



HAL
open science

Architecture et Intégration d'un module de type Smart-Dust

Guillaume Bacles-Min

► **To cite this version:**

Guillaume Bacles-Min. Architecture et Intégration d'un module de type Smart-Dust. Electromagnétisme. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009. Français. NNT : . tel-00790778

HAL Id: tel-00790778

<https://theses.hal.science/tel-00790778>

Submitted on 21 Feb 2013

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

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

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du groupe Radio Fréquences, Hyperfréquences et Optomicroondes de l'Institut de Microélectronique, Electromagnétisme et Photonique – Laboratoire d'Hyperfréquences de Caractérisation (IMEP-LAHC) de Grenoble.

Je tiens à remercier en premier lieu Messieurs Francis Balestra et Gérard Ghibaudo, successivement directeurs du laboratoire pour m'avoir accueilli au sein de leur établissement et ce, dès mon stage de DEA en 2005.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Fabien Ndagijimana, Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble I, pour avoir proposé ce sujet novateur et assuré la direction de cette thèse.

Je remercie vivement Skandar Basrou, Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble I, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et pour m'avoir donné l'occasion de présenter mes travaux à l'assemblée générale du GDR MNS à Toulouse.

J'adresse également mes remerciements à Nathalie Rolland, Professeur à l'Université de Lille I et à Norbert Noury, Professeur à l'Université de Lyon I, qui ont accepté d'être rapporteurs de mes travaux et pour les remarques constructives qu'ils ont faites dans ce cadre.

Je remercie Jacques Verdier, Maître de conférences à l'INSA de Lyon et Norbert Daniele, Ingénieur au CEA de Grenoble pour leur participation à mon jury de thèse.

J'en viens maintenant aux remerciements à tous ceux qui, aussi bien côté labo que côté jardin, ont fait que cette expérience restera inoubliable. Ils sont loin les débuts rue des martyrs où, de ma place dans le couloir, que ce soit en stage ou en thèse, j'avais une superbe vue de « la fourmilière ». Les bâtiments Minatec sont sortis de terre et avec eux un bureau confortable.

Vu le nombre de personnes du laboratoire à remercier, j'ai dû choisir une méthode afin (d'essayer) de n'oublier personne.

Je vais donc tout d'abord monter les 27 marches de la passerelle puis descendre les 30 marches jusqu'au rez-de-chaussée pour aller trouver les techniciens et ingénieurs ; Nicolas, Xavier, Martine, Aude, Greg' et Julie ; que je salue et remercie pour leur sympathie à mon égard et pour les coups de main donnés pendant ces 4 années de présence au laboratoire.

Je remonte maintenant 30 marches pour arriver au 1^{er} étage. Petit passage par le bureau 286, celui de Loan, que je ne remercierai jamais assez, William, Louis et Bogdan et le 233 de Guillaume, Anne-Laure, Hamza et Xin. Merci à vous tous pour les bons moments passés, je vous souhaite bonne continuation pour la suite. La cafet' est vide, je monte.

25 marches pour atteindre le 2^{ème} étage. On trouve ici le personnel administratif avec, bureau 360 et 361, les gestionnaires Dhalila, Valérie, Daniel et Anne, les secrétaires, en 327 Chahia et Mireille en 331. Merci à toutes et tous pour votre travail. Je ne peux m'empêcher de passer par le bureau 367 où Madame Vilcot et Monsieur Saquet résident. Je tiens à remercier la première pour tout ce qu'elle a fait pour le laboratoire et le deuxième pour m'avoir tout d'abord accepté dans le master OR il y a cinq ans déjà, puis pour ses qualités humaines exceptionnelles qui font de lui un grand monsieur auquel je souhaite une très

bonne retraite. En sortant du bureau je croise Manu, le nouvel adjoint, bon courage à toi ! Juste à côté, bureau 368, je retrouve les deux p'tits nouveaux, ceux qui me font vraiment penser que le monde est petit. Tout d'abord Emilie, la dynamique poitevine, que j'aurai pu connaître à Orsay quelques années plus tôt et Julien, le breton du Trégor ou du Léon (je sais plus), que j'aurai pu croiser à Lannion en 2002. Cette trop courte période passée avec vous a été très enrichissante, je vous souhaite pleins de bonnes choses pour la suite... En continuant je retrouve en 354 Irina alias « Madame j'assiste-à-toutes-les-repet'-de-theses-et-j'y-donne-mon-avis » que je remercie pour sa gentillesse... et son avis ! Ensuite c'est Monsieur Montès, mon maître de stage de DEA qui m'a appris à chercher, que je retrouve en 356. Un grand merci pour tout ce que j'ai appris à tes côtés. Enfin un grand merci à Sorin en 315 pour la bonne, que dis-je, excellente bouteille que j'ai pu déguster avec le bureau à l'occasion de ton anniversaire et bien sûr pour ses bons mots lors de ses visites, à Jean-Michel en 314 pour sa précieuse aide sur cadence, à Georges Pananakakis en 363 dont j'étais le seul élève en remise à niveau en DEA et qui m'a effectivement bien remis à niveau, à Guy Vitrant en 349 pour sa bonne, que dis-je, excellente boîte de chocolats que j'ai là encore pu déguster avec le bureau, au bureau 326 d'Adriana, que j'espère encore souvent croiser le dimanche au marché, et de Florent, mon collègue des TP CIME, à Davide en 369, l'Italien chantant, à Luiz en 366, le BBB (Brésilien bientôt Breton), le bonjour à Madame et à ta miss, à Nathalie en 337 pour sa bonne humeur, au bureau 313 de Nob, Max, Titof et Q, mes collègues de la promo 2005 qu'il faisait bon visiter. J'ai aussi une petite pensée pour Yan, Alina, Alexandru, Elise, Lionel, Moussa, Darine, Jérôme, Rafael, René, Franck, et Philippe.

Et je monte encore 25 marches pour me rendre à mon étage, le 3^{ème}. Un grand merci à l'équipe d'informaticiens, Brigitte en 431, Serge en 439 et Luc en 434. Je salue et remercie tous les membres de l'équipe du thème RFHO de cet étage, à savoir le bureau 478 des sages, Marc, Pascal, Dominique et Philippe, le bureau 436 des jeunes, Emmanuel et Yannis, le bureau 435 des jeunes de la promo d'avant, Florence, Ghislaine et Jean-Daniel, 10 enfants à eux trois et un gros capital sympathie, Béatrice du 433 et enfin Tan-Phu en 441, le jeune professeur tout fraîchement arrivé à qui je souhaite de vite trouver un toit à Grenoble. Je voudrais aussi saluer Zine, Laurence et Marwa du 415, Alexandre Chagoya du 457 qui est aussi gentil qu'efficace dans son travail et Bernard Bosc en 459. Etant au CIME j'en profite pour remercier tout le personnel que j'ai côtoyé lorsque je donnais des TP et qui m'a toujours apporté l'aide dont j'avais besoin. J'en viens maintenant au bureau 440, le bureau le plus éloigné de la sortie, l'endroit où la clim inarrêtable permet d'attraper un rhum en été, le bureau carrelé, MON bureau. Mais bien plus que les murs ce sont ses occupants qui ont fait que j'ai passé d'inoubliables moments. Par ordre alphabétique on trouve :

- Claudio Buran, commissaire au transfert du savoir, « il professore », bref l'Italien en face de moi. Claudio grand merci à toi pour toutes ces démonstrations, scientifiques ou non, tes histoires de jeunesse à mourir de rire, tes cours d'Italien très efficaces et ludiques (je suis sûr que ça va me servir un jour ça), ta connaissance illimitée des simpsons ou de south park, dont les extraits ont égayé certains après-midi. Fini vite la rédac et je te souhaite le meilleur pour la suite, tu le mérites amplement.

- Fabien de Barros, le p'tit nouveau du bureau qu'on pourrait nommer commissaire aux relations industrielles. On ne se sera pas croisé très longtemps mais cela a suffi à te connaître et à t'apprécier. Je te souhaite bon courage pour ta thèse avec son lot d'aléas scientifiques et administratifs et surtout plein de bonheur pour très bientôt, tu vas voir que dormir va devenir un plaisir ;).

- Simon Hemour, commissaire à la communication, mon voisin de gauche, le demi-suisse, l'homme qui fait du SWIFT, qui a son écran à 90° parce que c'est plus pratique pour lire les pdf, l'expert CST, qui est au labo depuis autant de temps que moi, grâce à qui j'ai lu une lettre envoyée par un ministre (B. K, qui ceux qui aiment chercher) et qui m'a gentiment prêté quelque gigas pour stocker mes fichiers. Je t'ai connu en stage

lors de ton stage de maîtrise et à part les cheveux et une alliance, tu n'as pas beaucoup changé, toujours cette même passion et cet enthousiasme à déplacer des montagnes. Continue sur cette voie, et avec un peu de chance et beaucoup de travail tu finiras ministre (t'en a déjà l'emploi du temps). J'aurai beaucoup appris à tes côtés : c'est le russe qui vient de l'ukrainien (dont je connais quelques mots importants grâce à toi), le swift c'est l'avenir et je sais ce qu'est et à quoi sert un radiogoniomètre. Salue bien ta maman et passe le « pryvit » à ta femme à qui, je l'espère, tu dis souvent « ya te bé liou bliou ».

- Tuan Quang Nguyen : le joyeux vietnamien que Fabien a remplacé. Tu es rentré au pays des nems mais je ne t'oublierai pas, toi qui est avec moi le premier locataire du bureau 440, qui est monsieur carac SOI. Tu mérites vraiment ton titre de commissaire aux relations extérieures vu le nombre de visiteurs qui sont venus te voir. Tes « bobobobop » sont cultes et ton pot de thèse restera le meilleur exemple de ce que tes compatriotes peuvent faire de meilleur au niveau gastronomique. Prend bien soin de ta petite Loan et je prends un peu d'avance pour te dire « tchouk mouille name meui » pour le prochain nouvel an.

Je remercie toutes les personnes qui sont montés et qui ont trouvé l'entrée de notre bureau, les nombreux diplômés de visiteurs de la semaine prouvent que vous avez été nombreux. Je pense entre autres à nos champions, Khalil, le 1^{er}, « quatra quatra hier mèl el oued » comme tu dis, Thomas, le sportif à l'accent du sud, Loan, on sait enfin pourquoi tu es tant venue ;) et William, le poète sur Germanium. Je n'oublierai jamais ce festival du transistor, ces remises de diplômés immortalisées, ces parties de mini trivial poursuit chaque matin, ces parties de world challenge... bref le sheep'n bell spirit dans toute sa splendeur. Pour tout cela, je vous exprime ma plus profonde gratitude et je compte bien avoir de vos nouvelles de temps en temps.

Place maintenant au côté jardin. Les amis tout d'abord. Les instit' vendéens Pierre et Pauline, les vendéens expatriés Lény et Adeline et le visiteur annuel de l'Alpe du Grand Serre, Jacques. Mes racines plantées dans ma Vendée et qui ont grandi jusqu'ici. Simon, Caroline et leur grand Maxence, la petite famille Joly que nous prenons plaisir à rencontrer, Bettina et messieurs Teboul, Isard, et Lombard, les amis ERGIENS, les MAYAS, les ST, Christine du léti, Djérem et Carole, les épéistes du club Parmentier et tout ceux que j'oublie mais qui ont à leur façon contribué à faire que la vie en dehors du labo a été belle.

Et enfin la famille. Merci à mes parents pour leur soutien. Les belles sœurs et conjoints, Sidonie et Kévin, Sophie et Nico et le p'tit beau-frère Fred. Merci d'être là quand ça va et quand ça va pas, bref toujours. Je terminerai avec ma femme qui depuis cette soirée crêpes à Orsay a fait naître en moi le plus beau sentiment qui soit et qui continue aujourd'hui à faire vivre la flamme. Merci à toi pour faire de moi l'homme que je suis et pour me soutenir comme tu le fais. Depuis un an nous deux s'est transformé en nous trois avec l'arrivée de notre petite Loanne qui nous émerveille de jours en jours. Notre vie a beaucoup changé mais le cap est toujours le même, du bonheur et de l'amour.

Une toute dernière pensée pour le lecteur qui honore ce rapport de sa lecture...

TABLE DES MATIERES

Table des figures.....	1
Liste des tableaux.....	6
Introduction Générale.....	9
CHAPITRE I : Etat de l'art des réseaux de capteurs sans fil.....	15
1 Introduction	17
2 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil	18
2.1 <i>Actions.....</i>	<i>18</i>
2.2 <i>Domaines d'application</i>	<i>18</i>
2.2.1 Le domaine médical.....	19
2.2.2 Le domaine militaire	19
2.2.3 Le domaine environnemental	20
2.2.4 Environnements intelligents	20
2.2.5 Les transports.....	21
2.2.6 L'industrie.....	21
2.2.7 La sécurité	21
3 Historique, acteurs et produits.....	22
3.1 <i>Les premiers projets.....</i>	<i>22</i>
3.2 <i>Les travaux de l'université de Berkeley.....</i>	<i>24</i>
3.2.1 Le projet TinyOS	24
3.2.2 Le projet Calamari	25
3.2.3 L'expérience Great Duck Island	25
3.2.4 Le projet TinyDB.....	25
3.2.5 Le projet Pico-Radio	25
3.2.6 Le JLHlabs.....	26
3.3 <i>Les autres projets dans le monde</i>	<i>28</i>
3.3.1 Développement de plates-formes.....	28
3.3.2 Les transferts technologiques.....	41
3.3.3 Travaux sur les réseaux de capteurs sans fil.....	44
3.4 <i>Les acteurs et projets français</i>	<i>49</i>
4 Synthèse	51
5 Perspectives de travail	53
CHAPITRE II : Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs....	55

1	Introduction	57
2	Les réseaux d'antennes classiques.....	57
2.1	<i>Théorie des réseaux d'antennes.....</i>	<i>57</i>
2.1.1	Réseau linéaire 1D de dipôles.....	57
2.1.2	Réseau linéaire 1D de dipôles à phase différentes	59
2.1.3	Réseau linéaire 1D de dipôles à amplitudes différentes	60
2.1.4	Réseau linéaire à deux dimensions	62
2.1.5	Réseau aléatoire 1D de dipôles.....	64
2.2	<i>Antennes adaptatives</i>	<i>65</i>
3	Réseaux d'antennes non liées.....	66
3.1	<i>Principe.....</i>	<i>66</i>
3.2	<i>Comparaison avec un réseau classique</i>	<i>67</i>
3.3	<i>Scénarios d'application</i>	<i>67</i>
3.3.1	Premier scénario.....	67
3.3.2	Deuxième scénario	68
4	Traitement des scénarios	68
4.1	<i>Outils de simulation.....</i>	<i>68</i>
4.1.1	Matlab	68
4.1.2	CST microwave studio.....	69
4.1.3	EMPIRE Xcel.....	69
4.2	<i>Calibrage des outils de simulation</i>	<i>69</i>
4.3	<i>Le scénario 1</i>	<i>73</i>
4.3.1	Première solution	73
4.3.2	Deuxième solution.....	78
4.3.3	Conclusion sur le scénario 1	78
4.4	<i>Le scénario 2</i>	<i>79</i>
4.4.1	Code pour le scénario 2	79
4.4.2	Application du code	82
4.4.3	Application en conditions réelles.....	86
4.4.4	Solution plus simpliste.....	91
4.4.5	Conclusion sur le scénario 2	95
5	Conclusion du chapitre 2.....	95
Chapitre III : Conception d'antennes.....		99
1	Introduction	101
2	Paramètres fondamentaux des antennes	101

2.1	<i>Définitions</i>	101
2.1.1	Antenne isotrope	102
2.1.2	Puissance rayonnée.....	102
2.1.3	Gain d'une antenne	102
2.1.4	Directivité	102
2.1.5	Efficacité d'une antenne.....	103
2.1.6	Impédance d'une antenne	103
2.1.7	Largeur de bande	104
2.2	<i>Types d'antennes</i>	104
2.2.1	Antenne quart d'onde.....	104
2.2.2	Antenne dipolaire	104
2.2.3	Antenne boucle	104
2.2.4	Antenne parabolique.....	104
2.2.5	Antenne Yagi-Uda.....	105
2.2.6	Antenne hélice	105
2.2.7	Antenne patch	105
2.3	<i>Intégration des antennes</i>	105
3	Antennes dans les réseaux de capteurs	107
3.1	<i>Revue des antennes utilisées</i>	107
3.2	<i>Travaux spécifiques sur les antennes des plates-formes</i>	107
3.3	<i>Problématique</i>	109
4	Concept d'antennes-package	109
4.1	<i>Motivation</i>	109
4.2	<i>Design des antennes</i>	109
4.3	<i>Antenne « dé »</i>	110
4.3.1	Modélisation	110
4.3.2	Antenne finale	111
4.3.3	Simulations.....	112
4.3.4	Réalisation et mesures	113
4.3.5	Conclusion.....	115
4.4	<i>Antennes hémisphériques</i>	115
4.4.1	Description.....	115
4.4.2	Simulation	116
4.4.3	Conclusion.....	117
4.4.4	Autre design.....	117
4.4.5	Simulation	118
4.4.6	Conclusion.....	119
4.5	<i>Antennes cubiques</i>	120

4.5.1	Motivation.....	120
4.5.2	Description.....	120
4.5.3	Simulations.....	120
4.5.4	Réalisation et mesures.....	125
4.5.5	Optimisation.....	128
4.5.6	Deuxième optimisation.....	135
4.5.7	Conclusion.....	136
4.6	<i>Antenne demi-boule agile</i>	137
4.6.1	Concept.....	137
4.6.2	Conception.....	137
4.6.3	Simulations.....	139
4.6.4	Etude environnementale.....	146
4.6.5	Remplacement des ports discrets.....	146
4.6.6	Conclusion.....	155
5	Conclusion du chapitre 3.....	155
	Conclusion générale.....	159
1	Rappel des travaux et contributions.....	161
2	Perspectives et défis.....	163
2.1	<i>Les antennes.....</i>	163
2.2	<i>Matériaux.....</i>	164
2.3	<i>Partie communicante.....</i>	167
2.4	<i>Architecture des plates-formes.....</i>	168
	Communications Scientifiques.....	169
	Bibliographie.....	170
	Annexes.....	183

TABLE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

Fig. 0- 1 : Architecture globale d'un capteur sans fil	9
Fig. 0- 2 : Exemple de réseau structuré.....	10
Fig. 0- 3 : Exemple de réseau ad-hoc	10

CHAPITRE 1 :

Fig. 1- 1 : Capteur sans fil issu du projet WINS	22
Fig. 1- 2 : Golden dust: alimentation solaire, capteurs d'accélération et de lumière	23
Fig. 1- 3 : Daft Dust: alimentation par pile, 63mm ³	23
Fig. 1- 4 : Evolution des plates-formes pour réseau de capteurs sans fil de l'université de Berkeley.....	24
Fig. 1- 5 : Plate-forme du projet Pico-Radio.....	26
Fig. 1- 6 : Plate-forme SPEC : (a) Vue comparative, (b) Détail	27
Fig. 1- 7 : Plate-forme SPEC et tous ses composants externes	27
Fig. 1- 8 : μ AMPS-1	28
Fig. 1- 9 : Modules du μ AMPS-1 : (a) DSP, (b) Radio.....	28
Fig. 1- 10 : 1 ^{er} BTnode (a), 1 ^{ère} révision (b), dernière version (c)	30
Fig. 1- 11 : Smart-its sur plate-forme PIC avec tête RF à 868 MHz.....	31
Fig. 1- 12 : Cartes additionnelles d'un Smart-its : (a) Carte avec liaison série RS232, (b) Carte avec capteurs, (c) Carte de test pour entrée/sortie.	31
Fig. 1- 13 : Smart-its version 1.81.....	31
Fig. 1- 14 : Carte capteur Smart-its version 1.84.....	31
Fig. 1- 15 : Particle 2.29 (a), μ Part (b), cPart (c), zPart (d), Blueticle (e).....	33
Fig. 1- 16 : Imote 1	34
Fig. 1- 17 : Imote 2	34
Fig. 1- 18 : Plate-forme du projet EYES	35
Fig. 1- 19 : Accéléromètre MITes portable	36
Fig. 1- 20 : Carte mère (a), carte mesures ambiantes (b), carte mesure de distance (c) ...	37
Fig. 1- 21 : Carte tactile (a), unité de mesure inertielle (b), carte mémoire (c)	37
Fig. 1- 22 : Une des configurations possibles de MASS	39
Fig. 1- 23 : Plate-forme XYZ.....	39
Fig. 1- 24 : Plate-forme XYZ et le module « mobilité ».....	39
Fig. 1- 25 : Plate-forme SENTIO.....	40
Fig. 1- 26 : Vues de la plate-forme ECO	41
Fig. 1- 27 : Plate-forme Sentilla-mini	42
Fig. 1- 28 : Mica2DOT (a), Mica2 (b), MicaZ (c), IRIS (d)	43
Fig. 1- 29 : Telos B (a), Cricket (b)	44

Fig. 1- 30 : Accéléromètre, gyroscope, et sonde d'électromyogramme (EMG) (a), Capteur de pouls par oxymétrie pulsée (b)	47
Fig. 1- 31 : Plate-forme Pluto	48
Fig. 1- 32 : Plate-forme Shimmer d'Intel	48

CHAPITRE 2 :

Fig. 2- 1 : Configuration d'un réseau d'antennes	58
Fig. 2- 2 : Diagrammes de rayonnement d'un dipôle $L = \lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.) ..	59
Fig. 2- 3 : Diagrammes de rayonnement de 5 dipôles espacés de $d=\lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.).....	59
Fig. 2- 4 : Diagrammes de rayonnement de 5 dipôles avec $\varphi_N = (N-1).\pi/4$ (Plan H à g., plan E à dr.).....	60
Fig. 2- 5 : Diagrammes de rayonnement d'un réseau linéaire de 5 dipôles $L = \lambda/2$ avec des amplitudes différentes (Plan H à g., plan E à dr.)	61
Fig. 2- 6 : Réseau de 5 antennes avec distribution binomiale des amplitudes (a) et distribution optimale (b).....	62
Fig. 2- 7 : Exemple d'un réseau 2D de 30 antennes	62
Fig. 2- 8 : Diagramme de rayonnement d'un réseau de 30 antennes.....	63
Fig. 2- 9 : Réseau d'antennes planaires [Hal88].....	64
Fig. 2- 10 : Diagrammes de rayonnement d'un réseau aléatoire de 5 dipôles $L = \lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.).....	65
Fig. 2- 11 : Exemple de réseau d'antennes non liées.....	66
Fig. 2- 12 : Exemple de configuration du scénario 1	67
Fig. 2- 13 : Exemple de configuration du scénario 2	68
Fig. 2- 14 : Diagrammes de rayonnement d'un dipôle $L = \lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.) simulés sous CST	70
Fig. 2- 15 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 5 dipôles identiques (a) et à amplitudes différentes (b).....	70
Fig. 2- 16 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 5 dipôles à phases différentes	71
Fig. 2- 17 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 3 dipôles dans le vide (a) et avec réflecteur (b).....	71
Fig. 2- 18 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 3 dipôles à phase différentes avec réflecteur	72
Fig. 2- 19 : Facteur de réseau de 6 antennes (en dB).....	72
Fig. 2- 20 : 1 ^{ère} phase: émission des capteurs	74
Fig. 2- 21 : 2 ^{ème} phase: émission vers l'utilisateur.....	74
Fig. 2- 22 : Réseau d'antennes planaires pour l'émission vers l'utilisateur	75
Fig. 2- 23 : Réseau de 25 antennes et leur récepteur (à g.), amplitudes normalisées des antennes (à dr.)	76
Fig. 2- 24 : Phases des antennes (à g.) et diagramme de rayonnement en dB (à dr.)	77
Fig. 2- 25 : position du réseau et du récepteur (en haut à g.), phases des antennes (en haut à dr.), diagramme de rayonnement (en bas).....	77

Fig. 2- 26 : Phase d'émission des capteurs	78
Fig. 2- 27 : Répartition des antennes (à g.) et amplitude des antennes choisies (à dr.)....	82
Fig. 2- 28 : Phases des antennes choisies (à g.) et diagramme de rayonnement du réseau (à dr.)	82
Fig. 2- 29 : Facteur de réseau de 3 antennes pour différents x (d/λ).....	83
Fig. 2- 30 : Evolution de la longueur d'onde en fonction de la fréquence pour une antenne résonnante à $\lambda/2$ (zoom entre 1 et 20 GHz à dr.).....	84
Fig. 2- 31 : Nombre de réseaux créés et d'antennes constituant le plus grand pour une densité de 0,4 capteur /m ² à 0,433, 0,868 et 2,4 GHz.....	85
Fig. 2- 32 : Exemple de placement des capteurs dans un réseau	89
Fig. 2- 33 : Constitution des réseaux d'antennes	90
Fig. 2- 34 : Comparaison de la taille des réseaux (à g.) et choix du capteur MAITRE (à dr.)	90
Fig. 2- 35 : Récepteur au dessus de la structure (à g.) et à 45° (à dr.)	92
Fig. 2- 36 : Diagrammes pour 5 antennes	92
Fig. 2- 37 : Diagrammes pour 7 antennes	92
Fig. 2- 38 : Diagrammes pour 9 antennes	93
Fig. 2- 39 : Diagrammes pour 10 antennes	93
Fig. 2- 40 : Diagrammes pour 11 antennes	93
Fig. 2- 41 : Configuration à 10 antennes	94
Fig. 2- 42 : Exemple de structure.....	94

CHAPITRE 3 :

Fig. 3- 1 : Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope	102
Fig. 3- 2 : Exemple d'antenne sur boîtier [San06].....	106
Fig. 3- 3 : Antennes patch repliées de l'équipe de P. M. Mendes	108
Fig. 3- 4 : Antenne SPIDA directionnelle [Nil09].....	108
Fig. 3- 5 : Antenne monopôle et son adaptation.....	110
Fig. 3- 6 : Antenne monopôle modifiée et son adaptation.....	111
Fig. 3- 7 : Emplacement des capacités lors du pliage	111
Fig. 3- 8 : Antenne cubique (vue en perspective et de côté).....	111
Fig. 3- 9 : Paramètre S_{11} simulé sous CST pour l'antenne seule.....	112
Fig. 3- 10 : Diagrammes de rayonnement simulés pour l'antenne seule.....	112
Fig. 3- 11 : Paramètre S_{11} simulé sous CST pour l'antenne remplie.....	113
Fig. 3- 12 : Antenne cube réalisée	114
Fig. 3- 13 : Mesure de l'antenne seule	114
Fig. 3- 14 : Mesure de l'antenne avec polystyrène	114
Fig. 3- 15 : Antenne hémisphérique.....	115
Fig. 3- 16 : Paramètre S_{11} simulé sous CST	116
Fig. 3- 17 : Diagrammes de rayonnement dans le plan ZX (à g.) et ZY (à dr.).....	116
Fig. 3- 18 : Vue de l'antenne en perspective (à g. et au centre), et en coupe (à dr.)	117
Fig. 3- 19 : Connexion des lignes d'alimentation à la demi-sphère.....	117
Fig. 3- 20 : Paramètre S_{11} simulé sous CST	118

Fig. 3- 21 : Diagramme de rayonnement dans le plan XY	118
Fig. 3- 22 : Diagrammes de rayonnement des plans XZ (à g.) et XZ tourné de 45° (à dr.)	119
Fig. 3- 23 : Vue en 3D du diagramme de rayonnement	119
Fig. 3- 24 : Vue en perspective de l'antenne	120
Fig. 3- 25 : Paramètre S_{11} de l'antenne seule	121
Fig. 3- 26 : Répartition des courants dans l'antenne	121
Fig. 3- 27 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans	121
Fig. 3- 28 : Paramètre S_{11} de l'antenne pour différents sols.....	122
Fig. 3- 29 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans sur différents sols.....	123
Fig. 3- 30 : Cube métallique inséré dans l'antenne (vue en coupe à g.) et différentes dimensions du cube (à dr.).....	124
Fig. 3- 31 : Paramètre S_{11} simulé pour différentes dimensions du cube.....	125
Fig. 3- 32 : Antenne réalisée.....	126
Fig. 3- 33 : Comparaison du S_{11} entre simulation et mesure pour l'antenne seule.....	126
Fig. 3- 34 : Matérialisation des défauts dans l'antenne réalisée.....	127
Fig. 3- 35 : Comparaison du S_{11} entre simulation et mesure pour l'antenne sur métal .	127
Fig. 3- 36 : Comparaison des S_{11} entre l'antenne seule et sur métal	128
Fig. 3- 37 : Vue en coupe avec ajout époxy+pile (à dr.)	129
Fig. 3- 38 : Paramètre S_{11} après la 1 ^{ère} optimisation.....	129
Fig. 3- 39 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans après la 1 ^{ère} optimisation.....	130
Fig. 3- 40 : Paramètre S_{11} simulé pour différentes dimensions du cube	130
Fig. 3- 41 : Paramètre S_{11} simulé pour l'antenne avec époxy+pile	131
Fig. 3- 42 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans après ajout de l'époxy et de la pile	132
Fig. 3- 43 : Paramètre S_{11} de l'antenne avec composants pour différents sols	133
Fig. 3- 44 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans sur différents sols.....	134
Fig. 3- 45 : Paramètre S_{11} de l'antenne avec composants pour différents sols	135
Fig. 3- 46 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans sur différents sols.....	136
Fig. 3- 47 : Configuration à 3 dipôles alignés	138
Fig. 3- 48 : Configurations à 3 dipôles en cercle.....	138
Fig. 3- 49 : Configurations à 3 dipôles en cercle.....	139
Fig. 3- 50 : Vue de l'antenne en perspective et de dessus.....	139
Fig. 3- 51 : Paramètres variables des dipôles.....	140
Fig. 3- 52 : Valeur des paramètres après adaptation.....	140
Fig. 3- 53 : Coefficient de réflexion et couplage du port 1 avec les autres ports.....	141
Fig. 3- 54 : Diagrammes de rayonnement du dipôle 1 seul	141
Fig. 3- 55 : Diagrammes de rayonnement des quatre dipôles	142
Fig. 3- 56 : Répartition des courants avec quatre dipôles en phase	142
Fig. 3- 57 : Diagrammes dans le plan XY pour chaque combinaison	143
Fig. 3- 58 : Diagrammes dans les plans XZ et YZ de la combinaison A	143
Fig. 3- 59 : Diagrammes dans le plan XY pour chaque combinaison	144
Fig. 3- 60 : Diagrammes dans les plans $X+45^\circ Z$ et $Y+45^\circ Z$ de la combinaison F	144
Fig. 3- 61 : Diagramme dans le plan XZ de la combinaison I	145

Fig. 3- 62 : Paramètre S_{11} d'un dipôle de la structure sur différents sols.....	146
Fig. 3- 63 : Schéma du circuit pour deux ports simple.....	147
Fig. 3- 64 : Adaptation (en haut à g.), phases (en haut à dr.) et pertes d'insertion (en bas) dans le circuit pour deux ports simple.....	148
Fig. 3- 65 : Emplacement des ports sur le substrat époxy	148
Fig. 3- 66 : Schéma du circuit pour deux ports final.....	149
Fig. 3- 67 : Adaptation (en haut à g.), phases (en haut à dr.) et pertes d'insertion (en bas) dans le circuit pour deux ports final.....	149
Fig. 3- 68 : Layout du circuit déphaseur pour deux ports.....	150
Fig. 3- 69 : Symétries des ports sur le substrat époxy	150
Fig. 3- 70 : Schéma du circuit pour quatre ports simple.....	151
Fig. 3- 71 : Adaptations (à g.) et phase (à dr.) dans le circuit pour quatre ports simple	151
Fig. 3- 72 : Pertes d'insertion dans le circuit pour quatre ports simple.....	152
Fig. 3- 73 : Distances entre ports	152
Fig. 3- 74 : Schéma du circuit pour quatre ports final.....	153
Fig. 3- 75 : Adaptations (à g.) et phases (à dr.) dans le circuit pour quatre ports final ..	153
Fig. 3- 76 : Adaptations (à g.) et phases (à dr.) dans le circuit pour quatre ports final ..	154
Fig. 3- 77 : Layout du circuit déphaseur pour quatre ports.....	154

CONCLUSION GENERALE

Fig. 4- 1 : Banc de caractérisation de matériau	164
Fig. 4- 2 : Schéma de principe	165
Fig. 4- 3 : Schéma électrique équivalent d'une paire de connecteurs	165
Fig. 4- 4 : Eléments de base du schéma électrique équivalent (respectivement C et M).	165
Fig. 4- 5 : Oscillateur à double paire différentielle à 24 GHz.....	167
Fig. 4- 6 : Sortie différentielle de l'oscillateur avec une alimentation modulée	168

ANNEXES

Fig. A-1: Densité 0,6 capteur/m ²	196
Fig. A-2: Densité 0,8 capteur/m ²	196
Fig. A-3: Densité 1 capteur/m ²	197
Fig. A-4: Densité 1,2 capteurs/m ²	197
Fig. A-5: Densité 1,4 capteurs/m ²	198
Fig. A-6: Densité 1,6 capteurs/m ²	198
Fig. A-7: Densité 1,8 capteurs/m ²	199
Fig. A-8: Densité 2 capteurs/m ²	199

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 : Plates-formes de TecO.....	32
Tab. 2 : Intel motes	34
Tab. 3 : Capteurs pour MITes	36
Tab. 4 : Produits proposés par Crossbow.....	43
Tab. 5 : Entrées du code 1D.....	69
Tab. 6 : Tableau R	80
Tab. 7 : Tableau Ant_ok.....	80
Tab. 8 : Tableau Tab	81
Tab. 9 : Tableaux X, Y, AMP et PHA.....	81
Tab. 10 : Tableaux dist2, ecart et PHAfin	81
Tab. 11 : Résumé des propriétés pour chaque fréquence.....	86
Tab. 12 : Exemple d'échanges d'informations entre les capteurs de la fig. 2-32	89
Tab. 13 : Antennes utilisées dans les plateformes existantes	107
Tab. 14 : Fréquences et amplitudes des résonnances de l'antenne cubique sur des sols différents	123
Tab. 15 : Ouvertures, efficacité et gain sur différents sols.....	124
Tab. 16 : Résonnance et adaptation pour chaque dimension du cube	125
Tab. 17 : Dimensions de l'antenne optimisée	129
Tab. 18 : Caractéristiques des deux antennes.....	130
Tab. 19 : Résonnance et adaptation pour chaque dimension du cube	131
Tab. 20 : Dimensions de l'antenne avec époxy+pile.....	131
Tab. 21 : Caractéristiques des deux antennes.....	132
Tab. 22 : Fréquences et adaptation de l'antenne avec composants pour différents sols.....	133
Tab. 23 : Ouvertures, efficacités et gains sur différents sols.....	134
Tab. 24 : Fréquences et adaptation de l'antenne avec composants pour différents sols.....	135
Tab. 25 : Ouvertures, efficacités et gains sur différents sols.....	136
Tab. 26 : Combinaisons avec quatre ports.....	142
Tab. 27 : Ouvertures et gains de chaque plan/combinaison	143
Tab. 28 : Combinaisons avec deux ports (NA : Non Alimenté).....	144
Tab. 29 : Ouvertures et gains de chaque plan/combinaison	144
Tab. 30 : Combinaisons avec deux ports (NA : Non Alimenté).....	145
Tab. 31 : Fréquences et amplitude à la résonnance d'un dipôle sur différents sols.....	146

INTRODUCTION GENERALE

Qu'est-ce qu'un réseau de capteurs sansfil? Pour répondre à cette interrogation, il convient de se pencher sur les innovations de ces dernières années en matière de communications sans fil et de leurs applications dans la vie courante. En effet, les constants progrès réalisés en matière d'intégration de fonctions sur une même puce par l'industrie microélectronique et la définition de normes de communication telles que la 802.11 [IEE97], apparue en 1997 pour sa première version, et ses dérivées [IEE11], il est aujourd'hui envisageable de concevoir des systèmes communicants de petite taille. L'exemple le plus flagrant déjà existant est certainement celui des WPAN (Wireless Personal Area Network), littéralement «réseau sans fil personnel» qui, avec la norme Bluetooth [Blu08] développée à partir de 1994 par Ericsson, permet de connecter entre eux des appareils numériques tels que des PDA¹, ordinateurs portables, appareils photographiques, oreillettes...

En associant dans une même structure : un capteur qui mesure une grandeur dans son environnement, une partie logicielle qui met en forme les données du capteur et gère le fonctionnement global de cette structure, une source d'énergie pour alimenter le tout et une tête communicante, on obtient UN capteur sans fil (Fig. 0- 1) capable de transmettre des données vers un récepteur et ce, sans liaison physique avec celui-ci et de façon autonome en termes d'énergie. L'aspect autonome de ces systèmes leur permet de s'affranchir de la contrainte due aux fils, souvent difficile à mettre en œuvre et perturbatrice dans certains milieux, en utilisant un moyen de communication par voie aérienne.

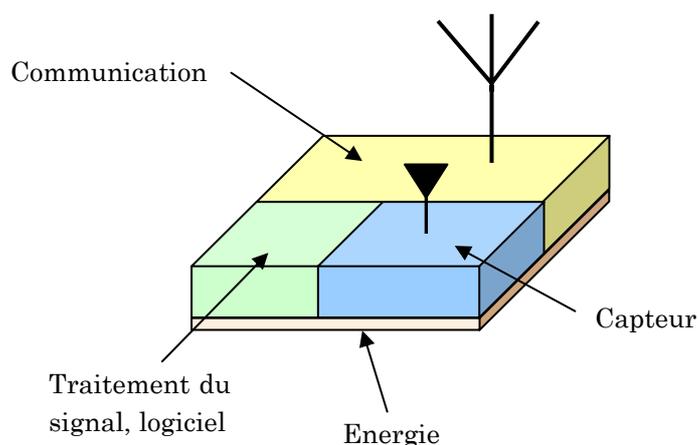


Fig. 0- 1 : Architecture globale d'un capteur sans fil

¹ Personal Digital Assistant

Maintenant, si en plus de la simple fonction récolte et émission de données, on ajoute celle de la communication entre capteurs, il est possible de créer un réseau de capteurs qui collecte puis fusionne les données d'un environnement complet. Cela ouvre alors la voie vers de multiples applications (voir Chapitre 1 §2.2). Dans un souci de facilité d'installation et de flexibilité mais surtout pour parer à l'éventuelle défaillance de l'un des capteurs, ces réseaux devront être ad-hoc². En effet, contrairement aux réseaux structurés où l'espace est divisé en cellules à l'intérieur desquelles une station gère toutes les communications (Fig. 0- 2) comme c'est le cas avec la téléphonie mobile, les réseaux ad-hoc se composent d'entités qui communiquent les unes avec les autres (Fig. 0- 3) et où une information peut transiter par des nœuds avant d'arriver à destination. Ce type de réseau implique que les nœuds en question puissent jouer plusieurs rôles différents au cours du temps, c'est-à-dire relayer une information, en être l'émetteur ou bien le destinataire.

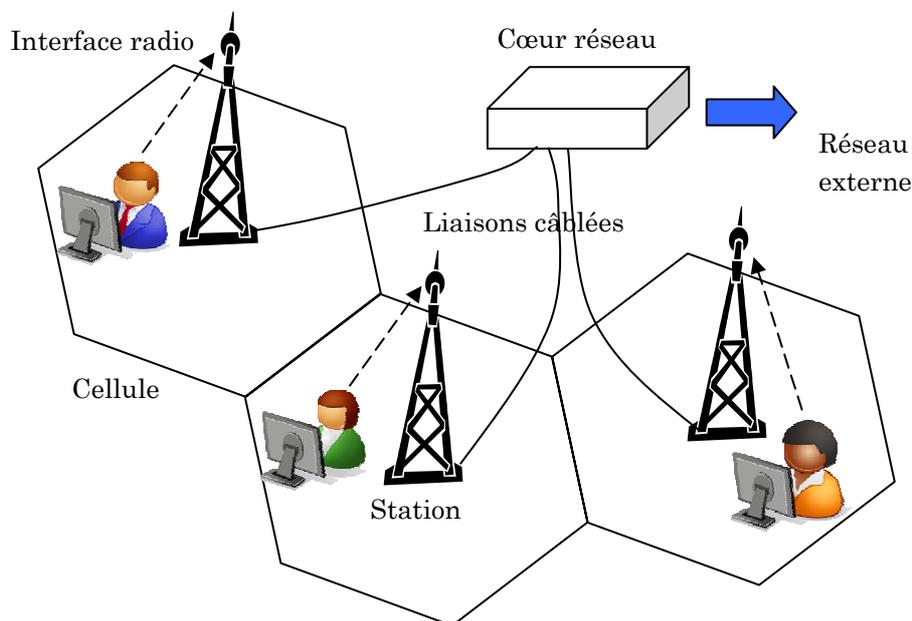


Fig. 0- 2 : Exemple de réseau structuré

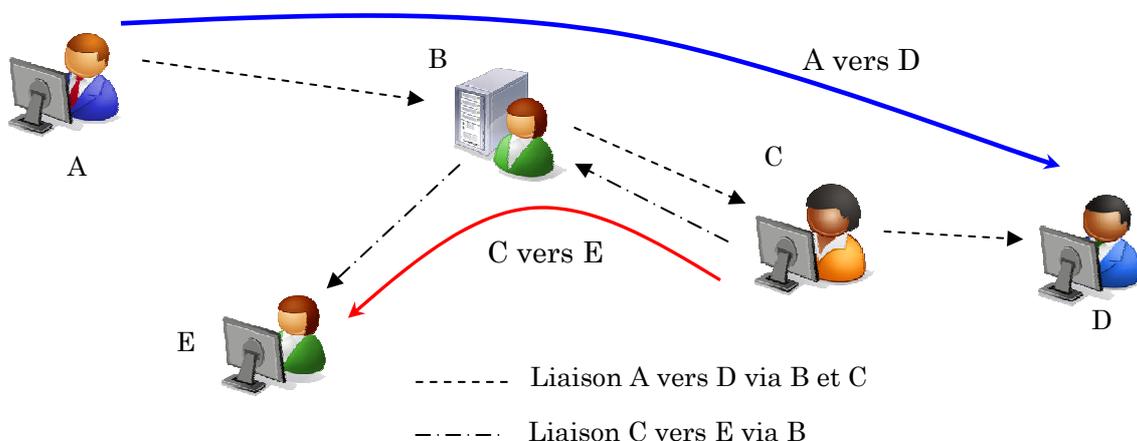


Fig. 0- 3 : Exemple de réseau ad-hoc

² En latin : « Qui va vers ce vers quoi il doit aller »

Cette dernière caractéristique complexifie énormément l'architecture d'un nœud car une sorte d'« intelligence réseau » doit lui être ajoutée pour parvenir à réaliser ces fonctions. Dès lors, un immense travail concernant la localisation des nœuds entre eux [Lor05, Pat05, Ram03, Sic04, Yed05], les protocoles de communication [Akk05, Hei02, Hoe04, Per05], le routage d'une information [Alk04, Sta06], la hiérarchisation des nœuds, la structure et l'adaptabilité du réseau [Lew04] a été et est en train d'être réalisé par le monde académique mais aussi industriel. Le professeur Bhaskar Krishnamachari qui dirige le « Autonomous Network Research Group » de l'université de Californie du Sud a réalisé une bibliographie très complète des travaux effectués dans tous les domaines impliqués dans les réseaux de capteurs sans fil³.

Ces réseaux, de par l'absence de tous câbles, obéissent à de fortes contraintes en matière de consommation d'énergie [Asa98]. En effet, les capacités des batteries intégrées actuelles ne permettent pas de les faire communiquer à outrance et nécessite donc une gestion draconienne de l'énergie, thématique très en vogue actuellement et porteuse économiquement. C'est ici que toute l'industrie « low power » entre en jeu avec des composants ayant des consommations très faibles en veille et limitées en fonctionnement normal. Seulement, même avec des composants à très basse consommation, le pari de faire fonctionner un réseau plusieurs années est loin d'être atteint. C'est pourquoi les nœuds de ces réseaux sont amenés à être « intelligents ». Intelligents à la fois dans la gestion de leur énergie en utilisant au strict minimum leur fonction communicante, la plus gourmande dans ce domaine, mais aussi intelligents ensemble en recherchant la solution la plus économe pour transmettre un message d'un endroit à un autre tout en gérant les éventuelles défaillances. Concrètement, le but recherché par les personnes travaillant sur les modules composant ces réseaux est qu'ils soient :

- assez intelligents pour pouvoir s'autogérer et s'adapter à leur environnement [Mis07],
- de petite taille et ergonomiques,
- simples à concevoir et produire,
- dotés d'une durée de vie la plus longue possible, et éventuellement,
- proposer une interface humaine (écran, clavier, ...),
- pouvoir être compatible avec d'autres réseaux existants tels qu'Internet ou le GSM⁴.

Tout ceci dans le respect des normes internationales en matière de télécommunications et d'environnement.

Cette thèse s'est déroulée sur le site Grenoblois de l'IMEP-LAHC et a été financée par la région Rhône-Alpes dans le cadre du cluster micro nano. Ce rapport va se décomposer en trois chapitres suivis d'une conclusion et d'une partie prospective.

³ Cette bibliographie est consultable sur <http://ceng.usc.edu/~anrg/SensorNetBib.html> (en ligne)

⁴ Global System for Mobile communications

Le premier chapitre va introduire les réseaux de capteurs en présentant leurs applications puis en listant chronologiquement leurs premières réalisations et les projets qui ont porté sur eux. Il se conclura par une synthèse point de départ à la suite des travaux.

Le second chapitre va s'intéresser à la possibilité de mettre les antennes de ces capteurs en réseau, afin d'orienter l'émission vers un récepteur visé et ainsi optimiser l'énergie consommée. Contrairement aux réseaux d'antennes classiques, ceux-ci seront constitués d'éléments placés aléatoirement non liés physiquement. Après une présentation de l'outil de simulation et sa comparaison avec des références commerciales, deux scénarios typiques d'applications seront présentés et développés. Une conclusion viendra émettre un avis sur le fait d'utiliser les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs.

Enfin, le troisième chapitre sera dédié à la conception d'antennes tentant de répondre aux problèmes des antennes utilisées jusqu'alors et mis en évidence dans une partie bibliographique. Plusieurs concepts de structures seront présentés et simulés afin d'appréhender leur comportement dans des situations susceptibles d'être rencontrées en réalité. Certaines seront l'objet de réalisations et de mesures.

Une conclusion générale permettra de faire une rétrospective des résultats et points marquants vus dans les différents chapitres. Elle sera suivie d'une partie dans laquelle seront proposées des pistes pour des travaux futurs.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Sommaire

CHAPITRE I : Etat de l'art des réseaux de capteurs sans fil.....	15
1 Introduction	17
2 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil	18
2.1 <i>Actions.....</i>	<i>18</i>
2.2 <i>Domaines d'application</i>	<i>18</i>
3 Historique, acteurs et produits.....	22
3.1 <i>Les premiers projets.....</i>	<i>22</i>
3.2 <i>Les travaux de l'université de Berkeley.....</i>	<i>24</i>
3.3 <i>Les autres projets dans le monde</i>	<i>28</i>
3.4 <i>Les acteurs et projets français</i>	<i>49</i>
4 Synthèse	51
5 Perspectives de travail	52

1 Introduction

En 1991, Mark Weiser, un scientifique du centre de recherche de la firme Xerox de Palo Alto aux Etats-Unis, a publié un article devenu célèbre [WEI 91] introduisant le concept d'*ubiquitous computing* (informatique omniprésente), plus généralement connu, aujourd'hui, sous le nom de *pervasive computing* (informatique diffuse). Ce concept désigne un type de système informatique innovant basé sur la collaboration d'« objets intelligents et communicants » déployés dans notre environnement de travail, de vie ou de loisir afin de leur apporter une compétence supplémentaire. Ces objets peuvent faire partie de notre quotidien tels que des appareils ménagers, vêtements, téléphone portable, etc. auxquels on a ajouté des fonctions de capture et de traitement d'information et de communication, ou bien, sous la forme de modules autonomes et communicants déployés dans des infrastructures ou des environnements. La notion de mobilité ou au contraire d'immobilité est présente dans ces deux cas et conditionnera la manière de fonctionner de ces objets entre eux.

C'est à partir de ces travaux, très relayés, que la notion de réseaux de capteurs sans fil est apparue et a commencé à être développée. Elle s'inscrit dans le contexte actuel qui a tendance à multiplier les objets porteurs de technologie dans notre environnement et à rendre ce dernier « sensible » à notre comportement. L'informatique, à ses débuts cantonnée aux ordinateurs, se décline maintenant sur des appareils portatifs là aussi en évolution. On est passé en peu de temps de l'ordinateur portable à l'assistant personnel numérique tenant dans la main mais où subsiste encore une interface homme-machine qui permet les échanges. L'informatique diffuse est révolutionnaire dans le sens où cette interface est « naturelle » et furtive. Ce dernier point est d'ailleurs sujet à des controverses plus ou moins fondées quant à l'utilisation de ces réseaux qui peuvent trouver des applications dans lesquelles des questions d'éthique peuvent apparaître.

Dans ce chapitre, nous allons voir les potentielles applications qui ont été imaginées pour ces réseaux ainsi que l'historique des réalisations à ce jour. Suivront un bilan de ces recherches et une réflexion sur les perspectives de travail à suivre dans le cadre de ce travail.

2 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

Dans cette partie nous allons recenser les différentes applications possibles pour les réseaux de capteurs sans fil. Voyons tout d'abord quels types d'actions peuvent réaliser de tels réseaux.

2.1 Actions

Il existe deux grandes actions réalisables avec UN capteur, communicant ou non. Ce sont la mesure de grandeurs physiques et la détection de phénomènes physiques. Par définition, un capteur recueille des données physiques provenant de l'environnement où il est placé, ceci, par le biais d'une réaction chimique (capteur de gaz ou d'éléments chimique), une action mécanique (capteur de pression à membrane) ou des propriétés de ses matériaux (capteur de température à thermocouple ou à résistance, capteur solaire), etc. Il est dès lors possible d'obtenir des informations sur l'ampleur d'un phénomène et sur son existence ou non. Enfin, avec PLUSIEURS capteurs, il est possible d'ajouter une fonction de localisation. C'est le cas par exemple, mais à une très grande échelle, des systèmes GPS⁵ et Galiléo qui consistent à localiser un nœud du réseau (le récepteur situé dans votre voiture) en se servant de quatre autres nœuds (les satellites en orbite). Le même principe est reportable à l'échelle des microsystèmes sur une zone plus restreinte. En couplant toutes ces actions, il est alors envisageable d'obtenir des informations sur des phénomènes et sur le lieu où ils se produisent. Cela ouvre la voie à de nombreuses applications que l'on va lister ci-après.

2.2 Domaines d'application

Avec le potentiel d'actions des réseaux de capteurs, ceux-ci font déjà l'objet de recherches intensives de par le monde. En relevant l'objet de ces recherches, on peut dégager plusieurs grands domaines qui demandent des spécificités différentes en termes de résistance au milieu, de durée de vie, de mode de dispersion, de nœuds nécessaires, de portée de communications, de débit des données, etc.

Voici une liste non exhaustive de ces domaines :

- le médical ;
- le militaire ;
- l'environnement ;
- les environnements « intelligents » ;
- les transports ;
- la sécurité ;
- l'industrie.

Voyons maintenant, pour chaque domaine, les applications exploitées et celles envisageables.

⁵ Global Positioning System

2.2.1 Le domaine médical

Le monde médical doit aujourd'hui faire face à plusieurs défis. Le premier est le vieillissement de la population dans les pays industrialisés. Couplé au manque de personnel pour s'en occuper, ce phénomène fait que ce domaine est très demandeur d'aide extérieure. De plus, beaucoup de personnes âgées, quand elles le peuvent, préfèrent rester à leur domicile plutôt que d'aller en centre gériatrique. Un suivi de ces personnes s'impose donc mais le problème du personnel et de sa disponibilité réapparaît dans ce cas. A cela s'ajoute le fait qu'il est plus difficile de s'enquérir de l'état de santé de quelqu'un lorsqu'il n'est pas surveillé en permanence.

Un deuxième défi est l'amélioration constante des techniques de soin et d'étude médicale. Le suivi médical est souvent perçu comme une contrainte ne serait-ce parce qu'il impose un déplacement dans un centre médicalisé. Il en est de même pour une étude médicale nécessitant que le patient conserve une vie normale. L'équipement nécessaire pour ce type d'étude est souvent lourd et gêne la personne étudiée. De nouvelles méthodes et de nouveaux outils s'imposent donc là aussi.

Enfin, un dernier point à améliorer est la rapidité d'intervention des secours lorsqu'un problème survient chez quelqu'un seul chez lui. La clef de voûte de ce processus est la détection même du problème qui, bien souvent, est réalisée dans un délai trop long et parfois fatal. C'est pour répondre à ces différentes problématiques que des applications pour les capteurs sans fil communicants ont déjà été proposées [Aky02, Asa98, Fon03, Hoy02, Jov01, Jov03, Jov05, Luk02, Vir02] :

- pour relever des données physiologiques (pouls, température, saturation en oxygène, humidité de la peau, respiration) sur des patients chez eux ou à l'hôpital permettant de réaliser un pré-diagnostic ou de faire un suivi ;
- pour permettre un suivi géographique des patients mais aussi du personnel médical au sein d'un hôpital ;
- pour faire le lien entre un patient chez lui, l'hôpital et les services ambulatoires ;
- afin de mettre en évidence un comportement (accéléromètre sur le patient pour justifier une accélération du rythme cardiaque, modification de la résistance de la peau en cas de stress) ;
- pour mesurer le taux de glucose dans le sang d'un diabétique ;
- pour capter les signaux nerveux et musculaires pendant une activité ;
- intégrés dans les vêtements, pour connaître la position d'un corps dans l'espace (position assise, debout, chute) grâce à des accéléromètres, magnétomètres et capteurs de lumière ;
- disposés à des endroits stratégiques dans une maison, pour surveiller l'activité ou l'inactivité d'une personne.

2.2.2 Le domaine militaire

Souvent, le domaine militaire est à l'origine des progrès dans le domaine civil, ceci pour des raisons politiques et financières, le marché militaire étant important encore aujourd'hui. C'est donc tout naturellement que les fonds de recherche alloués pour les premières recherches aux États-Unis sur les réseaux de capteurs sans fil l'ont été par des organisations de défense (voir §3.1). Les réseaux de capteurs sans fil présentent un

grand intérêt pour ce domaine soucieux de pouvoir opérer en minimisant les risques et donc les pertes humaines. De plus, la perte d'un capteur à bas coût faisant partie d'un réseau dense est moins préjudiciable que celle d'un capteur seul et onéreux.

L'autre intérêt concerne l'obtention de la supériorité stratégique. Les réseaux de capteurs vont être amenés à faire partie du système militaire C4ISRT (Command, Control, Communications, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, Targeting) Américain. Voici quelques applications touchant au domaine militaire et de la sécurité [Aky02, Asa98, Fli99, Fle02, Fon03] :

- gestion des troupes, de l'équipement et des munitions : en disposant des capteurs sur eux, il serait possible de connaître leur localisation, disponibilité, et état à tout moment ;
- reconnaissance sur le terrain : en déployant un réseau dense il est possible de connaître la topologie d'un terrain difficile, de servir d'éclaireur pour observer les activités de l'ennemi (détection de passage de véhicules par exemple) ;
- détection d'agents chimiques ou nucléaires à distance, évitant ainsi toute exposition humaine.

2.2.3 Le domaine environnemental

Dans le domaine de l'environnement, l'utilisation de réseaux de capteurs sans fil a permis ou va permettre des avancées en termes de minimisation de l'impact de l'homme sur l'environnement qu'il étudie, d'augmenter les temps d'étude et les données récoltées, d'améliorer la précision d'une mesure et enfin de mieux prévenir l'arrivée d'un phénomène naturel. Ainsi, on trouve les applications suivantes [Aky02, Fli99, Lun03, Mai02, So07, Wer05] :

- mesure de température, d'humidité, de pression et d'exposition lumineuse dans un lieu pour des applications météorologiques, agricoles, écologiques ou ethnologiques ;
- détection d'entités chimiques dans l'eau ou l'air afin de mettre en évidence une pollution ou pour un relevé qualitatif ;
- surveillance de la vie de petits animaux ;
- détection de feux de forêts : plus tôt le sinistre est détecté plus il sera facile et rapide à éteindre ;
- surveillance de volcans, glaciers ou autres structures naturelles « vivantes ».

2.2.4 Environnements intelligents

Rendre l'environnement dans lequel on se trouve à l'écoute et sensible à des événements puis agir en conséquence est une vision très répandue dans les œuvres de science fiction. Cette vision est en passe de devenir réelle grâce aux réseaux de capteurs sans fil. En effet, il est facile d'imaginer leur intégration dans notre quotidien et comment ils pourraient nous être utiles. En plus des applications médicales vues auparavant, on en retrouve d'autres telles que [Ago03, Aky02, Her00, Pet00, Vir02] :

- la mesure de température à plusieurs endroits dans une même pièce pour optimiser la climatisation ;
- détecter une présence ou non pour optimiser l'éclairage dans un souci d'économie d'énergie ;

- grâce à un système de localisation, dire à un utilisateur où aller chercher le document qu'il vient d'imprimer dans un bâtiment ;
- avec un système de reconnaissance personnel, activer ou non l'ouverture de portes ou l'utilisation d'appareils ;
- en intégrant un nœud du réseau dans le mobilier d'une pièce, il serait possible de savoir comment elle est meublée et si, en fonction du nombre de personnes prévues dedans, il faut augmenter ou diminuer le nombre de chaises par exemple.

Pour montrer tout le potentiel de ces applications, des scénarios sont présentés à la communauté scientifique mais aussi au public [Ho06] car ces applications sont celles qui le toucheront le plus et suscitent des craintes de sa part à cause des possibles dérives qui peuvent en découler.

2.2.5 Les transports

L'utilisation de capteurs dans les domaines des transports n'est pas nouvelle. Leur utilisation en réseau va permettre une centralisation des données et un traitement plus pointu. Ainsi la maintenance de véhicules [Asa98] est citée, la détection du passage de véhicules [Fli99] pour permettre de mieux surveiller le trafic. Enfin, des capteurs de pression sans fil pour le contrôle des pneumatiques ont été développés [Poh97, Sch00]. Dans ce domaine, c'est avant tout la sécurisation des moyens de transport qui est visée.

2.2.6 L'industrie

Le monde industriel, très demandeur de systèmes de contrôles performants, est sûrement un des domaines où les réseaux de capteurs sans fil seront les plus répandus. Au chapitre des applications on trouve [Asa98, Fle02, Fon03] :

- la maintenance des installations ;
- la localisation du personnel, des machines et des produits ;
- le contrôle des procédés ;
- le suivi des produits (provenance, chaîne du froid) ;

Dans ce domaine c'est l'amélioration de la fiabilité et de la qualité qui est visée, le tout à bas coût.

2.2.7 La sécurité

Au niveau de la sécurité, c'est surtout l'action de localisation qui va être mise en avant avec la localisation d'enfants, de pompiers ou de sauveteurs lors d'un incendie, d'animaux perdus, l'assistance en cas de grandes catastrophes [Asa98, Lor04]. Pour ce qui est de la sécurité de défense, des systèmes de reconnaissance et de suivi de personne pourront être utilisés dans des lieux sensibles.

On le voit donc, les applications sont nombreuses et permettent ou permettront des progrès notables dans beaucoup de domaines-clefs de l'économie mondiale. Comme il l'a été dit précédemment, à chaque application vont correspondre des spécificités techniques différentes. Cette constatation va influencer sur l'architecture même des nœuds du réseau. Enfin, l'aspect éthique de ces réseaux est un paramètre à prendre en compte quand on connaît les dérives possibles. La communication médiatique faite autour peut en effet

faire peur à des gens mal informées et une certaine méfiance vis-à-vis des nouvelles technologies est en train d'apparaître dans la population. Il est donc important de bien encadrer légalement ces réseaux et de surtout bien communiquer à leur sujet.

3 Historique, acteurs et produits

Intéressons-nous maintenant à l'histoire et aux acteurs présents dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil.

3.1 Les premiers projets

Les premiers travaux de réseaux de capteurs intégrés sans fil sont apparus, on l'a vu, au début des années 90 aux États-Unis grâce à l'émergence des communications sans fil et à l'intégration toujours plus grande de fonctions et de composants sur une même puce. Le premier projet qui, historiquement, a porté sur le développement des réseaux de capteurs sans fil est le projet WINS [Pot00] qui a commencé en 1993 à l'université de Californie à Los Angeles sous le nom « Low Power Wireless Integrated Microsensors ». Tourné vers des applications militaires, il a été financé par la DARPA⁶. Ce projet a porté sur les réseaux ad-hoc de capteurs sans fil avec une orientation vers les MEMS, le design de circuit et l'auto-organisation de réseaux. Ses applications touchaient aux domaines militaire et environnemental et utilisaient des fréquences non libres ce qui les rendait restrictives pour l'industrie. En 1996, le premier réseau de capteurs sans fil est déployé au cours d'un exercice militaire dans le désert et en 1997 un premier démonstrateur de système de communication RF à faible consommation est présenté. Le projet a pris fin en 1998 après avoir développé et démontré un système basse consommation comportant un capteur et une unité de traitement du signal. La figure 1-1 présente une réalisation du projet :



Fig. 1- 1 : Capteur sans fil issu du projet WINS

Un autre projet fait figure de pionnier dans le domaine, c'est le projet Smart Dust [Atw00]. Lui aussi financé par la DARPA, il a débuté en 1995 à l'université de Berkeley en Californie. L'expression « Smart Dust »⁷ a d'ailleurs été inventée par le professeur Kris Pister, le principal instigateur du projet. Le but était de créer des micro-capteurs à

⁶ Defense Advanced Research Projects Agency

⁷ Littéralement « Poussière intelligente »

faible coût que l'on peut mettre partout « Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter ». Le projet a pris fin en 2001 en ayant réalisé plusieurs systèmes de quelques dizaines de millimètres cubes comprenant un système de communication optique constitué d'une diode laser et d'un coin de cube pour l'émission ou la réception de données, une cellule solaire fournissant de l'énergie, différents capteurs, une partie analogique et numérique et une alimentation par pile dans certains cas (Fig. 1- 2 et Fig. 1- 3).



Fig. 1- 2 : Golden dust: alimentation solaire, capteurs d'accélération et de lumière

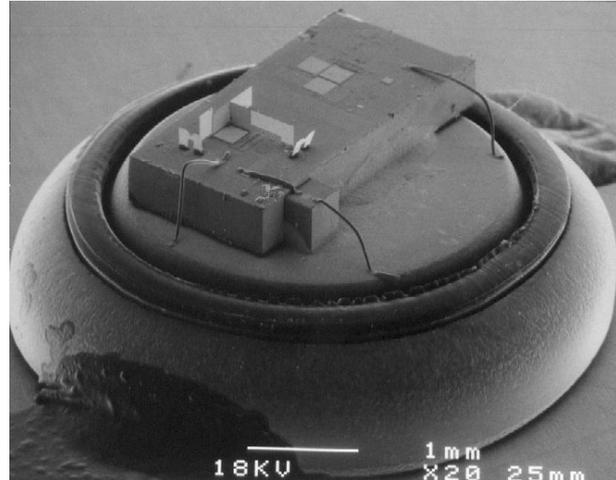


Fig. 1- 3 : Daft Dust: alimentation par pile, 63mm³

Le signal lumineux étant utilisé pour la communication, celle-ci doit se faire en liaison directe, ce qui est problématique pour beaucoup d'applications particulièrement les applications en intérieur. Cependant, le projet Smart Dust reste reconnu pour le dynamisme qu'il a insufflé à la recherche sur le domaine et pour avoir conçu le premier vrai capteur sans fil miniature presque assimilable à une poussière.

Smart Dust n'était en fait qu'une vitrine des travaux de l'université de Berkeley. En effet, parallèlement, des équipes de l'université ont développé des plates-formes plus grandes et plus complexes communiquant par radiofréquences et embarquant une partie logicielle. Différents projets ont permis d'améliorer au fil des années ces plates-formes présentées sur la figure 1-4 [Pol04] qui sont loin des Smart Dust vus auparavant mais qui sont aujourd'hui commercialisées par des entreprises créées pour la plupart par des personnes de Berkeley (voir §3.2.2). On voit clairement qu'entre 1998 et 2004, les efforts ont plus portés sur le débit des données et la consommation que sur la réduction des dimensions.

Plusieurs projets touchant à différents axes de développement ont démarré pendant et après Smart Dust, la suite va présenter leurs objectifs et réalisations.

Mote Type Year	<i>WeC</i> 1998	<i>René</i> 1999	<i>René 2</i> 2000	<i>Dot</i> 2000	<i>Mica</i> 2001	<i>Mica2Dot</i> 2002	<i>Mica 2</i> 2002	<i>Telos</i> 2004
								
Microcontroller								
Type	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128		TI MSP430	
Program memory (KB)	8		16		128		60	
RAM (KB)	0.5		1		4		2	
Active Power (mW)	15		15		8		33	
Sleep Power (μ W)	45		45		75		75	
Wakeup Time (μ s)	1000		36		180		180	
Nonvolatile storage								
Chip	24LC256			AT45DB041B			ST M24M01S	
Connection type	I ² C			SPI			I ² C	
Size (KB)	32			512			128	
Communication								
Radio	TR1000			TR1000		CC1000		CC2420
Data rate (kbps)	10			40		38.4		250
Modulation type	OOK			ASK		FSK		O-QPSK
Receive Power (mW)	9			12		29		38
Transmit Power at 0dBm (mW)	36			36		42		35
Power Consumption								
Minimum Operation (V)	2.7		2.7		2.7		1.8	
Total Active Power (mW)	24			27		44		89
Programming and Sensor Interface								
Expansion	none	51-pin	51-pin	none	51-pin	19-pin	51-pin	10-pin
Communication	IEEE 1284 (programming) and RS232 (requires additional hardware)							
Integrated Sensors	no	no	no	yes	no	no	no	yes

Fig. 1- 4 : Evolution des plates-formes pour réseau de capteurs sans fil de l'université de Berkeley

3.2 Les travaux de l'université de Berkeley

En 2001, quand le projet Smart Dust à pris fin, plusieurs autres projets ont été créés et regroupés sous le nom de NEST pour Network Embedded Systems Technology. En voici certains :

3.2.1 Le projet TinyOS

Développé à l'université de Berkeley en 2000, TinyOS [Tin05], littéralement « petit système d'exploitation », est spécialement dédié aux réseaux de capteurs et aux contraintes en termes de consommation, de dimensions et d'applications qu'ils impliquent. Ainsi, il gère l'activité du capteur, sa consommation en énergie et facilite la communication avec le réseau. Ecrit en nesC, un dialecte du langage C optimisé pour les applications nécessitant peu de mémoire, ce système d'exploitation est sans cesse en évolution car son code source est mis à disposition sur le site qui lui est consacré⁸. Intégré dans les plates-formes faites à l'université, il est aujourd'hui aussi utilisé par plus de 500 organismes et des projets l'utilisent pour créer des outils. On peut citer TOSSIM [Lev03], un simulateur de réseaux de capteurs et Maté [Lev02], une machine virtuelle.

⁸ <http://www.tinyos.net/>

3.2.2 Le projet Calamari

Le projet Calamari [Whi03] a porté sur le développement d'une méthode de localisation des capteurs entre eux basée sur la recherche des autres capteurs en utilisant les techniques de mesure par ultrasons avec un signal 25 KHz, une procédure de calibration utilisant un système de filtrage et un algorithme de localisation.

3.2.3 L'expérience Great Duck Island

L'expérience Great Duck Island [Mai02] qui a eu lieu du printemps à la fin 2002 consistait à déployer un réseau de capteurs sur l'île Great Duck dans le Maine aux États-Unis pour la surveillance de son écosystème et montrer la corrélation entre le climat et l'activité des oiseaux présents. Pour cela, divers paramètres météorologiques tels que la luminosité, la température et la pression ont été mesurés. Trente-deux capteurs de type Micamote (Fig. 1- 4), auxquels une carte « Weather » a été ajoutée, ont été utilisés. La communication avec les capteurs a été complètement réalisée par radiofréquences. Cette expérience, en plus de son utilité scientifique, a permis d'utiliser un réseau de capteurs en situation réelle et donc d'acquérir une expérience conséquente pour la suite.

3.2.4 Le projet TinyDB

Le projet TinyDB [Mad05], « petite base de données » est un système de traitement de requêtes pour extraire des informations d'un réseau de capteurs embarquant le TinyOS. L'extraction des données se fait via un algorithme optimisé en consommation d'énergie. Son but premier était de faciliter la programmation des capteurs en proposant une API⁹ Java.

3.2.5 Le projet Pico-Radio

A coté du projet NEST, un projet qui a débuté en 1999 a porté sur la création d'une interface unifiée pour les applications sans fil, c'est le projet Pico-radio¹⁰ [Rab00]. Dirigé par Jan Rabaey, le groupe a réalisé une telle interface appelée Sensor Network Service Platform. Le but était de faire abstraction du réseau de capteur pour le rendre transparent à la couche application. C'est une approche top-down allant du contrôle aux capteurs. Le groupe pico-radio a travaillé dans tous les secteurs du domaine des réseaux de capteurs sans fil : design RF, gestion de réseau, positionnement, design numérique basse tension, design d'antenne et design analogique basse puissance. Une collaboration interdisciplinaire a été utilisée pour rassembler les dispositifs MEMS, la dissipation d'énergie, le packaging avancé, la gestion avancée de réseau, la théorie des communications et la construction d'applications environnementales. Quatre sous-groupes ont constitué le projet :

1. Pico node3 : travail sur l'intégration d'un module complet dans un petit package incluant l'antenne, la partie radiofréquence, la partie protocole et application, les capteurs et l'alimentation. Le but ultime est la réalisation d'un processeur numérique intégré à très faible consommation ;

⁹ Application Programming Interface

¹⁰ http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Research/Pico_Radio/

2. PicoRadioRF : développement d'une liaison RF intelligente base consommation ;
3. Network : développement d'algorithme pour transmissions bas débit ;
4. Yields optimization : compensation des perturbations dues à l'environnement liées à la faiblesse des tensions utilisées ;

De leurs travaux, est sortie une plate-forme (Fig. 1- 5) complètement autonome énergétiquement grâce à des convertisseurs d'énergie solaire et vibrationnelle [Rou03]. Elle fonctionne en émission à 1,9 GHz et utilise un résonateur FBAR pour générer cette fréquence, ce qui réduit considérablement le nombre de composants nécessaires à la fonction émission.

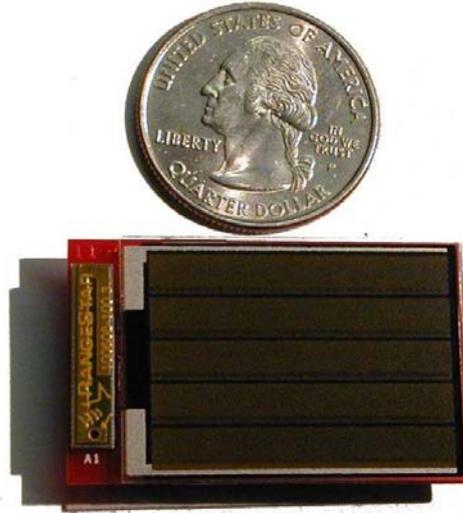


Fig. 1- 5 : Plate-forme du projet Pico-Radio

3.2.6 Le JLHlabs

Le laboratoire JLH a été fondé par Jason Lester Hill, docteur de l'université de Berkeley depuis 2003. C'est après avoir quitté l'université et cofondé Dust-network¹¹ (voir §3.3.2.1) qu'il a fondé le JLH. Ses travaux de thèse ont porté sur les architectures pour réseaux de capteurs sans fil et il fait partie de l'équipe ayant développé le TinyOS (voir §3.2.1). L'entité qu'il a créée travaille dans la continuité des recherches entreprises à Berkeley avec un souci de réduire toujours plus la taille des nœuds du réseau. Elle offre ses services de consultant pour l'industrie et s'implique dans l'amélioration du TinyOS. En 2003, une plate-forme a été développée et porte le nom de SPEC (Fig. 1- 6). SPEC mesure 2×2,5 mm² et a complètement rompu avec ses prédécesseurs en matière de dimensions notamment grâce aux travaux d'Al Molnar, un doctorant au département de génie électrique et informatique, qui a réalisé un transceiver-on-chip à 900 MHz consommant 2,5mW en émission et transmission combinées, communiquant à 20 kbps et tenant sur une puce de 1,6mm de côté en technologie 0,25µm [Mol04]. SPEC comporte un cœur RISC apparenté AVR, 3K de mémoire, un convertisseur analogique-numérique 8 bits « On-chip », un émetteur radio FSK, un système de mémoire paginée, des accélérateurs de protocoles de communication, un registre Windows, un oscillateur à 32KHz, une interface programmable SPI par lequel le TinyOS est installé, une liaison

¹¹ <http://www.dustnetworks.com/index.shtml>

RS232 compatible UART, des ports entrée et sortie de 4 bits, un support de communications cryptées, un synthétiseur de fréquences à base de PLL et une synchronisation de communication sur-échantillonnée. Seuls cinq composants physiques restent à ajouter :

- un oscillateur à 4 MHz;
- une inductance à 15nH ;
- un cristal à 32 KHz ;
- une source d'énergie ;
- une antenne.

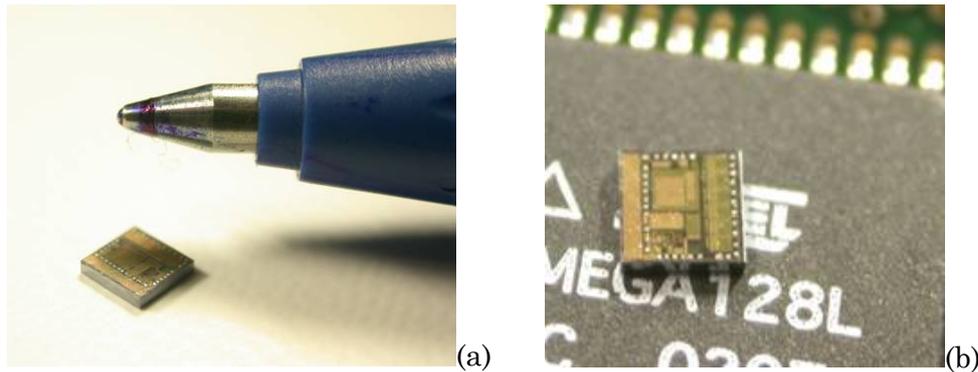


Fig. 1- 6 : Plate-forme SPEC : (a) Vue comparative, (b) Détail

La figure 1-7 montre la plate-forme complète lors des premiers essais de communication. On constate que l'antenne met un frein à l'intégration de toute la plate-forme. Cependant, SPEC reste à ce jour la plus petite plate-forme hors-antenne et hors alimentation existante.

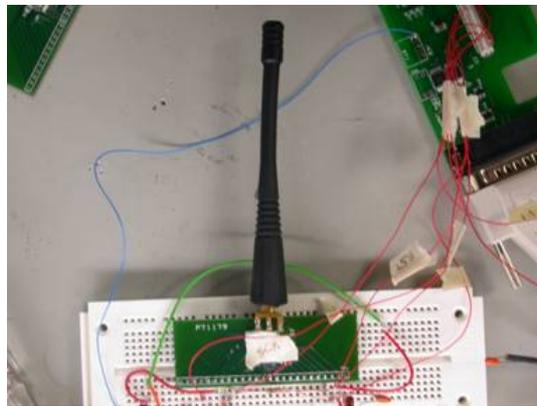


Fig. 1- 7 : Plate-forme SPEC et tous ses composants externes

On le voit donc, Berkeley est un haut lieu de la recherche sur les réseaux de capteurs sans fil. Ses travaux ont été les premiers à être transférés vers l'industrie et commercialisés (voir §3.3.2).

Intéressons-nous maintenant aux travaux réalisés ailleurs dans le monde, principalement aux États-Unis et en Europe.

3.3 Les autres projets dans le monde

Cette partie a pour but de dresser une liste qui ne se veut pas exhaustive des différents travaux menés dans le monde par différents laboratoires et universités. Nous distinguerons les projets dont le but est de développer ou commercialiser une plate-forme intégralement (§3.3.1 et §3.3.2) de ceux qui utilisent une plate-forme pour y intégrer des fonctions particulières ou en modifier certaines parties pour viser une application précise (§3.3.3).

3.3.1 Développement de plates-formes

3.3.1.1 μ AMPS

Le projet μ AMPS (Micro Adaptive Multi domain Power Aware Sensor)¹² a débuté en 1999 au Massachusetts Institute of Technology et semble avoir pris fin en 2006. Financés par la DARPA, les travaux de ce projet sont axés sur le conditionnement du signal et de l'énergie, la communication et la collaboration dans les réseaux de capteurs sans fil. Une solution programmable plutôt qu'un système spécifique à une fonction a été recherchée dans le but de faire un système économe en énergie et adaptable à plusieurs applications. Pour débiter et pour développer plus facilement une partie hardware répondant aux critères en termes de consommation, une plate-forme nommée μ AMPS-1 réalisée avec des composants du commerce a été réalisée (Fig. 1- 8).



Fig. 1- 8 : μ AMPS-1

Elle comportait des cartes correspondant aux différents modules étudiés. On retrouve un module DSP et un module radio (Fig. 1- 9).

Des techniques telles que le « Dynamic Voltage scaling » qui consiste à faire varier la tension d'alimentation en fonction des besoins ont pu être ainsi testées [Ca04, Cha99].

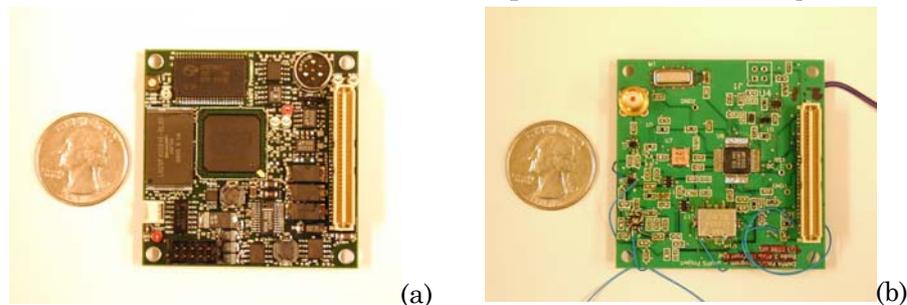


Fig. 1- 9 : Modules du μ AMPS-1 : (a) DSP, (b) Radio

¹² <http://mtlweb.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>,

Une deuxième plate-forme a alors été développée, μ AMPS-2, dans laquelle deux ASIC sont présents ; un pour le traitement numérique et l'autre pour la partie analogique RF. Des travaux sur de nouvelles architecture à faibles consommations ont été présentés, elles sont disponibles sur le site internet du projet.

3.3.1.2 BTnode

BTnode est une plate-forme sans fil autonome, émettrice seulement, développée conjointement à l'ETH de Zurich par le laboratoire de génie informatique et de réseaux et le groupe de recherche pour les systèmes distribués¹³. Basée sur le système Bluetooth et sur un microcontrôleur ATMEL, la plate-forme a subi deux révisions depuis ses débuts :

1^{er} BTnode : réalisé en quatre exemplaires, le premier prototype utilisait le module ROK101007 d'Ericsson et a permis de concevoir le logiciel d'émulation qui s'est avéré très souple d'utilisation et facile à déboguer pour les premières expériences (Fig. 1- 10a). C'est aussi le pré-prototype du projet Smart-its (voir §3.3.1.3).

1^{ère} révision : cette version est constituée de deux couches comportant, pour celle du bas, le microcontrôleur ATmega128 et la mémoire externe et, pour la couche supérieure le module Bluetooth ROK101008 d'Ericsson détachable (Fig. 1- 10b). Deux cents plates-formes de ce type ont été produites, principalement dans le cadre du projet Smart-its dont l'ETH fait partie. Elle a permis aussi de réaliser le premier réseau Bluetooth constitué de 40 nœuds.

2^{ème} révision : sur cette version commercialisée (Fig. 1- 10c), en plus d'un module Bluetooth Zeevo ZV4002, on trouve une tête RF Chipcon CC1000 opérant dans la bande ISM 433-915 MHz. La gestion de l'énergie a été optimisée. La tête RF étant la même que celle de la plate-forme Mica2 de Berkeley (Fig. 1- 4), ces systèmes ainsi que la première révision peuvent être utilisés dans le même réseau. Voici quelques caractéristiques de cette dernière version :

- Microcontrôleur Atmel ATmega 128L (8 MHz @ 8 MIPS) ;
- Mémoires : 64+180 Kb de RAM, 128 Kb de FLASH ROM et 4 Kb d'EEPROM;
- Scatternets avec maximum 4 Piconets/7 esclaves, compatible avec les deux premiers BTnote ;
- Interfaces externes/ ISP, UART, SPI, I2C, GPIO, ADC, Timer, 4 DELs ;
- Programmation en C, compatible TinyOS ;
- Alimentation par 2 piles AA;
- Dimensions 58,15×33 mm².

¹³ <http://www.btnode.ethz.ch/>

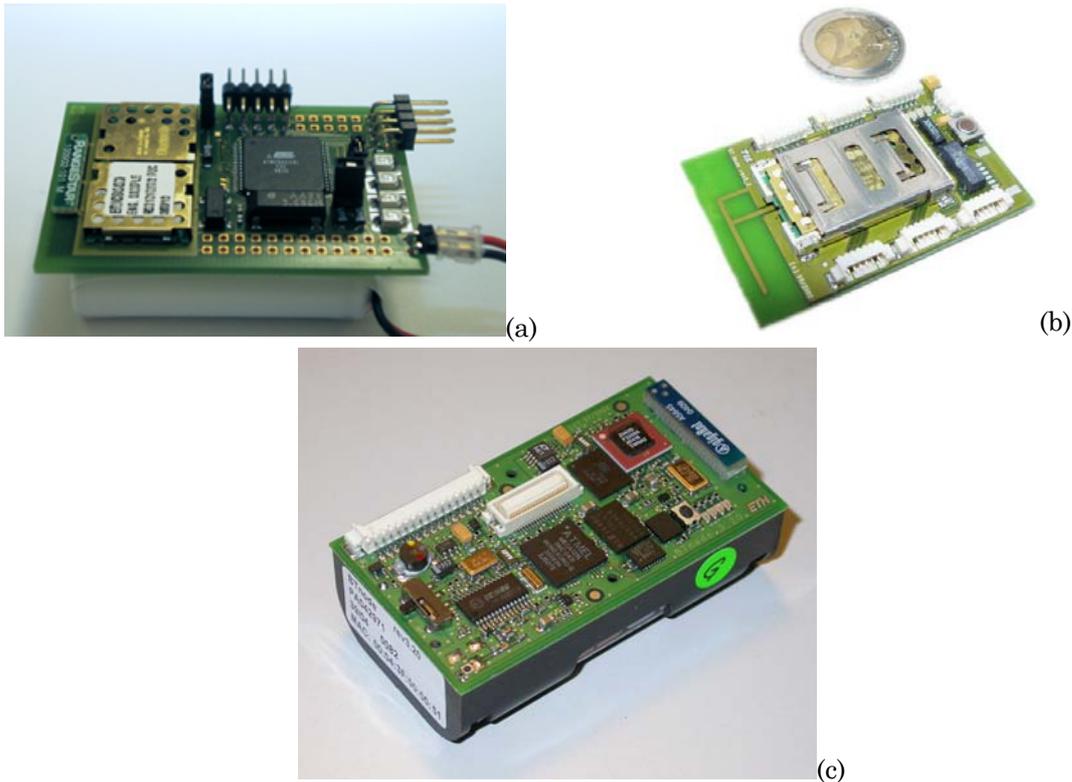


Fig. 1- 10 : 1^{er} BTnode (a), 1^{ère} révision (b), dernière version (c)

La première révision du BTnode a été très utilisée pour deux projets, NCCR MICS et Smart-Its, et la dernière version est actuellement impliquée dans la recherche sur « l'informatique omniprésente » et sur les réseaux. Une expérience concluante comprenant 70 BTnode en réseau a déjà été réalisée.

3.3.1.3 Projet Smart-Its

Issu d'une collaboration entre l'université de Lancaster en Angleterre, l'ETH de Zurich en Suisse, l'université de Karlsruhe en Allemagne, l'institut interactif de Suède et VTT electronics en Finlande, le projet Smart-its a débuté en 2001. Il a été financé en partie par l'union Européenne dans le cadre d'un projet fédérateur ; The disappearing computer ; et par le bureau fédéral suisse pour l'éducation et la science. L'objectif de ce projet était de créer des systèmes capables de rendre intelligents des objets du quotidien en les rendant sensibles à leur environnement et en communiquant avec d'autres objets. Les premiers prototypes de dispositifs étudiés l'ont été sur deux plates-formes de microcontrôleur différentes, Atmel et PIC. Le prototype réalisé sur la plate-forme d'Atmel était un BTnode (voir §3.3.1.2) et a permis l'intégration d'une tête communicante Bluetooth [Kas01] (Fig. 1- 10a), alors que la plate-forme PIC a été employée avec une communication RF à 868 MHz (Fig. 1- 11).

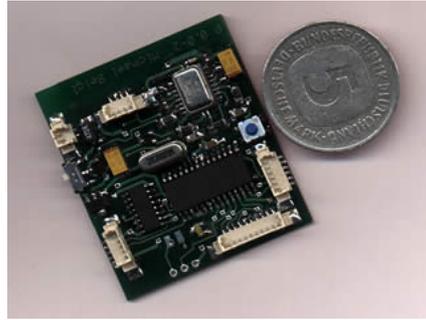


Fig. 1- 11 : Smart-its sur plate-forme PIC avec tête RF à 868 MHz

Sur la figure 1-11 le système comporte un PIC 16F876 fonctionnant à 20 MHz et une tête RF à 868 MHz permettant un débit à 128 kbit/s. Des capteurs y sont intégrés et une interface I2C permet d'ajouter des cartes additionnelles (Fig. 1- 12). En effet, l'architecture globale des dispositifs est modulaire de sorte que différentes cartes additionnelles peuvent être reliées à l'une ou l'autre des plates-formes. Enfin l'alimentation se fait avec une pile lithium de 3V.

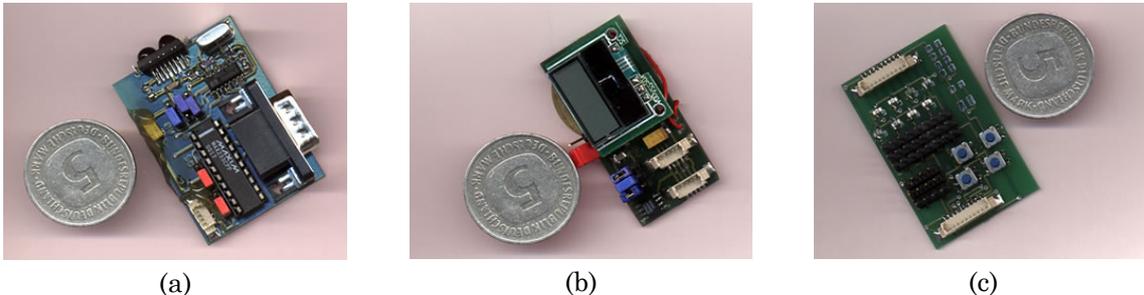


Fig. 1- 12 : Cartes additionnelles d'un Smart-its : (a) Carte avec liaison série RS232, (b) Carte avec capteurs, (c) Carte de test pour entrée/sortie.

En mars 2002, une deuxième version du Smart-its sur plate-forme PIC optimisée sort sous l'appellation Smart-Its P 1.0-1. Ses dimensions sont de 46×42 mm² hors antenne. La différence avec la première version est que celle-ci est programmable et debuggable avec un programmeur du commerce, l'encodage des données est optimisé pour la basse consommation et elle embarque un capteur et trois actuateurs.

Après plusieurs étapes d'intégration, d'ajout de mémoire et de modification des parties hardware et software, deux nouvelles versions de la plate-forme principale (version 1.81, Fig. 1- 13) et de la plate-forme capteurs (version 1.84, Fig. 1- 14) sont présentées en mai 2003. Elles font respectivement 15×25mm et 17×30 mm².

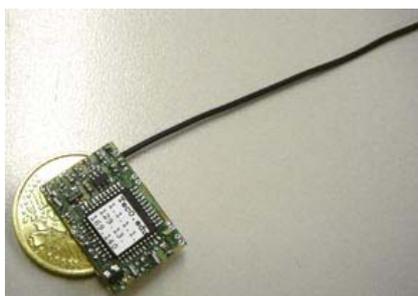
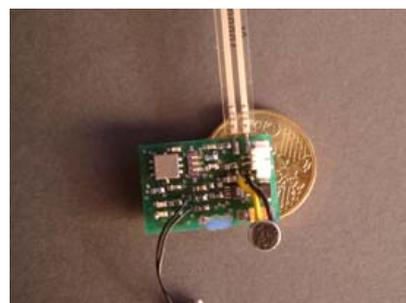


Fig. 1- 13 : Smart-its version 1.81



**Fig. 1- 14 : Carte capteur
Smart-its version 1.84**

Le progrès, en plus de l'intégration, vient du nouveau PIC 18F452 qui fonctionne à 20 MHz et comporte 32 kB de mémoire de programme et 1,5k de RAM. Le projet a pris fin et un transfert a été fait vers TecO qui a renommé la version 1.81 en « Particle » (voir paragraphe suivant).

3.3.1.4 Les μ Part de TecO

TecO est l'abréviation de Telecooperation Office. Cette entité a été fondée en 1993 à l'université de Karlsruhe en Allemagne pour faire de la recherche et développement dans la télématique appliquée en collaboration avec l'industrie. Le « calcul omniprésent », les réseaux, les interfaces hommes/machines et l'ambiance intelligente sont ses domaines de prédilection.

Dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil, TecO a poursuivi les travaux du projet Smart-its (§3.3.1.3) et a développé un « Particle Computer System »¹⁴ qui regroupe quatre classes de plates-formes :

- les plates-formes mères et communicantes ;
- les plates-formes additionnelles (capteurs, actuateurs...) ;
- les plates-formes d'interconnexion ;
- les plates-formes de développement.

Nous ne nous intéresserons qu'aux deux premières, les Particle faisant partie de la première. Le tableau suivant présente les différentes plates-formes développées par TecO avec quelques caractéristiques :

Plate-forme	Particle 2.29	μ Part	cPart	zPart	Blueticle
Figure	Fig. 1- 15a	Fig. 1- 15b	Fig. 1- 15c	Fig. 1- 15d	Fig. 1- 15e
Processeur	PIC 16F6720	PIC 12F675	CC1010	PIC 16F672	
Taille	45×18 mm ²	8×11 mm ²	22×16 mm ²	35×21 mm ²	60×38 mm ²
RAM	4K	64K	2K	4K	
RAM données	512K			512K	
Flash	128K	1,8K	32K	14K	
Radio	TR1001	intégrée		CC2420	Zeevo
Débit	125 Kbps	19,2 Kbps	76.8 ou 19.2 Kbps	250 Kbps	230 Kbps
Fréquences	868,35 MHz	868 MHz 315 MHz	868 MHz 915,315 MHz 315,433 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Modes	SSS ¹⁵ , RSSI ¹⁶	RSSI	SSS, RSSI, DES	SSS, RSSI	
Interfaces	Microphone 2 DEL	1 DEL	2 DEL	Microphone 2 DEL	
Capteurs	Mouvement			Mouvement	

Tab. 1 : Plates-formes de TecO

¹⁴ <http://particle.teco.edu/>

¹⁵ Sending Signal Strength

¹⁶ Received Signal Strength Indicator

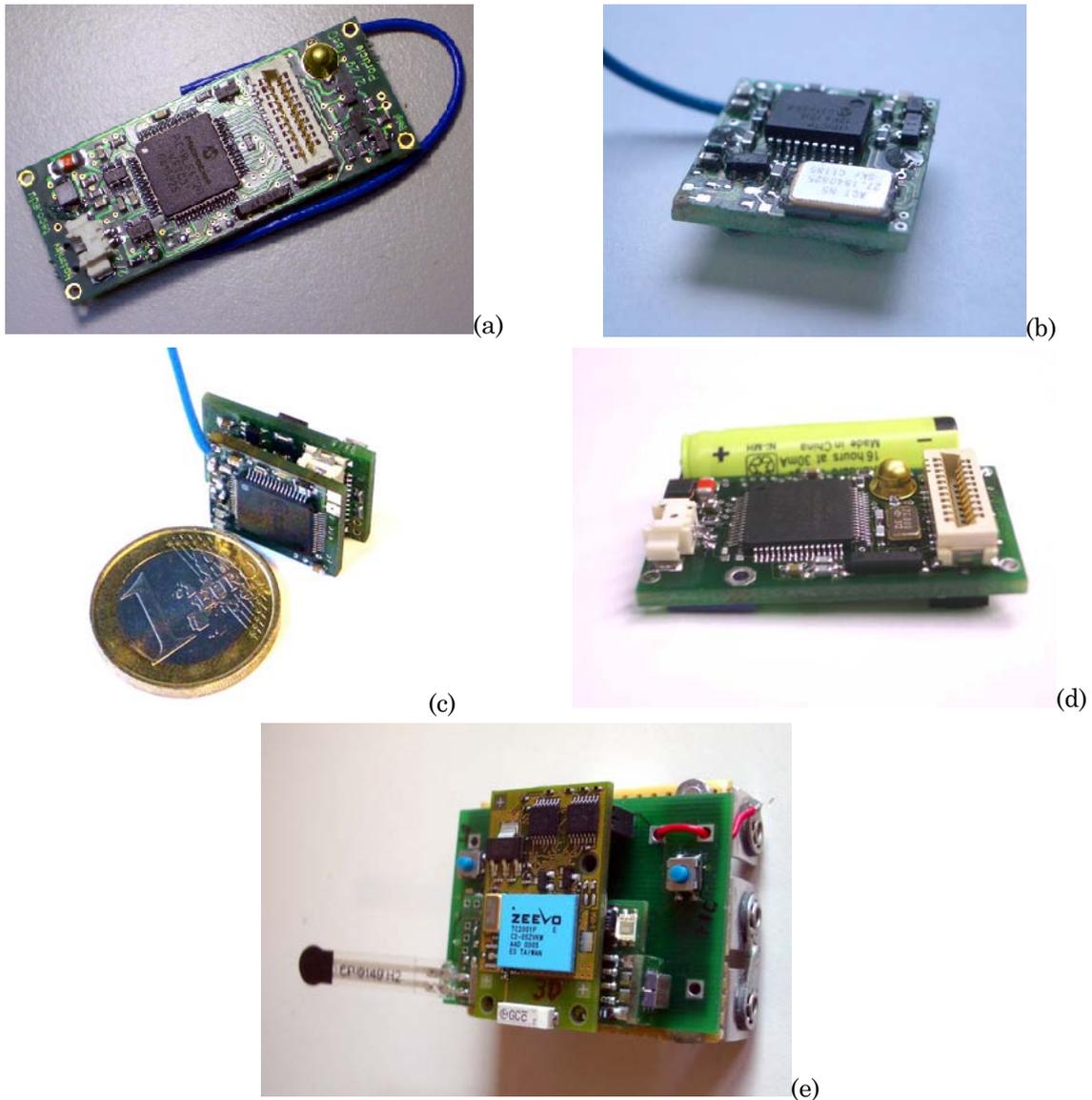


Fig. 1- 15 : Particle 2.29 (a), μ Part (b), cPart (c), zPart (d), Blueticle (e)

Pour chaque plate-forme, plusieurs types de batteries sont utilisables en fonction de l'application choisie. Les antennes sont de type filaire. Le produit-phare de TecO à l'heure actuelle est le μ Part, plate-forme regroupant à la fois intégration et bas coût [Bei05].

3.3.1.5 Intel mote

La société Intel s'intéresse aussi aux réseaux de capteurs sans fil et ce, depuis 2002. Partant du constat que les plates-formes de l'époque étaient « très limitées en ressources » et que ces limitations étaient dues à « des contraintes de coût, de consommation d'énergie et de taille », Intel a orienté ses recherches vers une augmentation des performances du processeur, de la capacité de mémoire et de la fiabilité de la partie radio [Kli05]. C'est ainsi que deux plates-formes ont été développées l'une après l'autre, Imote 1 (Fig. 1- 16) en 2003 et Imote 2 (Fig. 1- 17) en 2004. Imote 1 a été conçu avec des composants pris « sur l'étagère » alors que Imote 2 a nécessité des développements au niveau hardware et software. Les caractéristiques de chacune sont

présentées dans le tableau 2. Pour ce qui est des applications, Intel s'est clairement orienté vers le milieu industriel [Nac05].

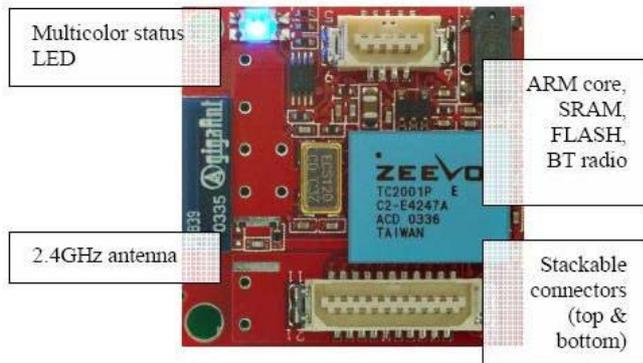


Fig. 1- 16 : Imote 1

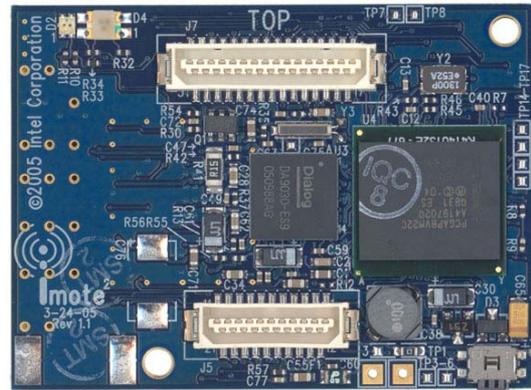


Fig. 1- 17 : Imote 2

	Imote 1 ¹⁷	Imote 2 ¹⁸
Unité de calcul	microcontrôleur Zeevo cœur ARM7TDMI à 12 MHz TinyOS	Intel PXA27x XScale 13 MHz en mode « éco » 100 MHz à 416 MHz par dynamic voltage scaling TinyOS ou Linux
Mémoire	64 KB de RAM 512 KB de Flash	256 KB de SRAM 32 MB de SDRAM
Radio	2,4 GHz Bluetooth 1.1 (portée 30m)	802.15.4 ¹⁹ (Zigbee) possibilité Bluetooth en plus
Interfaces	UART, USB, GPIO	UART, I ² C, SPI, USB
Dimensions	28×28×9 mm ³	48×36 mm ²
Autres	Connecteurs pour empilement	

Tab. 2 : Intel notes

Ces deux plates-formes sont en fait les composantes principales d'un empilement comprenant en plus une carte d'alimentation et une ou deux cartes capteurs.

3.3.1.6 EYES

EYES (Energy Efficient Sensor network)²⁰ est un projet financé par l'union Européenne qui s'est déroulé entre mars 2002 et février 2005. Les acteurs de ce projet étaient le centre de télématique et des technologies de l'information de l'université de Twente aux Pays-Bas, Nedap N.V. des Pays-Bas, le consortium national inter-universitaire pour les télécommunications Italien, l'université de Rome en Italie, l'université de Berlin en Allemagne, Alcatel CIT en France et Infineon en Autriche. Ce projet avait pour but de développer une architecture et une technologie pour créer un réseau de capteurs communicants en utilisant des nœuds intelligents et autonomes afin

¹⁷ <http://www.intel.com/research/downloads/imote-ds-101.pdf>

¹⁸ http://www.intel.com/research/downloads/imote_overview.pdf

¹⁹ Standard dédié aux WPAN (Wireless Personal Area Network) [IEE15]

²⁰ <http://www.eyes.eu.org/>

de réaliser une plate-forme adaptable à chaque application. Les travaux ont porté surtout sur l'aspect réseau avec une étude des protocoles, des algorithmes de localisation et de la sécurité. Une plate-forme a été développée (Fig. 1- 18) et toutes ses caractéristiques sont regroupées dans [Dul02]. Des travaux ont portés sur le développement d'un protocole MAC spécifique aux réseaux de capteurs [Hav04, Hoe04] et d'un banc de test et de vérification [Hoe03].

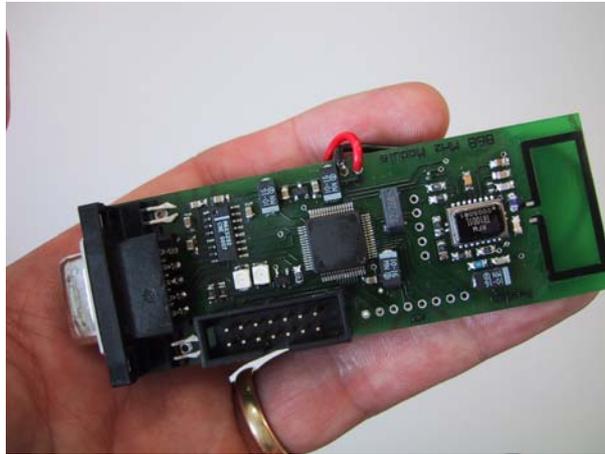


Fig. 1- 18 : Plate-forme du projet EYES

3.3.1.7 Les « MITes » du M.I.T

Parallèlement au projet μ AMPS, le M.I.T a développé une autre plate-forme destinée à détecter des mouvements de personnes ou d'objets dans un environnement. Cette plate-forme se nomme MITes pour M.I.T Environmental Sensors et vise les applications en intérieur [Mun06]. Un MITes est un capteur communicant de 8,1g, batterie incluse, mesurant $32 \times 25 \times 06 \text{ mm}^3$ qui capte des informations sur un environnement ou sur une personne pour ensuite les transmettre à une plate-forme de réception qui, après en avoir collecté plusieurs, peut alors les faire suivre vers un ordinateur, un téléphone ou autre via un port série ou USB²¹.

Les MITes (Fig. 1- 19) ont été conçues autour d'un transceiver nRF24E1 de Nordic VLSI Semiconducteurs [Tap04] qui intègre :

- un transceiver opérant à 2,4 GHz avec un débit de 1 Mbps et proposant 125 canaux d'émission et de réception pour des communications multicanaux, un mode de consommation réduite en émission (10,5 mA à -5dBm) et en réception (18 mA à 250 Kbps) ;
- un microcontrôleur fonctionnant à 16 MHz comprenant un convertisseur analogique/numérique de 12 bits à 9 entrées ;
- 3 timers, des interfaces série (UART et SPI), une modulation PW et 11 broches entrée/sortie.

En plus, 4K de mémoire programme externe EEPROM, des accéléromètres et un adaptateur 50Ω liant les entrées/sorties du nRF24E1 à une antenne microstrip sont inclus. Le tout est alimenté par une pile bouton CR2032. Le tableau 3 présente les six

²¹ <http://web.media.mit.edu/~emunguia/html/mites.htm> et <http://web.media.mit.edu/emunguia/miteswebsite/>

types de capteurs environnementaux nécessitant une faible bande passante disponibles avec la plate-forme ainsi que les cinq capteurs portables.

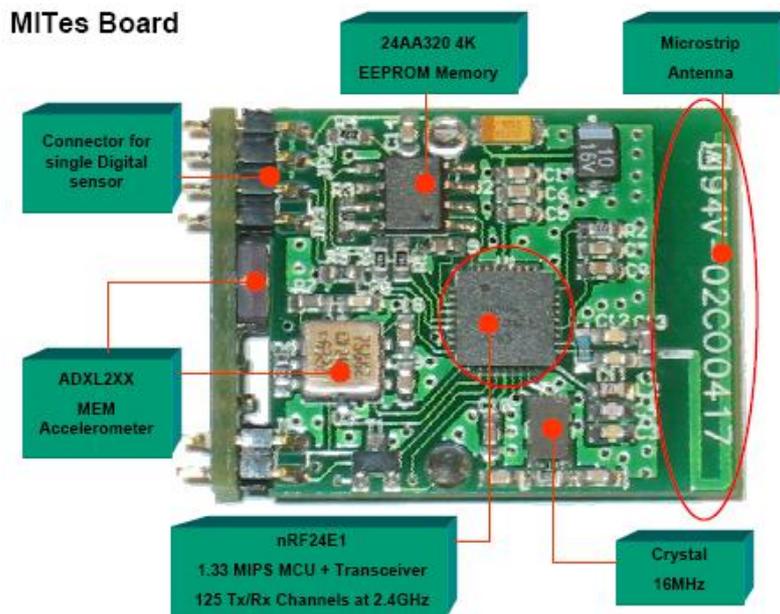


Fig. 1- 19 : Accéléromètre MITes portable

Capteurs environnementaux		
Mouvement (boule)	Lumière (conversion lumière/fréquence)	Proximité (capteur pyroélectrique)
détection d'utilisation d'objet (accéléromètre)	température	capteur de courant (conversion champ magnétique/tension)
Capteurs portatifs		
accélération du corps (accéléromètre)	bracelet RFID	radiation UV (photodiode)
pouls	Localisation (détection par atténuation du signal)	

Tab. 3 : Capteurs pour MITes

3.3.1.8 STACK

STACK [Ben05] est une plate-forme issue du groupe « Responsive Environments » du M.I.T. Ce groupe a privilégié la partie capteur à la mise en réseau et, dans un souci de rapidité et de simplicité, a développé une plate-forme modulaire, comme celle de Intel, composée d'une carte mère sur laquelle viennent s'empiler d'autres cartes ayant chacune une fonction précise. En plus de la carte mère, on trouve six cartes, elles vont être présentées ci-après. Toutes sont des carrés de 36 mm de côté (Fig. 1- 20 et Fig. 1- 21).

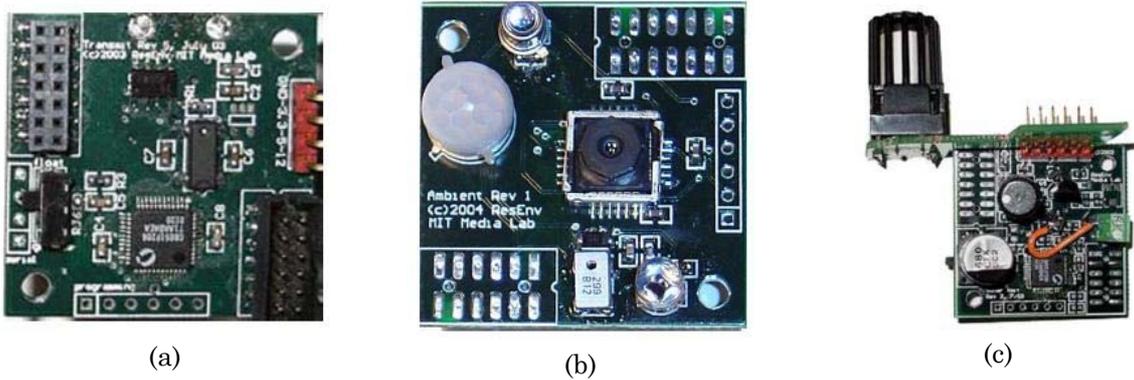


Fig. 1- 20 : Carte mère (a), carte mesures ambiantes (b), carte mesure de distance (c)

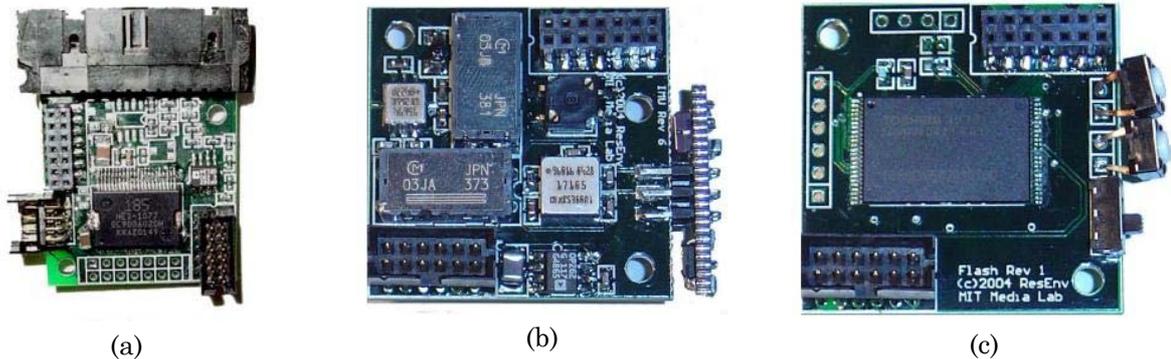


Fig. 1- 21 : Carte tactile (a), unité de mesure inertielle (b), carte mémoire (c)

- Carte mère : cette carte a pour fonction de collecter les données des autres cartes et de les transmettre à une station de base. Elle est composée d'un processeur C8051F2060 de Silicon Labs possédant un convertisseur analogique/numérique de 12 bits et d'un transceiver RFM TR1000 à 916 MHz fonctionnant à 115,2 KBps (Fig. 1- 20a). Elle consomme 35mW en mode de fonctionnement normal auxquels s'ajoutent 15mW lors d'une transmission.
- Carte de mesures ambiantes : ce module a pour but de capter le son et la lumière d'un environnement. Pour cela, deux phototransistors à cône large et cône étroit, un capteur pyroélectrique, une caméra VGA et un microphone sont présents (Fig. 1- 20b). La consommation est de 100mW, principalement due à la caméra.
- Carte mesure de distance : comme son nom l'indique, la fonction de cette carte est de mesurer une distance. Pour cela un sonar est utilisé. En transmission sur une carte (Fig. 1- 20c) et en réception sur une autre. Une mesure de temps de vol différentiel est possible grâce à une synchronisation avec la station de base. Ce module consomme 120mW lorsqu'il fait une mesure toutes les 20ms.
- Carte tactile : cette carte permet le branchement de capteurs tactiles ou de pression par le biais de trois ports différents (Fig. 1- 21a). Utilisée dans une application visant à étudier la marche d'un homme, elle consomme 65mW.
- Unité de mesure inertielle : cette carte permet de mesurer des accélérations grâce à trois accéléromètres disposés de façon à capter une accélération selon trois axes et des vitesses angulaires grâce à trois gyroscopes (Fig. 1- 21b). Cette combinaison permet une mesure sur six axes. Le tout consomme 65mW.

- Carte mémoire : cette carte sert à stocker des données. Une mémoire flash d'un gigabit, une connexion SPI pour l'écriture et RS232 pour la lecture la compose (Fig. 1- 21c). Sa consommation est de 40mW.
- Carte alimentation : cette carte se place sous la carte mère. Elle a pour but de réguler la puissance dans tout l'empilement. L'énergie provient d'une pile 9V. Cette architecture étant exclusivement dédiée à la récolte de données, la partie logicielle est très simple. En mode TDMA, la plate-forme ne répond qu'à une sollicitation de la station de base, elle est en mode veille le reste du temps. STACK a été utilisé dans deux applications, la première concerne l'étude de la marche dans le cadre médical. La plate-forme composée de la carte mère, de la carte tactile et de mesure à distance est accrochée au talon de la chaussure d'un patient et mesure différents paramètres de la marche utiles pour la rééducation et certaines pathologies du pied. L'autre application concerne l'entraînement à la pratique d'un instrument de musique. La plate-forme comprend, dans cette configuration, la carte tactile et l'unité de mesure inertielle. Le principe complet est expliqué dans [Ben05].

3.3.1.9 MASS

MASS (Modular Architecture for Sensor System) a été conçue pour « permettre le développement rapide d'une solution à une application spécifique » [Edm05]. Développée au Sandia National Lab à l'institut Embedded Reasoning, elle allie rapidité de développement et performance en termes de consommation, qualités normalement attribués aux plates-formes non dédiées à une application particulière pour la première et aux plates-formes très spécifiques pour la deuxième. Cela a été rendu possible grâce à une architecture modulaire qui permet de découpler le traitement des données de la gestion du réseau. L'architecture comporte quatre cartes :

- le module General Purpose Processeur qui réalise le traitement et la fusion des données,
- le module capteur,
- le module Wireless Network Connector qui gère la communication avec les autres nœuds du réseau,
- le module alimentation.

L'aspect distribué implique que les modules sont indépendants les uns des autres, ce qui ne nécessite pas de synchronisation de tout l'ensemble. Chaque carte possède un microcontrôleur Cygnal C8051F125 dans lequel un logiciel de contrôle est installé pour permettre de gérer les priorités entre chacune. Ce logiciel nécessite 32Kb de ROM et 7Kb de RAM. La figure 1-22 présente une configuration possible de la plate-forme.



Fig. 1- 22 : Une des configurations possibles de MASS

3.3.1.10 XYZ

XYZ [Lym05] est une plate-forme open-source développée à ENALAB (Embedded Networks and Applications Lab) à l'université de Yale aux États-Unis comme support pour la recherche sur les réseaux de capteurs mobiles. XYZ est développée autour d'un microprocesseur OKIML67Q500x ARM THUMB et d'un transceiver Chipcon CC2420 portant le standard IEEE 802.15.4 avec un débit de 250kbps (Fig. 1- 23). La particularité de cette configuration est qu'elle propose deux modes de veille différents dont le deuxième, celui éteignant le plus de fonctionnalités, permet de consommer très peu d'énergie (0,03 mA) sur une longue période. Il est aussi possible, pour économiser l'énergie, de diviser la fréquence du processeur de 57,6MHz par 2, 16 et 32. L'alimentation se fait par trois batteries Ni-MH 1,2V rechargeables. A la mémoire interne du processeur a été ajoutée une mémoire RAM de 2Mb mise hors tension en mode veille. La plate-forme comporte quatre sous-systèmes que sont l'alimentation, la partie communicante, la partie capteur comprenant des capteurs de lumière, un thermomètre et un accéléromètre et une partie « mobilité », implémentée sur une carte additionnelle, qui permet de déplacer la plate-forme le long d'un câble grâce à un petit moteur (Fig. 1- 24). Au niveau logiciel, XYZ embarque le système d'exploitation SOS²² développé pour les réseaux de capteurs sans fil à l'université de Los Angeles.



Fig. 1- 23 : Plate-forme XYZ



Fig. 1- 24 : Plate-forme XYZ et le module « mobilité »

²² <https://projects.nesl.ucla.edu/public/sos-2x/doc/>

3.3.1.11 SENTIO

SENTIO [Lin06] est une autre plate-forme modulaire développée dans le cadre du projet Sensible Things that Communicate de la Mid Sweden university. Ici l'accent a été mis sur le fait qu'une plate-forme flexible en termes d'application peut avoir de petites dimensions et un coût faible. Trois modules composent SENTIO et tous sont des circuits imprimés d'environ 30×40 mm² empilés et espacés entre eux de 5 mm (Fig. 1- 25) :

- le module processeur : ce module contient un microcontrôleur Atmel Atmega128 possédant 128K de mémoire flash programme, 4K de mémoire de données SRAM et 4K d'EEPROM non volatile. Le circuit imprimé peut accepter neuf types de microcontrôleurs différents sans aucune modification.
- le module communication : développé autour du transceiver Chipcon CC2420 le circuit imprimé de ce module fait 30×50 mm² de côté à cause de l'antenne intégrée placée de sorte à réduire les interférences avec les autres modules. Il peut être développé, selon les applications, pour trois standards de communication : IEEE 802.15.4, la RFID et la norme GSM/GPRS. Ce module possède une interface utilisateur constituée de quatre DEL et deux boutons poussoirs et doit donc toujours se situer au-dessus de la pile de modules.
- le module capteur : neuf modules capteurs ont été développés, chacun portant un capteur (température, humidité, lumière, accéléromètre, gyroscope, choc, magnétomètre, GPS). L'alimentation dépend de la configuration et du type de module, elle se fait par une source externe et est transmise aux modules via les pins des GPIO liant les modules entre eux. Le système d'exploitation utilisé est le Contiki OS développé dans le groupe Networked Embedded Systems au Swedish Institute of Computer Science [Dun04].

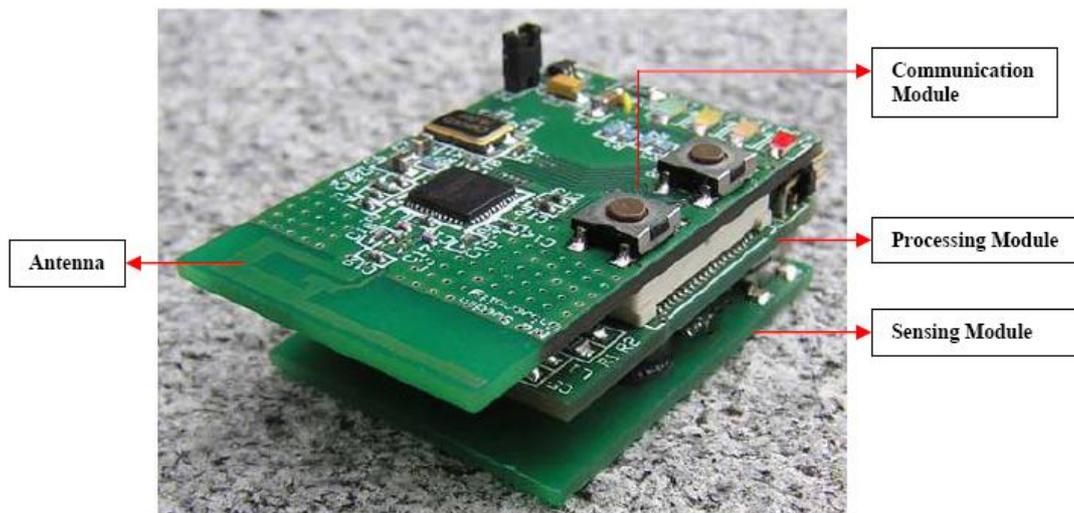


Fig. 1- 25 : Plate-forme SENTIO

3.3.1.12 ECO sensors

ECO [Eco06] est une plate-forme développée à l'université IRVINE de Californie au centre des systèmes informatiques embarqués. Avec des dimensions de 13×11×7 mm³ et un poids de 2 grammes, antenne et batterie comprises, c'est à l'heure actuelle la plus petite plate-forme de capteur sans fil au monde.

Tout comme les MITes du MIT (voir §3.3.1.7), ECO est développée autour d'un transceiver nRF24E1 et fonctionne donc à 2,4 GHz avec un débit de 1 Mbps. Un accéléromètre trois axes, un capteur de température ainsi qu'un capteur de lumière sont embarqués. L'alimentation se fait grâce à une batterie Lithium-Polymère rechargeable débitant 40mAh et une liaison physique avec l'extérieur se fait avec un circuit imprimé flexible permettant l'utilisation d'entrées/sorties analogiques ou digitales, de protocoles SPI, UART, et I2C. On retrouve ces différents composants sur la figure 1-26.

Au niveau de la consommation en énergie, elle est inférieure à 10mA en transmission (à 3.0V, 1Mbps, 0dBm), de 21mA en réception (à 3.0V, 1Mbps) et de 6 μ A au repos. Une plate-forme communique avec une station de base connectée par liaison USB à un ordinateur ou autre unité de traitement.

A l'origine, conçue pour surveiller les mouvements de bébés prématurés [Par05], la plate-forme ECO se décline aujourd'hui en caméra miniature [Par06] ou en électrocardiogramme portatif [Cho06].

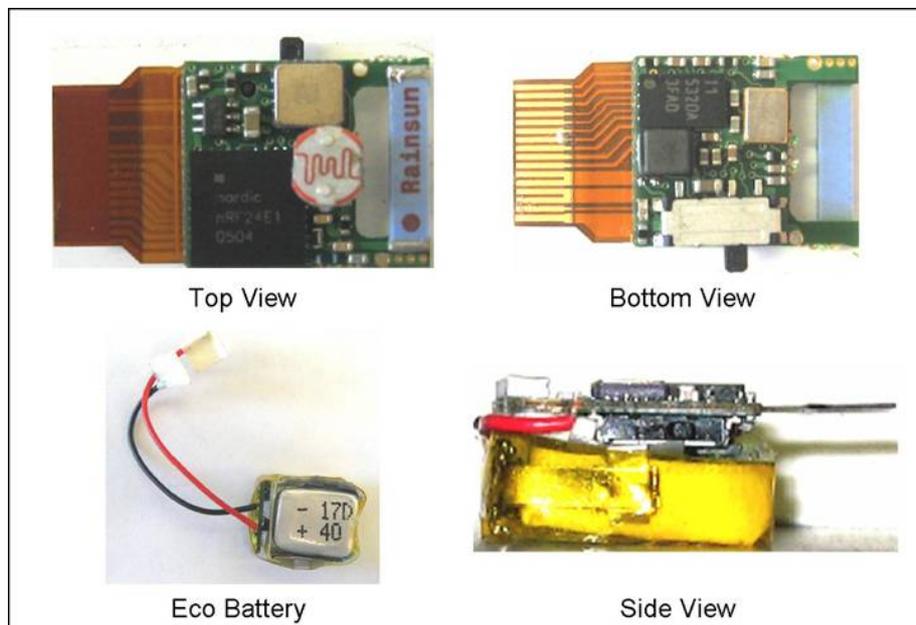


Fig. 1- 26 : Vues de la plate-forme ECO

3.3.2 Les transferts technologiques

Cette section présente les sociétés commercialisant des plates-formes issues des travaux vus précédemment.

3.3.2.1 DUST network

La société Dust Network [32] a été créée par Kris Pister, professeur à Berkeley, à l'origine du nom « Smart Dust ». Elle commercialise des plates-formes et des managers de réseaux. Deux fréquences sont utilisées : 916 MHz et 2,4 GHz pour des applications dans l'industrie. La société propose trois plates-formes :

- M1030 émettant à 916 MHz, portée 200m en extérieur, 80m en intérieur ;
- M2030 émettant à 2,4 GHz, portée 200m en extérieur, 25m en intérieur ;
- M2135 émettant à 2,4 GHz, avec une plus longue portée que le M2030, 400m en extérieur et 100m en intérieur.

Les dimensions de chacune sont identiques, 24,4×39,9×12,65 mm³. Une interface série standard permet de les connecter facilement à un capteur et à une batterie. Cette configuration, couplée à un protocole spécifique, le TSMP (Time Synchronised Mesh Protocole)²³[TSMP], permet une durée de vie de 5 à 10 ans en autonomie.

3.3.2.2 MoteIV/Sentilla

MoteIV Corporation a été fondé en 2003 par trois docteurs de l'université de Berkeley dont les thèses ont porté sur la robustesse et la mise en œuvre d'applications pour les réseaux de capteurs sans fil. Fin 2003, une plate-forme nommée Tmote Sky a été développée. Cette plate-forme est en fait la révision de la plate-forme Telos réalisée à Berkeley. En plus des caractéristiques visibles dans le tableau 3.4, il convient d'ajouter que Tmote Sky embarque trois capteurs ; d'humidité, de température et de lumière.

Fin 2007, la société a été renommée Sentilla²⁴ et a développé une plate-forme d'environ 25 mm de côté comprenant un microcontrôleur Texas Instruments MSP430 et un transceiver TI/Chipcon CC2420 dans laquelle peut fonctionner un petit logiciel Java. Cette plate-forme appelée Sentilla-mini (Fig. 1- 27) est une avancée considérable dans le monde du « pervasive computing » car elle propose des dimensions et une consommation d'énergie (<1µA en veille, 2 mA en fonctionnement, 19mA émission/réception) très intéressantes pour servir de base dans beaucoup d'applications. De plus l'introduction du Java associé à une gestion de la mémoire utilisant un dispositif d'échange permettant d'écrire et d'effacer du code à volonté permet à la plate-forme de gérer de grosses applications sans épuiser ses ressources en fonctionnement.

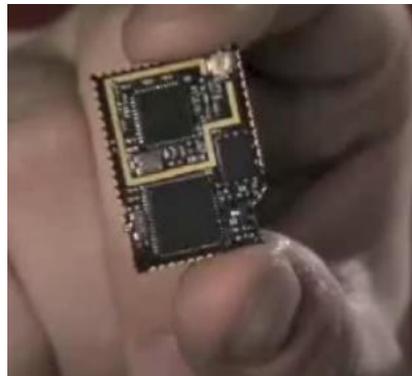


Fig. 1- 27 : Plate-forme Sentilla-mini

3.3.2.3 Crossbow

Crossbow²⁵ est une société dont les réseaux de capteurs sans fil sont une des spécialités. Elle s'appuie dans ce domaine sur l'expérience acquise à l'université de Berkeley dans ce domaine en commercialisant les « Mote » de celle-ci. On les retrouve avec leurs caractéristiques respectives dans le tableau 3.4.

²³ Protocole optimisant la consommation d'énergie en évitant de créer des collisions dans le réseau et limitant donc les tentatives de renvois de paquets. Une synchronisation entre les nœuds est nécessaire

²⁴ <http://www.sentilla.com/>

²⁵ <http://www.xbow.com>

Plate-forme	Mica2dot	Mica2	MicaZ	IRIS	Telos B	Cricket ²⁶
Figure	1-28a	1-28b	1-28c	1-28d	1-29a	1-29b
Taille	25×6 mm ²	58×32×7 mm ³			65×31×6 mm ³	Non disp.
Poids	3g	18g			23g	Non disp.
Fréquences	315,433 ou 916 MHz		2,4 GHz			433 MHz
Mémoire	512 KB				1024 KB	512 KB
Débit	38,4 Kbps		250 Kbps			512 Kbps
Puissance RF	-20 à +10 dBm		-24 à 0 dBm	3 dBm	-24 à 0 dBm	Non disp.
Portée (ext. Int.)	150 à 300 m		75 à 100 m 20 à 30 m	> 300 m <50 m	75 à 100 m 20 à 30 m	Non disp.
Interface	1 DEL	3 DEL		3 DEL, I2c, SPI	USB	Port série
Alimentation	3V pile plate	3V 2 piles AA		2,7 à 3,3 V	3V 2 piles AA	Non disp.

Tab. 4 : Produits proposés par Crossbow

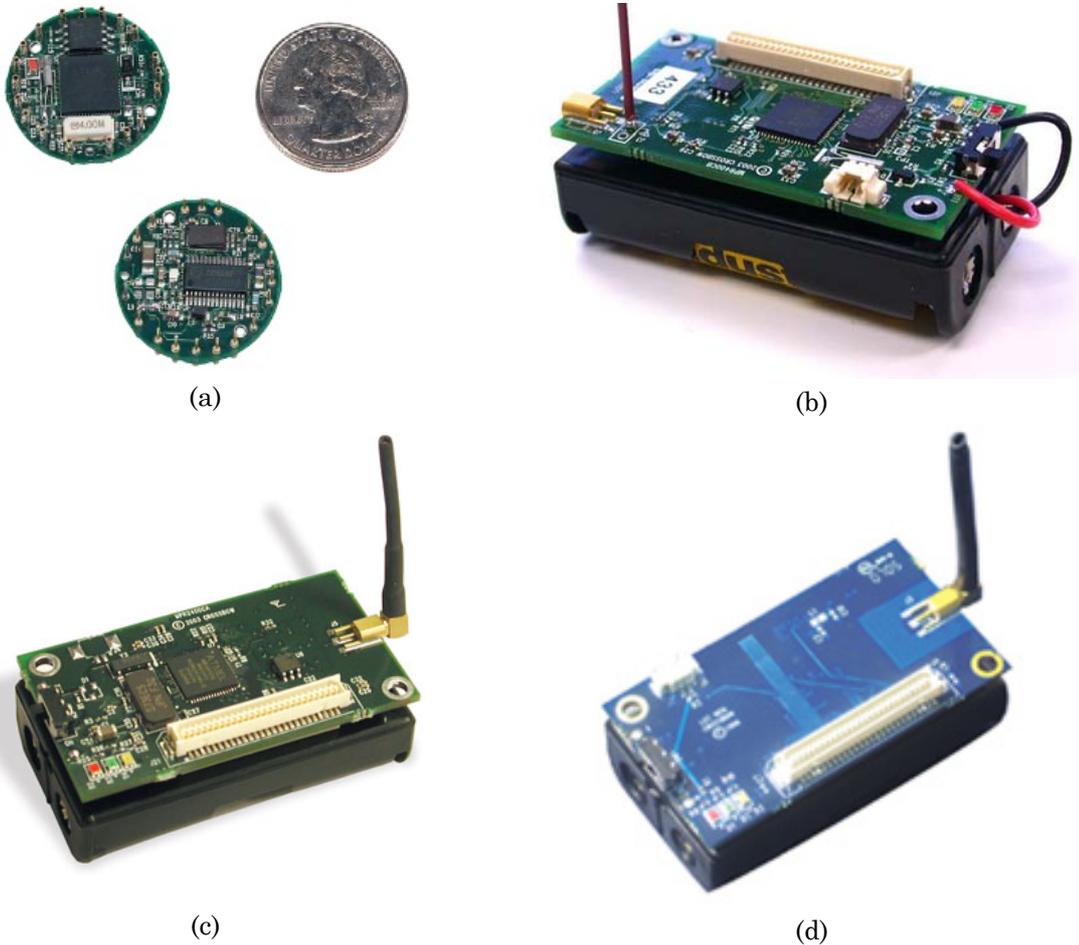


Fig. 1- 28 : Mica2DOT (a), Mica2 (b), MicaZ (c), IRIS (d)

²⁶ Cricket a été développé au M.I.T à partir d'une plate-forme Mica2 pour réaliser une fonction localisation grâce à des émetteurs et récepteurs à ultrasons



Fig. 1- 29 : Telos B (a), Cricket (b)

3.3.2.4 Les autres sociétés

D'autres sociétés commercialisent des modules pour réseaux de capteurs sans fil. On trouve notamment le japonais AR'S²⁸ qui, depuis 2001, propose des produits complets issus de la recherche académique et industrielle Japonaise. Le Japon est d'ailleurs aujourd'hui un acteur très dynamique au vu des rapports de l'ambassade de France sur le sujet [Baf08, Baf09]. Beaucoup d'autres, parmi lesquelles Microstrain²⁹, Pirelli, Smartire ou Motorola ne commercialisent que des capteurs communicants sans aucune notion de réseau.

3.3.3 Travaux sur les réseaux de capteurs sans fil

On ne va ici présenter que succinctement différents travaux portant sur les réseaux de capteurs sans fil, qui ont eu lieu ou qui sont encore en cours, avec leurs objectifs et réalisations. Ici aussi, la liste n'est pas exhaustive.

3.3.3.1 COUGAR

Le projet COUGAR a été lancé en 2000 à l'université Cornell de New York³⁰. Ce projet, comme le projet TinyDB (voir §3.2.4), a utilisé une approche « base de données » de la gestion des informations dans les réseaux de capteurs pour à la fois permettre une bonne flexibilité et une « scalabilité » de ceux-ci. L'objectif était d'établir une nouvelle couche distribuée de gestion des données qui s'adapte au nombre d'interconnexions entre capteurs et à la puissance informatique nécessaire. Le système s'applique directement sur les capteurs et rend abstrait un nœud de traitement sans centraliser de données et sans calcul. Sa conception a impliqué un nouveau travail de recherche dans le traitement de base de données, la gestion de réseau, les algorithmes, et les systèmes distribués. Ce système a été appliqué aux Mica mote de Berkeley.

3.3.3.2 Projet MobiHealth

Financé par l'union Européenne, ce projet a regroupé 14 acteurs académiques, industriels et du milieu hospitalier venant de cinq pays Européens que sont l'Espagne,

²⁸ <http://www.arsjp.com/>

²⁹ <http://www.microstrain.com/>

³⁰ <http://www.cs.cornell.edu/database/>

³² http://www.itiv.uni-karlsruhe.de/opencms/opencms/en/research/projects/mst_phm/

les Pays-Bas, la Suède, l'Allemagne et l'Angleterre. Il s'est déroulé d'avril 2002 à octobre 2003. L'objectif de ce projet était de permettre à des patients de conserver une certaine autonomie tout en étant surveillé médicalement. Pour rendre cela possible, des capteurs sont disposés sur les patients et communiquent leurs données par GPRS à un téléphone portable ou PDA. Ces derniers envoient ces données par UMTS à un centre qui les analyse et selon le résultat, soit un ordre est renvoyé par UMTS au portable et une action est commandée par GPRS à un actuateur, soit des services d'urgences sont prévenus. Capteurs et actuateurs représentent un BAN (Body Area Network). Le projet a été testé avec succès dans les cinq pays acteurs et pour plusieurs applications pour évaluer les performances du système GPRS-UMTS.

On peut aussi citer le projet « Personal Health Monitoring System » de l'université de Karlsruhe³² réalisé en collaboration avec des industriels et qui utilise le même système à la différence que les données peuvent être soit stockées dans une base de données consultable par le personnel médical ou directement à des services d'urgences.

Enfin le projet « Personal Health Assistant » du Wearable Computing Lab³³ de l'institut fédéral de technologie de Zurich en Suisse qui développe des concepts de capteurs incrustés dans les vêtements pour le domaine médical.

3.3.3.3 WiseNET

En 2002, le centre Suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM) a lancé le projet WiseNET³⁴ dont le but principal était de développer un réseau ad-hoc de capteurs sans fil très basse consommation. Pour cela, l'objectif a été de réaliser un transceiver à très basse consommation fonctionnant sous 1,5V pendant cinq ans. Pour parvenir à cet objectif, un travail a été fait sur le fonctionnement avec un très faible duty-cycle pour la partie radio combiné à un protocole MAC dédié à ce faible duty-cycle, WiseMAC[Elh04]. Tout ceci a été intégré sur une puce de 3,6×3,3 mm² (sans l'antenne ni batterie) en technologie 0,18 µm comprenant une partie radio émission/réception fonctionnant à 433 ou 868 MHz, une partie de gestion de l'énergie, une partie microcontrôleur, une partie mémoire et une partie analogique servant d'interface avec un capteur. Les performances de cette puce en termes de consommation sont de 1,8mW en réception et 31,5mW en émission. Toutes les caractéristiques et autres performances sont dans [Enz04].

3.3.3.4 ReWINS

Le Projet ReWINS (Reconfigurable Wireless Integrated Network Sensor)³⁵ est une collaboration entre l'université de Californie de Los Angeles et un consortium d'industriels (WINMEC) qui a débuté en 2003. En analysant des résultats des autres projets concernant les réseaux de capteurs, le constat était que ceux-ci s'étaient focalisés sur le développement d'interfaces pour les capteurs sans fil intelligents mais pas sur l'intégration de ceux-ci vers une application précise [Ram04]. Par-là même, il y avait beaucoup d'interfaces avec chacune une application mais pas d'interopérabilité entre

³³ <http://www.wearable.ethz.ch/>

³⁴ http://www.csem.ch/detailed/m_161_wisenet.htm

³⁵ <http://www.winmec.ucla.edu/rewins/>

elles. L'idée fut donc de réaliser un système pour rendre les différents réseaux de capteurs sans fil modulables et extensibles et de travailler avec des fréquences libres pour permettre à l'industrie d'aborder ces réseaux. Le résultat de ces travaux fut la réalisation d'un réseau de capteurs utilisant les protocoles bluetooth, Wi-Fi et RFID pour communiquer avec un « agrégateur » qui concentre les données et les envoie par Wi-Fi vers une unité de contrôle [Ram05]. Un système complet de gestion de ces capteurs permet d'atteindre la flexibilité recherchée.

3.3.3.5 NIMS

Lancé en 2003 à l'université de Californie à Los Angeles, le projet NIMS (Networked Infomechanical Systems)³⁶ a pris la suite du projet WINS (voir §3.1). NIMS est à l'origine d'une technologie qui combine l'aspect calcul distribué à l'action mécanique pour permettre aux systèmes de prendre en compte leurs incertitudes de mesures. Ceci est rendu possible en réalisant une cartographie spatio-temporelle de l'environnement et de la propagation des signaux et en exploitant cela pour ajuster la position, la perspective, la densité et le type des capteurs afin de réduire l'incertitude de mesure. En pratique, ce système a été utilisé pour surveiller une forêt aux Etats-Unis et était composé de capteurs mobiles et statiques. Les capteurs mobiles se déplaçaient horizontalement sur des câbles fixés aux arbres et communiquaient avec les capteurs statiques situés au sol. En plus de cela, un capteur mobile descendait à la verticale du capteur statique pour prendre une mesure.

3.3.3.6 MoteTrack

Le projet MoteTrack a débuté en 2004 à l'Université de Harvard³⁷. Le but de ce projet était d'avoir une « approche robuste et décentralisée de la localisation RF ». Pour cela, l'équipe du projet a utilisé les systèmes existants tels que les Mica mote de Berkeley sur lesquels une partie logicielle permettant leur localisation par mesure d'intensité du signal a été implémentée dans le TinyOS [Lor05]. Une interface logicielle permet de situer les émetteurs sur un site et de garder des données en mémoire. Le code source du logiciel est disponible sur le site de l'université.

3.3.3.7 RUNES

Le projet RUNES³⁸ fait partie du 6^{ème} plan cadre européen et a débuté en septembre 2004 pour une durée de 32 mois. C'est le premier projet majeur portant sur les réseaux de capteurs sans fil en Europe. Ses membres proviennent du monde académique et industriel de neuf pays différents que sont l'Australie, le Canada, l'Allemagne, la Grèce, l'Italie, la Hongrie, la Suède, le Royaume-Uni et les Etats-Unis. L'objectif premier du projet était la création d'un réseau de capteurs hétérogènes à très grande échelle pouvant s'adapter à leur environnement et interopérer entre eux. Pour cela, une infrastructure normalisée a été nécessaire afin de favoriser une large utilisation des systèmes embarqués en réseau. Dans ce but, le projet a cherché à

³⁶ <http://research.cens.ucla.edu/areas/2005/NIMS/>

³⁷ <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/motetrack/>

³⁸ <http://www.ist-runes.org/>

développer des plates-formes et a mis en place les infrastructures adaptées à des scénarios établis (feu dans un tunnel routier, télésurveillance de personnes cardiaques, secteur automobile...) avec l'idée que les produits et les systèmes réalisés puissent être ensuite réutilisés et améliorés par d'autres équipes ou industriels. Toujours dans l'optique de la normalisation des architectures, des outils de développement et des plates-formes middleware adaptatives ont été créés pour rendre flexible l'approche qu'auront les futurs développeurs et diminuer les coûts engendrés par le développement dans un processus d'industrialisation. Au niveau des plates-formes de capteurs, ce sont des TelosB provenant de Berkeley qui ont été utilisées.

3.3.3.8 CodeBlue

Depuis 2003, l'université de Harvard travaille sur l'utilisation de réseaux de capteurs pour des applications médicales comprenant l'intervention en milieu hospitalier, la surveillance post-opératoire et la rééducation. Ces travaux portent le nom de CodeBlue³⁹. Utilisant les plates-formes disponibles comme Telos, Mica2 et MicaZ, plusieurs instruments ont été développés. La figure 1-30a présente un instrument basé sur une plate-forme Telos et celui de la figure 1-30b l'est sur une plate-forme MicaZ. Une plate-forme dérivée de Telos a aussi été développée, il s'agit de la plate-forme Pluto (Fig. 1- 31). Plus petite, plus légère que Telos, elle est pour l'instant destinée à la surveillance d'activités physiques et des fonctions motrices. Enfin, une plate-forme de deuxième génération a été mise au point par le Digital Health Group d'Intel. Appelée Shimmer (Fig. 1- 32), elle comprend un processeur TI MSP430, un transceiver CC2420 fonctionnant avec le standard IEEE 802.15.4, un accéléromètre triaxial et une batterie rechargeable Li-polymère. Un port MicroSD permettant d'embarquer plus de 2 GB de mémoire flash est inclus. Shimmer existe aussi avec l'option Bluetooth.

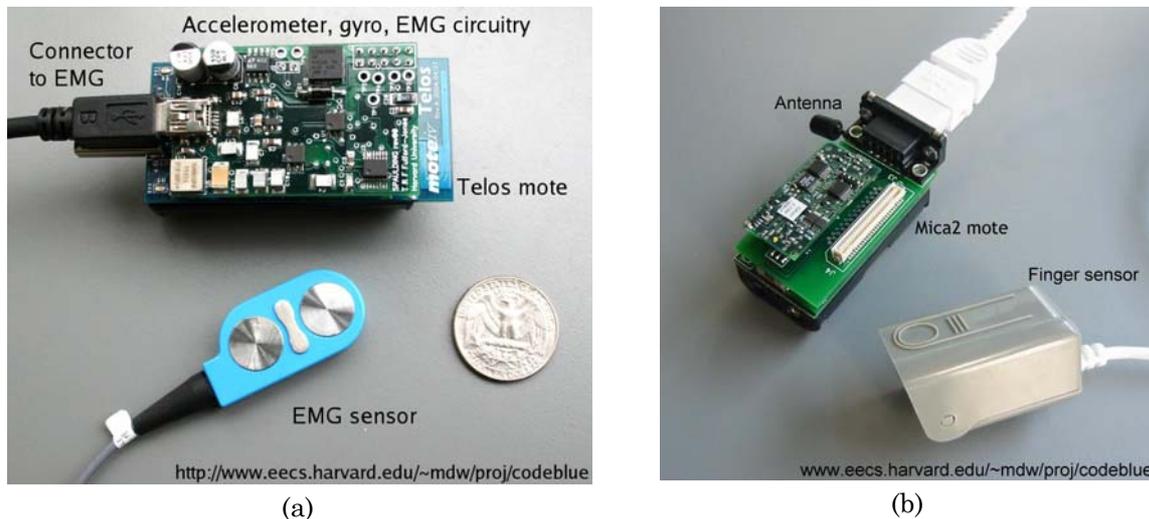


Fig. 1- 30 : Accéléromètre, gyroscope, et sonde d'électromyogramme (EMG) (a), Capteur de pouls par oxymétrie pulsée (b)

³⁹ <http://fiji.eecs.harvard.edu/CodeBlue>



Fig. 1- 31 : Plate-forme Pluto



Fig. 1- 32 : Plate-forme Shimmer d'Intel

A côté de ces plates-formes, une plate-forme logicielle a été créée pour permettre la réception et le traitement des données provenant de capteurs déployés sur les lieux d'une grande catastrophe [Lor04]. Une partie de MoteTrack (voir §3.3.3.6) a été utilisée pour réaliser la fonction localisation. Ces travaux sont réalisés dans le cadre de coopérations avec des centres médicaux où sont testés les instruments.

3.3.3.9 MIMOSA

MIMOSA (Microsystems platform for MOBILE Services and Applications) est un projet faisant partie du 6^{ème} plan cadre de l'union Européenne⁴⁰. Commencé en 2003, il s'est terminé en juin 2006. Le projet a regroupé une quinzaine d'acteurs industriels et académiques Européens sur l'objectif de réaliser une plate-forme pour créer une ambiance intelligente. Le téléphone portable est l'élément central entre des capteurs, des réseaux de capteurs et internet. Les travaux devaient porter sur le développement de capteurs sans fil utilisant la RFID⁴¹, de systèmes très intégrés permettant de lire et écrire sur des capteurs RFID, de composants RF sur SOI à base de MEMS⁴² (nano-résonateur), de systèmes radios à faible portée et faible consommation, de nouveaux types de capteurs à base de MEMS (nano-accéléromètre) et d'interfaces utilisateurs conviviales. Il semble que seules les parties très orientées « technologie » aient été réalisées.

3.3.3.10 SWN

SWN (Sensorial Wireless Network) est lui aussi un projet du 6^{ème} plan cadre Européen qui a débuté en octobre 2006 pour une durée de 3 ans. Ses travaux portent sur la recherche du déploiement optimal d'un réseau de capteurs en fonction d'un scénario et sur le routage optimal et les protocoles adéquats à utiliser en fonction de l'énergie, la

⁴⁰ <http://www.mimosa-fp6.com/>

⁴¹ Radio Frequency IDentification

⁴² Micro Electro Mechanical Systems

mémoire et la bande passante disponible. De plus, il est prévu d'étudier une technologie d'agents⁴³ pour réaliser des systèmes de contrôle.

3.3.3.11 e-CUBES

e-CUBES⁴⁴ est un autre projet du 6^{ème} plan cadre Européen qui regroupe un grand nombre d'acteurs universitaires et industriels. Démarré en 2006, son objectif principal était de réaliser un système autonome miniature à bas coût, en vue de son industrialisation, en utilisant des technologies microsystèmes et notamment l'intégration en 3 dimensions de différentes technologies. Ce système ayant pour fonction de capter une information de la transmettre, via un réseau d'autres systèmes, à un nœud central. Les applications visées sont la santé, la spatial et l'automobile. Les travaux de ce projet portent sur la fabrication de technologies en 3 dimensions avec les process et la méthode de design qu'elle implique, l'idée étant d'empiler plusieurs couches possédant chacune des circuits liés entre eux. Une partie traite des spécifications précises des e-CUBES pour chaque application. Une première démonstration utilisant des plateformes développées en Suisse a eu lieu en 2008 dans le but de démontrer le concept d'auto-localisation des nœuds et de réseau multi-sauts [Dub08]. L'objectif de réaliser une plate-forme complètement intégrée n'a pas encore été atteint à ce jour.

3.3.3.12 Conclusion

Les projets précédemment cités montrent l'intense activité qu'il existe sur le développement et même l'amélioration des réseaux de capteurs sans fil. On constate d'ailleurs que le domaine médical représente une part importante de cette activité. Il existe bien sûr beaucoup d'autres projets que nous ne citerons pas ici.

3.4 Les acteurs et projets français

A l'échelle nationale, plusieurs instituts et industriels travaillent sur la thématique des réseaux de capteurs sans fil soit dans le cadre de projets tels que ceux vus précédemment soit en interne.

Voici une liste d'équipes de recherche et un descriptif de leurs activités :

- l'équipe AFIRM (Acquisition Fusion d'Informations et Réseaux pour la Médecine) basée au laboratoire TIMC-IMAG de Grenoble⁴⁵. Elle cherche à collecter et rassembler des informations via divers moyens tels que les réseaux de capteurs sur un patient, hospitalisé ou non. Ses activités de recherche sont vastes : systèmes d'information, réseaux, capteurs physiques et physiologiques, traitement du signal, mathématiques appliquées au traitement des données, intelligence artificielle, méthodes d'évaluation clinique et éthique. En 2004, les premières expérimentations ont eu lieu sur des patients et forte de cette expérience l'équipe a centré son activité vers quatre thématiques :

- les systèmes multi-perceptifs ;

⁴³ Un agent est un programme qui accomplit des tâches à la manière d'un automate et en fonction de ce que lui a demandé son auteur.

⁴⁴ <http://ecubes.epfl.ch/public/>

⁴⁵ <http://www-timc.imag.fr/article91.html>

- le traitement et la fusion des données ;
- la cognition et l'informatique diffuse ;
- l'analyse et l'évaluation des usages ;

Un capteur de chute de personne utilisant des accéléromètres a été développé [Nou04] puis industrialisé. Le groupe a pour souhait de développer une recherche en prenant en compte le côté éthique de la surveillance médicale. Ses travaux portant sur « la maison intelligente » permettant la surveillance du comportement et des paramètres vitaux d'une personne à l'aide de réseaux de capteurs avec ou sans fil sont reconnus internationalement.

- l'équipe « sensors » du laboratoire CITI de Lyon⁴⁶. Ses travaux sur les réseaux de capteurs portent sur le développement d'outils informatiques pour les applications et les protocoles, les architectures hardware et les systèmes d'exploitation, le design inter couche, les protocoles de communications et la modélisation et la simulation de la couche physique. En collaboration avec l'entreprise Orange Labs, un projet appelé « Wifly » a été initié pour mettre en œuvre ces travaux. En 2007, une expérience consistant à déployer un réseau de plates-formes EW2420⁴⁷ au sol et à en embarquer une sur un aéronef a été tentée. Il s'agissait ici d'envoyer via une base une requête à l'aéronef et que celui-ci la transmette au réseau au sol qui communique par multi-saut entre ses nœuds. La réponse du réseau est envoyée à l'aéronef qui la transmet enfin à la base. Cette expérience a été concluante et a permis de valider un nouveau protocole et l'utilisation de coordonnées virtuelles.

- l'équipe « réseaux de capteurs et microsystemes sans fil » du laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS)⁴⁸ de Toulouse. Leur but est « d'étudier l'impact des micro et nanotechnologies sur les architectures de réseaux de capteurs ou de microsystemes ainsi que d'étudier les architectures matérielles et logicielles qui permettront de déployer ces réseaux avec des contraintes de débits, d'énergie, de sécurité ainsi que d'environnement ».

- l'équipe « systèmes de communication et applications des microondes » de l'institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN)⁴⁹ de Lille. Cette équipe travaille en collaboration avec le laboratoire d'informatique de Lille (LIFL) dans le cadre de la Fédération de Recherche IRCICA. L'IEMN est en charge des couches physique et MAC alors que le LIFL développe les intergiciels de communication et les algorithmes de routage. Leur travaux portent sur le développement de réseaux de capteurs en intérieur et communicant à 60 GHz.

⁴⁶ <http://www.citi.insa-lyon.fr/research/sensors/>

⁴⁷ Plate-forme Ember comprenant un microprocesseur ATMEL AtMega 128L et un module Zigbee 2420. Le système d'exploitation utilisé est THINK (<http://think.ow2.org/>)

⁴⁸ <http://www.laas.fr/laas/1-6008-Reseaux-de-capteurs-et-de-microsystemes-sans-fils.php>

⁴⁹ <http://www.iemn.univ-lille1.fr/fr/la-recherche/les-axes-de-recherche/circuits-et-systemes-de-telecommunication.html>

- plusieurs laboratoires bretons des universités de Rennes I et II, l'INSERM, l'INRIA, l'ENS Cachan Bretagne tentent de mettre leurs compétences en commun dans le projet « Pucescom »⁵⁰ dans le but de fédérer leurs efforts de recherche dans tous les domaines des réseaux de capteurs sans fil.

- le CEA/Léti⁵¹ de Grenoble inclut depuis quelques années dans ses activités le développement d'objets communicants au sein de son groupe « conception et intégration de systèmes ». Ses travaux portent sur l'intégration de fonctions électroniques, la récupération d'énergie dans l'environnement, les antennes et les microsystèmes autonomes. Un capteur de mouvement composé d'accéléromètres a été développé en 2002 et des démonstrateurs sont régulièrement réalisés pour valider un concept. Le Léti est à l'heure actuelle impliqué dans plusieurs projets nationaux et européens.

On le voit, tous les grands acteurs de la recherche française sont impliqués de près ou de loin dans le développement des réseaux de capteurs sans fil, que ce soit pour la partie logicielle ou matérielle.

4 Synthèse

Comme on peut le constater, les réalisations ne manquent pas dans le domaine des plates-formes et l'activité autour des réseaux de capteurs est intense. On notera tout de même une différence entre les plates-formes dédiées aux réseaux ad-hoc, c'est-à-dire que tous les nœuds du réseau sont susceptibles d'envoyer et de recevoir des données et qui embarquent le plus souvent un système d'exploitation (Mica, TelosB, Mica2, Spec, BTnode, Imote, SENTIO) permettant de mettre en œuvre une intelligence réseau et les autres qui communiquent leurs données vers une base unique qui se charge de faire le lien entre les capteurs d'un côté et l'analyse des données de l'autre. Ce sont deux approches différentes qui ne nécessitent pas les mêmes outils et ne se destinent pas forcément aux mêmes applications.

De plus, la tendance actuelle voit se développer les architectures modulaires. Le constat est qu'il existe deux types d'approches au niveau de la conception. L'une consiste à développer une plate-forme dédiée à une application précise, il en résulte une structure très efficace pour ce qu'elle a été conçue et très optimisée au niveau consommation d'énergie et dimensions mais coûteuse en temps de développement et difficilement évolutive si des fonctionnalités venaient à s'ajouter. L'autre type concerne les plates-formes non spécifiques à une application. Généralement constituées d'un circuit imprimé sur lequel on vient brancher des modules via des interfaces GPIO, elles sont plus simples à développer, plus évolutives mais consomment plus d'énergie et sont plus imposantes que leurs consœurs dédiées. Là aussi, un problème peut venir se poser si une fonctionnalité demande des spécificités que la plate-forme n'a pas, par exemple en capacité mémoire ou puissance de calcul.

⁵⁰ <http://pucescom.irisa.fr/>

⁵¹ <http://www.leti.fr>

Pour remédier à cela, des plates-formes modulaires sont apparues. Constituées d'un empilement ou assemblage de modules possédant chacun une fonction précise ces plates-formes sont très évolutives et rapides à développer. En ce qui concerne la consommation et les dimensions, elles sont supérieures aux autres types mais les travaux menés actuellement sur le sujet tentent de réduire cet écart.

D'abord menées aux États-Unis, les recherches se font aujourd'hui dans le monde entier. Cependant, pionniers dans le domaine, ces premiers conservent une avance stratégique en ayant transféré avec succès la recherche et les chercheurs vers l'industrie. Le domaine médical est très représenté dans les différents projets ainsi que tout ce qui touche aux environnements intelligents pour la santé. Dans ce dernier cas, la tendance actuelle est à la recherche de standards afin d'étendre les réseaux au maximum et toucher le plus de personnes à travers plusieurs applications. Cependant, il reste des points à améliorer à tous les niveaux dans les plates-formes.

Dans la course à la miniaturisation et la basse consommation, le compromis entre la fréquence d'émission, la taille de l'antenne, le type de modulation et le protocole à utiliser reste à trouver. Au niveau des moyens de communication, les radiofréquences ont supplanté l'optique des Smart Dust et, de la bande ISM⁵² à 433 MHz des débuts, on observe, avec l'arrivée du Bluetooth et autres normes IEEE, l'apparition du 2,4 GHz, autre bande ISM. En effet, pour permettre un déploiement rapide, il faut que les réseaux de capteurs sans fil soient économiquement peu chers et l'utilisation de bandes de fréquences libres s'impose. Pour les alimentations, on relève aussi un passage de la pile AA à la pile Lithium-Polymère des ECO sensors en passant par la pile bouton. L'énergie reste un des points critiques dans la conception de capteurs autonomes. Seule une solution consistant à récupérer de l'énergie dans l'environnement, qu'elle soit solaire [War04], vibrationnelle [Amm05, Men01, Rou03] ou électromagnétique [Bay03, Ini05], permettrait de s'affranchir d'une source limitée en durée. Malheureusement, l'état de l'art actuel ne permet pas cela et toutes les applications ne peuvent mettre en œuvre ces techniques faute d'environnement solaire, vibrant ou électromagnétique.

En termes d'organisation du travail de recherche, une tendance consiste à faire travailler ensemble, dans un même projet ou au sein d'un même laboratoire, les gens spécialistes du logiciel et ceux plutôt orientés matériel afin d'optimiser au maximum l'intégration de l'intelligence dans les réseaux et surtout pour obtenir l'intégration maximale. Car c'est bien là la difficulté de ce type de recherche, elle combine l'informatique aux radiofréquences, aux capteurs et à l'énergie, ce qui demande un panel de compétences très vastes qu'il faut regrouper. Ce type de configuration où toutes sont regroupées est très bien assimilée aux États-Unis, où des laboratoires sont créés spécialement autour de cette recherche, mais difficile à mettre en place dans des pays où ces spécialités de recherche sont bien souvent séparées géographiquement. Mais la tendance est aujourd'hui à la collaboration au sein de grands projets multinationaux.

⁵² Les bandes ISM (industriel, scientifique, et médical) sont des bandes de fréquences qui ne sont pas soumises à des réglementations nationales et qui peuvent être utilisées librement (gratuitement, et sans autorisation) pour des applications industrielles, scientifiques et médicales.

5 Perspectives de travail

Dans le cadre de la thèse, il ne va pas être possible de traiter toutes les problématiques inhérentes aux capteurs sans fil miniatures destinés à être mis en réseau. De plus, comme la plupart des projets qui ont réalisé leurs premiers prototypes avec des composants du commerce dans un souci de simplicité, l'objectif va consister à faire simple pour commencer. Par « simple », il est entendu que l'on ne va pas chercher, faute de compétences, à rendre intelligent un capteur, l'intégration restant une priorité. Le but final étant d'apporter des pistes de recherches, une contribution à l'édifice que sont les réseaux de capteurs sans fil.

Avant de commencer à réfléchir à une quelconque architecture, il faut savoir à quels compromis on va être confrontés. Dans le cas d'un système de capteur sans fil simple avec lequel on ne vise pas d'application précise, les compromis interviennent au niveau de la partie communicante, la partie énergie et la taille du système. En effet, plus on travaillera avec une fréquence haute, plus l'antenne sera petite mais plus il faudra d'énergie pour émettre loin. Il s'agit donc dans un premier temps de se fixer des limites dimensionnelles. En ce qui concerne les dimensions, un capteur tenant dans un volume inférieur à 27 cm³, antenne et batterie comprise, serait un défi intéressant à relever car peu de réalisations l'ont fait à ce jour.

Un point crucial à déterminer ensuite est le choix d'une utilisation en intérieur ou en extérieur. Les deux milieux présentent des caractéristiques qu'il faut savoir appréhender en amont. Ainsi une utilisation en intérieur évite des contraintes sur la robustesse et la résistance à certaines conditions comme l'humidité ou les hautes ou basses températures mais en contrepartie la portée du signal va être considérablement réduite à cause d'obstacles. Au final c'est l'option en extérieur que l'on va choisir car elle permet plus de latitude dans la façon de déployer un réseau et le fait de travailler en espace libre est plus facile pour débiter.

Notre travail va dès lors se focaliser essentiellement sur la partie communicante et notamment les antennes, gros contributeur en ce qui concerne les dimensions. En effet, la plupart des plates-formes réalisées sont conçues avec de simples antennes filaires ou alors sans antenne, cette dernière étant connectée par la suite. Plus récemment, ce sont les antennes intégrées à 2,4 GHz qui sont apparues et avec elles, les problèmes dus au packaging de la plate-forme qui est d'ailleurs très rarement réalisé. De plus, ces antennes sont omnidirectionnelles ce qui en termes d'économie d'énergie n'est pas très intéressant. Les utiliser en réseaux pourrait être une solution à étudier. Enfin, depuis les débuts des recherches dans ce domaine, les efforts se sont beaucoup portés sur les parties logicielles au détriment des parties matérielles ce qui a créé un déséquilibre visible sur certaines plates-formes qui présentent beaucoup de fonctionnalités avec de grandes dimensions.

C'est donc aux antennes DANS les réseaux de capteurs et POUR les réseaux de capteurs que va être consacrée la suite de ce rapport.

CHAPITRE II : LES RESEAUX D'ANTENNES DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS

Sommaire

CHAPITRE II : Les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs....	55
1 Introduction	57
2 Les réseaux d'antennes classiques.....	57
2.1 <i>Théorie des réseaux d'antennes</i>	<i>57</i>
2.2 <i>Antennes adaptatives</i>	<i>65</i>
3 Réseaux d'antennes non liées.....	66
3.1 <i>Principe</i>	<i>66</i>
3.2 <i>Comparaison avec un réseau classique</i>	<i>67</i>
3.3 <i>Scénarios d'application</i>	<i>67</i>
4 Traitement des scénarios	68
4.1 <i>Outils de simulation.....</i>	<i>68</i>
4.2 <i>Calibrage des outils de simulation</i>	<i>69</i>
4.3 <i>Le scénario 1</i>	<i>73</i>
4.4 <i>Le scénario 2</i>	<i>79</i>
5 Conclusion du chapitre 2.....	95

1 Introduction

Les premiers travaux sur les réseaux d'antennes sont apparus dans les années 50 [Han64]. Un des plus connu et très étudié est le réseau de Van Atta, breveté en 1959 [Van59], qui avait comme propriété de renvoyer une onde dans la direction par laquelle elle arrivait, comme le fait un coin de cube en optique. L'idée était de relier des antennes entre elles et faire varier la phase de leur alimentation afin d'obtenir un diagramme de rayonnement beaucoup plus directif qu'avec une seule. D'abord reliées par de simples lignes, les antennes l'ont ensuite été par des lignes comprenant des déphaseurs commandables ce qui a permis de modifier le diagramme en fonction de l'endroit où on veut émettre ou recevoir. Depuis, ces réseaux ont beaucoup évolué et le traitement numérique a permis des progrès notables. Aujourd'hui, les applications de ces réseaux d'antennes sont nombreuses et variées et ces dernières années les ont vu être préconisés dans les télécommunications mobiles pour en améliorer les performances, embarqués sur des véhicules, avions, bateaux, satellites, etc. pour répondre à la forte demande en canaux de communications [God97I].

Dans le cas de réseau de capteurs sans fil, on imagine aisément que l'utilisation de ce type de réseaux d'antennes pourrait être intéressante du point de vue énergétique car l'énergie émise le serait efficacement mais aussi dans la gestion du réseau avec des applications de localisation [Mao07, Kuc08], de management de nœuds [Erd06] ou de collaboration des nœuds pour émettre dans une direction voulue [Gua07]. C'est ce dernier point que nous allons étudier dans ce chapitre. Après avoir rappelé la théorie des réseaux d'antennes, nous allons essayer de simuler un réseau d'antennes non liées physiquement capable d'orienter leur émission vers une cible afin d'optimiser la liaison entre les deux en termes d'énergie. Pour cela, nous allons établir des scénarios avec des conditions et des contraintes et en déduire des spécifications et des limites pour leur réalisation.

2 Les réseaux d'antennes classiques

Intéressons-nous ici aux bases des réseaux d'antennes en étudiant leur théorie et en relevant les situations où ils peuvent être utilisés.

2.1 Théorie des réseaux d'antennes

2.1.1 Réseau linéaire 1D de dipôles

Pour étudier les réseaux d'antennes on se place tout d'abord dans le cas simple où N antennes, toutes identiques, sont alignées et espacées entre elles d'une distance d inférieure ou égale à la longueur d'onde émise par les antennes. Chaque antenne émet à une amplitude A liée à son excitation et une phase propre Φ due à la différence de marche de l'onde produite par rapport à l'antenne 1 (Fig. 2- 1).

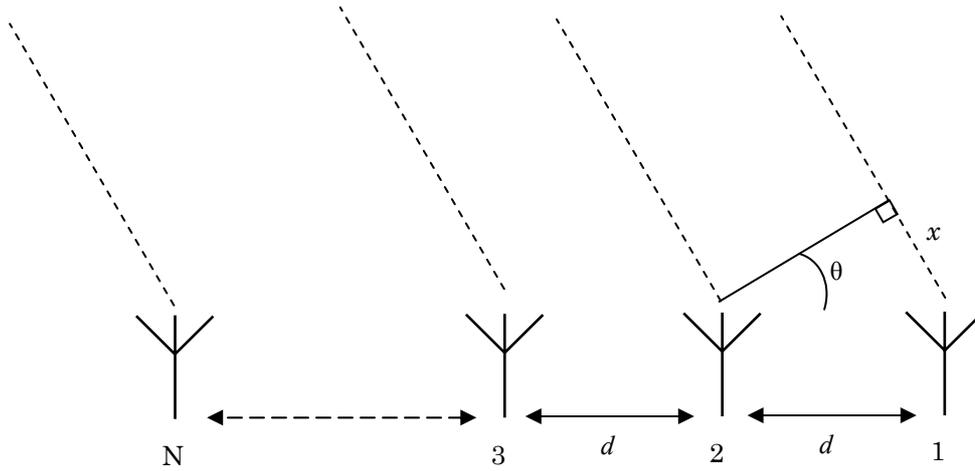


Fig. 2- 1 : Configuration d'un réseau d'antennes

En effet, du fait de l'éloignement des antennes les unes par rapport aux autres, le champ, considéré lointain, de l'antenne n aura une certaine distance x en moins à couvrir que celui de l'antenne $n-1$. On peut calculer la valeur de x en fonction de l'angle de visée θ , sachant que cette distance augmente linéairement :

$$x_2 = d \sin \theta \text{ pour le décalage entre l'antenne 1 et l'antenne 2 et}$$

$$x_N = (N-1)d \sin \theta \text{ pour le décalage entre l'antenne 1 et l'antenne N.}$$

Pour connaître le déphasage on utilise le nombre d'onde k égal au nombre d'oscillations qu'effectue une onde de longueur λ sur une distance de 2π . On a alors :

$$\phi_2 = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \text{ pour le décalage entre l'antenne 1 et l'antenne 2 et}$$

$$\phi_N = (N-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \text{ pour le décalage entre l'antenne 1 et l'antenne N}$$

Le facteur de réseau qu'on appellera B est donc :

$$B = A \left(1 + e^{i(\phi_2)} + e^{i(\phi_3)} + \dots + e^{i(\phi_N)} \right) = A \left(1 + e^{i(\phi)} + e^{i(2\phi)} + \dots + e^{i((N-1)\phi)} \right) \quad \text{Éq. 1}$$

Dans ce cas où les distances et les amplitudes sont toutes égales et que le déphasage entre les antennes suit une loi géométrique, on peut simplifier cette expression qui devient alors une suite géométrique connue :

$$B = \sum_{n=0}^{N-1} e^{in\phi} = \frac{1 - e^{iN\phi}}{1 - e^{i\phi}} \quad \text{Éq. 2}$$

L'équation 1 donne le champ d'un réseau de sources ponctuelles. Pour obtenir le champ lointain d'un réseau d'antennes dipôles, il faut multiplier B par le champ d'une antenne seule. Dans le cas d'un dipôle ce champ vaut, dans le plan E [Kra50]:

$$E = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \cos \theta\right)}{\sin \theta} \text{ pour un dipôle de longueur } L = \lambda / 2$$

$$E = \frac{\cos(\pi \cdot \cos \theta) + 1}{\sin \theta} \text{ pour un dipôle de longueur } L = \lambda$$

$$E = \frac{\cos\left(\frac{3\pi}{2} \cdot \cos\theta\right)}{\sin\theta} \text{ pour un dipôle de longueur } L = 3\lambda/2$$

Il est alors possible de tracer (avec Matlab) les diagrammes de rayonnement en coordonnées polaires d'un dipôle $\lambda/2$ seul (Fig. 2- 2) puis d'un réseau constitué de 5 dipôles espacés de $\lambda/2$ (Fig. 2- 3). Les antennes sont représentées en traits ou points noirs selon l'orientation.

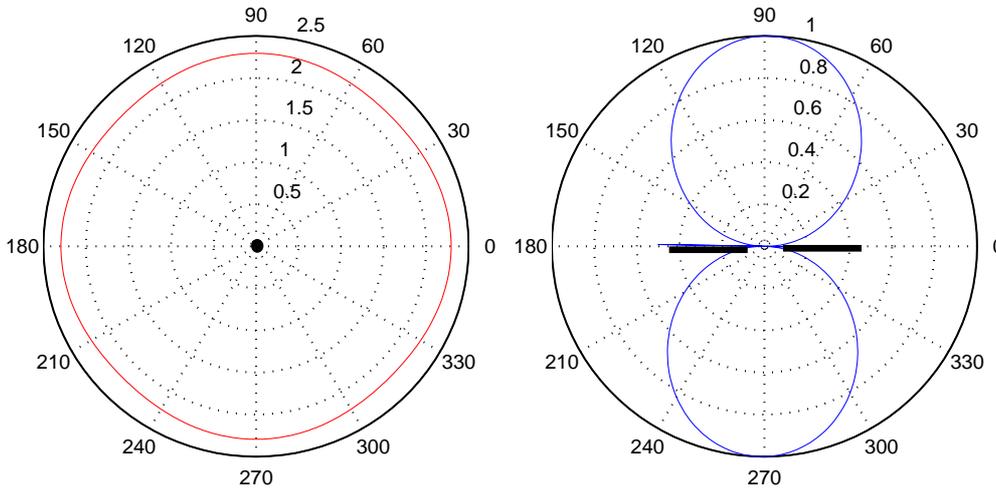


Fig. 2- 2 : Diagrammes de rayonnement d'un dipôle $L = \lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.)

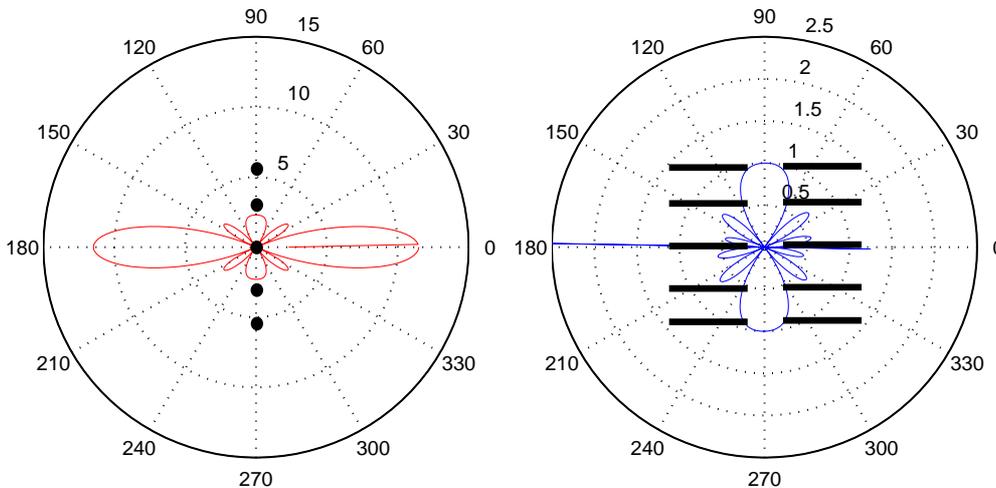


Fig. 2- 3 : Diagrammes de rayonnement de 5 dipôles espacés de $d=\lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.)

L'échelle de l'amplitude est en unités arbitraires. On observe bien que l'ajout de dipôles accroît la directivité du rayonnement émis dans la direction perpendiculaire à l'alignement des dipôles.

2.1.2 Réseau linéaire 1D de dipôles à phase différentes

En plus de la phase due au décalage des antennes dans l'espace, il est possible d'ajouter à chaque antenne une phase qu'on appellera ϕ . Cette phase vient s'ajouter à la première et peut être fixe si on utilise des longueurs de lignes d'alimentation différentes qui permettent d'exciter une antenne en décalage avec une autre ou bien variable en

utilisant un déphaseur contrôlable qui retarde ou avance l'excitation. En prenant le même réseau que précédemment auquel on applique une phase croissant linéairement de $\pi/4$ entre les antennes, l'équation 1 devient :

$$B = A \left(1 + e^{i(\phi+\varphi_2)} + e^{i(2\phi+\varphi_3)} + e^{i(3\phi+\varphi_4)} + e^{i(4\phi+\varphi_5)} \right)$$

$$= A \left(1 + e^{i\left(\phi+\frac{\pi}{4}\right)} + e^{i\left(2\phi+\frac{\pi}{2}\right)} + e^{i\left(3\phi+\frac{3\pi}{4}\right)} + e^{i(4\phi+\pi)} \right) \quad \text{Éq. 3}$$

La figure ci-dessous montre les diagrammes de rayonnement d'une telle configuration.

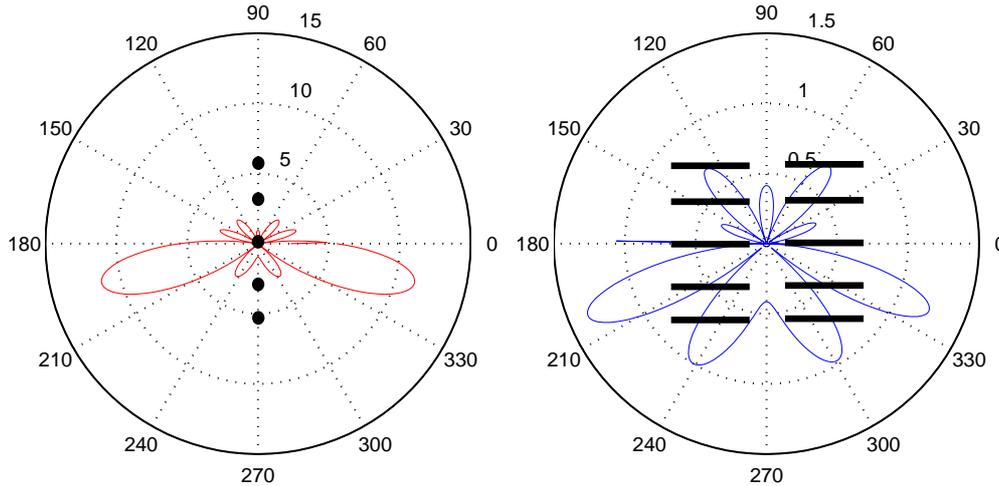


Fig. 2- 4 : Diagrammes de rayonnement de 5 dipôles avec $\varphi_N = (N-1).\pi/4$ (Plan H à g., plan E à dr.)

On observe bien que le fait de faire varier la phase permet d'orienter l'émission dans une autre direction que dans l'axe perpendiculaire aux antennes.

2.1.3 Réseau linéaire 1D de dipôles à amplitudes différentes

Un dernier paramètre modifiable est l'amplitude d'émission de chaque antenne. Elle se modifie en jouant sur l'alimentation de celles-ci avec un atténuateur ou amplificateur. Sa valeur pondère les termes en exponentielle de l'équation 1 en remplaçant le coefficient A général par un coefficient A_N correspondant à l'antenne N . L'équation 1 devient alors :

$$B = A_1 + A_2 e^{i(\phi)} + A_3 e^{i(2\phi)} + A_4 e^{i(3\phi)} + A_5 e^{i(4\phi)} \quad \text{Éq. 4}$$

Un coefficient A_N peut être nul, ce qui revient à retirer l'antenne du réseau. Prenons par exemple $A_1=1$; $A_2=3$; $A_3=2$; $A_4=4$; $A_5=1$. On obtient alors les diagrammes qui suivent.

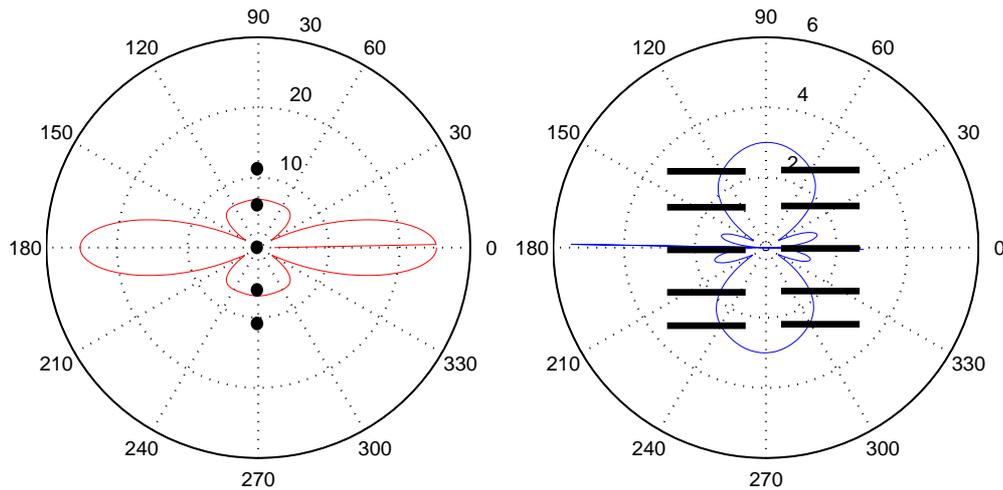


Fig. 2- 5 : Diagrammes de rayonnement d'un réseau linéaire de 5 dipôles $L = \lambda/2$ avec des amplitudes différentes (Plan H à g., plan E à dr.)

On constate que par rapport à la figure 2-3, où les amplitudes sont toutes égales, les lobes secondaires et principaux sont modifiés. Cette modification peut être contrôlée en fonction des valeurs que l'on donne aux différentes amplitudes. Ainsi pour optimiser l'émission, selon que l'on veut mettre plus ou moins d'énergie dans les lobes secondaires, il existe des distributions d'amplitudes caractéristiques. On peut citer la distribution binomiale proposée par John Stone Stone⁵³ qui consiste à donner aux antennes des amplitudes égales aux coefficients d'une série binomiale de la forme :

$$(a + b)^{n-1} = a^{n-1} + (n-1)a^{n-2}b + \frac{(n-1)(n-2)}{2!}a^{n-3}b^2 + \dots \quad \text{Éq. 5}$$

Dans le cas d'un réseau de 5 antennes ($n=5$) on obtient pour amplitudes $A_1=1$; $A_2=4$; $A_3=6$; $A_4=4$; $A_5=1$. Il en résulte un diagramme de rayonnement où seuls subsistent deux lobes principaux (Fig. 2- 6a) plus larges que dans le cas d'une distribution uniforme (Fig. 2- 3). Dans ce cas, toute l'énergie est émise dans un cône de 31° d'ouverture alors qu'il était de 23° auparavant. Cependant, il se peut que l'on veuille diminuer la largeur de ce cône quitte à perdre un peu d'énergie dans des lobes secondaires que l'on cherchera à minimiser. On applique alors une distribution répondant à ces critères : $A_1=1$; $A_2=1.6$; $A_3=1.9$; $A_4=1.6$; $A_5=1$. Le diagramme présente alors deux lobes principaux de 27° d'ouverture chacun et de petits lobes secondaires (Fig. 2- 6b).

⁵³ John Stone Stone, Brevet Américain 1,643,323

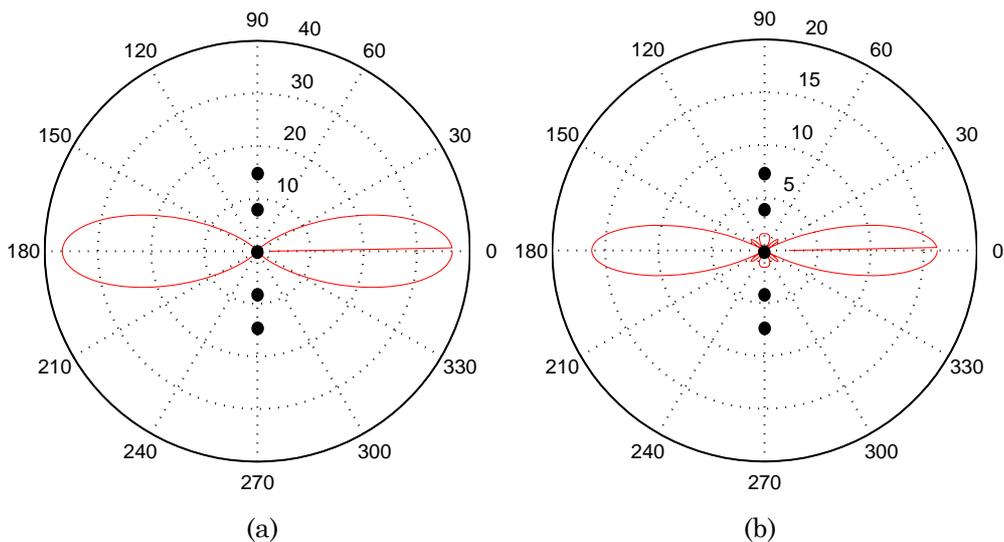


Fig. 2- 6 : Réseau de 5 antennes avec distribution binomiale des amplitudes (a) et distribution optimale (b)

2.1.4 Réseau linéaire à deux dimensions

Il est possible de faire les mêmes opérations avec un réseau à deux dimensions. Dans ce cas là, les antennes sont disposées linéairement selon deux axes et l'espace entre elles peut différer selon l'axe (voir Fig. 2- 7).

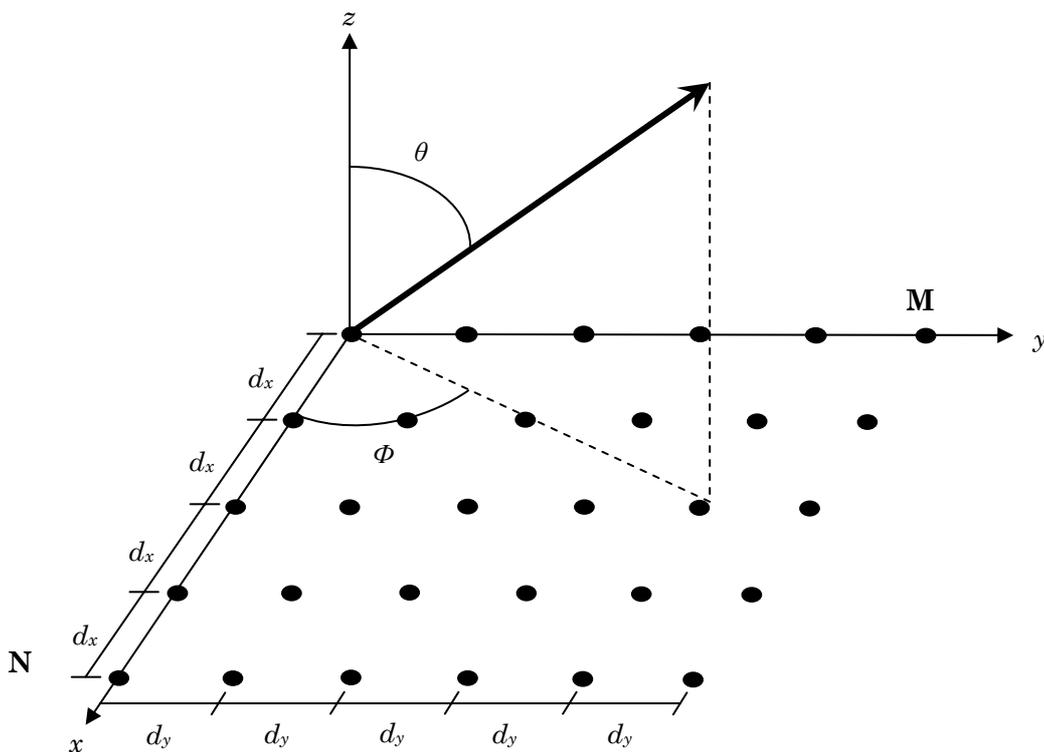


Fig. 2- 7 : Exemple d'un réseau 2D de 30 antennes

Pour ces réseaux à deux dimensions, il est plus intéressant de regarder le diagramme de rayonnement directement en trois dimensions. C'est pourquoi nous allons balayer tout l'espace en faisant varier les angles θ et Φ . Ici, le calcul de la contribution de toutes les

antennes se fait en considérant que le réseau d'antenne linéaire 1D de cinq antennes vu auparavant est répété six fois le long de l'axe y . Toutes les distances selon les axes étant égales, on réutilise l'équation 1 en redéfinissant l'argument de l'exponentielle complexe de la manière suivante :

$$\phi_x = \frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \theta \cos \Phi \quad \text{ce qui donne, dans le cas général, } B_x = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{in\phi_x}$$

Pour calculer la contribution de toutes les antennes on considère B_x comme une antenne que l'on a mise en réseau avec d'autres selon l'axe y . On a alors :

$$B = \sum_{m=0}^{M-1} B_x A_m e^{im\phi_y} = \sum_{m=0}^{M-1} A_m e^{im\phi_y} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{in\phi_x} = B_x B_y \text{ avec } \phi_y = \frac{2\pi d_y}{\lambda} \sin \theta \cos \Phi$$

Au final, si les amplitudes dans la direction x sont proportionnelles à celles dans la direction y , on peut écrire que $A_m A_n = A_{mn}$, où A_{mn} est l'amplitude de la (m,n) ème antenne. Et si en plus toutes les amplitudes sont égales, on aura $A_{mn} = A_0$. Enfin, en prenant en compte le fait que l'on peut ajouter un déphasage supplémentaire φ dans chaque direction, on obtient :

$$B = A_0 \sum_{m=0}^{M-1} e^{im\left(\frac{2\pi d_y}{\lambda} \sin \theta \cos \Phi + \varphi_y\right)} \sum_{n=0}^{N-1} e^{in\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda} \sin \theta \cos \Phi + \varphi_x\right)} \quad \text{Éq. 6}$$

Avec, dans le cas de la figure 2-7, $M=6$ et $N=5$, on peut alors tracer le diagramme de rayonnement en 3D. Cependant sa visualisation sous Matlab n'est pas aisée étant donné qu'il n'existe pas de fonctions pour tracer directement une courbe polaire en trois dimensions. C'est pourquoi nous avons utilisé le code proposé par Brégains [Bre04] qui convertit des coordonnées polaires en cartésiennes. L'affichage graphique du diagramme de rayonnement (Fig. 2- 8) est moins esthétique que celui réalisé avec la fonction *polar* de Matlab mais la forme du diagramme ci-dessous est correcte. Nous avons choisi de ne représenter que la partie du diagramme se trouvant dans les z positifs.

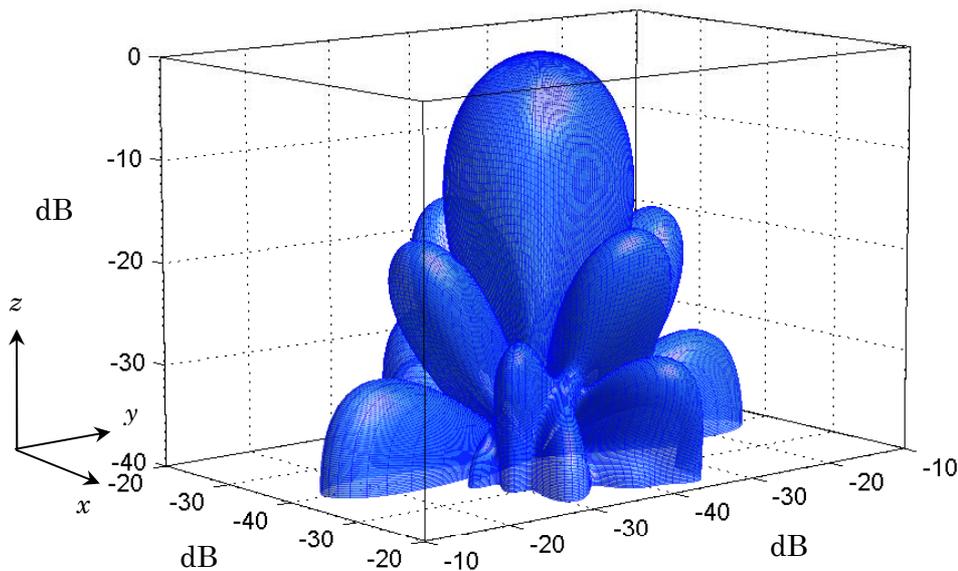


Fig. 2- 8 : Diagramme de rayonnement d'un réseau de 30 antennes

Etant donné la proximité des antennes entre elles (écart inférieur à la longueur d'onde, voir 4.4.2.1 du Chapitre 2), il serait impossible d'utiliser des dipôles, nécessitant deux lignes d'alimentation, pour réaliser ce type de réseau. C'est pourquoi les antennes planaires telles que les antennes patches rectangulaires ou rondes sont le plus souvent utilisées lorsqu'on travaille avec des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre. Compactes, elles possèdent un diagramme de rayonnement quasi demi-sphérique et sont faciles à agencer et alimenter (Fig. 2- 9). Pour des longueurs d'onde de l'ordre de la dizaine de mètres on peut se permettre d'utiliser de grandes paraboles comme le font certains radiotélescopes géants⁵⁴.

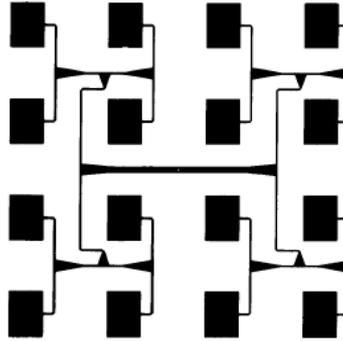


Fig. 2- 9 : Réseau d'antennes planaires [Hal88]

Comme pour les réseaux 1D, il est là aussi possible de jouer sur la phase et l'amplitude des antennes pour orienter le faisceau vers une direction précise.

2.1.5 Réseau aléatoire 1D de dipôles

Pour des raisons que l'on va expliquer par la suite nous allons maintenant rendre le réseau aléatoire en fixant des distances inégales entre les antennes. Celles-ci sont maintenant représentées par d_1 pour celle entre les antennes 1 et 2 et donc d_{N-1} pour celle entre les deux dernières. On pose $d_0=0$. Ainsi la phase due à la distance entre les antennes ne croît plus linéairement mais selon le cumul des distances :

$$\phi_N = \frac{2\pi \sum_{x=0}^{N-1} d_x}{\lambda} \sin \theta \quad \text{Éq. 7}$$

L'expression de B n'est plus simplifiable et reste sous la forme d'une somme d'exponentielles complexes. Par exemple, pour notre cas avec 5 antennes, on choisit de prendre $d_1 = \lambda/2$, $d_2 = \lambda/4$, $d_3 = \lambda$ et $d_4 = \lambda/3$, ce qui donne :

$$\phi_1 = 0 ; \quad \phi_2 = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \sin \theta ; \quad \phi_3 = \frac{2\pi (d_1 + d_2)}{\lambda} \sin \theta ; \quad \phi_4 = \frac{2\pi (d_1 + d_2 + d_3)}{\lambda} \sin \theta ;$$

$$\phi_5 = \frac{2\pi (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)}{\lambda} \sin \theta \text{ et par suite } B = 1 + e^{i(\pi \cdot \sin \theta)} + e^{i\left(\frac{3}{2}\pi \cdot \sin \theta\right)} + e^{i\left(\frac{7}{2}\pi \cdot \sin \theta\right)} + e^{i\left(\frac{25}{6}\pi \cdot \sin \theta\right)}$$

En multipliant B par le diagramme d'un dipôle $\lambda/2$ on obtient les diagrammes de rayonnement présentés ci-après.

⁵⁴ Un exemple est le VLA (Very Large Array), <http://www.vla.nrao.edu/>

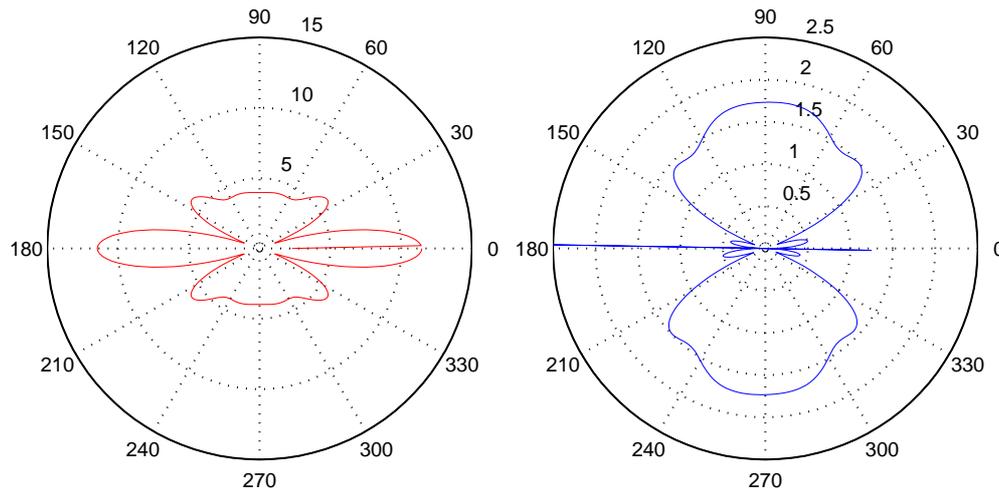


Fig. 2- 10 : Diagrammes de rayonnement d'un réseau aléatoire de 5 dipôles $L = \lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.)

On constate que les lobes secondaires sont plus importants qu'avec un réseau linéaire mais la directivité est tout de même intéressante.

2.2 Antennes adaptatives

Les antennes adaptatives font partie de la classe des antennes intelligentes ou « smart antennas ». Elles combinent la technique des réseaux d'antennes et le traitement efficace du signal. En effet, en plus des antennes mises en réseau, un algorithme est appliqué sur le signal reçu par chacune puis leur somme est traitée pour en augmenter la qualité en éliminant ou du moins en réduisant les interférences. Concrètement, des contrôleurs rendent compte de l'état de l'environnement radiofréquences à des processeurs sur lesquels tourne en permanence un algorithme complexe dont le rôle est d'identifier les interférences et de les différencier du signal utile. Donc, à la différence d'un réseau simple où amplitudes et phases sont prédéfinies pour certaines configurations, les antennes adaptatives font en sorte que le traitement du signal se fasse en fonction du signal reçu dans un environnement qui peut être hostile. En émission comme en réception, il est alors possible d'orienter le lobe principal dans la direction voulue, c'est la technique dite du « beamforming ».

On imagine bien l'intérêt de ce type d'antenne dans un réseau de capteurs où la consommation d'énergie pour les communications entre les capteurs est une donnée à minimiser pour garantir une durée de vie intéressante aux nœuds. La communauté scientifique s'y est intéressée notamment en étudiant les performances de telles antennes dans les réseaux ad-hoc et en proposant des protocoles les mettant en œuvre [Ram01] ou bien en présentant des configurations d'antennes permettant d'orienter un faisceau dans toutes les directions [Hua04].

En termes de déploiement les antennes adaptatives peuvent être utilisées autant en station de base qu'en terminal. Les utiliser des deux côtés améliorerait bien sûr la qualité du signal mais cela engendrerait un surcoût autant financier qu'énergétique non justifié par rapport à une configuration où un seul côté est équipé. Ensuite le choix du côté, émetteur ou récepteur, est une question de coût. Dans le premier cas il est divisé

par le nombre d'utilisateurs, dans le deuxième il est absorbé par chacun. Au niveau des réseaux de capteurs sans fil, dans une configuration avec une station de base et des capteurs disséminés, étant donné le nombre de nœuds qui peut exister, une configuration où ce serait la station de base qui seule porterait une antenne adaptative serait un choix économique.

On le voit donc, les réseaux d'antennes permettent de mieux cibler/écouter un émetteur/récepteur en orientant le faisceau vers lui. En plus d'optimiser le transfert d'énergie, cette technique permet de réaliser des communications point-à-point sans émettre dans toute une zone inutile et parasiter d'autres transmissions.

3 Réseaux d'antennes non liées

Dans cette partie nous allons étudier comment il serait possible utiliser les réseaux d'antennes dans un réseau de capteurs en se servant des capteurs et de leur position les uns par rapport aux autres.

3.1 Principe

Dans un réseau ad-hoc, une information est transmise d'un point à l'autre du réseau en passant par un chemin optimal correspondant à l'emplacement des nœuds. Cela nécessite une connaissance globale du réseau et de l'état des nœuds à chaque instant. En effet, si plusieurs informations circulent, un nœud peut se trouver sur le trajet de plusieurs d'entre elles et ne pas arriver à toutes les relayer. Dans cette topologie on considère que chaque nœud est une entité qui transmet ou reçoit une information d'un de ses plus proches voisins.

Dans un souci d'économie de transmissions, on peut maintenant faire en sorte que les nœuds les plus proches prennent part à la formation d'un réseau d'antennes et que ce réseau émette dans la direction d'un nœud ou d'une station de base éloignée. Pour cela il faut bien sûr que ces nœuds soient proches les uns des autres et qu'ils sachent vers où émettre leur information. La figure 2-11 montre comment pourrait se présenter un tel réseau. Dans la suite nous allons expliquer ce qu'implique la réalisation de ce type de réseaux, notamment en le comparant avec des réseaux classiques, puis nous allons utiliser deux scénarios dans lesquels nous tenterons de les mettre en œuvre.

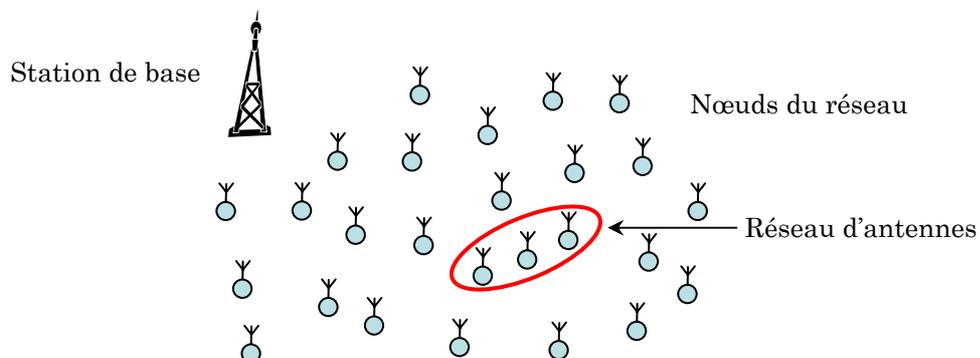


Fig. 2- 11 : Exemple de réseau d'antennes non liées

3.2 Comparaison avec un réseau classique

La principale différence entre un réseau d'antennes non liées et un réseau classique est que les antennes n'ont aucun lien physique entre elles. Là où il était possible d'alimenter les antennes avec la même ligne d'alimentation et de créer des déphasages sur les tronçons de cette ligne, il faudra désormais réussir à faire en sorte que les antennes en réseau soient synchronisées afin de les alimenter avec la phase et l'amplitude requises pour orienter l'émission là où il le faut. Autre point, la constitution du réseau lui-même. En effet, les antennes doivent pouvoir se situer les unes aux autres afin de savoir quelle est la topologie du réseau.

La prise en compte de ces points va être différente selon l'application que l'on veut viser. Une application où les capteurs sont disposés précisément sera traitée différemment d'une application où les capteurs sont dispersés aléatoirement. C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons choisi de développer ces réseaux selon les deux scénarios détaillés ci-après.

3.3 Scénarios d'application

Nous avons choisi de développer deux scénarios possédant chacun des caractéristiques afférentes à des applications pouvant exister. L'un va plutôt se référer à des applications en intérieur alors que l'autre conviendrait pour des applications en extérieur.

3.3.1 Premier scénario

Dans ce scénario, les capteurs sont disposés précisément dans un volume correspondant à une grande pièce dans laquelle des objets sont entreposés. L'objectif est de mesurer la température dans différents endroits de ce volume et de venir récupérer les données à l'aide d'un récepteur portable. Il s'agit ici de savoir comment disposer les capteurs afin d'optimiser la prise d'information et de quelle manière les récupérer au final. La figure ci-dessous en montre un exemple.

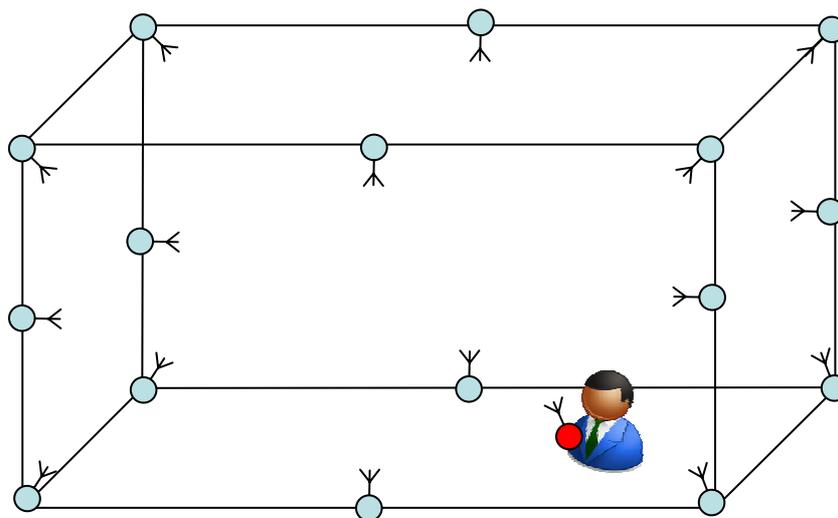


Fig. 2- 12 : Exemple de configuration du scénario 1

3.3.2 Deuxième scénario

Le deuxième scénario se joue en extérieur sur une zone de la taille d'un terrain de football. Les capteurs sont déposés aléatoirement par voie aérienne et leur objectif est de détecter un gaz spécifique dans l'air. Le recueil d'information se fait par voie aérienne grâce à un objet volant de type drone par exemple. La disposition des capteurs étant aléatoire, il va falloir chercher la façon de créer un réseau et comment le commander à distance. La figure ci-dessous en montre un exemple.

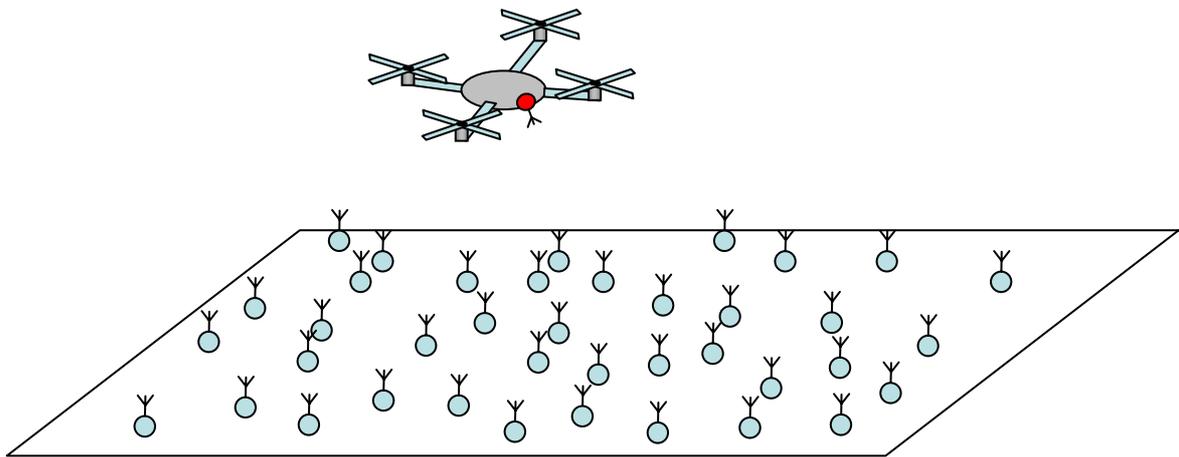


Fig. 2- 13 : Exemple de configuration du scénario 2

4 Traitement des scénarios

Nous allons maintenant traiter chacun des deux scénarios en discutant de la manière la plus judicieuse de les réaliser en utilisant un réseau d'antennes. Nous validerons cela grâce à des simulations puis nous formulerons des spécifications permettant de les mettre en œuvre et enfin les limitations existantes. Mais dans un premier temps les outils de simulation qui vont être impliqués vont être présentés puis comparés entre eux.

4.1 Outils de simulation

Plusieurs outils ont été utilisés pour le tracé des diagrammes de rayonnement de réseaux d'antennes. Le premier est Matlab sous lequel des codes ont été développés, et les deux autres sont des simulateurs électromagnétiques, CST microwave studio et EMPIRE XCcel que nous avons eu l'occasion de tester. En voici une rapide présentation.

4.1.1 Matlab

Matlab est la contraction de matrix laboratory. C'est un langage de programmation et un environnement de développement développé dans les années 70 aux Etats-Unis et commercialisé par la société américaine The MathWorks⁵⁵. Il est utilisé dans les domaines de l'éducation, de la recherche et de l'industrie pour le calcul numérique mais

⁵⁵ <http://www.mathworks.fr/>

aussi dans les phases de développement de projets. D'abord codé en fortran, il a été recodé en langage C puis a acquis au fil du temps les possibilités du C++ et du Java. Aujourd'hui, de nombreuses boîtes à outils le complètent permettant d'utiliser des fonctions spécifiques à chaque domaine.

4.1.2 CST microwave studio

CST microwave studio (Computer Simulation Technology) fait partie de la suite CST STUDIO développée par l'entreprise, basée en Allemagne, CST AG⁵⁶. C'est un logiciel de simulation électromagnétique 3D basé sur la technique de modélisation appelée FITD (Finite-Integration Time-Domain) qui discrétise les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Le logiciel propose plusieurs solveurs pour traiter tous types de structures fonctionnant dans le domaine des basses et hautes fréquences.

4.1.3 EMPIRE Xcel

EMPIRE Xcel est aussi un logiciel de simulation électromagnétique 3D mais lui basé sur la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) qui discrétise les équations de Maxwell sous leur forme différentielle partielle. Il a été développé par IMST, un centre de recherche et développement Allemand. Son code optimisé et adaptable fait de lui le logiciel le plus rapide de son domaine pour la simulation de structures complexes.

4.2 Calibrage des outils de simulation

De nouveaux codes ont été développés sous Matlab afin de gagner du temps par rapport aux logiciels de simulations électromagnétiques dont les temps de calcul peuvent avoisiner une ou plusieurs heures selon le logiciel utilisé et sans prendre en compte le temps pour configurer les simulations. Ces codes ont pour but d'afficher le diagramme de rayonnement obtenu à partir d'un réseau. Un premier code trace ces diagrammes en deux dimensions et le deuxième en trois dimensions. Le premier code écrit permet de simuler un réseau 1D linéaire ou aléatoire. Il possède plusieurs paramètres d'entrées qui sont :

Entrées code 1D	
Nombre d'antennes, fréquence	
Si réseau linéaire: Pas du réseau	Si réseau aléatoire: Distance entre antennes
Si phase linéaire: Pas de la phase	Si phase aléatoire: Phase de chaque antenne
Si amplitude constante: Valeur	Si amplitude variable: Amplitude de chaque antenne

Tab. 5 : Entrées du code 1D

Ces paramètres sont ensuite utilisés pour calculer le facteur de réseau (Eq. 1) que l'on multiplie enfin par le diagramme du type d'antenne avec laquelle on souhaite faire le réseau. Ces diagrammes sont auparavant calculés sous CST, la figure 2-14 en est un exemple.

⁵⁶ <http://www.cst.com>

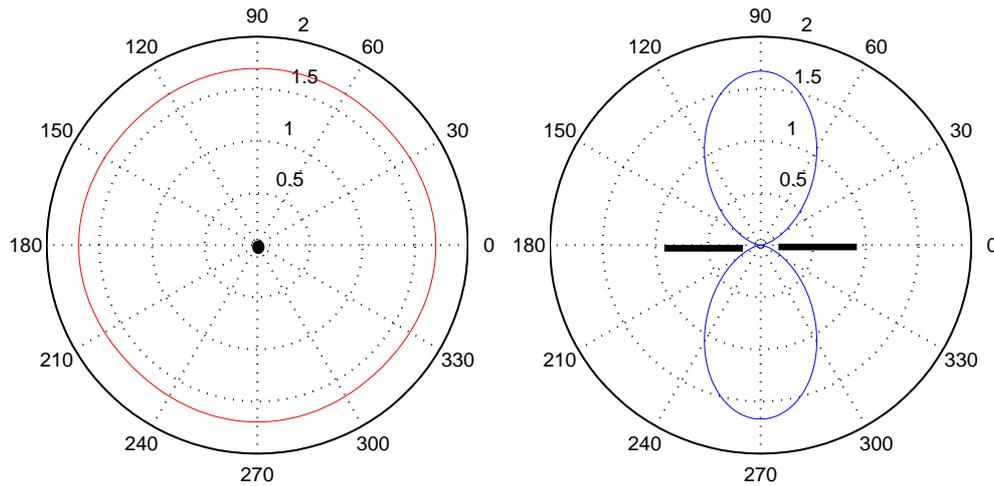


Fig. 2- 14 : Diagrammes de rayonnement d'un dipôle $L = \lambda/2$ (Plan H à g., plan E à dr.) simulés sous CST

Le code complet est disponible en Annexe A.

Afin de valider ce premier code, ses résultats ont été comparés à ceux obtenus avec les outils numériques dans plusieurs configurations (les antennes sont alignées dans l'axe 0-180° et les diagrammes sont vus dans le plan H) :

- Un réseau de 5 dipôles $\lambda/2$ espacés de $\lambda/2$:
On constate sur la figure 2- 15a que les résultats donnés par les deux logiciels de simulation sont identiques alors que ceux obtenus avec Matlab diffèrent en amplitude. Cependant les formes et l'emplacement des lobes sont respectés.
- Un réseau de 5 dipôles $\lambda/2$ espacés de $\lambda/2$ à amplitudes différentes :
Les antennes ont respectivement pour amplitude 1, 3, 2, 4 et 1. Là aussi, mêmes constatations que précédemment (Fig. 2- 15b).
- Un réseau de 5 dipôles $\lambda/2$ espacés de $\lambda/2$ à phases différentes :
Les antennes ont respectivement pour phase 0, $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$ et π . Ici, en plus de la différence d'amplitude, il y a une modification de certains lobes sur l'axe des antennes (Fig. 2- 16).

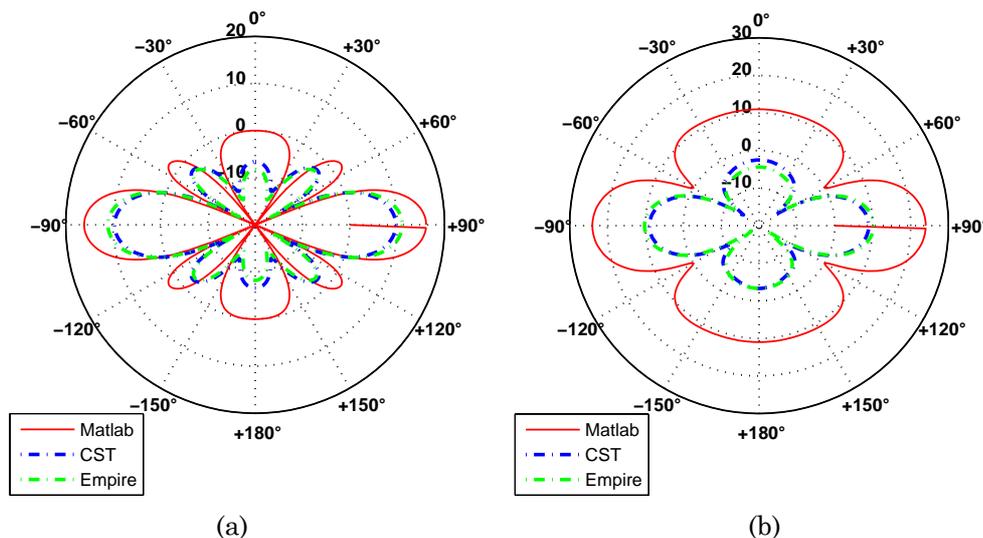


Fig. 2- 15 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 5 dipôles identiques (a) et à amplitudes différentes (b)

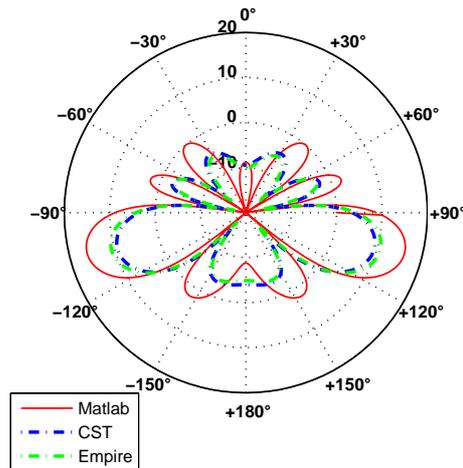


Fig. 2- 16 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 5 dipôles à phases différentes

- Un réseau de 3 dipôles $\lambda/2$ espacés de 8λ :
Dans ce cas, l'accord entre les trois logiciels est quasi-parfait (Fig. 2- 17a).
- Un réseau de 3 dipôles $\lambda/2$ espacés de 8λ avec un réflecteur métallique situé à $\lambda/4$ sous chaque dipôle:
Là aussi, l'accord entre les trois logiciels est quasi-parfait (Fig. 2- 17b).
- Un réseau de 3 dipôles $\lambda/2$ espacés de λ avec un réflecteur métallique situé à $\lambda/4$ sous chaque dipôle et à phases différentes:
Les phases sont de 0 , $\pi/3$ et $2\pi/3$. L'accord est moins bon, toujours dans le plan des antennes (axe 0 - 180°) où les lobes sont décalés (Fig. 2- 18).

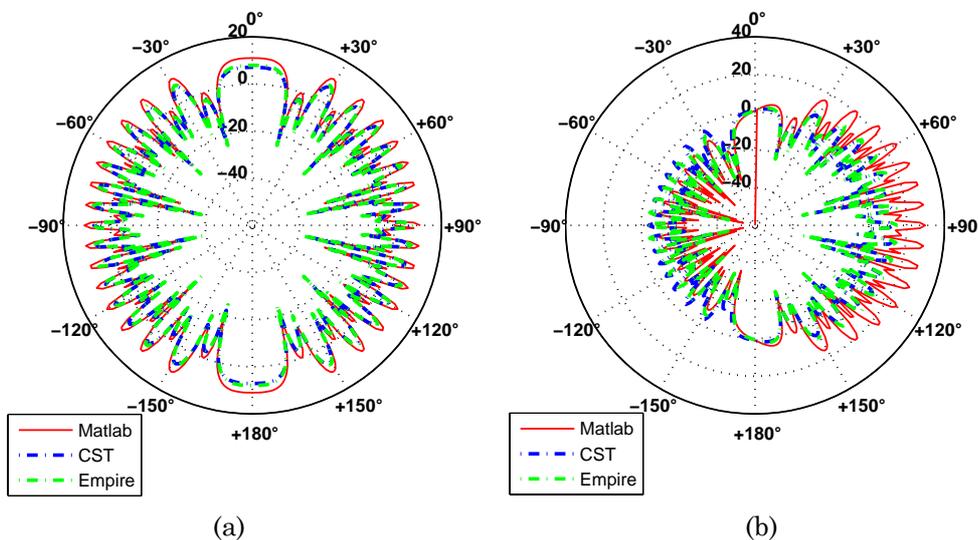


Fig. 2- 17 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 3 dipôles dans le vide (a) et avec réflecteur (b)

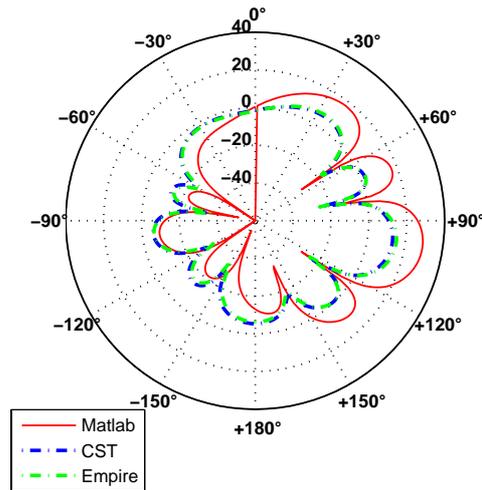


Fig. 2- 18 : Comparaison entre Matlab/CST/Empire d'un réseau de 3 dipôles à phase différentes avec réflecteur

On constate avec ces quelques comparaisons que les deux logiciels commerciaux sont en parfait accord et que notre code développé sous Matlab fonctionne bien avec ce type de réseau linéaire sauf pour les cas où les antennes présentent des déphasages entre elles. Cependant l'écart n'est pas très conséquent et les résultats en termes d'orientation des lobes principaux est correct.

Voyons maintenant le code permettant de faire de réseaux en 2D et d'afficher leurs diagrammes de rayonnement en 3D. Comme il l'a été dit précédemment, nous avons utilisé le code Matlab proposé par Brégains [Bre04] permettant de réaliser cela. Ce code a pour entrée un fichier texte dans lequel sont écrites les coordonnées, l'amplitude et la phase de chaque antenne. Comme pour le code 1D, ces paramètres permettent de tracer le facteur de réseau mais cette fois-ci en 3D. La fonction extraite de ce code 3D est détaillée en Annexe B. Appelée Diag3D, elle permet d'afficher en plus du diagramme 3D, les phases et amplitudes de chaque antenne du réseau. La figure 2-19 montre le facteur de réseau en dB de la simulation de 6 antennes espacées de $\lambda/4$ dans le plan XY orientées selon y ayant respectivement pour phase π , 0, $\pi/4$, $\pi/4$, 0, π .

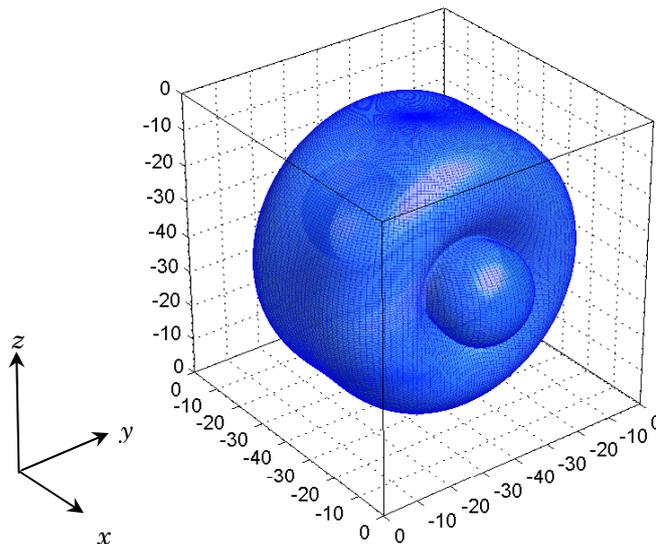


Fig. 2- 19 : Facteur de réseau de 6 antennes (en dB)

Ces quelques comparaisons montrent qu'il va être possible d'utiliser notre code développé sous Matlab pour simuler certaines configurations. Cependant, en termes de précision, étant donné que nous ne prenons pas en compte les couplages existants entre les antennes, nos résultats seront donc moins précis pour des configurations où les antennes seront proches les unes des autres. Cela est mis en évidence avec les figures 2-15, 2-16 et 2-17 où l'on voit que le tracé Matlab correspond exactement aux autres dans le cas d'un réseau où les antennes sont espacées de 8λ (Fig. 2-17) alors que pour des réseaux où les distances sont de l'ordre de la longueur d'onde, l'écart est plus grand (Fig. 2-15 et 2-16). De même, là où notre excitation sera parfaitement sinusoïdale sous Matlab, cas idéal, elle sera constituée d'une somme de contributions sous les logiciels commerciaux, cas réel.

Matlab va donc nous permettre de nous faire rapidement une idée sur le diagramme de rayonnement d'un réseau avec moins de précision mais avec un gain de temps non négligeable au vu du nombre de simulations à réaliser.

4.3 Le scénario 1

Le scénario 1 est, rappelons-le, représentatif de cas se déroulant en intérieur, le plus souvent dans des locaux de stockage de marchandises ou des lieux de vie. Ces milieux se caractérisent par un grand encombrement d'objets voire de murs ou cloisons. Cela a bien entendu un impact sur les contraintes en termes de communication entre plusieurs points, les objets et murs créant des réflexions multiples et atténuation des signaux émis. Il est donc difficile d'y déployer un réseau de capteurs sans au préalable réfléchir à la disposition de chaque module et encore plus d'utiliser ces modules pour en faire un réseau d'antennes. Ce scénario est donc peu propice à la réalisation de réseaux sans lien physique car la densité de capteurs est trop faible pour pouvoir en mettre plusieurs sur une petite surface. Cependant, l'utilisation de capteurs sans fil trouve ici sa justification dans le fait qu'il sera possible de modifier facilement la position des capteurs en fonction des changements dans l'environnement sondé.

Le but ici est de relever la température en plusieurs points d'un volume. Le placement des capteurs se fait donc dans les endroits stratégiques du volume avec la condition qu'ils ne perturbent pas l'activité de la zone. C'est donc au cas par cas que ce placement se fait. On peut tout de même essayer de définir une sorte de standard utilisable pour ce type d'application. Parmi les configurations possibles, deux retiennent notre attention car elles permettent d'utiliser des réseaux d'antennes. Nous allons les détailler dans les parties suivantes.

4.3.1 Première solution

La première solution consiste à faire que les capteurs envoient leurs données vers une base fixe, laquelle les compilera, les stockera et les réémettra vers une base mobile (un PDA) ou une autre base fixe (un ordinateur) quand elle la sollicitera. Ce processus se fait donc en deux phases distinctes qui sont :

- 1) l'émission des données de chaque capteur vers la base fixe (Fig. 2-20)
- 2) l'émission de la base vers l'utilisateur (Fig. 2-21)

4.3.1.1 1^{ère} phase

Pour la première opération, afin d'éviter que tous les capteurs n'émettent en même temps leurs données, il est indispensable qu'un système faisant office de synchronisation leur soit intégré. Ce système peut, par exemple, être activé lors de l'installation du réseau pendant laquelle on définit dans quel ordre les capteurs émettent et à quels instants ou bien par un signal émit par la base fixe qui joue le rôle de starter. Une temporisation ayant été implémentée auparavant dans chaque module. En dehors du temps de mesure et d'émission de données, les capteurs doivent consommer le moins d'énergie, c'est-à-dire être complètement éteints avec une sentinelle qui les allumera au moment opportun.

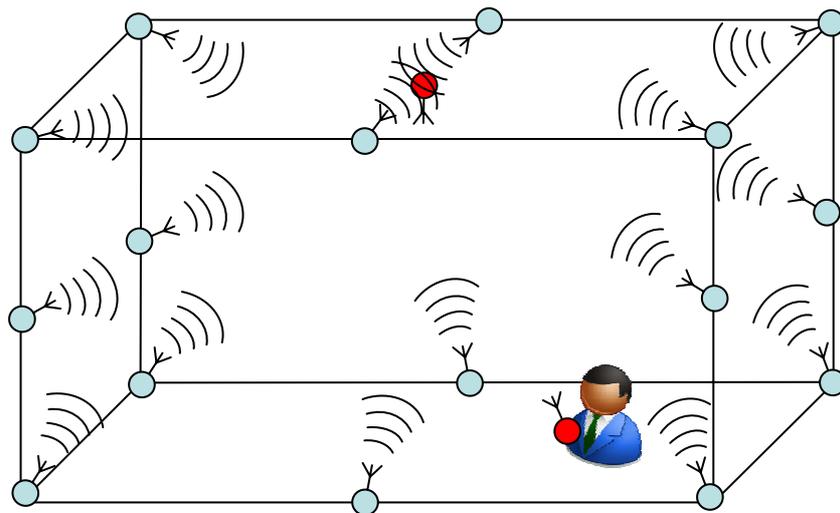


Fig. 2- 20 : 1^{ère} phase: émission des capteurs

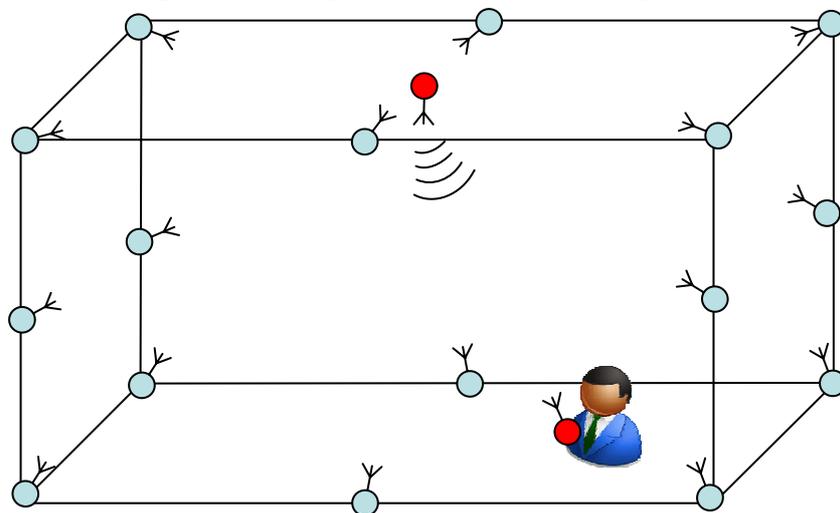


Fig. 2- 21 : 2^{ème} phase: émission vers l'utilisateur

Au niveau du signal de chaque capteur, la trame émise doit comporter un identifiant permettant de connaître la localisation et la donnée elle-même. Dans le cas d'une surveillance de température, les prises de mesures n'ont pas nécessairement besoin de se faire à haute fréquence d'échantillonnage, on travaillerait plutôt à l'échelle de la minute voire la dizaine de minutes et les trames seront de petites tailles, typiquement quelques bits pour l'identification et 8 bits pour la température.

Du côté de la base fixe qui collecte les données, il faut qu'elle puisse en stocker assez pour ne pas en perdre entre deux prises d'information par l'utilisateur. De la mémoire est donc à prévoir en fonction du nombre de capteurs, de la période de prises de mesures et de celle de récolte d'information. De plus, pour rendre le réseau reconfigurable, il faut qu'elle puisse accepter l'ajout d'un nouveau capteur ou au contraire son retrait. Dans ce cas, plusieurs possibilités s'offrent à nous :

- la prise en compte se fait simplement à « l'écoute » des capteurs, cela implique de rajouter un temps légèrement supérieur à celui qui existe entre l'envoi de données de deux capteurs successifs ;
- des informations concernant le réseau peuvent être envoyées à la base par le biais d'une liaison utilisateur/base, cette dernière s'adaptant aux nouvelles conditions.

Cela implique de créer une liaison ascendante vers la base.

Le choix de l'une ou l'autre va se faire principalement sur des critères économiques, la deuxième possibilité étant plus coûteuse à mettre en œuvre.

4.3.1.2 2^{ème} phase

Intéressons-nous maintenant à la phase au cours de laquelle la base envoie ses données vers un point représentant l'interface finale avec un utilisateur. C'est en effet là qu'il serait intéressant d'utiliser un réseau d'antennes car, dans le cas où la zone dans laquelle est déployé le réseau est grande, il se peut que l'utilisateur veuille recueillir ces données à des endroits différents à chaque fois. Il faut donc que la base ayant recueilli toutes les informations l'atteigne quelque soit son emplacement dans la zone.

Pour ce cas précis, un réseau d'antennes de type réseau d'antennes planaires semble être le plus approprié car il permet d'émettre dans toutes les directions contenues dans le demi-espace qui la surplombe. On peut trouver aujourd'hui ce type d'antennes dans les radars d'avions de chasse. Elles font partie des antennes adaptives dans lesquelles le balayage se fait électroniquement. Sans être aussi complexe, notre antenne doit pouvoir déplacer son faisceau principal dans un cône allant de -60 à 60° par rapport à sa normale (Fig. 2- 22), ce qui est suffisant pour rayonner partout dans une pièce.

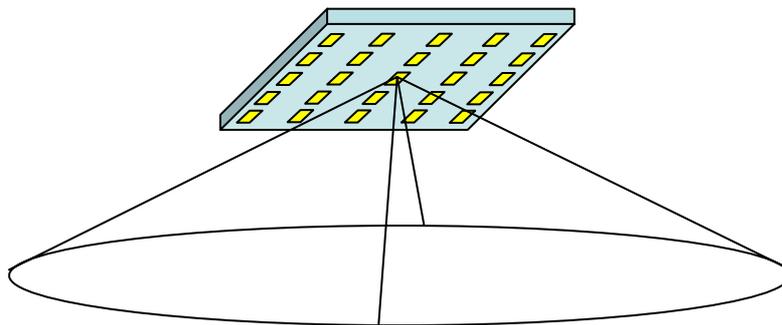


Fig. 2- 22 : Réseau d'antennes planaires pour l'émission vers l'utilisateur

Placé comme sur la figure 2-21, ce réseau peut émettre vers un récepteur situé n'importe où dans la zone étudiée. Pour montrer cela, nous avons simulé un réseau constitué de 25 antennes planaires disposées en 5 lignes dans 5 colonnes sous Matlab. Le code réalisé permet de tracer le diagramme de rayonnement du réseau en fonction de la direction où

l'on veut émettre. Ce code est disponible en Annexe C et nous allons maintenant expliquer son fonctionnement.

4.3.1.3 Code pour le réseau 5 par 5

Les paramètres d'entrées pour ce code sont :

- La fréquence de travail des antennes
- La configuration d'amplitude souhaitée
- Le type de vue du diagramme que l'on souhaite obtenir (hémisphère ou sphère)
- La position du récepteur par rapport à la normale du réseau (angle, direction, distance)
- Le nombre d'antennes selon x et selon y
- L'écart en les antennes selon x et selon y

A partir de la fréquence, une longueur d'onde est définie. Les distances en x , y et z seront normalisées par rapport à elle afin de ne pas en dépendre par la suite. Le code calcule ensuite la phase qu'il faut donner à chaque antenne pour que son signal arrive en même temps que celui émis par une antenne située au centre du réseau. Ainsi, toutes les antennes atteignent le récepteur en phase quelle que soit leur position. C'est avec toutes ces données que le diagramme 3D est tracé par la suite. Les figures suivantes présentent ce que l'on obtient en utilisant une configuration d'amplitude binomiale ; l'antenne centrale a une amplitude de 6, le premier cercle d'antennes autour d'elle, 4, et le cercle extérieur, 1 ; avec un récepteur situé à 10λ exactement au-dessus du réseau.

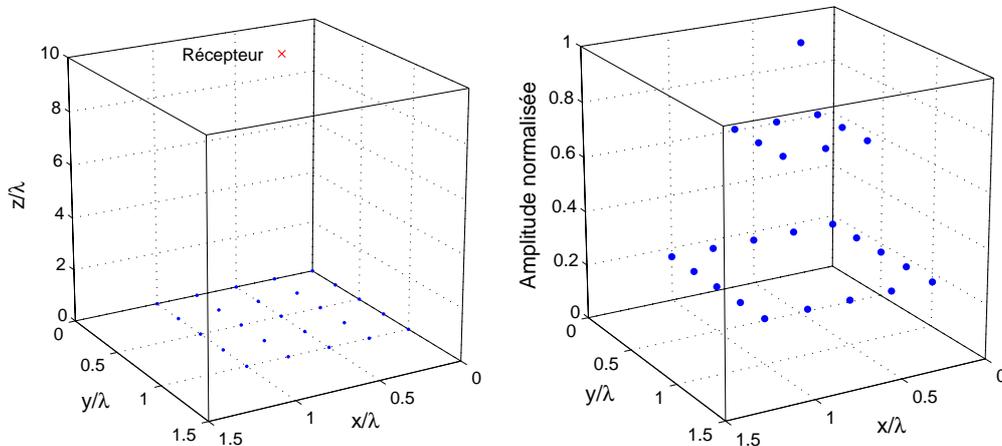


Fig. 2- 23 : Réseau de 25 antennes et leur récepteur (à g.), amplitudes normalisées des antennes (à dr.)

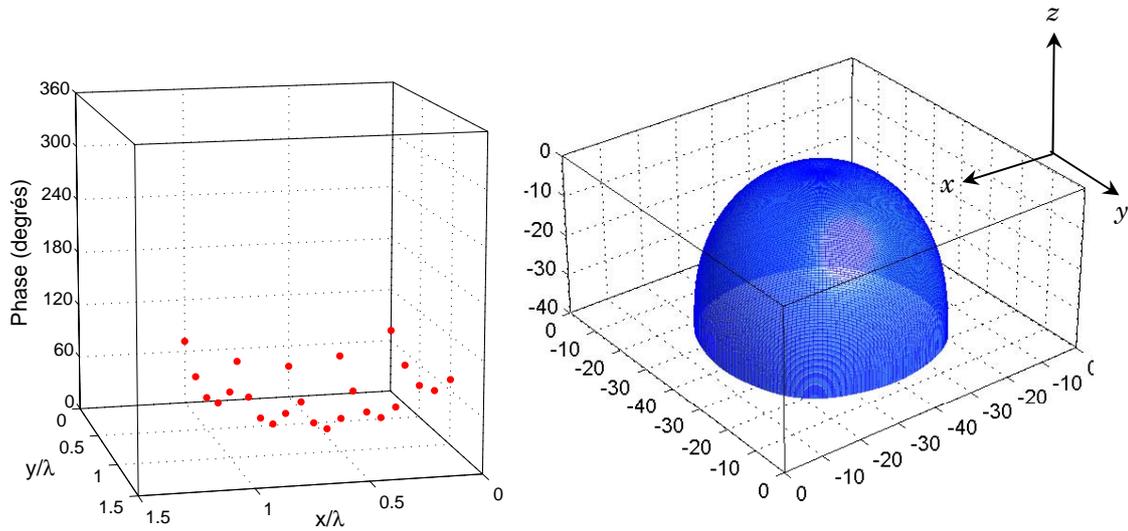


Fig. 2- 24 : Phases des antennes (à g.) et diagramme de rayonnement en dB (à dr.)

En déplaçant maintenant le récepteur, on va changer les phases et donc le diagramme final. Prenons le cas où le récepteur est à 45° de la normale du réseau à une altitude de 10λ dans la direction XY (les amplitudes ne changent pas).

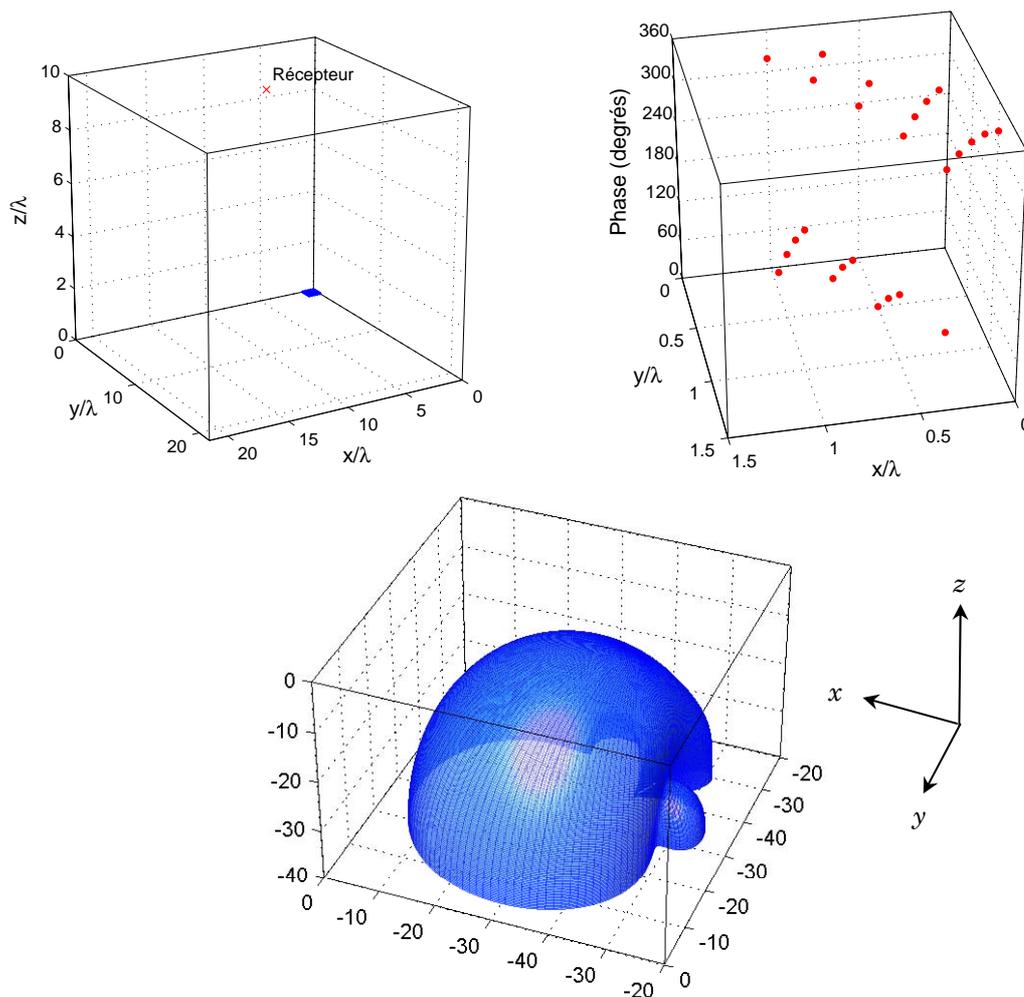


Fig. 2- 25 : position du réseau et du récepteur (en haut à g.), phases des antennes (en haut à dr.), diagramme de rayonnement (en bas)

4.3.2 Deuxième solution

La deuxième solution envisageable consiste à faire que les capteurs créent une sorte de chaîne en se transmettant leurs données entre eux comme c'est le cas dans la figure 2-26.

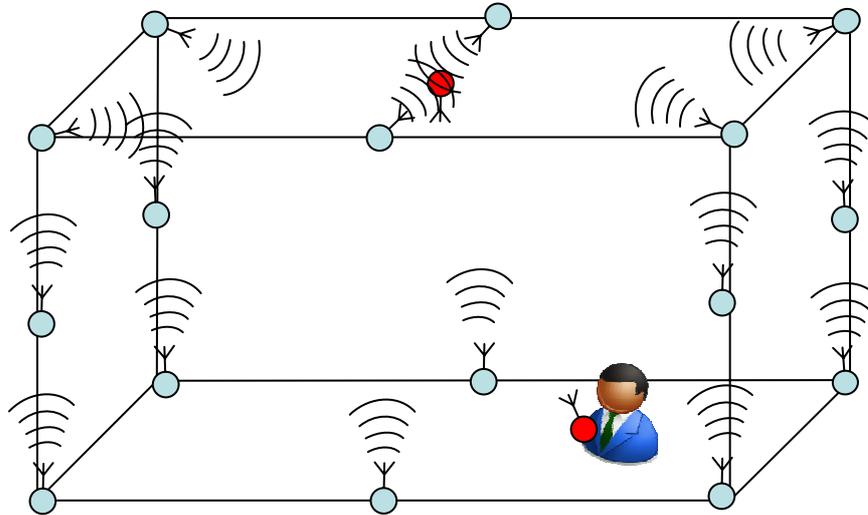


Fig. 2- 26 : Phase d'émission des capteurs

Cela nécessite bien sûr que les capteurs puissent recevoir des données et les traiter pour ensuite les renvoyer avec les leurs. Dans ce schéma, les capteurs situés le plus près du sol ont plus de chances d'atteindre un autre capteur situé à proximité plutôt que la base principale surtout si l'environnement est encombré (une armoire métallique par exemple). De plus, les distances entre capteurs étant plus faibles que celle entre chaque capteur et la base, la puissance d'émission, et donc la consommation d'énergie pourront être plus faibles. Cette configuration revient à contourner les obstacles pouvant exister faisant transiter les informations en hauteur où l'espace est le plus souvent dégagé. Là, chaque capteur se trouvant au bout d'une chaîne envoie ses données en plus de celles des capteurs de sa chaîne à une base du même type que dans la première solution. Bien sûr, un système de synchronisation est nécessaire afin d'éviter un « embouteillage » de données au niveau de la base finale. Par contre, pour les capteurs situés en amont du dernier capteur, la synchronisation peut se faire sur la base du premier capteur de la chaîne. C'est lui, qui en envoyant son signal, va mettre en marche le capteur suivant et ainsi de suite.

Dans cette configuration, seule la première phase est modifiée, la deuxième est identique à celle de la solution 1.

4.3.3 Conclusion sur le scénario 1

On l'a vu, les configurations du type du scénario 1 ne sont pas adaptées à un déploiement de capteurs aléatoire nécessaire pour créer un réseau sans lien physique. Dans ce cas, une étude au cas par cas doit être faite afin de déterminer la répartition optimale des capteurs en termes de performances et de consommation. Une fois cette étape réalisée, il faut choisir dans quelle configuration les capteurs vont être utilisés, à savoir celle de la solution 1 ou de la 2, voire d'autres. Pour ce choix-ci, c'est plutôt le coût de l'ensemble qui va être prépondérant, en effet, les modules de la solution 2 qui peuvent

recevoir et émettre seront plus coûteux que ceux de la solution 1, seulement émetteurs. Finalement, seule la base principale, qui récolte toutes les informations, peut faire recourir à l'utilisation d'un réseau d'antennes dans le cas où le récepteur final n'est pas fixe.

4.4 Le scénario 2

Le scénario 2 traite de situations ayant lieu en extérieur. L'environnement est dans ces cas-là souvent dégagé mais les distances à couvrir sont plus grandes que pour des applications en intérieur. L'impact majeur sur de ce dernier point est qu'il faudra plus de puissance pour émettre vers un récepteur éloigné. Comme introduit précédemment, le scénario 2 consiste à déployer un réseau de capteurs sur une zone par lâcher aérien, puis à venir récupérer les données toujours par voie aérienne. Le fait de déployer des capteurs par ce type de voie permet de rendre quasi-aléatoire leur position les uns par rapport aux autres. On peut donc penser que certains capteurs vont être assez proches les uns des autres pour créer un réseau qui va orienter son diagramme vers un récepteur aérien statique ou mobile.

C'est ce que nous allons essayer de modéliser par le biais d'un nouvel algorithme sous Matlab. Comme le code précédent, il utilise toujours le code de Brégains [Bre04] pour visualiser les différentes sorties par contre les entrées et le traitement sont différents.

4.4.1 Code pour le scénario 2

Ce nouveau code va servir à modéliser le scénario 2, il possède quatre fonctions qui permettent de :

- Générer aléatoirement une carte de répartition d'antennes sur une zone,
- Sélectionner toutes les antennes qui sont situées à une distance inférieure ou égale à une distance prédéfinie d'une autre antenne, afin de constituer un réseau
- Choisir le réseau le plus grand
- Calculer les phases de chaque antenne en fonction de l'emplacement du récepteur.

Il nécessite peu d'entrées qui sont :

- La fréquence de travail des antennes,
- Le nombre d'antennes, nb_ant
- La taille de la zone de réception des antennes,
- Les coordonnées du récepteur, $x0, y0, z0$,
- L'écart maximal entre les antennes du futur réseau, $emax$.

Pour voir les différentes étapes réalisées par ce code, nous allons traiter un exemple en prenant 20 capteurs à répartir sur une surface de 5m de côté. Le récepteur est situé à $z=10$ aux coordonnées $x=10$ et $y=10$. La fréquence de travail est de 433MHz ce qui donne une longueur d'onde de 69 cm dans l'air. On choisit un $emax$ inférieur ou égal à une longueur d'onde. Voici ces étapes :

- 1) Génération aléatoire des coordonnées des antennes, mise à 1 des amplitudes et 0 des phases dans un tableau R . Utilisation de la fonction $rand$ de Matlab qui

génère un nombre aléatoire entre 0 et 1. Ce nombre est multiplié par la taille de la zone de réception exprimée en fonction de la longueur d'onde ; On considère ici que les capteurs sont tous dans le même plan $z=0$;

Antennes	X	Y	Z	AMP	PHA
1	3,6892	0,3170	0	1	0
2	4,3022	4,6720	0	1	0
3	4,9220	4,2947	0	1	0
4	3,9278	2,5669	0	1	0
5	0,8880	1,9929	0	1	0
6	0,6697	0,1544	0	1	0
7	4,6957	1,5065	0	1	0
8	1,4777	1,6647	0	1	0
9	2,3353	3,2410	0	1	0
10	0,1261	4,2110	0	1	0
11	2,7952	4,2705	0	1	0
12	1,7394	2,2301	0	1	0
13	0,2712	0,8855	0	1	0
14	3,3140	1,6541	0	1	0
15	4,4924	0,5908	0	1	0
16	4,9421	2,6999	0	1	0
17	3,5346	4,9975	0	1	0
18	1,4392	2,0726	0	1	0
19	2,3242	3,8198	0	1	0
20	4,0910	0,5011	0	1	0

Tab. 6 : Tableau R

- 2) Calcul des distances entre toutes les antennes. Création d'un tableau *dist* de taille $nb_ant \times nb_ant$ en sortie ;
- 3) Recherche dans *dist* des distances inférieures à *emax* et création d'un tableau *Ant* de 2 colonnes comportant tous les couples d'antennes dont l'écart est inférieur à cette valeur. Mise à zéro et effacement des lignes doublons (par exemple, les couples 4 ; 6 et 6 ; 4 n'en font qu'un. Création d'un tableau *Ant_ok* ne comportant que les couples et un Compteur qui va servir par la suite ;

Couples d'antenne		Compteur	Couples d'antenne		Compteur
3	2	1	18	12	1
8	5	1	19	9	1
12	8	1	19	11	1
18	5	1	20	1	1
18	8	1	20	15	1

Tab. 7 : Tableau Ant_ok

- 4) Regroupement des antennes en réseau(x) et choix du réseau le plus grand. Un algorithme complexe rassemble dans un tableau *Tab* les antennes d'*Ant_ok* en réseau. Par exemple avec les couples 1 ;3, 1 ;4, 3 ;5, 2 ;6, 2 ;7 on crée deux

réseaux : 1 ;3 ;4 ;5 et 2 ;6 ;7. Le compteur donne le nombre d'antennes dans chaque réseau à la fin de chaque ligne de *Tab*. Ce compteur sert ensuite à choisir le réseau le plus grand ;

Réseau	Antennes composant le réseau				Compteur
1	3	2	0	0	2
2	8	5	12	18	4
3	19	9	11	0	3
4	20	1	15	0	3

Tab. 8 : Tableau Tab

- 5) Récupération des coordonnées des antennes du réseau choisi (ici le réseau 2). Lecture de *Tab* et remplissage de *X*, *Y*, *AMP* et *PHA*, respectivement les coordonnées en x et y, amplitude et phase des antennes sélectionnées ;

Antennes	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>AMP</i>	<i>PHA</i>
8	1,9702	2,2196	0	1	0
5	1,1840	2,6573	0	1	0
12	2,3192	2,9735	0	1	0
18	1,9190	2,7635	0	1	0

Tab. 9 : Tableaux X, Y, AMP et PHA

- 6) Calcul de la distance entre le récepteur et chaque antenne (*dist2*) puis de l'écart entre ces distances et celle de la première antenne (*ecart*). Cet écart sert à calculer les phases à appliquer *PHAfin*, la première antenne aura donc une phase nulle ;

Antenne	<i>dist2</i>	<i>ecart</i>	<i>PHAfin</i>
8	20,7464	0	0
5	20,9610	0,2146	4,9351
12	20,1597	-0,5867	3,6862
18	20,4887	-0,2577	1,6193

Tab. 10 : Tableaux dist2, ecart et PHAfin

- 7) Affichage de la répartition des antennes, des amplitudes et phase des antennes du réseau choisi et du diagramme 3D du facteur de réseau (Fig. 2- 27 et 2- 28) réalisé par la fonction *Diag3D* à laquelle on passe *X*, *Y*, *AMP* et *PHAfin*. Le choix d'afficher le diagramme en unités linéaires a été préféré aux unités logarithmiques pour plus de clarté dans le repérage du lobe principal. Celui-ci est d'ailleurs bien orienté par rapport au récepteur.

Dans le cas où aucune antenne n'est assez proche d'une autre pour créer un réseau, un message s'affiche pour le signaler. Cette situation peut arriver si on met peu d'antennes sur une grande zone. La rapidité du code est directement liée au nombre d'antennes que l'on place, ce nombre étant souvent utilisé dans les boucles. L'intégralité de ce code est en Annexe D.

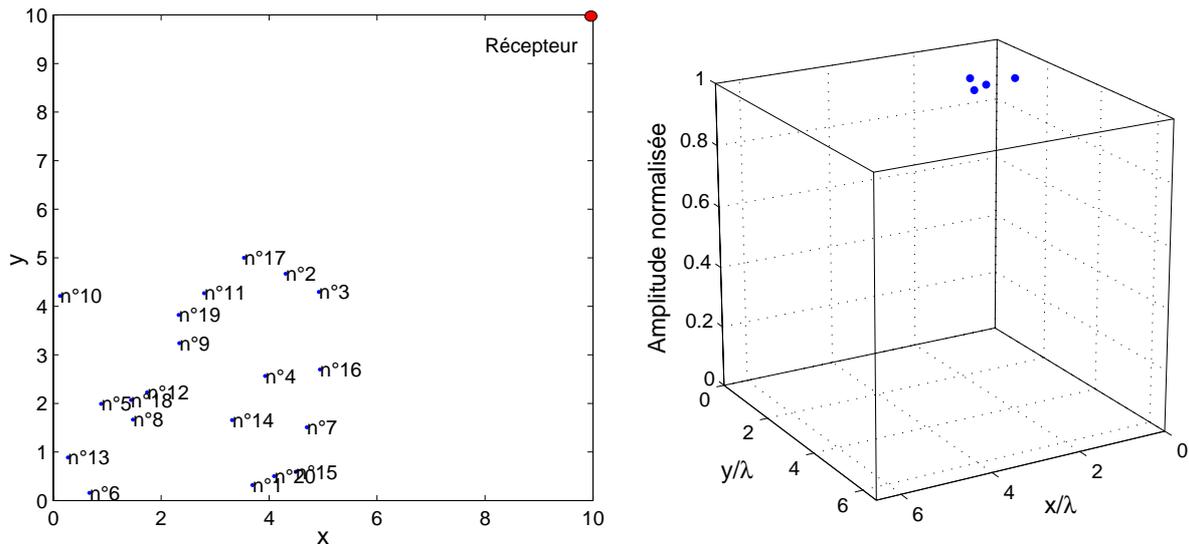


Fig. 2- 27 : Répartition des antennes (à g.) et amplitude des antennes choisies (à dr.)

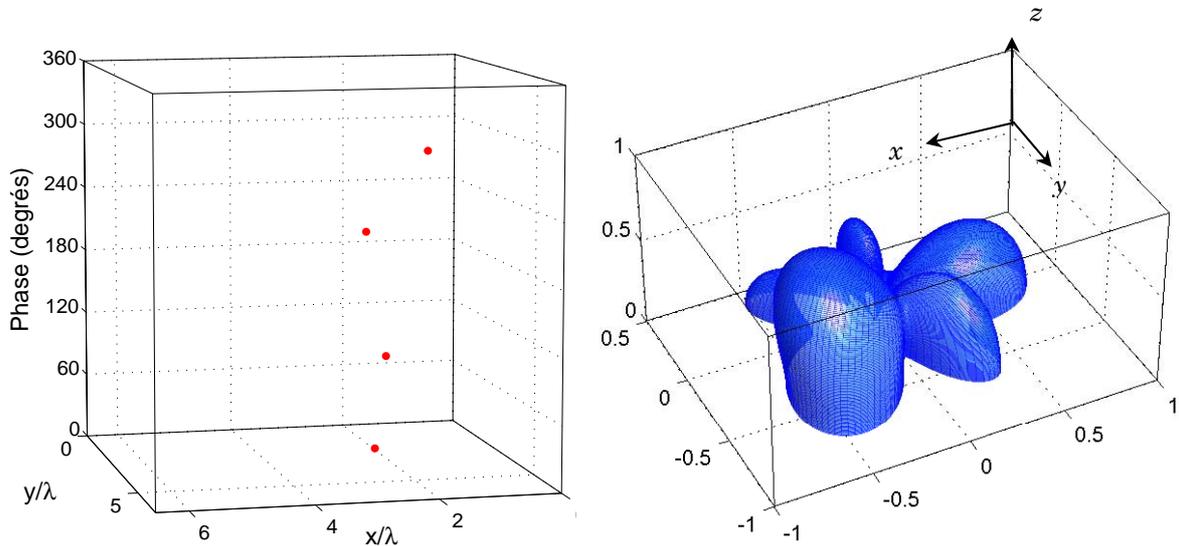


Fig. 2- 28 : Phases des antennes choisies (à g.) et diagramme de rayonnement du réseau (à dr.)

4.4.2 Application du code

Le code précédemment étudié va nous permettre de voir quelle serait la meilleure configuration pour obtenir un réseau dans les conditions du scénario 2. En effet, avant de calculer les phases pour émettre dans une certaine direction, il faut auparavant que le réseau soit constitué à l'arrivée au sol des capteurs. Nous allons voir quelles sont les conditions limites à cette constitution avec trois paramètres qui sont :

- La distance maximale entre les antennes ;
- Le nombre d'antennes ;
- La surface de la zone ;

Tous ces paramètres sont très liés pour des raisons évidentes ; plus la distance maximale sera petite, plus il faudra d'antennes sur la surface pour espérer remplir la condition. Nous allons donc tout d'abord voir comment fixer cette distance.

4.4.2.1 Condition sur l'écart entre antennes

Cette condition pourrait dépendre essentiellement du fait que l'on veut obtenir un réseau avec un écart fixé à une certaine valeur. On serait alors tenté d'utiliser un écart assez grand pour être sûr de trouver au moins deux antennes pour créer notre réseau. La réalité est toute autre car les réseaux obéissent à une contrainte majeure qui prend source dans les équations des réseaux.

Reprenons les arguments des exponentielles complexes de l'équation 1, qui rappelons-le sont égaux à :

$$\phi_N = (N-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \text{ avec } d \text{ la distance entre antennes et } \lambda \text{ la longueur d'onde.}$$

Appelons x le rapport d sur λ et faisons le varier de 0,25 à 1,5 par pas de 0,25. Traçons maintenant, le facteur de réseau B de l'équation 2 pour 5 antennes alignées linéairement ($n=5$). Cette équation s'écrit alors :

$$B = \sum_{n=0}^5 e^{in\phi} = \frac{1 - e^{i5\phi}}{1 - e^{i\phi}} \text{ et on obtient, en coordonnées polaires :}$$

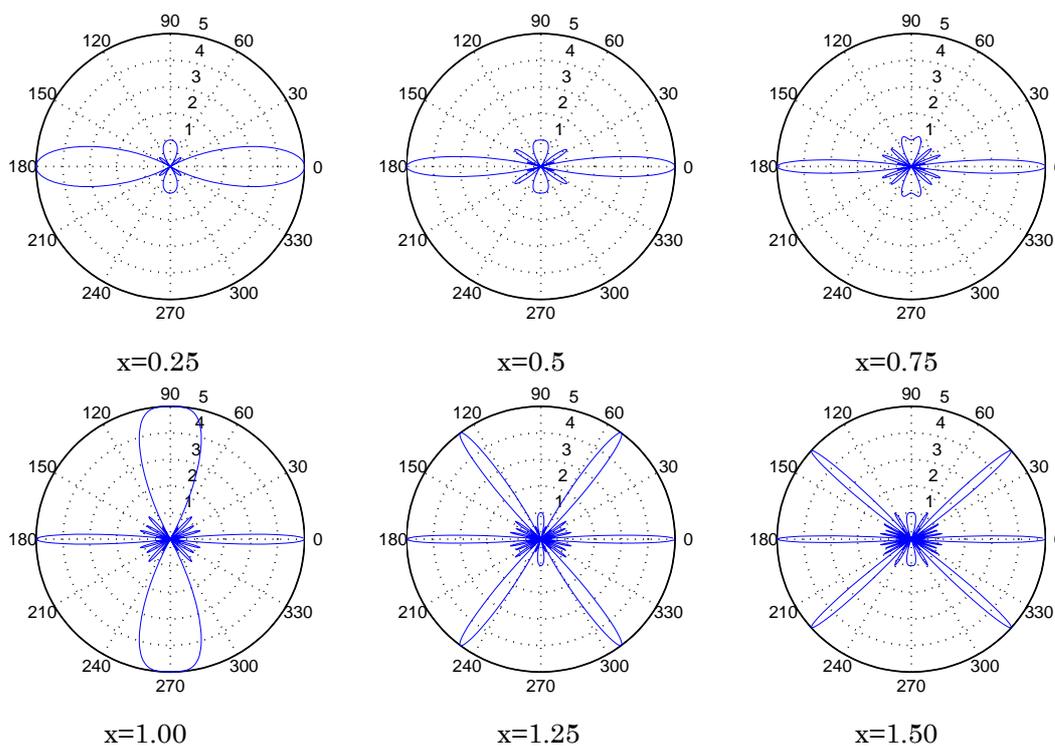


Fig. 2- 29 : Facteur de réseau de 3 antennes pour différents x (d/λ)

Observons maintenant deux cas :

- $x < 1$: ce qui signifie que d est inférieur à λ . On observe dans ce cas qu'il existe deux lobes principaux opposés de grande amplitude et de petits lobes secondaires de faible amplitude ;
- $x \geq 1$: ici l'écart entre antenne est supérieur à la longueur d'onde. On constate que certains lobes secondaires ont atteint l'amplitude des lobes principaux, ce qui fait que le réseau n'est plus directif.

Ce comportement s'observe quelque soit le nombre d'antennes et peut se généraliser à tous les réseaux. On voit donc ici que l'écart maximal entre les antennes doit être inférieur à la longueur d'onde si on souhaite utiliser pleinement les propriétés des réseaux d'antennes.

4.4.2.2 Conditions sur le nombre d'antennes et sur la surface

Les capteurs étant placés aléatoirement sur la zone de réception, il est difficile de savoir combien d'antennes sont nécessaires pour créer un réseau sur une certaine surface. De plus, la fréquence de travail, et donc la longueur d'onde, est aussi un paramètre qui va influencer sur cette condition. Plus on augmentera la longueur d'onde, plus on a de chance de trouver une autre antenne dans un périmètre donné. Or, une grande longueur d'onde signifie une basse fréquence et une grande antenne. Les graphes ci-après montrent comment évolue la longueur d'onde avec la fréquence pour des antennes résonnantes.

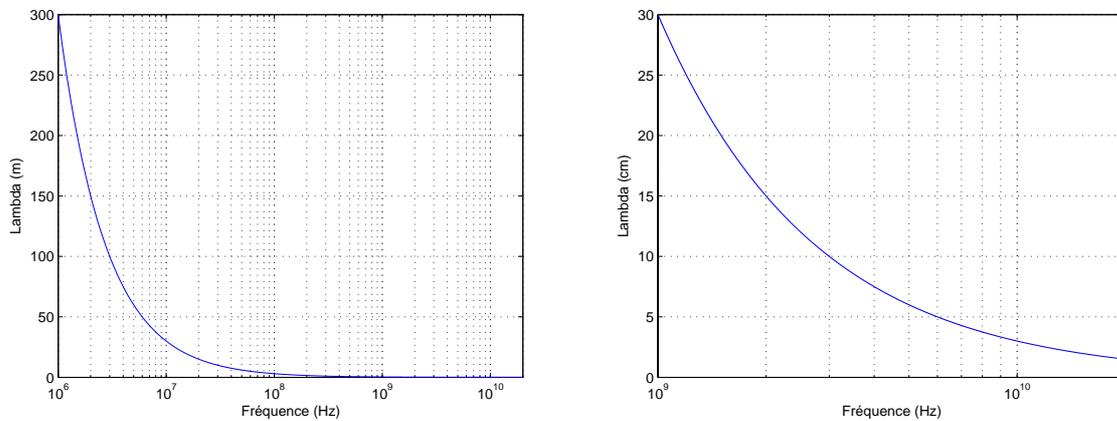


Fig. 2- 30 : Evolution de la longueur d'onde en fonction de la fréquence pour une antenne résonnante à $\lambda/2$ (zoom entre 1 et 20 GHz à dr.)

On voit que pour les fréquences situées au-delà du gigahertz, λ devient inférieure à 30 cm. Pour le standard 2,4 GHz de la bande ISM, il faudrait donc avoir au maximum 12,5 cm entre deux antennes. Cette valeur semble très faible au regard de la taille des zones à couvrir qui font en général plusieurs mètres voire des dizaines de mètres. Il faut donc trouver une loi qui définit le nombre de capteurs à répandre pour créer des réseaux de plus de deux antennes sur une surface et à une fréquence donnée. Le caractère aléatoire de cette donnée fait que nous allons utiliser l'outil statistique en simulant plusieurs fois de suite la répartition d'un nombre de capteurs en relevant à chaque fois combien d'antennes constituent le plus grand réseau créé et le nombre de réseaux possibles (s'il y en a). Il y a ici trois variables qui sont le nombre de capteurs, la taille de la zone de réception et la fréquence. Nous pouvons ramener ce nombre à deux en faisant le rapport du nombre de capteurs sur la surface pour avoir une densité moyenne de capteurs au mètre carré. Nous allons donc prendre plusieurs densités allant de 0,4 à 2 antennes/m² ce qui correspond à répandre entre 40 et 200 capteurs sur 100m². Au niveau des fréquences nous allons nous servir de fréquences déjà utilisées dans les réseaux de capteurs à savoir 0,433, 0,868 et 2,4 GHz. Pour chaque combinaison densité/fréquence nous allons réaliser 50 tirages. Les résultats sont présentés sous la forme

d'histogrammes avec le numéro de l'expérience en abscisse et le nombre d'antennes du réseau le plus grand et de réseaux créés en ordonnée. La taille de la zone est fixée à 100m^2 .

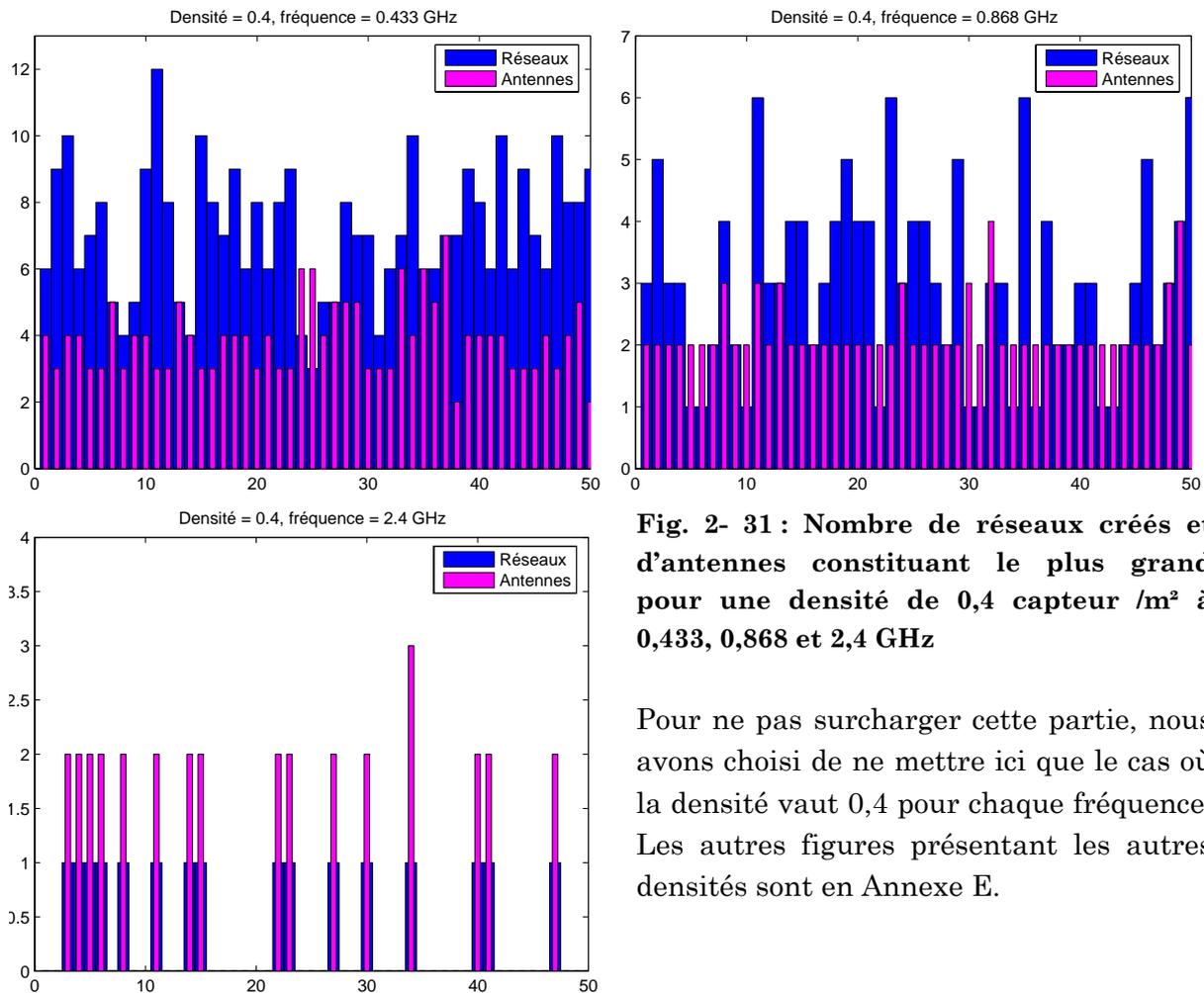


Fig. 2- 31 : Nombre de réseaux créés et d'antennes constituant le plus grand pour une densité de 0,4 capteur /m² à 0,433, 0,868 et 2,4 GHz

Pour ne pas surcharger cette partie, nous avons choisi de ne mettre ici que le cas où la densité vaut 0,4 pour chaque fréquence. Les autres figures présentant les autres densités sont en Annexe E.

Comme on pouvait s'y attendre, plus la densité est faible et la longueur d'onde petite plus il est difficile de créer un réseau. Il arrive même qu'aucun réseau ne soit créé comme c'est le cas certaines fois avec 2,4 GHz jusqu'à une densité de 1,6 antennes/m².

Au niveau des fréquences, il est clair que 0,433 GHz est la plus adaptée car à faible densité on obtient en moyenne un réseau de 3 ou 4 antennes alors qu'à 0,868 ou 2,4 GHz la moyenne est respectivement proche de 2 et proche de zéro. A 2,4 GHz il est rarement possible de créer un réseau de plus de deux antennes, même à forte densité, ce qui est insuffisant pour espérer ensuite avoir une directivité intéressante. La fréquence de 0,868 GHz présente de bons résultats mais pour une densité supérieure à 1,2 antennes/m².

Sur la base de ces expériences qui ne permettent que de montrer la probabilité de créer ou non un réseau et d'en voir sa taille, on peut dégager quelques conclusions :

- Si on recherche la solution la plus économique en termes de nombre de capteurs à déployer il faudra travailler à 0.433 GHz ;
- Si on recherche à optimiser la taille des antennes et donc des capteurs c'est à 2,4 GHz qu'il est préférable d'être ;
- Si, enfin, on recherche un compromis nombre de capteurs à déployer/taille des capteurs, c'est 0.868 GHz qui apparaît comme la plus adaptée.

Le tableau suivant résume ces conclusions (les chiffres entre parenthèse représentent la densité minimale à atteindre si on considère que 4 ou 5 antennes sont un minimum pour créer un réseau capable d'émettre dans toutes les directions) :

Fréquence	Taille des antennes ⁵⁷	Densité minimale
433MHz		  (0.8)
868MHz		 (1.2)
2,4GHz	 	  (8)

Tab. 11 : Résumé des propriétés pour chaque fréquence

On constate là un dilemme puisqu'en diminuant la taille des antennes (et en augmentant alors la fréquence) on réduit les chances de créer un réseau d'antennes.

Le choix de la fréquence est donc dépendant d'impératifs plutôt économiques. Il existe d'autres types d'antennes fonctionnant à $\lambda/4$ ou $\lambda/100$ mais celles-ci sont souvent le fruit « d'astuces électriques » [Cho03] ou utilisent des matériaux avec des propriétés spécifiques [Zio03]. Ces types d'antennes sont déjà l'objet de beaucoup de travaux et nous avons choisi de ne pas les étudier car même si elles présentent des dimensions intéressantes, leur conception est longue et leurs performances moyennes. Voyons maintenant comment, en contexte réel, un tel scénario pourrait être mis en place.

4.4.3 Application en conditions réelles

Ce scénario se déroulant en extérieur trouve des applications dans la surveillance d'un environnement à des fins militaires ou scientifiques. Dans les deux cas, il peut y avoir nécessité de déployer les capteurs par voie aérienne afin de le faire en prenant le moins de risques ou bien en évitant de venir perturber l'environnement par une présence humaine. Un largage par avion ou hélicoptère à basse altitude semble possible, avec, dans le deuxième cas la possibilité d'influer sur la répartition au sol en essayant de concentrer plusieurs capteurs à un endroit afin d'augmenter les chances d'obtenir un réseau. On va cependant rester dans le cas où les capteurs sont littéralement jetés sans aucune organisation. Détaillons maintenant chaque phase de ce scénario.

4.4.3.1 Largage/atterrissage

Cette phase de largage et d'atterrissage est une phase assez violente pour le capteur et des précautions sont à prendre afin d'en garder l'intégrité. Il ne s'agit pas en effet que cette chute rende le capteur non opérationnel. Deux options sont possibles pour éviter cela : soit le packaging et la structure du capteur sont très résistants et font en sorte que ce dernier rebondisse avant de se stabiliser, soit les capteurs sont dotés de sorte de parachutes qui ralentissent la chute et font que l'atterrissage se fait en douceur.

⁵⁷ Pour des antennes $\lambda/2$

Mais dans les deux configurations il faut que le packaging soit résistant pour supporter des changements de températures, des températures extrêmes, l'humidité, l'érosion... des phénomènes que l'on trouve dans la nature. Un autre point est à mettre en lumière lors de cet atterrissage, c'est la position de l'antenne. Il faut bien sûr que celle-ci soit correctement orientée, c'est-à-dire, qu'elle ne se trouve pas face au sol par exemple. Nous verrons dans le chapitre 3 un exemple de solutions à ce problème.

4.4.3.2 Localisation

Une fois au sol, pour pouvoir créer un réseau d'antennes, tous les capteurs doivent pour se situer par rapport aux autres. Une phase de localisation est donc nécessaire. Elle peut-être amorcée par un signal extérieur envoyé à tous les capteurs. Cette fonction appliquée aux réseaux de capteurs sans fil est l'objet de beaucoup de travaux depuis le début des années 2000. En effet, certaines applications nécessitent de connaître les positions des capteurs et ceux-ci étant autonomes, il faut que cette reconnaissance se fasse par les capteurs eux-mêmes, on parle alors d'auto-localisation. On considèrera ici que les capteurs sont fixes car les rendre mobiles implique l'utilisation du temps-réel et demande des ressources de calculs importantes.

Il existe deux grandes catégories de localisation, celles utilisant des nœuds de référence dont on connaît la position absolue et celles n'utilisant pas de références. Quelque soit la catégorie utilisée, il existe plusieurs techniques de mesure permettant d'évaluer des distances [PAT05]:

- RSS (Received Signal Strength): le RSS est défini comme la tension mesurée par un indicateur d'un récepteur lors de la réception d'un signal. L'un des avantages de cette technique est qu'elle est simple à implémenter au niveau hardware et donc peu coûteuse. De plus, la mesure se faisant directement sur le signal, ce dernier ne nécessite pas d'ajout de bande passante ni d'énergie supplémentaire. Un calibrage est nécessaire au préalable pour avoir des mesures absolues des distances. Le RSS comporte cependant des sources d'erreur dues principalement aux signaux multi-trajets et au shadowing qui existent dans les environnements denses en obstacles, typiquement en intérieur ou les milieux naturels avec reliefs ou nature abondante. Des modèles statistiques sont utilisés pour limiter ces erreurs qui croissent avec la distance. Cette technique est donc plus efficace dans des réseaux denses ;
- TOA (Time Of Arrival) : le TOA est une technique simple qui consiste à mesurer le temps que met un signal pour aller d'un point à un autre. Connaissant la vitesse de celui-ci, on remonte à la distance. Les sources d'erreur sont ici liées au bruit et aux signaux multi-trajets. Idéalement, les nœuds du réseau doivent être synchronisés pour n'avoir qu'à soustraire l'heure d'émission à l'heure locale. Cependant, la meilleure précision obtenue dans des réseaux de capteurs était de quelques microsecondes en 2004 [Siv04] ce qui ne permet pas de travailler avec des signaux RF. Il faut donc passer en mode asynchrone où le calcul se fait sur le temps mis pour un aller-retour entre deux capteurs. L'utilisation de signaux ultra large

bande (UWB) permet d'atteindre une grande précision de mesure, 12cm pour les plus performants mais cette technique-ci requiert des ressources importantes en bande passante et en énergie.

- AOA (Angle Of Arrival) : l'AOA est une technique complémentaire des deux précédentes car elle permet d'avoir des informations sur la direction d'où provient un signal. Il y a deux façons de réaliser cette mesure. La première consiste à utiliser un réseau d'antennes parfaitement connu et de comparer l'écart de temps mesuré entre la réception du même signal sur chaque antenne. De cet écart on déduit une phase qui va permettre de situer l'émetteur comme expliqué dans [Nic03]. L'autre approche consiste à combiner plusieurs mesures RSS prises par plusieurs antennes directives dont les diagrammes se recoupent. L'AOA est calculé à partir des ratios entre les indicateurs RSS. Ces deux approches nécessitent l'utilisation de plusieurs antennes, ce qui augmente le coût et la taille d'un capteur. Des signaux acoustiques ont été déjà utilisés pour des applications environnementales mais avec l'utilisation de fréquences millimétriques, nécessitant de petites antennes, ce sont les signaux RF qui pourraient se généraliser dans ce domaine qui souffre des mêmes sources d'erreur que le TOA, à savoir les trajets multiples et le bruit. Une précision de 3° a été obtenue avec la deuxième approche en 2004 [Ash04].

Dans notre cas, il n'est pas nécessaire de connaître la position absolue d'un capteur. Cela implique généralement l'utilisation du GPS et amène donc un surcoût dans la conception de ce dernier. Notre objectif est de faire que tous les capteurs sondent leur environnement pour détecter un autre capteur à une distance inférieure à la longueur d'onde à laquelle il émet. C'est pourquoi le RSS semble être la solution la plus intéressante parce que techniquement réalisable. En effet, avec des ondes RF, utiliser le TOA sur des distances si courtes demande la détection de durées de l'ordre de la nanoseconde à 400MHz, performance difficilement réalisable pour des dispositifs autonomes à basse consommation. En RSS, la calibration doit être capable de faire qu'un capteur puisse discriminer le signal d'un autre capteur situé à une distance inférieure à λ de celui d'un capteur plus éloigné.

Passé ce stade, chaque capteur sait combien il a de voisins à la distance requise. S'en suit alors un traitement informatique de cette information.

4.4.3.3 Constitution du réseau, comptage, et choix

La constitution des réseaux requiert des ressources informatiques dont le but final est de déterminer quel est le réseau le plus grand en termes de nombre de capteurs. Il s'agit ici de réaliser la fonction décrite dans la partie 4 de la section 4.4.1 de ce chapitre qui consiste à regrouper les capteurs en réseaux de sorte à ce que chacun ait un autre capteur distant que moins de λ (qu'on appellera C_OK), reconnaître les doublons et compter le nombre de capteurs dans un réseau. Dans des conditions réelles, voilà comment pourrait se transcrire cette fonction :

- Chaque capteur envoie une trame contenant son identifiant précédé de 1 à tous les C_OK ;
- Chaque capteur qui a reçu une ou plusieurs trames les compile pour annuler les doublons et renvoie le résultat en y ajoutant son identifiant précédé de 2 à tous ses C_OK ;
- Et ainsi de suite jusqu'à ce que la trame reçue à N soit identique à celle reçue à N-1, si c'est le cas, un STOP est inséré dans la trame à envoyer et le capteur émet encore une dernière fois puis n'accepte plus rien ;

Bien sûr, pour ne contacter que ses C_OK, chaque capteur devra émettre à une puissance faible. Ci-dessous est présenté un exemple de ce que chaque capteur recevra à chaque étape de la recherche avec le placement suivant :

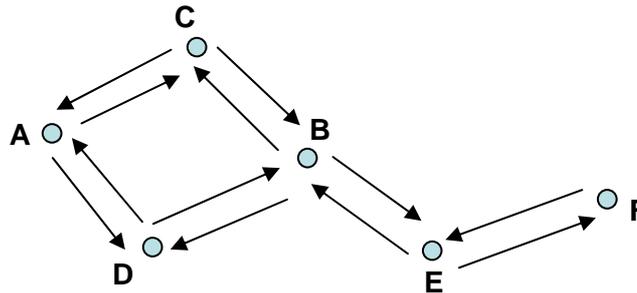


Fig. 2- 32 : Exemple de placement des capteurs dans un réseau

Dans le tableau ci-dessous la deuxième colonne montre à combien de capteurs s'adresse chaque capteur. Dans les autres colonnes, les lettres en gras informent sur la provenance de la trame et la ligne en italique présente la trame réémise sans le numéro. Les cases mises en évidence correspondent à l'apparition d'un STOP.

Capteur	C_OK	1	2	3	4	5
A	C, D	1 C 1 D <i>ACD</i>	2 CAB 2 DAB <i>ABCD</i>	3 CABDE 3 DABCE <i>ABCDE</i>	4 CABDEF 4 DABCEF <i>ABCDEF</i>	5 STOPCABDEF 5 DABCEF <i>STOPABCDEF</i>
B	C, D, E	1 C 1 D 1 E <i>BCDE</i>	2 CAB 2 DAB 2 EBF <i>BACDEF</i>	3 CABDE 3 DABCE 3 EBCDF <i>STOPBACDEF</i>		
C	A, B	1 A 1 B <i>CAB</i>	2 ACD 2 BCDE <i>CABDE</i>	3 ABCD 3 BACDEF <i>CABDEF</i>	4 ABCDE 4 STOPBACDEF <i>STOPCABDEF</i>	
D	A, B	1 A 1 B <i>DAB</i>	2 ACD 2 BCDE <i>DABCE</i>	3 ABCD 3 BACDEF <i>DABCEF</i>	4 ABCDE 4 STOPBACDEF <i>STOPDABCEF</i>	
E	B, F	1 B 1 F <i>EBF</i>	2 BCDE 2 FE <i>EBCDF</i>	3 BACDEF 3 FBCE <i>EABCDF</i>	4 STOPBACDEF 4 FBCDE <i>STOPEABCDF</i>	
F	E	1 E <i>FE</i>	2 EBF <i>FBE</i>	3 EBCDF <i>FBCDE</i>	4 EABCDF <i>FABCDE</i>	5 STOPEABCDF <i>STOPFABCDE</i>

Tab. 12 : Exemple d'échanges d'informations entre les capteurs de la fig. 2-32

Dans cet exemple, on voit qu'il faut cinq étapes pour arriver à un comptage complet du réseau. C'est le capteur B qui est le premier à terminer à l'étape 3. Ses C_OK, à savoir C, D, E, terminent à l'étape 4 et les derniers capteurs, A et E, à l'étape 5.

Bien sûr, cette méthode n'a pas la prétention d'être la plus performante, ce travail relève plutôt de gens travaillant dans les protocoles ou le routage de données dans la thématique des réseaux de capteurs comme le font les gens de l'équipe DRAKKAR du laboratoire d'informatique de Grenoble (LIG)⁵⁸ par exemple.

Une fois le recensement des capteurs en présence réalisé, un capteur de chaque réseau est désigné et se charge de transmettre la taille de son réseau à tous les autres capteurs. On appellera ce capteur MAITRE. Une comparaison est ensuite faite pour indiquer le plus grand réseau avec critère départiteur en cas d'égalité. Là aussi, un algorithme de routage serait utile pour réaliser cette opération. Lorsque ce réseau est défini, tous les capteurs sauront qu'ils doivent diriger leurs informations vers le MAITRE du réseau. Ce capteur devient alors le centre du réseau.

Le résumé de cette étape est décrit dans les figures suivantes :

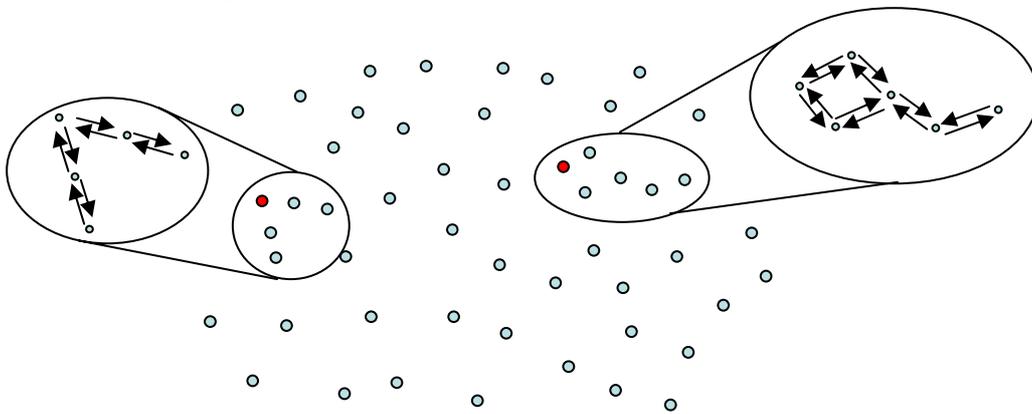


Fig. 2- 33 : Constitution des réseaux d'antennes

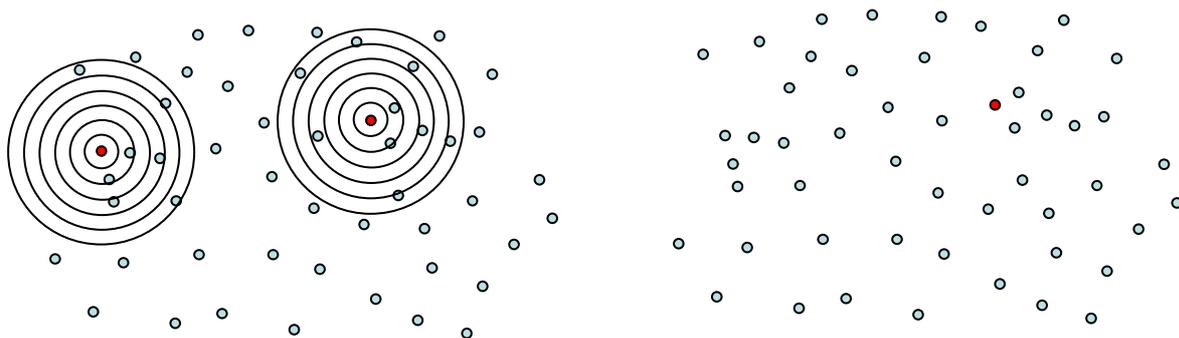


Fig. 2- 34 : Comparaison de la taille des réseaux (à g.) et choix du capteur MAITRE (à dr.)

4.4.3.4 Emission vers le récepteur

Le récepteur peut ne pas être en permanence présent pour récupérer les informations. Il faut donc que celles-ci soient stockées jusqu'à ce qu'un récepteur les demande. Il faut donc que ce dernier, quand il est prêt à recevoir des données, le fasse

⁵⁸ <http://drakkar.imag.fr/>

savoir au MAITRE. Pour cela, il peut émettre un signal caractéristique à tout le réseau. Ce signal serait l'initiateur de plusieurs événements :

- A l'intérieur du réseau d'antenne choisi, chaque capteur relève le moment où il a reçu le signal du récepteur. Cette donnée est collectée par le MAITRE et va servir à définir la phase à appliquer sur chaque antenne pour émettre dans la direction du récepteur ;
- Tous les capteurs envoient les données qu'ils ont stockées au MAITRE et celui-ci les transfère aux capteurs de son réseau avant d'émettre vers le récepteur.

C'est bien sûr cette phase d'émission qui demandera le plus d'énergie aux capteurs du réseau car la distance à couvrir jusqu'au récepteur pourrait atteindre plusieurs dizaines de mètres.

4.4.4 Solution plus simpliste

La réussite de la solution décrite précédemment dépend complètement de l'agencement des capteurs au sol. Il existe un risque, minimisable mais réel, qu'aucun réseau ne soit créé et donc que la communication avec le récepteur soit difficile. Pour empêcher cela, il pourrait être possible de s'affranchir de la procédure de localisation et du choix du réseau d'antennes le plus grand en s'assurant dès le largage que des capteurs auront le placement adéquat pour constituer un réseau. Dans ce but, il suffirait de lier certains capteurs qui constitueront un réseau d'antennes entre eux par le biais d'une structure souple résistante qui, une fois au sol, prendrait la forme voulue au départ. La présence de cette structure pourrait même permettre de n'utiliser qu'un seul capteur et de le lier physiquement avec des émetteurs avec antennes afin d'éviter des communications sans fil plus coûteuses en énergie.

C'est au sol que cette structure devra se faire connaître auprès des autres capteurs en envoyant des trames qui seront relayées dans tout le réseau. La suite est identique à la solution précédente. Un récepteur déclenche la transmission des données du réseau de capteurs vers le réseau d'antennes via un signal qui servira aussi à le situer afin de le viser grâce au jeu des phases des antennes du réseau.

4.4.4.1 Choix et définition de la structure

Concernant la structure, elle doit avoir une forme plane pour que les antennes soient toutes près du sol et présenter une symétrie de rotation afin de ne pas privilégier de directions. Si les antennes sont placées et espacées linéairement sur la périphérie de la structure, on peut voir qu'avec 3 antennes, c'est un triangle équilatéral qui ressortirait, avec 4, un carré etc. A mesure qu'on augmente le nombre d'antennes, la structure se rapproche du cercle, c'est donc cette forme qui répond le mieux aux critères énoncés. Le choix a été fait de disposer un capteur au centre d'un cercle de diamètre λ et de mettre les émetteurs sur le cercle lui-même.

4.4.4.2 Choix du nombre d'antennes

Pour déterminer le nombre minimal d'antennes à mettre dans la structure, des simulations ont été réalisées. Elles ont porté sur l'étude des diagrammes de

rayonnement obtenus pour des structures dont on fait varier le nombre de capteurs. Les résultats sont présentés pour une émission lorsque le récepteur est exactement 10λ au-dessus de la structure (diagrammes de gauche) et lorsqu'il est à une distance de $10\sqrt{3}\lambda$ à 45° par rapport au centre de la structure dans la direction xy (voir figures suivantes).

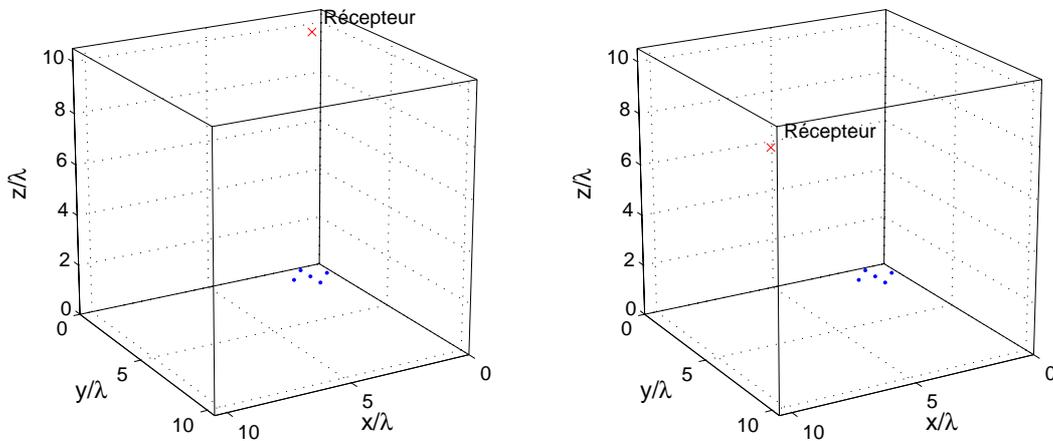


Fig. 2- 35 : Récepteur au dessus de la structure (à g.) et à 45° (à dr.)

Les diagrammes de rayonnement ont été tracés pour 5, 7, 9, 10 et 11 antennes, leur origine est à chaque fois prise au centre de la structure :

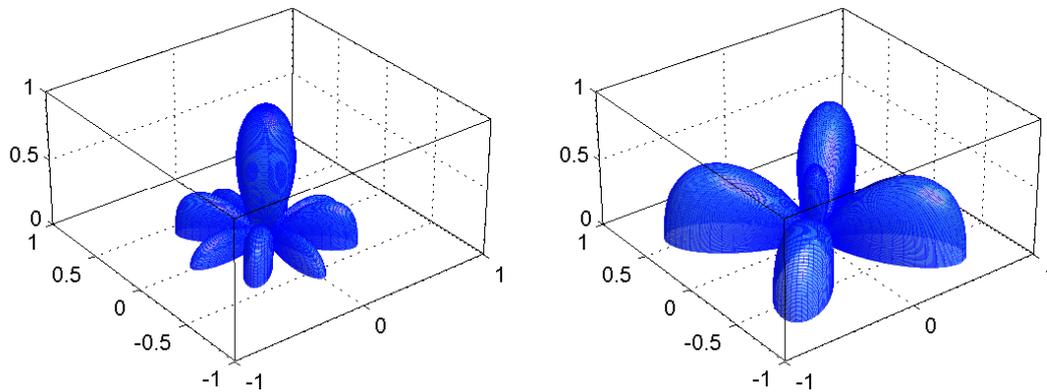


Fig. 2- 36 : Diagrammes pour 5 antennes

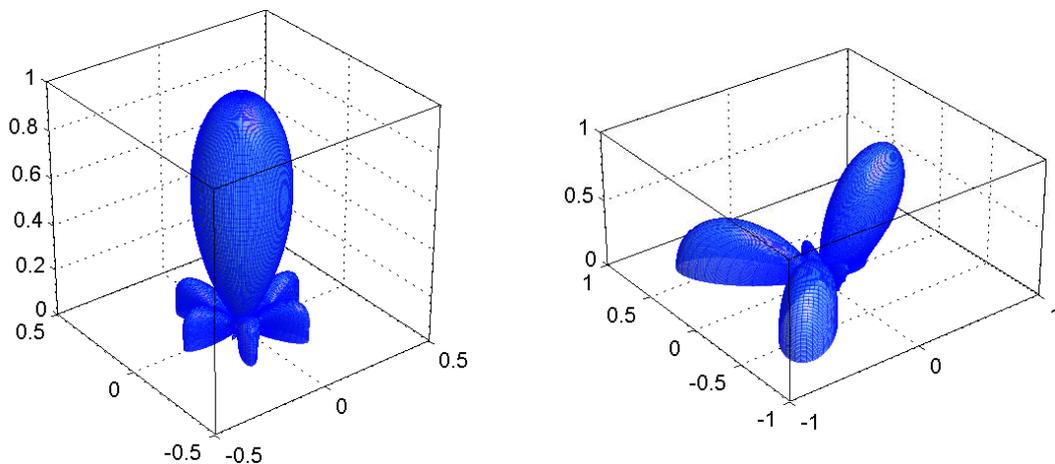


Fig. 2- 37 : Diagrammes pour 7 antennes

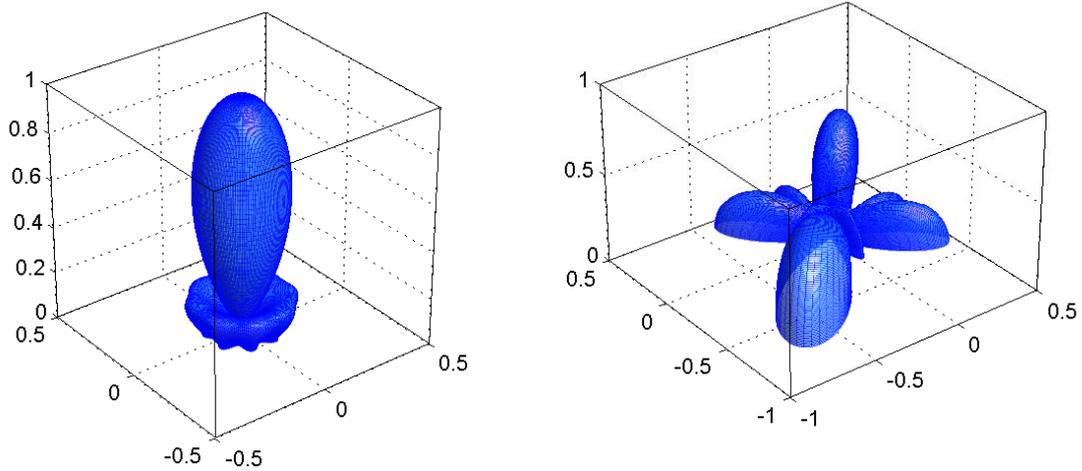


Fig. 2- 38 : Diagrammes pour 9 antennes

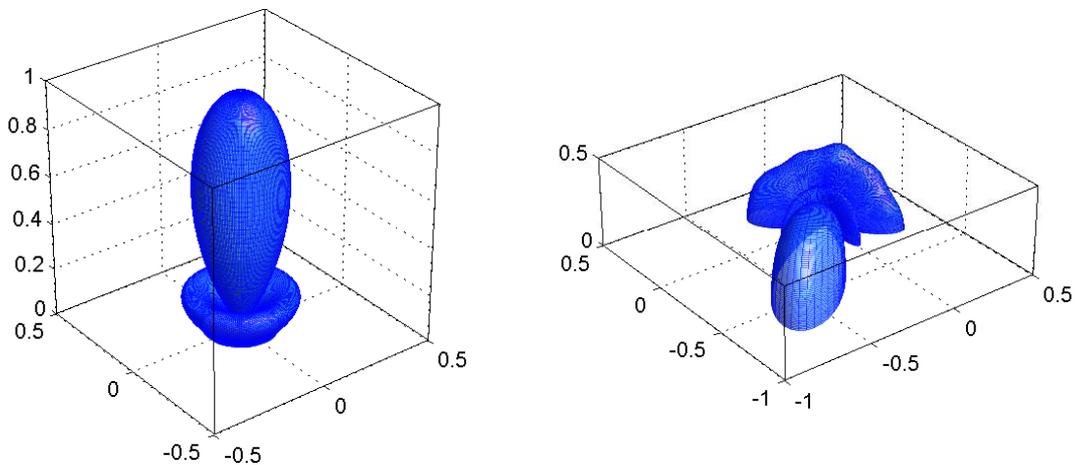


Fig. 2- 39 : Diagrammes pour 10 antennes

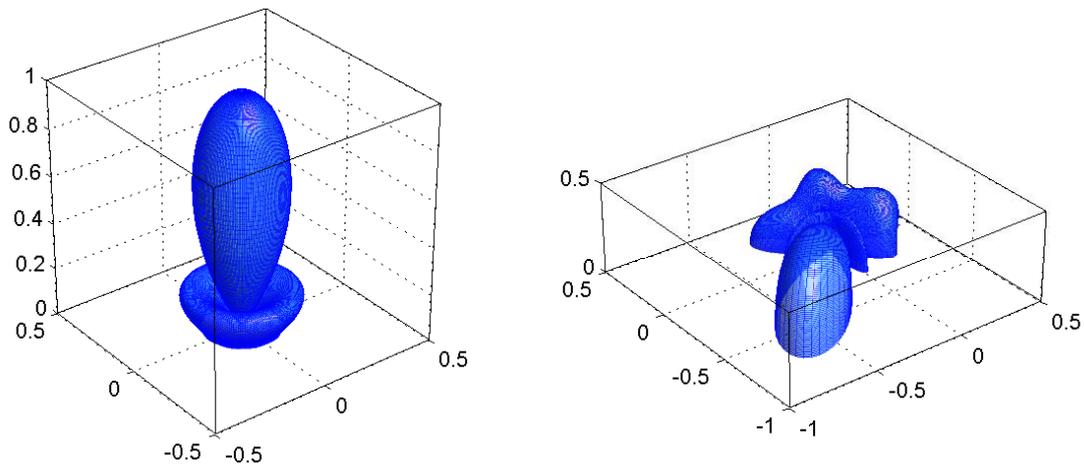


Fig. 2- 40 : Diagrammes pour 11 antennes

Toujours pour plus de clarté, les diagrammes sont présentés en échelle linéaire. De ce comparatif, il ressort que 10 antennes (1 au centre et 9 autour distantes de λ tous les 40° , Fig. 2- 41) sont un minimum pour parvenir à une bonne directivité sans gros lobes secondaires. D'autres simulations non présentées ici montrent que le réseau balaye bien les directions situées dans le demi-espace le surplombant. Une telle structure, à 433MHz aurait un diamètre de 69 cm.

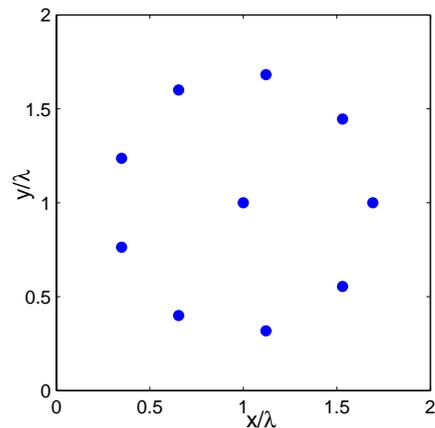


Fig. 2- 41 : Configuration à 10 antennes

4.4.4.3 Optimisation

L'utilisation de cette structure permettrait plusieurs optimisations au niveau des capteurs.

La première concerne leurs dimensions. En effet, seuls les capteurs composant la structure doivent émettre à une fréquence donnée, 433MHz par exemple. Rien n'empêche les autres de travailler à 2,4GHz et ainsi utiliser des antennes plus petites qui réduisent donc leurs dimensions. Cela implique bien sûr que les capteurs de la structure puissent recevoir cette fréquence.

L'autre optimisation porte sur la structure elle-même. Ses dimensions pourraient permettre l'utilisation de cellules photovoltaïques disposées partout où il n'y a pas de capteurs ce qui augmenterait sa durée de vie. Voilà comment pourrait se présenter une telle structure :

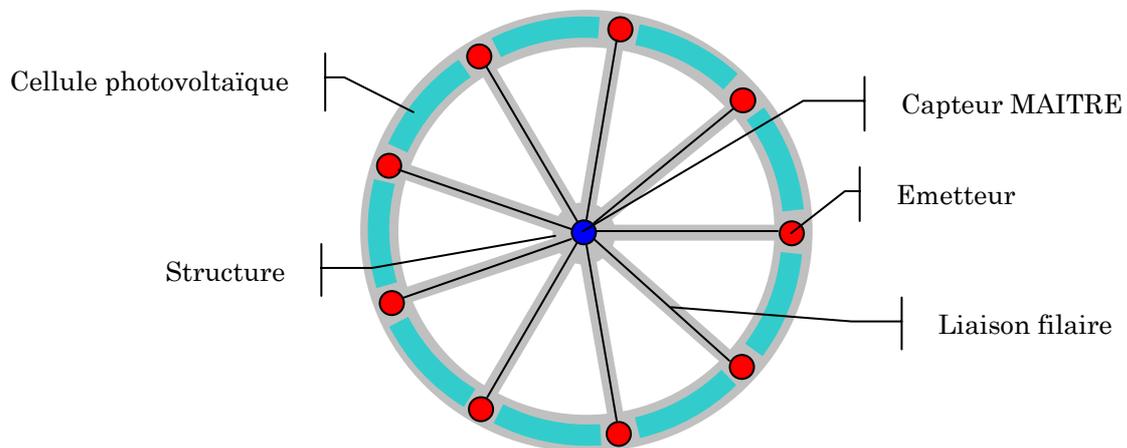


Fig. 2- 42 : Exemple de structure

Le capteur central correspond au MAITRE, sont liés à lui les émetteurs via une liaison filaire protégée de l'extérieur. Cette liaison a pour but de transférer les données à émettre ainsi que la phase à appliquer à chaque émetteur. Cette tâche, ajoutée à celle consistant à récupérer toutes les données des capteurs du réseau, implique un gros travail de la part du capteur MAITRE, ce qui nécessite l'ajout de cellules photovoltaïques qui viendraient charger une batterie. Les émetteurs, constitués d'une tête émettrice

incluant antenne et déphaseur, n'ont pas besoin d'embarquer une grosse unité de traitement, leur tâche consistant seulement à envoyer les données transmises par le MAITRE avec la phase, elle aussi transmise.

Cette solution simplifiée de la précédente permet de relâcher les contraintes au niveau du largage des capteurs et assure une réussite du scénario.

4.4.5 Conclusion sur le scénario 2

Ce qui précède l'atteste, le scénario 2 est plus propice à l'utilisation d'antennes en réseaux fussent-elles bien disposées pour en former un. Avec le code développé sous Matlab nous avons mis en évidence dans une première partie que cette condition est dépendante de facteurs comme la méthode de largage, la densité de capteurs et la longueur d'onde utilisée pour communiquer entre capteurs. Dans une deuxième partie, nous avons réduit ou éliminé l'impact de ces facteurs en présentant un réseau d'antennes « artificiel » porté par une structure. Des essais en conditions réelles seraient bien sûr utiles pour valider les simulations et les conclusions qu'elles amènent.

Au niveau des capteurs et de leur partie traitement des informations, il apparaît que le logiciel embarqué doit pouvoir accomplir des tâches complexes telles que la localisation des capteurs environnants ou le routage d'informations permettant de configurer le réseau tout cela « en réseau » avec les autres capteurs.

5 Conclusion du chapitre 2

Les réseaux d'antennes sont devenus un sujet d'étude pour les personnes impliquées dans les réseaux de capteurs car leur faculté d'orienter un signal vers une direction précise les rend intéressants dans un domaine où la consommation d'énergie est un point critique.

L'objectif de ce chapitre était de voir, au travers de scénarios, s'il était possible d'utiliser les propriétés des réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs sans fil en utilisant les nœuds dudit réseau. Ces scénarios sont au nombre de deux et chacun est caractéristique d'une utilisation des réseaux de capteurs sans fil ; l'un traite d'une application en intérieur et l'autre d'une application en extérieur, deux milieux ayant leurs spécificités propres.

Il est montré que pour une application en intérieur il est quasi impossible de créer un tel réseau car l'emplacement des capteurs répond à des exigences autant pratiques qu'économiques qui font que la constitution d'un réseau d'antennes n'est pas envisageable aux fréquences usuelles rencontrées à savoir 433 MHz, 868 MHz et 2,4 GHz. En effet, une condition sine qua non pour faire qu'un réseau d'antennes soit efficace ; c'est-à-dire qu'il émet une grande partie de son énergie dans une direction donnée ; est que celles-ci soient distantes de moins de la longueur d'onde à laquelle elles émettent. Condition difficilement réalisable si les capteurs sont répartis uniformément dans un volume. Malgré tout, une solution existe pour utiliser un réseau d'antennes. Il s'agit de le placer sur un des nœuds et que celui-ci s'en serve pour atteindre un

récepteur. On sort alors du cadre du chapitre qui est rappelé plus haut mais cette solution trouve son utilité dans des cas où le récepteur est mobile.

L'étude du scénario se déroulant en extérieur a permis de montrer qu'il était dans ce cas possible de créer un réseau d'antennes avec les nœuds du réseau. La condition initiale étant que les capteurs soient déployés aléatoirement et que certains d'entre eux soient assez proches pour constituer un réseau avec un critère de distance maximale défini auparavant. Pour remplir ce critère, des recommandations en termes de densité de capteurs et de fréquence à utiliser ont été faites sur la base de simulations. Une procédure a été ensuite définie afin que les capteurs se localisent entre eux et qu'au final un capteur faisant partie du réseau le plus grand soit désigné comme l'agrégateur des données émises par l'ensemble des capteurs du réseau avant émission vers un récepteur situé au-dessus, en altitude. Cette première solution pouvant conduire à la non-crédation d'un réseau, une deuxième a été présentée. Elle consiste à disposer neuf émetteurs sur une structure circulaire au centre de laquelle un capteur est mis. Cette structure, constituant un réseau d'antennes (liées physiquement), est déposée au même endroit que les autres capteurs et le capteur central y joue le rôle d'agrégateur. En plus de l'avantage d'avoir avec certitude un réseau, il est possible d'implanter sur cette structure des cellules photovoltaïques pouvant apporter de l'énergie en plus de celle des batteries et même charger celle-ci. Cependant cette solution nous fait perdre la souplesse du sans fil.

Cette étude a mis en lumière le fait qu'il est plausible d'utiliser les nœuds du réseau comme constituants d'un réseau d'antennes mais dans certaines conditions qui peuvent cependant ne pas être remplies avec certitude. Par contre, l'utilisation d'un réseau d'antennes, qu'il tienne sur un capteur ou sur une structure est à recommander vu les économies d'énergie qu'il peut apporter en optimisant la liaison émetteur/récepteur. Bien sûr, les scénarios développés sont exhaustifs et ne peuvent pas représenter toutes les applications visées par les capteurs sans fil mais il est aisé de s'imaginer comment les utiliser dans d'autres configurations.

CHAPITRE III : CONCEPTION D'ANTENNES

Sommaire

Chapitre III : Conception d'antennes.....	99
1 Introduction	101
2 Paramètres fondamentaux des antennes	101
2.1 Définitions.....	101
2.2 Types d'antennes.....	104
2.3 Intégration des antennes	105
3 Antennes dans les réseaux de capteurs	107
3.1 Revue des antennes utilisées	107
3.2 Travaux spécifiques sur les antennes des plates-formes	107
3.3 Problématique.....	109
4 Concept d'antennes-package	109
4.1 Motivation.....	109
4.2 Design des antennes	109
4.3 Antenne « dé »	110
4.4 Antennes hémisphériques.....	115
4.5 Antennes cubiques	120
4.6 Antenne demi-boule agile	137
5 Conclusion du chapitre 3.....	155

1 Introduction

L'antenne est le premier/dernier maillon d'une chaîne de réception/émission. Elle est l'interface entre le circuit et l'espace libre qui transforme un signal électrique en champ électromagnétique et inversement. A ce titre, elle doit avoir des propriétés spécifiques à l'utilisation que l'on veut en faire. De la gigantesque antenne parabolique capable de capter des signaux provenant du fin fond de l'espace à l'antenne intégrée de notre téléphone portable, il en existe une multitude de taille et forme différentes.

Pour ce qui concerne les réseaux de capteurs sans fil, les antennes doivent permettre aux capteurs de communiquer entre eux ou avec une base. Compte tenu du faible encombrement recherché, l'antenne doit se faire discrète sans pour autant perdre en efficacité et c'est dans cet esprit que ce chapitre a été rédigé. Nous allons tout d'abord nous intéresser à quelques paramètres fondamentaux des antennes puis présenter un état de l'art des antennes utilisées jusqu'à présent dans les réseaux de capteurs. La conclusion de cette partie amènera la suivante qui détaillera la conception de nouvelles antennes pouvant être amenées à servir pour ce type d'application, mises en réseau comme il l'a été présenté dans le chapitre précédent, ou non.

2 Paramètres fondamentaux des antennes

Pour caractériser une antenne, il a fallu établir certaines définitions. Pour cela, un standard définissant les termes propres aux antennes a été rédigé par l'IEEE et est référencé sous le nom STD 145-1993 [IEE93].

2.1 Définitions

Toutes les définitions qui vont suivre ont été élaborées en se plaçant sur une sphère de rayon R autour de l'antenne. Cette distance, appelée distance de Fraunhofer a été calculée en considérant qu'un retard de $\lambda/16$ entre deux points d'une onde sphérique sur un plan est négligeable. On travaille donc en champ lointain de l'antenne, là où les composantes du champ électromagnétique sont considérées comme planes. R est ainsi défini:

$$R > \frac{2d^2}{\lambda} \quad \text{Éq. 8}$$

Où d est la plus grande dimension de l'antenne et λ la longueur d'onde du champ rayonné.

La notation des puissances sera la suivante :

- P_{DISP} pour la puissance disponible au niveau du générateur alimentant l'antenne ;
- P_{INJ} pour la puissance effectivement injectée dans l'antenne ;
- P_{RAY} pour la puissance totale rayonnée par l'antenne ;
- $P_{\text{RAY}}(\theta, \varphi)$ pour la puissance totale rayonnée par l'antenne dans la direction (θ, φ)

2.1.1 Antenne isotrope

Une antenne isotrope rayonne dans toutes les directions de l'espace de manière homogène. Purement théorique, elle sert de référence pour caractériser la directivité ou le gain d'une antenne. Son diagramme de rayonnement est une sphère :

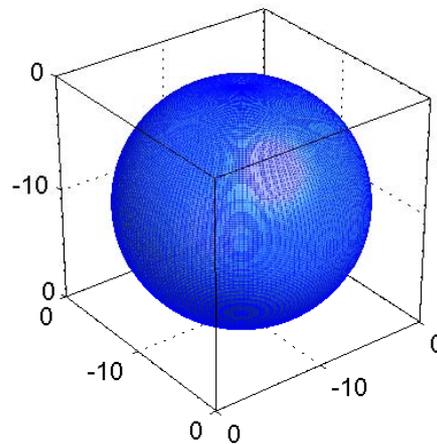


Fig. 3- 1 : Diagramme de rayonnement d'une antenne isotrope

2.1.2 Puissance rayonnée

Le champ électromagnétique issu de l'antenne se décompose en un champ électrique E et un champ magnétique H . En intégrant la somme de ces deux champs dans un angle solide $d\Omega$ compris dans la sphère définie précédemment on obtient la puissance rayonnée :

$$P_{ray} = \int_{\Omega} EH^* d\Omega \quad \text{Éq. 9}$$

2.1.3 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne est un paramètre qui prend en compte ses performances électriques et sa faculté à orienter le signal émis dans une direction donnée en fonction des angles θ et φ . Il peut être défini comme le rapport des densités de puissance rayonnées par l'antenne testée et par l'antenne isotrope ayant la même excitation dans une direction donnée. Il dépend donc de la direction dans laquelle il est mesuré et s'exprime de la manière suivante :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{INJ}} \quad \text{Éq. 10}$$

Avec $U(\theta, \varphi)$ l'intensité de rayonnement exprimée en $W/\text{stéradian}$. Le maximum de gain est atteint lorsque U est maximal pour un couple de coordonnées (θ, φ) donné. Le gain peut aussi s'exprimer par rapport à l'antenne isotrope, on l'exprime alors en dBi.

2.1.4 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise sa faculté à orienter son rayonnement dans une direction. Elle s'exprime par rapport au rayonnement d'une antenne isotrope :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{RAY}} \quad \text{Éq. 11}$$

Là aussi la directivité maximale est obtenue pour une orientation (θ, φ) donnée qui coïncide avec le gain maximum.

2.1.5 Efficacité d'une antenne

L'efficacité d'une antenne, permet de quantifier les pertes de puissance de l'onde émise ou reçue. On distingue deux types d'efficacité :

- l'efficacité d'antenne : c'est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance émise par l'alimentation de l'antenne. Cette valeur souligne le niveau de désadaptation de l'antenne par rapport à sa source ;

$$\eta_{ANT} = \frac{P_{RAY}}{P_{DISP}} \quad \text{Éq. 12}$$

- l'efficacité de rayonnement : c'est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance injectée dans l'antenne. La notion de désadaptation n'est ici pas prise en compte, seules les pertes dues à la structure de l'antenne sont considérées ;

$$\eta_{RAY} = \frac{P_{RAY}}{P_{INJ}} \quad \text{Éq. 13}$$

2.1.6 Impédance d'une antenne

D'un point de vue circuit, l'antenne est un élément traversé par un courant alternatif sinusoïdal et à ce titre, présente une impédance. Lorsqu'elle est alimentée, elle est vue comme une charge pour la source et comme un changement de milieu pour l'onde qui y pénètre occasionnant une réflexion d'une partie de la puissance électromagnétique, le reste étant transmis.

Cette impédance est la somme d'une partie réelle R qui englobe les pertes résistives dues au rayonnement et aux matériaux (pertes métalliques et diélectriques) et d'une partie imaginaire, la réactance X , dont le signe et la valeur font que l'antenne aura un comportement capacitif ($X < 0$), inductif ($X > 0$) ou purement résistif ($X = 0$) ($Z_{ANT} = R_{ANT} + jX_{ANT}$ Éq.14). Ce dernier terme étant dépendant de la fréquence du signal, l'impédance de l'antenne le sera aussi et tout le travail d'adaptation consiste à maximiser la puissance transmise de la source vers l'antenne P_{INJ} (en émission), ces pertes occasionnant une baisse de l'efficacité de rayonnement de l'antenne.

$$Z_{ANT} = R_{ANT} + jX_{ANT} \quad \text{Éq.14}$$

Un coefficient de réflexion appelé S_{11} a été défini entre l'antenne et la source d'impédance de sortie Z_g :

$$S_{11} = \frac{Z_g - Z_{ANT}}{Z_g + Z_{ANT}} \quad \text{Éq. 15}$$

Le module de ce coefficient est souvent exprimé en décibels (dB) et on considère qu'une adaptation est correcte lorsque le S_{11} est inférieur à -10dB c'est-à-dire à un dixième de sa valeur absolue.

2.1.7 Largeur de bande

Pour nos applications la largeur de bande d'une antenne correspondra à la plage de fréquences dans laquelle le S_{11} est inférieur ou égal à -10 dB.

Les valeurs des paramètres cités dans cette partie permettent de cerner les performances d'une antenne. C'est lors de la conception qu'il faut veiller à adapter ces valeurs au cahier des charges défini pour l'antenne.

2.2 Types d'antennes

Nous allons ici présenter succinctement et non exhaustivement différents types d'antennes existants. En effet, selon l'application visée et l'environnement dans lequel sera placée l'antenne, on utilisera différentes structures ayant chacune des spécificités propres. En voici quelques-unes.

2.2.1 Antenne quart d'onde

Aussi appelée antenne fouet, cette antenne est constituée d'un brin rayonnant flexible souvent placé à la verticale sur un plan de masse métallique. Sa longueur vaut un quart de la longueur d'onde mais il est possible de la réduire en utilisant un bobinage. Mise à la verticale, son rayonnement est omnidirectionnel. Monobande, on la retrouve sur les toits de voitures ou sur les anciens téléphones portables.

2.2.2 Antenne dipolaire

Un dipôle est une antenne constituée de deux brins de longueurs égales alimentée en son milieu. Très simple à fabriquer, son diagramme de rayonnement a une forme de tore de rayon central nul orienté perpendiculairement à l'antenne. Son gain croît avec sa longueur qui est souvent prise comme la moitié de la longueur d'onde afin de faciliter les calculs. Elle est aussi monobande.

2.2.3 Antenne boucle

L'antenne boucle est une grande spire pouvant prendre des formes diverses. Sa forme fait qu'elle est insensible à la composante électrique du champ électromagnétique qui la traverse et cela s'avère très utile pour certaines applications telles que la radiogoniométrie. Son diagramme de rayonnement est un tore orienté dans le plan de la boucle. L'ajout d'une capacité variable permet d'accorder l'antenne à une fréquence précise.

2.2.4 Antenne parabolique

Une antenne parabolique est constituée d'une source ou d'un récepteur associé à un réflecteur de forme parabolique de révolution. En réception, ce réflecteur concentre le faisceau vers le récepteur ce qui confère à cette antenne un très grand gain. Une très grande directivité la caractérise également ce qui lui vaut d'être utilisée pour des applications de type liaison satellitaire où le signal est très faible. On considère que la parabole fait son effet lorsque qu'elle fait au moins quatre fois la taille de la longueur d'onde.

2.2.5 Antenne Yagi-Uda

L'antenne Yagi-Uda porte le nom de ses deux concepteurs Hidetsugu Yagi et Shintaro Uda qui l'ont brevetée en 1932. L'antenne Yagi est une antenne directive dont le gain est supérieur à celui du dipôle dans la direction avant et inférieur dans la direction arrière. Elle se compose d'un dipôle demi-onde, d'un ou plusieurs éléments réflecteurs, non alimentés et d'un ou plusieurs éléments directeurs, non alimentés eux aussi. Les éléments non alimentés sont qualifiés de "parasites". Le gain de cette antenne augmente dans une certaine limite à mesure qu'on lui rajoute des éléments directeurs et la directivité de l'ensemble est étroitement liée à ce gain. Cette antenne a été très utilisée pour la télévision terrestre dans les bande UHF et VHF.

2.2.6 Antenne hélice

L'antenne hélice a été décrite pour la première fois par un radioamateur américain en 1947. Elle doit son nom à son élément rayonnant, un fil conducteur bobiné autour d'un axe. Un élément réflecteur plan se situe à sa base. Son gain dépend du nombre de tours et du pas du bobinage et son rayonnement est orienté selon son axe. Sa particularité est qu'elle émet un signal polarisé circulairement. Utilisées pour la poursuite de cibles et les communications spatiales avec des fréquences supérieures au mégahertz car en deçà sa taille devient importante.

2.2.7 Antenne patch

Les antennes patch font partie des antennes planaires. Elles sont constituées d'une surface métallique déposée sur un substrat diélectrique. Cette surface est excitée en un point par l'âme d'un connecteur dont la masse est relié à un plan de masse situé sur l'autre face du diélectrique. Sa compacité permet à cette antenne d'être facilement intégrable dans un circuit ou bien dans un réseau. Elle émet perpendiculairement à sa surface.

Cette liste n'est pas exhaustive et il resterait beaucoup à dire sur ces antennes qui sont aujourd'hui encore l'objet de recherches dans la communauté scientifique notamment au niveau de leur intégration avec les circuits.

2.3 Intégration des antennes

Au-delà de fréquences supérieures au gigahertz il devient possible d'intégrer certaines antennes sur du silicium avec les procédés standards de la microélectronique. En effet, la montée en fréquence réduit la longueur d'onde et par-là même la taille globale des antennes. Beaucoup de travaux portent sur ces antennes intégrées qui émettent le plus souvent à des fréquences millimétriques comme 24, 60 ou 77 GHz pour des raisons de compatibilité avec les dimensions des circuits actuels et avec les fréquences libres. Cette intégration, en plus du fait de rendre compact le système final, permet de réaliser des réseaux d'antennes avec toute leur électronique sur de très petites surfaces et ainsi rendre le tout agile en directivité [Chi05, Nat05, Cai06]. Pour obtenir une agilité en fréquence, des MEMS sont utilisés dans le but de modifier les dimensions des antennes et donc leurs dimensions électriques [Lah01].

Le phénomène de réduction des dimensions s'accroît lorsqu'il est couplé à l'utilisation de substrats à haute permittivité diélectrique comme les matériaux ferroélectriques [San97], le silicium-sur-quartz [Cha01], le TEFLON [Sek05], les métamatériaux [Bae06], le silicium-sur-isolant (SOI) [Bar07] ou les céramiques afin d'améliorer les performances des antennes en termes de gain ou d'efficacité. L'antenne n'est plus, dans ce cas, intégrée au circuit silicium mais située dessus et liée à lui par des vias métalliques ou par couplage électromagnétique. D'autres composants (filtres, amplificateurs, etc.) pouvant utiliser ces substrats, il peut en résulter un empilement de couches réalisant chacune une fonction. On parle alors de circuits hybrides par opposition aux circuits monolithiques. De plus, du fait de la permittivité diélectrique supérieure de leur matériau qui contribue à réduire le champ électrique à proximité, ces antennes ont tendance à avoir un meilleur isolement que les autres et peuvent être insérées aisément dans un circuit sans devoir se soucier de l'interaction avec leur environnement. Cependant, dans le cas de la céramique, sa densité élevée fait que ces antennes sont mécaniquement moins solides que les autres et de façon générale, l'utilisation des substrats différents du silicium fait que leur coût est plus élevé.

On trouve enfin des travaux qui ont porté sur l'intégration des antennes sur le boîtier de puces afin de s'affranchir de l'influence du circuit [Zha04, San06]. Il s'agit là d'une antenne patch composée de plusieurs couches déposées sur un substrat céramique lui-même posé sur un substrat contenant des puces (Fig. 3- 2). Cet empilement peut ensuite être utilisé dans un circuit plus complexe.

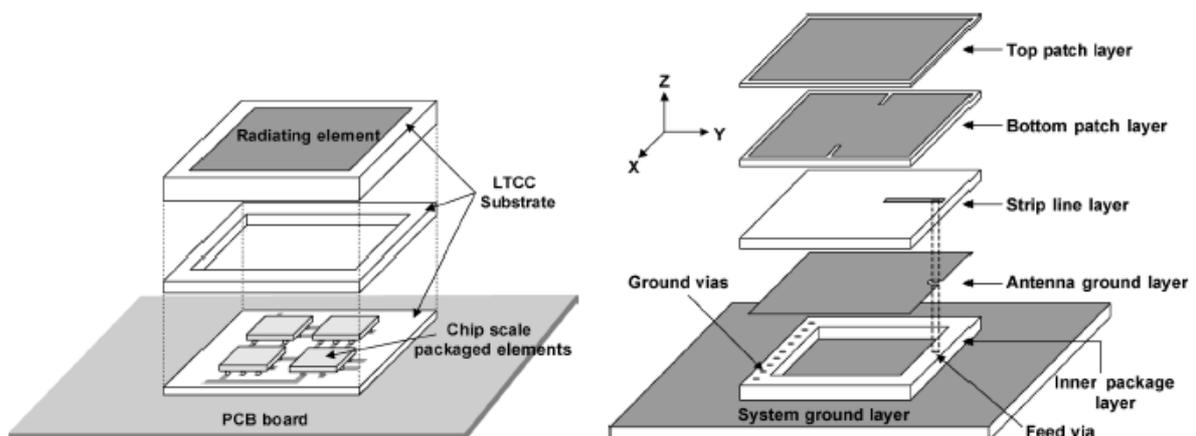


Fig. 3- 2 : Exemple d'antenne sur boîtier [San06]

On le voit, les travaux sur les antennes intégrées sont nombreux. Les fréquences utilisées sont peu adaptées pour couvrir des dizaines de mètres comme il le faudrait dans un réseau de capteurs en extérieur et mis à part les réseaux d'antennes, les diagrammes de rayonnement sont omnidirectionnels, ce qui est peu économe en énergie. Recentrons-nous maintenant sur les réseaux de capteurs sans fil.

3 Antennes dans les réseaux de capteurs

Cette partie va lister les antennes qui ont été utilisées jusqu'à présent dans les modules de réseaux de capteurs sans fil existants et celles qui leur sont spécialement dédiées. Elle se conclura par la mise en lumière d'une problématique qui introduira la suite.

3.1 Revue des antennes utilisées

Pour cette revue nous allons reprendre la liste des modules présentés dans le premier chapitre et les classer selon l'antenne qui les équipe. La présence d'un « (I) » après le nom d'une plate-forme signifie que l'antenne est intégrée.

Monopôle $\frac{1}{4}$ d'onde	Dipôle $\frac{1}{2}$ d'onde	Hélicoïdale	PIFA	Céramique	Boucle
WINS, μ AMPS, BTnode1, Smart-its, μ Part, XYZ, MITes (I)	Imote2 (I)	JLH lab, STACK, MASS	BTnode2 (I) Sentio (I)	Pico radio, BTnode3, Imote1, Ecosensor	EYES (I)

Tab. 13 : Antennes utilisées dans les plateformes existantes

On constate avec ce tableau que deux voies ont été privilégiées par les concepteurs. La première est celle du monopôle $\frac{1}{4}$ d'onde filaire. Facile à fabriquer, elle consiste en un morceau de câble souple ou rigide qui est connecté à la plate-forme. Cette solution est la pire en terme d'intégration et nécessite d'être orientée pour optimiser les échanges entre plates-formes. Une étude complète sur ce sujet est proposée dans [Lym06]. L'autre voie est celle des antennes céramiques. Très intégrées ces antennes seraient idéales si elles n'étaient pas si fragiles et coûteuses. De plus, le fait de mettre la plate-forme en boîtier ; chose qui est rarement faite dans les plates-formes présentées ; perturbe encore son rayonnement. Ce constat peut d'ailleurs être fait pour toutes les autres antennes intégrées.

Il ressort de cette revue que la conception et l'optimisation d'antennes pour les plates-formes de capteurs sans fil n'a pas été un point très étudié. Les progrès notables l'ont surtout été dans les aspects hardware avec l'optimisation de la consommation d'énergie, le développement de nouvelles sources d'énergie, le fonctionnement intelligent des plates-formes et logiciel avec le développement de systèmes d'exploitation et de protocoles dédiés aux réseaux de capteurs. Les progrès sont certes importants mais l'objectif final qui est de réaliser une plate-forme la plus petite possible, antenne et alimentation comprise n'est pas atteint.

3.2 Travaux spécifiques sur les antennes des plates-formes

Le constat précédent a été fait par plusieurs équipes de recherche qui ont cherché à développer des antennes spécifiques aux plates-formes des réseaux des capteurs sans fil. Parmi elles, se trouve P. M. Mendes et al. de l'université de Minho au Portugal qui a proposé plusieurs antennes de petites dimensions. On relève en 2003, 2004 et 2006

plusieurs antennes patch repliées intégrées fonctionnant à 5,7 GHz [Men03, Men04, Men06] (Fig. 3- 3).

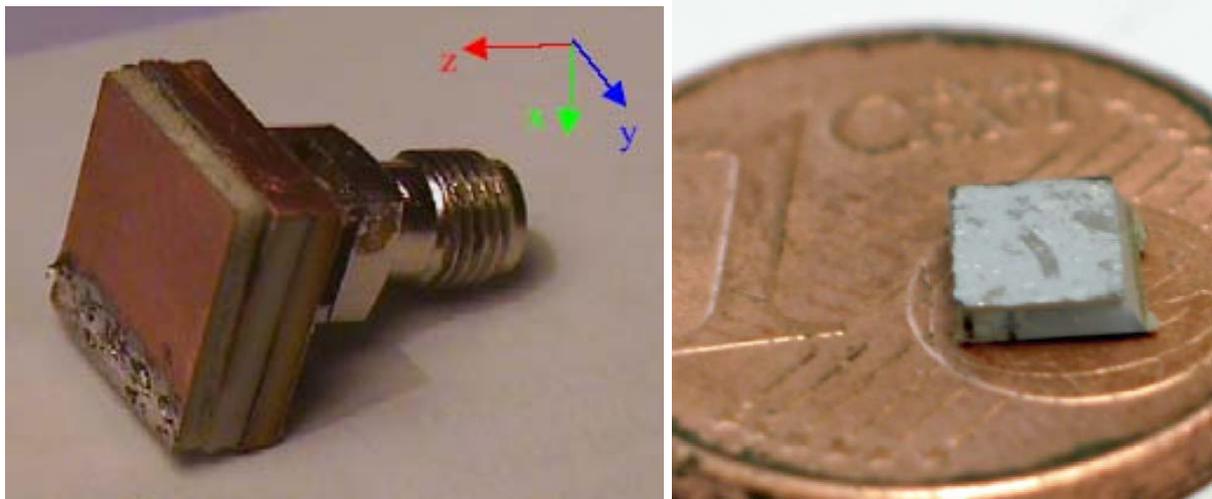


Fig. 3- 3 : Antennes patch repliées de l'équipe de P. M. Mendes

Ces antennes sont conçues avec un objectif d'intégration mais là aussi la mise en boîtier fait défaut et leur rayonnement se fait dans tout le demi-espace supérieur.

On relève ensuite plusieurs travaux dont l'objectif est de rendre directif le rayonnement des antennes, soit du fait de l'antenne [Nil09] (Fig. 3- 4) soit par le biais de réseaux d'antennes ; [Chi05] qui utilise quatre antennes placées autour d'un circuit tous les 90° pour balayer successivement quatre directions en alimentant tour à tour chaque antenne et [Rui04] qui se sert de quatre antennes quart d'onde disposées en cercle pour balayer quatre directions en changeant la phase de chacune.

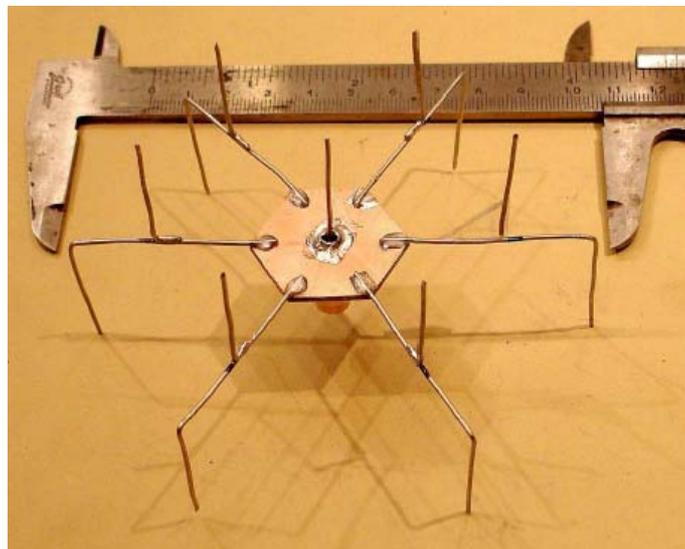


Fig. 3- 4 : Antenne SPIDA directionnelle [Nil09]

Il est intéressant de voir que les recherches se portent sur des antennes directionnelles et sur des réseaux d'antennes capables de rayonner dans différentes directions.

3.3 Problématique

L'antenne est devenue une partie critique dans la conception d'une plate-forme. En effet, à quoi bon vouloir réaliser un système à basse consommation de taille réduite si son antenne est encombrante et dépense beaucoup d'énergie pour émettre correctement ? L'idéal serait une antenne intégrée dont la directivité serait variable et fonction de la direction d'émission ou de réception. Bien sûr cette antenne n'existe pas et un compromis est donc à faire entre taille et efficacité de rayonnement de l'antenne. La question de la taille ramène à celle de la fréquence utilisée pour les échanges car celle-ci est proportionnelle à un multiple de la longueur d'onde. On l'a vu, les premières plates-formes émettaient à 433 puis 916 MHz et utilisaient des antennes quart d'onde filaires rigides ou non, alors que les plates-formes plus récentes travaillent à 2,4 GHz avec des antennes intégrées. Dans le premier cas l'antenne est externe, fait plusieurs fois la taille du reste de la plate-forme et nécessite dans certaines configurations d'être orientée. Dans le cas suivant, l'antenne est intégrée à la plate-forme et peut donc voir son rayonnement être parasité par celle-ci et par le package servant à protéger le tout. L'approche qu'on eu les premiers concepteurs consistait à assembler des modules, solution gourmande en place, alors que les réalisations plus récentes ont voulu tout intégrer ensemble au détriment de l'efficacité de l'antenne.

Nous allons donc dans la suite répondre à cette problématique en proposant des concepts d'antennes compactes étant si possible peu sensibles au reste de la plate-forme.

4 Concept d'antennes-package

4.1 Motivation

Puisque les antennes utilisées jusqu'ici ne donnent pas satisfaction en terme d'encombrement ou d'efficacité de rayonnement, le concept d'antenne-package a été développé. Il est basé sur le fait que l'antenne, en plus de sa fonction première, peut faire office de protection pour tous les composants de la plate-forme. Cette dernière considération amène que ces antennes doivent avoir une structure en 3 dimensions assez grande pour contenir une source d'énergie, un circuit et un ou plusieurs capteurs. Elles doivent aussi présenter un diagramme de rayonnement couvrant peu de zones inutiles et ne perturbant pas le fonctionnement des composants internes.

4.2 Design des antennes

Concernant le design des antennes, pour pouvoir faire office d'enveloppe, elles devront être constituées de solides creux tels qu'un cube ou une sphère. L'objectif est ici de trouver des configurations dans lesquelles il est possible de mettre des composants sans que cela ait trop de répercussions sur la fréquence de résonance de l'antenne ni sur son diagramme de rayonnement. Au niveau de la fréquence de fonctionnement, la bande ISM reste incontournable car libre. Avec les fréquences citées auparavant, il existe la bande dite des 5 GHz (de 5150 à 5350 et de 5470 à 5725 MHz en France), celle à 24 GHz et la

bande 59-62 GHz recommandée par l'ERO⁵⁹ pour les réseaux de capteurs utilisés en intérieur. Bien sûr, plus la fréquence augmente, moins la portée sera grande à puissance égale. La plupart des réalisations vues précédemment émettent et reçoivent à 2,4 GHz et ceci pour des raisons pratiques, plusieurs protocoles utilisant cette fréquence sont déjà très répandus. Nous allons donc faire de même. De plus, la longueur d'onde dans le vide à cette fréquence est de 12,5 cm, ce qui permet de faire des antennes d'environ 3 ou 4 cm si on les conçoit à $\lambda/4$. La suite va présenter les antennes étudiées.

4.3 Antenne « dé »

4.3.1 Modélisation

Pour réaliser une antenne en forme de dé, nous sommes partis d'une structure monopolaire constituée d'un brin rayonnant et d'un plan de masse infini. L'écart pris entre le brin et la masse est de 5 mm. Pour faire résonner cette structure à 2,4 GHz nous avons donné au brin rayonnant plusieurs longueurs multiples de λ et c'est finalement le cas où la longueur vaut 84 mm soit environ $3\lambda/4$ que l'adaptation est la meilleure à la fréquence voulue. La figure suivante présente l'antenne et son adaptation. On dénote plusieurs résonances dont l'amplitude décroît avec la montée en fréquence. Le S_{11} , qui représente le coefficient de réflexion en entrée de l'antenne en fonction de la fréquence, à 2,4 GHz vaut ici -36,62 dB.

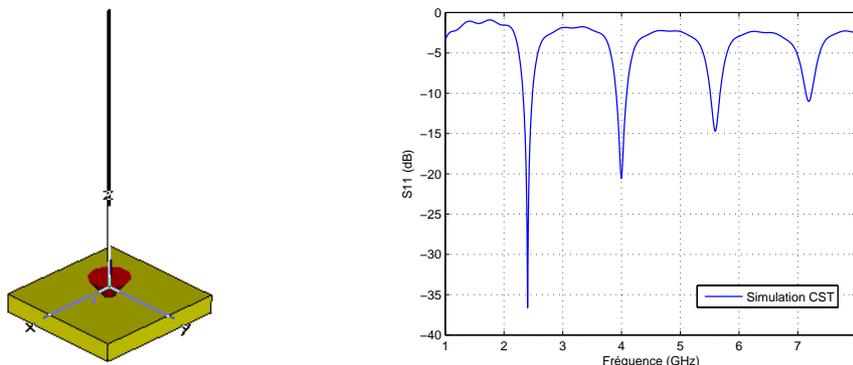


Fig. 3- 5 : Antenne monopôle et son adaptation

Dans un deuxième temps, en prévision d'un pliage de la structure pour créer la forme cubique, nous avons élargi le brin rayonnant et donné à la masse les mêmes dimensions a et b que celui-ci comme montré sur la figure 3-6. Plusieurs simulations ont été nécessaires pour obtenir une résonance à 2,4 GHz. C'est finalement lorsque a vaut 72,5 mm et b 16 mm que l'on obtient la meilleure adaptation avec -35,03 dB. On est ici proche de $\lambda/2$.

Lors du pliage de cette structure, des capacités vont apparaître aux endroits où les côtés du brin rayonnant vont être proches de ceux de la masse. La figure 3-7 montre ces capacités, les chiffres montrent les endroits où les côtés seront en vis-à-vis et donc les endroits où seront ces capacités.

⁵⁹ European Radiofrequency Office

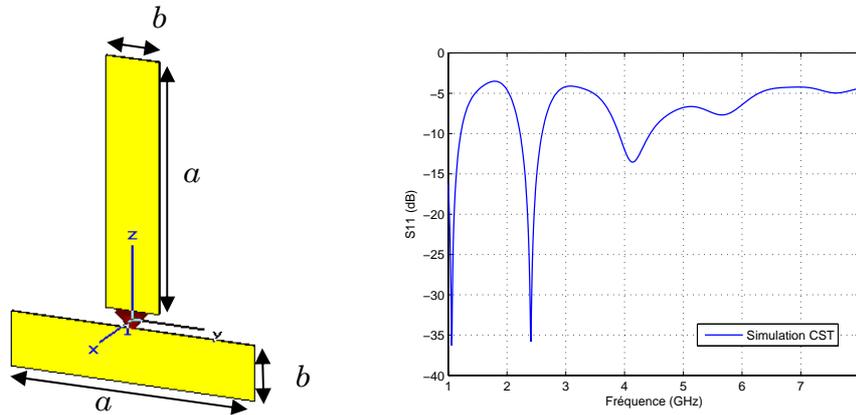


Fig. 3- 6 : Antenne monopôle modifiée et son adaptation

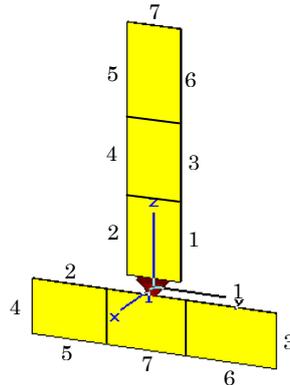


Fig. 3- 7 : Emplacement des capacités lors du pliage

4.3.2 Antenne finale

La première antenne conçue est donc une antenne dipôle de forme cubique composée de deux bras en cuivre pliés en trois et mis en quinconce. La figure 3-8 montre cette antenne simulée sous le logiciel CST, présenté dans le chapitre précédent, en perspective et vue de côté. L'excitation se fait entre l'extrémité d'un bras et le milieu de l'autre par un port discret. Le matériau utilisé est le cuivre avec une épaisseur de $500\mu\text{m}$. Cette forme permet effectivement de contenir des composants et ceux-ci sont d'ailleurs nécessaires à la tenue mécanique de l'antenne, qui, en l'état, n'est pas réalisable.

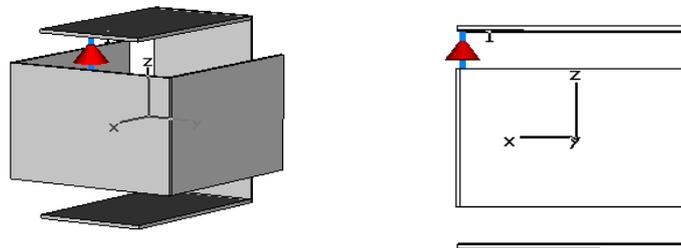


Fig. 3- 8 : Antenne cubique (vue en perspective et de côté)

4.3.3 Simulations

4.3.3.1 Antenne seule

A partir des résultats précédents, l'objectif était de la faire résonner entre 2,4 et 2,45 GHz. Cependant, les capacités vues sur la figure 3-6 font que les dimensions obtenues vont être modifiées. Pour parvenir à notre objectif, deux paramètres ont donc été modifiés ; la longueur des bras et leur largeur. En jouant sur la longueur, on modifie le volume de l'antenne et donc son encombrement alors qu'en jouant sur la largeur on joue sur la longueur du port. Il est possible avec CST de réaliser plusieurs simulations successives en faisant varier un ou plusieurs paramètres et d'afficher pour chaque combinaison les paramètres S. Les différentes simulations réalisées ont permis d'arriver aux dimensions suivantes :

- $78 \times 16 \text{ mm}^2$ pour chaque bras soit des côtés de $26 \times 16 \text{ mm}^2$;
- $17,5 \text{ cm}^3$ de volume extérieur et $15,6 \text{ cm}^3$ de volume intérieur ;

La largeur de 16 mm a été conservée et avec elle la longueur de port.

Dans cette configuration, la figure 3-9 montre comment se comporte le paramètre S_{11} . Par rapport à l'antenne dépliée, la première résonance a lieu ici à 2,41 GHz, la valeur du paramètre S_{11} est alors de -18,27 dB. La première résonance a disparue mais les deux dernières subsistent. L'effet des capacités est donc perceptible. Concernant le diagramme de rayonnement, la figure 3-10 en présente différentes vues.

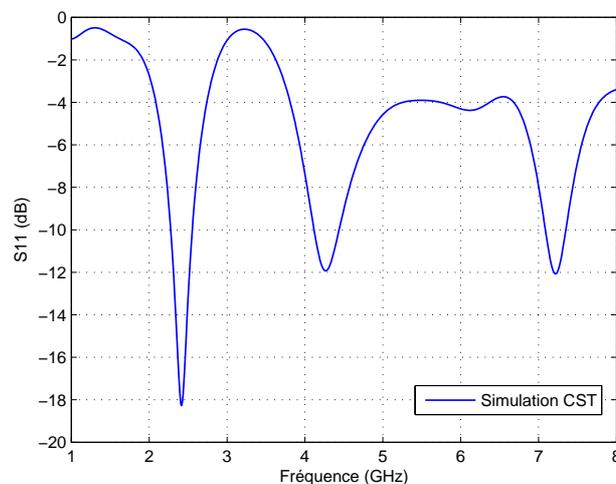


Fig. 3- 9 : Paramètre S_{11} simulé sous CST pour l'antenne seule

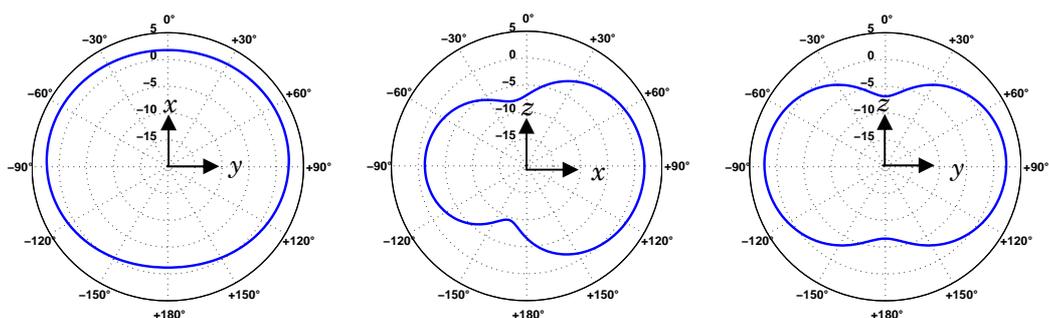


Fig. 3- 10 : Diagrammes de rayonnement simulés pour l'antenne seule

Sur ces diagrammes on voit clairement que le rayonnement se fait plutôt dans la direction x . Sur le diagramme du centre l'ouverture à -3 dBi est de $114,6^\circ$ et sur celui de droite de 92° . L'efficacité d'antenne de 95%, celle de rayonnement de 94% et le gain est de 2,5 dBi.

4.3.3.2 Antenne remplie

Une fois la structure simulée et en accord avec les spécifications, des simulations ont été faites en remplissant l'antenne avec du polystyrène afin de lui assurer une bonne tenue lors de sa réalisation. La permittivité de ce matériau étant variable d'un polystyrène à l'autre, plusieurs valeurs ont été prises, à savoir 1,05, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 et 1,5. La figure 3-11 montre les valeurs du S_{11} pour chaque valeur de la permittivité. On constate un décalage des résonnances vers les basses fréquences à mesure que la permittivité augmente. Cela donne des indications sur le comportement de l'antenne avec des composants à l'intérieur. En effet, il serait possible de contrecarrer le décalage en fréquence du à leur présence en diminuant les dimensions de l'antenne, celle-ci étant inversement proportionnelle à ces dernières. En ce qui concerne le diagramme de rayonnement, il reste inchangé en présence de polystyrène.

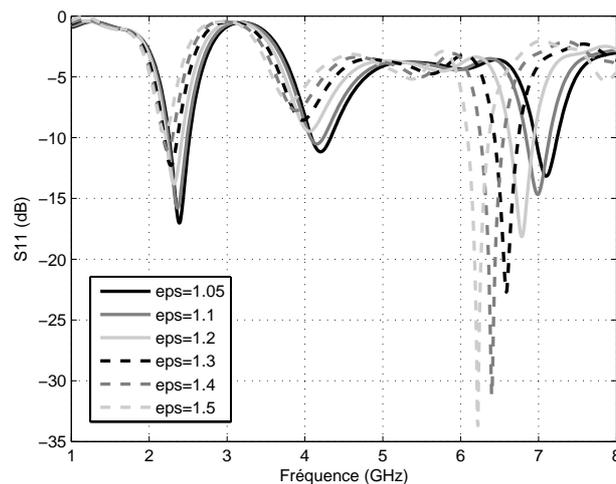


Fig. 3- 11 : Paramètre S_{11} simulé sous CST pour l'antenne remplie

4.3.4 Réalisation et mesures

Cette antenne a été réalisée avec du cuivre puis alimentée à l'aide d'un câble coaxial extérieur dénudé auquel l'âme et la masse ont été dissociés à l'extrémité pour le contact avec l'antenne (Fig. 3-12). Cette solution était nécessaire pour mesurer l'impédance de l'antenne et donc la connecter à un analyseur. Il s'est avéré que l'extrémité du câble permettait une bonne tenue de l'antenne donc il n'y a pas eu besoin de polystyrène dans un premier temps. La photographie qui suit montre l'antenne réalisée.



Fig. 3- 12 : Antenne cube réalisée

Une fois la structure réalisée, son impédance a été mesurée avec l'analyseur vectoriel 8720ES d'Agilent. Sur la figure 3-13, on constate que l'accord avec la simulation est bon avec -17,45 dB à 2,43 GHz. Les différences étant certainement dues au câble d'alimentation inexistant en simulation.

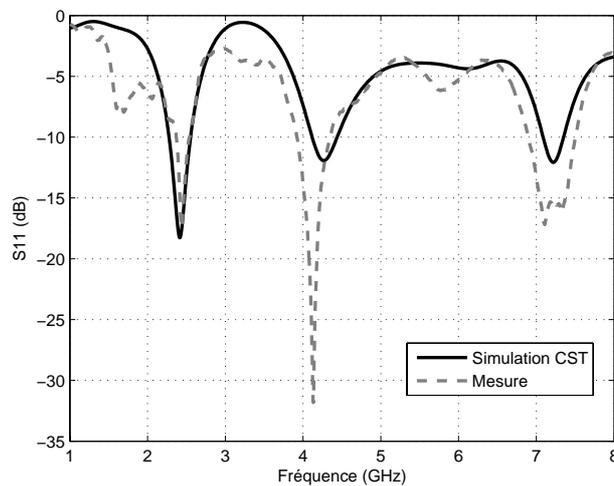


Fig. 3- 13 : Mesure de l'antenne seule

Nous avons ensuite inséré du polystyrène à l'intérieur de l'antenne pour améliorer la tenue mécanique de la structure. Voilà ce que donne une mesure comparée à la simulation où la permittivité du polystyrène est de 1,05.

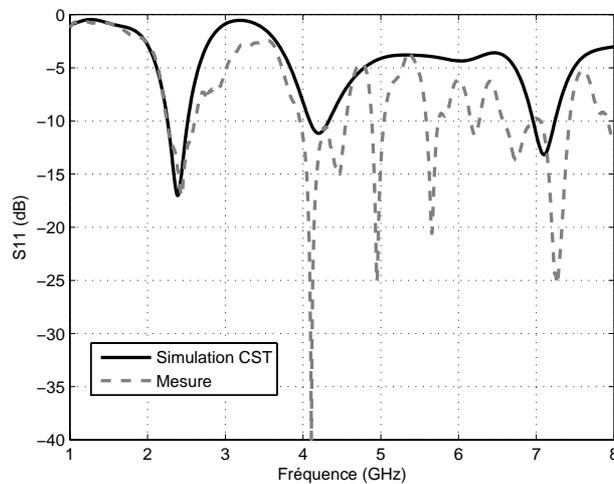


Fig. 3- 14 : Mesure de l'antenne avec polystyrène

On constate dans un premier temps que la présence du polystyrène fait apparaître des résonances assez importantes entre celles de 4 et 7 GHz vues initialement « à vide ». , Concernant la résonance entre 2,4 et 2,45 GHz, voici les valeurs mesurées et simulées :

- Mesure : -16.60 dB à 2,47 GHz ;
- Simulation : -17.03 dB à 2.38 GHz.

On voit que l'écart est plus conséquent entre simulation et mesure, cependant la résonance est quasiment dans la bande voulue et sa valeur en dB est proche de l'autre.

4.3.5 Conclusion

Le concept d'antenne package semble intéressant du point de vue des problèmes à résoudre mais l'antenne cube étudiée ici, de par sa structure, n'est pas une solution viable. Et quand bien même elle serait robuste, connectée de son intérieur et remplie, son diagramme de rayonnement nécessite que l'antenne soit orientée dans la direction où le gain est maximum, c'est-à-dire la direction x .

4.4 Antennes hémisphériques

4.4.1 Description

Après une structure cubique, est venue l'idée d'utiliser une forme sphérique. Pour des raisons de stabilité, nous allons utiliser une demi-sphère montée sur un substrat d'époxy plan. Le matériau est le même qu'auparavant et là aussi, une structure dipolaire a été choisie, la demi-sphère étant coupée en deux parties égales. Ensuite, pour ne pas retrouver le problème de solidité vu précédemment lors des mesures, un connecteur de type SMA placé sous l'époxy a été simulé. Un trou dans l'époxy permet à une structure elle aussi en époxy et interne à l'antenne de relier l'âme du connecteur au sommet d'un des deux hémisphères et la masse à l'autre. Le substrat est métallisé sur sa face inférieure autour du connecteur mais sans contact avec lui. La figure 3-15 montre l'antenne simulée en perspective et en coupe.

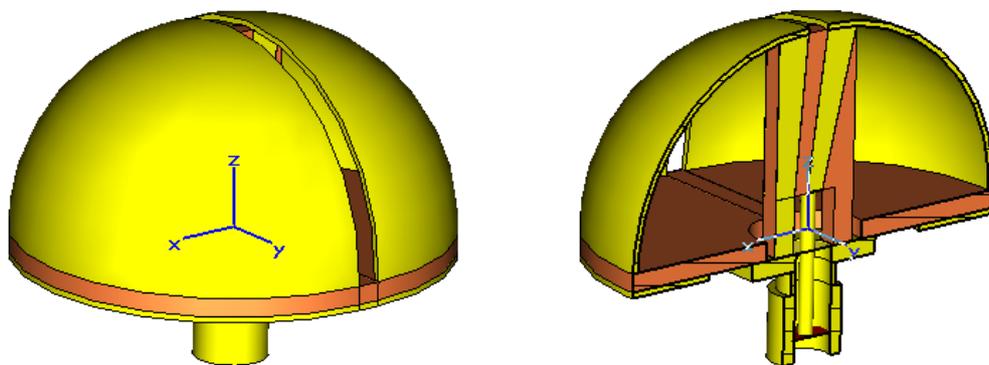


Fig. 3- 15 : Antenne hémisphérique

4.4.2 Simulation

Au niveau des dimensions, modifiées pour que l'antenne résonne à 2,4 GHz, le rayon de la boule est de 17,75 mm, l'espacement entre les deux parties de la boule est de 2 mm, le trou permettant au connecteur SMA de passer à travers le substrat d'époxy fait 8 mm de diamètre, la largeur de l'anneau de réflexion est de 7,75 mm. La structure en époxy est métallisée pour faire contact avec la masse, l'âme du connecteur SMA et la boule. Cette métallisation est présente des deux côtés afin d'avoir une structure symétrique. L'excitation du port SMA se fait avec un « waveguide port » sous CST.

Présentée de cette façon, avec un connecteur externe, l'antenne est configurée pour la mesure de son impédance et de son rayonnement. En pratique, le port SMA n'aurait plus lieu d'être et un circuit implanté dans l'antenne exciterait celle-ci. Le plan de masse réflecteur sous-jacent prendrait alors toute la surface inférieure de l'époxy.

Les figures suivantes présentent respectivement le coefficient de réflexion et les diagrammes de rayonnement.

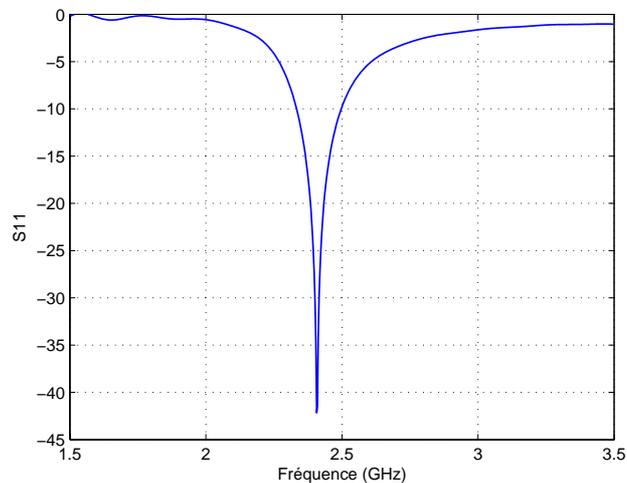


Fig. 3- 16 : Paramètre S_{11} simulé sous CST

La résonance se trouve lieu à 2,407 GHz et la valeur du paramètre S_{11} à cette fréquence est de -42,17 dB. Intéressons-nous maintenant aux diagrammes de rayonnement :

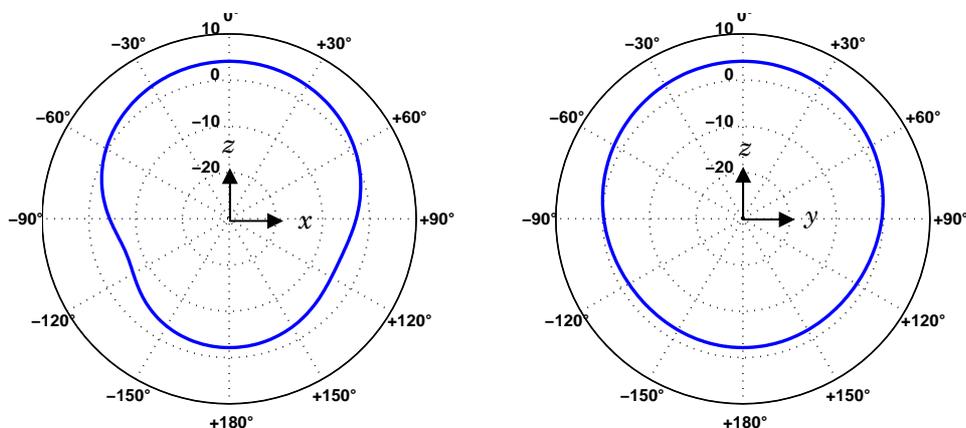


Fig. 3- 17 : Diagrammes de rayonnement dans le plan ZX (à g.) et ZY (à dr.)

La figure précédente permet de voir que l'émission est légèrement directive vers le haut (direction z). Les ouvertures à -3 dBi sont de 112,2° pour le plan ZX et de 141,6° dans le

plan ZY . Le gain est de 4 dBi. Pour ce qui est du plan XY , le diagramme est parfaitement omnidirectionnel.

4.4.3 Conclusion

Cette antenne présente des propriétés intéressantes, notamment avec sa capacité à contenir des composants avec une taille raisonnable (35 mm de diamètre). Cependant sa fabrication n'est pas aisée, notamment à cause de la forme sphérique et de la structure amenant le signal du port à la sphère. De plus son diagramme de rayonnement montre qu'une partie non négligeable est rayonnée vers le sol malgré la métallisation partielle de la face inférieure du substrat. Elle n'a donc pas été réalisée.

4.4.4 Autre design

Parallèlement à l'antenne présentée ci-dessus, une autre structure a été développée. Celle-ci est similaire à la première au niveau de la forme mais la demi-sphère est ici coupée en quatre morceaux égaux au lieu de deux auparavant. L'alimentation a donc été adaptée pour que chaque quart de la demi-sphère ait une ligne l'alimentant, la structure en époxy ne s'arrête donc plus sous la demi-sphère mais passe entre deux hémisphères. Enfin, la face inférieure de l'époxy est métallisée partout autour de la base du port SMA sans contact avec elle. Les figures suivantes donnent plusieurs aperçus de cette antenne :

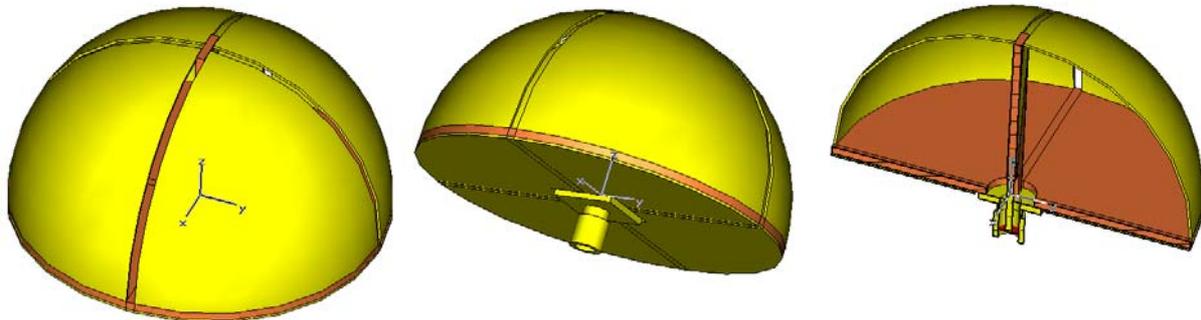


Fig. 3- 18 : Vue de l'antenne en perspective (à g. et au centre), et en coupe (à dr.)

L'alimentation est répartie comme indiqué sur la figure 3-18, les côtés opposés de la demi-sphère sont soit connectés à l'âme (figure de gauche) soit à la masse (figure de droite) afin de ne pas revenir à la configuration précédente.

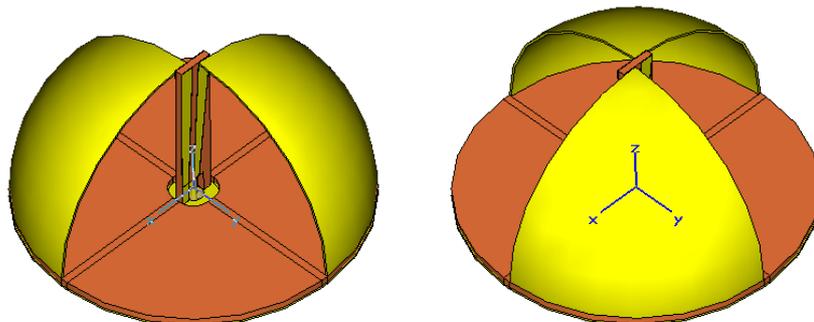


Fig. 3- 19 : Connexion des lignes d'alimentation à la demi-sphère

4.4.5 Simulation

Lors de la simulation de cette structure, comme dans la précédente, seul le rayon de la demi-sphère a été rendu variable. L'écartement entre les quatre quarts étant fixé par l'épaisseur de la structure en époxy (1,6 mm) à laquelle on ajoute deux fois l'épaisseur des lignes conductrices (35 μ m) ce qui donne un écartement de 1,67 mm. Il s'est avéré que c'est pour un rayon de 35,5 mm que l'adaptation dans la bande voulue était la meilleure. Le paramètre S_{11} vaut alors -15,62 dB à 2,419 GHz (figure 3-20).

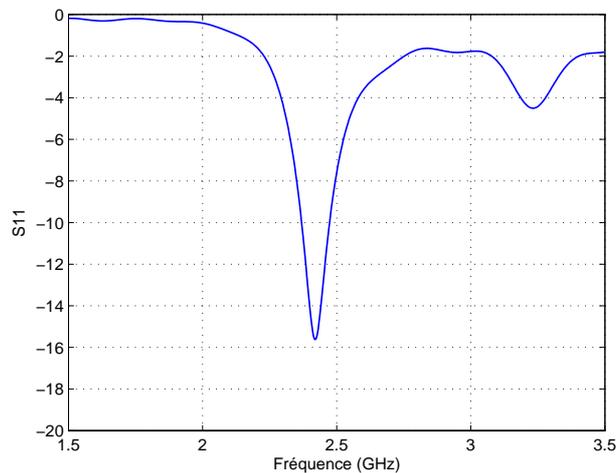


Fig. 3- 20 : Paramètre S_{11} simulé sous CST

Concernant le diagramme de rayonnement, il diffère pour beaucoup de celui de l'autre structure au niveau des lobes.

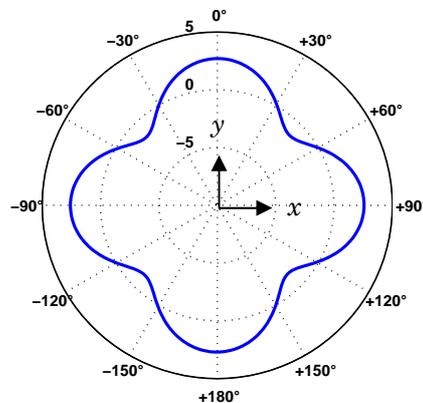


Fig. 3- 21 : Diagramme de rayonnement dans le plan XY

On constate avec ce premier diagramme que quatre lobes, de 65,1° d'ouverture à -3 dBi chacun, apparaissent là où sont les ouvertures dans la demi-sphère rendant l'antenne directive dans ces directions. Pour ce qui est du plan XZ (par symétrie identique à YZ) voilà ce qu'on obtient :

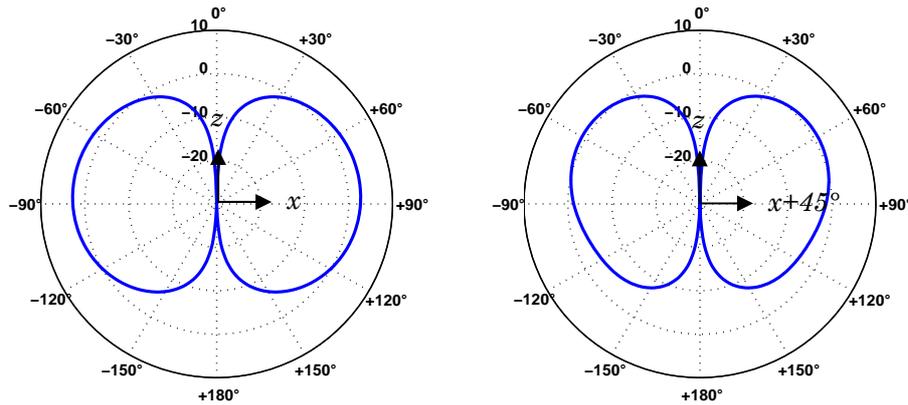


Fig. 3- 22 : Diagrammes de rayonnement des plans XZ (à g.) et XZ tourné de 45° (à dr.)

Sur la figure de gauche, dans le plan de deux lobes de la figure 3-21, l'ouverture à -3dB de ces derniers est de 82,6° et les deux maxima pointent vers $\pm 80^\circ$, l'horizontale étant à $\pm 90^\circ$. Pour la figure de droite, toujours dans le plan XZ mais dans le plan des minima de la figure 3-21, l'ouverture est de 68,4° et les maxima sont orientés vers $\pm 57^\circ$. Cette antenne rayonne donc dans quatre directions privilégiées tout autour d'elle et exclue les z positifs et négatifs. Une vue 3D du diagramme le confirme (figure 3-23).

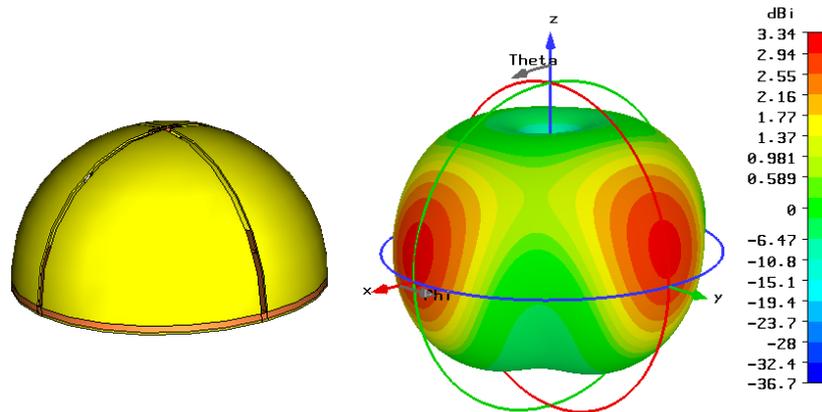


Fig. 3- 23 : Vue en 3D du diagramme de rayonnement

Le fait de ne pas rayonner vers le sol est important car aucune énergie n'est perdue pour cette zone-là. Encore faut-il que l'antenne soit bien disposée. Cependant, le fait de ne rayonner que dans quatre directions peut être un inconvénient car dans le cas où une autre antenne se situerait dans une zone où le gain est beaucoup plus faible, l'énergie nécessaire pour communiquer avec elle serait plus grande.

4.4.6 Conclusion

Comme pour l'antenne précédente, la réalisation de celle-ci est difficile. Le fait de couper en quatre la demi-sphère la rend mécaniquement fragile et facilement déformable dans le cas d'un choc tel qu'elle pourrait le subir dans le cas d'un largage. De plus sa taille est le double de la précédente avec un diamètre de 71 mm. On est donc resté ici aussi au stade de la simulation.

4.5 Antennes cubiques

4.5.1 Motivation

Un retour à une structure cubique a été opéré pour simplifier la fabrication. L'idée de conserver un plan réflecteur sous la structure a été gardée afin d'orienter le rayonnement autre part que vers le sol. A partir de là, une structure a été dessinée puis optimisée par simulation pour correspondre aux spécifications de fréquence d'émission et de diagramme.

4.5.2 Description

La structure résultant de l'optimisation est un cube, toujours en cuivre, coupé en deux posé sur un substrat d'époxy métallisé sur sa face inférieure. Une bande métallique située dans la partie supérieure de la structure porte le port servant à alimenter l'antenne (voir figure 3-24, une moitié du cube a été mise en transparence). La phase d'optimisation a vu varier toutes les dimensions de l'antenne avec pour condition que la forme finale soit proche d'un cube, c'est-à-dire aussi long que large et que haut.

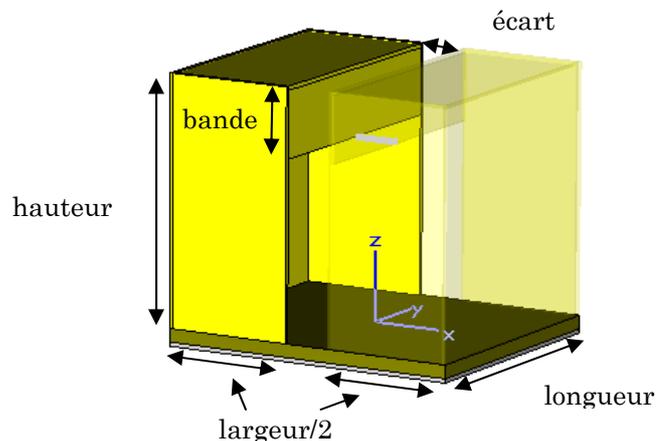


Fig. 3- 24 : Vue en perspective de l'antenne

Sur la figure ci-dessus, les dimensions marquées sont celles dont on a fait varier la valeur lors de l'optimisation.

4.5.3 Simulations

4.5.3.1 Antenne seule

Au terme d'un premier balayage, les dimensions trouvées sont de 6 mm pour l'écart, 33 mm pour la longueur et la largeur, 30 mm pour la hauteur et 9 mm pour la bande. On a donc une antenne de $38,6 \text{ cm}^3$ pouvant contenir un cube aux mêmes proportions de 27 cm^3 . La figure 3-25 montre comment varie le paramètre S_{11} avec ces dimensions.

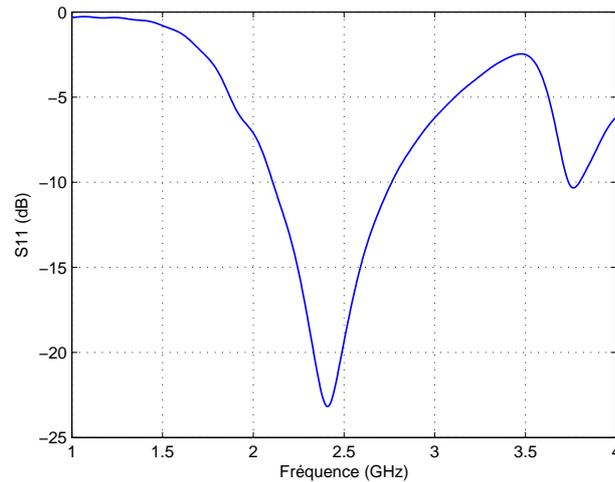


Fig. 3- 25 : Paramètre S_{11} de l'antenne seule

On trouve une résonance de $-23,07$ dB à $2,41$ GHz. En regardant comment les courants se répartissent dans la structure, on constate que c'est le long des extrémités de la structure qu'ils sont les plus importants (figure 3-26). La longueur physique de ce parcours de chaque côté est de 141 mm, ce qui est proche de 125 mm qui est la longueur d'onde à $2,4$ GHz dans le vide. On peut donc considérer que notre antenne est un dipôle à 2λ .

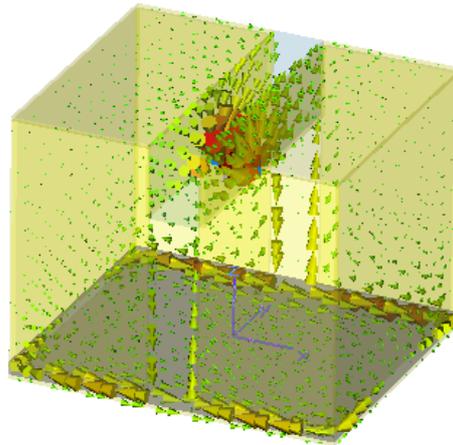


Fig. 3- 26 : Répartition des courants dans l'antenne

Au niveau de son diagramme de rayonnement, voilà ce qu'on obtient à la fréquence de résonance :

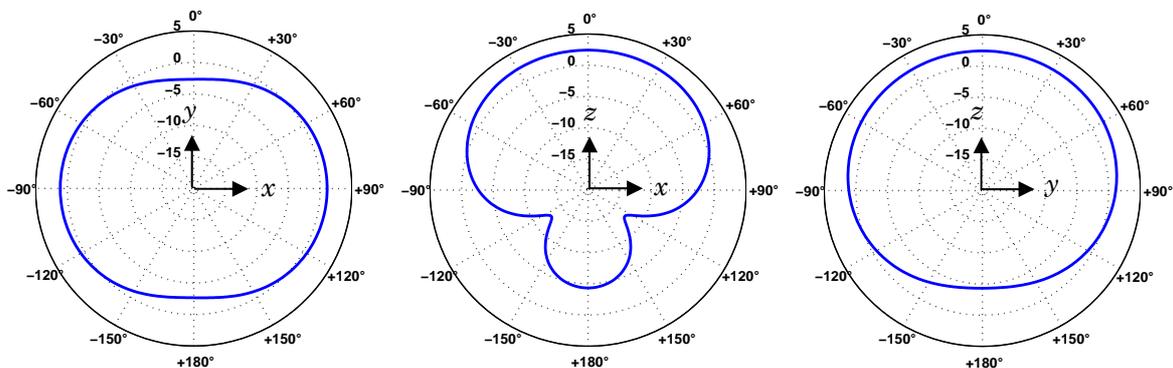


Fig. 3- 27 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans

On voit sur ces diagrammes que cette antenne rayonne dans une zone couvrant toute la demi-sphère surplombant celle-ci et que peu d'énergie est émise vers le sol. Les ouvertures à -3 dBi et les directions principales de rayonnement sont, pour les diagrammes de gauche à droite, de $140,2^\circ$ (vers $\pm 90^\circ$), $155,4^\circ$ (vers 0°) et $263,3^\circ$ (vers 0°). L'efficacité totale est de 99% et le gain de 2,41 dBi. Cette configuration étant intéressante, nous allons simuler cette antenne dans différents environnement et ainsi voir son comportement.

4.5.3.2 Antenne dans un environnement

Le fait de placer l'antenne dans un environnement rapproche ce travail de la réalité et permet d'appréhender l'influence des conditions extérieures sur celle-ci. Nous sommes partis du constat que l'antenne était posée sur un type de sol qu'on va considérer comme infiniment large et profond et que de l'air l'entoure partout ailleurs. Cinq types de sol ont été choisis [F5ZV]:

- L'eau : avec une permittivité relative de 80 et une conductivité de 0,2 S/m l'eau douce est un terrain extrême qu'il peut être est possible de rencontrer dans des applications en extérieur ;
- Sol humide : d'une permittivité relative proche de 30 et une conductivité de 0.03 S/m, assimilable à un sol en terre ou un marais, c'est un type de terrain assez répandu et donc probable;
- Lande ou colline boisée : permittivité relative de 13 et conductivité de 0.005 S/m. C'est là aussi un type de terrain très courant ;
- Sol sec : on rencontre ce sol dans les zones arides de type désert de sable ou de pierre. Sa permittivité est de 3 et sa conductivité de 0,02 S/m ;
- Métal : un sol métallique peut se rencontrer en intérieur, comme l'eau c'est un autre cas extrême.

Voilà ce qui est obtenu pour le paramètre S_{11} pour chacun des sols.

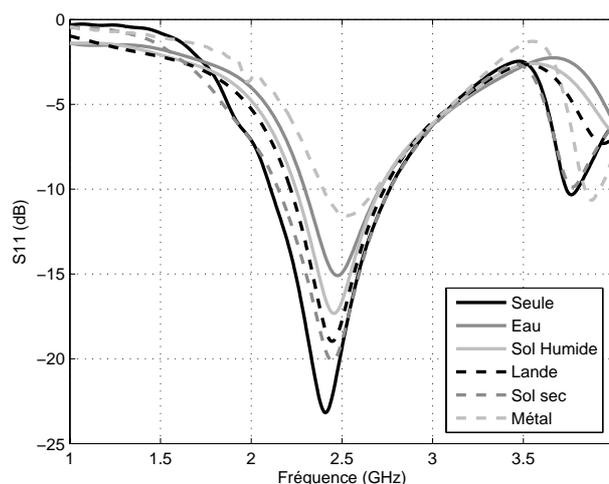


Fig. 3- 28 : Paramètre S_{11} de l'antenne pour différents sols

On constate que le fait de placer l'antenne sur un matériau influence son impédance. La résonance se décale vers les hautes fréquences à mesure que la permittivité du sol

augmente et que son amplitude diminue. Le tableau suivant recense la fréquence et l'amplitude des résonances pour chaque sol :

	Fréquence	Adaptation
Seule	2,41 GHz	-23,07 dB
Eau	2,476 GHz	-15,13 dB
Sol humide	2,455 GHz	-17,33 dB
Lande	2,446 GHz	-18,97 dB
Sol sec	2,446 GHz	-20,12 dB
Métal	2,515 GHz	-11,59 dB

Tab. 14 : Fréquences et amplitudes des résonances de l'antenne cubique sur des sols différents

On voit donc que l'environnement a un impact sur l'impédance de l'antenne mais celui reste faible au regard des fréquences de résonances qui restent presque toutes dans la bande 2,4-2,45 GHz. Regardons maintenant les diagrammes de rayonnement obtenus sur chaque sol à la fréquence de résonance.

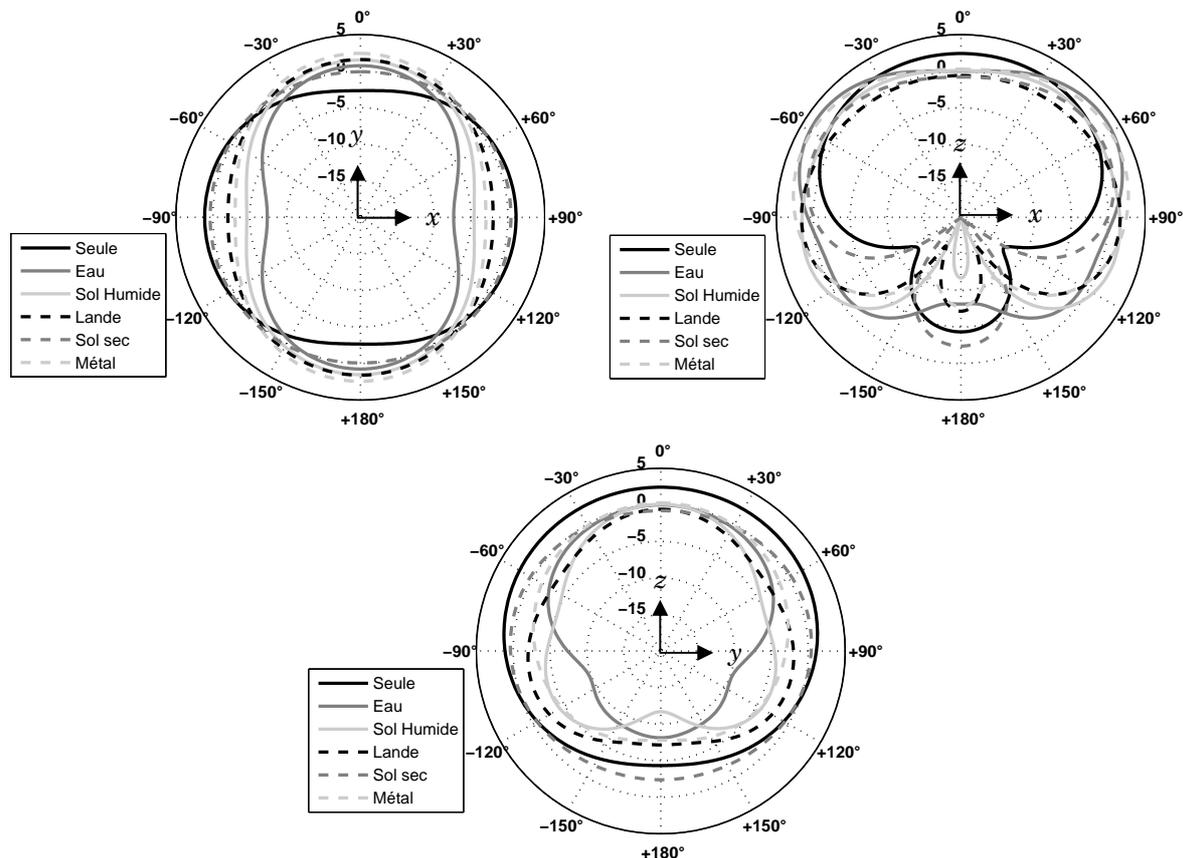


Fig. 3- 29 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans sur différents sols

Là aussi, on voit que le sol influe sur la répartition de l'énergie émise dans l'espace. Selon les directions, le gain est plus faible ou plus élevé mais globalement les propriétés intéressantes, rayonnement concentré vers le haut et les côtés, sont conservées. Voici pour chaque configuration, les ouvertures à -3 dBi avec la direction du ou des lobes principaux et le gain de ce ou ces lobes et l'efficacité résumés dans le tableau 15.

	Plan XY	Plan XZ	Plan YZ	Efficacité
Seule	140,2° 1,1 dBi vers 90°	155,4° 2,4 dBi vers 0°	263,3° 2,4 dBi vers 0°	99%
Eau	88,3° 0,8 dBi vers 0°/180°	75,3° 3,7 dBi vers ±55°	127,7° 0 dBi vers 0°	92%
Sol humide	100,2° 1,5 dBi vers 0°/180°	252° 1,7 dBi vers ±101°	89,2° 0,1 dBi vers 0°	96%
Lande	135,5° 1,6 dBi vers 0°/180°	256° 1,6 dBi vers ±89°	263,1° -0,6 dBi vers 0°	97%
Sol sec	360° 0,4 dBi vers ±60°	193,3° 1,8 dBi vers ±61°	360° 0,5 dBi vers ±75°	98%
Métal	100,9° 2,4 dBi vers 0°/180°	102,8° 3,4 dBi vers ±64°	169,7° 0,3 dBi vers 0°	89%

Tab. 15 : Ouvertures, efficacité et gain sur différents sols

On constate que par rapport au cas où l'antenne était seule, certaines configurations présentent des ouvertures plus importantes avec des gains moindres mais toujours intéressants. L'impact majeur se retrouve dans le plan XY où l'on voit que la tendance est à une rotation de 90° du diagramme avec un rétrécissement de celui-ci. D'une configuration où on rayonnait moyennement sur 360° autour de l'antenne, à mesure que la permittivité du sol augmente on passe à des configurations où le rayonnement est bidirectionnel.

4.5.3.3 Antenne remplie

Après avoir étudié l'impact d'un environnement extérieur sur l'antenne, intéressons-nous à son environnement interne, là où il est prévu de mettre des composants. Pour cela, un cube métallique (PEC : conducteur parfait) ayant les mêmes proportions que l'intérieur de l'antenne a été inséré au centre du substrat d'époxy (figure 3-30). Ce cube pourrait être assimilé à un blindage protégeant le circuit de l'antenne mais aussi l'antenne du circuit.

Afin de connaître comment le cube va influencer sur l'antenne, plusieurs simulations vont être réalisées en augmentant les dimensions du cube. Nous avons choisi d'exprimer ses dimensions en pourcentage du volume interne de l'antenne (les 27 cm³ cités auparavant).

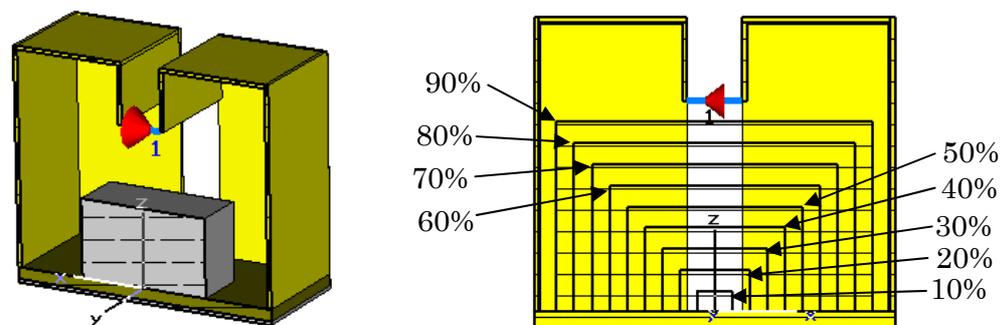


Fig. 3- 30 : Cube métallique inséré dans l'antenne (vue en coupe à g.) et différentes dimensions du cube (à dr.)

Les courbes superposées du paramètre S_{11} simulé pour chaque dimension sont visibles sur la figure 3-31 et le tableau ci-dessous donne les fréquences et l'adaptation pour chaque dimension :

% de l'antenne	Résonnance	Adaptation	% de l'antenne	Résonnance	Adaptation
10	2,377 GHz	-27,97 dB	60	2,464 GHz	-25,99 dB
20	2,413 GHz	-23,53 dB	70	2,449 GHz	-24,34 dB
30	2,440 GHz	-23,21 dB	80	3,130 GHz	-18,57 dB
40	2,437 GHz	-24,94 dB	90	3,367 GHz	-15,97 dB
50	2,443 GHz	-25,95 dB			

Tab. 16 : Résonnance et adaptation pour chaque dimension du cube

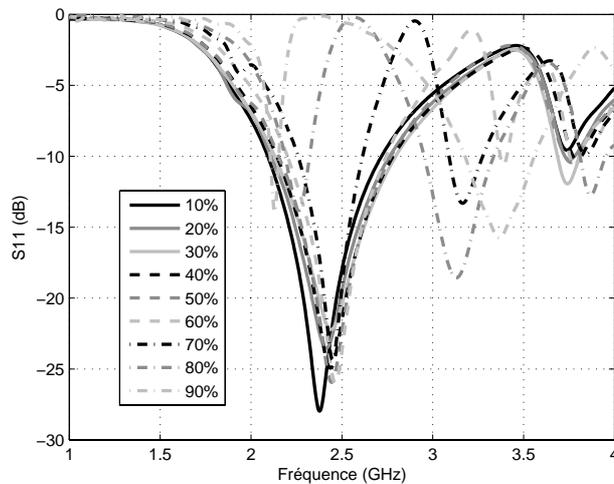


Fig. 3- 31 : Paramètre S_{11} simulé pour différentes dimensions du cube

On constate que jusqu'à 70% des dimensions internes, l'impact sur la fréquence de résonance est minime. Au-delà, l'impédance est complètement modifiée. Ce phénomène s'explique par le couplage qui doit s'opérer entre le cube et les parois de l'antenne à partir d'une certaine distance. En considérant que ce couplage apparaît à 80%, les distances entre le cube et l'antenne sont alors de 3,3 mm sur la longueur, 3,9 mm sur la largeur et 2,1 mm sur la hauteur. On peut donc en déduire qu'il faut rester à moins de 4 mm de la paroi pour ne pas perturber l'antenne, ce qui est raisonnable car il reste 17,2 cm³ pour tous les composants internes.

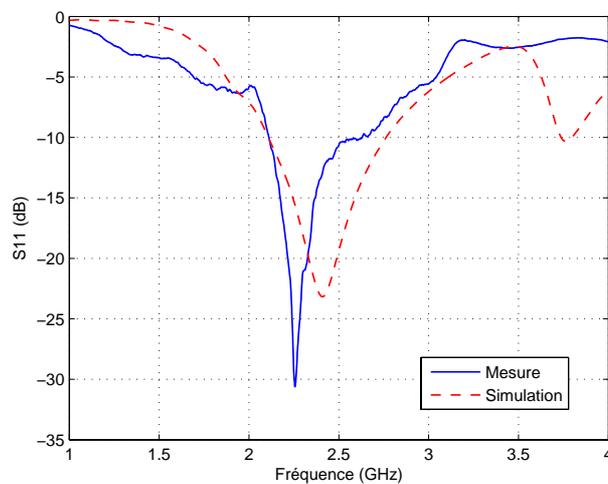
Ces résultats de simulation étant intéressants, nous sommes passés à la réalisation de l'antenne.

4.5.4 Réalisation et mesures

Cette antenne a été réalisée en découpant et en pliant une plaque de cuivre épaisse de 500 μm pour obtenir la forme et les dimensions voulues. Le port utilisé est le même que pour l'antenne « dé », à savoir un câble coaxial dont l'âme et la masse sont séparés à l'extrémité (Fig. 3-32).

**Fig. 3- 32 : Antenne réalisée**

L'âme et la masse du câble sont connectées par soudure au centre des bandes. Le substrat d'époxy est collé au cuivre plié et une plaque de cuivre est collée à sa face pour faire office de réflecteur. Pour les mesures d'impédance, l'antenne a été suspendue par son câble afin de ne pas être perturbé par un substrat quelconque. La comparaison entre simulation et mesure est faite sur la figure 3-33. On voit que l'allure générale est conservée mais que la résonance a lieu à une fréquence plus faible de 2,25 GHz (-30,6 dB).

**Fig. 3- 33 : Comparaison du S_{11} entre simulation et mesure pour l'antenne seule**

Cet écart avec la simulation peut s'expliquer par le fait que la structure réalisée n'est pas exactement la même que la structure simulée. Le fait de plier du cuivre n'est pas précis et créer des formes géométriques exactes n'est pas aisé. Dans notre cas ce sont les parties qui se recouvrent qui posent problème, elles sont matérialisées sur la figure 3-34.

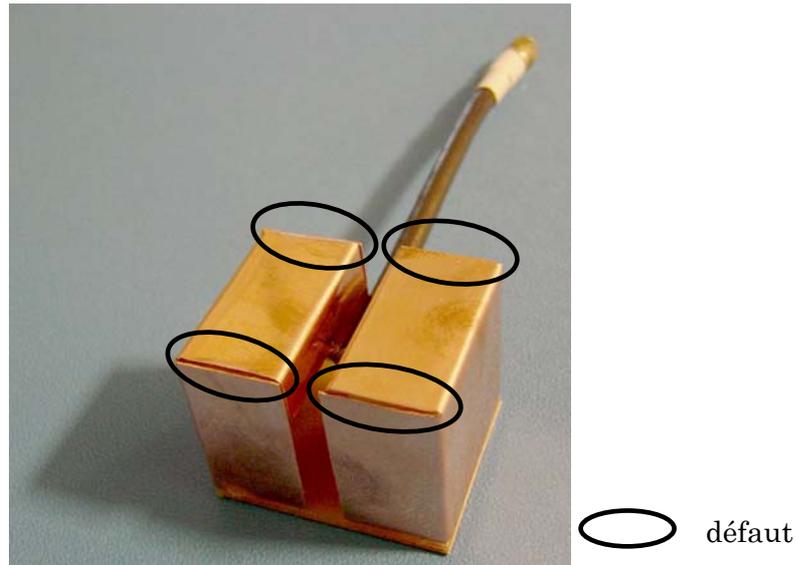


Fig. 3- 34 : Matérialisation des défauts dans l'antenne réalisée

La soudure du port est elle aussi problématique car elle n'est pas ponctuelle mais étalée sur les bandes. Malgré ces défauts nous avons poursuivi les mesures avec une mesure sur sol métallique, l'eau et le terrain humide étant difficiles à introduire dans une salle de caractérisation hyperfréquences.

Le métal utilisé est une plaque de cuivre, de même épaisseur que celle utilisée pour fabriquer l'antenne. L'antenne a été posée sur cette plaque de dimensions 20×20 cm². La figure 3-35 montre la mesure réalisée sur sol métallique avec la simulation réalisée auparavant.

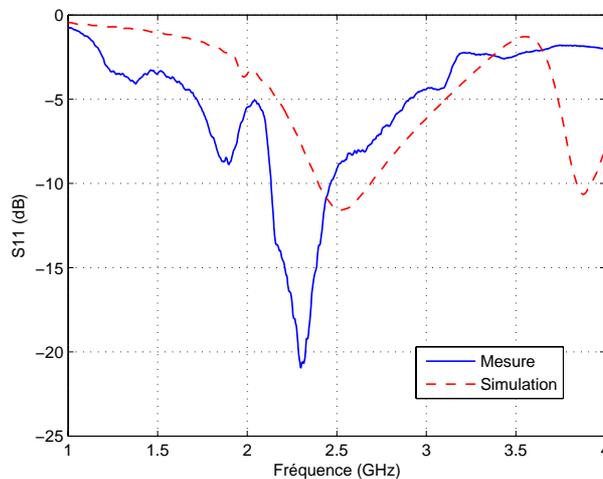


Fig. 3- 35 : Comparaison du S₁₁ entre simulation et mesure pour l'antenne sur métal

La résonance a lieu ici à 2,3 GHz et son amplitude est de -20,94 dB alors qu'en simulation elle avait lieu à 2,51 GHz (-11,59 dB). Les raisons de cet écart sont sans doute les mêmes que celles évoquées plus haut ajouté au fait que le plan métallique n'est pas infini comme il l'était pour les simulations pour des raisons de réduction de temps de calcul. Il est cependant intéressant de comparer cette mesure à la précédente (figure 3-36).

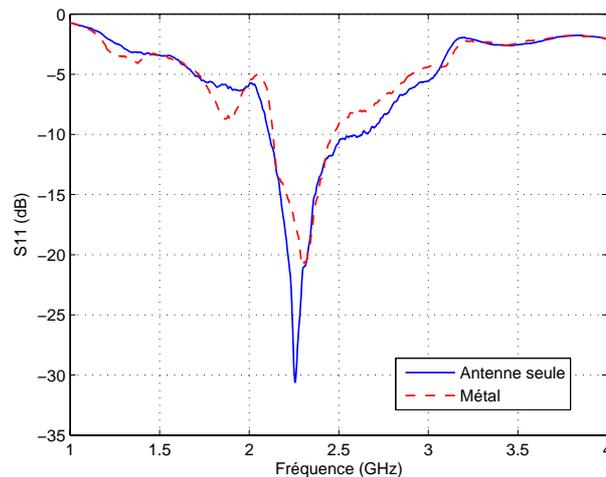


Fig. 3- 36 : Comparaison des S_{11} entre l'antenne seule et sur métal

On voit que l'écart entre les deux mesures est moins grand qu'entre les simulations des deux configurations. On passe de 2,25 à 2,3 GHz avec les mesures alors qu'on allait de 2,41 à 2,51 GHz en simulation. Cette différence s'explique peut-être par le fait que le métal utilisé en simulation est « parfait ». Ce résultat est donc une bonne nouvelle quant à l'influence de l'environnement sur l'antenne.

Il serait intéressant de revenir sur ce type de mesure qui nécessite la connexion de l'antenne à un analyseur vectoriel et donc la présence de connectiques. Comme on l'a vu, il n'est pas aisé d'alimenter notre antenne par câble du fait de sa forme et de sa taille. Il n'existe cependant aujourd'hui pas de technique permettant de mesurer une impédance « sans fil » et cela pose un réel problème quant à la caractérisation de petites antennes.

Nous n'avons pas eu l'occasion d'aller mesurer le diagramme de rayonnement de cette antenne mais il est intéressant d'évoquer cette mesure. En effet, la mesure du diagramme de rayonnement de petites antennes est problématique dans le sens où le câble d'alimentation n'est pas de taille négligeable par rapport à l'antenne et a donc une influence sur le diagramme de celle-ci. De plus, lorsque l'accès à celle-ci est situé à l'intérieur comme c'est notre cas, il n'est pas aisé d'aller brancher un câble. Une autre approche doit donc être développée et une solution possible à ce problème serait d'utiliser un circuit autonome de petite taille composé d'une alimentation et d'un circuit émetteur qui serait connecté à l'antenne ou dans l'antenne avant la mesure. Il faudrait dans ce cas concevoir un circuit adapté pour chaque antenne ce qui peut se révéler assez fastidieux.

4.5.5 Optimisation

Une fois les mesures réalisées et sachant qu'il serait difficile de faire mieux au niveau de la réalisation, une optimisation de la valeur du paramètre S_{11} a été opérée en simulation. Puis, des composants ont été ajoutés à l'antenne par la suite (figure 3-36):

- une plaque d'époxy, parallèle à la première et de dimensions similaires auxquelles on retranche l'épaisseur du cuivre de l'antenne, mise au niveau du bas des bandes et représentant le substrat d'un circuit ;
- un cylindre en aluminium ayant les dimensions d'une pile bouton 3V CR2032 (diamètre 20 mm, épaisseur 3,2 mm), posé au centre de la plaque d'époxy.

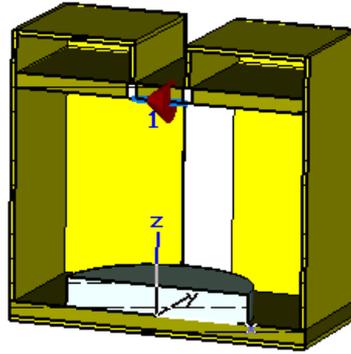


Fig. 3- 37 : Vue en coupe avec ajout époxy+pile (à dr.)

Notons qu'une adaptation a du être faite au niveau du port qui se trouve maintenant sur la face inférieure de la plaque d'époxy supérieure et qui est lié à l'antenne par deux vias métalliques. Ces ajouts préfigurent ce qui pourrait se trouver dans un module de capteur sans fil.

4.5.5.1 Antenne vide

Cette optimisation a eu pour but de réduire la taille de l'antenne vide tout en essayant de conserver sa fréquence de résonance et si possible de diminuer la valeur du paramètre S_{11} . La technique de recherche a été la même que précédemment, sous CST, tous les paramètres de l'antenne ont vu leur valeur modifiée dans des proportions plus grandes qu'auparavant. De cette étape est sortie une grande quantité de résultats dont un était particulièrement bon. Le tableau 17 en donne les paramètres et rappelle ceux de l'antenne précédente. On constate qu'il y a bien eu réduction des dimensions, on passe d'un volume de $38,6 \text{ cm}^3$ à 34 cm^3 .

	Ecart	Longueur	Largeur	Hauteur	Bande
1 ^{ère} antenne	6 mm	33 mm	33 mm	30 mm	9 mm
1 ^{ère} optimisation	5,6 mm	31 mm	31 mm	30 mm	8 mm

Tab. 17 : Dimensions de l'antenne optimisée

Avec ces dimensions, voici le paramètre S_{11} suivi des diagrammes de rayonnement :

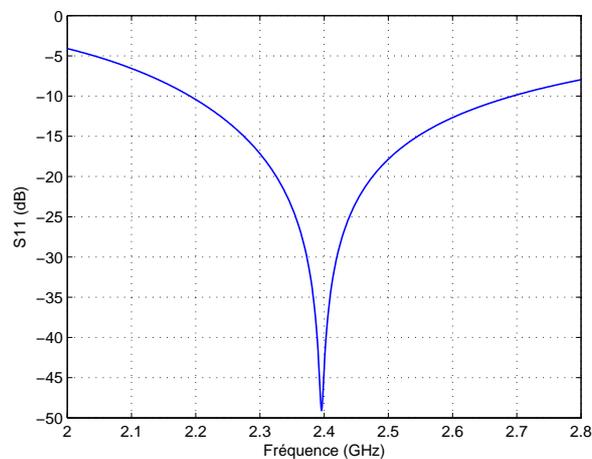


Fig. 3- 38 : Paramètre S_{11} après la 1^{ère} optimisation

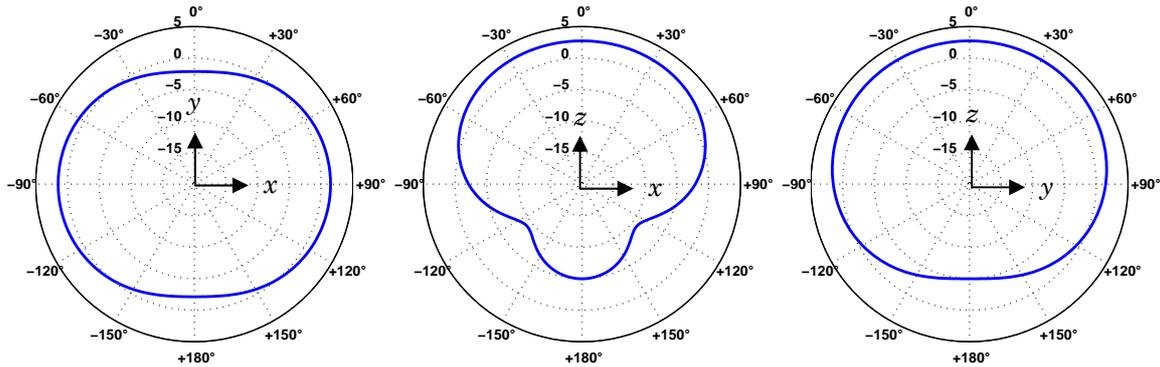


Fig. 3- 39 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans après la 1^{ère} optimisation

Le tableau suivant compare les deux antennes :

	1 ^{ère} antenne	1 ^{ère} optimisation
S11	-23,07 dB @ 2,41 GHz	-49,09 dB @ 2,396 GHz
Ouv. à -3 dB (XY)	140,2° (vers ±90°)	144° (vers ±90°)
Ouv. à -3 dB (XZ)	155,4° (vers 0°)	155,8° (vers 0°)
Ouv. à -3 dB (YZ)	263,3° (vers 0°)	233° (vers 0°)
Efficacité totale	99%	99%
Gain	2,41 dB	2,73 dB

Tab. 18 : Caractéristiques des deux antennes

On peut voir que l'adaptation est meilleure qu'auparavant pour une fréquence légèrement plus basse. Pour les diagrammes les ouvertures sont quasiment inchangées et le gain est un peu plus élevé.

4.5.5.2 Antenne remplie – Influence des composants

Comme pour la première antenne, un cube métallique a été placé dans l'antenne et a pris du volume au fur et à mesure des simulations. La figure 3-40 et le tableau 19 montrent les résultats de ces simulations.

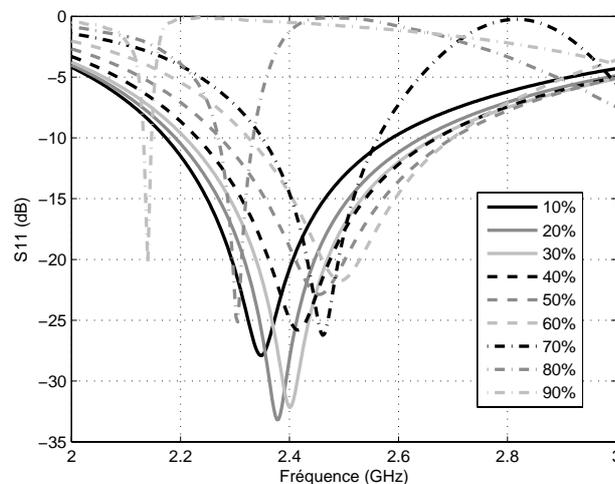


Fig. 3- 40 : Paramètre S11 simulé pour différentes dimensions du cube

% de l'antenne	Résonance	Adaptation	% de l'antenne	Résonance	Adaptation
10	2,347 GHz	-27,91 dB	60	2,494 GHz	-21,74 dB
20	2,477 GHz	-33,19 dB	70	2,461 GHz	-26,24 dB
30	2,401 GHz	-32,17 dB	80	3,305 GHz	-25,14 dB
40	2,416 GHz	-25,81 dB	90	2,140 GHz	-20,31 dB
50	2,455 GHz	-22,87 dB			

Tab. 19 : Résonance et adaptation pour chaque dimension du cube

On voit que par rapport à la première expérience, les courbes sont plus étalées et seules celles pour 30% et 40% sont dans la bande 2,4-2,45 GHz. L'impact du cube est donc ici plus important. Cette optimisation a donc rendu notre antenne plus sensible à son environnement interne. Il a donc tout de même été décidé d'ajouter les composants présentés en 4.5.5 et de ré-optimiser l'antenne avec eux.

L'ajout de la plaque d'époxy et de la pile a eu pour effet de diminuer la fréquence de résonance, comme si l'antenne avait été agrandie électriquement. Il a donc fallu refaire l'opération de variation des dimensions en réduisant les bornes inférieures des valeurs prises par les différents paramètres. Cette étape a permis de trouver une configuration intéressante détaillée dans le tableau 20.

	Ecart	Longueur	Largeur	Hauteur	Bande
1 ^{ère} optimisation	5,6 mm	31 mm	31 mm	30 mm	8 mm
Ajout époxy+pile	5,6 mm	30 mm	27 mm	29 mm	4 mm

Tab. 20 : Dimensions de l'antenne avec époxy+pile

On constate que toutes les dimensions ont été réduites avec plus ou moins d'intensité. C'est surtout visible au niveau de la largeur et des bandes qui perdent 4 mm chacune. La figure 3-41 présente le paramètre S_{11} de cette nouvelle structure et il en ressort que la résonance a lieu à 2,395 GHz et a pour valeur -27,74 dB. On se situe un peu en deçà de la bande visée mais l'expérience précédente a montré qu'une fois placée dans un environnement, l'antenne voit sa résonance augmenter en fréquence donc on ne cherchera pas à modifier ce paramètre.

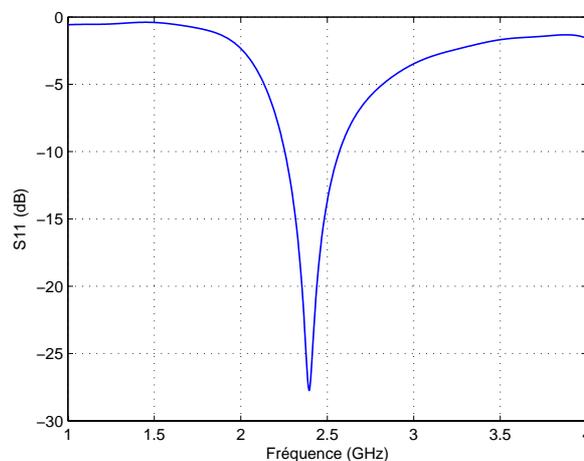


Fig. 3- 41 : Paramètre S_{11} simulé pour l'antenne avec époxy+pile

Voyons ce qu'il en est des diagrammes de rayonnement à la fréquence de résonance :

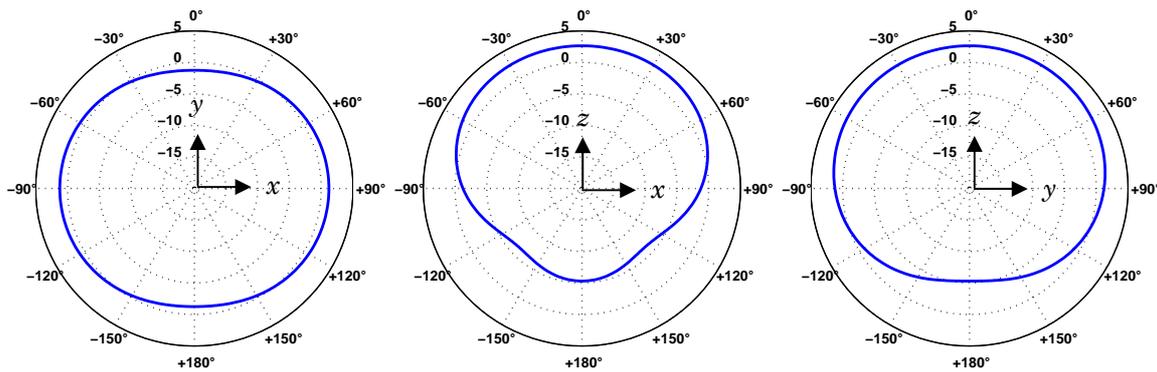


Fig. 3- 42 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans après ajout de l'époxy et de la pile

On conserve globalement les propriétés vues précédemment.

Comparons maintenant les caractéristiques de cette antenne par rapport à l'antenne vide :

	1 ^{ère} optimisation	Ajout époxy+pile
S ₁₁	-49,09 dB @ 2,396 GHZ	-27,7 dB @ 2,395 GHZ
Ouv. à -3 dB (XY)	144° (vers ±90°)	360°
Ouv. à -3 dB (XZ)	155,8° (vers 0°)	167,7° (vers 0°)
Ouv. à -3 dB (YZ)	233° (vers 0°)	227,1° (vers 0°)
Efficacité totale	99%	99%
Gain	2,73 dBi	2,64 dBi

Tab. 21 : Caractéristiques des deux antennes

On peut voir avec ce tableau que l'optimisation après l'ajout de composants a permis de conserver les propriétés de l'antenne, malgré quelques degrés perdus dans un plan vertical, le diagramme de rayonnement dans le plan horizontal est maintenant omnidirectionnel. Nous pouvons donc simuler cette configuration dans les environnements utilisés précédemment.

4.5.5.3 Antenne avec composants dans un environnement

L'antenne a donc été placée sur différents sols afin d'évaluer sa sensibilité. La figure 3-43 expose le paramètre S₁₁ pour chaque sol et le tableau 22 donne la fréquence et l'amplitude de la résonance dans chaque cas.

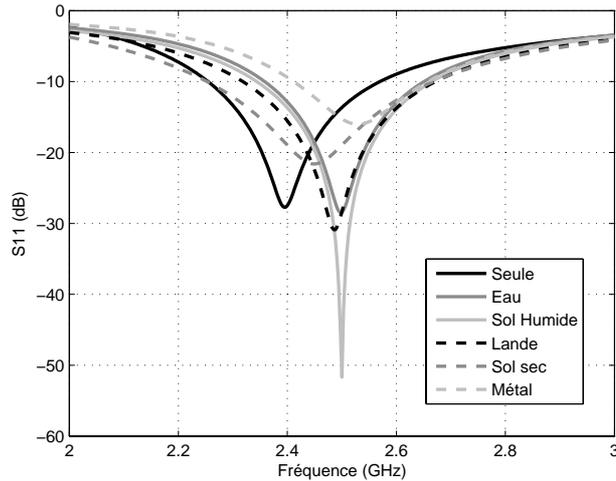


Fig. 3- 43 : Paramètre S_{11} de l'antenne avec composants pour différents sols

	Fréquence	Adaptation
Seule	2,395 GHz	-27,74 dB
Eau	2,497 GHz	-28,49 dB
Sol humide	2,50 GHz	-51,67 dB
Lande	2,485 GHz	-30,89 dB
Sol sec	2,449 GHz	-21,6 dB
Métal	2,53 GHz	-16,02 dB

Tab. 22 : Fréquences et adaptation de l'antenne avec composants pour différents sols

On peut voir ici que l'environnement a un impact un peu plus fort qu'il ne l'a eu sur la première version de cette antenne (voir 4.5.3.2). On note toujours une montée en fréquence et un groupement des fréquences de résonnance vers 2,5 GHz. Sur la figure 3-44 sont présentés les diagrammes de rayonnement pris à 2,4 GHz et le tableau 23 détaille les valeurs des ouvertures à -3 dBi, gains et efficacités pour chaque plan.

On peut voir notamment que dans le plan YZ, à part pour un sol sec, présente des gains faibles et que dans le plan XY le rayonnement omnidirectionnel a disparu pour tendre vers un rayonnement bidirectionnel à mesure que la permittivité augmente. Les efficacités ont aussi diminué mais restent élevées.

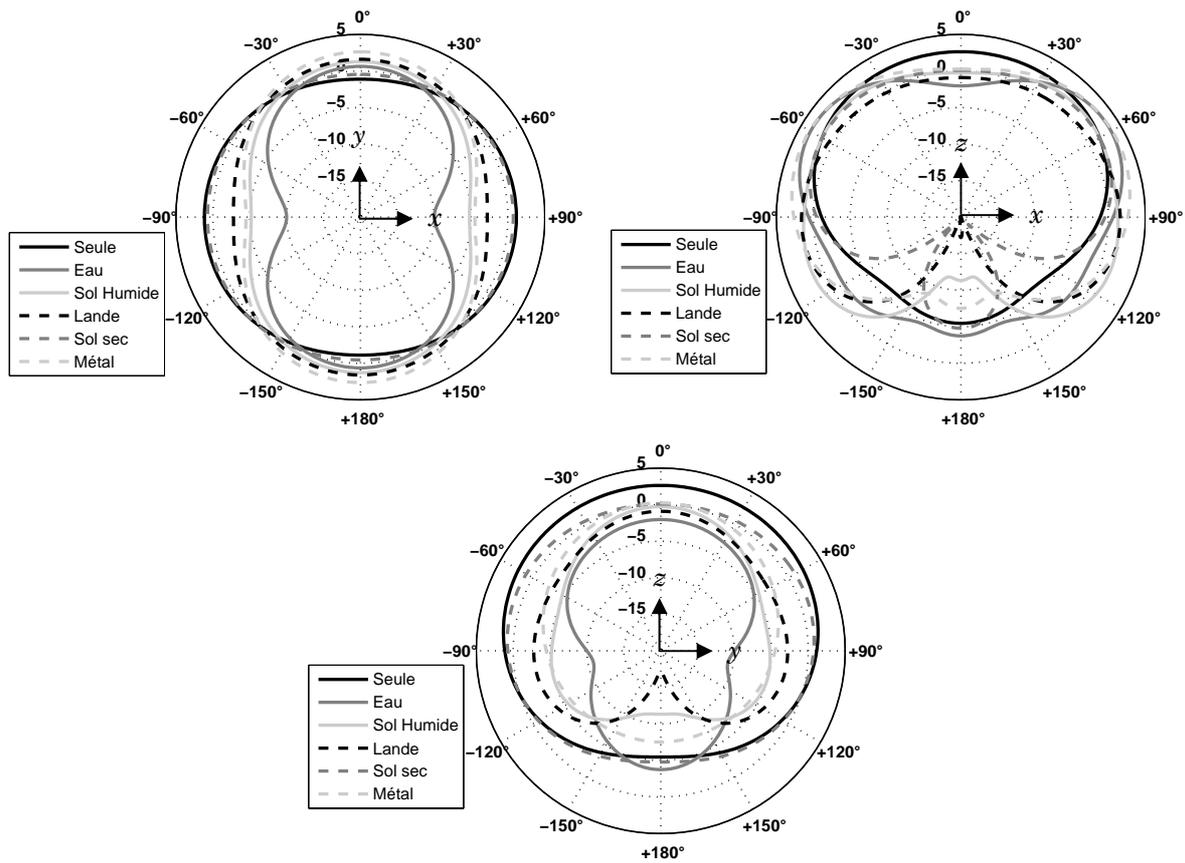


Fig. 3- 44 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans sur différents sols

	Plan XY	Plan XZ	Plan YZ	Efficacité
Seule	360° 1,1 dBi vers 90°	167,7° 2,6 dBi vers 0°	224,8° 2,6 dBi vers 0°	99%
Eau	84,1° 0,6 dBi vers 0°/180°	60,1° 3,5 dBi vers ±58°	114,2° -2 dBi vers 0°	92%
Sol humide	98,9° 1,3 dBi vers 0°/180°	360° 1,9 dBi vers ±44°	92,1° -0,3 dBi vers 0°	94%
Lande	122,8° 1,6 dBi vers 0°/180°	264° 1,6 dBi vers ±93°	237,2° -0,9 dBi vers 0°	96%
Sol sec	360° 0,7 dBi vers ±90°	190,2° 1,7 dBi vers ±56°	360° 1,1 dBi vers ±67°	98%
Métal	93,7° 2,6 dBi vers 0°/180°	97,5° 3,7 dBi vers ±62°	128,1° 0,2 dBi vers 0°	87%

Tab. 23 : Ouvertures, efficacités et gains sur différents sols

4.5.5.4 Conclusion

Cette première optimisation de l'antenne a permis de montrer qu'il était possible d'améliorer ses performances, meilleure adaptation et meilleur gain, tout en réduisant ses dimensions. L'ajout de composants à l'intérieur a encore permis de lui faire perdre quelques millimètres sans, là aussi, modifier grandement les propriétés. Par contre, le

fait de mettre cette nouvelle antenne dans un environnement a montré une plus grande sensibilité et une modification du diagramme de rayonnement qui en réduit l'intérêt.

4.5.6 Deuxième optimisation

Partant de la conclusion précédente et sachant que la résonance de l'antenne optimisée seule avait lieu vers 2,5 GHz, une nouvelle optimisation a été entreprise en plaçant l'antenne avec composants dans un environnement pour tout de suite être à la bonne fréquence. Le choix de l'environnement s'est porté sur le sol humide dont la permittivité est proche de la moyenne des permittivités des sols utilisés. Comme pour les cas précédents, toutes les dimensions ont été rendues variables. Il a résulté de cette opération, une structure résonnant à 2,42 GHz ayant pour adaptation -56,1 dB. Ses dimensions sont de 30 mm pour la hauteur, la largeur et la longueur, 5,6 mm pour l'écart et 4 mm pour les bandes.

C'est avec ces dimensions que l'antenne a été simulée dans les autres environnements. Voici les résultats obtenus au niveau des fréquences de résonnances (figure 3-45 et tableau 24), diagrammes de rayonnement (figure 3-46) et ouvertures angulaires (tableau 25).

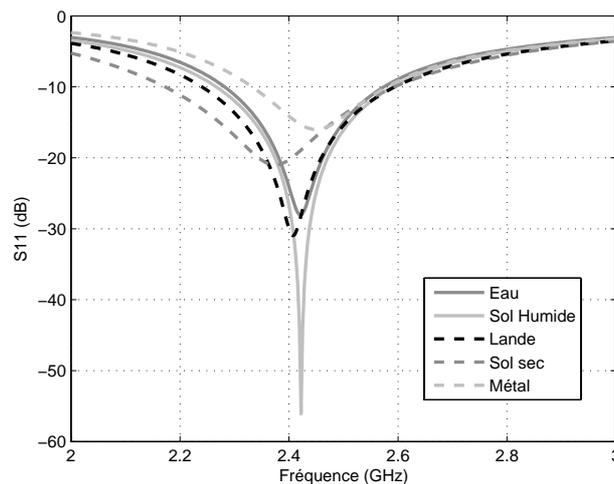


Fig. 3- 45 : Paramètre S_{11} de l'antenne avec composants pour différents sols

	Fréquence	Adaptation
Eau	2,42 GHz	-28,07 dB
Sol humide	2,42 GHz	-56,10 dB
Lande	2,407 GHz	-30,98 dB
Sol sec	2,374 GHz	-21,01 dB
Métal	2,449 GHz	-16,01 dB

Tab. 24 : Fréquences et adaptation de l'antenne avec composants pour différents sols

Ce tableau permet de voir que, à part sur sol sec, la fréquence de résonance est bien dans la bande 2,4-2,45 GHz avec des adaptations inférieures à -16 dB.

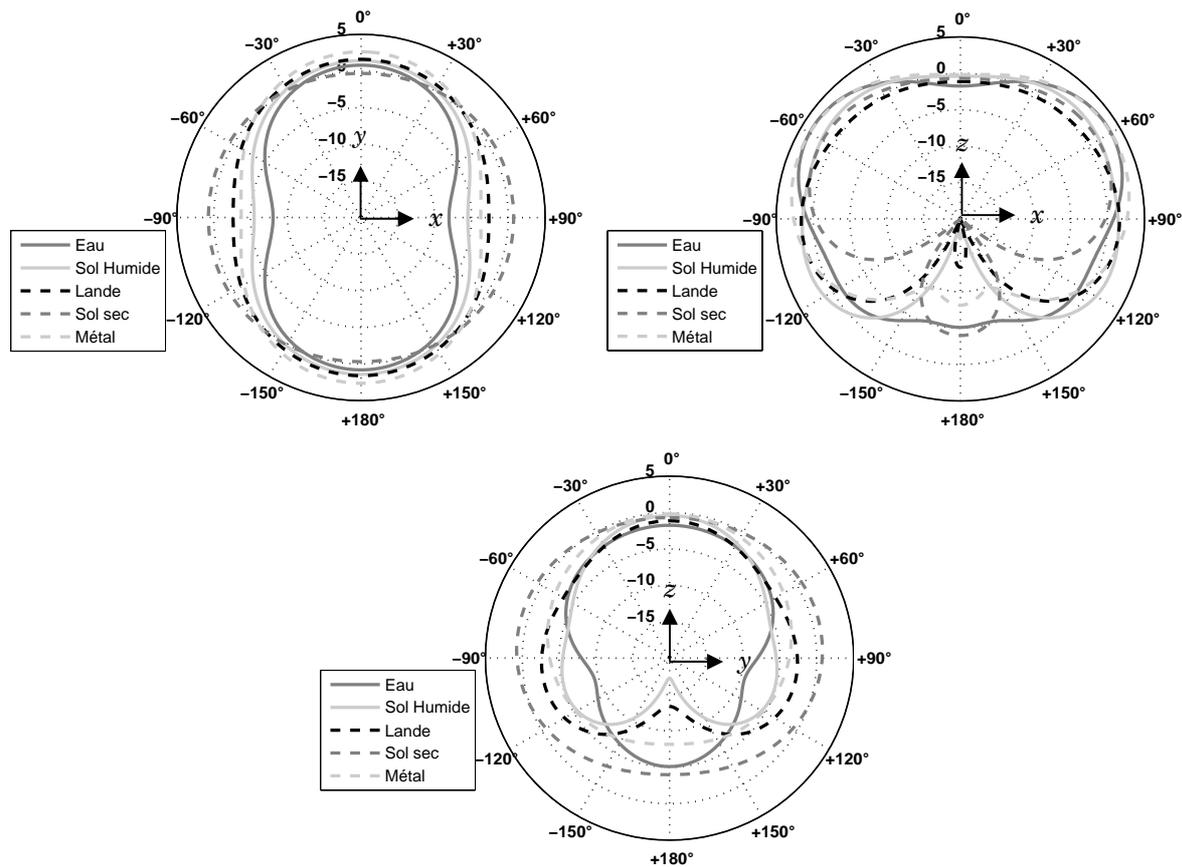


Fig. 3- 46 : Diagrammes de rayonnement dans 3 plans sur différents sols

	Plan XY	Plan XZ	Plan YZ	Efficacité
Eau	86,2° 0,8 dBi vers 0°/180°	67,1° 3,6 dBi vers ±58°	134,2° -1,8 dBi vers 0°	96%
Sol humide	96,4° 1,4 dBi vers 0°/180°	184° 1,9 dBi vers ±49°	92,9° -0,4 dBi vers 0°	98%
Lande	125,2° 1,6 dBi vers 0°/180°	262° 1,6 dBi vers ±92°	251,4° -1,1 dBi vers 0°	99%
Sol sec	360° 0,7 dBi vers ±90°	193° 1,6 dBi vers ±56°	360° 0,9 dBi vers ±75°	98%
Métal	96,8° 2,6 dBi vers 0°/180°	93,3° 3,6 dBi vers ±63°	159,5° -0,2 dBi vers 0°	95%

Tab. 25 : Ouvertures, efficacités et gains sur différents sols

Avec ce tableau-ci, on voit que hors sols extrêmes comme l'eau ou le métal, les caractéristiques de rayonnement sont bonnes. L'antenne émet de l'énergie principalement vers le haut et ce presque de manière omnidirectionnelle dans le plan lorsque le sol n'est pas trop humide.

4.5.7 Conclusion

Pour conclure sur ce type d'antenne cubique, nous avons vu que notre structure permet de contenir un volume sans en être affecté dans une certaine mesure. Le fait d'ajouter des volumes ayant la forme de composants réels que l'on retrouvera dans un

capteur dans sa configuration finale permet d'affiner notre modèle et de dimensionner l'antenne plus précisément. Les simulations de l'antenne sur divers sols sur lesquels des réseaux de capteurs peuvent être déployés permettent de se donner une idée du comportement de l'antenne dans des conditions réelles. Il ressort de cette étude que notre antenne optimisée réagit bien aux changements environnementaux si ceux-ci ne sont pas extrêmes (eau et métal). Pour sa réalisation, il serait nécessaire de la consolider mécaniquement, le lien époxy-cuivre étant un point faible dans notre montage. Un autre problème se pose enfin, c'est l'orientation de l'antenne lors du déploiement. La forme cubique permet six positions dont quatre sont équivalentes deux à deux et le pire cas est celui où la structure se pose au sol avec le plan réflecteur vers le haut. Cet aspect n'a pas été pris en compte dans la conception mais des astuces pourraient permettre d'éviter ce scénario. En effet, en mettant du poids directement sur l'époxy, on approche le centre de gravité de la structure du sol et on augmente les chances de la voir se poser dans le bon sens.

4.6 Antenne demi-boule agile

Nous allons, dans cette partie, présenter une dernière structure en rupture avec les autres du fait de sa forme, sphérique en dessous et plate au-dessus.

4.6.1 Concept

Le concept de cette structure permet de répondre au problème de la position de l'antenne au sol. En effet, ayant une face hémisphérique, si elle tombe sur celle-ci⁶⁰, sa face plane sera à l'horizontal par le jeu de l'équilibre que la sphère trouvera avec le sol. Il suffit alors de mettre nos éléments rayonnants sur cette face plane pour leur assurer une bonne position.

En plus de cela, nous allons rendre cette antenne agile au niveau de son diagramme de rayonnement en disposant plusieurs éléments rayonnants sur sa face plane et qui, selon l'excitation qu'ils reçoivent, font que le tout rayonne dans différentes directions.

4.6.2 Conception

4.6.2.1 La structure

Pour concevoir la structure nous avons besoin d'une demi-sphère pouvant résister à un choc sans se déformer, assez grande pour contenir des composants et dont le matériau est compatible avec une utilisation en extérieur. Le métal a vite été écarté car trop fragile. Nous nous sommes donc tournés vers le caoutchouc qui allie souplesse et rigidité et dont la résistance est bonne. Mouler du caoutchouc n'étant pas dans nos compétences, il a été choisi d'utiliser une balle de tennis coupée en deux. Creuse, d'un diamètre de 65 mm et d'une épaisseur de 2 mm, elle formera la partie sphérique de notre structure. La partie plane quant à elle sera une plaque d'époxy posée sur la demi-sphère et sur laquelle seront les éléments rayonnants. Cette plaque viendra refermer la demi-

⁶⁰ L'ajout d'un élément flottant accroché à la structure permet d'accroître grandement les chances de tomber sur la face bombée (85%)

sphère, rendant la structure hermétique si un joint est placé à la jonction. Dans cette configuration, l'alimentation des antennes se fera à travers l'époxy.

4.6.2.2 Les antennes

Nous disposons des 33,1 cm² d'époxy pour disposer des antennes en réseau dessus. L'objectif est de créer un réseau capable d'orienter son diagramme tout autour de la structure et vers le haut, le sol étant à éviter. Pour résoudre ce dernier point, un réflecteur métallique a été ajouté au fond de la demi-sphère, recouvrant sa surface à moitié. Le choix du type d'antenne à mettre en réseau s'est arrêté sur de simples dipôles linéaires dans un premier temps. Plusieurs configurations avec trois ou quatre dipôles alignées (Fig. 3-47) ont été testées sans parvenir à trouver une bonne solution en termes d'agilité du diagramme et d'efficacité de rayonnement. En effet, le fait de mettre des dipôles côte-à-côte comme cela a été fait dans la théorie des réseaux (voir Chap. 2 §2.1) ne permet pas de rayonner dans toutes les directions.

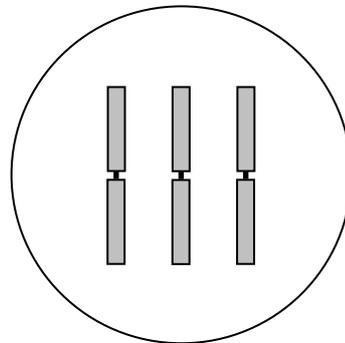


Fig. 3- 47 : Configuration à 3 dipôles alignés

D'autres agencements à trois dipôles ont été simulés, la figure suivante les présente :

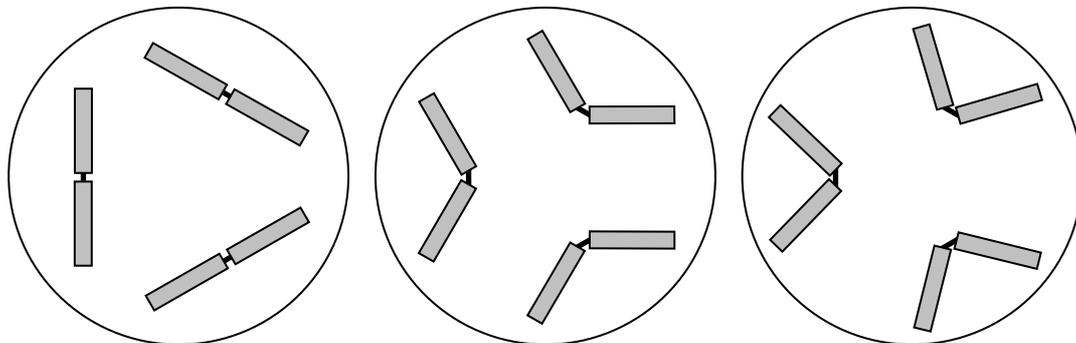


Fig. 3- 48 : Configurations à 3 dipôles en cercle

Trois configurations sont présentées ci-dessus, sur chacune les trois dipôles sont disposés en cercle tous les 120° et l'angle entre les bras a été modifié à chaque fois pour passer par 180° (figure de gauche), 120° (au centre) et enfin 90° (à droite). Cependant, là aussi, aucune n'est satisfaisante pour les mêmes raisons énoncées plus haut. L'inefficacité de ces agencements provient du fait que les courants, et donc les champs créés par chaque dipôle, sont opposés et s'annulent dans la plupart des cas. De plus, trois dipôles ne suffisent pas pour viser toutes les directions.

Nous sommes donc passés à quatre dipôles que nous avons là disposés tous les 90° comme la figure 3-49 le montre.

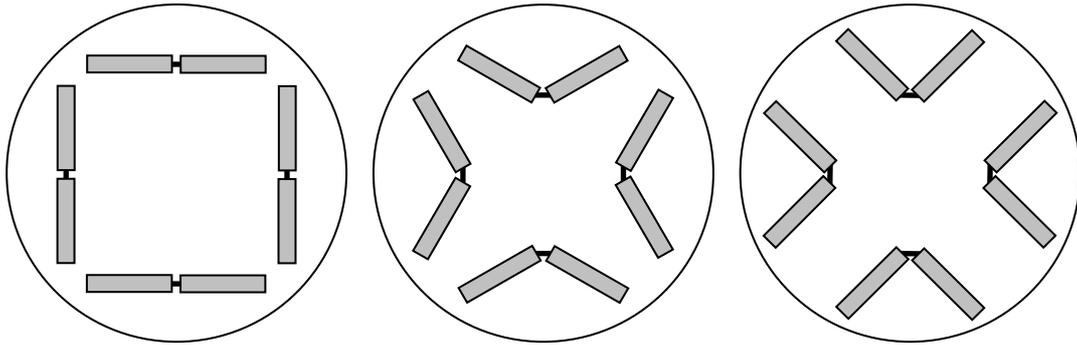


Fig. 3- 49 : Configurations à 3 dipôles en cercle

L'angle entre les bras a là aussi pris trois valeurs. Ce type d'arrangement fonctionne beaucoup mieux que les précédents car il présente quatre axes de symétrie passant par le centre de la plaque d'époxy. Ces symétries permettent de créer plusieurs configurations où des courants sont dans la même direction. Des trois configurations à quatre dipôles, c'est celle où les bras des dipôles sont perpendiculaires qui présente les meilleures efficacités de rayonnement avec des diagrammes directifs. C'est donc cette topologie que nous allons étudier dans la suite.

4.6.3 Simulations

La structure complète a été simulée sous CST (Fig. 3-50). Les ports utilisés sont des ports discrets situés sous l'époxy et liés aux bras des dipôles par des vias métalliques cylindriques de 2 mm de diamètre. Dans un premier temps, elle a été adaptée pour résonner dans la bande 2,4-2,45 GHz puis dans un deuxième temps nous avons cherché quelles phases il fallait appliquer à chaque dipôle pour obtenir des diagrammes directifs.

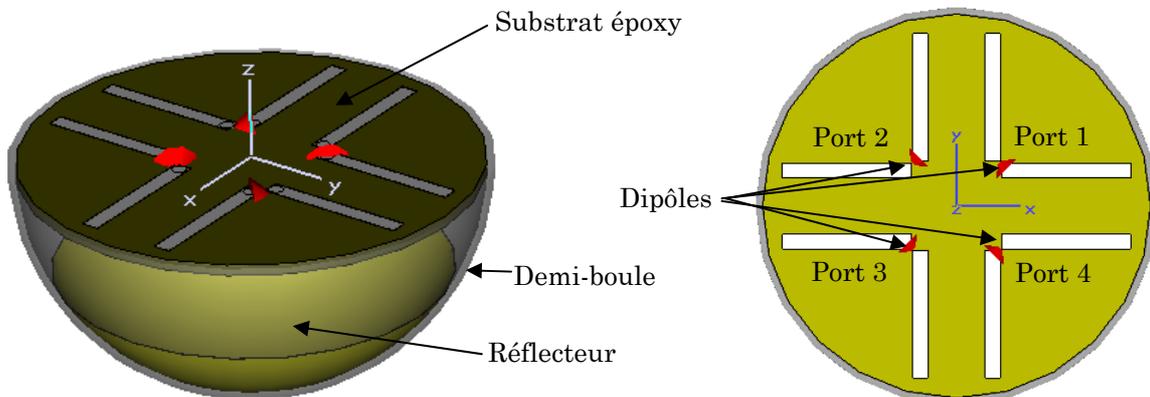


Fig. 3- 50 : Vue de l'antenne en perspective et de dessus

4.6.3.1 Adaptation

L'adaptation de chaque dipôle s'est faite simultanément. Pour cela, nous disposons de plusieurs degrés de libertés sur certaines dimensions marquées sur la figure 3-51 et détaillées par la suite.

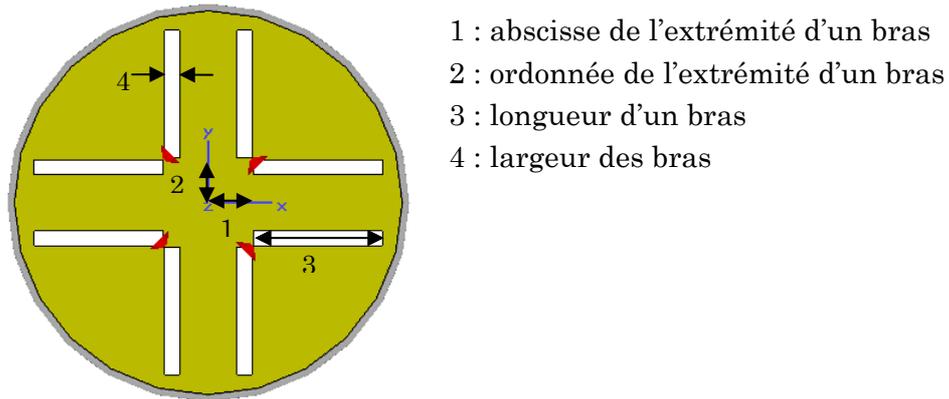


Fig. 3- 51 : Paramètres variables des dipôles

La valeur de ces paramètres influe sur l'écart entre deux bras parallèles ainsi que sur celui entre deux bras perpendiculaires. Ces écarts ont un impact sur le couplage qui va exister entre les dipôles.

La technique d'adaptation a été la même que précédemment, c'est-à-dire réalisée par le biais de simulations successives dans lesquelles tous les paramètres varient et où toutes les combinaisons de valeurs sont testées. Ce travail est long en temps de calcul et demande d'ajuster les plages de variations des paramètres en fonction des tendances observées sur les valeurs de résonances. Des limitations sont tout de même nécessaires car il faut éviter que les dipôles ne sortent du périmètre de l'époxy ou que leurs bras n'entrent pas en contact.

Le résultat de toutes ces simulations a permis de dégager une configuration intéressante :

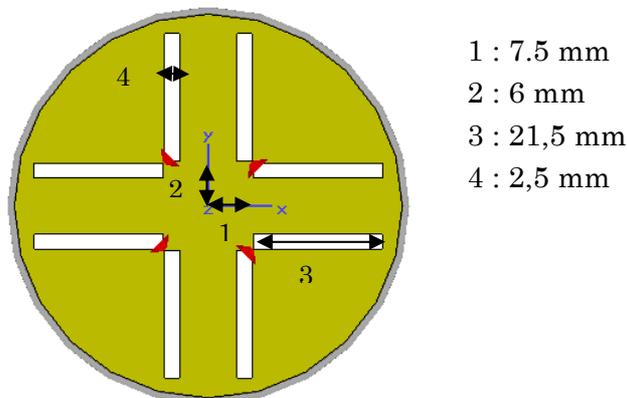


Fig. 3- 52 : Valeur des paramètres après adaptation

Ces valeurs ont été retenues de par l'adaptation qu'elles engendrent, -11,54 dB à 2,41 GHz et le diagramme de rayonnement induit par chaque dipôle. La figure 3-53 présente le coefficient de réflexion du port 1 ainsi que le couplage qui existe avec les ports 2, 3 et 4. Par symétrie on sait que l'on a :

- $S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}= -11,54$ dB
- $S_{21}=S_{12}=S_{32}=S_{23}=S_{43}=S_{34}=S_{41}=S_{14}= -12,71$ dB
- $S_{31}=S_{13}=S_{42}=S_{24}= -7,81$ dB

On constate que le couplage est plus fort entre deux dipôles opposés qu'entre deux dipôles consécutifs.

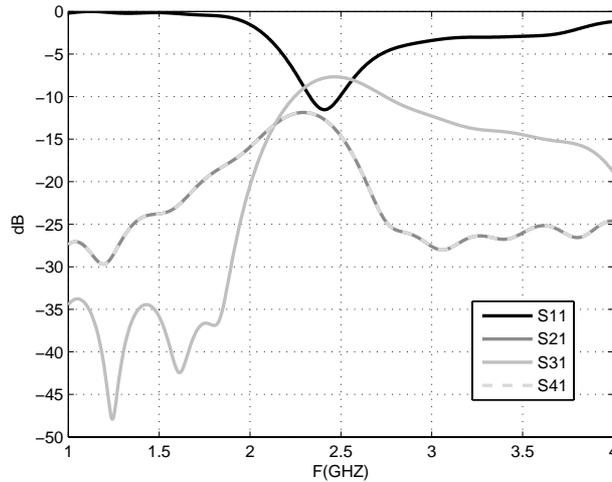


Fig. 3- 53 : Coefficient de réflexion et couplage du port 1 avec les autres ports

Voyons maintenant le diagramme de rayonnement d'un de ces dipôles, celui qu'excite le port 1 :

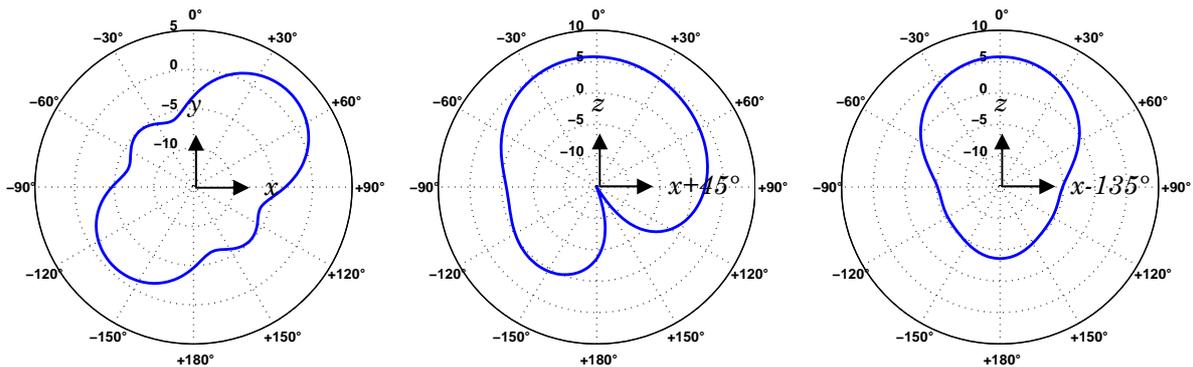


Fig. 3- 54 : Diagrammes de rayonnement du dipôle 1 seul

Pour la figure du centre nous nous sommes placés dans le plan où le gain était le plus fort, à savoir à 45° de l'axe x par rotation autour de z , le diagramme de droite étant pris à 90° de celui du centre. De gauche à droite les ouvertures à -3 dBi et gains sont de 65,9° vers 45° avec 2,1 dBi, 134,5° vers 5° à 5,8 dBi et 80,4° vers 0° à 5,8 dBi. L'efficacité de rayonnement est là de 65%. Ces diagrammes sont identiques quel que soit le dipôle, seules les orientations changent. Notons que le réflecteur joue pleinement son rôle en empêchant l'antenne de rayonner vers le sol.

4.6.3.2 Variation des phases

L'objectif étant de réaliser une antenne agile, nous allons maintenant faire varier la phase des ports pour tenter de trouver des situations intéressantes. Voyons tout d'abord le diagramme obtenu lorsqu'on combine les quatre dipôles, tous étant alimentés en phase (Fig. 3-55). On voit que dans le plan XY le diagramme est omnidirectionnel et qu'il est identique dans les plans XZ et YZ par symétrie.

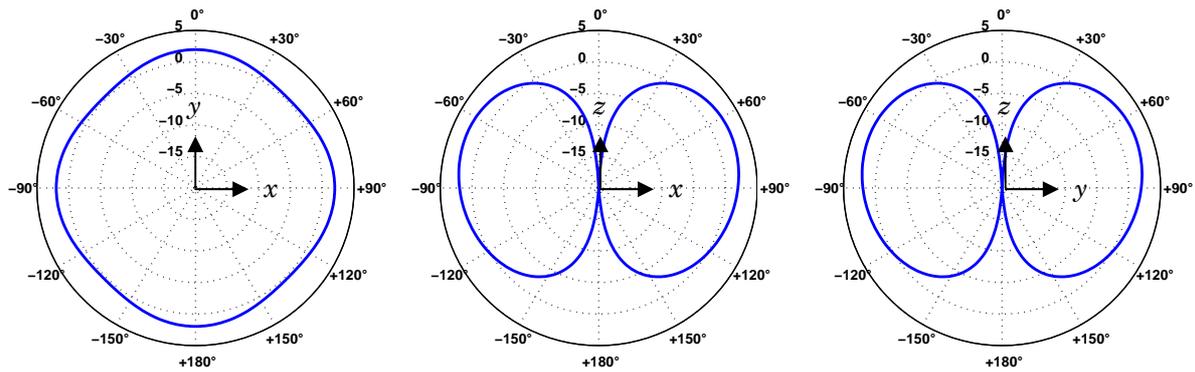


Fig. 3- 55 : Diagrammes de rayonnement des quatre dipôles

Ces caractéristiques intéressantes cachent en fait une efficacité de rayonnement de 18%. Cette inefficacité trouve son explication dans la répartition des courants dans toute la structure (Fig. 3-56).

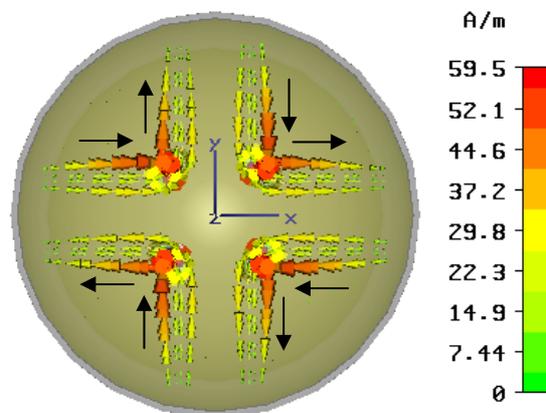


Fig. 3- 56 : Répartition des courants avec quatre dipôles en phase

Cette figure permet de mettre en évidence le fait que les courants dans les bras parallèles sont opposés et annulent donc les champs qu'ils créent. Il va donc falloir trouver des situations où ce phénomène est minimale.

Nous avons donc testé des déphasages entre ports de 90 à 180° et des configurations à deux, trois ou quatre dipôles alimentés. Parmi toutes, trois ont retenu notre attention, les voici donc :

- 1^{ère} configuration :

Cette première configuration consiste à alimenter les quatre dipôles et de déphaser deux d'entre eux de 90° par rapport aux autres. Dans ce cas, on obtient quatre combinaisons ayant toutes le même diagramme de rayonnement mais orienté différemment. Voici tout d'abord ces combinaisons :

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
A	90°	0°	0°	90°
B	0°	0°	90°	90°
C	0°	90°	90°	0°
D	90°	90°	0°	0°

Tab. 26 : Combinaisons avec quatre ports

Et voici les diagrammes de rayonnement pris dans le plan XY correspondant à chacune :

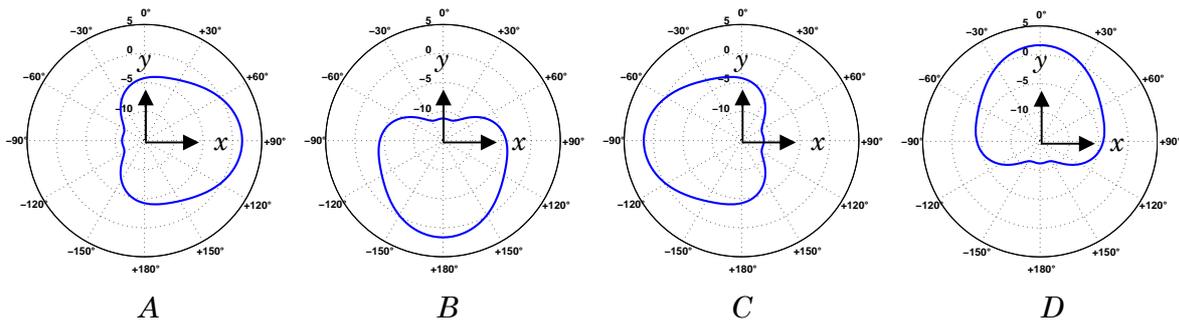


Fig. 3- 57 : Diagrammes dans le plan XY pour chaque combinaison

Et voici la configuration A prise dans les plans XZ et YZ :

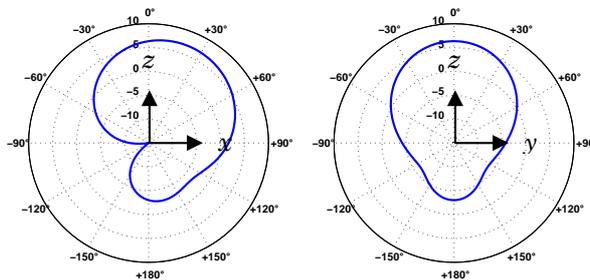


Fig. 3- 58 : Diagrammes dans les plans XZ et YZ de la combinaison A

Les deux derniers diagrammes sont bien sur les mêmes pour les combinaisons B , C et D , seules leurs orientations varient. Le tableau ci-dessous détaille les ouvertures à -3 dBi, directions et gains :

Plan/comboinaison	Ouvertures	Gain
XY/A	$82,7^\circ$ vers $+90^\circ$	1,7 dBi
XY/B	$82,7^\circ$ vers 180°	
XY/C	$82,7^\circ$ vers -90°	
XY/D	$82,7^\circ$ vers 0°	
$XZ/toutes$	$97,5^\circ$ vers 20°	6,9 dBi
$YZ/toutes$	$79,5^\circ$ vers 0°	6,3 dBi

Tab. 27 : Ouvertures et gains de chaque plan/comboinaison

On voit bien que ces combinaisons permettent de balayer quatre directions toutes perpendiculaires entre elles dans le plan XY et que, dans le plan XZ , le rayonnement se fait entre 0 et 90° avec un bon gain. L'efficacité totale de cette configuration est de 57%. En effet, en étudiant les courants dans les dipôles à différents moments pour la combinaison D (Annexe F), on constate que sur une période il n'y a qu'un seul cas où tous les courants de même amplitude s'annulent ($\varphi=120^\circ$), le reste du temps, il existe toujours au moins deux courants plus intenses allant dans la même direction.

▪ 2^{ème} configuration

Cette deuxième configuration ne nécessite que deux ports opposés, le port 1 et le port 3 ou le port 2 et le port 4, l'un étant déphasé de 90° par rapport à l'autre et les

autres étant non alimentés. On obtient là aussi quatre combinaisons listées dans le tableau 28 :

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
<i>E</i>	0°	NA	90°	NA
<i>F</i>	90°	NA	0°	NA
<i>G</i>	NA	0°	NA	90°
<i>H</i>	NA	90°	NA	0°

Tab. 28 : Combinaisons avec deux ports (NA : Non Alimenté)

Voici les diagrammes obtenus dans le plan *XY* pour chacune :

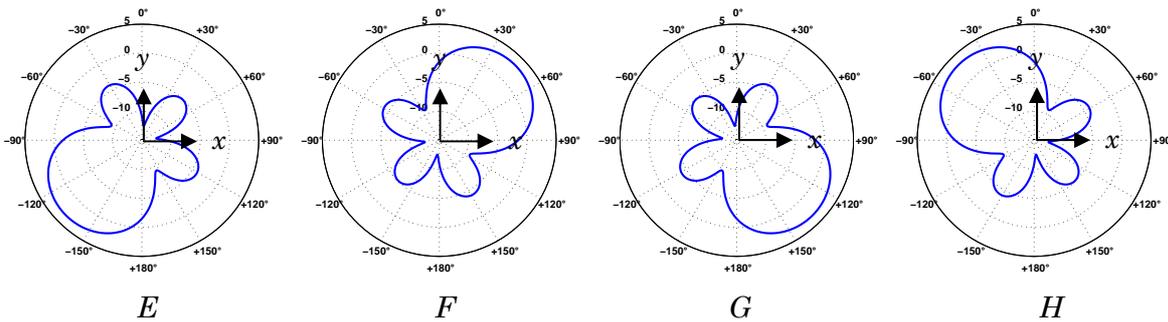


Fig. 3- 59 : Diagrammes dans le plan *XY* pour chaque combinaison

Et dans les plans $X+45^\circ Z$ et $Y+45^\circ Z$:

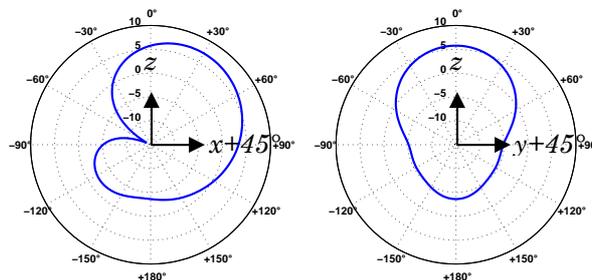


Fig. 3- 60 : Diagrammes dans les plans $X+45^\circ Z$ et $Y+45^\circ Z$ de la combinaison *F*

Comme précédemment aussi les deux derniers diagrammes sont identiques pour toutes les combinaisons. Le tableau suivant donne les ouvertures à -3 dBi, directions et gain de chaque diagramme :

Plan/combinaison	Ouvertures	Gain
<i>XY/E</i>	73,6° vers -135°	3,3 dBi
<i>XY/F</i>	73,6° vers +45°	
<i>XY/G</i>	73,6° vers -45°	
<i>XY/H</i>	73,6° vers +135°	
<i>XZ/toutes</i>	94,5° vers 30°	7,1 dBi
<i>YZ/toutes</i>	80,4° vers 0°	5,8 dBi

Tab. 29 : Ouvertures et gains de chaque plan/combinaison

Ces combinaisons permettent ici de balayer quatre directions toutes perpendiculaires entre elles et à 45° par rapport aux directions vues avec la première configuration. Le

rayonnement se fait là aussi entre 0 et 90° à la verticale. L'efficacité totale est de 65% ce qui s'explique là encore par l'étude des courants dans les dipôles avec la combinaison F (Annexe F). On voit là aussi qu'à un seul moment ($\varphi=120^\circ$), les courants s'annulent. Cependant, comparée au premier cas, l'efficacité est meilleure. Cela s'explique par le fait que les dipôles 1 et 3 sont les seuls ports alimentés, ils ne subissent donc pas l'influence de leurs voisins directs, les ports 2 et 4. Leur position diamétralement opposée, fait que l'effet de cette annulation est moindre.

On voit qu'avec ces deux premières configurations, il est possible de balayer huit directions distinctes dans le plan horizontal avec une efficacité et une directivité intéressantes. Voyons enfin la dernière configuration qui traite de la direction verticale, z .

- 3^{ème} configuration

Cette dernière configuration va servir à viser une zone encore non couverte par les précédentes, à savoir la verticale. Pour cela, deux ports opposés sont nécessaires avec un déphasage de 180° entre eux. Il existe là aussi quatre combinaisons :

Combinaison	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
I	0°	NA	180°	NA
J	180°	NA	0°	NA
K	NA	0°	NA	180°
L	NA	180°	NA	0°

Tab. 30 : Combinaisons avec deux ports (NA : Non Alimenté)

Ces combinaisons donnent les mêmes résultats en termes de diagrammes de rayonnement, nous ne nous intéresserons donc qu'à la combinaison I dont voici le diagramme de rayonnement dans le plan XZ :

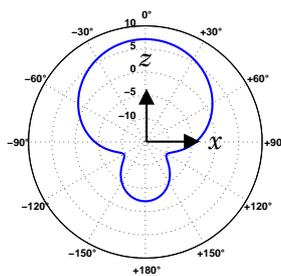


Fig. 3- 61 : Diagramme dans le plan XZ de la combinaison I

L'ouverture à -3 dBi est de 90,5° et l'émission se fait vers 0° à 7,1 dBi. L'efficacité est excellente avec 95%.

On voit qu'avec les trois configurations présentées, il est possible de couvrir le demi-espace situé autour de la structure demi-boule. Il existe bien d'autres configurations utilisant d'autres déphasages et pointant vers des directions autres mais ces dernières recoupent les premières et affichent des efficacités moindres ou équivalentes. Elles ne trouvent donc pas leur utilité et ne seront pas étudiées ici.

4.6.4 Etude environnementale

Comme pour l'antenne précédemment étudiée, nous avons voulu connaître le comportement de l'antenne demi-boule placée dans un environnement. Les mêmes sols ont donc été repris pour tester l'influence qu'ils ont sur notre antenne. Voici les courbes du paramètre S_{11} simulées pour chaque sol :

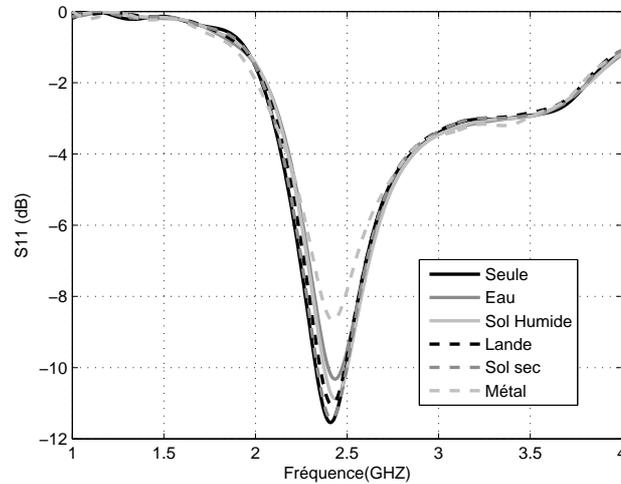


Fig. 3- 62 : Paramètre S_{11} d'un dipôle de la structure sur différents sols

Le tableau suivant présente les fréquences et amplitudes à la résonance :

	Fréquence	Amplitude
Seule	2,410 GHz	-11,54 dB
Eau	2,434 GHz	-10,32 dB
Sol humide	2,434 GHz	-10,87 dB
Lande	2,419 GHz	-11,04 dB
Sol sec	2,416 GHz	-11,45 dB
Métal	2,422 GHz	-8,66 dB

Tab. 31 : Fréquences et amplitude à la résonance d'un dipôle sur différents sols

Cette figure et ce tableau permettent de voir que l'environnement a un faible impact sur notre structure. On peut expliquer cette robustesse par le fait que les dipôles sont surélevés et protégés par une couche de caoutchouc (la demi-balle), une couche métallique (le réflecteur), de l'air (intérieur de la boule) et une couche d'époxy, ce qui les isole assez bien de l'extérieur.

4.6.5 Remplacement des ports discrets

En vue de la réalisation et de la caractérisation de l'antenne demi-boule, il est nécessaire de remplacer les ports discrets par des alimentations existantes. Le caractère agile de cette antenne nécessite une alimentation elle aussi agile pouvant alimenter ou non des dipôles et pouvant déphaser le signal. Les structures idéales pouvant répondre à ce type de problématique seraient des lignes commutées par des MEMS commandés numériquement. Ces MEMS viendraient faire contact ou non entre deux lignes et orienter le signal vers un tronçon de ligne plus long pour créer un déphasage. Cependant, la réalisation de telles structures est longue et bien trop complexe pour

simplement valider notre antenne. Nous avons donc choisi d'étudier deux circuits déphaseurs reprenant chacun une combinaison des deux premières configurations. Le premier va permettre de mettre en œuvre les combinaisons E à H avec un port déphasé de 90° par rapport à un autre. Le deuxième traitera des combinaisons de A à D où deux ports sont déphasés de 90° par rapport à deux autres.

Ces circuits ont été simulés sous le logiciel ADS2006. Ils utilisent des lignes microstrip sur substrat Alumine de permittivité relative $\epsilon_r=9,6$. Les déphasages à appliquer étant de 90° , des lignes quart d'ondes ont été recherchées.

4.6.5.1 Circuit pour deux ports

L'objectif pour ce circuit est de créer un déphasage de 90° entre deux ports à 2,41 GHz, la fréquence de résonnance des dipôles. Nous avons dans un premier temps réalisé un circuit électrique simple afin de déterminer les longueurs de lignes à mettre pour obtenir une bonne adaptation et un déphasage de 90° . Notre circuit se compose d'une source qu'un diviseur de puissance vient scinder en deux pour alimenter les deux ports via des lignes. Afin de connaître l'adaptation et les phases induites par les lignes, nous avons utilisés des ports 50Ω idéaux que nous remplacerons ensuite par des ports contenant l'impédance des dipôles obtenu sous CST. Ces ports 50Ω sont numérotés, 1 pour la source, 2 pour l'antenne 2 et 3 pour l'antenne 1. Après optimisation, nous avons finalement une ligne de 10 mm et l'autre de 26,38 mm (Fig. 3-63), la figure 3-64 montre l'adaptation S_{11} avec ports 50Ω et avec antennes, les phases que l'on a obtenues ainsi que les pertes d'insertion S_{12} et S_{13} (avec ports 50Ω).

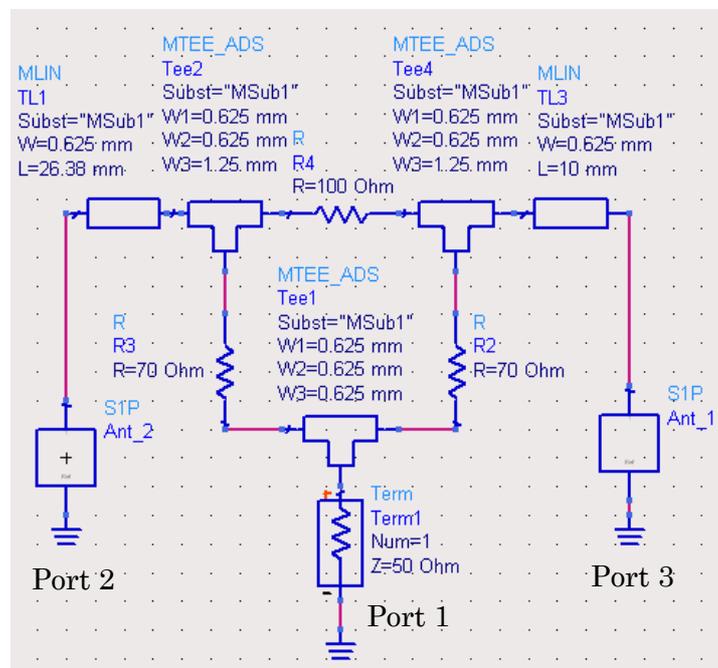


Fig. 3- 63 : Schéma du circuit pour deux ports simple

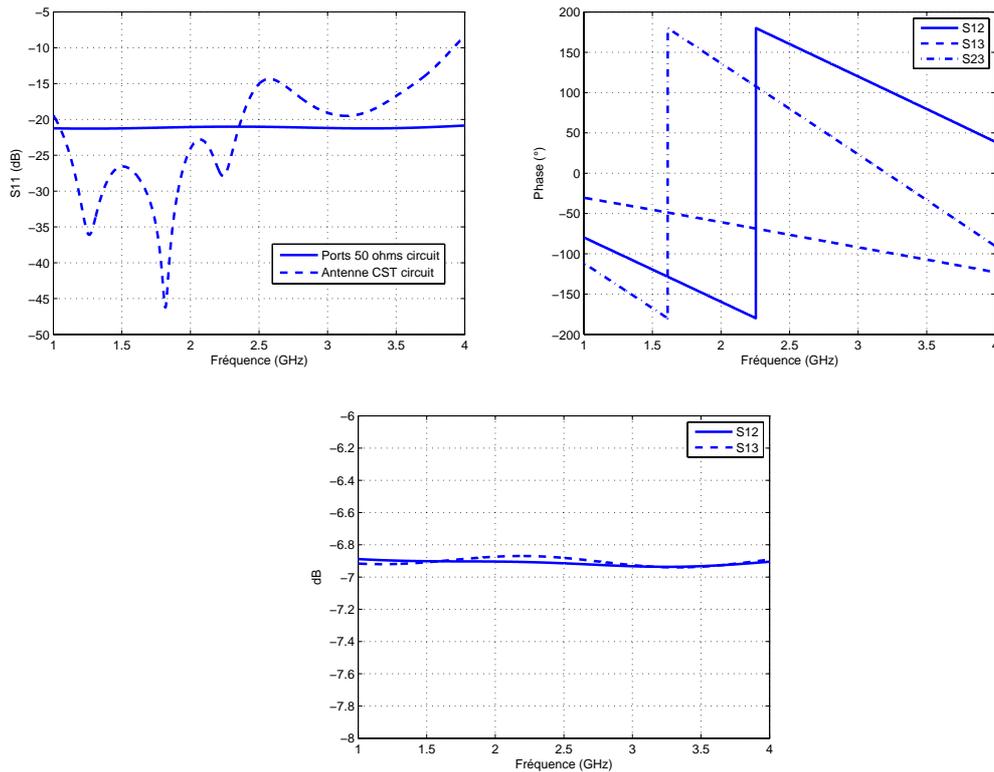


Fig. 3- 64 : Adaptation (en haut à g.), phases (en haut à dr.) et pertes d’insertion (en bas) dans le circuit pour deux ports simple

Le S_{11} à 2,41 GHz vaut avec les ports 50Ω -21 dB, et avec les antennes simulées -17,97 dB. Au niveau des phases nous avons $S_{12}=167,52^\circ$, $S_{13}=-73.58^\circ$ et ce que nous cherchions, $S_{23}=90,11^\circ$. Les pertes d’insertion sont conséquentes proches de -7 dB ($S_{12}=-6.91$ dB et $S_{13}=-6.97$ dB).

Une fois ce circuit validé nous allons étudier le circuit qui servira de base au layout. Dans notre cas, ce circuit sera contraint en dimension par l’emplacement des ports sur le substrat époxy (Fig. 3-65). Nous devons ici alimenter deux ports opposés, prenons pour l’exemple les ports 1 et 3. Nous choisissons dans chacun le côté qui recevra le signal afin de conserver une symétrie centrale centrée sur le centre du substrat, lieu d’où partira le signal.

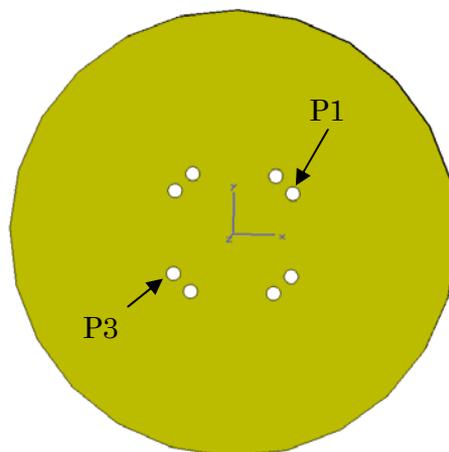


Fig. 3- 65 : Emplacement des ports sur le substrat époxy

Ces ports sont chacun à 10,4 mm du centre de l'époxy, il nous faut donc respecter cette distance dans la conception de notre layout. On voit à partir du circuit simple que pour un côté cela ne posera pas de problème alors que pour l'autre il faudra rallonger la ligne dans une autre direction. Le circuit a donc été réalisé en prenant en compte ces critères de dimensions et une nouvelle phase d'optimisation a eu lieu. La figure 3-63 présente le schéma complet du circuit puis les figures 3-67 et 3-68 montrent respectivement le paramètre S_{11} , les phases, les pertes d'insertion et le layout.

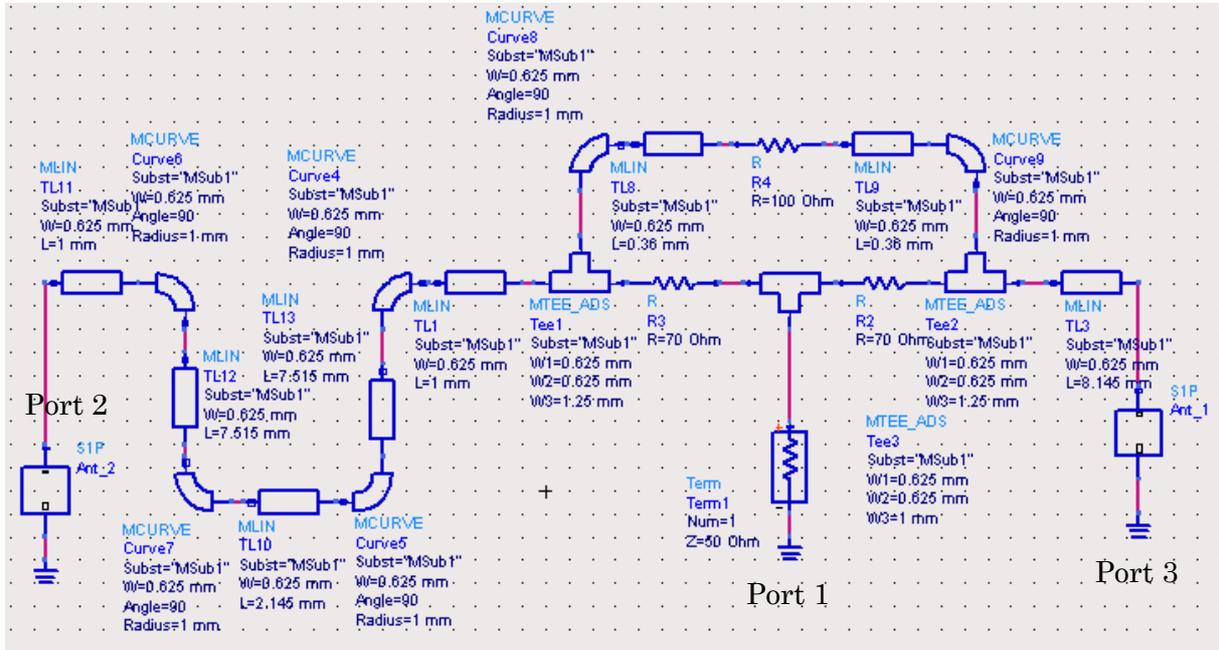


Fig. 3- 66 : Schéma du circuit pour deux ports final

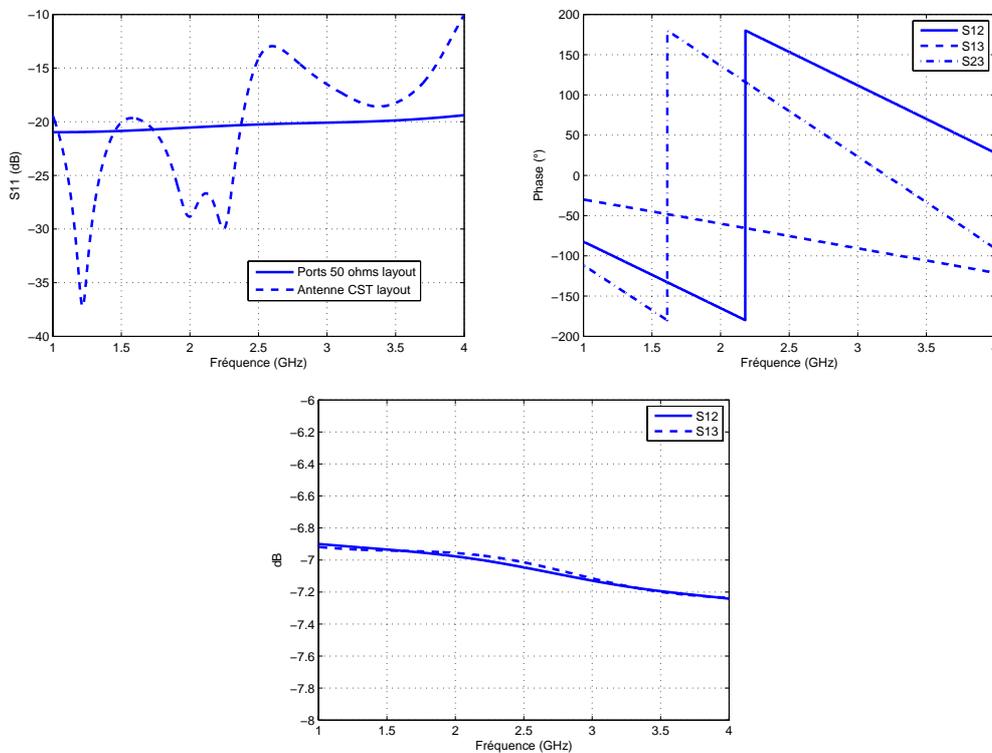


Fig. 3- 67 : Adaptation (en haut à g.), phases (en haut à dr.) et pertes d'insertion (en bas) dans le circuit pour deux ports final

Le S_{11} à 2,41 GHz vaut ici -20,29 dB avec les ports 50 Ω et -17,92 dB avec les antennes simulées. Pour les phases on a $S_{12}=160^\circ$, $S_{13}=-72^\circ$ et $S_{23}=90^\circ$, les pertes d'insertion restent proches de -7 dB ($S_{12}=-7.03$ dB et $S_{13}=-6.99$ dB).



Fig. 3- 68 : Layout du circuit déphaseur pour deux ports

On voit bien sur le layout le coude de la ligne la plus longue qui permet de la faire tenir entre le port 3 et le centre. On obtient bien au final une distance de 10,4 mm entre chaque port et le centre. Ses dimensions sont de 21x14 mm².

4.6.5.2 Circuit pour quatre ports

Ce circuit va servir à réaliser une des combinaisons où deux ports sont déphasés de 90° par rapport aux deux autres. Nous mettrons ici la phase des ports 2 et 3 à 90° de celle des ports 1 et 4. Nous avons là aussi réalisé un premier circuit afin de valider la longueur des lignes et le déphasage qu'elles impliquent. Ce circuit va posséder une symétrie car la répartition des phases en présente deux comme indiqué sur la figure 3-69.

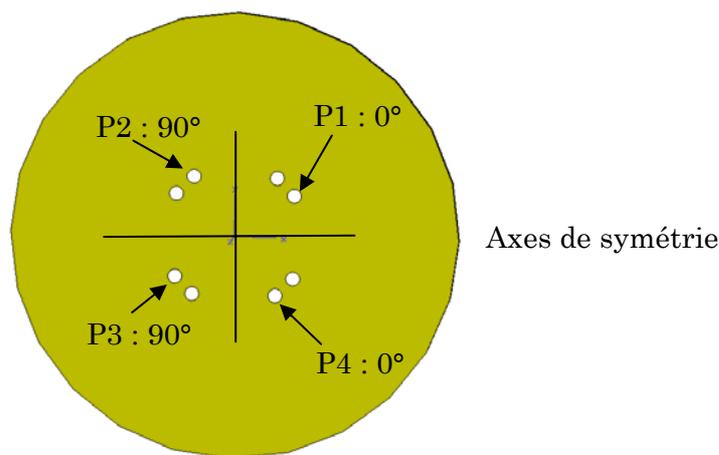


Fig. 3- 69 : Symétries des ports sur le substrat époxy

Il ne sera donc pas nécessaire d'utiliser un diviseur de puissance comme précédemment où les voies étaient asymétriques. Nous avons choisi de prendre comme axe de symétrie l'axe x . A partir de là, il faut donc, dès le centre du substrat, séparer le signal en deux

voies qui elles-mêmes se séparent en deux pour alimenter deux ports. Pour créer le déphasage nous avons opté pour le choix qui consiste à d'abord alimenter le port 1 (ou 4) puis le port 2 (ou 3). La figure 3-70 montre la mise en œuvre de nos choix avec le circuit électrique simple. Les lignes ont été prises à $\lambda/4$ afin d'assurer une bonne adaptation avec la source ce qui fait qu'elles sont toutes de tailles quasiment égales, un peu plus de 12 mm. Cette longueur permet aussi de réaliser le déphasage de 90° .

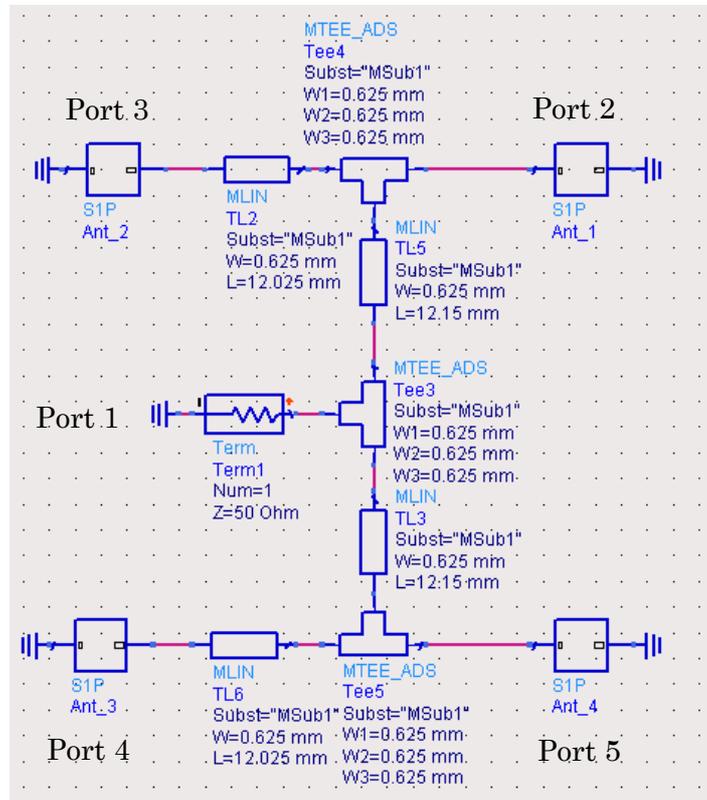


Fig. 3- 70 : Schéma du circuit pour quatre ports simple

Les figures 3-71 et 3-72 présentent l'adaptation, la phase et les pertes d'insertion obtenues. Pour l'adaptation, à 2,41 GHz on est à -28,89 dB avec les ports 50Ω et à -26,44 dB avec les antennes simulées sous CST. Pour la phase, on ne s'intéresse qu'à celle entre les ports 1 et 2, la symétrie donnant les mêmes résultats pour les ports 3 et 4. Nous avons ici -90° . Les pertes sont plus faibles qu'avec deux ports avec des valeurs tout de même élevées proches de -6 dB ($S_{12}=S_{15}=-6.10$ dB $S_{13}=S_{14}=-5.94$ dB)

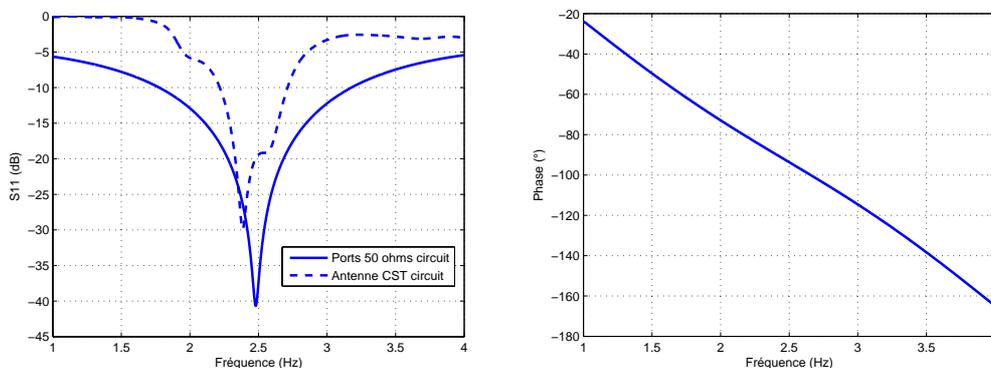


Fig. 3- 71 : Adaptations (à g.) et phase (à dr.) dans le circuit pour quatre ports simple

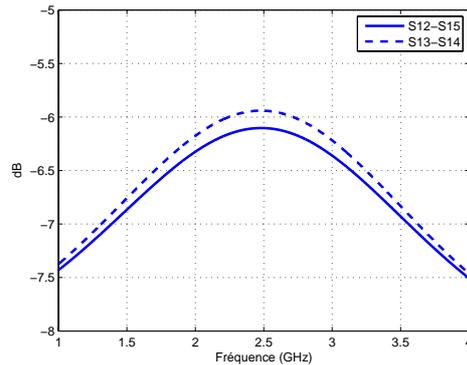


Fig. 3- 72 : Pertes d'insertion dans le circuit pour quatre ports simple

Cette première étape franchie, nous sommes passé au circuit en vue du layout et un problème du aux dimensions est apparu au niveau des lignes. Ces lignes font en effet 12,15 mm et 12,025 mm alors que les distances à couvrir depuis le centre sont de 10,4 mm et depuis le port 1 (ou 4) de 14,71 mm (Fig. 3-73).

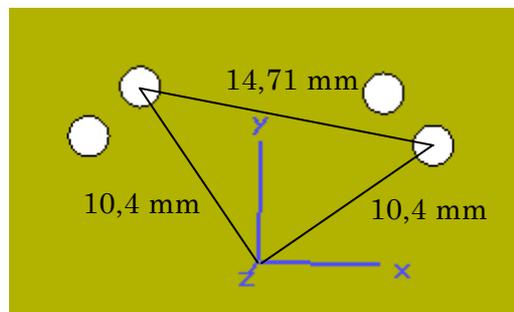


Fig. 3- 73 : Distances entre ports

On a donc un cas où la ligne est trop longue et l'autre où elle est trop courte. Pour résoudre ces problèmes nous avons utilisé des lignes courbes dans le premier cas, elles mesurent bien 12,15 mm de long mais parcourent 10,4 mm du centre vers les ports 1 et 4. Dans le deuxième cas il a donc fallu rallonger la ligne, et pour conserver les 90° de déphasage, lui donner pour longueur $3\lambda/4$. Le circuit que nous avons simulé est visible sur la figure 3-74.

Deux coudes ont été ajoutés pour prendre en compte le rajout de longueur. Ils permettent en outre de respecter les contraintes en dimensions qui sont ici doubles car il faut par exemple que le port 2 soit à 10,4 mm du centre et à 14,7 mm du port 1.

Les figures 3-75 et 3-76 donnent l'adaptation, la phase et les pertes d'insertion avec ce nouveau circuit. L'adaptation avec ports 50Ω est de -30,26 dB et de -26,44 dB avec les antennes simulées. La phase est maintenant de 90°, le changement de signe vient du rajout qui a ajouté 180° de phase. Les pertes d'insertion sont là aussi proches de -6 dB ($S_{12}=S_{15}=-6.09$ dB et $S_{13}=S_{14}=-5.96$ dB).

Le layout de ce circuit est donné sur la figure 3-77, on retrouve la position des ports. Il mesure 15×28 mm².

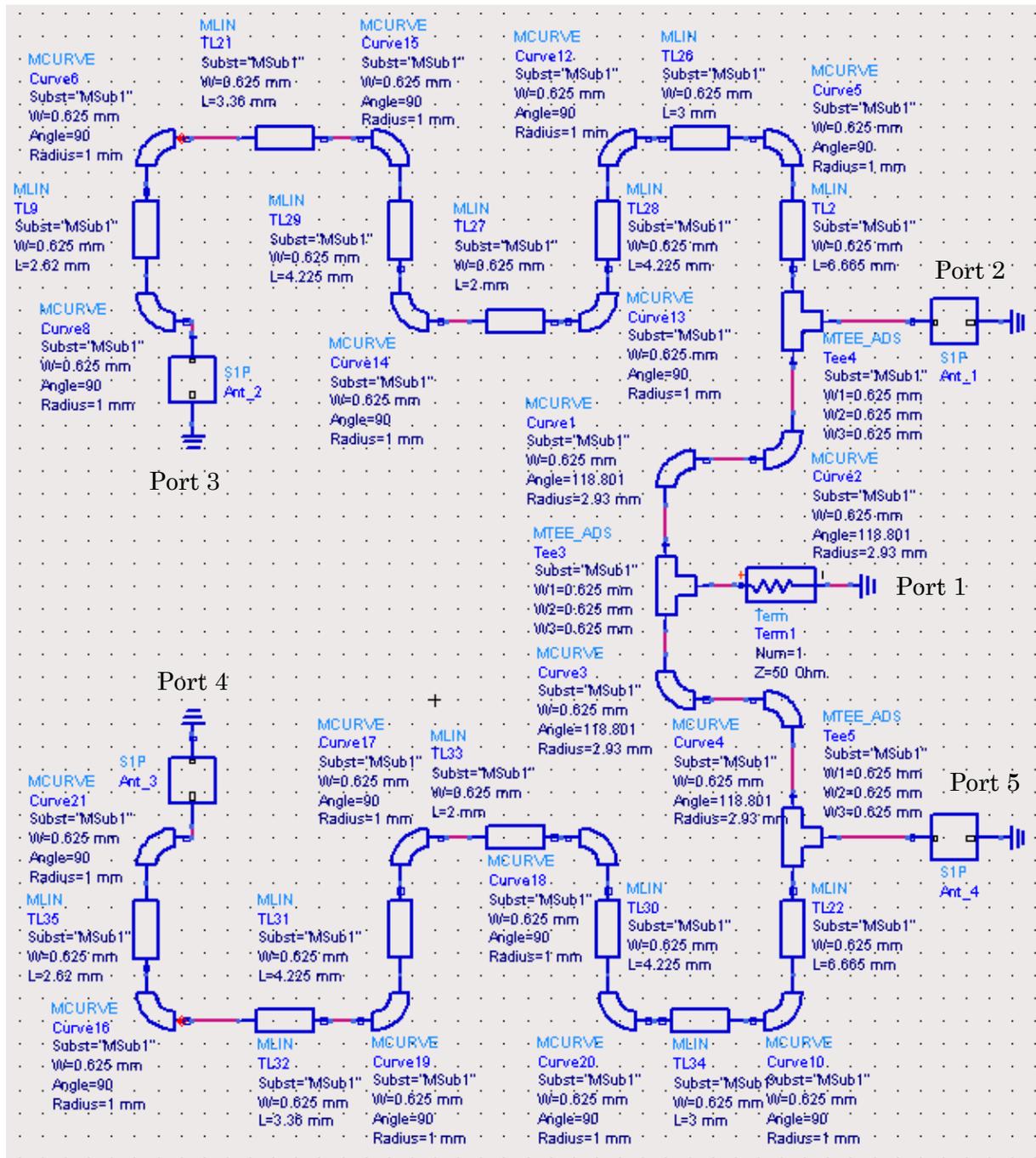


Fig. 3- 74 : Schéma du circuit pour quatre ports final

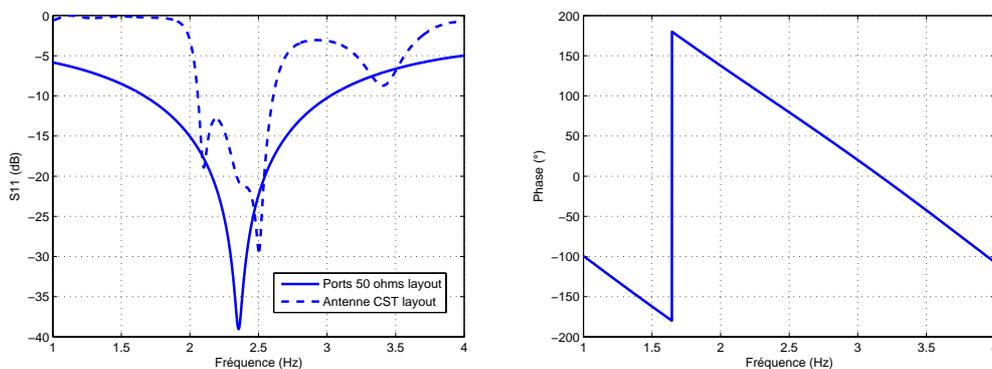


Fig. 3- 75 : Adaptations (à g.) et phases (à dr.) dans le circuit pour quatre ports final

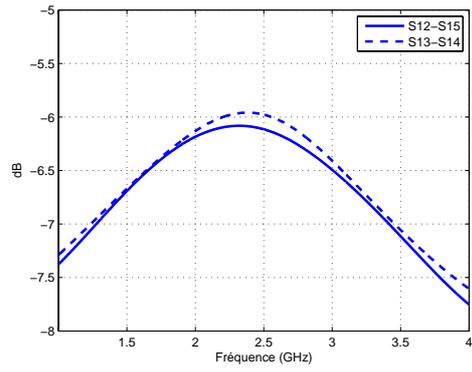


Fig. 3- 76 : Adaptations (à g.) et phases (à dr.) dans le circuit pour quatre ports final

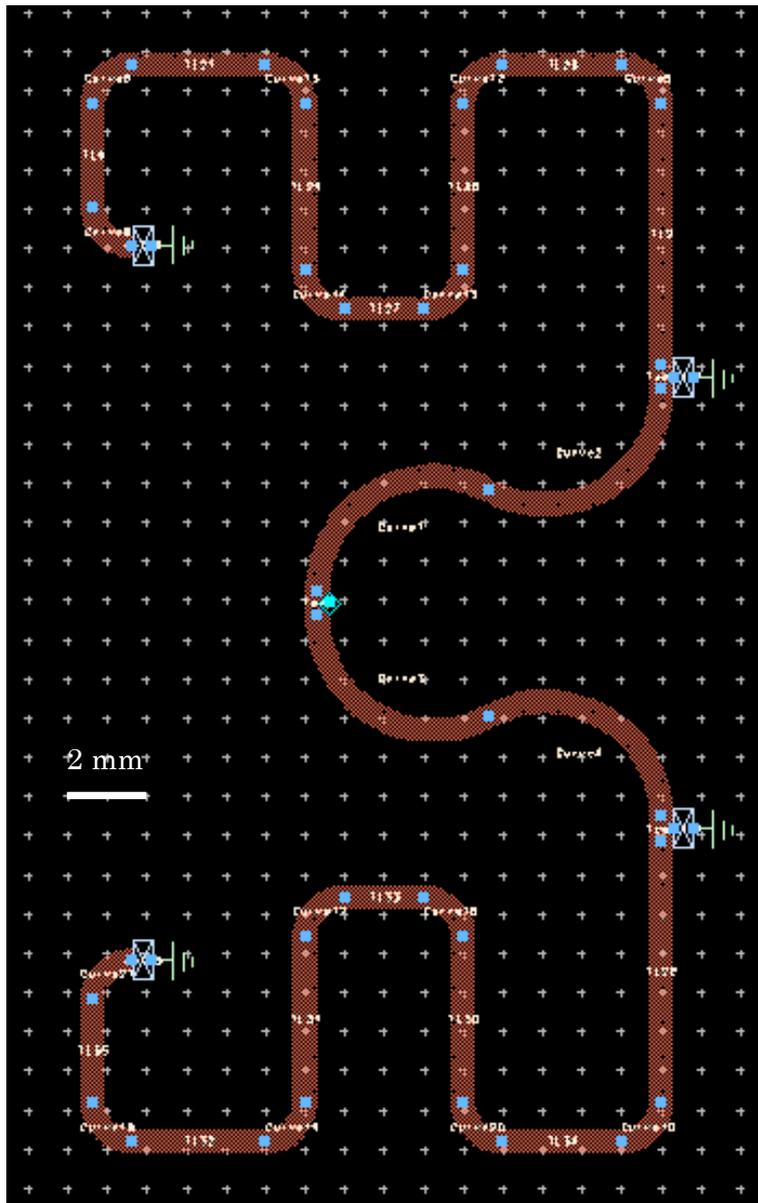


Fig. 3- 77 : Layout du circuit déphaseur pour quatre ports

4.6.6 Conclusion

Cette structure demi-boule agile est en rupture avec celles présentées auparavant du fait justement de son agilité et de sa forme lui permettant d'être toujours bien orientée une fois au sol à condition de tomber sur sa face bombée. L'ajout d'une structure flottante permettant d'augmenter les chances que ce cas se réalise. Elle propose une alternative au dilemme posé dans le deuxième chapitre qui rendait incompatible l'utilisation de fréquences élevées avec les réseaux d'antennes non liées en mettant le réseau d'antennes directement sur le capteur.

Il faudrait maintenant connaître le coût qu'aurait ce réseau au niveau logiciel et donc énergétique par rapport à une solution basique et si ce coût est justifié par le gain réalisé au niveau des performances. Une solution pourrait être de n'utiliser ce type de structure que sur des nœuds importants du réseau de capteurs comme il l'est préconisé dans [Gan05, Lee06, Dun08].

5 Conclusion du chapitre 3

L'objectif de ce chapitre était de présenter de nouvelles antennes pouvant être utilisées dans des modules de réseaux de capteurs sans fil en essayant de contourner les problèmes des antennes déjà utilisées, à savoir, leur grande taille et leur packaging qui influait sur leurs performances. Nous avons donc proposé le concept d'antenne-package qui associe les propriétés d'une antenne à celui d'un packaging. Quatre types d'antennes ont été proposés, l'antenne « dé », hémisphérique, cubique et demi-boule. Chacune a été simulée sous CST afin d'en connaître les propriétés en termes d'adaptation et de diagramme de rayonnement. Les critères permettant de valider chaque antenne étaient sa facilité de fabrication, sa robustesse et la forme de son diagramme. Seules deux antennes ont répondu à ces critères, l'antenne cubique et l'antenne demi-boule. L'étude de la première a montré qu'elle rayonne une très grande partie de son énergie vers le haut et qu'elle est peu sensible à la présence de matière ou de composants à l'intérieur d'elle-même. Elle correspondrait, dans la logique du chapitre 2, à une antenne que l'on pourrait mettre en réseau avec d'autres pour émettre dans différentes directions vers le haut. Nous avons ensuite simulé cette antenne sur différents sols caractéristiques des applications où on peut trouver des réseaux de capteurs. Ces simulations en environnement ont nécessité une modification des dimensions de l'antenne qui est cependant restée compacte avec une trentaine de cm³. La version la plus optimisée est très peu sensible à l'environnement mais a tendance à rayonner dans deux directions opposées toujours vers le haut. Cette antenne, dans sa première configuration a été réalisée et caractérisée en adaptation avec des résultats encourageants. Un travail sur la solidité mécanique et la précision des dimensions devant être fait. La deuxième antenne est très différente des autres car elle constitue à elle seule un réseau pouvant orienter son diagramme de rayonnement dans le demi-espace situé autour et au-dessus d'elle en jouant sur la phase et l'amplitude (nulle ou non) des dipôles la constituant. De plus, elle repose sur une structure hémisphérique qui fait qu'elle se trouvera toujours à l'horizontal du moment qu'elle tombera dessus lorsqu'elle sera déployée. Elle montre une

faible sensibilité au changement d'environnement autant en adaptation qu'en forme de diagramme de rayonnement. En vue de sa réalisation, deux circuits déphaseurs ont été conçus.

CONCLUSION GENERALE

Sommaire

1	Rappel des travaux et contributions	161
2	Perspectives et défis	163
2.1	<i>Les antennes.....</i>	<i>163</i>
2.2	<i>Matériaux.....</i>	<i>164</i>
2.3	<i>Partie communicante.....</i>	<i>167</i>
2.4	<i>Architecture des plates-formes</i>	<i>168</i>

1 Rappel des travaux et contributions

Ce travail intitulé « architecture et intégration d'un module de type smart dust » a consisté à apporter des pistes d'études au domaine des réseaux de capteurs sans fil et plus précisément à leur partie communicante.

Ce manuscrit est découpé en trois chapitres qui se suivent dans une logique « top-down », c'est-à-dire d'un système complet à une partie de celui-ci.

Le premier chapitre, après avoir introduit les réseaux de capteurs, les thématiques qui s'y côtoient et les défis à relever, détaille les applications existantes ou possibles dans lesquelles les réseaux de capteurs peuvent apporter un gain par rapport à d'autres technologies. Une grande partie est ensuite consacrée à l'état de l'art de ce domaine avec un historique et un recensement non exhaustif des projets ayant développé, utilisé ou commercialisé des plates-formes pour réseaux de capteurs. Cette partie permet de constater que l'activité autour de ce domaine a été et reste intense dans le monde. Les grandes tendances en matière de conception des plates-formes sont dégagées et expliquées pour la plupart par les progrès technologiques et la course à la miniaturisation. On dénote cependant que, comme beaucoup d'autres technologies, les premiers travaux reflétaient plutôt l'imaginaire des gens avec des modules très petits mais peu fonctionnels qui ont eu le mérite d'être la vitrine du domaine et une sorte de but ultime à atteindre. Le terme « Smart Dust » image d'ailleurs bien cette pratique. Les travaux suivants étant ancrés dans leur époque avec l'utilisation et l'assemblage de technologies existantes. Ce dernier point est caractéristique des domaines alliant plusieurs secteurs scientifiques qu'il est difficile de faire converger vers un système complet optimisé. C'est pourquoi certaines plates-formes sont le fruit d'un simple assemblage alors que d'autres sortent d'une fusion des technologies. Ce premier chapitre se termine par une réflexion sur ce qui a été vu et un choix est opéré quant à l'orientation à donner à nos travaux. En effet, pour des raisons pratiques, nous avons centrés notre activité sur la partie communication des plates-formes et plus précisément sur les antennes qui, avec l'alimentation, sont des points critiques, l'une l'étant à cause de sa taille et l'autre sa durée de vie.

Le deuxième chapitre fait suite à cette réflexion en essayant de voir le potentiel relatif à l'utilisation de réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs, chaque module étant un élément constitutif de ce réseau. Une première partie rappelle la théorie des réseaux et en montre les propriétés en termes d'agilité de diagramme de rayonnement. Les réseaux d'antennes présentés sont constitués d'éléments liés physiquement entre eux et dont le placement est fait de sorte à obtenir les propriétés voulues. Dans le cas des réseaux de capteurs, et particulièrement dans celui où les capteurs sont répartis aléatoirement, c'est le placement des capteurs qui va faire qu'un élément fera partie ou non d'un réseau d'antenne. Cette perspective est déclinée selon deux scénarios, l'un étant le déploiement d'un réseau de capteurs en intérieur et l'autre en extérieur, deux situations très différentes auxquelles on peut être confronté. Avant de traiter ces scénarios, une partie est réservée à la calibration de l'outil de simulation qui va être

utilisé, à savoir des codes développés sous Matlab. Ces codes sont comparés à des simulations faites sous deux logiciels de simulation électromagnétiques du commerce, CST microwave studio et EMPIRE XCcel. Ces comparaisons mettent en évidence l'accord entre les logiciels commerciaux et la relative justesse des codes Matlab développés. Un code reprenant en partie des travaux antérieurs et permettant de représenter un diagramme de rayonnement en trois dimensions est présenté. L'étude du scénario se déroulant en intérieur montre qu'un déploiement aléatoire des capteurs n'est pas une solution judicieuse et qu'il ne va donc pas être possible d'en faire un réseau. La seule utilisation d'un réseau d'antenne dans ce cas se situe dans la liaison entre une base qui collecte les informations des capteurs et un utilisateur final mobile. Un code a été développé pour simuler comment un réseau classique de 25 antennes pourrait suivre cet utilisateur en fonction de sa position. Le traitement de deuxième scénario, en extérieur, montre que ce dernier est plus propice à un déploiement aléatoire des capteurs, par voie aérienne par exemple. Un code complexe a été développé et a pour fonction de sélectionner le plus grand nombre de capteurs formant un réseau dont le pas est défini puis d'appliquer la bonne phase à chaque antenne pour émettre vers un récepteur. Les résultats obtenus sont intéressants mais sont remis en cause lorsqu'ils sont confrontés à des déploiements réalistes, peu denses. Une étude est alors faite afin de déterminer, par de multiples expériences, le nombre maximal d'antennes que l'on pourra mettre en réseau en fonction de la longueur d'onde utilisée et de la densité des capteurs. Comme attendu, c'est le cas avec la plus grande longueur d'onde et la plus forte densité qui est le plus intéressant. Un exemple de méthode de constitution de réseau est ensuite donné avant de terminer sur une solution plus simple où une structure composée de plusieurs capteurs se chargerait d'envoyer les données qu'elle aura au préalable reçues des capteurs de tout le réseau. Cette solution revient au final à utiliser un réseau d'antenne classique et montre là les limites des réseaux non liés. Ce chapitre permet tout de même de montrer l'intérêt de l'utilisation des réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le troisième et dernier chapitre traite des antennes elles-mêmes, celles que l'on pourrait trouver dans les réseaux du chapitre précédent. Il s'agissait ici de proposer des topologies d'antennes pouvant servir dans les réseaux de capteurs. Là aussi, un rappel théorique est donné dans un premier temps, puis, un recensement des antennes utilisées par les plates-formes vues dans le premier chapitre est fait. Il en ressort deux grandes tendances, soit l'antenne n'est pas du tout intégrée et a des dimensions très grandes par rapport au reste de la plate-forme, soit elle est intégrée et n'est pas pleinement efficace à cause de la présence des autres parties et surtout du packaging qui vient perturber son diagramme de rayonnement. Pour répondre à cette problématique, le concept d'antenne-package, faisant office d'élément rayonnant et de package, a été proposé et décliné sous plusieurs structures dipolaires en trois dimensions. Ces structures, résonnant à 2,4 GHz pour des raisons pratiques, ont pris des formes cubique ou sphérique. Chacune a été simulée sous le logiciel CST afin d'en connaître le diagramme de rayonnement et la sensibilité par rapport à l'environnement dans lequel elle peut être placée. Des structures ont été écartées pour solidité mécanique insuffisante, difficulté de réalisation ou diagramme peu intéressant. Seules deux ont été conservées. La première est une

antenne dipôle cubique rayonnant vers le haut et la deuxième est une structure hémisphérique dont la face bombée est au sol afin de garantir l'horizontalité de la face plane qui, elle, porte quatre dipôles à bras perpendiculaire. Il est possible, en faisant varier l'amplitude et la phase de ces dipôles d'obtenir un diagramme de rayonnement directif et ce, dans tout le demi-espace surplombant la structure. Cette dernière est donc un réseau d'antennes à elle seule et nécessite un circuit agile pour pouvoir appliquer les différentes combinaisons de phases menant à des diagrammes pertinents. Le concept étant prouvé, il est bien sûr nécessaire de poursuivre le développement de ces antennes notamment au niveau de leur robustesse mécanique. Notons que ces deux antennes ont chacune fait l'objet d'une publication.

L'ensemble de ces chapitres répond bien à l'objectif qui était de proposer des idées pour contribuer au développement des réseaux de capteurs et en particulier aux antennes qu'embarquent les plates-formes. Ce travail n'est bien sûr pas terminé et la partie suivante va permettre de donner des pistes à explorer et les défis à relever.

2 Perspectives et défis

Cette partie est destinée à apporter des idées de solutions à des problèmes mais aussi à ouvrir des perspectives pour des travaux futurs aussi bien sur les antennes que sur le reste des plates-formes de capteurs.

2.1 Les antennes

Intéressons-nous tout d'abord aux antennes. Comme il l'a été précisé, un travail reste à faire pour améliorer la robustesse mécanique des antennes citées. Elles doivent pouvoir en effet résister à des chocs pouvant être violents sans se déformer ou perdre leurs facultés. Cela vaut aussi bien pour la structure elle-même que pour ce qu'elle contiendra. C'est pourquoi il serait intéressant de remplir les structures avec un matériau liquide de type résine se durcissant afin de protéger les composants internes des chocs mais aussi de facteurs comme l'humidité ou le gel. Il pourrait même être nécessaire de complètement enduire la structure pour protéger les parties métalliques de l'oxydation. Une équipe de l'Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR) a déjà développée une technologie de moulage d'antennes planaires sous vide [Flo08], il serait intéressant de tester ce procédé avec des antennes en volume. Cette couche de protection, même de faible épaisseur, a de fortes chances d'influer sur l'adaptation des antennes et nécessiteraient d'être prise en compte dès les simulations. Cette influence peut d'ailleurs être bénéfique en termes de dimensions des éléments rayonnants étant donnée sa plus forte permittivité. Un optimum est à trouver quant au type de résine sur les pertes qu'elle peut engendrer.

Au niveau maintenant des perspectives sur les antennes plus classiques, il a été vu dans [Dun08] que les antennes directives sont de plus en plus étudiées pour être utilisées sur les plates-formes de capteurs sans fil car « elles permettent d'augmenter le débit, de réduire les délais et les interférences, tout en exigeant une plus faible puissance

pour émettre». C'est donc vers ce type d'antennes qu'il faudrait s'orienter tout en essayant de les rendre agiles afin de garder une certaine flexibilité dans la position des capteurs. Pour mettre en œuvre cette agilité, et pour des raisons pratiques, il serait préférable de jouer sur les amplitudes des antennes (alimentées ou non) que sur leurs phases qui nécessitent plusieurs déphaseurs là où un switch suffit dans le premier cas. Pour ce qui est du problème de la mise en boîtier, une solution consistant à mettre les antennes à l'extérieur serait préférable mais sans pour autant les faire dépasser complètement comme cela est fait dans les premières plates-formes. C'est en cela que le concept d'antenne-package est intéressant mais rien n'empêche d'intégrer des antennes sur le boîtier, en les protégeant bien sûr. En tout état de cause, les antennes sont des composants à ne pas négliger car faisant partie de la stratégie de conception d'une plate-forme.

2.2 Matériaux

Dans la continuité de ce qui précède, un travail un peu connexe aux antennes a été débuté dans le cadre d'un stage qui a porté sur la caractérisation radiofréquences de matériaux. Un banc utilisant une technique de comparaison de la transmission d'un signal à travers un matériau de test et une couche d'air de mêmes épaisseurs a été développé (Fig. 4-1).



Fig. 4- 1 : Banc de caractérisation de matériau

Ce banc comporte quatre connecteurs SMA longs dont l'âme traverse une couche de métal. Ces connecteurs sont mis en vis-à-vis deux-à-deux et l'espace entre eux est réglable grâce à une molette.

A partir des coefficients de réflexion $S_{11_connecteur}$ et $S_{11_matériau}$ et des coefficients de transmission $S_{21_connecteur}$ et $S_{21_matériau}$, on va déduire la permittivité relative du matériau. Voici son schéma de principe :

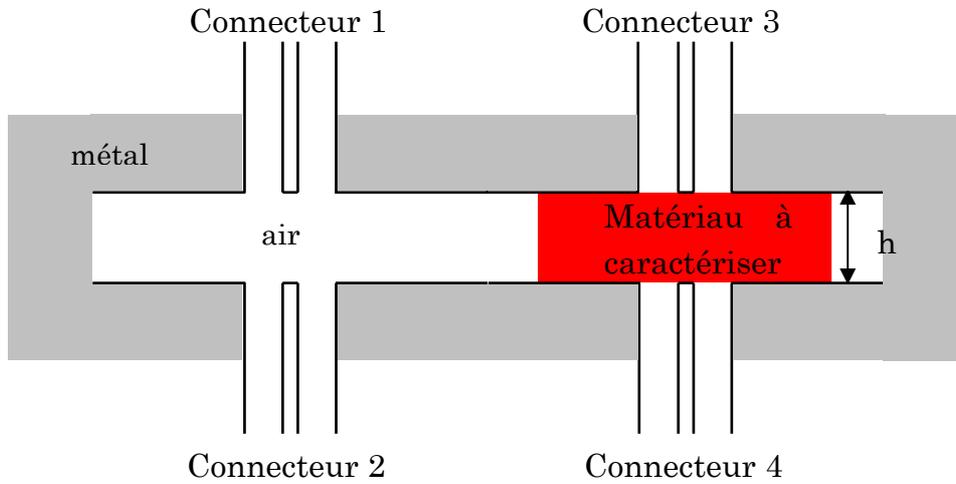


Fig. 4- 2 : Schéma de principe

On peut modéliser chaque paire de connecteur par une impédance $Z_{connecteur}$ parallèle suivie d'une impédance série $Z_{matériau}$ puis d'une autre impédance $Z_{connecteur}$ parallèle comme indiqué sur la figure 4-3.

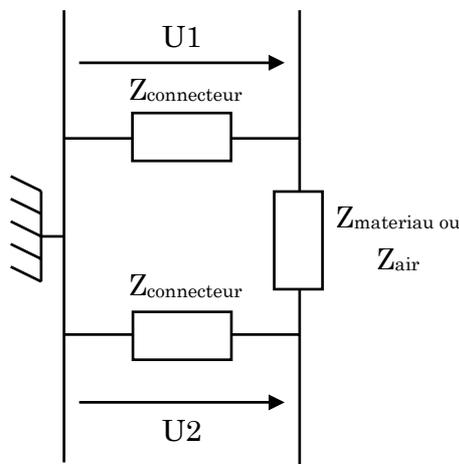


Fig. 4- 3 : Schéma électrique équivalent d'une paire de connecteurs

On peut décomposer ce schéma en 2 éléments de base :

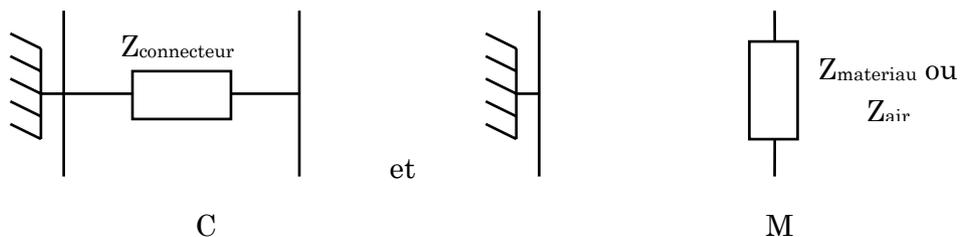


Fig. 4- 4 : Eléments de base du schéma électrique équivalent (respectivement C et M).

La matrice ABCD de l'élément C est :

$$ABCD_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{connecteur}} & 1 \end{bmatrix}$$

Et celle de l'élément M est

$$ABCD_M = \begin{bmatrix} 1 & Z_{matériau} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ ou } \begin{bmatrix} 1 & Z_{air} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On a en cascade un élément C, un élément M et un élément C donc la matrice ABCD globale du circuit électrique équivalent est :

$$[ABCD] = ABCD_C \cdot ABCD_M \cdot ABCD_C.$$

D'où

$$[ABCD] = \begin{bmatrix} \frac{1+Z_{matériau}}{Z_{connecteur}} & Z_{matériau} \\ \frac{2}{Z_{connecteur}} + \frac{Z_{matériau}}{Z_{connecteur}^2} & \frac{1+Z_{matériau}}{Z_{connecteur}} \end{bmatrix} \text{ ou } \begin{bmatrix} \frac{1+Z_{air}}{Z_{connecteur}} & Z_{air} \\ \frac{2}{Z_{connecteur}} + \frac{Z_{air}}{Z_{connecteur}^2} & \frac{1+Z_{air}}{Z_{connecteur}} \end{bmatrix}$$

On a donc le coefficient de transmission B qui est égal soit à $Z_{matériau}$ ou à Z_{air} .

A partir des mesures, on récupère donc les coefficients S_{11} et S_{21} desquels on déduit le terme B de la matrice ABCD avec la formule :

$$B = \frac{(1+S_{11})^2 - S_{12}^2}{2 \times S_{12}}$$

Supposons que l'on a $Z = R + \frac{1}{jC\omega}$, en prenant la partie imaginaire de B, on obtient $\frac{-1}{C\omega}$.

Sachant que :

$$\epsilon_r \approx \frac{C_{matériau}}{C_{air}}$$

d'où:

$$\epsilon_r \approx \frac{\text{Im}(B_{matériau})}{\text{Im}(B_{air})}$$

On peut donc avec cette méthode déterminer très facilement les capacités de l'air et du matériau à caractériser afin de calculer ϵ_r .

Malheureusement, faute de temps, ce banc, n'a pu être complètement validé et il serait intéressant de poursuivre ce travail qui permettrait de connaître rapidement la permittivité et les pertes dans un matériau.

Revenons aux antennes et sur une façon de réduire leur taille en augmentant leur fréquence de résonance. Un saut vers les fréquences millimétriques comme 60 GHz est

aujourd'hui d'actualité et trouve seulement des applications en intérieur où les distances à couvrir sont faibles. Le milieu extérieur est très contraignant sur plusieurs points et il est difficile de monter en fréquences sans s'exposer à de fortes pertes incompatibles avec la recherche de la faible consommation. On le voit, la recherche sur les antennes pour plates-formes de capteurs sans fil est riche en contraintes qui sont autant de défis à relever à l'avenir.

2.3 Partie communicante

Passons maintenant à la partie communicante dans son ensemble. Elle est généralement composée de circuits générant une fréquence qui est mélangée à un signal à transmettre, amplifiée puis émise. Beaucoup de travaux portent aujourd'hui sur l'optimisation de cette chaîne au niveau de sa consommation d'énergie. Une idée permettant de se passer de mélangeur pourrait être de directement moduler l'alimentation d'un oscillateur avec le signal utile. Des simulations sous le logiciel spectre de Cadence avec le design kit 90 nm de ST microelectronics ont permis de montrer qu'un tel scénario est possible. L'alimentation d'un oscillateur à 24 GHz à double paire différentielle (Fig. 4-5) a été modulée par un signal carré de faible fréquence permettant de créer une modulation OOK (On/Off Key) (Fig. 4- 6). Ce travail est resté au stade de la simulation et mérite d'être poursuivi afin de se confronter aux problèmes inhérents au fait d'éteindre et de rallumer plusieurs fois de suite l'alimentation d'un circuit oscillant et au comportement global d'un tel circuit dans une chaîne.

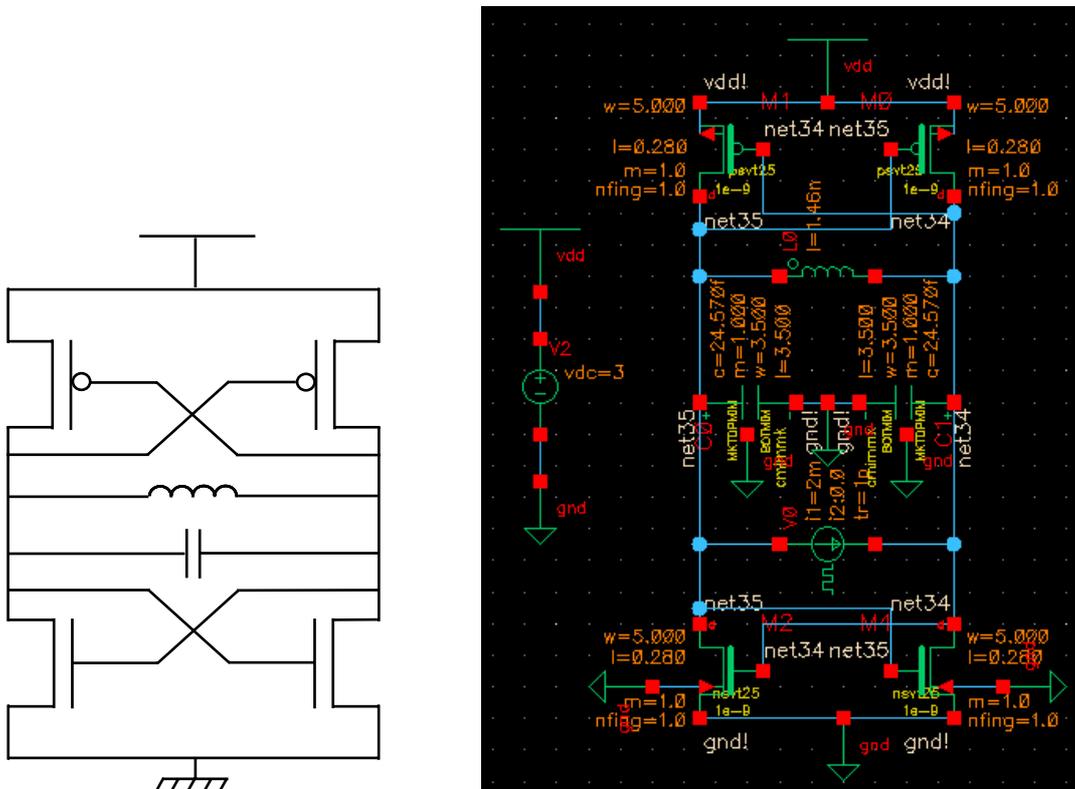


Fig. 4- 5 : Oscillateur à double paire différentielle à 24 GHz.

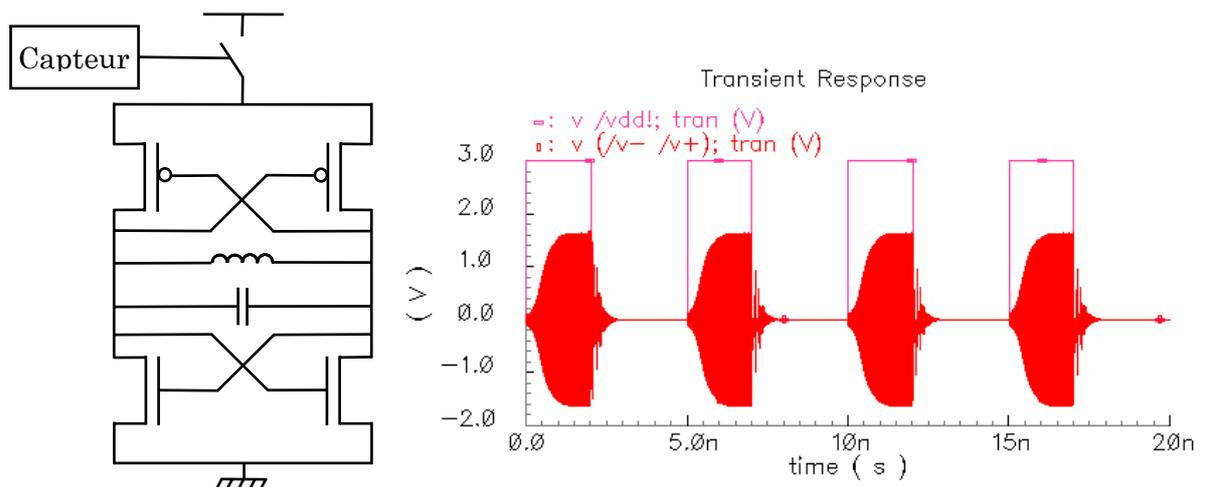


Fig. 4- 6 : Sortie différentielle de l'oscillateur avec une alimentation modulée

2.4 Architecture des plates-formes

Poursuivons sur l'architecture des plates-formes et notamment sur la place des capteurs en leur sein. Il n'est pas nécessaire de rappeler que l'objectif premier d'une plate-forme est de capter une variable environnementale et de la transmettre via d'autres plates-formes à un utilisateur final. La justesse de la mesure réalisée est en partie liée à la pertinence de l'emplacement du capteur. Si on prend le cas de nos antennes-packages qui renferment tous les composants de la plate-forme, il faut veiller à ce que l'élément qui capte une variable se situe à l'extérieur de la structure ou du moins sur celle-ci au contact de l'environnement. L'idée développée auparavant proposant de mouler la structure dans de la résine permettrait de figer le capteur dans une position telle qu'il se situerait hors de la structure. Quoiqu'il en soit, une étude est à mener sur l'impact qu'a le reste de la plate-forme sur la mesure réalisée. En effet, en extérieur, une structure peut chauffer et emmagasiner de la chaleur qu'elle restituera lentement, faussant une mesure de température dans son environnement proche.

Ces perspectives ne couvrent qu'un aspect des réseaux de capteurs sans fil, les parties informatique et énergétique étant elles aussi confrontées à des défis majeurs. Mais au-delà des problèmes techniques, il faudra d'abord résoudre celui concernant l'aspect organisationnel pour pouvoir œuvrer efficacement pour le développement des réseaux de capteurs sans fil. Seul l'avenir nous dira comment ces problématiques auront été résolues.

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Conférence internationale avec comité de lecture :

Bacles-Min Guillaume, Ndagijimana Fabien, Package-antenna for wireless sensor network nodes, *Loughborough Antennas and Propagation Conference*, 17-18 Mars 2008, p. 381-384

Conférence nationale avec comité de lecture :

Bacles-Min Guillaume, Ndagijimana Fabien, Antenne agile pour réseau de capteurs sans fil, *16^{èmes} Journées Nationales Microondes*, Mai 2009 (à paraître)

Groupe de travail :

Bacles-Min Guillaume, Architecture et intégration de la partie communicante de capteurs sans fil, *2^{èmes} Journées Nationales du GDR Micro et Nano Systèmes*, 21-23 Nov. 2007

Rapports d'avancement :

Bacles-Min Guillaume, Etat de l'art sur les capteurs communicants et perspectives, rapport bibliographique interne, 2006.

Bacles-Min Guillaume, Rapport d'activité Allocation de Recherche Région Rhône-Alpes - Année 1, Cluster de recherche Micro-nano, 2006.

Bacles-Min Guillaume, Rapport d'activité Allocation de Recherche Région Rhône-Alpes - Année 2, Cluster de recherche Micro-nano, 2007.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ago03] Agogino A., MEMS "Smart Dust Motes" for designing, monitoring and enabling efficient lighting, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2003
- [Akk05] Akkaya K. et Younis M., A survey on routing protocols for wireless sensor networks, *Ad Hoc Networks*, Mai 2005, vol. 3, p. 325-349
- [Amm05] Ammar Y., Buhrig A., Marzencki M., Charlot B., Basrouf S., Matou K. et Renaudin M., Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator, *Proceedings of the 2005 joint conference on smart objects and ambient intelligence, ACM*, 2005, p. 287-292
- [Atw00] Atwood B., Warneke B. et Pister K.S.J., Preliminary circuits for smart dust, *Southwest Symposium on Mixed-Signal Design*, 2000, p. 87-92
- [Aky02] Akyildiz I., Su W., Sankarasubramaniam Y. et Cayirci, E., Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, 2002, vol. 38, p. 393-422
- [Alk04] Al-Karaki J. et Kamal A., Routing techniques in wireless sensor networks: a survey, *IEEE Wireless Communications*, Déc. 2004, vol. 11, n°6, p. 6-28
- [Asa98] Asada G., Dong M., Lin T., Newberg F., Pottie G., Kaiser W. et Marcy H., Wireless Integrated Network Sensors: Low Power Systems on a Chip, *Proceedings of the 1998 European Solid State Circuits Conference*, 1998
- [Ash04] Ash J.N. et Potter, L.C., Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas, *Proceedings of the 2004 Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2004, p. 1861-1870.
- [Bae06] Bae-Ian Wu, Weijen Wang, Joe Pacheco, Xudong Chen, Jie Lu, Tomasz M. Grzegorzcyk, Jin Au Kong, Kao P., Theophelakes P. A, Hogan M. J., Anisotropic metamaterials as antenna substrate to enhance directivity, *Microwave and Optical Technology Letters*, Fév. 2006, vol. 48, n°4, p. 680-683
- [Baf08] Bafleur M., Clavier L., Dilhac J.-M., Un aperçu des réseaux de capteurs sans fil au Japon : de la gestion de l'énergie à l'architecture des réseaux [en ligne].
Disponible sur : http://www.ambafrance-jp.org/article.php3?id_article=390
(consulté le 09/07/2009)
- [Baf09] Bafleur M., Dilhac J.-M., Réseaux de capteurs sans fil au Japon : aperçu du contexte industriel et dernières avancées présentées à la conférence PowerMEMS 2008 [en ligne].
Disponible sur : http://www.ambafrance-jp.org/article.php3?id_article=390
(consulté le 09/07/2009)

-
- [Bar07] Barakat M., Delaveaud C., Ndagijimana, F, Performance of a 0,13 μm SOI integrated 60 GHz dipole antenna, *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Juin 2007, p. 2526-2529
- [Bay03] Bayrashev A., Parker A., Robbins W. et Ziaie B., Low frequency wireless powering of microsystems using piezoelectric-magnetostrictive laminate composites, *12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 8-12 Juin 2003, p. 1707-1710
- [Bei05] Beigl M., Decker C., Krohn A., Riedel T. et Zimmer T., μ Parts: Low Cost Sensor Networks at Scale, *7th International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP)*, 2005
- [Ben05] Benbasat A. et Paradiso, J., A compact modular wireless sensor platform, *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 15 Avr. 2005, p. 410-415
- [Bre04] Bregains, J., Ares, F. & Moreno, E., Visualizing the 3D polar power patterns and excitations of planar arrays with Matlab, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Avr. 2004, vol. 46, n^o2, p. 108-112
- [Blu08] Bluetooth, informations techniques [en ligne]. Disponible sur : <http://french.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Default.htm> (consulté le 20/04/2008)
- [Cai06] Caillet M., Lafond O., Himdi M. , A low cost millimeterwave antenna with smart tapering active feed network, *First European Conference on Antennas and Propagation EuCAP*, 6-10 Nov. 2006, p.1-6
- [Cha99] Chandrakasan A et al., Design considerations for distributed microsensor systems, *Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, Mai 1999, p. 279-286
- [Cha01] Chan K.T., Chin A., Chen Y.B., Lin Y.-D., Duh T.S., Lin, W.J, Integrated antennas on Si, proton-implanted Si and Si-on-quartz, *International Electron Devices Meeting, 2001. IEDM Technical Digest*, 2001 p. 40.6.1-40.6.4
- [Che05] Chiau C. C., Chen X., Parini C. G., A compact four-element diversity-antenna array for PDA terminals in a MIMO system, *Microwave and Optical Technology Letters*, Jan. 2005, vol 44, n^o5, p. 408–412
- [Chi05] Chin-Lung Y., Mastarone J.F., Chappell W.J., Directional antennas for angular diversity in wireless sensor networks, *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 3-8 Juil. 2005, vol. 4A, p 263-266
- [Cho03] Choo H. et Ling H., Design of electrically small planar antennas using inductively coupled feed, *Electronics Letters*, Oct. 2003, vol. 39, n^o22,p. 1563-1565

- [Cho06] Park C., Chou P.H., Bai Y., Matthews R. et Hibbs A., An Ultra-Wearable, Wireless, Low Power ECG Monitoring System, *Proceedings of IEEE BioCAS*, 29 Nov. – 1^{er} Déc. 2006
- [Cal04] Calhoun B.H. et Chandrakasan A.P., Standby Power Reduction Using Dynamic Voltage Scaling and Canary Flip-Flop Structures, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Sept. 2004, vol. 39, p. 1504-1511
- [Dub08] Dubois P. et Shea H., The e-CUBES Space demonstrator : A flying 5 node WSN demonstrating self-localization and dynamic multihop networking [en ligne]. Disponible sur:
http://ecubes.epfl.ch/public/news/news_doc/news_documents/EPFL-eCUBES_demo_nov_2008.pdf
(consulté le 08/07/2009)
- [Dul02] Dulman, S. et Havinga, P., Operating system fundamentals for the EYES distributed sensor network, *Proceedings of the PROGRESS Workshop*, Oct. 2002
- [Dun04] Dunkels A., Grönvall B. et Voigt T., Contiki - a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors, *Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (Emnets-I)*, Nov. 2004
- [Dun08] Dunlop J. et Cortes J., Co-Design of Efficient Contention MAC with Directional Antennas in Wireless Sensor Networks, *Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2008. 6-8 Août. 2008 p. 383-388
- [Eco06] Park C. et Chou P.H., Eco: Ultra-Wearable and Expandable Wireless Sensor Platform, *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'06)*, 2006, p.162-165
- [Edm05] Edmonds N., Stark D. et Davis J., MASS: modular architecture for sensor systems, *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 15 Avr. 2005, p. 393-397
- [Elh04] El-Hoiydi A. et Decotignie J., WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks, *9th International Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2004, vol. 1, p. 244-251
- [Enz04] Enz C.C., El-Hoiydi A., Decotignie J. et Peiris V., WiseNET: an ultralow-power wireless sensor network solution, *Computer*, Août 2004, vol. 37, n°8, p. 62-70
- [Erd06] Erdogan A., Coskun V. et Kavak, A., The Sectoral Sweeper Scheme for Wireless Sensor Networks: Adaptive Antenna Array Based Sensor Node Management and Location Estimation, *Wireless Personal Communications*, Déc. 2006, vol. 39, n° 4, p. 415-433

-
- [F5ZV] Le sol et les ondes radio [en ligne]. Disponible sur <http://pagesperso-orange.fr/f5zv/RADIO/RM/RM10/RM10E06.html> et <http://pagesperso-orange.fr/f5zv/RADIO/RM/RM08/RM08a/RM08a06.html> (consultés le 20/04-2009)
- [Fle02] Fleming R., Kushner C., Roberts G. et Nandiwada U., Rapid acquisition for ultra-wideband localizers, *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, 22-23 Mai 2002
- [Fli99] Flint J., The particles of dust that could be watching you, 7 Sept. 1999 [en ligne]. Disponible sur <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/5/5269/1.html> (consulté le 20/04/2009)
- [Flo08] Floch J. M., Antennes intégrées dans une matrice composite, *10^{èmes} Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux*, 2-4 Avr. 2008.
- [Fon03] Fontana R.J., Richley E. et Barney J., Commercialization of an ultra wideband precision asset location system, *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, Nov. 2003
- [Han61] Hansen R. Communications Satellites Using Arrays, *Proceedings of the IRE*, 1961, vol. 49, n° 6, p. 1066-1074
- [Hua04] Huang R. et Manoli Y., Phased array and adaptive antenna transceivers in wireless sensor network, *Euromicro Symposium on Digital System Design*, Sept. 2004, p. 587-592
- [Gan05] Gandelli A., Mussetta M., Pirinoli P., E. Zich R., Optimization of integrated antennas for wireless sensor networks, *Smart Structures, Devices, and Systems II conference, Proceeding of SPIE*, vol. 5649, 2005;
- [God97I] Godara L., Applications of antenna arrays to mobile communications. Part I: Performance improvement, feasibility, and system considerations, *Proceedings of the IEEE*, Juil. 1997, vol. 85, n° 7, p. 1031-1060
- [God97II] Godara L., Applications of antenna arrays to mobile communications. Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations, *Proceedings of the IEEE*, Aug. 1997, vol. 85, n° 8, p. 1195-1245
- [Gua07] Guama, J. et Saad, N., Using Adaptive Antenna Arrays in Mobile Ad-hoc Network with Multihop-RTS MAC Protocol, *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, Juil. 2007, p. 1-4
- [Hal88] Hall, P.S. et Hal, C.M., Coplanar corporate feed effects in microstrip patch array design, *IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, Juin 1988, vol. 135, n° 3, p. 180-186
- [Han64] Hansen R., Preface: Special issue on Active and adaptive antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Mars 1964, vol. 12, n°2, p. 140-141

- [Hav04] van Hoesel L.F.W. et Havinga P.J.M., A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks: Reducing Preamble Transmissions and Transceiver State Switches, *1st International Workshop on Networked Sensing Systems, Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, 2004, p. 205-208
- [Hei02] Heinzelman W.B., Chandrakasan A.P. et Balakrishnan H., An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Oct. 2002, vol. 1, n° 4, p. 660-670
- [Her00] Herring C. et Kaplan S., Component-based software systems for smart environments, *IEEE Personal Communications*, Oct. 2000, vol. 7(5), p. 60-61
- [Hoe03] van Hoesel L.F.W., Dulman S., Havinga P. et Kip H., Design of a low-power testbed for Wireless Sensor Networks and verification, Centre for Telematics and Information Technology de l'université de Twente, Pays-Bas, 2003
- [Hoe04] van Hoesel L., Nieberg T., Kip H. et Havinga P., Advantages of a TDMA based, energy-efficient, self-organizing MAC protocol for WSNs, *59th IEEE Vehicular Technology Conference*, Mai 2004, vol. 3, p. 1598-1602
- [Hoy02] Hoyt R., Reifman J., Coster T. et Buller M., Combat Medical Informatics: Present and Future, *Proceedings of the AMIA 2002 Annual Symposium*, 9-13 Nov. 2002, p. 335-9
- [Hua04] Huang, R. et Manoli, Y., Phased array and adaptive antenna transceivers in wireless sensor network, *Euromicro Symposium on Digital System Design*, Sept. 2004, p. 587 - 592
- [IEE11] Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines [en ligne]. Disponible sur: http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm (consulté le 20/04/2009)
- [IEE15] IEEE 802.15 Working Group for WPAN [en ligne]. Disponible sur: <http://www.ieee802.org/15/> (consulté le 20/04/2009)
- [IEE93] IEEE standard definitions of terms for antennas, *IEEE Antennas and Propagation Society*, Juin 1993, n° E-ISBN: 0-7381-0555-4
- [IEE97] IEEE Standard for Information Technology Telecommunication and Information Exchange between systems. *Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1997.
- [Ini05] Iniewski K., Siu C., Kilambi S., Khan S., Crowley B., Mercier P. et Schlegel C., Ultra-low power circuit and system design trade-offs for smart sensor network applications, *3rd International Conference on Information and Communications Technology*, 5-6 Déc. 2005, p. 309-321

- [Jov01] Jovanov E., Raskovic D., Price J., Chapman J. et Moore A., Patient monitoring using personal area networks of wireless intelligent sensor, *Biomedical Sciences Instrumentation*, 2001, vol. 37, p. 373-8
- [Jov03] Jovanov E., O'Donnel Lords A., Raskovic D., Cox P., Adhami R. et Andrasik F., Stress monitoring using a distributed wireless intelligent sensor system, *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Mai/Juin 2003, vol. 22, n° 3, p. 49-55
- [Jov05] Jovanov E., Milenkovic A., Otto C. et de Groen P.C., A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Mars 2005, vol. 2, n°6
- [Kas01] Kasten O. et Langheinrich M., First experiences with bluetooth in the smart-its distributed sensor network, *Workshop on Ubiquitous Computing and Communications (UBICOMP)*, 2001
- [Kli05] Kling R., Intel Motes: advanced sensor network platforms and applications, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 12-17 Juin 2005, p. 365-367
- [Kuc08] Kucuk, K.; Kavak, A.; Yigit, H.; et Ozdemir, C., A novel localization technique for wireless sensor networks using adaptive antenna arrays, *IEEE Radio and Wireless Symposium*, 22-24 Juin. 2008, p. 483-486
- [Kra50] Kraus John D., *Antennas*, Mc Graw-Hill editions, 1950, p. 57-95 et 140-143
- [Lah01] Laheurte J.-M., Switchable CPW-fed slot antenna for multifrequency operation, *Electronics Letters*, Déc. 2001, vol. 37, n°25, p. 1498-1500
- [Lee06] Cho J. et al, Directional Antenna at Sink (DAaS) to Prolong Network Lifetime in Wireless Sensor Networks, *European Wireless*, Avr. 2006
- [Lev03] Levis, P. et Lee, N., TOSSIM: A Simulator for TinyOS Networks, Université de Berkeley, Californie, Sept. 2003
- [Lev02] Levis P. et Culler D., Maté: a Virtual Machine for Tiny Networked Sensors, *Proceedings of the ACM Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*, Oct. 2002
- [Lew04] Lewis F., *Wireless Sensor Networks, Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*, John Wiley, 2004
- [Lin06] Linnarsson F., Cheng P. et Oelmann B., SENTIO: a hardware platform for rapid prototyping of wireless sensor networks, *32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06)*, 7-10 Nov. 2006, p. 3002-3006

- [Lor04] Lorincz K., Malan D.J., Fulford-Jones T.R.F., Nawoj A., Clavel A., Shnayder V., Mainland G., Welsh M. et Moulton S., Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities, *IEEE Pervasive computing*, Oct.-Déc. 2004, vol. 3(4), p. 16-23
- [Lor05] Lorincz K. et Welsh M., MoteTrack: a robust, decentralized approach to RF-based location tracking, *Proceedings of the international workshop on Location and Context-Awareness (LoCA)*, Mai 2005
- [Luk02] Lukowicz P., Junker H., Stäger M., Von Büren T. et Tröster G., WearNET: a distributed multi-sensor system for context aware wearables, *Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Computing*, Sept./Oct. 2002, p. 361-370
- [Lun03] Lundquist J., Cayan D., et Dettinger.M., Meteorology and Hydrology in Yosemite National Park: A Sensor Network Application., *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, Avr. 2003.
- [Lym05] Lymberopoulos D. et Savvides A., XYZ: a motion-enabled, power aware sensor node platform for distributed sensor network applications, *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 15 Avr. 2005, p. 449-454
- [Lym06] Lymberopoulos D., Linsey Q. et Savvides, A., An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas, *European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '06)*, 13-15 Fév., 2006.
- [Mad05] Madden, S.R., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M. & Hong, W., TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks, *ACM Transactions on Database Systems*, Mar. 2005, vol. 30(1)
- [Mao07] Mao G., Fidanb B. et Anderson B., Wireless sensor network localization techniques, *Computer Networks*, Juil. 2007, vol. 51, n° 10, p. 2529 - 2553
- [Mai02] Mainwaring A., Polastre J., Szewczyk R., Culler D. et Anderson J., Wireless sensor networks for habitat monitoring, *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, 28 Sept. 2002, p. 88-97
- [Men01] Meninger S., Mur-Miranda J., Amirtharajah R., Chandrakasan A. et Lang J., Vibration-to-electric energy conversion, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Fév. 2001, vol. 9(1), p. 64-76
- [Mis07] Miscopein B., Arndt M., Communications radio mobiles : des interfaces intelligentes pour le futur, formation de l'école doctorale EEATS, 2007
- [Mol04] Molnar A., Lu B., Lanzisera S., Cook B. et Pister K., An ultra-low power 900 MHz RF transceiver for wireless sensor networks, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 3-6 Oct. 2004, p. 401-404

-
- [Mun06] Munguia Tapia E., Intille S.S., Lopez L. et Larson K., The design of a portable kit of wireless sensors for naturalistic data collection, *Proceedings of PERVASIVE 2006*, 2006
- [Nac05] Nachman L., Kling R., Adler R., Huang J. et Hummel V., The Intel mote platform: a Bluetooth-based sensor network for industrial monitoring, *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 15 Avr. 2005, p. 437-442
- [Nat05] Natarajan A., Komijani A., Hajimiri A., A fully integrated 24-GHz phased-array transmitter in CMOS, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Déc. 2005, vol. 40, n°12, p. 2502-2514
- [Nic03] Niculescu D. et Nath B., Ad hoc positioning system (APS) using AOA, *22th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Mars – Avr. 2003, vol. 3, p. 1734-1743
- [Nil09] Nilsson M., Directional antennas for wireless sensor networks. *9th Scandinavian Workshop on Wireless Adhoc Networks (Adhoc'09)*, 4-5 Mai 2009
- [Nou04] Noury N., Barralon P., Virone G., Rumeau P. et Boissy P., Fusion multi capteurs dans un capteur de chute : conception et résultats, *J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, vol. 3, Hors-Série 1, 15, 2004
- [OH06] O. H., Des espions très high-tech, *Science et avenir*, Avr. 2006, vol. 710, p. 80-86
- [Par05] Park C., Liu J. et Chou P., Eco: an ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring, *4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 15 Avr. 2005
- [Par06] Park C. et Chou P.H., eCAM: Ultra Compact, High Data-Rate Wireless Sensor Node with a Miniature Camera, *Proceedings of ACM SenSys*, 1-3 Nov. 2006
- [Pat05] Patwari N., Ash J., Kyperountas S., Hero A.I., Moses R. et Correal N., Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, Juil. 2005, vol. 22(4), p. 54-69
- [Per05] Perillo, M. et Heinzelman, W., *Wireless Sensor Network Protocols Fundamental Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Networks*, CRC Hall, 2005
- [Pet00] Petriu E., Georganas, N., Petriu D., Makrakis D. et Groza V., Sensor-based information appliances, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Déc. 2000, vol. 3(4), p. 31-35
- [Poh97] Pohl A., Ostermayer G., Reindl L. et Seifert F., Monitoring the tire pressure at cars using passive SAW sensors, *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 5-8 Oct. 1997, vol. 1, p. 471-474
-

- [Pol04] Polastre J., Hill J. et Culler D., The mote revolution: Low power wireless sensor network devices, *Proceedings of hot Chips: a symposium on high performance chips*, 22-24 Août 2004
- [Pot00] Pottie G. and Kaiser W., Wireless Integrated Network Sensors (WINS): Principles and Approach, *Communications of the ACM*, 2000
- [Rab00] J. Rabaey, J. Ammer, J.L. da Silva Jr. et D. Patel, Pico-Radio: ad-hoc wireless networking of ubiquitous low energy sensor/monitor nodes, *Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI (WVLSI'00)*, Orlando, Florida, Avr. 2000, p. 9 - 12.
- [Ram01] Ramanathan R., On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas, *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking*, 2001, p. 95 - 105
- [Ram03] Ramadurai V. et Sichitiu M.L., Localization in wireless sensor networks: a probabilistic approach, *International Conference on Wireless Networks (ICWN)*, Oct. 2003, p. 275-281
- [Ram04] Ramamurthy H., Prabhu B. et Gadh R., Reconfigurable wireless interface for networking sensors (ReWINS), *9th International Conference on Personal-Wireless-Communications*, 21-23 Sept. 2004, p. 215-229
- [Ram05] Ramamurthy H., Lal D., Prabhu B., Gadh R. et Samueli H., ReWINS: a distributed multi-RF sensor control network for industrial automation, *Symposium on Wireless Telecommunications*, 28-30 Avril 2005, p. 24 -33
- [Rou03] Roundy S., Otis Y., Rabaey J.M. et Wright P., A 1.9GHz RF Transmit Beacon using Environmentally Scavenged Energy, *IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Devices*, Août 2003
- [San06] Sang-Hyuk Wi, Yong-Bin Sun, In-Sang Song, Sung-Hoon Choa, Koh I.-S., Yong-Shik Lee, Jong-Gwan Yook, Package-level integrated antennas based on LTCC technology, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Août. 2006, vol. 54, n°8, p. 2190-2197
- [Sch00] Schimetta G., Dollinger F. et Weigel R., A wireless pressure-measurement system using a SAW hybrid sensor, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 11-16 Juin 2000, vol. 48, n° 12, p. 2730-2735
- [Sek05] Seki T., Honma N., Nishikawa K., Tsunekawa K, A 60-GHz multilayer parasitic microstrip array antenna on LTCC substrate for system-on-package, *Microwave and Wireless Components Letters*, Mai 2005, vol.15, n°5, p. 339-341
- [Sen97] Sengupta L., Sengupta S., Ultrasonics Novel ferroelectric materials for phased array antennas, *Transactions on Ferroelectrics and Frequency Control*, Jui. 1997, vol. 44, n°4, p. 792-797

-
- [Sic04] Sichitiu, V., Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon, *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, Oct. 2004, p. 174-183
- [Siv04] Sivrikaya, F. et Yener, B., Time synchronization in sensor networks: a survey, *IEEE Network*, Jui. - Août 2004, vol. 18, n° 4, p. 45-50
- [So07] So S., Koushanfar F., Kosterev A. et Tittel F., LaserSPECKs: Laser spectroscopic trace gas sensor networks - sensor integration and applications, *Information Processing in Sensor Networks*, Avr. 2007
- [Sta06] Stann, F., Heidemann, J., Shroff, R. et Murtaza, M., RBP: Robust Broadcast Propagation in Wireless Networks, *4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Nov. 2006
- [Tap04] Tapia E.M., Marmasse N., Intille S.S. et Larson K., MITes: Wireless portable sensors for studying behaviour, *6th International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP)*, 2004
- [Tin05] Weber W., Rabaey J. M. et Aarts E., Ambient intelligence, éditions Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-23867-6, 2005, 2ème partie, 2ème chapitre : TinyOS: An Operating System for Sensor Networks, p. 115-148
- [TSMP] Technical Overview of Time Synchronized Mesh Protocol (TSMP) (en ligne). Disponible sur:
http://www.dustnetworks.com/cms/sites/default/files/TSMP_Whitepaper.pdf
(consulté le 20/04/2009)
- [Van59] Van Atta L. C., Electromagnetic reflector, Brevet Américain n°. 2,908,002; 6 Oct., 1959.
- [Vir02] Virone G. et Noury N., Télé-Surveillance Automatique de l'Activité dans un Habitat, *JFIM2002, Congrès Francophone d'Informatique Médicale*, 6-7 Mai 2002
- [Yed05] Yedavalli K., Krishnamachari B., Ravula S. et Srinivasan B., Ecolocation: a sequence based technique for RF localization in wireless sensor networks, *IEEE 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2005
- [War02] Warneke B.A., Scott M.D. et Leibowitz L., An Autonomous 16mm³ Solar-Powered Node for Distributed Wireless Sensor Networks, *Proceedings of Sensors' 02*, 2002
- [Wei91] Weiser, M., The Computer for the Twenty-first Century. *Scientific American*, 1991, vol. 265 n° 3, p. 94-104

- [Wer05] Werner-Allen G., Johnson J., Ruiz M., Lees J. et Welsh M., Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network, *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks*, 31 Jan.-2 Fév. 2005, p. 108-120
- [Whi03] Whitehouse K., Optimism in localization [en ligne]. Disponible sur: <http://www.cs.berkeley.edu/~culler/cs294-f03/finalpapers/calamari.pdf>, (consulté le 20/04/2009)
- [Zha04] Zhang Y.P, Integrated circuit ceramic ball grid array package antenna, *Transactions on Antennas and Propagation*, Oct. 2004, vol. 52, n°10, p. 2538-2544
- [Zha07] Zhai, Y., Yang, B., Salter, T., Goldsman, N. et Abshire, P. Using device characteristics to obtain a low-power temperature-insensitive oscillator for smart dust networks, *2007 International Semiconductor Device Research Symposium*, 12-14 Déc. 2007, p. 1-2
- [Zio03] Ziolkowski R.W., Kipple A.D., Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas, *Transactions on Antennas and Propagation*, Oct. 2003, vol. 51, n°10, Part 1, p. 2626-2640

ANNEXES

Sommaire

Annexe A :	185
Annexe B :	187
Annexe C :	190
Annexe D :	193
Annexe E :	196
Annexe F :	200

Annexe A : Code Matlab traçant le diagramme de rayonnement d'un réseau avec des phases et des distances entre antennes différentes.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Tracé rayonnement réseau d'antennes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%avec delta phi et d variables%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
close all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Données%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nb_ant = 5;           %nb d'antennes
pas_teta = 2*pi/360;  %incrément en teta
teta = 0:pas_teta:2*pi; %plage teta
teta0 = 0 ;          %en radian
frequence = 2.4;     %en GHZ
lambda = 3*10^8/(fréquence*10^9); %longueur d'onde
taille = floor((2*pi)/pas_teta)+1; %nombre de points dans les matrices
marker = 9; %pas d'échantillonnage pour les marqueurs sur courbes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Vecteurs & matrices%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dvar = zeros(1,nb_ant-1);
amp = zeros(1,nb_ant);
phi_man = zeros(1,nb_ant);
long = zeros(1,nb_ant-1);
deph = zeros(1,nb_ant);
phi = zeros(nb_ant,taille);
A = zeros(nb_ant,taille);
B = zeros(nb_ant,taille);
interf = ones(1,taille);
interf_temp = zeros(1,taille);
champ = zeros(1,taille);
champ1 = zeros(1,taille);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%ùDistances et déphasages variables entre les antennes%%
%%remplissage manuel%
%dvar = [0 lambda/2 lambda/4 lambda lambda/3 0 0 ];
%phi_man = [0 pi/3 pi/2 pi/4 pi/6];
%amp = [1 3 2 4 1 0 5 2 1 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

%%remplissage auto%
for l = 2:nb_ant
    dvar(l)= lambda/2; %dvar(l)=dist entre 2 et 1
    long = cumsum(dvar);%long(k)=distance de k par rapport à 1
    phi_man(l) = (l-1)*pi/4; %phi_man(l)=phase de l ;p
    %phi_man(l) = 0;%phase antenne 1
    amp(l) = 1;
    amp(l) = 1; %amplitude de chaque antenne
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Calcul des déphasages%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for n =2:taille
    for m=2:nb_ant
        phi(1) = 0;
        phi(m,1:taille) = 2*pi*long(m)*cos(teta+pi/2)/lambda;%phi=phase /
antenne 1

```

```

A(1,1:taille) = phi_man(1);
B(1,1:taille) = phi(1,1:taille)+A(1,1:taille);
interf(1,1) = amp(1);
%choix phase manuelle ou calculée
%A(m,1:taille) = 2*pi*long(m)/lambda.*(cos(n*pi/180-teta0)-
cos(n*pi/180)); %dphil dphi2...
A(m,1:taille) = phi_man(m);
B(m,1:taille) = phi(m,1:taille)+A(m,1:taille);%phi+dphil 2phi+dphi2...
interf_temp(1,n) = amp(m)*exp(i*B(m,n));
%exp(i*phil,2,,nb_ant+dphil)
interf(1,n) = interf(1,n)+interf_temp(1,n);%Somme exp(iphix+dphix)
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[antenne]=textread('planH.txt','%f%f%f%f%f%f%f','headerlines',2);
%fichier CST
antenne=[antenne; antenne(1)];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Calcul du champ%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for k=1:181
    champ(1,k) = cos(pi/2*cos(k*pi/180))./sin(k*pi/180)).*abs(interf(1,k));
end
for g=181:361
    champ1(1,g) =
        (-cos(pi/2*cos(g*pi/180))./sin(g*pi/180)).*abs(interf(1,g));
end
champ3 = (abs(interf).*antenne);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Tracé des diagrammes de rayonnement%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%un dipôle
figure
polar3(10,teta,antenne,'g')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%calcul pour marker
for p=1:taille/marker
    teta2(p) = teta(p*marker);
    champ2(p) = champ(p*marker);
    champ3(p) = champ1(p*marker);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%diagramme interférences
figure
polar(teta,abs(interf),'r');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%diagramme final
figure
polar(teta,cos(pi/2*cos(teta))./sin(teta),'r'); hold on
polar(teta,champ,'b');
hold on
polar(teta,champ1,'b');
polar(teta2,champ2,'bs');
polar(teta2,champ3,'bs');
figure
polar(teta,champ3,'r')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Annexe B: Fonction diag3D

```

function DIAG3D=diag3d(X,Y,AMP,PHA,n_points,echelle_db,dmax,vue,affichage)

level_db= echelle_db;
n_points_theta=n_points;
n_points_phi=n_points;
itheta=0;
iphi=0;
fphi=2*pi;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%affichage amplitudes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
max_amp=max(max(AMP)) ;
AMP=AMP/max_amp;
fig_amp=figure('Name','Array amplitudedistribution','NumberTitle','off');
colordef(fig_amp,'white');
plot3(X,Y,AMP,'b.','MarkerFaceColor','white','MarkerSize',12);
axis([0 dmax 0 dmax 0 1]) ;
tick_pos= (0 : 0.2 : 1) ;
set(gca,'ZTick', tick_pos,'ZTickLabel',tick_pos) ;
xlabel('x/\lambda','FontSize',12,'position',[0.5*dmax 1.2*dmax 0
],'HorizontalAlignment','center');
ylabel('y/\lambda','FontSize',12,'position',[1.2*dmax 0.5*dmax
0],'HorizontalAlignment','center');
zlabel('Amplitude normalisée','FontSize',12);
grid on; axis square; box on;
camproj ('perspective'); view(150,20) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%affichage phases%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PHADEG=180*PHA/pi;
fig_pha=figure('Name','Array phasedistribution','NumberTitle','off');
colordef(fig_pha,'white');
plot3(X,Y,PHADEG,'r.','MarkerFaceColor','white','MarkerSize',12);
axis([0 dmax 0 dmax 0 360]);
tick_pos=(0:60:360);
set(gca,'ZTick',tick_pos,'ZTickLabel',tick_pos) ;
xlabel('x/\lambda','FontSize',12,'position',[0.5*dmax 1.2*dmax 0
],'HorizontalAlignment','center');
ylabel('y/\lambda','FontSize',12,'position',[1.2*dmax 0.5*dmax
0],'HorizontalAlignment','center');
zlabel('Phase (degrés)','FontSize',12);
grid on; axis square; box on;
camproj ('perspective'); view(167,8);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%affichage diagramme%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
whole=input('Hémisphère (0) ou espace entier (1)?:\n');
if vue==0;
    ftheta=pi/2;
else ftheta=pi;
end;
THETA=linspace(itheta,ftheta,n_points_theta)';
PHI=linspace(iphi,fphi,n_points_phi);
for m=1:n_points_theta,
    for n=1:n_points_phi,
        temp_field=0;
        for r=1:size(AMP),
            temp_field=temp_field+AMP(r)*exp(i*(PHA(r)+2*pi*(sin(THETA(m))*(X(r)*cos(PHI(n))+Y(r)*sin(PHI(n))))));
        end;
    end;
end;

```

```

        RADIUS(m,n)=abs(temp_field);
    end;
end;
RADIUS=RADIUS/max(max(RADIUS));
RADIUSlin=RADIUS/max(max(RADIUS));
switch affichage
    case 'db'
        for m=1:n_points_theta,
            for n=1:n_points_phi,
                if (RADIUS(m,n)<10^(-level_db/20))
                    RADIUS(m,n)=0;
                else RADIUS (m,n)=20*log10(RADIUS(m,n))+level_db;
                end;
            end;
        end;
        XX=sin(THETA)*cos(PHI).*RADIUS;
        YY=sin(THETA)*sin(PHI).*RADIUS;
        ZZ=cos(THETA)*ones(1,n_points_phi).*RADIUS;
        fig_power=figure('Name','3D Polar Power Pattern in
dBs','NumberTitle','off');
        ps=surf(XX,YY,ZZ, 'Edgecolor','blue','EdgeAlpha', 0.60,
'Linewidth', 0.50);
        set(ps,'FaceColor',[0.169 0.502 1.000]);
        alpha(0.60); %title('Normalized Power Pattern (dB) ');
        tick_pos=(-level_db:10:level_db);
        ticks=abs(tick_pos)-level_db;

        set(gca,'XTick',tick_pos,'XTickLabel',ticks);
        set(gca,'YTick',tick_pos,'YTickLabel',ticks);
        set(gca,'ZTick',tick_pos,'ZTickLabel',ticks);
        set(gca,'Xcolor','black','Ycolor','black','Zcolor','black') ;
        axis equal; axis auto; box on;
        camlight; lightangle(0,45); lighting gouraud;camproj
('perspective');

    case 'lin'
        for m=1:n_points_theta,
            for n=1:n_points_phi,
                if (RADIUS(m,n)<(-level_db))
                    RADIUS(m,n)=0;
                else RADIUS (m,n)=(RADIUS(m,n));
                end;
            end;
        end;
        XX=sin(THETA)*cos(PHI).*RADIUS;
        YY=sin(THETA)*sin(PHI).*RADIUS;
        ZZ=cos(THETA)*ones(1,n_points_phi).*RADIUS;
        fig_power=figure('Name','3D Polar Power Pattern','NumberTitle',
'off');
        ps=surf(XX,YY,ZZ, 'Edgecolor','blue','EdgeAlpha', 0.60,
'Linewidth', 0.50);
        set(ps,'FaceColor',[0.169 0.502 1.000]);
        alpha(0.60); %title('Normalized Power Pattern (lin) ');
        set(gca, 'Xcolor', 'black', 'Ycolor', 'black', 'Zcolor', 'black' )
;
        axis([-max(max(XX)) max(max(XX)) -max(max(YY)) max(max(YY)) 0
max(max(ZZ))]);
        axis equal; axis auto;
        box on;
        camlight; lightangle(0,45); lighting gouraud;camproj
('perspective');

```

```

case 'les 2'
    %en dB
    for m=1:n_points_theta,
        for n=1:n_points_phi,
            if (RADIUS(m,n)<10^(-level_db/20))
                RADIUS(m,n)=0;
            else RADIUS (m,n)=20*log10(RADIUS(m,n))+level_db;
            end;
        end;
    end;
    XX=sin(THETA)*cos(PHI).*RADIUS;
    YY=sin(THETA)*sin(PHI).*RADIUS;
    ZZ=cos(THETA)*ones(1,n_points_phi).*RADIUS;
    fig_power=figure('Name','3D Polar Power Pattern in
dBs','NumberTitle','off');
    ps=surf(XX,YY,ZZ, 'Edgecolor','blue','EdgeAlpha', 0.60,
'Linewidth', 0.50);
    set(ps,'FaceColor',[0.169 0.502 1.000]);
    alpha(0.60); %title('Normalized Power Pattern (dB) ');
    tick_pos=(-level_db:10:level_db);
    ticks=abs(tick_pos)-level_db;

    set(gca,'XTick',tick_pos,'XTickLabel',ticks);
    set(gca,'YTick',tick_pos,'YTickLabel',ticks);
    set(gca,'ZTick',tick_pos,'ZTickLabel',ticks);
    set(gca,'Xcolor','black','Ycolor','black','Zcolor','black')
;

    axis equal; axis auto; box on;
    camlight; lightangle(0,45); lighting gouraud;camproj
('perspective');

    %en lin
    for m=1:n_points_theta,
        for n=1:n_points_phi,
            if (RADIUSlin(m,n)<(-level_db))
                RADIUSlin(m,n)=0;
            else RADIUSlin (m,n)=(RADIUSlin(m,n));
            end;
        end;
    end;
    XX2=sin(THETA)*cos(PHI).*RADIUSlin;
    YY2=sin(THETA)*sin(PHI).*RADIUSlin;
    ZZ2=cos(THETA)*ones(1,n_points_phi).*RADIUSlin;
    fig_power=figure('Name','3D Polar Power Pattern','NumberTitle',
'off');
    ps=surf(XX2,YY2,ZZ2, 'Edgecolor','blue','EdgeAlpha', 0.60,
'Linewidth', 0.50);
    set(ps,'FaceColor',[0.169 0.502 1.000]);
    alpha(0.60); %title('Normalized Power Pattern (lin) ');
    set(gca,'Xcolor','black','Ycolor','black','Zcolor','black')
;

    axis([-max(max(XX2)) max(max(XX2)) -max(max(YY2)) max(max(YY2)) 0
max(max(ZZ2))]);
    axis equal; axis auto;
    box on;
    camlight; lightangle(0,45); lighting gouraud;camproj
('perspective');
end

```

Annexe C : Code pour un réseau de 5×5 antennes

```

clear
close all
clc
frequence = 2.4; %en GHZ
lambda = 3*10^8/(frequence*10^9);%longueur d'onde en m
vue = 0; %vue = 0 =>hemisphère
affichage = 'les 2'; %'db' ou 'lin' ou 'les 2'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
angle = [45,1,1];%[angle par rapport à la normal du récepteur,selon x,
selon y]
z0=10;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Définition du reseau%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nb_x = 5;
nb_y = 5;
ecart_x = 0.5;
ecart_y = 0.5;
X_fin = zeros(nb_x*nb_y,1);
Y_fin = zeros(nb_x*nb_y,1);
Z_fin = zeros(nb_x*nb_y,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Placement récepteur%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if angle(2) == 0 && angle(3) == 0
    x0 = (nb_x*ecart_x-ecart_x)/2;
    y0 = (nb_y*ecart_y-ecart_y)/2;
elseif angle(2) == 1 && angle(3) == 0
    x0 = z0*tan(angle(1)*pi/180)+(nb_x*ecart_x-ecart_x)/2;
    y0 = (nb_y*ecart_y-ecart_y)/2;
elseif angle(2) == 0 && angle(3) == 1
    x0 = (nb_x*ecart_x-ecart_x)/2;
    y0 = z0*tan(angle(1)*pi/180)+(nb_y*ecart_y-ecart_y)/2;
elseif angle(2) == 1 && angle(3) == 1
    x0 = z0*tan(angle(1)*pi/180)+(nb_x*ecart_x-ecart_x)/2;
    y0 = x0;
elseif angle(2) == -1 && angle(3) == 1
    x0 = -z0*tan(angle(1)*pi/180)+(nb_x*ecart_x-ecart_x)/2;
    y0 = x0;
end
angle = angle(1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Placement des antennes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
i=1:nb_y;
for m = 1:nb_x
    X_fin(i,1) = -ecart_x+m*ecart_x;
    i=i+nb_y;
end
for n = 1:nb_y
    Y_(n,1) = -ecart_y+n*ecart_y;
    Z_fin(m*n,1) = 0;
end
for o = 1:nb_y:(nb_x-1)*(nb_y)+1
    Y_fin(o:o+nb_y-1,1) = Y_(1:nb_y,1);
end

tab = zeros(nb_y,nb_x);
for p=1:nb_y*nb_x
    tab(p) = p;
end
tab = tab';
%%traitement en ligne
% PHA_fin((tab(1,1:nb_x)),1) = -pi;
% PHA_fin((tab(2,1:nb_x)),1) = -pi/2;

```

```

% PHA_fin((tab(3,1:nb_x)),1) = 0;
% PHA_fin((tab(4,1:nb_x)),1) = pi/2;
% PHA_fin((tab(5,1:nb_x)),1) = pi;
% AMP_fin((tab(1,1:nb_x)),1) = 0;
% AMP_fin((tab(2,1:nb_x)),1) = 4;
% AMP_fin((tab(3,1:nb_x)),1) = 6;
% AMP_fin((tab(4,1:nb_x)),1) = 4;
% AMP_fin((tab(5,1:nb_x)),1) = 0;
%%%traitement en colonne
% PHA_fin((tab(1:nb_y,1)),1) = -pi;
% PHA_fin((tab(1:nb_y,2)),1) = -pi/2;
% PHA_fin((tab(1:nb_y,3)),1) = 0;
% PHA_fin((tab(1:nb_y,4)),1) = pi/2;
% PHA_fin((tab(1:nb_y,5)),1) = pi;
% AMP_fin((tab(1:nb_y,1)),1) = 1;
% AMP_fin((tab(1:nb_y,2)),1) = 4;
% AMP_fin((tab(1:nb_y,3)),1) = 6;
% AMP_fin((tab(1:nb_y,4)),1) = 4;
% AMP_fin((tab(1:nb_y,5)),1) = 1;
%%%traitement concentrique
%pour 5*5
AMP_fin([1:5,21:25,6,10,11,15,16,20],1) = 1;
AMP_fin([7,8,9,12,13,14,17,18,19],1) = 4;
AMP_fin(13,1) = 6;
%%pour 3*3
% AMP_fin([1:3,7:9,4,6],1) = 1;
% AMP_fin(5,1) = 2;
% PHA_fin([1:5,21:25,6,10,11,15,16,20],1) = 0;
% PHA_fin([7,8,9,12,13,14,17,18,19],1)=pi/2;
% PHA_fin(13,1)=pi;
%AMP_fin(1:nb_x*nb_y,1) = 1;
%%%Phase variable selon emplacement
for j=1:nb_x*nb_y
    dist(j,1) = sqrt((X_fin(j)-x0)^2+(Y_fin(j)-y0)^2+(Z_fin(j)-z0)^2)...
        -sqrt((((ecart_x*nb_x-ecart_x)/2)-x0)^2+(((ecart_y*nb_y-
ecart_y)/2)-y0)^2+(z0)^2);
    PHA_fin(j,1) = -2*pi*dist(j,1)/lambda;
    if mod(PHA_fin(j,1),2*pi)~=0 && mod(PHA_fin(j,1),2*pi)~=PHA_fin(j,1)
        PHA_fin(j,1) = mod(PHA_fin(j,1),2*pi);
    else
        PHA_fin(j,1) = PHA_fin(j,1);
    end
end
%PHA_fin = [0;0;0];
%%%Definition max pour axes
nelem=size(AMP_fin,1);
if max(X_fin) < max(Y_fin)
    axe = max(Y_fin);
else
    axe = max(X_fin);
end
dmax=max(max(axe))+0.5;
if dmax==0
    dmax=1;
end;
dmax2=max(max(x0+y0))+0.5;
if dmax2==0
    dmax2=1;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%affichage localisation%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
fig_pos=figure('Name','Array positiondistribution','NumberTitle','off');
colordef(fig_pos,'white');
plot3(X_fin,Y_fin,Z_fin,'b. ');
hold on
plot3(x0,y0,z0,'rx');
text(x0-0.5,y0,z0+0.5,['Récepteur'])
grid on; axis square; box on;
xlabel('x/\lambda','FontSize',12,'position',[0.5*dmax2 1.2*dmax2 0
],'HorizontalAlignment','center');
ylabel('y/\lambda','FontSize',12,'position',[1.2*dmax2 0.5*dmax2
0],'HorizontalAlignment','center');
axis([0 dmax2 0 dmax2 0 z0 ] ) ;
xlabel('z','FontSize',12);
camproj ('perspective'); view(150,20) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%diagramme 3D%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
diag3d(X_fin,Y_fin,AMP_fin,PHA_fin,180,40,dmax,vue,affichage);
%diag3d(X,Y,amplitude,phase,nb_points_theta&phi,echelle_db,max_axes,vue,aff
ichage)
```

Annexe D : Code Matlab pour le scenario 2

```

clear all
close all
clc
level_db = 40;
frequence = 0.4; %en GHZ
lambda = 3*10^8/(frequence*10^9);%longueur d'onde en m
nb_ant = 20; %nombre d'antennes
terrain = 5; %en m
emax = 1; %en lambda
x0 = 10; %position récepteur (3D)
y0 = 10;
z0 = 10;
vue = 0; %vue = 0 => hémisphère
affichage = 'les 2'; %'dB' ou 'lin' ou 'les 2'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
R=zeros(nb_ant,5);
for a = 1:nb_ant,
    R(a,1:2) = terrain*rand(1,2); %placement aléatoire
    R(a,3) = 0;%pour les z
    R(a,4) = 1;%amplitude
    R(a,5) = 0;%phase
end

Xdeb = R(1:nb_ant,1);
Ydeb = R(1:nb_ant,2);
Zdeb = R(1:nb_ant,3);
AMPdeb = R(1:nb_ant,4);%amplitude
PHAddeb = R(1:nb_ant,5);%phase
nelem = size(AMPdeb,1);
dist = sqrt(Xdeb.*Xdeb+Ydeb.*Ydeb);
dmax = max(max(dist));
if dmax == 0
    dmax = 1;
end
dmax2 = terrain+1;
if dmax2 == 0
    dmax2 = 1;
end;
for b = 1:nb_ant
    plot(x0,y0,'r. ');
    text(x0-0.5,y0,['Récepteur']);
    hold on
    plot(Xdeb(b),Ydeb(b),'b. ');
    xlabel('x','FontSize',12,'position',[0.5*dmax2 -
0.5],'HorizontalAlignment','center');
    ylabel('y','FontSize',12,'position',[-0.5
0.5*dmax2],'HorizontalAlignment','center');
    text(Xdeb(b)+0.005,Ydeb(b),['n°',num2str(b)])
    hold on
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Recherches antennes dont éloignement < n*lambda%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Calcul distances entre antennes
for c = 1:nb_ant,
    for ant = 1:nb_ant,
        dist(c,ant) = (((Xdeb(c,1)-Xdeb(ant,1))^2+(Ydeb(c,1)-
Ydeb(ant,1))^2)^0.5)/lambda;
    end
end
end

```

```
%%%Recherche des distances < lambda
ok = 1;
for d = 1:nb_ant,
    for e = 1:nb_ant,
        if dist(d,e)<=emax && (d~=e)
            Ant(ok,1) = d; %Ant = liste des antennes dont dist <2*lambda
            Ant(ok,2) = e;
            ok = ok+1;
        else
            ok = ok;
        end
    end
end
if ok == 1
    'pas de réseau possible'
else
    %%%mise à 0 des doublons
    for f = 1:ok-1,
        for g = 1:ok-1,
            if (Ant(f,1)==Ant(g,2)) && (Ant(f,2)==Ant(g,1)) && (f~=g);
                Ant(f,1) = 0;
                Ant(f,2) = 0;
            end
        end
    end
    %%%effacement lignes avec 0
    z = 1;
    for h = 1:ok-1,
        if (Ant(h,1)==0) && (Ant(h,2)==0);
            z = z;
        else
            Ant_ok(z,1) = Ant(h,1);%Ant_ok=liste des antennes sans doublons
            Ant_ok(z,2) = Ant(h,2);
            Ant_ok(z,3) = 0;%indice 0 utile pour après
            z = z+1;
        end
    end
    %%%choix des antennes
    k = 1;j = 3;l = 1;
    Tab = zeros(size(Ant_ok,1),nb_ant);
    while l<=size(Ant_ok,1)
        for k = 1:size(Ant_ok),
            if Ant_ok(l,3)==0
                Tab(k,1:2) = Ant_ok(l,1:2);
                Ant_ok(l,3) = 1;
                for p = 1:nb_ant, %size(Ant_ok,1)
                    for q = 1:size(Ant_ok);
                        if ((Tab(k,p)==Ant_ok(q,1) || Tab(k,p)==Ant_ok(q,2)) &&
(k~=q) && (Ant_ok(q,3)~=1))
                            if Tab(k,p)==Ant_ok(q,1)
                                if find(Tab(k,1:(j-1))==Ant_ok(q,2))
                                    Ant_ok(q,3) = 1;
                                else
                                    Tab(k,j) = Ant_ok(q,2);
                                    j = j+1;
                                    Ant_ok(q,3) = 1;
                                end
                            else
                                if find(Tab(k,1:j-1)==Ant_ok(q,1))
                                    Ant_ok(q,3)=1;
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

```

        else
            Tab(k,j)=Ant_ok(q,1);
            j=j+1;
            Ant_ok(q,3) = 1;
        end
    end %3eme if
    else
    end%2eme if
    end%3eme for
end%2ème for
Tab(k,nb_ant+1) = j-1; %nombre d'antennes par lignes
j = 3;
Ant_ok(1,3) = 1;
else
end%1er if
l = l+1;
end%1er for
end%while

%%%recherche ligne la plus longue
Compteur = Tab(1,nb_ant+1);
Ligne = 1;
for n = 2:size(Tab,1);
    if Tab(n,nb_ant+1)>Compteur;
        Ligne = n;
        Compteur = Tab(n,nb_ant+1);
    else
    end
end
%%%prend les coordonnées des antennes de la ligne
X = Xdeb(Tab(Ligne,1:Compteur))/lambda;
Y = Ydeb(Tab(Ligne,1:Compteur))/lambda;
AMP = AMPdeb(Tab(Ligne,1:Compteur));
PHA = PHAdeb(Tab(Ligne,1:Compteur));

for j=1:size(X)
    dist2(j,1) = sqrt((X(j)-x0/lambda)^2+(Y(j)-y0/lambda)^2+(z0/lambda)^2);
    ref = dist2(1,1);
    ecart(j,1) = dist2(j,1)-ref;
    PHAfin(j,1) = -2*pi*ecart(j,1);
    if mod(PHAfin(j,1),2*pi)~=0 && mod(PHAfin(j,1),2*pi)~=PHAfin(j,1)
        PHAfin(j,1) = mod(PHAfin(j,1),2*pi);
    else
        PHAfin(j,1) = PHAfin(j,1);
    end
end

diag3d(X,Y,AMP,PHAfin,180,40,dmax,vue,affichage);
%diag3dlineaire(X,Y,AMP,PHAfin,180,32,dmax,vue,dB ou lin);
end

```

Annexe E : Histogrammes présentant le nombre de réseaux disponibles et le nombre d'antennes composant le plus grand d'entre eux pour plusieurs densités et plusieurs fréquences.

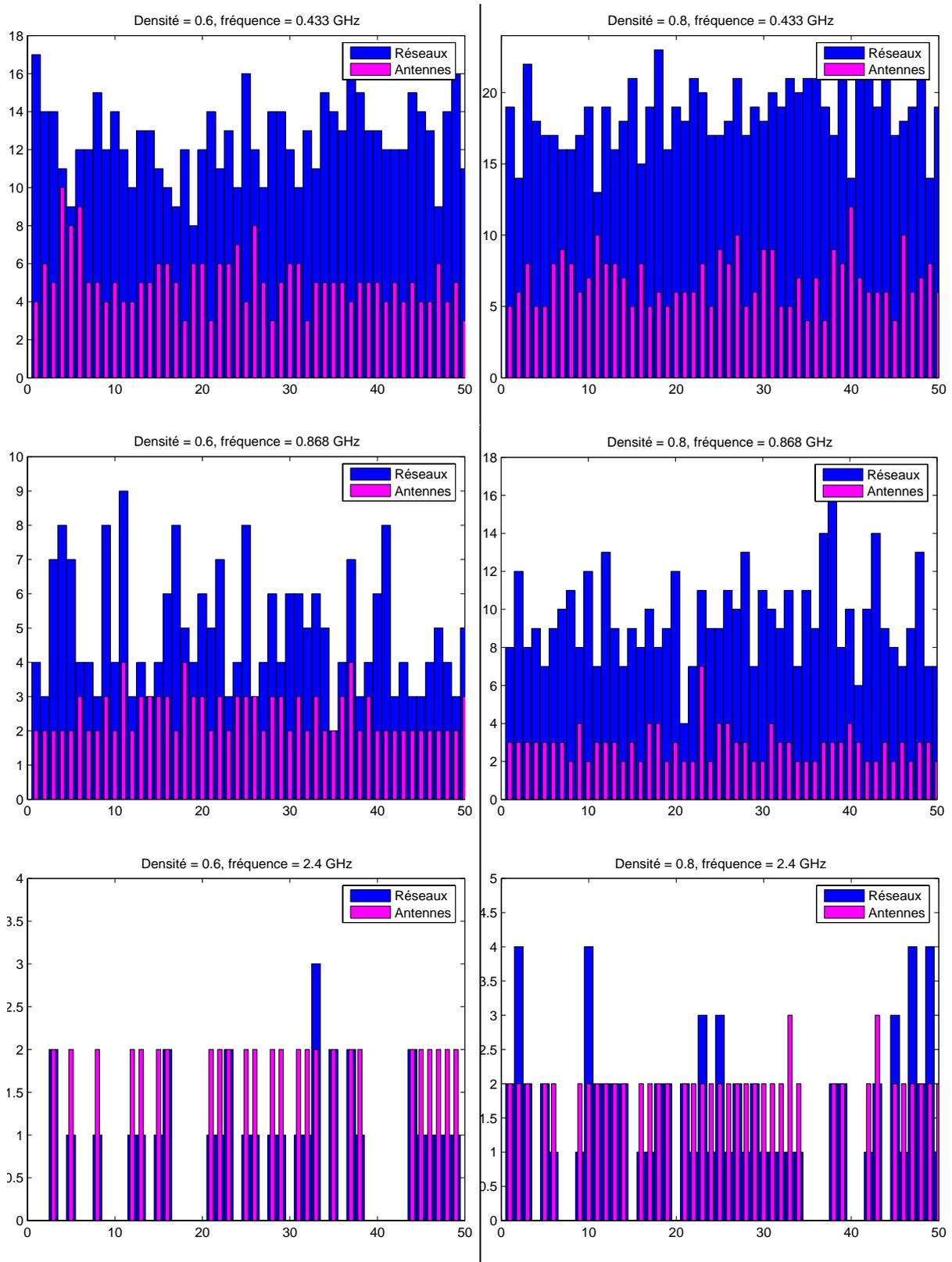
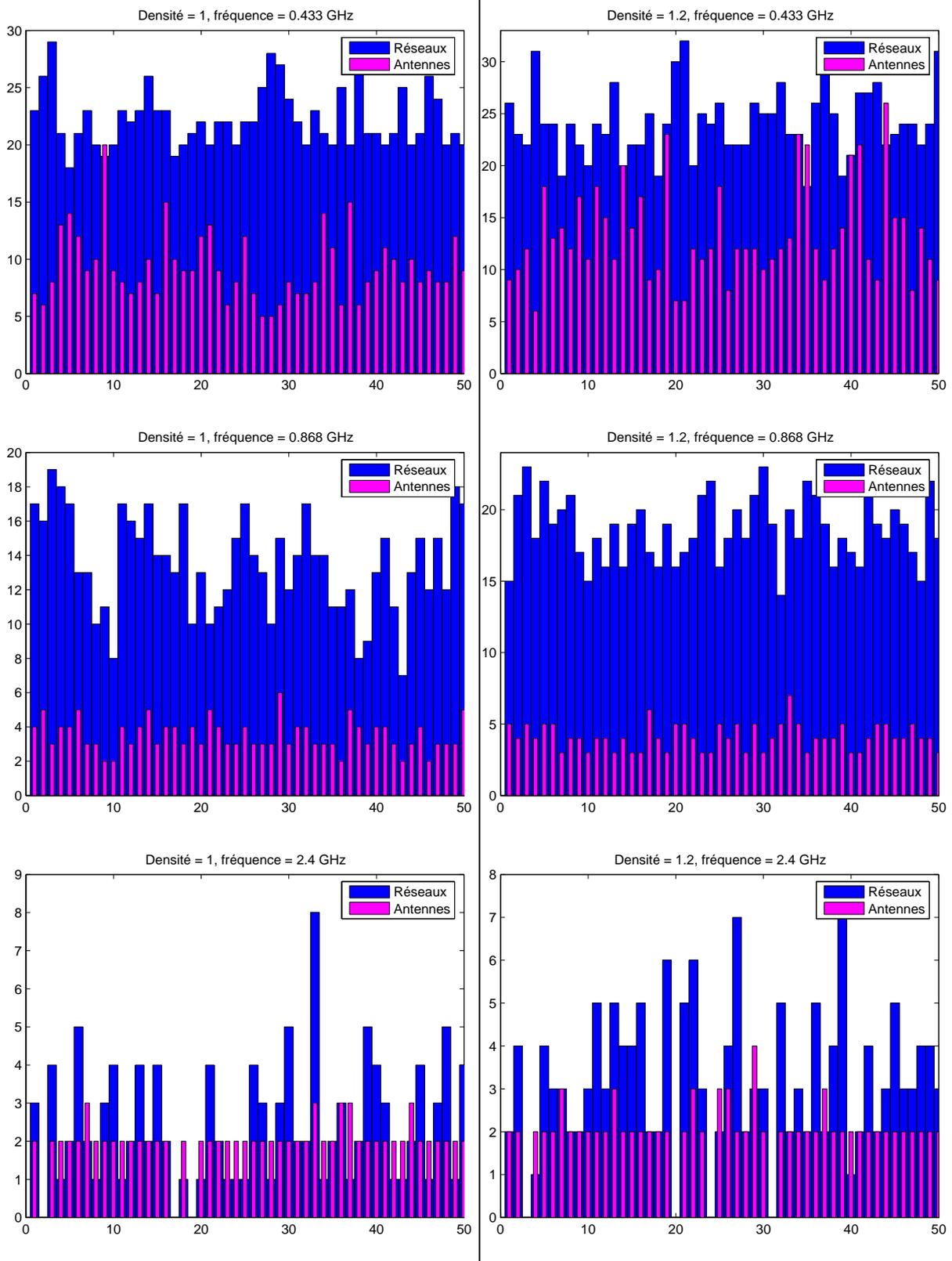


Fig. A-1: Densité 0,6 capteur/m²

Fig. A-2: Densité 0,8 capteur/m²

Fig. A-3: Densité 1 capteur/m²Fig. A-4: Densité 1,2 capteurs/m²

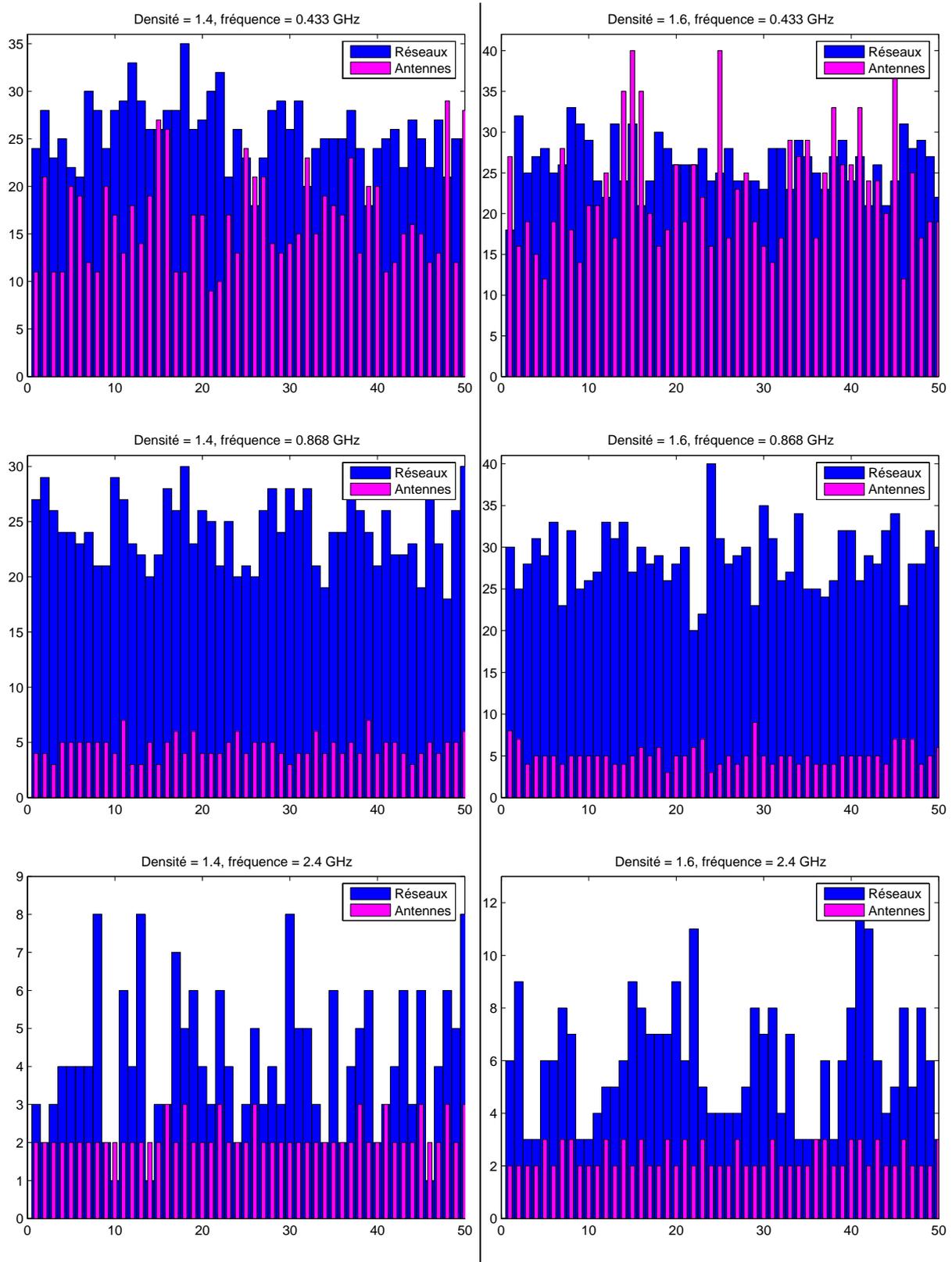
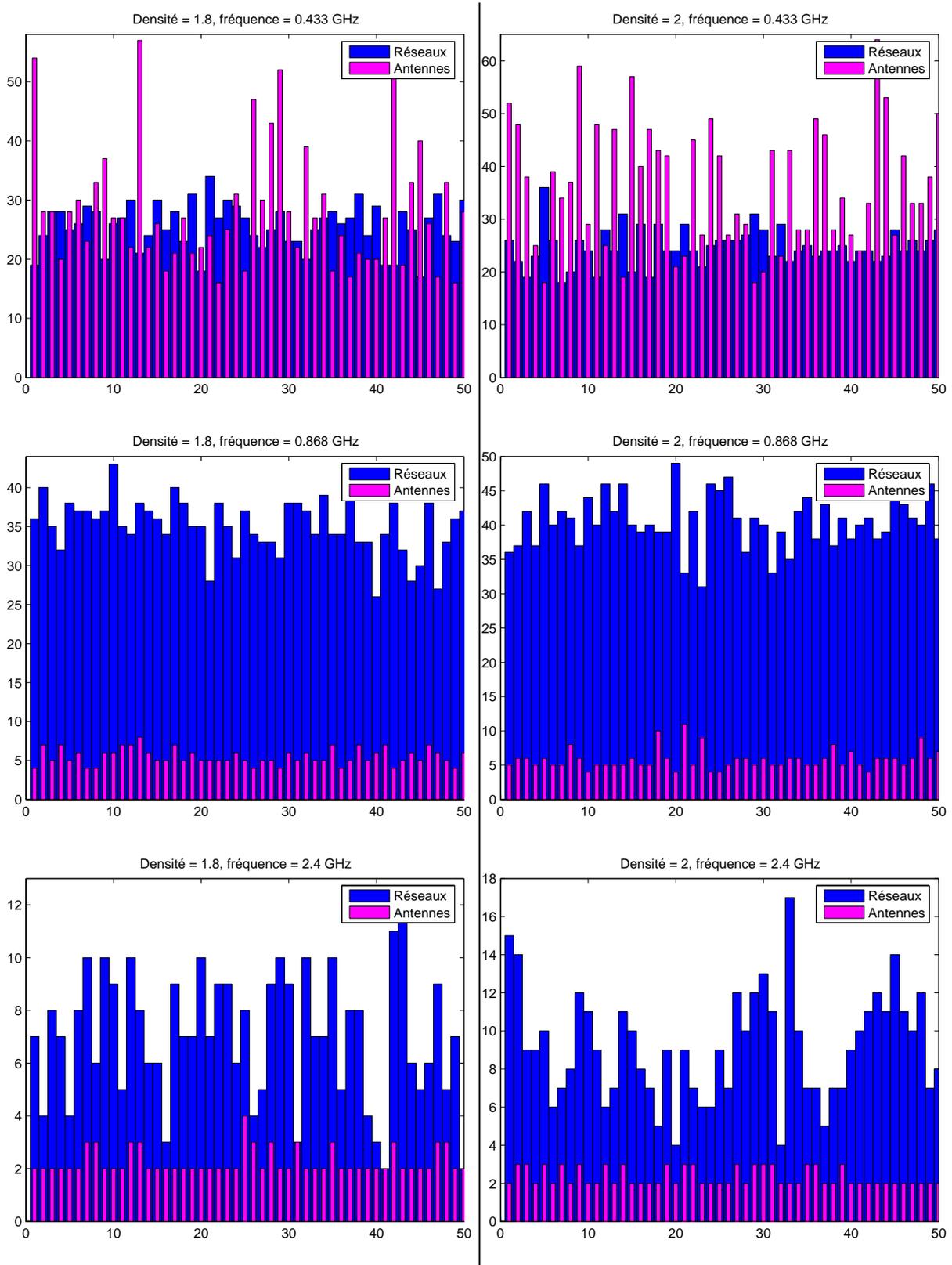
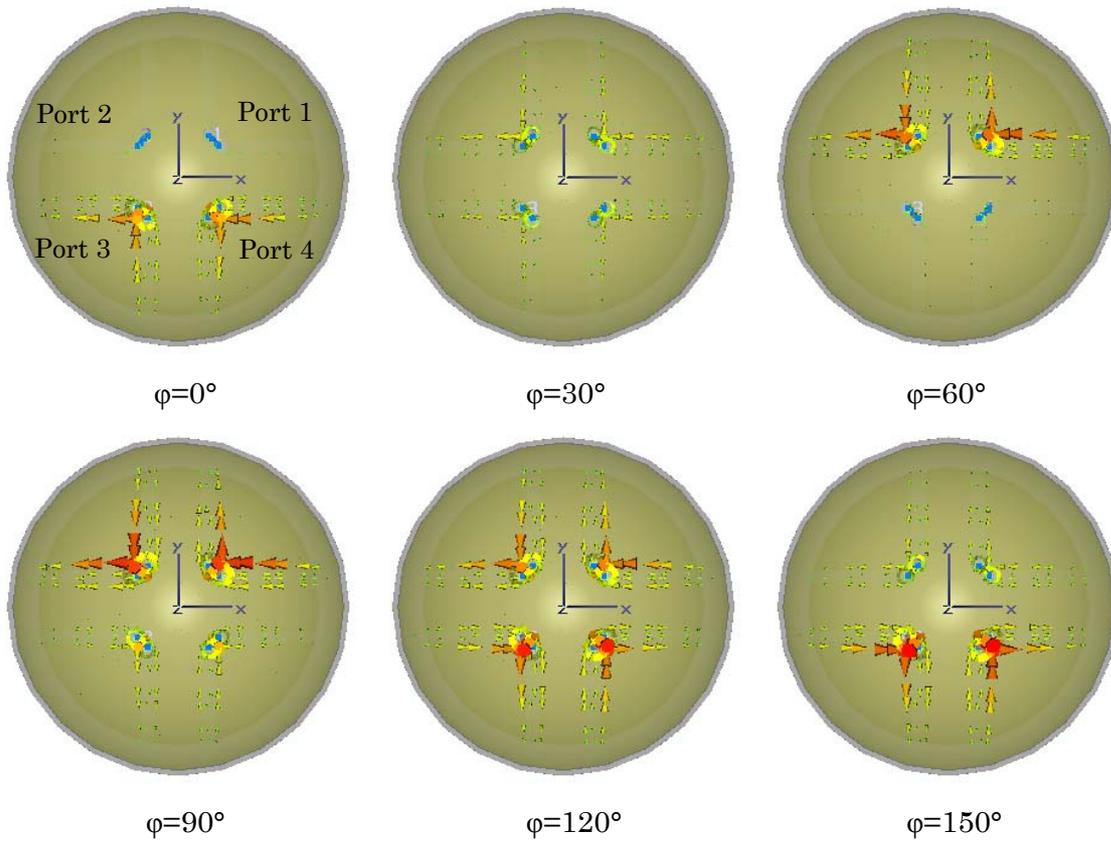


Fig. A-5: Densité 1,4 capturs/m²

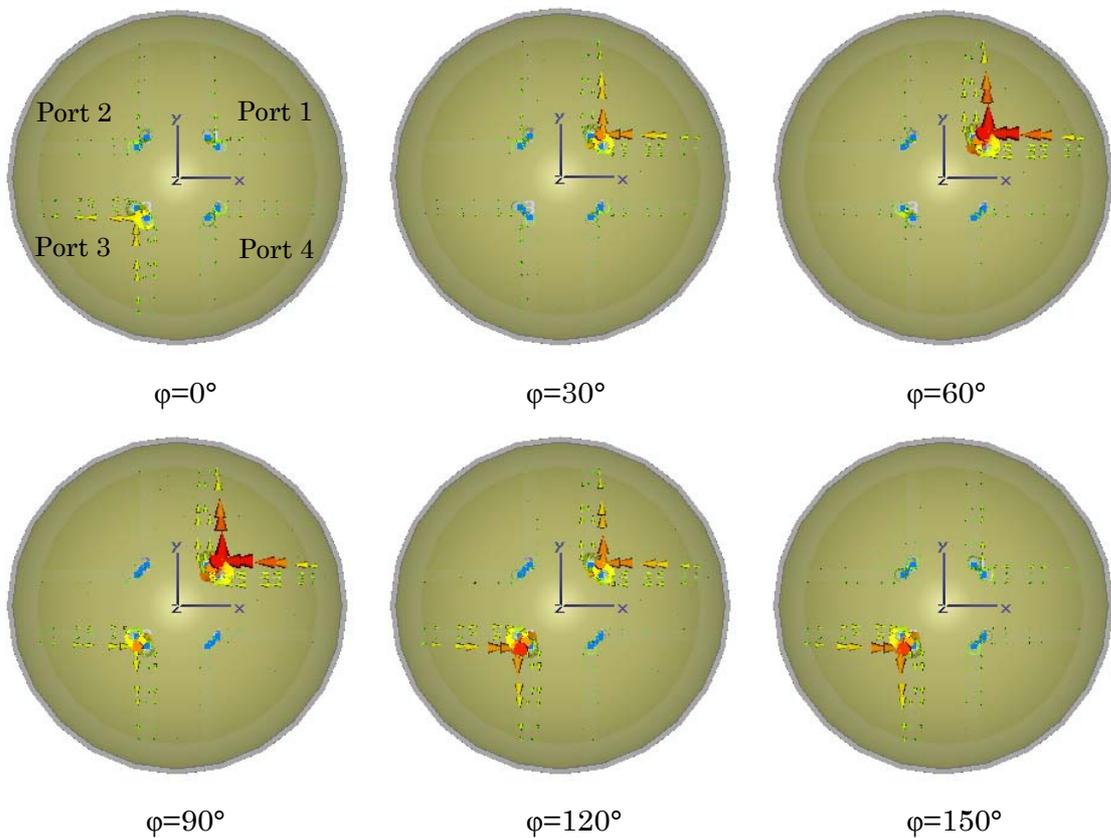
Fig. A-6: Densité 1,6 capturs/m²

Fig. A-7: Densité 1,8 capteurs/m²Fig. A-8: Densité 2 capteurs/m²

Annexe F : Répartition des courants dans la combinaison *D* : Ports 1 et 2 à 90°, ports 3 et 4 à 0°



Répartition des courants dans la combinaison *F* : port 1 à 90°, port 3 à 0°



« Architecture et intégration d'un module de type Smart-Dust »

Les progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'intégration de fonctions sur des surfaces de plus en plus petites a permis le développement de l'informatique diffuse, c'est-à-dire, intégrée dans notre espace et mise en œuvre par des objets du quotidien ou des structures spécifiques. Nous nous intéressons dans ce travail à ces structures couramment appelées « capteurs sans fil » car leur fonction est de capter des informations dans leur environnement et de les transmettre ensuite. Ces structures autonomes sont constituées d'un capteur, d'une partie numérique pour le traitement des données et la gestion de la structure, d'un système de communication et d'une alimentation. Afin d'être discrète, cette structure doit être de petite taille. Dans ce but, il est nécessaire que toutes ses composantes soient intégrées ensemble. L'antenne de la partie communicante est aujourd'hui un frein à cette intégration car les fréquences utilisées font qu'elle a des dimensions très supérieures à celles du reste de la structure et, même intégrée, ses propriétés vont être perturbées par le packaging de la structure. Autre point, ces antennes sont souvent omnidirectionnelles, ce qui, en termes d'économies d'énergie, cruciales dans ce domaine, n'est pas une solution optimale.

Dans ce contexte, la première partie de ce rapport présente les applications envisagées et envisageables pour les réseaux de capteurs sans fil. Un historique puis un état de l'art sont ensuite proposés pour identifier les différentes stratégies mises en œuvre dans la conception de plates-formes ainsi que les acteurs académiques et industriels. Une synthèse vient justifier l'orientation à prendre dans le cadre de ce travail et clôt cette partie. La deuxième partie traite de la façon d'appliquer des réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs sans fil. L'idée étant d'utiliser les nœuds du réseau comme éléments du réseau d'antenne, créant ainsi un réseau où les éléments ne sont pas liés physiquement. Cette perspective est étudiée par le biais de deux scénarios caractéristiques des applications des capteurs sans fil. Dans chacun son application est testée et des solutions sont proposées et détaillées grâce à l'outil de calcul Matlab. Une partie finale discute des limitations pour utiliser les réseaux d'antennes dans les réseaux de capteurs sans fil. La dernière partie aborde la conception d'antennes spécifiques aux capteurs sans fil pour des applications en extérieur. Un concept d'antenne-package est présenté et développé sur différentes architectures d'antennes qui ont, de ce fait, des formes en volume. Des structures cubiques et sphériques sont proposées, conçues et simulées. L'attention se porte sur leur diagramme de rayonnement, leur robustesse et leur faculté à pouvoir garder leurs propriétés même placées dans un environnement et avec des composants placés à l'intérieur. Deux structures, une cubique et une demi-boule, présentent des profils intéressants, la deuxième étant un réseau d'antennes à elle-seule. Agile, elle permet de balayer tout le demi-espace supérieur qui l'entoure avec une bonne efficacité.

Enfin, une partie conclusive montre la contribution apportée et propose des perspectives de travail en lien avec les antennes et plus généralement avec la partie communicante et l'architecture des nœuds.

Mots-clés : réseaux de capteurs sans fil, antenne, réseaux d'antennes, réseaux d'antennes non liées, scénarios d'applications, dipôle, antenne cubique, antenne demi-boule agile.

“Architecture and integration of a Smart-Dust module”

Technological advances in the field of integration of functions in silicon technologies and their miniaturization have allowed the development smart electronic devices for public application. We are interested in this work in those structures commonly known as "wireless sensor" whose purpose is to capture information in their environment and then transmit it. These autonomous structures consist of a sensor, a digital part for data processing and management of the whole structure, a communication system and a power supply. To be discreet, this structure must be small. For this purpose it is necessary that all components be integrated in one chip. The antenna of the communicating part is an obstacle to integration because the frequencies used make its dimensions larger than other dimensions of the module, and even when integrated, its properties will be affected by the packaging of the device. Another parameter is, these antennas are omnidirectional, which in terms of energy saving is critical for these applications.

In this context, the first part of this report presents the approaches and applications for networks of wireless sensors. A state of the art is presented to identify the different strategies used in the design of platforms for wireless sensors as well as academic and industrial applications. The synthesis showed that in this context, antennas have not been studied extensively. The second part deals with how to implement antenna arrays in wireless sensors networks. The idea is to use the network nodes as elements of the array, thus creating a network where elements are not physically linked. This prospect is explored through two characteristic scenarios of wireless sensors applications. Each application is tested and solutions are proposed and detailed thanks to the calculation tool Matlab. A final section discusses the limitations of use of antenna arrays in wireless sensors networks and our conclusion is that antennas arrays could be a good solution to optimize the link with the end user. The last part deals with the specific antenna design for wireless sensors for outdoor applications. A concept of antenna-package is introduced and developed on different architectures that use antennas body, therefore, in volume. Cubic and spherical structures are proposed, designed and simulated. We focus on the radiation pattern of package antennas, their robustness and their ability to keep their properties even placed in an environment and with components placed inside. Two structures, a cubic and a half-ball, have interesting profiles; the second is an antenna array. Smart, it can scan the entire upper half-space around him with good efficiency.

Finally, a conclusive part shows the contribution and gives work perspectives in conjunction with the antennas and more generally with the communicating part and nodes architecture.

Keywords: wireless sensor networks, antenna, antenna networks, networks of antennas not connected, applications scenarios, dipole, cube antenna, smart half-ball antenna.