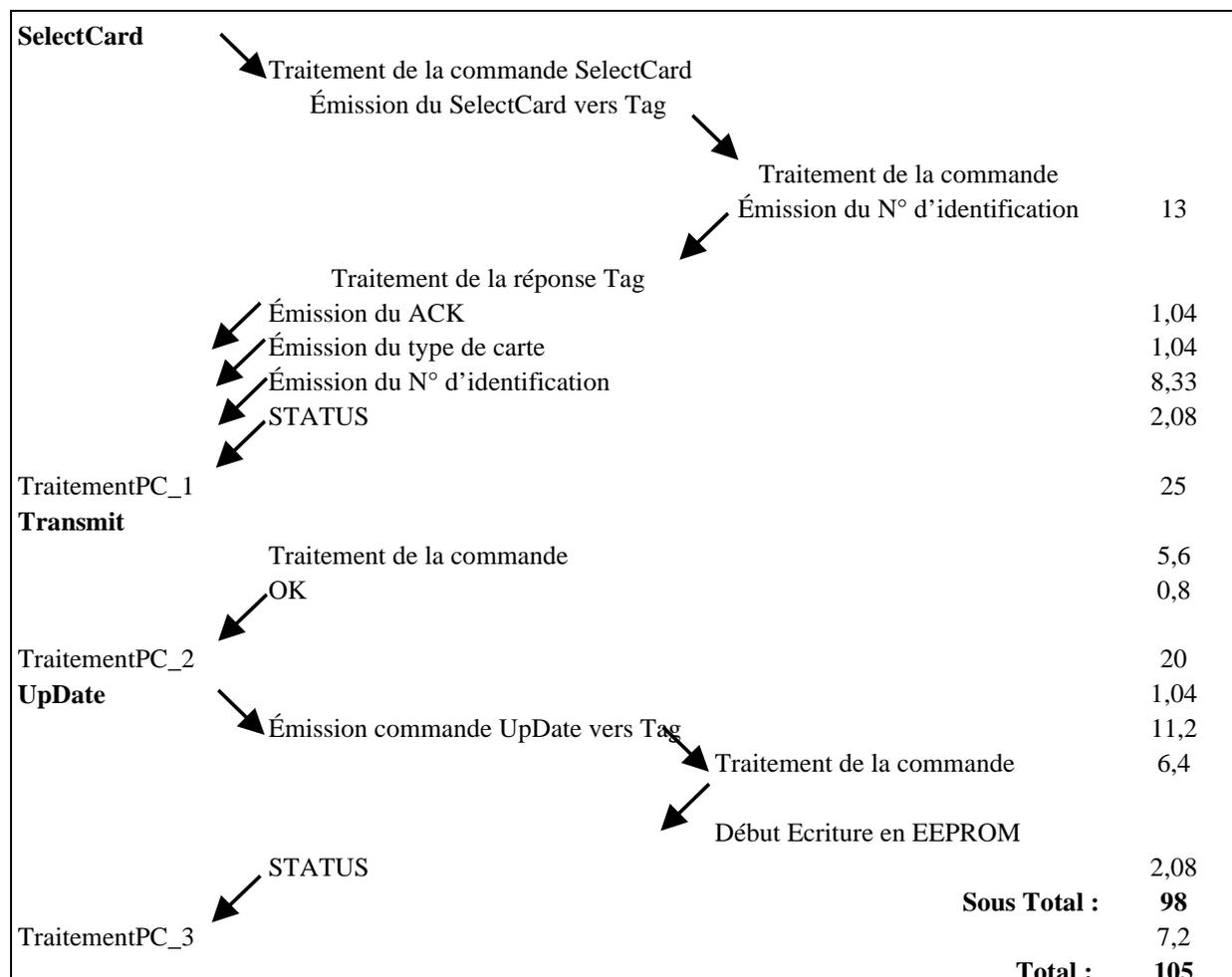


Figure 0.4 Protocole pour le cycle d'écriture Tag

Attention, le cycle d'écriture dans l'EEPROM du Tag n'est pas terminé, celui-ci sera uniquement disponible uniquement eu bout de 30 ms.

7.1.12 Traitement d'une lecture

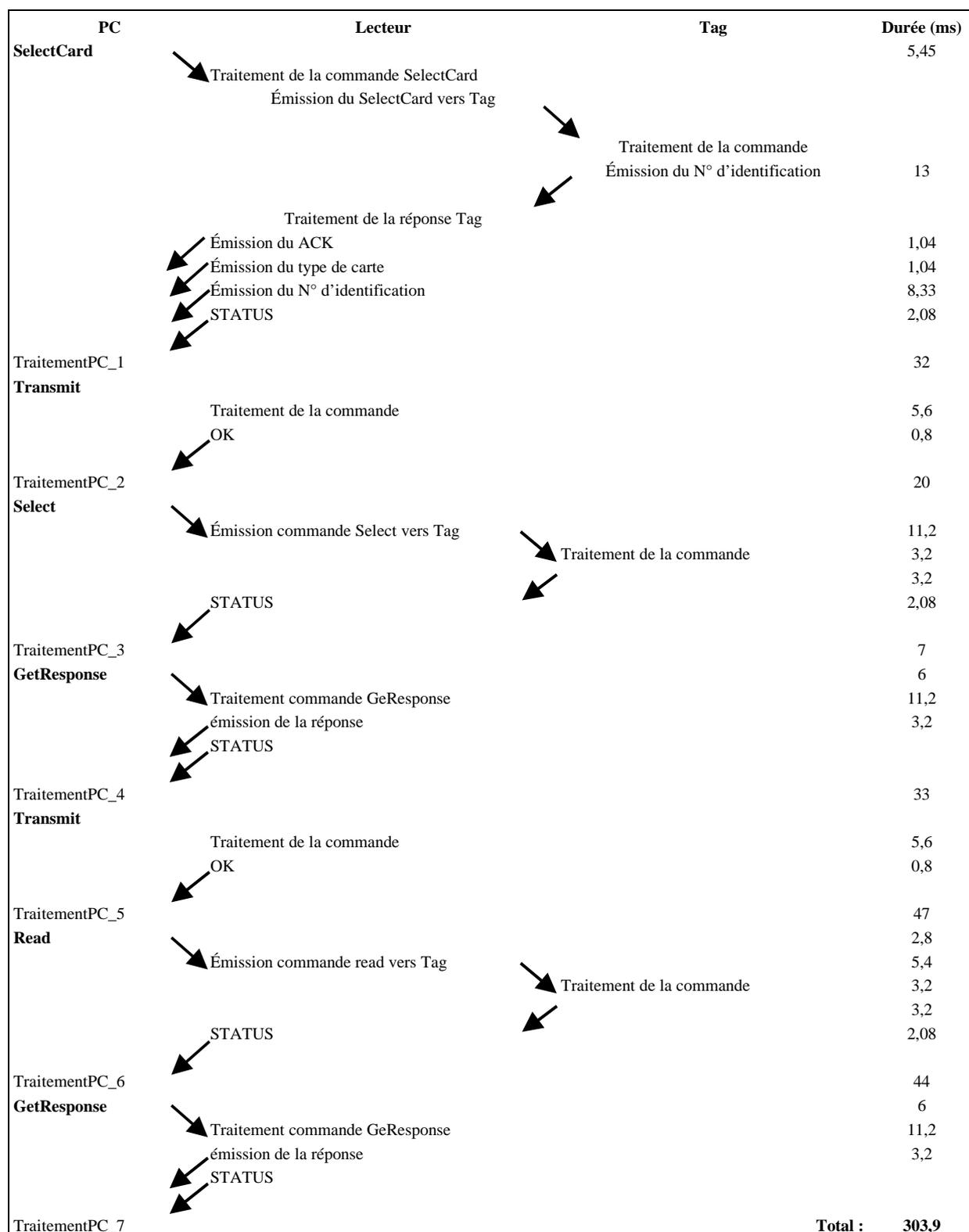


Figure 0.5 Protocole pour le cycle de lecture dans le Tag

Annexe 11 : Schémas électroniques

7.1.13 Schéma du lecteur

Figure 0.1 Schéma électronique du lecteur

7.1.14 Schéma du démodulateur

Figure 0.2 Schéma électronique du démodulateur du lecteur

7.1.15 Schéma du transpondeur

Figure 0.3 Schéma électronique du transpondeur

7.1.16 Schéma du transpondeur : Démodulateur et Modulateur de charge.

Figure 0.4 Démodulateur et Modulateur de charge du transpondeur.

Annexe 12 : Réalisation du transpondeur

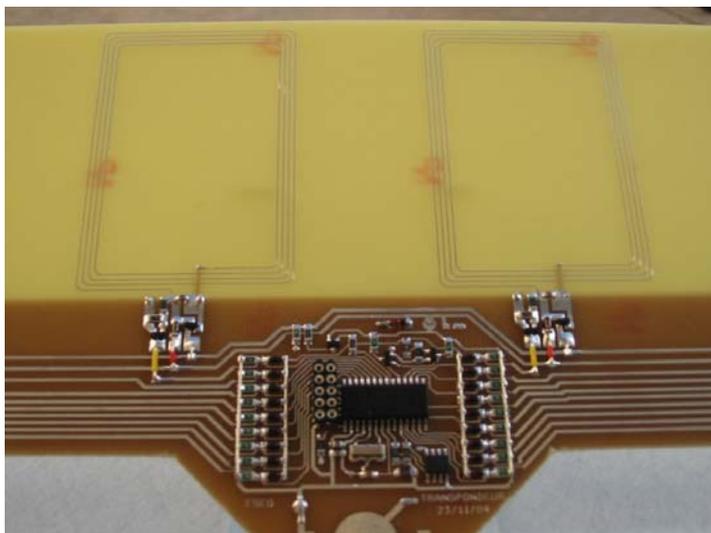


Figure 0.1 Le transpondeur et ses deux antennes centrales



Figure 0.2 Le transpondeur dans sa configuration 6 antennes

Annexe 13 : Table de codage des signaux DCF 77

N° du bit	Signification
0 à 14	*
15	Bit d'antenne (0 = antenne normal 1 = antenne de reserve)
16	Si 1: passage heure été/hiver
17	1: heured'été 0: heure d'hiver
18	
19	1:Il arrive une seconde de commutation 0: Fonctionnement normal
20	Toujours à 1
21	Bit de Minute, Poids 1
22	Bit de Minute, Poids 2
23	Bit de Minute, Poids 4
24	Bit de Minute, Poids 8
25	Bit de Minute, Poids 10
26	Bit de Minute, Poids 20
27	Bit de Minute, Poids 40
28	Bit de parité paire (bits 21 à 27)
29	Bit d'heure, Poids 1
30	Bit d'heure, Poids 2
31	Bit d'heure, Poids 4
32	Bit d'heure, Poids 8
33	Bit d'heure, Poids 10
34	Bit d'heure, Poids 20
35	Bit de parité paire (bits 29 à 34)
36	Bit de jour calendaire, Poids 1
37	Bit de jour calendaire, Poids 2
38	Bit de jour calendaire, Poids 4
39	Bit de jour calendaire, Poids 8
40	Bit de jour calendaire, Poids 10
41	Bit de jour calendaire, Poids 20
42	Bit de jour de la semaine, Poids 1
43	Bit de jour de la semaine, Poids 2
44	Bit de jour de la semaine, Poids 4
45	Bit de mois, Poids 1
46	Bit de mois, Poids 2
47	Bit de mois, Poids 4
48	Bit de mois, Poids 8
49	Bit de mois, Poids 10
50	Bit d'année, Poids 1
51	Bit d'année, Poids 2
52	Bit d'année, Poids 4
53	Bit d'année, Poids 8
54	Bit d'année, Poids 10
55	Bit d'année, Poids 20
56	Bit d'année, Poids 40
57	Bit d'année, Poids 80
58	Bit de parité paire (bits 36 à 57)

Tableau 0.1 Table de décodage des signaux DCF 77 de l'horloge de Frankfurt.

Annexe 14 : Description des structures de données.

Parameter	Bit	Located	Cycle type
Lateral position	16		Read
Transponder number	64	EEPROM	Read
Speed	8	EEPROM	Read
Curve beam	16	EEPROM	Read
Devers	16	EEPROM	Read
Curvilinear abscissa	16	EEPROM	Read
Reference point	16	EEPROM	Read
Direction	1	EEPROM	Read
Read checksum	16	Calculate	
Total	169		

Tableau 0.1 Caractéristiques statiques de la prochaine section de route

Parameter	Bit	Located	Cycle type
Vehicle status word	16	FRAM	Read/Write
Date	16	FRAM	Read/Write
Time	24	FRAM	Read/Write
Write checksum	16	Calculate	
Total	72		

Tableau 0.2 Informations temps réel caractéristiques du véhicule

s

8 PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Congrès Internationaux

8.1.1 ITSC'2003

Plainchault P., Ehrlich J., Bertrand J., Foret S., "13.56 MHz Transponders Use for Vehicles Infrastructure Communication", *ITSC'2003 IEEE Intelligent Transportation Systems Council*, Shanghai, October 2003.

8.1.2 IEEE Sensors'2003

Plainchault P., Ehrlich J., Bertrand J., "13.56 MHz Transponders design for Vehicles/Infrastructure communications", *IEEE Sensors 2003*, Toronto, October 2003.

8.1.3 ITSS'2003

Plainchault P., Ehrlich J., Bosch T., "A new transponder design for car/infrastructure communication", *10th World Congress on ITSS'2003 Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, November 2003.

Congrès nationaux

8.1.4 C2I2000

Plainchault P., Marciniak D., Lonc B., Bajic E., "*La traçabilité après vente en secteur automobile : Utilisation de la Mémoire Embarquée*", C2I Colloque Interdisciplinaire en instrumentation, Paris, France, 2000

Perdriau R., Plainchault P., "*Réseaux de capteurs/actionneurs : la solution Ethernet/IP*", C2I Colloque Interdisciplinaire en instrumentation, Paris, 2000

8.1.5 MEITO2001

Plainchault P., "*Traçabilité :Pensez étiquettes électroniques : État de l'art* ", Journée technologique de la MEITO, Angers , France, Octobre 2001.

Brevet

Brevet N° 02 04 450 du 10 avril 2002, « Dispositif à Transpondeur »

Inventeurs : P.Plainchault et J. Ehrlich

Déposants : LCPC et ESEO

Publié le 17 octobre 2003 sous le n° 2 838 566.

Résumé

Cette thèse présente comment utiliser la communication entre les véhicules et l'infrastructure à base de transpondeurs pour sécuriser le déplacement automobile. Dans un premier temps, nous présentons un état de l'art des systèmes de localisation (LIDAR, RADAR, caméras vidéo, marqueur magnétique, GPS, gyroscope, et cartes embarquées,...), de communication (DAB, UMTS, DSRC, Bluetooth, WIFI, InfraRouge,..) et sur la technologie des transpondeurs. Puis nous rappelons les principes liés à l'étude d'un transpondeur, sachant que ce système de communication s'appuie sur deux éléments principaux : 1) le lecteur et son antenne embarqués dans le véhicule; 2) le transpondeur logé dans la bande de roulement composé d'antennes, d'un microcontrôleur et d'une mémoire. Enfin, nous présentons les résultats obtenus et quelques applications possibles : contrôle latéral et longitudinal, le calcul d'inter distance et la détection de circulation à contresens.

Mots Clés :

Transpondeur; 13,56 MHZ; Transports Intelligents; Suivi de trajectoire; Localisation latérale et longitudinale; Sécurité routière; Capteur; Radiofréquence; RFID; Télé-alimentation.

Title:

Ensuring driving through transponder based communication between vehicles and infrastructure

Abstract:

For many years, car manufacturers have been trying to ensure the safety of automobile movements. This thesis relates how a transponder based communication between vehicles and infrastructure can be used. In the first part overview of localisation systems (LIDAR, RADAR, video cameras, magnetic strip following, GPS, gyro platforms and cartography systems embedded in the vehicle), local communication (DAB, UMTS, DSRC, Bluetooth, WIFI, InfraRed,...) and transponder technology are presented. Then it recalls the principles of transponder. This communication system consists of two main elements: 1) a base station with an antenna embedded in a vehicle, 2) a transponder, located in the tread including an antenna, a microcontroller for data processing and communication and a memory. Finally, also some results and applications: lateral and longitudinal positioning, inter distance calculation and detection of wrong way traffic are presented.

Key words :

Transponder; 13.56MHz; Intelligent Transport; Course following, Lateral and longitudinal localisation; Sensor, Road safety, RFID.