N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
المركز الجامعي بلحاج بوشعيب عين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent

Institut : Technologie
Departement : Génie Electrique
Laboratoire : Structures Intelligentes

THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT LMD**
Domaine : Science et Technologie
Filière : Génie Electrique
Spécialité : Télécommunications
Par : Mohammed Belkacem Yasmina

Intitulé

Mission CubeSat pour l'etude du comportement des SiPMs dans l'espace

Soutenue publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Nom & Prénom(s)	Grade	Qualité	Etablissement de rattachement
Mr. BENCHERIF Kaddour	MCA	Président	CUBBAT- Aïn Témouchent
Mr.BENAISSA Mohamed	MCA	Rapporteur	CUBBAT- Aïn Témouchent
Mr. BANADDA Belkacem	Prof	Co-Rapporteur	Univ. Abou Bekr Belkaid-Tlemcen
Mr. BASSOU Abdesselam	Prof	Examinateur	Univ.Bechar
Mme. ZIGH Ehlem	MCA	Examinatrice	INTTIC-Oran
Mme.SLIMANE Zohra	MCA	Examinatrice	CUBBAT- Aïn Témouchent

Année Universitaire : 2019/2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
المركز الجامعي بلحاج بوشعيب عين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent

Institut : Technologie
Filiere : Télécommunication
Laboratoire : Structures Intelligentes

Résumé de thèse de doctorat

(Français-Anglais-Arabe)

Intitulée :

Mission CubeSat pour l'étude du comportement des SiPMs dans l'espace

Présenté par : Mme Mohammed Belkacem Yasmina

Encadrée par : Mr Benaissa Mohamed

Co-Dirigé par : Mr Belkacem Benadda

Soutenue le : 17/03/2020

1. Contexte de la thèse

Ces derniers années les CubeSats dans la catégorie des Nanosatellites connaissent un développement considérable et jouent un rôle croissant dans les applications spatiales, tout en réduisant les coûts et le temps de conception. Ainsi, ces satellites peuvent être un outil important pour évaluer de nouvelles technologies et estimer leurs paramètres de performance en vue de leurs exploitations ou utilisations dans des projets spatiaux d'envergure.

Dans cette perspective le travail de cette thèse propose une étude qui consiste en l'utilisation d'un CubeSat comme plateforme pouvant embarquer une charge utile de test technologique pour une future mission satellite.

Dans un premier temps l'étude consiste en l'analyse globale de mission et la caractérisation du Nanosatellite à travers le dimensionnement de ce dernier et l'étude de chaque sous-système nécessaire pour assurer la mission.

La seconde partie consiste en l'étude sur le Readout de la charge utile qui comportera la nouvelle génération de photo-détecteurs ; les Photomultiplicateurs au Silicium (SiPMs), dont les avantages sont très attrayants pour les applications spatiales .Une étude des caractéristiques des SiPMs est egalement necessaire et le design de lecture proposé et validé par FPGA.

2. Mots clés :

CubeSat, Mission, charge utile, photo-détecteur, photomultiplicateur au silicium, Readout, FPGA.

3. Méthodologie de développement

D'un point de vue méthodologique, le travail de recherche proposé s'appuie sur deux parties principales ou la première a pour objet l'étude de la mission spatiale basée sur un satellite qui se place dans la ligne des CubeSats, alors que la seconde partie est l'étude de la charge utile à intégrer sur le satellite pour assurer la mission.

4. Objectifs de la thèse

Les principaux objectifs fixés pour cette thèse sont donnés ci-dessous :

- Appréhender les méthodes de développement d'un projet spatial
- acquérir la technologie et les compétences nécessaires pour l'ingénierie spatiale

- promouvoir la recherche dans le domaine
- rendre accessible l'exploration scientifique spatiale aux universités
- L'étude de la technologie des SiPMs
- la mise en œuvre de l'électronique de lecture associée
- L'expérimentation en vol des SiPMs jamais testés en orbite
- Caractérisation de leurs comportements dans l'espace pour de futures exploitations

5. Plan de rédaction de la thèse

Le travail de recherche pour cette thèse à donné lieu à un manuscrit de thèse d'un nombre d'environ 111 de pages, ou l'on retrouve les principaux travaux repartis sur 4 chapitres donnés comme suit :

Le premier chapitre « **Les CubeSats, missions et standards »** est consacré à l'étude des phases de déroulement d'une mission spatiale et aux normes qui y sont appliquées, l'étude du concept CubeSat, de son architecture et de ses différentes spécifications sont également détaillés.

Le travail du deuxième chapitre «**Design préliminaire de la mission CubeSat »** s'agit de l'analyse de mission à travers l'étude de l'orbitographie via le logiciel de simulation STK pour connaitre la trajectoire du satellite et des différents accès. Une étude préliminaire sur la plateforme CubeSat est décrite, nous y trouverons le choix de la structure proposée, l'ensemble des sous-systèmes retenus ainsi que la modélisation mécanique qui permet l'étude de différentes configurations et l'identification de contraintes mécaniques possibles.

Le troisième chapitre « **Système de détection et photomultiplicateurs au Silicium(SiPMs) »** introduit le détecteur du rayonnement Gamma pour expliquer son principe de fonctionnement et identifier les composants de la chaine de détection, les traditionnels types de photo-détecteurs pouvant être utilisés sont brièvement décrits, pour laisser place à une description détaillée de la nouvelle technologie des photomultiplicateurs au silicium(SiPMs).

Le quatrième chapitre « **Simulations et lecture des signaux SiPMs »** présente les méthodes de lecture possibles des signaux en provenance des SiPMs et de la méthode la plus adaptée pour une application spatiale à base de CubeSat. La simulation du model électrique du dispositif est présentée ainsi que du circuit de lecture (Readout).Un traitement par carte FPGA est également réalisé à l'aide d'un générateur de signaux en remplacement physique du SiPM.

6. Résultats de simulations/Réalisations

Dans les travaux de recherches de cette thèse les résultats concernanst les points suivants ont été réalisés :

Choix de l'orbite et Contraintes : Justifie le choix de l'orbite suivant Le but de la mission proposée ,ainsi l'identification de l'orbite appropriée.

La Simulation d'orbite : Le logiciel STK à été utilisé pour visualiser l'orbite képlérienne du Nanosatellite et représenter l'empreinte au sol du satellite et la vue tridimensionnelle de l'orbite autour de la terre ainsi que les différents accès.

Le Dimensionnement préliminaire du CubeSat : qui est justifié par le choix de notre structure

Simulation du model électrique du SiPM : Le travail de simulation présenté dans cette thèse permet de simuler la réponse d'un SiPM en amplitude et format d'impulsion en utilisant le logiciel de schématisation et de simulation (Orcad capture+Pspice). Une étude par simulation sur des effets de la résistance de lecture sur la linéarité et le temps de descente est également exposée dans la thèse.

L'électronique de lecture analogique : Dans cette partie nous avons réalisé la simulation du circuit analogique en figure tous en justifiant le choix de la méthode d'amplification et le choix du discriminateur au lieu des ADC

L'Application des modes de mesure sur FPGA :cette application concerne les modes de comptage ainsi que la mesure de largeur d'impulsion

7. Publications

Publications Scientifiques Parues

Y.M. Belkacem , B. Benadda, M. Benaissa, "Preliminary design and simulation of SiPM device operation for a potential CubeSat radiation detector", Telecommunications and Radio Engineering(TRI), vol.78,Issue18:1671-1680 ,2019.

Communications nationales-Internationales

Y. M. Belkacem,M. Benaissa, , B. Benadda "mission CubeSat pour l'étude du comportement des SiPMs dans l'espace, 5^{éme} semaine de la technologie ,Institut de technolgie ,C.U.B.B.A.T, 23-24 Avril 2018.

Y. M. Belkacem, B. Benadda,M. Benaissa, "A survey of Readout Asics for near infrared atmospheric measurement unsing Nanosatellites", 3rd Conference on advances in mechanical engineering (ICAME) ,Istanbul, , 19-21 December 2017.

CubeSat mission to study the behavior of SiPMs in space

1. **Context of the thesis**

Nanosatellites as CubeSats have undergone considerable development in recent years, and are playing an increasing role in space applications, whilst reducing costs and design time. Thus, these satellites can be an important tool for assessing new technologies and estimating their performance parameters for their operations or uses in large space projects.

In this perspective , the work presented in this research proposes a study consisting on the use of a CubeSat as a platform capable of carrying a useful payload of technological test for a future satellite mission

Firstly, the study consists of the global mission analysis and characterization of the Nanosatellite through its dimensioning, the study of each subsystem necessary to ensure the mission is also carried.

In the second part , we have investigated in the study of the readout payload which will include the new generation of photo-detectors; the Silicon Photomultipliers (SiPMs), whose advantages are very attractive for space applications. A study of SiPMs characteristics will be presented and the Readout design system proposed and validated through an FPGA.

2. **Keywords:** CubeSat, Mission, photo-detector, payload, silicon photomultiplier, Readout, FPGA.
3. **Development methodology**

From a methodological point of view, the proposed research work is based on two main parts where the first aims to the study of the space mission based on a satellite which is placed in the line of CubeSats, while the second part is the study of the payload to be integrated on the satellite to ensure the mission.

4. **Objectives of the thesis**

The main objectives set for this thesis are given below:

- Understand development methods of a space project
- Acquire the technology and skills necessary for space engineering
- Promote research in the space field
- Make space scientific exploration accessible to universities
- The study of SiPMs technology
- The implementation of the associated reading electronics of SiPMs
- Flight experimentation of SiPMs never tested in orbit
- Characterization of their behavior in space for future operations

5. Thesis writing plan

The research work for this thesis results in a thesis manuscript of approximately 111 pages, where the main works can be found spread over 4 chapters given as follows:

The first chapter "CubeSats, missions and standards" is devoted to the study of the phases of a space mission and the standards applied to them, the study of the CubeSat concept, its architecture and its various specifications are also detailed.

The work of the second chapter "Preliminary design of the CubeSat mission" concerns the mission analysis through the study of the orbitography via the STK simulation software to know the trajectory of the satellite and the different accesses. A preliminary study on the CubeSat platform is described, we will find the choice of the proposed structure, all the subsystems selected as well as the mechanical modeling which allows the study of different configurations and the identification of possible mechanical constraints.

The fourth chapter “Simulations and reading of SiPMs signals” presents the possible methods of reading signals from SiPMs and the most suitable method for a space application based on CubeSat. The simulation of the electrical model of the device is presented as well as of the readout circuit. Processing by FPGA card is also carried out using a signal generator as a physical replacement for the SiPM.

6. Simulation results / Realizations

In the research work of this thesis the results concerning the following points were achieved:

Choice of orbit and Constraints: Justifies the choice of the orbit according to the purpose of the proposed mission, as well as the identification of the appropriate orbit.

Orbit simulation: The STK software was used to visualize the Keplerian orbit of the Nanosatellite and represent the footprint of the satellite and the three-dimensional view of the orbit around the earth as well as the various accesses.

Preliminary sizing of the CubeSat: which is justified by the choice of our structure .

Simulation of the electrical model of SiPM: The simulation work presented in this thesis makes it possible to simulate the response of a SiPM in amplitude and pulse format using schematization and simulation software (Orcad capture + Pspice). A simulation study on the effects of reading resistance on linearity and fall time is also presented in the thesis.

Analog reading electronics: In this part we simulated the analog circuit in figure all by justifying the choice of the amplification method and the choice of the discriminator instead of the ADCs

Application of measurement modes on FPGA: this application concerns counting modes as well as pulse width measurement.

7. Publications

Scientific publications published

Y.M. Belkacem, B. Benadda, M. Benaissa, “Preliminary design and simulation of SiPM device operation for a potential CubeSat radiation detector”, Telecommunications and Radio Engineering (TRI), vol.78, Issue18: 1671-1680, 2019.

National-International Communications

Y. M. Belkacem, M. Benaissa,, B. Benadda “CubeSat mission to study the behavior of SiPMs in space, 5th week of technology, Institut of technology, U.C.B.B.A.T, 23-24 April 2018.

Y. M. Belkacem, B. Benadda, M. Benaissa, “A survey of Readout Asics for near infrared atmospheric measurement unsing Nanosatellites”, 3rd Conference on advances in mechanical engineering (ICAME), Istanbul,, 19-21 December 2017.

مهمة كوبيسات لدراسة سلوك SiPMs في الفضاء

1. سياق الرسالة

في السنوات الأخيرة، يشهد الكيوبسات في فئة السواتل النانوية تطوراً كبيراً، وهو يلعب دوراً متنامياً في التطبيقات الفضائية، بينما يقلل من التكاليف ووقت التصميم. ومن ثم، يمكن أن يكون هذا النوع من السواتل أداة هامة لتقييم التكنولوجيات الجديدة وتقدير معايير أدائها لعملياتها أو استخداماتها في المشاريع الفضائية الكبيرة.

وفي هذا المنظور، يقترح العمل الوارد في هذه الرسالة دراسة تتكون من استخدام قمر اصطناعي كيوبسات يحمل حمولة من الاختبار التكنولوجي لبعثة فضائية مقبلة.

في البداية، تتألف الدراسة من تحليل *شامل* للبعثة الساتلية وتحديد خصائص الكيوبسات من خلال تحديد أبعاد هذا الساتل و دراسة كل نظام فرعي ضروري لضمان البعثة.

وفي الجزء الثاني من هذه الرسالة، يهمنا دراسة قراءة الحمولة الصافية التي ستشمل الجيل الجديد من أجهزة الكشف الضوئي المضخمات الضوئية السيليكونية(SiPMs) التي تتسم بميزات تجعلها مؤهلة للتطبيقات الفضائية. بعد ذلك سيتم تقديم دراسة عن خصائص هذه الاجهزة وتصميم القراءة المقترحة والمصادق عليها بجها ز FPGA

2. كلمات المفاتيح: كيوبسات،بعثة،حمولة،أجهزة الكشف الضوئي،المضخمات الضوئية السيليكونية ،قراءة، FPGA

3. منهجية التطوير

من وجهة نظر منهجية ، يتركز العمل البحثي المقترح على جزأين رئيسيين حيث يهدف الأول إلى دراسة المهمة الفضائية أساس قمر صناعيكيوبسات بينما الجزء الثاني هو دراسة الحمولة المراد دمجها على القمر الصناعي لضمان المهمة

4.أهداف الرسالة

الأهداف الرئيسية المحددة لهذه الرسالة موضحة أدناه

* فهم طرق تطوير مشروع الفضاء

* كسب التكنولوجيا والمهارات اللازمة لهندسة الفضاء

* تعزيز البحث في الميدان

* جعل الاستكشاف العلمي للفضاء في متناول الجامعات

* دراسة تقنية SiPMs

* تنفيذ إلكترونيات القراءة المصاحبة

* توصيف سلوك SiPMs التي لم يتم اختبار ها في الفضاء

5.خطة كتابة الرسالة

ينتج عن العمل البحثي لهذه الرسالة أطروحة من حوالي 111 صفحة ، حيث يمكن العثور على الأعمال الرئيسية موزعة على 4 فصول على النحو التالي:

يخصص الفصل الأول" الكيوبسات ،المهام ،المعايير " لدراسة مراحل المهمة الفضائية والمعايير المطبقة عليها ، ودراسة مفهوم الكيوبسات وهيكله ومواصفاته المختلفة.

يتعلق عمل الفصل الثاني "التصميم الأولي لبعثة الكيوبسات" بتحليل المهمة من خلال دراسة المدار عبر برنامج STK لمعرفة مسار القمر الصناعي ومنافذ الوصول المختلفة. تم وصف دراسة أولية لمنصة الكيوبسات، وسنجد اختيار الهيكل وجميع الأنظمة الفرعية المختارة وكذلك النمذجة الميكانيكية التي تسمح بدراسة التكوينات المختلفة وتحديد القيود الميكانيكية المحتملة.

يقدم الفصل الثالث "نظام كشف السيليكون والمضاعف الضوئي SiPMs" كاشف أشعة جاما لشرح مبدأ التشغيل الخاص به وتحديد مكونات سلسلة الكشف ، وقد تم وصف الأنواع التقليدية من أجهزة الكشف التي يمكن استخدامها ، لإفساح المجال لوصف تفصيلي للتقنية الجديدة لمضاعفات السيليكون الضوئية SiPMs

يعرض الفصل الرابع "محاكاة وقراءة إشارات SiPMs" الطرق الممكنة لقراءة الإشارات والطريقة الأكثر ملاءمة لتطبيق فضائي يعتمد على الكيوبسات تم عرض محاكاة النموذج الكهربائي للجهاز بالإضافة إلى دائرة القراءة ، كما تتم المعالجة بواسطة بطاقة FPGA باستخدام مولد إشارة كبديل

6.نتائج المحاكاة / الإنجازات

تحققت في العمل البحثي لهذه الرسالة النتائج المتعلقة بالنقاط التالية:

اختيار المدار والقيود: يبرر اختيار المدار حسب الغرض من المهمة المقترحة ، وكذلك تحديد المدار المناسب للقمر الصناعي.

محاكاة المدار: تم استخدام برنامج STK لتصوير مدار للقمر الصناعي النانوي وتمثيل بصمة القمر الصناعي والمنظر ثلاثي الأبعاد للمدار حول الأرض بالإضافة إلى المداخل المختلفة.

الأبعاد الأولية للقمر الصناعي النانوي: وهو ما يبرره اختيار هيكلنا.

محاكاة النموذج الكهربائي لـ SiPM: يتيح عمل المحاكاة المقدم في هذه الأطروحة إمكانية محاكاة استجابة SiPM باستخدام

برنامج التخطيط والمحاكاة (Orcad capture + Pspice)

كما تم تقديم دراسة محاكاة لتأثير مقاومة القراءة على الخطية ووقت السقوط في الأطروحة.

إلكترونيات القراءة التناظرية: في هذا الجزء قمنا بمحاكاة الدائرة التناظرية في الشكل كل ذلك من خلال تبرير اختيار طريقة التضخيم واختيار أداة التمييز بدلاً من ADCs

تطبيق أنماط القياس على FPGA**:** يتعلق هذا التطبيق بالعد وكذلك قياس عرض النبضة.

7.المنشورات

المنشورات العلمية المنشورة

ي.م.بلقاسم ، ب. بن عدة ، م. بن عيسى،" التصميم الأولي ومحاكاة تشغيل جهاز SiPM لكاشف إشعاع محتمل للكيوبسات"، هندسة الاتصالات والراديو، المجلد 78 ، العدد 18: 1671-1680 ، 2019

المداخلات الوطنية والدولية

ي.م.بلقاسم ، ب. بن عدة ، م. بن عيسى،" مهمة CubSat لدراسة سلوك SiPMs في الفضاء " ، الأسبوع الخامس للتكنولوجيا ، معهد التكنولوجيا،م.ج.ب.ب.ع.ت ، 23-24 أبريل 2018

ي.م.بلقاسم ، ب. بن عدة ، م. بن عيسى،" استبيان حول Readout Asics لقياس الغلاف الجوي بالأشعة تحت الحمراء باستعمال السواتل النانوية " ، المؤتمر الثالث حول التطورات في الهندسة الميكانيكية، اسطنبول، 19-21 ديسمبر2017