

Abstract

TODO

Résumé

TODO

Remerciements

TODO

Sommaire

1 - Introduction	1
2 - Présentation de l'entreprise	2
2.1 - Le CSEP	2
2.1.1 - Présentation générale du CSEP	2
2.1.2 - Les activités du CSEP	2
2.2 - Présentation du Nanolab academy	2
3 - Sujet et contexte du stage	4
3.1 - Les nanosatellites - CubeSats	4
3.2 - Contexte du stage	4
3.2.1 - Le projet IonSat	4
3.2.2 - L'équipe du projet IonSat	5
3.2.3 - Phases de développement du projet	5
3.3 - Sujets et objectifs du stage	6
4 - Architecture d'IonSat	7
4.1 - Composants hardware	7
4.1.1 - Orientation et déplacement	7
4.1.2 - Communication avec le sol	7
4.1.3 - Electronique numerique	7
4.1.4 - Interconnection des composants	7
4.2 - Logiciel embarqué	7
4.2.1 - FPGA	7
4.2.2 - Logiciel de bord	7
5 - Le CAN	8
6 - Architecture hardware de IonSat	9
7 - Conclusion	10
Bibliographie	11
Annexe 1 : auto-evaluation	12
Annexes	13

Abbreviations

CSEP : Centre Spatial de l'École Polytechnique

CSU : Centre Spatial Universitaire

CNES : Centre National d'Études Spatiales

LEO : Low Earth Orbit (orbite basse terrestre)

VLEO : Very Low Earth Orbit (orbite terrestre très basse)

FPGA : Field Programmable Gate Array

IP : Intellectual Property (propriété intellectuelle, dans le contexte des composants matériels)

VHDL : Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language (langage de description matérielle pour circuits intégrés)

CAN : Controller Area Network (réseau de communication pour systèmes embarqués)



1 - Introduction

breve Introduction

2 - Présentation de l'entreprise

2.1 - Le CSEP

2.1.1 - Présentation générale du CSEP

Le CSEP (Centre Spatial de l'École Polytechnique) est une structure rattachée à l'École Polytechnique, financée par le LPP (Laboratoire de Physique des Plasmas) via la chaire Espace - Sciences et Défis du Spatial et avec pour rôle d'affirmer la présence de l'École Polytechnique au niveau académique et mondial dans le domaine du spatial.

Le CSEP fait partie des vingt Centres Spatiaux Universitaires (CSU) répartis en France. Ces centres ont pour mission principale de former des étudiants aux métiers du spatial à travers des projets d'ingénierie concrets tels que le développement de satellites, de fusées expérimentales ou d'expériences embarquées à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS).

Les CSU s'appuient généralement sur une équipe d'ingénieurs permanents qui assurent la continuité des projets, accompagnent les étudiants, supervisent les stages et prennent en charge les aspects techniques les plus complexes. Le CSEP compte actuellement cinq ingénieurs, dont un chef de projet, ainsi que des spécialistes en électronique, logiciels embarqués, télécommunications, etc.

Chaque année, en complément de cette équipe, de nombreux étudiants participent activement aux projets du CSEP, que ce soit dans le cadre de cours, de projets universitaires ou de stages, conformément à la vocation pédagogique des CSU.

2.1.2 - Les activités du CSEP

Le CSEP a été créé en 2012 pour encadrer le premier projet de nanosatellite de l'École Polytechnique, X-CubeSat, lancé en 2017 après cinq ans de développement, et qui était alors le premier satellite étudiant français opérationnel en orbite.

Depuis, le CSEP pilote plusieurs projets et initiatives, parmi lesquels :

- Le développement du nanosatellite IonSat (cf. section **TODO**)
- L'encadrement des Projets Scientifiques Communs (PSC) menés par les étudiants de l'École Polytechnique, qui participent à des projets en cours au CSEP ou en proposent de nouveaux ;
- La participation annuelle au programme C'Space, une campagne de lancement de fusées expérimentales étudiantes organisée en partenariat avec le CNES, à travers l'association étudiante AstronautiX.

Ces activités permettent d'accueillir chaque année 80 étudiants, leur offrant une formation concrète et une porte d'entrée dans le domaine spatial.

2.2 - Présentation du Nanolab academy

Dans le cadre de son nouveau projet de nanosatellite, le CSEP participe au programme Nanolab Academy piloté par le CNES. Ce programme a pour objectif d'accompagner les Centres Spatiaux Universitaires (CSU) dans la conception et la réalisation de leurs satellites. Le CNES y joue un rôle de



soutien technique en fournissant à la fois des bases technologiques, des documents de référence et une plateforme de partage de connaissances destinée à faciliter le développement des projets.

Le CNES a notamment développé, dans le cadre de ce programme, le nanosatellite EyeSat, lancé en 2019 et resté opérationnel pendant quatre ans et finalise actuellement un nouveau projet, AeroSat, dont le lancement est prévu pour début 2026.

Les composants matériels et logiciels conçus pour EyeSat et AeroSat ont été mis à disposition des CSU partenaires. Ces éléments servent de base technique commune sur laquelle chaque CSU peut s'appuyer pour intégrer ses propres sous-systèmes et développer des fonctionnalités spécifiques.

3 - Sujet et contexte du stage

3.1 - Les nanosatellites - CubeSats

Un CubeSat est un petit satellite répondant à un format standardisé, basé sur un cube de 10 cm de côté pesant environ 1 kg. Plusieurs unités (ou « U ») peuvent être assemblées pour former des satellites plus grands : par exemple, un satellite 3U mesurera 30 x 10 x 10 cm. Chaque unité supplémentaire permet d'embarquer davantage de charges utiles, des composants plus volumineux et, par conséquent, d'augmenter les capacités du satellite. Toutefois, cette augmentation de taille implique également un coût de lancement plus élevé.

L'intérêt principal du format CubeSat réside dans sa capacité à démocratiser l'accès à l'espace. En effet, il permet à des universités, des laboratoires et des petites entreprises de concevoir, développer et lancer leurs propres satellites à un coût réduit, en s'appuyant sur des composants commerciaux standards disponibles sur le marché. Le coût de lancement d'un CubeSat reste généralement bien inférieur à celui des satellites conventionnels, notamment parce qu'ils sont conçus pour être lancés en groupes, mutualisant ainsi les coûts logistiques.

En général, les satellites universitaires embarquent plusieurs missions scientifiques - appelées charges utiles - qui donnent tout leur intérêt au projet. Ces missions sont souvent menées en partenariat avec d'autres universités, entreprises ou laboratoires, ce qui permet de renforcer la portée scientifique et pédagogique des CubeSats tout en offrant aux partenaires une opportunité d'envoyer leurs expériences dans l'espace de manière plus accessible et économique.

La durée de vie d'un CubeSat peut varier de quelques mois à plusieurs années, selon sa conception, son orbite et la nature de sa mission. Ces satellites sont souvent pensés pour être opérationnels sur une période limitée, au terme de laquelle ils entrent dans une phase de désorbitation contrôlée.

Les CubeSats peuvent être lancés sur différentes orbites, selon les objectifs du projet. Cependant, ils sont majoritairement déployés en orbite basse terrestre (LEO), entre 200 et 2 000 km d'altitude. Cette configuration permet non seulement de répondre à de nombreux besoins scientifiques et techniques, mais aussi de limiter la durée de vie orbitale du satellite après la fin de la mission, contribuant ainsi à la réduction des débris spatiaux.

3.2 - Contexte du stage

3.2.1 - Le projet IonSat

À la suite du succès de son premier satellite, le CSEP a lancé en 2017 un nouveau projet de nanosatellite : IonSat. Il s'agit d'un CubeSat de format 6U, mesurant 30 x 20 x 10 cm, destiné à être placé en orbite terrestre très basse (VLEO), à environ 300 km d'altitude.

IonSat embarquera plusieurs charges utiles, dont la principale est un moteur à ions. En règle générale, les CubeSats ne disposent pas de moyen de propulsion, mais uniquement de systèmes d'orientation. Toutefois, en VLEO, la traînée atmosphérique est bien plus importante qu'à plus haute altitude, ce qui entraîne une perte progressive d'altitude. Afin de prolonger la durée de vie du satellite,

le moteur à ions permettra d'effectuer des manœuvres de correction d'orbite, évitant ainsi une désorbitation prématurée.

Parmi les autres charges utiles, on compte :

- un capteur d'oxygène atomique,
- une caméra embarquée,
- une antenne radioamateur,
- un capteur mesurant l'effet de l'iode sur les panneaux solaires,
- **TODO** : vérifier la liste complète.

Le lancement d'IonSat est actuellement prévu pour courant 2026, mais cette date reste à confirmer en fonction de l'avancement du projet.

3.2.2 - L'équipe du projet IonSat

L'équipe permanente en charge du projet IonSat est composée de cinq ingénieurs :

- Directeur du CSEP : Luca Bucciantini
- Chef de projet : Borhane Bendaci
- Ingénieur électronique & logiciel embarqué : Ahmed Ghoulli
- Ingénieur AIT (Assembly, Integration and Testing) : Nicolas Lequette
- Ingénieur télécommunications : Tony Colin

En complément, durant mon stage, quatre autres stagiaires travaillaient aux côtés des ingénieurs permanents, notamment sur le logiciel embarqué, les campagnes de tests, ainsi que sur la mise en place de la station sol. De plus, au cours de six dernières années de développement, de nombreux autres stagiaires et étudiants ont contribué au projet au travers de leurs stages et projets.

3.2.3 - Phases de développement du projet

Le développement d'un satellite suit un processus normé, structuré en plusieurs phases successives, comme présenté dans le tableau ci-dessous. Le projet IonSat se trouve actuellement en phase D, la plus longue, mais aussi la dernière étape avant le lancement. Cette phase concentre la majeure partie du travail de développement d'intégration électronique et logicielle pour relier tous les sous-systèmes du satellite.

Phase	Description
Phase 0	Analyse de la mission – Identification des besoins
Phase A	Étude de faisabilité
Phase B	Définition préliminaire
Phase C	Définition détaillée
Phase D	Production / Intégration / Qualification au sol
Phase E	Opérations en orbite
Phase F	Fin de vie / Retrait de service

3.3 - Sujets et objectifs du stage

Dans le cadre du projet IonSat, mon stage d'ingénieur s'est inscrit dans le développement des systèmes électroniques embarqués du satellite. Plus précisément, en tant que stagiaire en électronique numérique spécialisé en FPGA, j'ai été chargé de deux missions principales.

La première mission portait sur la conception et l'implémentation d'un contrôleur CAN (Controller Area Network) sous forme d'IP matérielle dédiée, entièrement développée en VHDL. Ce composant a pour rôle de gérer les communications entre différents sous-systèmes du satellite via le bus CAN, un protocole robuste couramment utilisé dans les environnements embarqués pour ses performances en temps réel et sa tolérance aux erreurs.

La seconde mission consistait à intégrer plusieurs IPs sur la plateforme FPGA destinée à la mission. Ce travail comprenait la compréhension des IPs fournies par le CNES et l'adaptation de ces composants pour les adapter aux spécificités du projet IonSat. L'objectif était de garantir que toutes les IPs fonctionnent de manière cohérente et efficace, en assurant la communication entre elles et avec les autres sous-systèmes du satellite.

4 - Architecture d'IonSat

4.1 - Composants hardware

4.1.1 - Orientation et déplacement

L'orientation du satellite est cruciale pour garantir la bonne transmission des données de télémétrie et télécommande avec la station sol, pour l'acquisition d'images de la Terre et pour l'orientation des panneaux solaires vers le Soleil. Le satellite embarque pour ce faire de nombreux capteurs pour déterminer son orientation :

- Un accéléromètre pour mesurer les accélérations
- Un magnétomètre pour mesurer le champ magnétique terrestre
- Un gyroscope pour mesurer la rotation du satellite
- Des capteurs solaires pour déterminer l'orientation par rapport au Soleil

A l'aide de toutes ces données le système de contrôle d'attitude est capable de déterminer l'orientation du satellite dans l'espace et d'agir en conséquence pour maintenir une orientation optimale. Le système d'attitude dispose de plusieurs actionneurs, tels que des roues de réaction pour stopper la rotation et ajuster l'orientation, des magnetorqueurs pour ajuster l'orientation du satellite grâce au champ magnétique terrestre et un propulseurs pour ajuster l'orbite.

4.1.2 - Communication avec le sol

Pour communiquer avec la station sol, le satellite utilise la Bande S, une bande de fréquence radio située entre 2 et 4 GHz. Cette bande est couramment utilisée pour les communications par satellite en raison de sa capacité à pénétrer l'atmosphère terrestre. Pour cela le satellite dispose d'une antenne Bande S et d'un transceiver pour générer et recevoir les signaux radio.

Le satellite envoie des données de télémétrie TM et reçoit des commandes de télécommande TC qui suivent un format spécifique.

4.1.3 - Electronique numérique

Pour contrôler l'ensemble des systèmes

4.1.4 - Interconnection des composants

4.2 - Logiciel embarqué

4.2.1 - FPGA

4.2.2 - Logiciel de bord



5 - Le CAN

TODO



6 - Architecture hardware de IonSat

TODO



7 - Conclusion

TODO



Bibliographie

TODO



Annexe 1 : auto-evaluation

TODO



Annexes

TODO