

Rapport de stage de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
master en Sciences Pour l'Ingénieur
parcours Systèmes Électroniques Embarqués et Radiofréquences

Étude, conception et réalisation du sous- système de radiocommunication en bandes VHF/UHF pour nano-satellite

Réalisé au : **Laboratoire d'Electronique et Electromagnétisme (L2E)**



Amirreza Chobineh

Sous la responsabilité de : **Madame Muriel Darces**

Tuteur en laboratoire : **Madame Frédérique Deshours**

Etablissement : **Université Pierre et Marie Curie, Master SPI**

Année : 2015-2016

Remerciements

J'adresse mes remerciements avant tout à Madame Muriel DARCES qui a été mon maitre de stage et mon directeur de master, pour m'avoir donné d'excellentes pistes de réflexion, pour sa patience, sa pédagogie et surtout son implication dans mon travail.

Je tiens également à remercier Monsieur Dimitri Galayko, un des responsables du projet CurieSat qui m'a donné la chance de pouvoir suivre ce stage enrichissant.

Je remercie également Madame Frédérique Deshours et Monsieur Georges Alquié pour leurs conseils, partage d'expertise et leur soutien permanent pendant ces six mois de stage.

Je tiens à remercier également Monsieur Yves Chatelon, pour son aide et le temps qu'il a consacré patiemment à mon cas.

Enfin, je voudrais remercier toute les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Sommaire

Remerciements.....	2
Liste des figures	5
I. Introduction	7
A. Présentation générale du projet.....	7
1. Le CNES	7
2. Le projet Janus	7
3. Le Projet METEOR	8
B. Présentation du laboratoire d'accueil : L2E	8
Domaines d'activités	9
C. Cubesat	9
D. La communication satellitaire	10
1. Télémétrie, Tracking (suivi), contrôle (TT&C)	10
2. Radioamateur	10
3. Les bandes de fréquence de fonctionnement de CurieSat.....	11
4. Licence radioamateur	12
II. Étude des besoins	12
A. Grandeurs caractéristiques.....	12
1. La puissance maximale d'émission de la station sol	12
5. Débit binaire.....	12
6. Fréquences	13
B. Bilan de liaison	13
1. Les paramètres d'orbite.....	13
7. Pertes liées aux couches atmosphériques.....	14
8. Affaiblissement de propagation	15
9. Pertes de polarisation	15
10. Voie montante	15
11. Voie descendante.....	17
C. Modulations	18

D.	Le sous-système de télécommunication du satellite.....	20
12.	L'émetteur-récepteur du satellite.....	20
13.	Antennes embarquées sur le satellite.....	21
III.	Travail effectué.....	22
A.	Dimensionnement de la station sol.....	22
1.	Architecture de la station sol.....	22
2.	Sélection des composants	25
3.	Achat des matériels	29
4.	Emplacement de la station sol.....	29
5.	Les logiciels de la station sol	37
IV.	Expériences et tests.....	43
1.	Radioamateur	44
2.	La station sol IGOSat.....	44
3.	ISS.....	44
V.	Conclusion et perspectives	45
VI.	Perceptives.....	46
A.	Bande S.....	46
B.	Les aménagements de communication vocale.....	47
VII.	Références bibliographiques.....	48
VIII.	Annexe.....	49
A.	Annexe 1	49
B.	Annexe 2.....	Error! Bookmark not defined.

Liste des figures

Figure 1, Les Cubesats ont des tailles normalisées. Source : University of Colorado Boulder	10
Figure 2, Emplacement du satellite par rapport au satellite pour un angle d'élévation de 5°	14
Figure 3, Emplacement du satellite par rapport au satellite pour un angle d'élévation de 90°	14
Figure 4, bilan de liaison de la voie montante pour un angle d'élévation de 90°	16
Figure 5, bilan de liaison de la voie montante pour un angle d'élévation de 5°	16
Figure 6, bilan de liaison de la voie descendante pour un angle d'élévation de 90°	17
Figure 7, bilan de liaison de la voie descendante pour un angle d'élévation de 5°	18
Figure 8, taux d'erreur binaire pour les modulations 2FSK, GMSK, BPSK	19
Figure 9, L'encombrement spectral pour les modulation GMSK et BPSK	20
Figure 10, modélisation des antennes dipôles UHF et VHF sur la face supérieure du satellite.	21
Figure 11, diagramme de rayonnement 3D de dipôle VHF,	22
Figure 12, diagramme rayonnement 3D de dipôle UHF	22
Figure 13, L'architecture de la station sol de CurieSat	23
Figure 14, L'architecture de la station sol CurieSat	24
Figure 15 Antenne Yagi croisée en UHF	25
Figure 16, Antenne yagi croisée VHF	26
Figure 17, le rôle du coupleur est de combiner deux antennes yagi verticale et horizontale pour avoir une antenne yagi croisée avec polarisation circulaire	26
Figure 18, Diviseur de puissance	26
Figure 19, Amplificateur de mât en UHF	27
Figure 20, Emetteur/récepteur TS-2000	27
Figure 21, TNC Signalink USB	28
Figure 22, Rotor et contrôleur de rotor Yaesu	29
Figure 23, Interface de contrôleur de rotor	29
Figure 24 , L'emplacement des antennes à l'UPMC	31
Figure 25, Effet masquage de la tour Zamansky est 11,14° en azimut	31
Figure 26, Effet masquage de la tour Zamansky : 14,45° en élévation	32
Figure 27, Structure du système d'antenne	33
Figure 28, Le support de mât sur le toit de la tour 65	34
Figure 29, Le support de mât sur le toit de la tour 65	34
Figure 30, La pièce d'adaptation entre le support de mât et le mât, construite sur mesure	35
Figure 31, La pièce d'adaptation du support du mât au mât vertical	35
Figure 32, Le mât vertical inséré dans la pièce d'adaptation	36
Figure 33, Le rotor sera fixé sur le mât vertical	36
Figure 34, Mât horizontale en fibre de verre	37
Figure 35, Les coordonnées képlériennes d'un objet tournant en orbite autour de la Terre	38
Figure 36, Le logiciel PCSat32, La carte de suivi des satellites	39
Figure 37, ServerSDX, Le pilot de contrôleur de rotor	39
Figure 38, Logiciel MixW	40

Figure 39, Logiciel CW de SwissCube	41
Figure 40, Le logiciel ARCP-2000, développé par Kenwood	42
Figure 41, Logiciel TeamViewer	42
Figure 42, Test de la chaine de communication avec une antenne dipôle	44
Figure 43, La station sol CurieSat situé au laboratoire L2E	46
Figure 44, Microphone de bureau radioamateur	47

I. Introduction

Le but de ce stage est de réaliser une station sol qui répond aux besoins de la communication avec le nano-satellite CurieSat. Le présent rapport vise à dimensionner la station sol qui permettra la transmission de données vers le satellite, ainsi que la réception et le traitement des données envoyées par celui-ci. Nous commencerons par décrire brièvement la mission METEOR et le laboratoire L2E. Nous continuerons par l'analyse des bilans de liaison pour les deux voies, montante et descendante. Ensuite, différents types de modulation seront analysés, ce qui permettra de choisir la meilleure modulation pour chaque voie. Le sous-système de radiocommunication embarqué sur le satellite sera étudié afin d'avoir la meilleure compatibilité avec la station sol. Puis, une architecture pour cette station sera proposée en détaillant le rôle de chacun des éléments. Enfin, les tests réalisés et les perspectives d'étude autour de la station sol seront présentés.

A. Présentation générale du projet

1. Le CNES

Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) chargé d'élaborer et de proposer au gouvernement français le programme spatial français et de le mettre en œuvre. Le CNES dispose d'un budget de 1,911 milliard d'euros en 2010, ce qui reste le plus important en Europe malgré une relative stagnation au cours des dernières années. Il inclut la part reversée à l'Agence spatiale européenne (685 millions d'euros, 36 % du budget), qui est consacrée essentiellement aux missions scientifiques (astronomie, exploration du système solaire, étude de la Terre) et aux investissements dans les lanceurs.

Le CNES a été créé à l'initiative du président Charles de Gaulle le 19 décembre 1961 afin de fournir une structure chargée de coordonner et animer les activités spatiales françaises centrées à l'époque sur le développement du lanceur-fusée *Diamant*. Le CNES est toujours en 2016, l'agence spatiale nationale la plus importante des pays de l'Union européenne.[1]

2. Le projet Janus

Le projet Janus (Jeunes en Apprentissage pour la réalisation de nanosatellites au sein des Universités et des écoles de l'enseignement Supérieur) a pour objectif de promouvoir le spatial auprès des étudiants des écoles et universités françaises. Pour cela, le CNES leur propose de développer et d'envoyer dans l'espace leur propre satellite équipé d'instruments scientifiques sous le format "Cubesat". Janus sensibilise ainsi les étudiants à la logique de développement de projets spatiaux et à leur mise en œuvre : conduite de projet, plan de développement, lancement, réception de télémesures et émission de commandes, exploitation des données, ... Il assure aussi la promotion d'enseignements scientifiques avec une dimension expérimentale forte dans les différents domaines du spatial : mécanique, thermique, avionique, contrôle d'attitude, systèmes d'énergie... En retour, les projets testent en orbite de nouvelles technologies satellites ou instrumentales intéressantes pour la communauté scientifique et industrielle.[2]

3. Le Projet METEOR

Le projet METEOR est un des projets spatiaux Janus. Il s'agit d'un projet pédagogique développé en collaboration avec des étudiants de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), l'Institut de Mécanique Céleste et Calcul des Ephémérides (IMCCE), le Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), le Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observation Spatiales (LATMOS), et le Centre Nationales d'Études Spatiales (CNES).

Ce projet a pour objectifs de mesurer le flux et le spectre dans la gamme ultra-violette (UV) des émissions de météores. Un météore désigne la traînée lumineuse produite par l'entrée dans l'atmosphère d'un météoroïde et un météoroïde est un objet se déplaçant dans le milieu interplanétaire qui a une taille entre 100 μm et 10 m. L'étude du spectre UV des météores est particulièrement intéressante pour une mission spatiale car celle-ci est irréalisable depuis le sol à cause de l'absorption atmosphérique qui bloque tout rayonnement ayant une longueur d'onde inférieure à 310 nm. Cette étude va permettre de détecter les composés chimiques des météoroïdes, principalement le fer (Fe), le carbone (C) et l'hydroxyde (OH).

La mission commence dès que l'ensemble du système a été validé avec l'utilisation des procédures de qualification appliquées au modèle de vol. Après cela, la phase de lancement de la mission aura lieu (Phase 1).[3]

Ici, le nano-satellite (CurieSat) devra être dimensionné afin de s'adapter correctement à la baie de charge utile du lanceur. Le satellite n'aura pas un sous-système de propulsion et donc la phase d'éjection doit garantir qu'il arrive sur l'orbite prévue.

Ainsi, une fois que le lanceur atteint l'altitude de l'orbite souhaitée, le satellite est éjecté et ainsi placé sur son orbite opérationnelle. Au cours de ce transfert, l'attitude doit être surveillée et contrôlée pour minimiser le tumbling (la rotation du satellite sur lui-même due au moment cinétique parasite acquis lors de l'éjection). Ceci est effectué par les systèmes C&DH¹ et SCAO². Une fois le satellite arrivé sur son orbite, commence la phase de déploiement des éléments matériels. Ce sont les panneaux solaires qui sont déployés les premiers, pour pouvoir alimenter les composants électriques embarqués (sous-système puissance).

Cela déclenche ensuite le déploiement des antennes pour permettre la communication avec la station sol (TT&C)³. [3]

B. Présentation du laboratoire d'accueil : L2E

Le laboratoire L2E (Laboratoire d'Électronique et Électromagnétismes) est une unité de recherche de l'Université Pierre et Marie Curie. Le domaine de recherche du L2E concerne principalement l'électromagnétisme. Les activités de recherche de L2E visent à proposer un éventail de méthodes d'analyse et des modèles pour expliquer des phénomènes physiques de propagation d'ondes électromagnétiques dans des environnements complexes, multi échelles et multi physique, ainsi que des solutions électroniques innovantes ou de rupture, pour répondre à des besoins spécifiques exprimés dans les domaines de la télécommunication, de la santé, de la défense, du spatial et de l'industrie automobile.

¹ Command and data handling

² Système de contrôle d'attitude et d'orbite

³ Telemetry, tracking and command

Domaines d'activités

Le L2E a défini trois niveaux de dimensions, constituant chacun un thème scientifique, sur lesquels les efforts de recherche sont concentrés. Un quatrième thème transverse, dédié au biomédical, crée la pluridisciplinarité et structure la recherche translationnelle du L2E.

- 1) La dimension micro et nanométrique, traitée dans le thème MINA⁴, concerne l'amélioration des performances spécifiques ou ultimes des matériaux et circuits électroniques et mécatroniques en vue de concevoir des dispositifs faible consommation et autonomes.
- 2) La dimension millimétrique et sub métrique, traitée dans le thème P-SYS⁵, aborde l'étude de systèmes communicants dans les environnements de la personne et du corps humain en vue d'améliorer le coût énergétique des communications dans le réseau BAN.
- 3) La dimension centimétrique et métrique, traitée dans le thème MEDRA⁶, concerne le développement et l'exploitation des modèles électromagnétiques (EM) pour l'observation et la surveillance terrestre et la mise en place d'une expérimentation homothétique ou virtuelle.
- 4) Le thème transverse biomédical ABILE⁷, alimenté par les trois thèmes verticaux, se propose de mettre en œuvre de nouveaux concepts et solutions ad hoc pour l'aide à l'analyse, l'aide au praticien et l'aide au patient.[4]

C. Cubesat

Selon la définition officielle, un CubeSat est un satellite de moins de 1,33 kg et de taille 10×10×10 cm ou « 1U », qui utilise généralement des composants commerciaux « sur étagère » (COTS, Commercial On The Shell) pour son électronique de vol notamment. Les premiers CubeSat ont été développés par la California Polytechnic State University (Cal Poly) et l'Université de Stanford en 1999.

Elles ont rédigé les spécifications auxquelles les fabricants de CubeSat doivent se référer. On trouve communément des CubeSat assemblés par 2 unités (2U) ou par 3 unités (3U). sur un seul axe. Mais il existe des CubeSat 1,5U et même 6U ou 12U qui pèsent jusqu'à 15 kg. La figure 1 montre la structure des CubeSat de taille 1U, 1.5U, 2U et 3U. CurieSat est un CubeSat de type 3U.

⁴ Micro et nanoélectronique

⁵ Personnes et systèmes communicants

⁶ Modélisation EM pour la Détection radar

⁷ Applications Biomédicales de l'ingénierie électronique

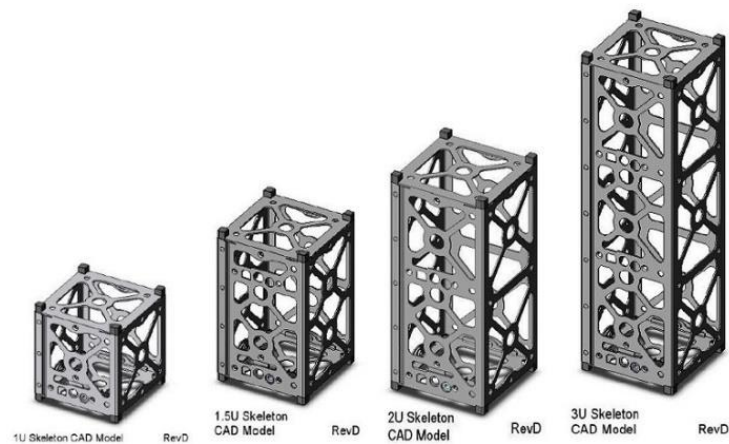


Figure 1, Les Cubesats ont des tailles normalisées. Source : University of Colorado Boulder

En normalisant la géométrie, les composants et les interfaces, le modèle CubeSat a diminué le coût de la construction d'un petit satellite. De plus, ces satellites peuvent être développés en quelques mois ou quelques années contrairement aux satellites habituels dont le développement s'échelonne sur plusieurs années.[5]

D. La communication satellitaire

1. Télémétrie, Tracking (suivi), contrôle (TT&C)

Le sous-système télémétrie, télécommande et contrôle donne la possibilité de communiquer avec le satellite. C'est le seul moyen d'observer et contrôler le fonctionnement et la situation du satellite. La télémétrie est la transmission des informations de la situation du satellite vers le sol. Le tracking est le suivi du satellite en utilisant les informations reçues durant les phases de télémétrie. Le contrôle consiste à envoyer les commandes de la station sol vers le satellite. Les modules télémétrie et commande peuvent être considérés comme des modules complémentaires. La télémétrie sera réalisée en voie descendante et le contrôle sera fait en voie montante. Dans le cas de la mission METEOR, ce sous-système est constitué de la station sol et du système de radiocommunication embarqué sur le satellite. Dans ce rapport, nous nous occupons du dimensionnement et de la réalisation de la station sol.

2. Radioamateur

Les radioamateurs sont des personnes qui pratiquent, sans intérêt pécuniaire, un loisir technique permettant d'expérimenter les techniques de transmission et par conséquence d'établir des liaisons radio avec d'autres radioamateurs ou satellites du monde entier. Beaucoup d'avancées technologiques sont dues aux radioamateurs. C'est par exemple grâce à eux que la bande de fréquences au-dessus de 30 MHz est aujourd'hui largement utilisée. L'activité radioamateur permet d'acquérir ainsi des connaissances techniques dans les domaines de la radio et de l'électronique et de développer des liens d'amitié entre amateurs de différents pays.

Le service radioamateur (service amateur et service satellite –amateur), est établi par l'Union International des Télécommunications (UIT), par l'intermédiaire du Règlement des Télécommunications Internationales. Les gouvernements des différentes nations règlent les caractéristiques techniques et opérationnelles de la transmission et délivrent des licences pour

les stations individuelles avec un signe d'appel pour les identifier. Les opérateurs amateurs sont évalués sur leur connaissance des notions clés de l'électronique et sur les spécificités des règlements radio du pays d'accueil. Les radioamateurs utilisent une variété de types de communication comme la voix, les textes, les images et les données.

Les radioamateurs sont officiellement représentés et coordonnés par l'Union Internationale des Radioamateurs (UIRA) Celle-ci est organisée en trois régions géographiques et a comme membre, les sociétés nationales de radioamateurs qui existent dans la plupart des pays. Selon une estimation faite en 2011 par l'“American Radio Relay League”, deux millions de personnes dans le monde sont souvent impliquées dans le pratique radioamateur. Près de 830 000 stations radioamateur sont localisées dans la deuxième région de l'UIRA (Amérique), suivies par la troisième région de l'UIRA (Asie du Sud et de l'Est, Océan Pacifique) avec 750 000 stations. Un nombre beaucoup plus limité, près de 400 000 stations, est localisé dans la première région de l'UIRA (Europe, Moyen Orient, CIS, Afrique). [6]

Dès 1961, les radioamateurs ont construit des satellites pour leur usage propre. Pour établir une communication à l'aide de ces satellites, les techniques mises en œuvre sont assez sophistiquées aussi bien dans la prévision des passages des satellites que dans la poursuite des satellites par les antennes.

La réalisation de chaque satellite amateur est gérée par un club généralement issu des universités, écoles d'ingénieurs ou de l'industrie aérospatiale, et leur lancement effectué bénévolement par les agences spatiales. Leur usage en relais est ouvert à tous les amateurs disposant du matériel adéquat.

Depuis 1996, l'association française des radioAMateurs par SATellite (AMSAT-France) a pour mission de faciliter l'accès aux communications par satellite pour les radioamateurs.

3. Les bandes de fréquence de fonctionnement de CurieSat

Les bandes de fréquence radioamateur sont allouées par l'UIT au service radioamateur et au service radioamateur par satellite. Pour émettre les ondes dans ces bandes, l'administration de tutelle des services amateurs et amateurs par satellite, l'Autorité de Régulation des Télécommunications (ART), délivre un certificat d'opérateur radioamateur et lui attribue un indicatif[7]. Il existe trois principales raisons justifiant l'utilisation des bandes radioamateurs pour notre application:

- 1) ces bandes sont accessibles par tous les radioamateurs et les universités du monde
- 2) les matériels pour la communication dans les bandes radioamateurs existent sur le marché et sont disponibles sans avoir besoin d'une licence radioamateur.
- 3) Les émission et réception dans ces bandes de fréquence sont gratuites.

Le tableau 1 représente les fréquences radioamateurs dans les bandes VHF, UHF.

Bande	Longueur d'onde caractéristique	Début	Fin	Largeur
VHF	2m	144 MHz	146 MHz	2MHz
UHF	70cm	430MHz	440MHz	10Mhz

Tableau 1, Les bandes de fréquences radioamateurs. Source : <http://radio.pagesperso-orange.fr/>

4. Licence radioamateur

Avant de faire fonctionner une station radioamateur, il est obligatoire de posséder le « certificat d'opérateur des services d'amateur ». Celui-ci est obtenu après avoir passé avec succès les épreuves de l'examen d'opérateur radioamateur dans un centre régional de contrôle du spectre radioélectrique de l'ANFR (Agence Nationale des FRéquences).

Le certificat d'opérateur des services d'amateur est obtenu en deux étapes. D'une part, il faut valider l'épreuve « réglementation » (20 questions d'ordre réglementaire, durée de l'épreuve 15 mn) et d'autre part, avoir réussi l'épreuve « technique » (20 questions sur la technique de l'électricité et de la radioélectricité, durée de l'épreuve 30 minutes)[6]. Nous aurons besoin d'une licence radioamateur pour pouvoir émettre dans les bandes radioamateurs. En revanche, pour recevoir dans ces bandes, nous n'avons pas besoin d'une licence.

II. Étude des besoins

A. Grandeurs caractéristiques

Dans cette partie, nous présentons les paramètres physiques importants, leur définition et leur valeur pour notre application. Nous allons utiliser ces paramètres pour analyser le bilan de liaison, choisir la modulation et les matériels de la station sol.

1. La puissance maximale d'émission de la station sol

En application du décret 2002-775 du 3 mai 2002, toute personne, exploitant un réseau de radiocommunications tel que les installations radioélectriques mentionnées à l'article L.33-3 du code des postes et des communications électroniques dont relèvent les installations radioamateurs, doit veiller à respecter certaines valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques fixées par cette réglementation. En conséquence, la puissance maximale autorisée pour émettre des ondes en bande UHF, VHF et SHF est 120 W (soit 50,79dBm ou 20,79dBW).

5. Débit binaire

Les débits préconisés dans le projet CurieSat sont de 1200 bauds en voie montante et 9600 bauds en voie descendante.

6. Fréquences

Nous définissons le lien montant comme la communication établie dans le sens de la station sol vers le satellite et le lien descendant comme la communication établie dans le sens du satellite vers la station sol. Nous avons décidé de travailler sur les plages de fréquence radioamateurs dans les bandes UHF (435-438 MHz) et VHF (144-146 MHz). La bande UHF attribuée par l'administration est plus large (3 MHz) que la bande VHF (2 MHz). En plus, la largeur de la bande de modulation autorisée est plus faible en VHF (2.7 kHz) qu'en UHF (20 kHz) ce qui limite le débit sur une voie descendante en VHF. En outre la plupart des radioamateurs dans le monde utilisent la bande UHF en voie descendante ce qui permet au satellite d'être reconnu par tous les radioamateurs et les stations de sol. Ceci nous donne la possibilité d'observer l'état du satellite même s'il n'est pas dans notre champ de vue. Ce sont les raisons pour lesquelles on a choisi d'utiliser la bande VHF pour la voie montante et la bande UHF pour la voie descendante.[8]

B. Bilan de liaison

Le calcul du bilan de liaison est une étape primordiale pour réaliser une chaîne de communication. Ce calcul nous permettra de déterminer si le niveau de puissance reçue par le satellite et la station sol sera suffisant pour que la liaison fonctionne correctement.

Avant de commencer la définition de bilan de liaison nous allons éclairer quelques points.

1. Les paramètres d'orbite

Le nano-satellite CurieSat va être mis sur une orbite LEO. L'orbite LEO est située entre 400 et 2000 km de la Terre. Selon les études orbitographiques réalisées pour CurieSat pendant les dernières années, ce satellite va se situer à 500 km de la surface[9]

Afin de définir un bilan de liaison précis, nous allons prendre en compte deux situations. Le pire cas est défini pour une direction station sol/nano-satellite formant un angle de 5° d'élévation au-dessus du sol (Figure 2). Dans ce cas la distance entre la station sol et le satellite est égale à $h = 2078$ km.

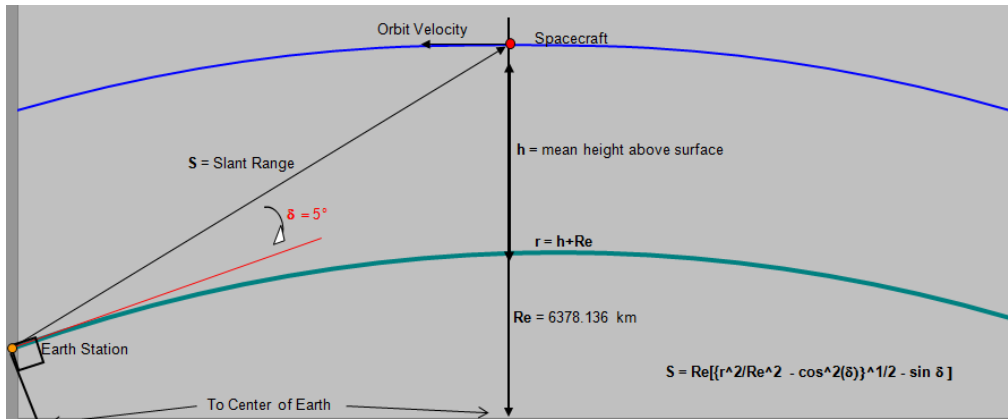


Figure 2, Emplacement du satellite par rapport au satellite pour un angle d'élévation de 5°

Dans le meilleur cas le nano-satellite est au zénith de la station sol. L'angle d'élévation est alors égal à 90° (Figure 3). Cela signifie que la distance entre la station sol et le satellite est $h = 500$ km.

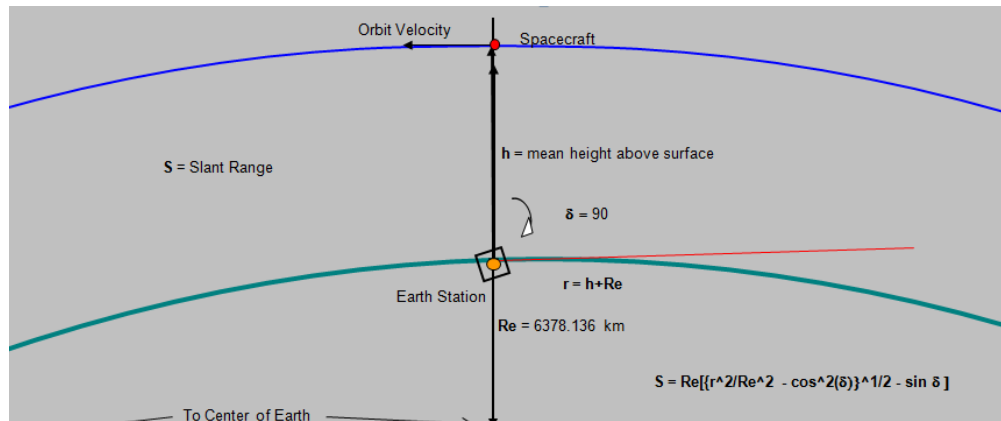


Figure 3, Emplacement du satellite par rapport au satellite pour un angle d'élévation de 90°

7. Pertes liées aux couches atmosphériques

Les pertes dues aux gaz atmosphériques sont quasiment indépendantes de la température de l'atmosphère et de l'humidité pour les fréquences inférieures à 2 GHz. L'absorption atmosphérique dépend fortement du nombre total de molécules distribuées sur le chemin de propagation entre la station sol et le satellite. Ce qui signifie que ces pertes dépendent de l'angle d'élévation. Nous avons utilisé le programme 'AMSAT / IARU Annotated Link Model System' qui calcule les pertes ionosphériques et les pertes atmosphériques selon les intervalles des fréquences. Ce logiciel est un tableur Excel développé par le radioamateur Jan A. King avec le numéro d'immatriculation radioamateur W3GEY. Ce tableur est gratuit et il est téléchargeable par les sites AMSAT et IARU. [10]

8. Affaiblissement de propagation

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage, elle se disperse dans le milieu de propagation et subit donc un affaiblissement, même dans un milieu sans pertes. Cet affaiblissement est dû à la dispersion de la puissance et peut être calculé par la formule suivante :

$$L = \left(\frac{\lambda}{2\pi d} \right)^2$$

Où λ est la longueur d'onde et d est la distance entre le satellite et les antennes de la station sol.

9. Pertes de polarisation

Comme la position du satellite sur son orbite n'est pas fixe (il peut avoir un mouvement de rotation désordonné et non prédictible), il est préférable de réaliser une communication en polarisation circulaire. Une communication en polarisation verticale ou horizontale n'est pas conseillée car les pertes entre une antenne d'émission, polarisée verticalement et une antenne de réception, polarisée horizontalement sont théoriquement infinies (<-30db en pratique). Dans le cas d'une polarisation circulaire, les pertes sont estimées à -3dB. Nous utiliserons des antennes Yagi croisées pour avoir une polarisation circulaire.

10. Voie montante

En connaissant la distance entre le satellite et la station sol, les pertes de propagation et d'atmosphère, les pertes d'insertion des composants et les caractéristiques des composants (gain, sensibilité, puissance d'émission, etc.), nous pouvons maintenant calculer le bilan de liaison en voie montante et descendante. Les bilans de liaison sont calculés pour chaque voie dans le meilleur et le pire cas. La sensibilité du récepteur de la station sol est environ -130 dBm et la sensibilité du récepteur du satellite est -100 dBm.

a. Bilan de liaison en voie montante dans le meilleur cas

Les figures 4 et 5, représentent le bilan de liaison de la voie montante, respectivement pour le meilleur et le pire cas.

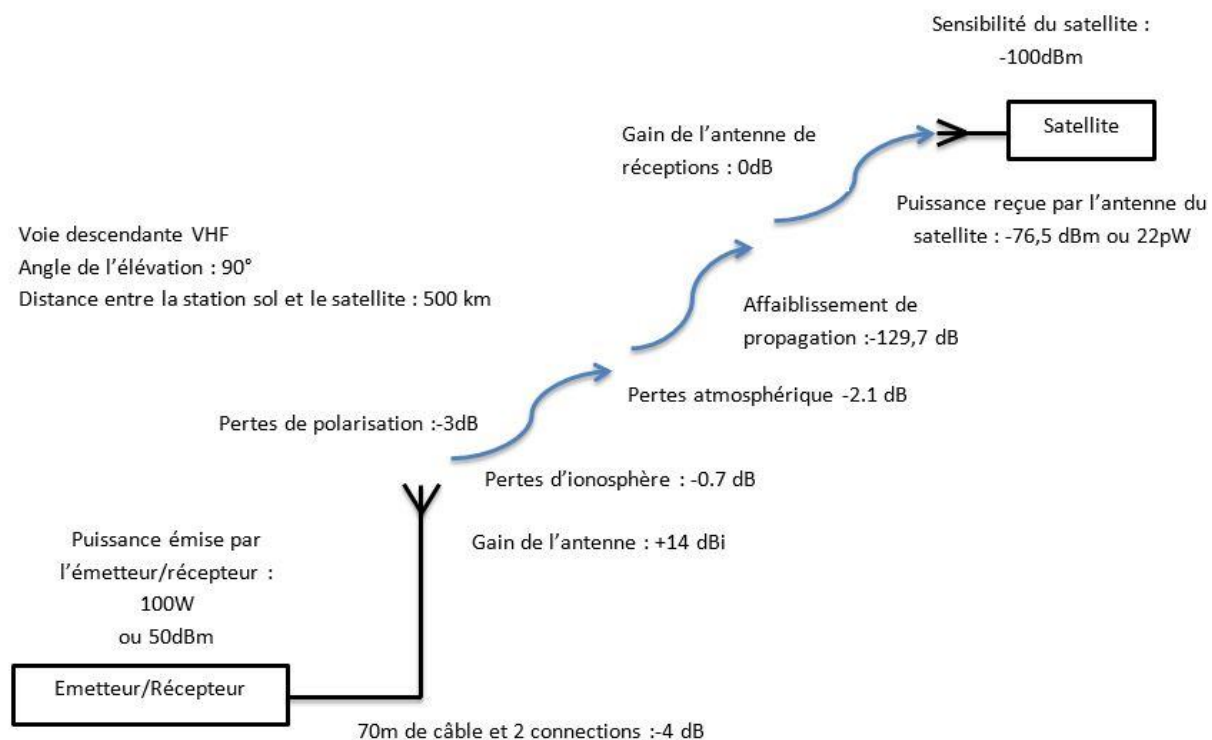


Figure 4, bilan de liaison de la voie montante pour un angle d'élévation de 90°

b. Bilan de liaison en voie montante dans le pire cas

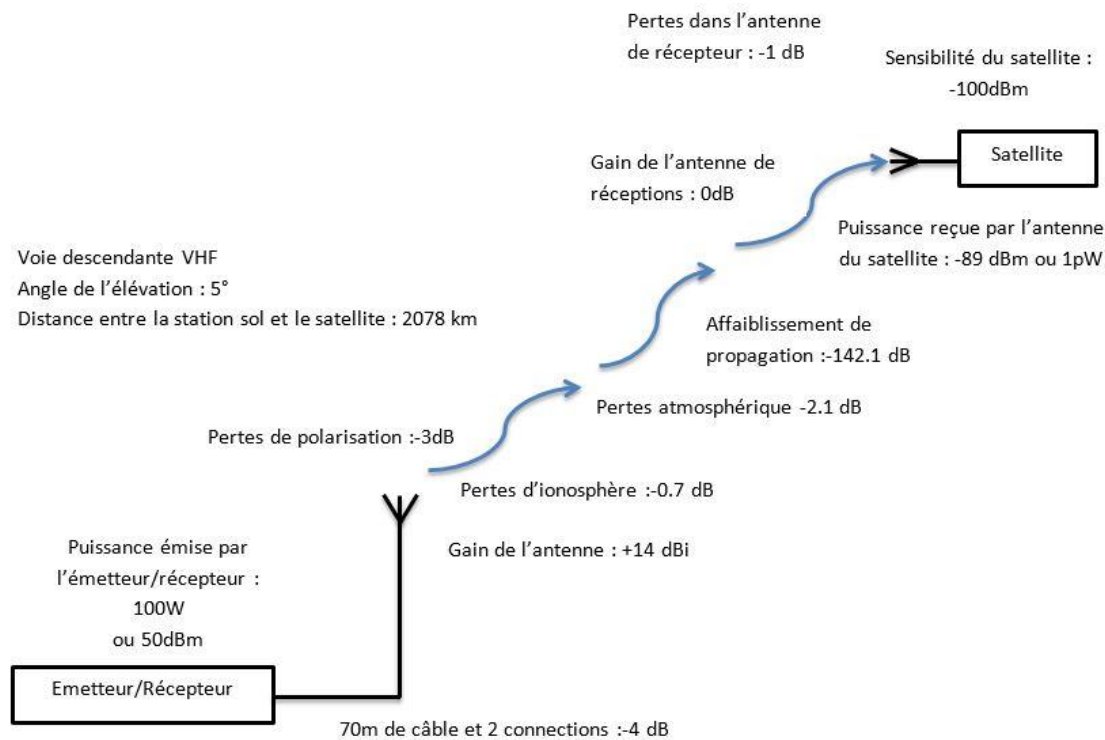


Figure 5, bilan de liaison de la voie montante pour un angle d'élévation de 5°

11. Voie descendante

a. Voie descendante : le meilleur cas

Ci-après les figures 6 et 7, représentent le bilan de liaison de la voie montante, respectivement pour le meilleur et le pire cas.

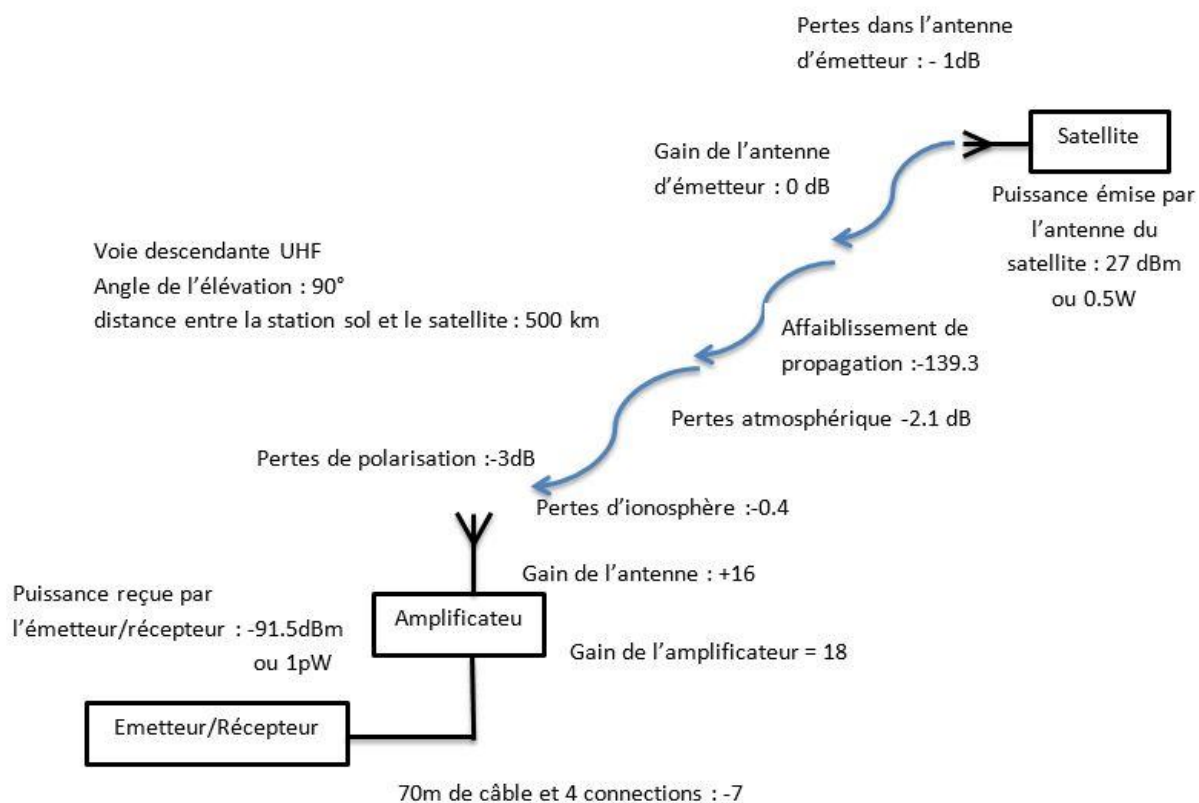


Figure 6, bilan de liaison de la voie descendante pour un angle d'élévation de 90°

b. Voie descendante : le pire cas

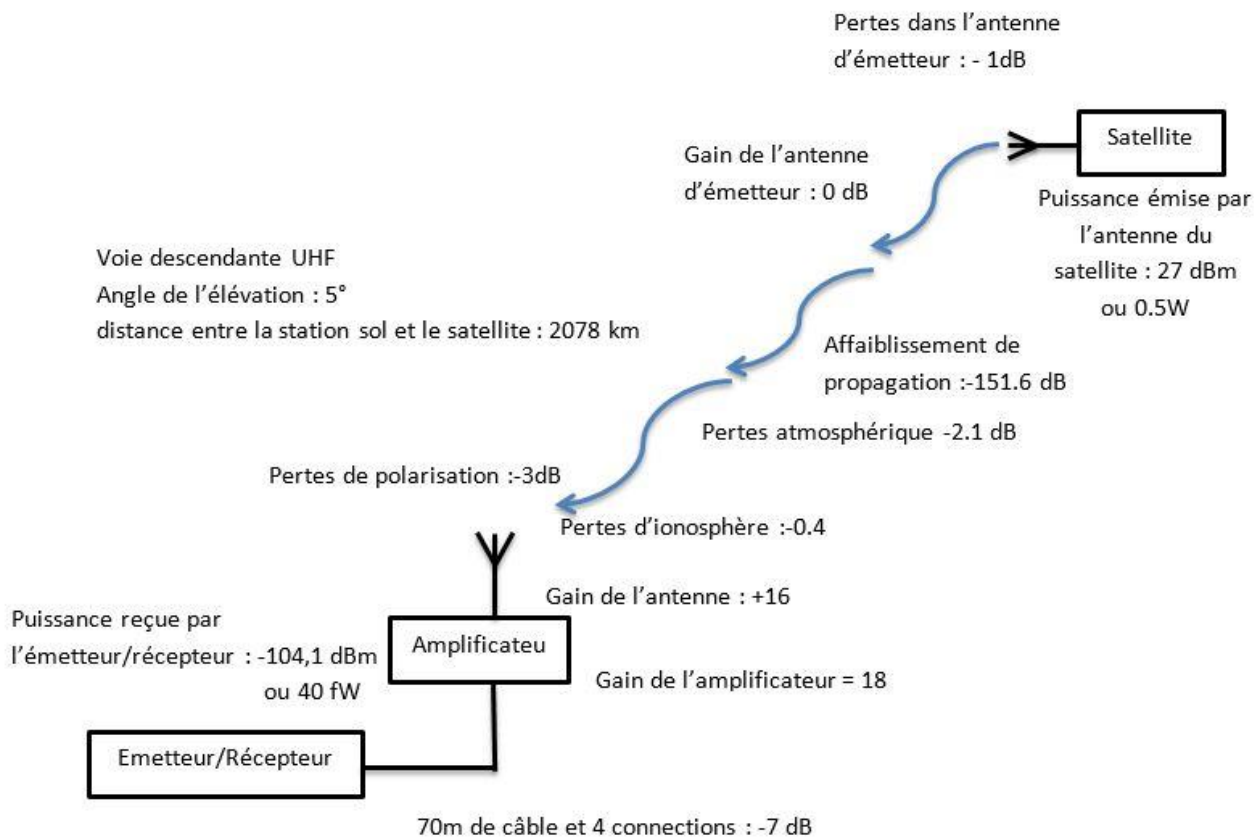


Figure 7, bilan de liaison de la voie descendante pour un angle d'élévation de 5°

C. Modulations

La technique de modulation doit être choisie en fonction de critères tels que l'encombrement spectral et la résistance au bruit et aux brouilleurs. De plus, ce choix devra tenir compte de la simplicité et du coût du modulateur et du démodulateur. Parmi les types de modulation qui semblent être bien adaptés, citons les modulations par déplacement de phase à deux ou quatre états (BPSK, QPSK) et la modulation par déplacement de fréquence d'indice $\frac{1}{2}$ à phase continue (MSK, GMSK). Ces dernières présentent l'avantage d'un spectre de puissance étroit à enveloppe constante.

La figure 8 présente le diagramme de BER (taux d'erreur binaire), en fonction du rapport de signal sur bruit, pour les modulations 2FSK, GMSK et BPSK.

Nous constatons que la modulation BPSK est la plus résistante au bruit du canal. Le diagramme de BER de la modulation GMSK est très proche de celui de BPSK, alors que la modulation 2FSK est beaucoup moins résistante au bruit. Les modulations 4QAM, 16QAM, 32QAM sont encore moins résistants au bruit de canal par rapport à 2FSK.

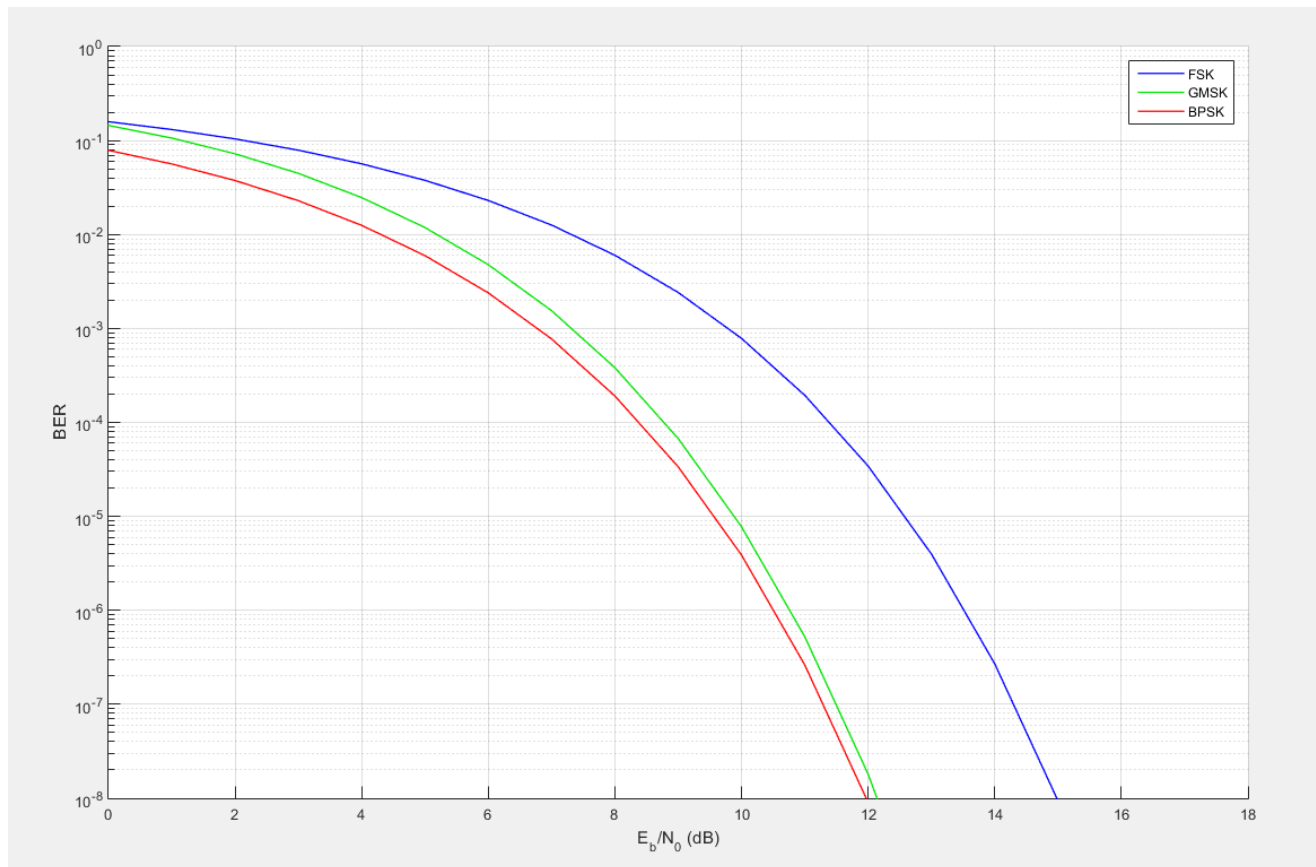


Figure 8, taux d'erreur binaire pour les modulations 2FSK, GMSK, BPSK

Sur la figure 9, on représente l'encombrement spectral des modulations BPSK et GMSK. En BPSK, nous voyons les lobes secondaires du signal modulé étalés sur tout le spectre. Cela montre que cette modulation peut bruer les canaux voisins de celui de la transmission. Par ailleurs, cela impose une largeur de bande plus importante pour transmettre l'intégralité du signal. En revanche, le spectre GMSK montre que les lobes secondaires s'atténuent beaucoup plus rapidement (effet du filtre gaussien) que celui de BPSK. Par conséquent, nous pouvons garantir que les canaux voisins seront moins perturbés.

En voie descendante, nous allons utiliser la modulation GMSK, ce qui introduit une bonne résistance au bruit. Cette modulation présente plusieurs avantages :

- Elle est relativement simple à réaliser.
- Elle présente un encombrement spectral réduit.
- Les lobes secondaires ont une énergie inférieure à -20dB.

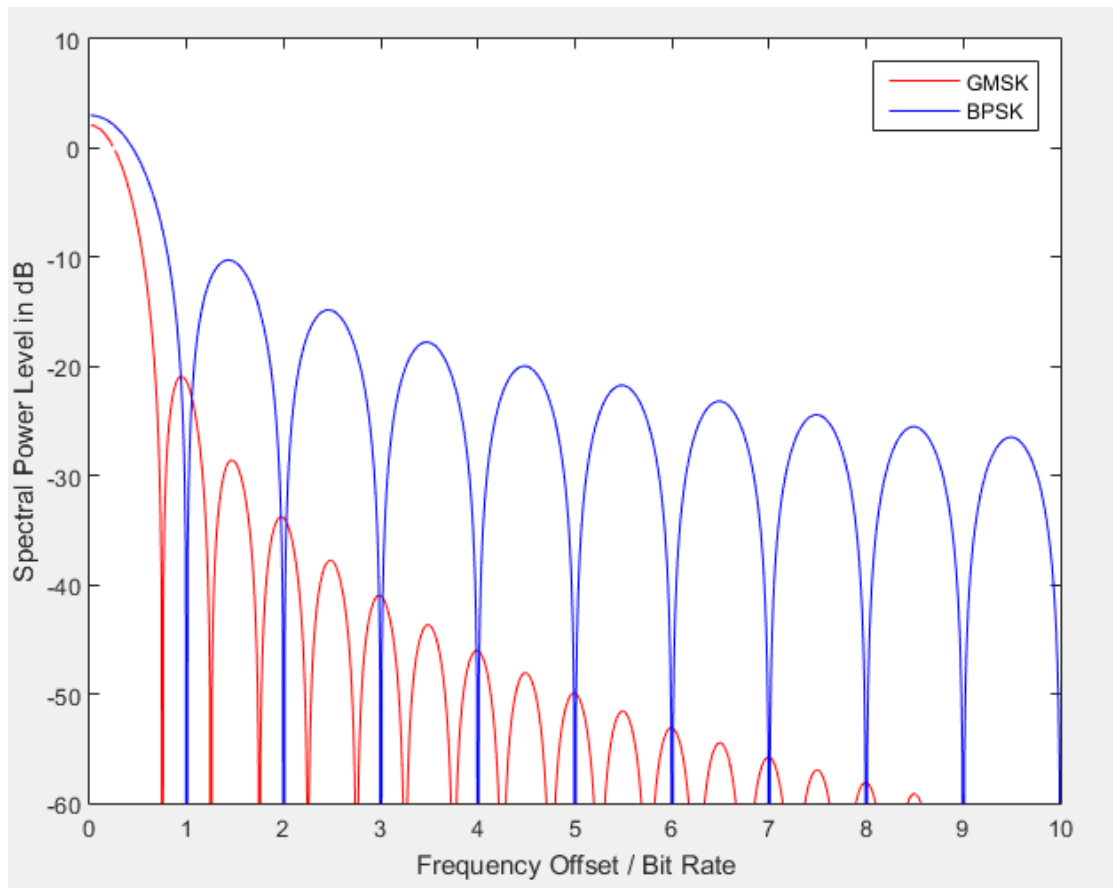


Figure 9, L'encombrement spectral pour les modulation GMSK et BPSK

En contactant ISIS cubesatshop⁸, nous avons appris qu'en voie montante, nous ne pouvons avoir que la modulation 2FSK, ou plus précisément la modulation AFSK (audio frequency shift keying). La raison de ce choix est la simplicité et l'accessibilité de cette modulation. Tous les appareils radioamateurs peuvent communiquer avec cette modulation. En outre, en voie montante, la communication est porteuse de plus d'énergie qu'en voie descendante, aussi l'utilisation d'une modulation GMSK, bien que très résistante au bruit (et utilisée en voie descendante) n'est pas nécessaire.

D. Le sous-système de télécommunication du satellite

12. L'émetteur-récepteur du satellite

La carte émetteur-récepteur de CurieSat est produite par la compagnie ISIS. C'est une carte UHF modulation GMSK en voie descendante et VHF modulation AFSK en voie montante. Le choix de l'émetteur récepteur de la station sol est fait par rapport aux caractéristiques de la carte émetteur-récepteur du nano satellite. Cette carte présente une puissance d'émission de 0,5 W et sa sensibilité en réception est égale à -100 dBm.

⁸ C'est un guichet unique qui fournit une large gamme de produits pour les Cubesat et nano-satellite. Le site « www.cubesatshop.com » propose des composants et des sous-systèmes normalisés construits par une variété de fabricants.

13. Antennes embarquées sur le satellite

Les antennes embarquées sur le satellite ont pour rôle d'émettre les ondes électromagnétiques en bande UHF et recevoir les ondes en bande VHF. Afin de communiquer avec la station sol, il faut adopter un type d'antennes qui convient le mieux à notre application. L'idée est d'utiliser un bloc d'antennes, de taille de $10 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$, qui sera monté sur la face supérieure ou inférieure et qui se déploiera une fois que le satellite sera situé sur son orbite. Nous allons utiliser une antenne dipôle VHF et une antenne dipôle UHF. La raison pour laquelle nous utilisons des antennes dipôles c'est le poids faible de ce type d'antenne et la simplicité de la procédure de déploiement.

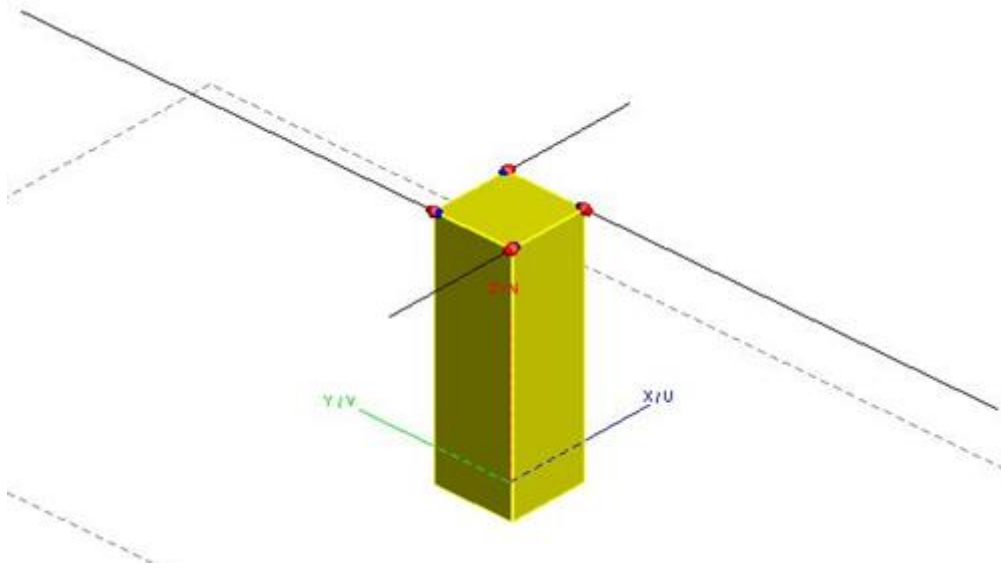


Figure 10, modélisation des antennes dipôles UHF et VHF sur la face supérieure du satellite.

a. Antenne dipôle VHF

Dans un premier temps, nous avons décidé de modéliser une antenne dipôle pour la communication VHF. L'antenne dipôle est constituée de deux antennes monopoles, de taille $\frac{\lambda}{4}$ chacune. La longueur d'onde en VHF (144 MHz) est de 2 mètres, ce qui signifie que la longueur de chaque monopôle est égale à 0.5 m.

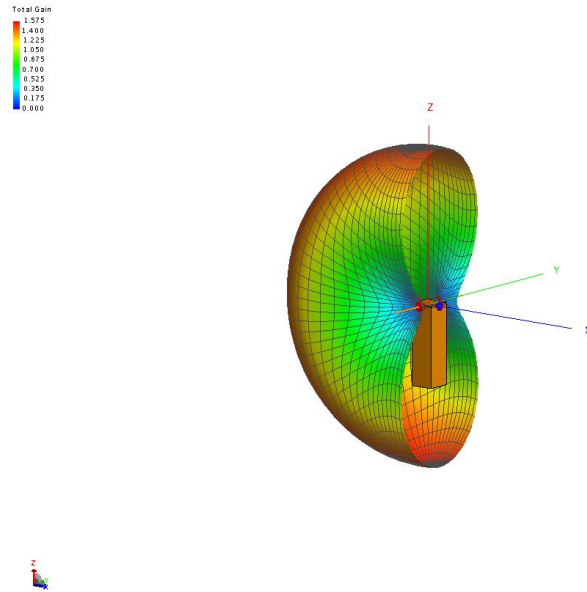


Figure 11, diagramme de rayonnement 3D de dipôle VHF,

b. Antenne dipôle UHF

L'antenne dipôle UHF est constituée de deux antennes monopoles, de taille 17 cm chacune.

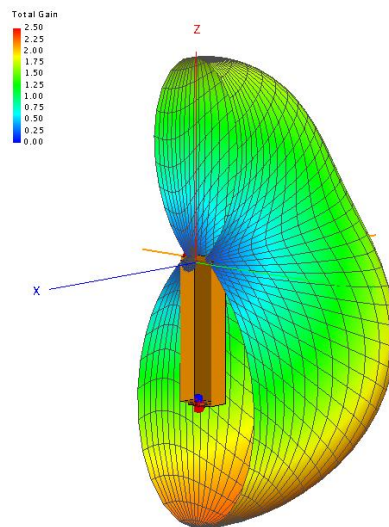


Figure 12, diagramme rayonnement 3D de dipôle UHF

III. Travail effectué

A. Dimensionnement de la station sol

1. Architecture de la station sol

En général, une station sol est constituée de deux grandes sous parties (figure 14). La sous-partie contrôle et la sous-partie traitement de données. La première sous-partie a le rôle de

contrôler les antennes de la station, de les diriger vers le satellite et de suivre le satellite pendant un passage. La deuxième sous-partie a le rôle de traiter et envoyer les informations sous forme d'ondes électromagnétiques vers le satellite et recevoir les informations captées par les antennes de la station. Ces deux sous-parties doivent travailler ensemble afin de pouvoir communiquer correctement avec les nano et pico satellites pendant un passage. L'ordinateur central de la station a le rôle de contrôler et synchroniser les sous-parties de la station sol, le traitement numérique, l'enregistrement des informations et leur mise sur le réseau. Plusieurs architectures pour la station de sol sont proposées. Après avoir étudié plusieurs structures de station sol l'architecture choisie pour la station sol CurieSat est présentée figure 15.

Cette structure nous permettra d'émettre en bande VHF et de recevoir en bande UHF. Les composants situés à l'intérieur du cadre en pointillés seront placés sur le toit du bâtiment. Voici les caractéristiques de chaque composant en détails.

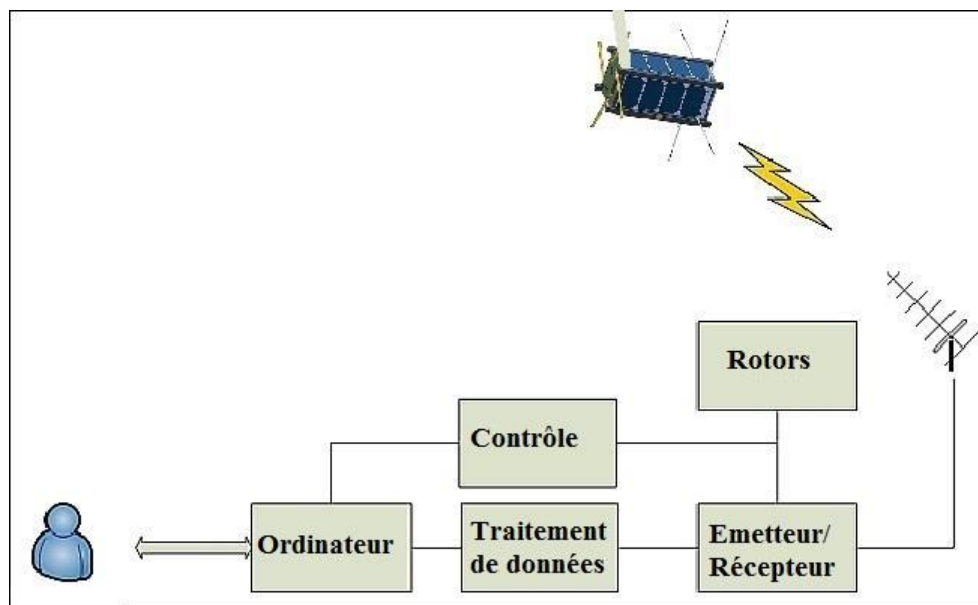


Figure 13, L'architecture de la station sol de CurieSat

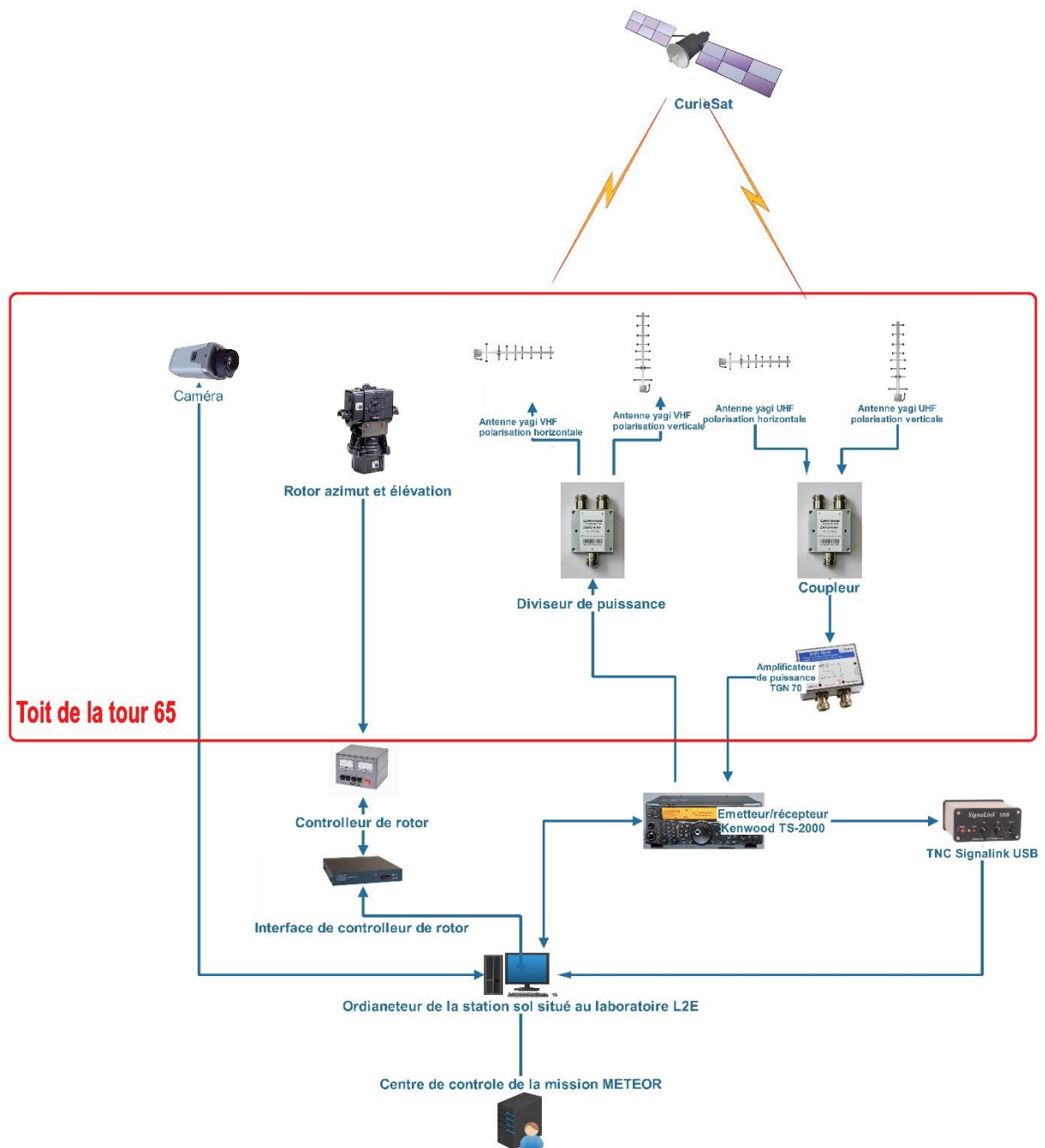


Figure 14, L'architecture de la station sol CurieSat

2. Sélection des composants

Après avoir défini l'architecture globale de la station sol, maintenant il faut choisir les matériels qui répondent au mieux à nos besoins. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte. Premièrement les matériels choisis doivent être en accord avec les éléments du bilan de liaison réalisé précédemment. Ensuite, les matériels pour chaque sous-partie doivent être capables de se synchroniser entre eux. Par exemple pour la sous-partie du contrôle, le rotor, le contrôleur de rotor, l'interface de contrôleur de rotor et l'ordinateur doivent être totalement compatibles. Un autre aspect à prendre en compte est le coût total des composants. Nous ne sommes pas très limités à ce niveau mais il faut considérer les dépenses comme le coût du câblage entre la station et les antennes, le coût de livraison des matériels et le coût des pièces à construire sur mesure. Enfin comme la durée de stage est limitée il faut prendre en compte la disponibilité des composants. Les composants à acheter ne sont pas utilisés par le grand public et par conséquent il faut anticiper la non-disponibilité ou l'épuisement de ces derniers. Avant d'acheter les matériels il faut s'informer sur la disponibilité et les délais de livraison de chaque composant. Il faut prendre en considération le délai de la procédure administrative d'achat par l'Université (comme la création de la fiche de l'entreprise dans la liste du service des achats et l'envoi des bons de commande). Ces délais peuvent très facilement dépasser quelques mois et c'est pourquoi il faut choisir les constructeurs ou distributeurs les plus rapides et fiables.

a. *Système de télémétrie et commande*

Voici une description de chaque composant du sous-système de télémétrie et commande.

i. Antenne Yagi UHF

Nous allons utiliser une antenne Yagi croisée de 2×19 éléments pour la communication en bande UHF (figure 16). La taille de cette antenne est de 3,25 m avec un gain de 16 dBi. La puissance HF maximale admissible par cette antenne est de 1000 W [11]. Cette antenne est construite par la compagnie AFT.



Figure 15 Antenne Yagi croisée en UHF

ii. Antenne Yagi VHF

Pour la communication en bande VHF, nous allons utiliser une antenne Yagi croisée de 2×11 éléments (figure 17), de taille 4,62 m et de gain 14 dBi. La puissance HF maximale

admissible par cette antenne est de 1000 W. Cette antenne est aussi construite par la compagnie AFT.



Figure 16, Antenne yagi croisée VHF

iii. Coupleur et diviseur de puissance

Afin de coupler deux antennes yagi horizontale et vertical pour avoir une polarisation circulaire nous allons utiliser des coupleurs.

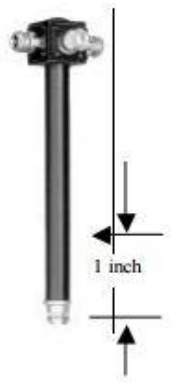


Figure 17, le rôle du coupleur est de combiner deux antennes yagi verticale et horizontale pour avoir une antenne yagi croisée avec polarisation circulaire

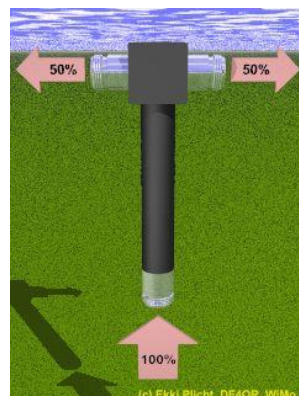


Figure 18, Diviseur de puissance

iv. Amplificateur

Nous allons utiliser un amplificateur afin d'amplifier les signaux en provenance du nano-satellite et arrivant sur les antennes de la station sol avant de se propager dans les câbles coaxiaux. C'est un amplificateur de faible bruit avec un gain de 20 dB et un facteur de bruit de 0,7 dB. Il sera alimenté par l'émetteur-récepteur de la station sol. Il a été construit par la compagnie TGN, sous le nom de « MVV70 » (figure 20).



Figure 19, Amplificateur de mât en UHF

v. Émetteur/récepteur

C'est le cœur de la station sol. Nous utilisons le Kenwood TS-2000 (figure 21) qui est un émetteur-récepteur HF/UHF/VHF all mode, capable de fournir jusqu'à 100 W en sortie dans les bandes UHF et VHF. La sensibilité de cet émetteur-récepteur est de -135 dBm. Il contient un préamplificateur pour chaque bande et un TNC (à ce stade, on ne sait pas encore ce qu'est un TNC) interne.



Figure 20, Emetteur/récepteur TS-2000

vi. TNC

Dans le but de traiter les données modulées en GMSK et mises en paquet selon le protocole AX.25, nous utilisons le Terminal Node Controller (TNC) Signalink USB (figure 22). Cet outil contient une carte son et sera connecté à l'ordinateur par un câble USB. Il est compatible avec

TS-2000. Le rôle de TNC est de convertir les ondes en bande de base en signaux électriques traitables par l'ordinateur. Il existe plusieurs logiciels gratuits pour réaliser les différents types de modulation et de démodulation.



Figure 21, TNC Signalink USB

vii. Câbles

Dans le but de connecter les différents matériels entre eux, nous utilisons plusieurs types de câbles.

Câble coaxial : Il permet de connecter l'émetteur-récepteur aux antennes. Celui que nous allons utiliser a été construit par la compagnie Andrew sous le nom de « CNT-400 ». Les pertes dans ce câble sont très faibles. 70 mètres de câble vont être utilisés pour chaque voie. (Annexe 1)

Câble Ethernet : Il permet de connecter le TNC à l'émetteur-récepteur. Il a été fourni par TNC Signalink.

Câble USB : Il permet de connecter l'ordinateur au TNC et à l'émetteur-récepteur en cas d'un contrôle à distance. L'interface de contrôle du rotor sera aussi connectée par un câble USB.

Câble Splinker 20AWG : Il permet de connecter les rotors placés sur le toit au contrôleur du rotor dans la chambre de contrôle. Il n'est pas fourni par le constructeur du rotor, car la taille du câble varie pour différentes situations.

b. Système de poursuite

viii. Rotors

Pour diriger les antennes vers le satellite, nous utilisons des rotors de positionnement. Nous citons le rotor GS-5500, qui est capable de tourner en azimuth et en élévation. Ce composant, très populaire parmi les radioamateurs, a été construit par la compagnie Yaesu (figure 23).



Figure 22, Rotor et contrôleur de rotor Yaesu

ix. Interface de contrôle de rotor

Le pilotage du contrôleur de rotor se fait via une interface physique représentée par la figure 24.



Figure 23, Interface de contrôleur de rotor

Ce composant nous permettra d'automatiser la procédure de poursuite du satellite. Il a été construit par la compagnie Yaesu, sous le nom de « GS-232A ».

3. Achat des matériels

Après avoir choisi les matériels, nous avons commencé à les commander. Dans un premier temps nous avons communiqué avec les constructeurs de ces composants et ils nous ont fourni la liste des distributeurs en Europe. Il est plus facile d'acheter les composants chez des distributeurs ou constructeurs français, car cela assure une durée d'administration et un délai de livraison plus court. Seuls les mâts des antennes et les coupleurs de la station sol n'ont pu être achetés chez des fournisseurs français. Durant la phase d'attente de livraison des composants, nous avons lancé une étude afin d'identifier le meilleur emplacement pour les antennes de la station sol.

4. Emplacement de la station sol

La station sol de CurieSat sera située au sein de l'Université Pierre et Marie Curie. Il existe plusieurs aspects à prendre en considération pour le choix de l'emplacement exact de la station sol. Premièrement il faut avoir en tête que la station sol doit être proche des antennes

UHV/VHF. Il s'agit, en effet, de minimiser la longueur des câbles coaxiaux permettant de connecter les antennes à l'émetteur/récepteur afin de minimiser les pertes.. Deuxièmement la station sol doit être la plus loin possible de la tour Zamansky qui est située au milieu de l'Université. La tour a une hauteur d'environ 80 m et elle peut perturber la liaison si les antennes sont placées proche de celle-ci. Nous avons eu trois possibilités d'emplacement. Le premier choix a été sur le toit de la tour Zamansky. L'avantage de ce choix est que les antennes ne sont pas gênées par la tour. Cependant, il est quasiment impossible d'espérer avoir une chambre de contrôle proche des antennes dans la tour Zamansky, Par ailleurs, obtenir les autorisations d'implantation aurait nécessité un délai trop important(l'implantation d'une antenne sur le toit de la tour Zamansky, commandée par le LATMOS a nécessité une année). Le deuxième choix a été la terrasse du bâtiment B situé au nord de l'Université. Dans ce cas, les antennes sont très loin de la tour Zamansky ce qui diminue l'effet potentiel de masquage. Même s'il n'était pas trop compliqué de trouver une local de commande à proximité, après avoir discuté avec les personnes concernées, nous avons constaté que cet emplacement était déjà très largement occupé par d'autres antennes. Mettre les antennes UHF/VHF dans un environnement très bruyé comme celui-ci n'aurait pas été la meilleure solution. Le troisième choix a donc été de mettre les antennes sur la terrasse de la tour 65. Le laboratoire L2E est situé au premier et au deuxième étages du couloir 65-66 et ce laboratoire a accepté de réserver un emplacement pour la station sol. La distance entre la station sol qui est située au laboratoire L2E et les antennes placées sur la terrasse de la tour 65 sera de l'ordre de 70 m. Un autre avantage de ce choix est la présence des spécialistes dans le domaine de la radiocommunication au sein de ce laboratoire ce qui peut être très intéressant dans le cas de problèmes importants. J'ai pu avoir une discussion avec Mme Richard, chef du projet SwissCube à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pendant un workshop au mois de juin 2016 sur le campus spatial d'IGOSAT à l'Université Paris Diderot. A cette occasion, elle m'a relaté son expérience dun'incendie dans leur station sol. Elle m'a expliqué que comme nous utilisons des matériels qui contiennent des pièces mécaniques et électriques alimentées par de forte tension, et qui fonctionnent de manière continue, il est préférable de localiser la station sol et la chambre de contrôle dans un lieu où de façon fréquente, il peut y avoir un contrôle par des personnels formés.. C'est pour ces raisons que nous avons choisi le laboratoire L2E comme la station sol principale du satellite CurieSat (figure 25). Nous avons calculé l'effet de masquage du bâtiment Zamansky sur le champ de vue des antennes sur le toit 65 et nous avons constaté que nous avons une zone d'aveugle de 11° en azimut et 14° en élévation (figures 26 et 27).



Figure 24 , L'emplacement des antennes à l'UPMC

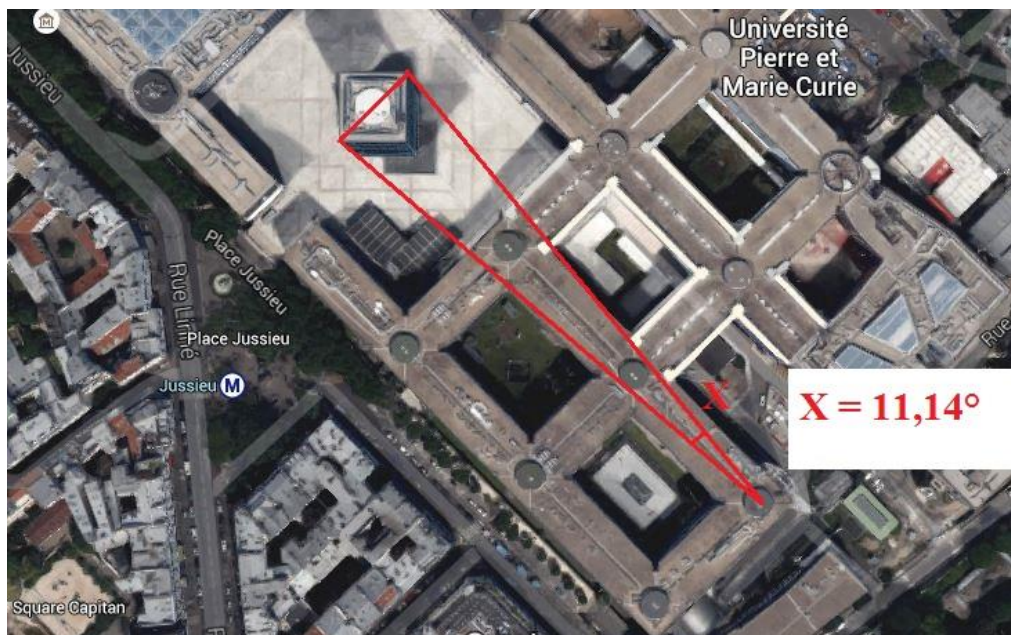


Figure 25, Effet masquage de la tour Zamansky est $11,14^\circ$ en azimuth

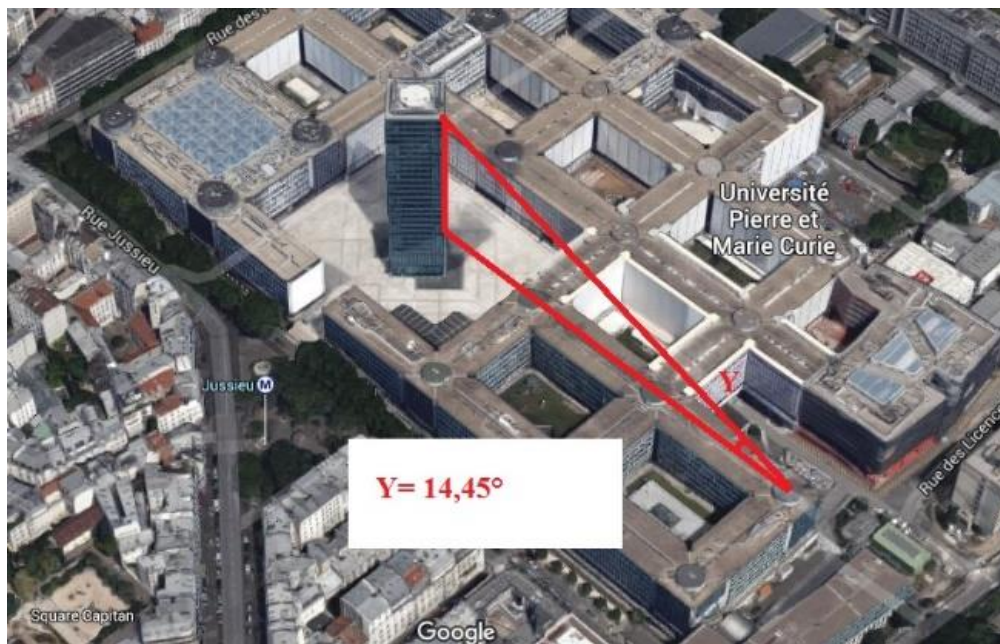


Figure 26, Effet masquage de la tour Zamansky : 14,45° en élévation

c. Installation des antennes

Afin de communiquer avec les satellites nous allons utiliser deux antennes Yagi de taille 2 et 4 mètres environ. Ces deux antennes doivent pouvoir être orientées vers le satellite et le suivre le satellite pendant un passage. L'installation sera faite à l'extérieur et elle doit être résistante au changement de température, à la pluie et au vent. On donne sur la figure 28 la structure du système d'antennes de la station sol CurieSat :

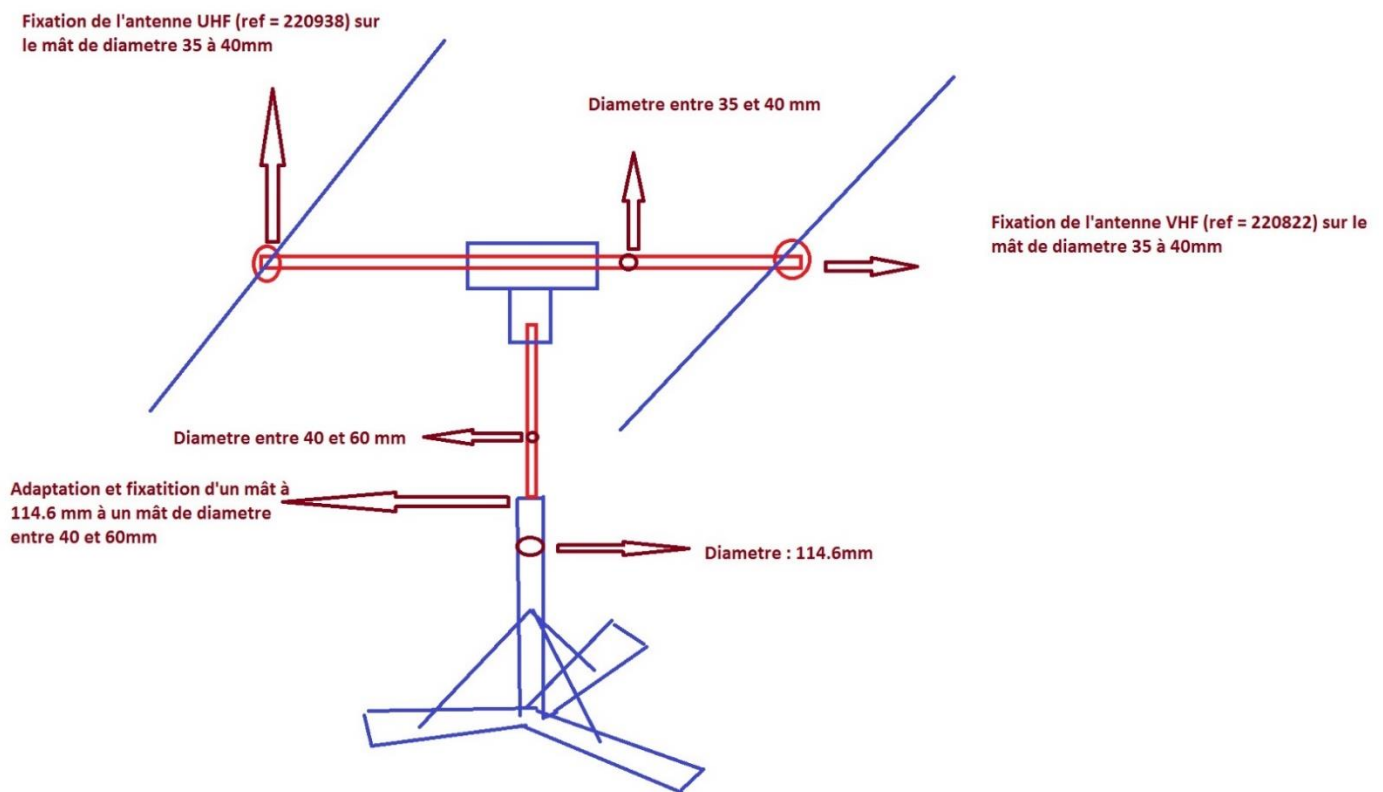


Figure 27, Structure du système d'antenne

Le système d'antennes est constitué de deux antennes UHF et VHF, un rotor azimuth/élévation, un mât vertical, un mât horizontal et un support de mât vertical fixé au sol et qui maintient tout le système.

i. support d'antenne

Comme mentionné avant, nous allons mettre le système d'antennes sur la terrasse de la tour 65 de l'UPMC. Nous avons constaté que sur cette tour, il existe un support de mât qui n'est plus utilisé mais qui est dans un très bon état. Il convient à notre structure. Les figures 29 et 30 montrent des photos de ce support de mât :



Figure 28, Le support de mât sur le toit de la tour 65

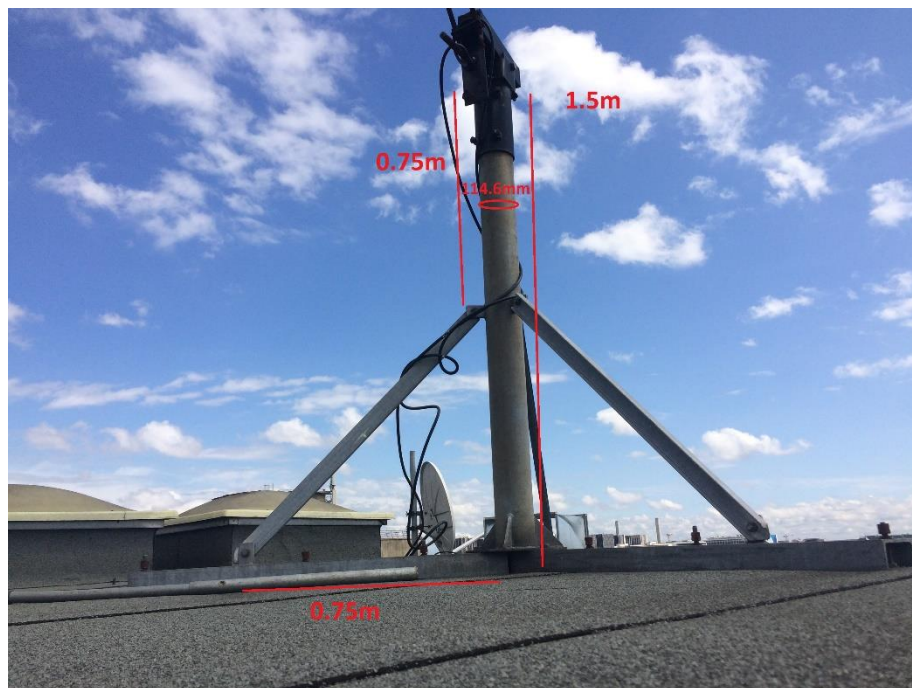


Figure 29, Le support de mât sur le toit de la tour 65

Initialement, ce support était utilisé pour une antenne réflecteur beaucoup plus grande et lourde que nos antennes. La seule contrainte a été d'adapter le diamètre de ce support (114,6mm) au diamètre de notre mât vertical (57 mm). Pour ce faire, nous avons construit une pièce d'adaptation qui permet de relier les deux pièces. La figure 31 montre la photo de cette pièce :



Figure 30, La pièce d'adaptation entre le support de mât et le mât, construite sur mesure

Cette pièce sera fixée sur le support de mât par trois vis et le mât vertical sera placé dans la pièce (figure 32).



Figure 31, La pièce d'adaptation du support du mât au mât vertical

ii. Le mât vertical

C'est un mât métallique de diamètre 57 mm et de longueur de 2,5 m (figure 27). A l'extrémité supérieure de ce mât seront placés les rotors de positionnement (figure 33).



Figure 32, Le mât vertical inséré dans la pièce d'adaptation



Figure 33, Le rotor sera fixé sur le mât vertical

iii. Le mât horizontal

Nous allons utiliser un mât horizontal pour accueillir les deux antennes UHF et VHF. Ce mât est fabriqué de fibre de verre. Nous n'utilisons pas un mât métallique pour éviter de perturber le rayonnement des antennes par la présence de métal. Ce mât a un diamètre de 38 mm et une longueur de 2 m (figure 35).



Figure 34, Mât horizontale en fibre de verre

5. Les logiciels de la station sol

L'ordinateur de la station sol a trois rôles principaux :

- 1) Récupérer les informations sur la position du satellite, calculer la position exacte du satellite et diriger les antennes vers le satellite.
- 2) Préparer les commandes à envoyer vers le satellite, traiter les signaux reçus du satellite et enregistrer les données reçues.
- 3) Donner la possibilité de contrôler la station sol à distance.

Pour chacun de ces tâches on utilisera le logiciel approprié.

a) Récupérer les informations sur la position du satellite, calculer la position exacte du satellite et diriger les antennes vers le satellite.

Cette tâche consiste à récupérer les paramètres orbitaux des satellites. Les paramètres orbitaux (éléments képlériens) sont au nombre de sept, nécessaires pour définir une orbite et l'emplacement du satellite sur cette orbite (figure 36). Ces paramètres définissent un point sur une ellipse dont la Terre est un des foyers. Les logiciels de suivi de satellites récupèrent ces informations depuis une source en ligne qui partage les paramètres képlériens instantanés des satellites amateurs.

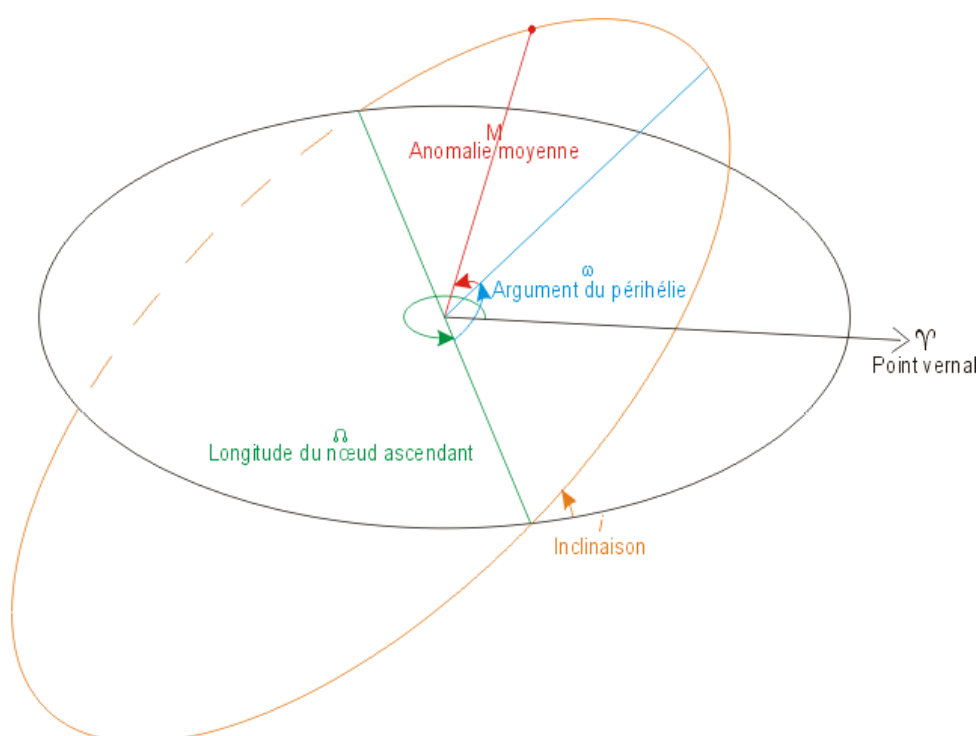


Figure 35, Les coordonnées képlériennes d'un objet tournant en orbite autour de la Terre

DELFI-C3						
Inclinaison	Longitude du nœud ascendant	Argument du périastre	Anomalie moyenne	Vecteur de l'équinoxe vernal	Moment cinétique spécifique	Point vernal
32789U	08021G	16157.4805913	0.00002332	00000-0	17673-3	0

Tableau 3, L'exemple des coordonnées Képlériens d'un objet tournant en orbite de la Terre

Le tableau 3 présente un exemple des données Képlériens pour le satellite DELFI-C3.

En revanche, les paramètres orbitaux képlériens ne donnent pas la situation très précise du satellite et ils introduisent toujours une erreur (perturbations créées par la force de gravité du Soleil et de la Lune) sur la position exacte du satellite ce qui peut être gênant dans le cas d'une communication avec le satellite par des antennes directives. Voici pourquoi les logiciels de suivi des satellites mettent à jours ces paramètres chaque mois. Une fois que le logiciel a calculé

la position exacte du satellite dans l'orbite, il visualise le satellite sur une carte afin de faciliter l'identification de la position et du mouvement du satellite[12] (figure 37).

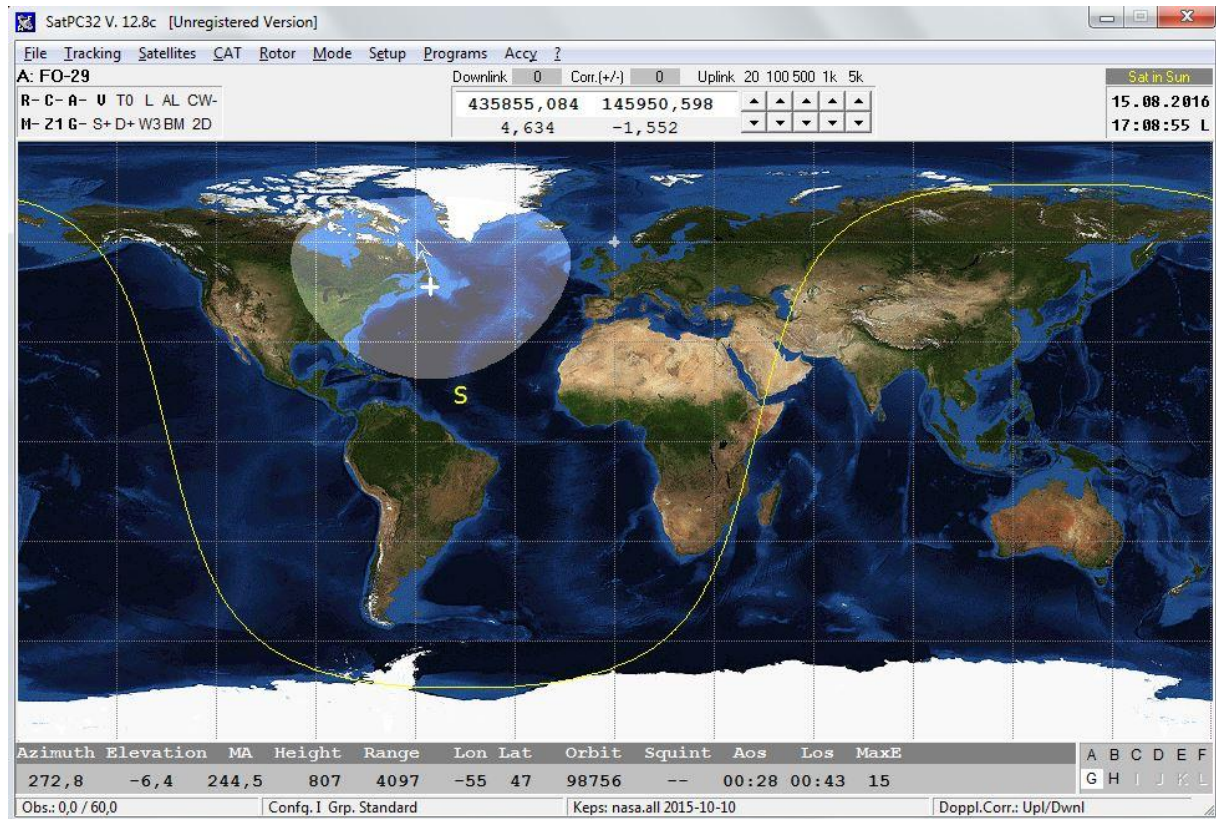


Figure 36, Le logiciel PCSat32, La carte de suivi des satellites

Une fois que le satellite est dans le champ de vision de la station sol, il faut que nous dirigions les antennes de la station sol vers le satellite pour le suivre pendant le passage. Pour ce faire nous utilisons une interface de contrôleur de rotor (présentée dans le chapitre précédent) et un logiciel qui pilote cette interface afin de contrôler le rotor et diriger les antennes vers le satellite. Il existe plusieurs pilotes d'interface de rotor développés par les radioamateurs. Nous utilisons le logiciel Putty [13] qui nous donne la possibilité de vérifier le bon fonctionnement du système de contrôle des antennes et de calibrer le convertisseur analogique numérique du contrôleur de rotor. Ensuite nous utilisons le logiciel ServerSDX [14](figure 38) pour piloter et contrôler le rotor.

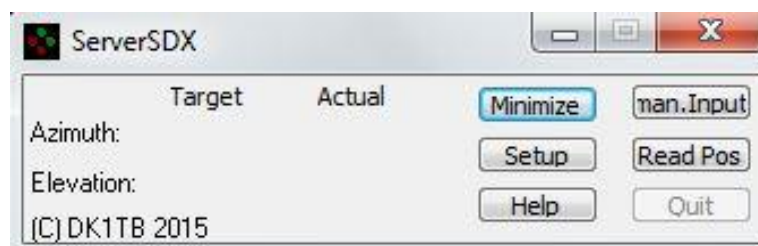


Figure 37, ServerSDX, Le pilot de contrôleur de rotor

Une fois que le satellite est sorti de notre champ de vision, le pilote positionne les antennes sur la position de garage et le logiciel de suivi calcule la position du satellite afin de diriger les antennes vers le satellite lors de prochain passage du satellite au-dessus de la station sol.

b) Préparer les commandes à envoyer vers le satellite, traiter les signaux reçus du satellite et enregistrer les données reçues.

Un autre rôle important de la station sol est de traiter les commandes à envoyer et les données reçues de la part du satellite. Pour ce faire, il existe une grande variété de logiciels accessibles par internet. Par exemple le logiciel MixW [15] nous permet de communiquer avec plusieurs protocoles radioamateurs comme Amtor, Pactor, Morse, Packet, etc. Nous allons communiquer avec CurieSat en utilisant le mode Packet en 9600 baud, une modulation GMSK et le protocole utilisé est AX.25 en bandes VHF et UHF. Comme présenté sur la figure 39, ce logiciel met à disposition un spectre de fréquence en bande base de 0 à 2kHz et un drapeau pour traiter la partie de spectre désiré.

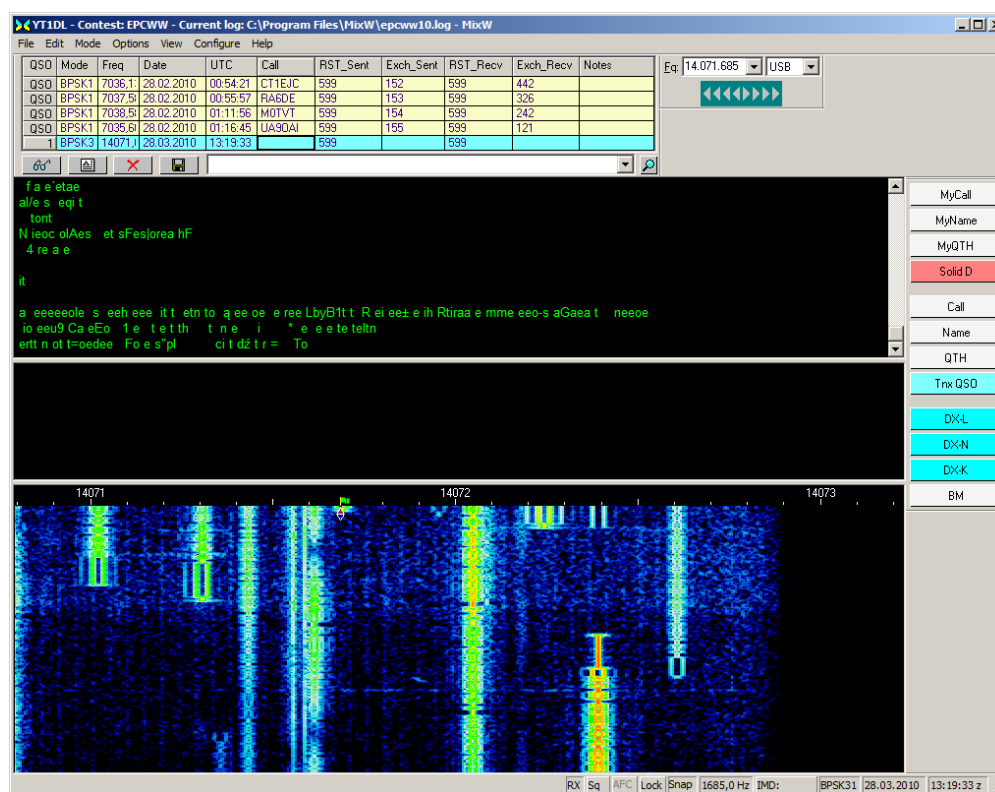


Figure 38, Logiciel MixW

Une autre possibilité est de développer un logiciel spécifique pour communiquer avec CurieSat. L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et l'Université de Delft ont développé leur propre logiciel et l'ont mis à disposition de tous les radioamateurs et des stations sol sur leur site. En utilisant ce logiciel, les données reçues de la part des satellites seront démodulées, dépaquetées et traitées. Les informations reçues comprenant l'état principal du satellite seront affichées dans une fenêtre (figure 40).

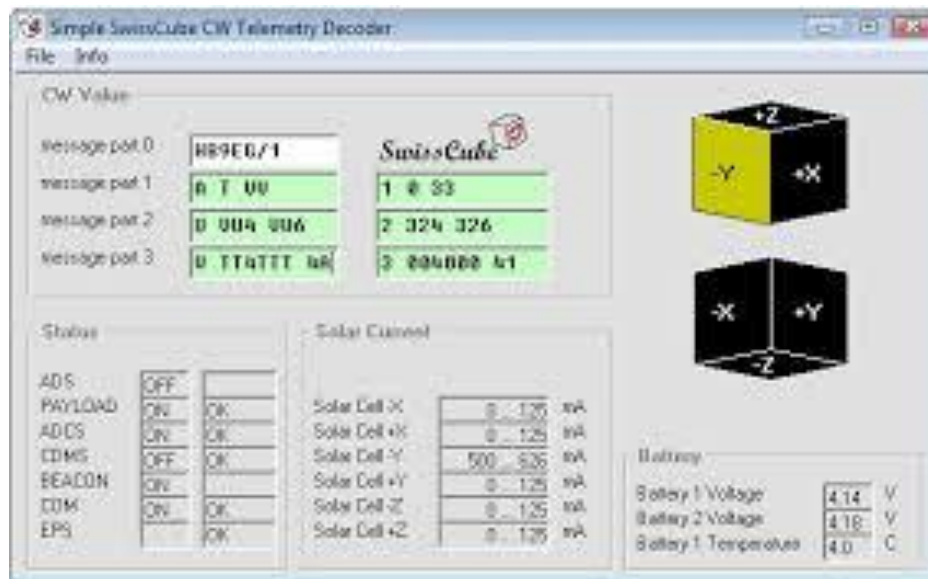


Figure 39, Logiciel CW de SwissCube

Afin de pouvoir communiquer avec les satellites sur les bonnes fréquences, nous devons être capables de contrôler l'émetteur/récepteur. Ce dernier permet de modifier les fréquences d'émission et réception, sélectionner les modes de transmission, éteindre et allumer le préamplificateur et atténuateur d'émetteur/récepteur, enregistrer les fréquences des satellites couramment suivis et si nécessaire utiliser son TNC interne. Pour tout cela, on peut utiliser un logiciel de contrôle d'émetteur/récepteur. Pour l'émetteur/récepteur Kenwood TS2000 il existe plusieurs logiciels payants ou gratuits. Le logiciel le plus performant est celui développé par la compagnie Kenwood sous le nom de ARCP-2000 (figure 41). Selon les avis favorables des utilisateurs [16], il s'agit du meilleur logiciel pour contrôler le TS-2000. Ce logiciel nous donne la possibilité de contrôler toutes les fonctionnalités de TS-2000 par l'ordinateur. Il a un prix de 100 euros et peut être commandé sur le site officiel de Kenwood. Le logiciel SatPC32 nous donne la possibilité de configurer les paramètres essentiels de l'émetteur/récepteur comme changer la fréquence et le mode de fonctionnement de TS2000. Ce logiciel est très limité pour contrôler le TS-2000.

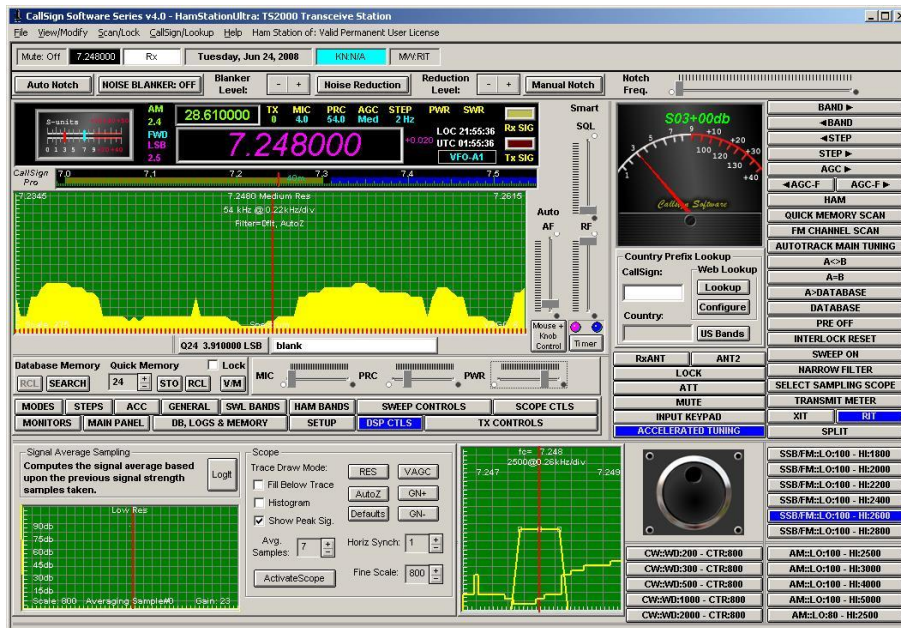


Figure 40, Le logiciel ARCP-2000, développé par Kenwood

c) Donner la possibilité de contrôler la station sol à distance

La station sol doit être contrôlable à distance, depuis la chambre de contrôle de la mission METEOR. Les enseignants, les ingénieurs et les étudiants qui travaillent pour la mission METEOR doivent être capables de contrôler la station sol de distance. Pour ce faire, nous allons utiliser le logiciel gratuit TeamViewer (figure 42). En utilisant ce logiciel nous pourrons avoir accès à l'ordinateur de la station sol en ayant le nom d'utilisateur et le mot de passe et prendre le contrôle de la station à la main.

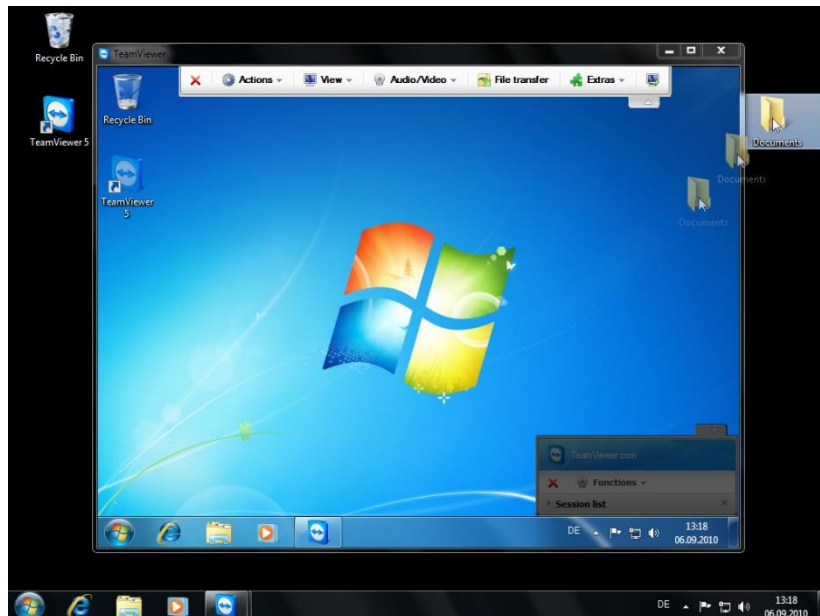


Figure 41, Logiciel TeamViewer

d) Choix du logiciel

Nous avons testé la plupart des logiciels libres et nous avons choisi ceux qui répondaient le mieux à notre besoin. Le tableau 4 donne la liste des logiciels retenus pour la station sol CurieSat. Tous les logiciels dans la liste sont utilisés et validés par les radioamateurs pour les applications satellitaires.

Nom du logiciel	Description
SatPC32	Suivi de satellite
ServerSDX	Pilotage du rotor
MixW	Traitement des données à transmettre et reçues
Commander	Contrôle de l'émetteur/récepteur

Tableau 4, Liste des logiciels de la station sol

IV. Expériences et tests

Lorsque nous avons rassemblés tous les matériels nécessaires pour les communications simples et courtes, nous avons décidé de réaliser quelques tests afin de vérifier le bon fonctionnement des matériels de la station sol. Les antennes de la station ne sont pas encore installées mais nous pouvons faire des tests sur le balcon de la tour 65/66 (figure 43). Nous n'avons pas encore une licence radioamateur, c'est pourquoi nous ne sommes pas encore en mesure d'émettre mais nous sommes capables d'écouter les communications vocales ou recevoir et traiter les paquets communiqués dans les bandes radioamateurs. Voici quelques tests réalisés par la station sol CurieSat.



Figure 42, Test de la chaîne de communication avec une antenne dipôle

1. Radioamateur

Le 21 Juin 2016, pour la première fois, nous avons réussi à entendre les radioamateurs. C'était une radio conférence entre quatre radioamateurs qui discutaient d'une anomalie dans leur station radioamateur. La communication est réalisée dans la bande VHF. Nous avons utilisé une antenne dipôle VHF, positionnée verticalement. Cette expérience était la première preuve de bon fonctionnement des matériels de la station sol. Lors de cet essai, nous n'avons pas pu établir un bilan de liaison ni identifier l'emplacement des radioamateurs.

2. La station sol IGOSat

Le 28 Juillet 2016, nous avons réussi à entendre la station sol IGOSat. Cette station sol est située sur le campus de l'Université Paris 13. La puissance d'émission par la station sol IGOSat était de 15 W dans la bande VHF. La polarisation était verticale.

3. ISS

La Station Spatiale Internationale (ISS) a lancé un programme radioamateur sous le nom d'ARISS⁹ [17]. Ce programme consiste à donner la possibilité aux radioamateurs, aux étudiants et aux établissements radioamateurs de communiquer avec l'ISS lors de chaque passage. L'ISS propose plusieurs types de communication. Dans le cas où l'ISS est à proximité d'un radioamateur, une communication vocale est envisageable. Sinon, il est possible d'utiliser les services de paquet automatique. Ce service émet, depuis l'ISS, des paquets d'informations vers la Terre et nous pouvons recevoir et traiter ces paquets. Nous avons réalisé un test avec l'ISS

⁹ Amateur Radio on International Space Station

le 15 Juillet 2016 et nous avons reçu les paquets transmis par l'ISS. Comme nous utilisons une antenne dipôle VHF sans amplificateur, les paquets reçus étaient très bruités. Nous ne sommes pas parvenus à démoduler les paquets car nous n'avons pas eu des informations sur la méthode de démodulation et dépaquetages. Nous avons démontré le bon fonctionnement des matériaux pour les communications satellitaires mais au niveau du traitement numérique des paquets, nous avons besoin plus d'information.

V. Conclusion et perspectives

Pendant ces six mois de stage, nous avons, dans un premier temps, étudié les besoins d'une station sol et ensuite nous avons choisi les matériels qui peuvent répondre le mieux à nos besoins. Après nous avons commencé à acheter ces matériels. Pendant cette étape nous avons eu des difficultés avec les délais de procédure administrative universitaire pour acheter les matériels. Les matériels ont été reçus les uns après les autres et pour chacun d'eux, nous avons effectué des tests afin de vérifier son bon fonctionnement. Enfin, une fois que nous avons eu tous les composants nécessaires pour réaliser les communications terrestres ou satellitaires, nous avons effectué quelque test pour vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de communication de la station sol.

La procédure administrative pour faire le câblage entre le deuxième étage du laboratoire L2E et le toit du bâtiment 65 a commencé au mois de juin 2016 mais malheureusement les travaux ne débuteront pas avant le mois de septembre 2016. Par conséquent, nous ne pouvons pas installer le système d'antennes pour le moment.

Une fois que le câblage sera effectué, nous pourrons monter l'installation du système d'antennes et ensuite commencer à communiquer avec les satellites par des antennes directives. Une licence radioamateur doit être acquise afin de pouvoir transmettre sur les bandes radioamateurs. Un test in situ des antennes Yagi UHF et VHF doit être effectué dans le but de mieux connaître le comportement précis des antennes.

Figure 44 présentes la station sol CurieSat.



Figure 43, La station sol CurieSat situé au laboratoire L2E

VI. Perceptives

Dance ce dernier chapitre nous allons proposer les améliorations possibles qui peuvent être réalisées dans le futur.

A. Bande S

Une des hypothèses présentées dans le document STB¹⁰ [18] de CurieSat est de télécharger les images pris par le satellite avec un sous-système de radiocommunication en bande S. Ceci signifie que nous devons ajouter un émetteur/récepteur en bande S sur la station sol et une antenne réflecteur dans le système d'antennes. Une étude approfondie doit être réalisée afin de définir les meilleures solutions pour le choix d'émetteur/récepteur et d'emplacement d'antenne réflecteur.

¹⁰ Spécifications Techniques des Besoins

B. Les aménagements de communication vocale

Comme nous l'avons expliqué avant, le programme ARISS donne la possibilité aux Ecoles et aux Universités de communiquer avec l'ISS. La station sol CurieSat peut être utilisée pour donner aux étudiants l'occasion de communiquer avec l'ISS et mieux comprendre les aspects techniques d'un tel projet. Il existe plusieurs types de composants pour faciliter la communication vocale : les microphones de bureau ou les casques main libre (figure 45).



Figure 44, Microphone de bureau radioamateur

VII. Références bibliographiques

- [1] « Centre national d'études spatiales », *Wikipédia*. 18-juill-2016.
- [2] CNES, « Janus ». [En ligne]. Disponible sur: <https://janus.cnes.fr/fr/JANUS/Fr/index.htm>. [Consulté le: 26-juill-2016].
- [3] O. Varela de Seijas, « METEOR Spécification Technique des Besoins STB », UPMC.
- [4] « L2E UPMC », *L2E Laboratoire d'Electronique et Electromagnétisme*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.l2e.upmc.fr/>. [Consulté le: 30-mai-2016].
- [5] « NASA's Cube Quest Challenge Aims to Send Nanosatellites to Lunar Orbit and Beyond on First SLS Flight », *AmericaSpace*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.americaspace.com/?p=72686>. [Consulté le: 30-mai-2016].
- [6] « Radioamateurs », 05-janv-2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.anfr.fr/autorisations-demissions/radioamateurs/>. [Consulté le: 02-août-2016].
- [7] « F6KUM - Les radioamateurs ». [En ligne]. Disponible sur: <http://f6kum.free.fr/radioamateur.html>. [Consulté le: 30-mai-2016].
- [8] « PLAN DES BANDES ET FREQUENCES RADIOAMATEURS ». [En ligne]. Disponible sur: <http://radio.pagesperso-orange.fr/FreqRA.htm#432>. [Consulté le: 30-mai-2016].
- [9] N. Rambaux et D. Galayko, « Campus spatial à l'UPMC, Projet Nanosatellites étudiants ». 30-janv-2014.
- [10] K. Jan A., « AMSAT / IARU Annotated Link Model System », *ww2.amsat.org*. [En ligne]. Disponible sur: ww2.amsat.org/xtra/AMSAT-IARU_Link_Model_Rev2.5.3.xls. [Consulté le: 03-sept-2016].
- [11] F. Michael, « Design of a Multi-Mission Satellite Ground Station for Education and Research », *2010 Second Int. Conf. Adv. Satell. Space Commun.*, p. 59-63, 2010.
- [12] « AMSAT - Keplerian Elements ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.amsat.org/amsat-new/tools/keps.php>. [Consulté le: 15-août-2016].
- [13] « Download PuTTY - a free SSH and telnet client for Windows ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.putty.org/>. [Consulté le: 03-sept-2016].
- [14] « Neue Seite 1 ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.dk1tb.de/downloadeng.htm>. [Consulté le: 03-sept-2016].
- [15] « MixW - multimode software for radio amateurs ». [En ligne]. Disponible sur: <http://mixw.net/>. [Consulté le: 03-sept-2016].
- [16] « SOFTWARE FOR TS2000 ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.eham.net/ehamforum/smf/index.php?topic=7072.0>. [Consulté le: 15-août-2016].
- [17] « ARISS », *ARISS*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ariss.org/>. [Consulté le: 21-août-2016].
- [18] O. Varela de Seijas, « METEOR Spécification Technique des Besoins STB ». 27-août-2015.

VIII. Annexe

A. Annexe 1

Les caractéristiques du câble coaxial Andrew CNT-400.

Dimensions

Cable Weight 0.10 kg/m
Diameter Over Dielectric 7.240 mm | 0.285 in
Diameter Over Jacket 10.290 mm | 0.405 in
Inner Conductor OD 2.740 mm | 0.108 in
Nominal Size 0.400 in
Outer Conductor OD 8.080 mm | 0.318 in

Electrical Specifications

Cable Impedance 50 ohm
Capacitance 78 pF/m | 24 pF/ft
dc Resistance, Inner Conductor 4.490 ohms/km | 1.370 ohms/kft
dc Resistance, Outer Conductor 5.610 ohms/km | 1.710 ohms/kft
dc Test Voltage 2500 V
Jacket Spark Test Voltage (rms) 8000 V
Maximum Frequency 16.20 GHz
Operating Frequency Band 30 – 6000 MHz
Peak Power 16.0 kW
Shielding Effectiveness >90 dB
Velocity 85%

Environmental Specifications

Installation Temperature 40
°C to +85 °C (40
°F to +185 °F)
Operating Temperature 40
°C to +85 °C (40
°F to +185 °F)
Storage Temperature 70
°C to +85 °C (94
°F to +185 °F)

General Specifications

Cable Type CNT400
Braid Coverage 86% braid
Brand Cinta™

Mechanical Specifications

Bending Moment 0.7 Nm
| 0.5 ft lb
Flat Plate Crush Strength 0.7 kg/mm | 40.0 lb/in
Minimum Bend Radius, Single Bend 25.40 mm | 1.00 in
Tensile Strength 73 kg | 160 lb

Performance

Frequency Attenuation (dB/100 m)

30 MHz 2.49

50 MHz	3.18
150 MHz	4.92
220 MHz	6.23
450 MHz	8.86
900 MHz	12.80
1500 MHz	16.70
1800 MHz	18.40
2000 MHz	19.40
2400 MHz	21.65
2500 MHz	22.00
3000 MHz	24.60
4000 MHz	28.87
4500 MHz	30.84
5000 MHz	32.81
5200 MHz	33.46
5500 MHz	34.78
5800 MHz	35.76
6000 MHz	36.42

Regulatory Compliance/Certifications

Agency Classification

RoHS 2002/95/EC Compliant

