

#### REALISATION D'UN BANC DE TEST DU SYSTEME D'ALIMENTATION ELECTRIQUE

#### Résumé

|   | Date | Signature |
|---|------|-----------|
| Préparé par :<br>Niriaina ANDRIAMADY<br>Thomas CLEMENCEAU<br>Sohaib DAHHANE<br>Zakariya RAHMOUNI<br>Rabie DIB |      |           |
| Approuvé par :  |      |           |
| Pour application :  |      |           |



Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite

# HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

| Ed. | Rev. | Date       | Modifications        | Visa |
|-----|------|------------|----------------------|------|
| 1   | 0    | xx/xx/xxxx | Création du document |      |
|     |      |            |                      |      |
|     |      |            |                      |      |

## Diffusion

| Liste de diffusion | Restreint | Non restreint |
|--------------------|-----------|---------------|
| Equipe IGOSAT      |           | Non restreint |
|                    |           |               |
|                    |           |               |



Satellite

# TABLES DES MATIERES

- 1. Présentation du contexte et des objectifs
- 2. Panneau solaire
  - 2.1. Présentation du sous-système
  - 2.2. Test courbes caractéristiques et rendement
  - 2.3. Test influence de l'éclairement
  - 2.4. Test influence de la température
  - 2.5. Remarques et ouverture
- 3. Régulateur MPPT
  - 3.1. Présentation du sous-système
  - 3.2. Test tension de sortie constante
  - 3.3. Test puissance maximale disponible et rendement
  - 3.4. Ouverture
- 4. Module BMS et batteries
  - 4.1. Présentation du sous-système batterie
  - 4.2. Présentation du sous-système module BMS
  - 4.3. Test du « seuil de coupure sous-charge »
  - 4.4. Test de la « disjonction décharge »
  - 4.5. Test de la « disjonction température »
  - 4.6. Remarque sur l'équilibrage des éléments
  - 4.7. Test de la « disjonction charge »
  - 4.8. Remarque sur la consommation de la carte du module BMS
  - 4.9. Montage générateur + module BMS + batteries + charges
  - 4.10. Protocole de communication RS485
  - 4.11. Conclusion et ouverture
- 5. Convertisseurs
  - 5.1. Présentation du sous-système
  - 5.2. Design de la carte électronique
  - 5.3. Ouverture
- 6. Conclusion et ouverture
- 7. Rubrique contacts



# 1. PRESENTATION DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS

Le nanosatellite IGOSat, dont le lancement est prévu en 2017, possède des composants appelés charges utiles qui réalisent les missions / études pour lesquelles le nanosatellite est conçu. Les résultats sont transmis à la station sol et analysés par l'ordinateur de bord.

Pour assurer ces missions et cette transmission de l'Espace vers la Terre, le nanosatellite nécessite un certain apport en énergie. Le système d'alimentation électrique est prévu à cet effet. Sa fonction se résume en trois parties :

- produire de l'énergie
- stocker de l'énergie
- et la distribuer aux autres sous-systèmes

Comme tout satellite, l'énergie est générée par des panneaux solaires, au nombre de 13 pour le cas d'IGOSat avec 2 cellules solaires par panneau, qui transforment les photons en énergie électrique. Une batterie permettra à la fois de stocker le surplus d'énergie créé par les panneaux, et de délivrer l'énergie nécessaire à la charge utile lorsque les panneaux ne suffisent pas. Un système de régulation permet d'équilibrer tout ceci, comme l'indique le schéma ci-dessous :





Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite

Il s'agit d'un système critique, car il doit répondre en permanence aux besoins en énergie du nanosatellite, auquel cas celui-ci ne fonctionnera plus. Il est donc nécessaire d'effectuer des tests fonctionnels, ainsi que des tests de résistance aux conditions spatiales. Ces tests se feront d'abord sur chaque sous-système, puis sur l'assemblage de tout le système d'alimentation. En effet, l'idée est dans un premier temps de tester les performances de chacun des sous-systèmes et de valider leur fonctionnement, puis dans un second temps assembler les composants pour tester l'ensemble de l'architecture électrique.

Pour tous ces tests, nous disposons d'un panneau solaire InGaP/GaAs/Ge, d'une plaque test contenant le régulateur MPPT SPV1040, de 4 batteries LiFePO<sub>4</sub> accompagnés du module BMS, puis des convertisseurs LTC3113. Nous avons donc divisé le travail en 4 parties dans un premier temps, correspondant à ces 4 sous-systèmes.

## 2. PANNEAU SOLAIRE

## 2.1. PRESENTATION DU SOUS-SYSTEME

Les panneaux solaires sont la seule source d'énergie du nanosatellite. En effet, sous éclairement, ils se comportent comme un générateur et ils convertissent les photons lumineux en énergie électrique. Il y aura sur le satellite 13 panneaux solaires, chacun composé de 2 cellules solaires.



Le nanosatellite sera placé à une altitude de 650 km, c'est-à-dire à l'orbite LEO. A cette altitude, l'éclairement du soleil est de 1367W/m2. La surface fonctionnelle du panneau fait 60,36cm2, donc la puissance reçue par le panneau est de 1367x0,006036 = 8,25W.

Nous disposons d'un panneau pour effectuer nos tests.



• Fonctionnement d'un panneau solaire

Le matériau qui compose une cellule solaire est un semi-conducteur, qui, lorsqu'il est éclairé, crée de l'énergie. Ceci est dû au principe d'Absorption de la lumière du Soleil : lorsqu'un photon d'une énergie hv frappe le matériau semi-conducteur, il excite un électron (on dit qu'il passe de la « bande de valence » à la « bande de conduction ») qui ainsi participe à la conduction. Il faut cependant que ce photon soit suffisamment énergétique pour que ce phénomène se produise. Ce seuil énergétique s'appelle le gap, noté Eg, et ce gap est spécifique à chaque matériau.



Il se trouve que dans toute cellule solaire, ce matériau contient deux zones : la zone P, riche en électrons, et la zone N, riche en trous. La cellule est donc une photodiode qu'on l'appelle alors « jonction PN ». Sous éclairement de cette jonction PN, des paires électrons/trous seront créées et ensuite séparées par un champ électrique interne. Le courant ainsi généré circule dans un circuit extérieur grâce à des contacts métalliques. Les électrons récupérés pourront donc alimenter un dispositif électrique en sortie du panneau solaire. Sous éclairement, la photodiode se comporte donc comme un générateur.

Les cellules photovoltaïques du projet IGOSat sont des cellules « triple jonction », c'est-à-dire qu'il y a trois matériaux différents, qui sont ici InGaP, GaAs, et Ge, chacun étant sous forme d'une jonction PN et ayant un gap différent. L'avantage de cette richesse en matériau est de pouvoir capter plus de photons, correspondant à un plus grand spectre lumineux, et ainsi obtenir un meilleur rendement.





Le schéma ci-dessus montre l'étendue du spectre solaire que nos panneaux peuvent absorber grâce aux trois types de matériaux.

• Caractéristiques électriques théoriques

Dans un premier temps, il nous faut étudier les caractéristiques électriques mentionnées dans les datasheets. Nous avons la datasheet de la cellule solaire, et du panneau. La capture d'écran ci-dessous concerne les caractéristiques de la cellule solaire triple jonction d'Azurspace, à une température de 28°C et pour un éclairement de 1367 W/m2 c'est-à-dire l'éclairement que recevra le panneau en orbite LEO :

|          | Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | X-X-XX      | X-XXXX | XXXX                 |
|----------|--|---------------------------|-------------|--------|----------------------|
| Line and | gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date : | Date : | XX-XX-XX<br>Page : 8 |

| Electrical Data (SCA)   |   |       |        |       |       |  |  |  |
|---|---|-------|--------|-------|-------|--|--|--|
|   |   | BOL   | 2,5E14 | 5E14  | 1E15  |  |  |  |
| Average Open Circuit Voc                                      | [mV]  | 2690  | 2560   | 2514  | 2468  |  |  |  |
| Average Short Circuit Isc                                     | [mA]  | 519.6 | 517.1  | 514.3 | 501.3 |  |  |  |
| Voltage at max. Power V <sub>mp</sub>                         | [mV]  | 2409  | 2277   | 2229  | 2191  |  |  |  |
| Current at max. Power Imp                                     | [mA]  | 502.9 | 499.2  | 493.4 | 477.6 |  |  |  |
| Average Efficiency ŋ <sub>bare</sub> (1367 W/m <sup>2</sup> ) | [%]   | 29.3  | 27.6   | 26.7  | 25.4  |  |  |  |
| Average Efficiency ŋ <sub>bare</sub> (1353 W/m <sup>2</sup> ) | [%]   | 29.6  | 27.8   | 26.9  | 25.6  |  |  |  |
| Standard: CASOLBA 2005 (05-20MV1, etc); Spe                   | Standard: CASOLBA 2005 (05-20MV1, etc); Spectrum: AMO WRC = 1367 W/m <sup>2</sup> ; T = 28 °C |       |        |       |       |  |  |  |

La première ligne correspond aux valeurs de fluence, c'est-à-dire d'irradiation. Nous ne nous intéresserons donc dans un premier temps qu'à l'efficacité du panneau sans irradiation, c'est-à-dire la colonne BOL : « beginning of life ».

Nous utilisons les valeurs encadrées pour tracer la courbe caractéristique courant-tension de la cellule solaire. Une caractéristique courant-tension d'une cellule solaire est une courbe représentant le courant généré par la cellule en fonction de la tension V générée par la présence d'une charge, c'est-à-dire d'un circuit extérieur à alimenter. Les trois points principaux de la courbe sont : le courant de court-circuit c'est-à-dire sans charge, la tension à vide c'est-à-dire sans courant, et le point optimal (Vpm,Ipm) correspondant au maximum de puissance que la cellule peut générer.

| Tension V (V) | Courant I (A) |
|---------------|---------------|
| 0             | lsc = 0,5196  |
| Vmp = 2,409   | Imp = 0,5029  |
| Voc = 2,69    | 0             |

| Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | (X-X-XX     | X-XXXX      | XXXX                 |
|--|---------------------------|-------------|-------------|----------------------|
| gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date : | Date :<br>: | XX-XX-XX<br>Page : 9 |



Il s'agit maintenant de tracer l'équivalent pour le panneau entier.

Nos panneaux solaires contiennent deux cellules solaires reliées en série. D'après nos recherches, ce branchement en série implique que le courant de court-circuit lsc du panneau est le même que pour la cellule solaire seule, et que la tension de circuit ouvert Voc du panneau vaut le double de celle de la cellule seule. La datasheet nous donne les coordonnées (Vmp,Imp) du point manquant, correspondant au point optimal :

| Parameter         | Condition                  | Min  | Тур | Max  | Unit |
|-------------------|----------------------------|------|-----|------|------|
| Solar Cell string | Full sunlight in LEO       |      |     |      |      |
| - Voltage         | Optimal voltage            | 4.64 |     | 4.84 | V    |
| - Current         | Current at optimal voltage | 490  |     | 508  | mA   |
| - Power           | Maximum power              | 2270 |     | 2400 | mW   |
| - Effeciency      | -                          | 29.8 | 30% | 30.2 | %    |

Nous rassemblons les valeurs du panneau dans le tableau ci-dessous, en faisant l'hypothèse que les valeurs de la datasheet du panneau ont été prises à la même température que pour la cellule solaire, c'est-à-dire 28°C :



Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite

| Réf. : IGOSAT-X | X-X-XX | X-XXXX | XXXX      |
|-----------------|--------|--------|-----------|
| Edition :       | 1      | Date : | XX-XX-XX  |
| Révision : 0    | Date   | :      |           |
|                 |        |        | Page : 10 |

| Tension V (V)         | Courant I (A)         | Puissance (W)          | Efficacité (%)    |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| 0                     | lsc = 0,5196          | VxI = 0                | P/Preçue = 0      |
| Vmp = 4,74 +/- 0,1    | Imp = 0,499 +/- 0,009 | Pmax = 2,335 +/- 0,065 | ŋmax = 30 +/- 0,2 |
| Voc = 2 x 2,69 = 5,38 | 0                     | VxI = 0                | P/Preçue = 0      |

Nous pouvons ainsi tracer les caractéristiques théoriques courant-tension et puissance-tension du panneau solaire :







# 2.2. TEST COURBES CARACTERISTIQUES ET RENDEMENT

La puissance fournie par un panneau dépend de la charge du circuit qu'il alimente. Or, dans le projet IGOSat, il existe plusieurs charges utiles, demandant des tensions différentes, et qui ne fonctionneront pas forcément en même temps, donc la charge totale va varier. Il est donc important de voir l'influence de la présence de charges sur les performances du panneau, et voir jusqu'à quel point, pour un éclairement donné, le panneau est-il capable d'alimenter les charges.

Nous avons donc pour premier objectif de tracer les courbes caractéristiques expérimentales courant-tension et puissance-tension du panneau solaire pour un même éclairement, et vérifier que l'on peut atteindre les 30% de rendement mentionnés dans la datasheet (cf précédemment), à la puissance maximale.

• Appareillage

Nous disposons pour cela :

- d'un simulateur de lumière solaire
- d'un capteur de puissance
- de plusieurs résistances de charge allant de 10 à 50 ohms ?
- et de deux multimètres.

Dans un premier temps, il nous faut régler l'éclairement envoyé par le simulateur solaire. Pour cela nous devons tourner manuellement le bouton qui fait varier l'intensité de l'éclairement. Pour plus de précision, nous positionnons un capteur de puissance sous l'éclairement du simulateur solaire, et obtenons ainsi la valeur de l'éclairement en W/m2 sur le puissance-mètre.

L'idée est d'étudier les performances du panneau solaire en simulant l'éclairement qu'il va recevoir une fois envoyé dans l'espace. L'idéal serait donc d'éclairer le panneau à 1367 W/m2, valeur de l'éclairement en orbite LEO. Cependant, le simulateur solaire ne permet pas d'atteindre cette valeur. En éclairant la totalité du panneau, il ne peut aller que jusqu'à environ 340 W/m2.

• Protocole expérimental

Nous réalisons le montage suivant : une charge de 5 ohms en parallèle d'un générateur, un ampèremètre en série, un voltmètre en parallèle de la charge.

| The first of the f | Ionospheric and<br>gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Réf. : IGOSAT-X<br>Edition :<br>Révision : 0 | XX-X-XX<br>1<br>Date | X-XXXX<br>Date :<br>: | XXXX<br>XX-XX-XX<br>Page : 12 |
|--|---|--|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
|  |   |  |                      |                       |                               |



Protocole expérimentale : Nous réglons le simulateur solaire à 340W/m<sup>2</sup> grâce au puissancemètre, ce qui correspond au maximum d'éclairement que peut générer le simulateur solaire en éclairant la totalité du panneau de dimension 9,8cm x 9,8xm. Pour cet éclairement fixe, nous faisons varier la charge et relevons pour chaque valeur de charge le courant et la tension avec les multimètres.

• Exploitation des résultats

Grâce aux valeurs de tension U et de courant I mesurées avec les multimètres, nous pouvons tracer la caractéristique courant-tension du panneau. L'incertitude des appareils de mesure entraîne une marge d'erreur pour la tension de +/- 0,1V et de +/- 0,002A pour le courant. Nous pouvons aussi tracer la caractéristique puissance-tension en calculant P=UxI (avec une incertitude sur P de +/- 0,02W), et le rendement en fonction de la tension avec le rendement correspondant à P/Preçue.

Les courbes obtenues ont bien les caractéristiques d'une diode photovoltaïque. Pour une résistance de 30 ohms, nous obtenons bien les 30% de rendement attendus.

| Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | X-X-XX    | X-XXXX      | XXXX                  |
|--|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|
| gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date | Date :<br>: | XX-XX-XX<br>Page : 13 |



Dans un premier temps, le panneau capte assez d'énergie pour alimenter les charges. Au bout d'un moment, la demande des résistances de charge est supérieure à ce que génère le panneau à cet éclairement, donc il y a une chute de courant.



| Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | Х-Х-Х>    | x-xxxx      | XXXX                  |
|--|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|
| gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date | Date :<br>: | XX-XX-XX<br>Page : 14 |

La puissance fournie par le panneau augmente linéairement avec la tension jusqu'à un maximum correspondant au maximum de puissance que le panneau peut fournir à cette éclairement.



Le rendement maximum est de 29,8% (+/- 1%), ce qui correspond dans la datasheet au rendement minimum théorique avec un éclairement en orbite LEO. C'est donc satisfaisant sachant que nous ne sommes qu'à 340 W/m<sup>2</sup>.

#### 2.3. TEST INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT

Les courbes précédentes ont été effectuées sous un éclairement de 340W/m<sup>2</sup>. Les conditions spatiales font que le nanosatellite ne sera pas éclairé tout le temps de la même façon. Nous décidons donc d'étudier l'influence de l'éclairement sur l'efficacité du panneau en refaisant les tests précédents mais cette fois-ci sous un éclairement de 233W/m<sup>2</sup>, correspondant au minimum d'éclairement que peut générer le simulateur solaire. Nous nous attendons à ce que plus le panneau est éclairé, plus il est efficace.

| Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | х-х-х>    | (X-XXXX     | XXXX                  |
|--|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|
| gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date | Date :<br>: | XX-XX-XX<br>Page : 15 |

Résultats : Les courbes ci-dessous nous montrent, comme nous nous y attendions, que l'efficacité augmente avec l'éclairement.









A 233 W/m2, le rendement maximal est de 29,1%. A 340 W/m2, le rendement est de 29,8%.

## 2.4. TEST INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

Les conditions spatiales font que le nanosatellite sera soumis à des températures extrêmes. Les panneaux solaires, constituant la façade extérieure du nanosatellite, seront donc les composants les plus exposés à ces variations de températures. D'après la datasheet, le panneau a une "operating temperature" de -40 à +85°C. Nous avons donc jugé important de vérifier leur performance sous d'autres températures que la température ambiante.

Nous disposons pour cela, en plus du matériel utilisé dans les tests précédents, d'un congélateur alimentaire, que nous a prêté l'UFR STEP.

Protocole expérimental : Nous avons donc laissé, pendant 2h, le panneau solaire dans ce congélateur, et l'avons ressorti pour refaire les tests de rendement.

Résultats : Nous obtenons ainsi la comparaison des courbes caractéristiques du panneau à température ambiante : 20 à 25°C, et à basse température : 5 à 10°C.











Nous constatons que rendement est un peu meilleur à froid, cependant l'écart n'est pas flagrant. Il faudrait refaire le test avec une plus grande différence de température pour bien voir son influence sur le rendement. A température ambiante, nous avons un rendement de 29.1%+/-0.2%, et à basse température nous avons un rendement de 29.6%+/- 0.2%. Les résultats sont donc concluants.

#### 2.5. REMARQUES ET OUVERTURE

Les performances du panneau solaire correspondent bien à celles mentionnées dans la datasheet.



• Résistance aux températures

Les tests de température pourront être approfondis, avec de plus grandes différences de température, pour simuler l'environnement spatial et vérifier l'"operating temperature". L'UFR Sciences du Vivant sera peut-être utile pour des tests en plus basses températures. Des tests en haute température pourront compléter ces derniers.

• Résistance aux radiations

Le panneau, une fois dans l'espace, sera soumis à des radiations qui influent sur sa performance. En effet, la datasheet de la cellule solaire spécifie que plus la cellule est irradiée, moins elle est efficace : l'efficacité à 1367 W/m2 passe de 29,3% sans irradiation à 25,4% avec une irradiation de de 1<sup>E</sup>15 MeV, soit une baisse d'environ 4% par MeV. La courbe ci-dessous trace l'efficacité de la cellule solaire en fonction de la fluence c'est-à-dire de l'exposition aux radiations, à partir des valeurs de la datasheet.



• Résistance aux débris spatiaux

Les panneaux peuvent aussi être confrontés à des chocs mécaniques dus à des débris spatiaux. Un test de Charpy serait intéressant pour mesurer la résistance à ces chocs. En effet, ce test consiste à frapper le matériau (perpendiculairement au plan du matériau) avec une sorte de marteau, avec une force préalablement fixée ou qui augmente au fur et à mesure, de façon à



mesurer la valeur de la force pour laquelle le choc influence négativement sur la performance du matériau.

Cependant, ce test est destructif et nécessite donc de synthétiser une plaque test ayant la même composition que la cellule solaire.

## 3. REGULATEUR MPPT

## 3.1. PRESENTATION DU SOUS-SYSTEME

• Explication du mode MPPT

Nous avons vu dans la partie panneau solaire que le rendement dépend de l'éclairement. Le régulateur MPPT, le SPV1040 dans le cas d'IGOSat, permet de soutirer le maximum de puissance que peut générer le panneau solaire. En effet, l'objet du régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est de se placer en permanence côté panneau solaire à la tension la plus optimale afin de tirer les meilleures performances des panneaux photovoltaïques. En plus de fournir une augmentation d'énergie à une installation, il optimise la charge de la batterie et prolonge sa durée de vie. Le régulateur MPPT est capable d'adapter la tension fournie par le panneau pour l'aligner à la tension que la batterie peut recevoir.

Le gain quotidien obtenu grâce à un régulateur MPTT bien conçu est de 20 à 30% (en fonction des conditions d'ensoleillement et de température). Les coordonnées du point MPPT de fonctionnement optimal (V MPPT, I MPPT) ne sont pas fixes, elles dépendent de : la température, de l'éclairement et de la technologie MPPT.

Avec le régulateur MPPT, la production du panneau devient donc indépendante de l'état de charge de la batterie et est optimisée en permanence en fonction des conditions environnementales (ensoleillement et température).

Les mesures sont faites à une fréquence élevée, de plus, la transformation de tension se fait avec peu de perte. La technologie MPPT offre donc un gain appréciable de l'ordre de 20% à 30%, sachant que les gains les plus importants sont obtenus lorsque la batterie est déchargée et lorsque la température est basse.

|   | Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | X-X-XX    | x-xxxx      | XXXX                  |
|---|--|---------------------------|-----------|-------------|-----------------------|
| CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>CO<br>C | gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date | Date :<br>: | XX-XX-XX<br>Page : 21 |

Sur la figure ci-dessous, le gain de puissance obtenu grâce à un régulateur MPPT est représenté par la surface en bleu foncé. En bleu clair, la surface représente la production obtenue sans régulateur MPPT.



• Schéma de la plaque test

Pour effectuer nos tests, nous disposons d'une plaque test, fournie par STMicroelectronics. Le régulateur MPPT SPV1040 a le schéma suivant :



Un autre composant (cf Partie 4) s'occupe de la charge de la batterie. Nous ne nous intéresserons donc, pour les tests, qu'à l'interface panneau solaire (PV+, PV-) et l'interface (VLOAD+, VLOAD-).



## 3.2. TEST TENSION DE SORTIE CONSTANTE

Le but de ce test est de vérifier que quel que soit l'éclairement du panneau solaire, le régulateur MPPT délivre une tension constante. Cette fonction du SPV1040 est importante car le nanosatellite doit toujours être alimenté et ne doit donc pas dépendre de l'éclairement.

Nous allons donc mesurer la tension de sortie du régulateur MPPT en fonction de l'éclairement / de la puissance reçue par le panneau.

Nous disposons pour cela :

- d'une plaque test du mode MPPT du SPV1040 fournie par STMicroelectronics
- d'un panneau solaire InGaP/GaAs/Ge d'AzurSpace
- d'un simulateur de lumière solaire accompagné de son capteur de puissance lumineuse
- d'un oscilloscope

Protocole expérimental : Le panneau solaire, modélisé par un générateur, est placé en entrée du régulateur MPPT c'est-à-dire à l'interface (PV+,PV-), et est éclairé par le simulateur solaire. Afin de modéliser la variation de l'éclairement reçu par le panneau, nous faisons varier la valeur de l'éclairement entre les valeurs limites du générateur solaire pour lesquelles le panneau est entièrement éclairé : de E=105 à E=366 W/m<sup>2</sup>. Pour plusieurs valeurs d'éclairement, nous surveillons la tension de sortie du MPPT avec un oscilloscope, modélisé ci-dessous par un voltmètre, branché en sortie du régulateur c'est-à-dire à l'interface (VLOAD+,VLOAD-).



| Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | X-X-XX      | X-XXXX | XXXX                  |
|--|---------------------------|-------------|--------|-----------------------|
| gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date : | Date : | XX-XX-XX<br>Page : 23 |

Résultat : Le signal à l'oscilloscope oscille ; cela est dû aux différents composants du régulateur (capacité, inductance). Nous relevons donc les valeurs moyennes données par l'oscilloscope, avec une incertitude de +/- 0,2V correspondant à l'intensité des oscillations. Afin de tracer la tension de sortie en fonction de la puissance reçue, nous calculons pour chaque éclairement E l'équivalent en puissance reçue par le panneau de surface S :  $P = E \times S = E \times 60,36.10^{-4}$ .



Nous constatons que le régulateur MPPT délivre bien une tension constante quelque soit l'éclairement. Le test valide donc la constance de la tension de sortie.

## 3.3. TEST PUISSANCE MAXIMALE DISPONIBLE

La demande en énergie du nanosatellite peut être plus ou moins importante. Le but de ce test est de déterminer quelle est la puissance maximale disponible que peut délivrer le système panneau solaire + régulateur, et déterminer ainsi le rendement du régulateur MPPT.

L'idée est donc de brancher une charge au régulateur MPPT, et de regarder le moment où le régulateur n'est plus capable d'alimenter la charge, c'est-à-dire le moment où sa tension de sortie



chute.

Nous disposons pour cela :

- d'une plaque test du mode MPPT du SPV1040 fournie par STMicroelectronics
- d'un panneau solaire InGaP/GaAs/Ge d'AzurSpace
- d'un simulateur de lumière solaire accompagné de son capteur de puissance lumineuse
- d'un oscilloscope
- d'un ampèremètre

Protocole : De la même manière que précédemment, nous plaçons le panneau en entrée du régulateur MPPT, éclairé cette fois-ci à un éclairement fixe de 233 W/m<sup>2</sup>. Les composants du nanosatellite nécessitant un apport en énergie sont modélisés par une charge en sortie du régulateur MPPT. Nous commençons avec une grosse charge, 470 ohms, et la diminuons au fur et à mesur, en surveillant le courant avec l'ampèremètre et la tension à l'oscilloscope.



Résultat : Dans un premier temps, la tension reste constante, comme déterminé lors du précédent test. Le système répond donc bien à la demande de la charge utile. Mais au bout d'un moment, le système n'est plus capable de répondre au besoin de la charge : la tension de sortie du régulateur MPPT chute. La courbe ci-dessous représente les valeurs de tension de sortie mesurées en fonction de la charge appliquée.





Ce point de chute correspond à une charge de 75,3 ohms et une tension mesurée de 5,23V. La puissance maximale que peut débiter le régulateur à cet éclairement de 233 W/m<sup>2</sup> est donc de :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{5,23^2}{75,3} = 0,36W$$

Or à cet éclairement, la puissance reçue par le panneau ayant une surface fonctionnelle de 60,36cm<sup>2</sup> est de 1,4W. Le régulateur délivre donc 25,8% de ce que le panneau reçoit. Le panneau ayant lui-même à cet éclairement un rendement de 29,1%, on en déduit que le régulateur a un rendement de 88,8% par rapport à la puissance délivrée par le panneau.

## 3.4. OUVERTURE

Une autre manip' consisterait à vérifier que le régulateur MPPT soutire bien le maximum du panneau en modélisant le panneau par un générateur et une résistance en série :



Il faut trouver R1 et la tension E générée par le générateur à partir des données de la datasheet du panneau. R2 correspond à une charge pas trop importante.

Tension à vide du paneau : E = 5,38V (c'est la tension qui sera envoyée par le générateur). Courant de court-circuit : 0,52A. La pente de la droite U=f(i) créée par ces deux points est R1 = 10,3 ohms.

 $Pe = U^*i = (E - R^*i)^*i$ 

La puissance maximale est obtenue quand i = E / 2R donc à une tension de U = Ri = E/2. Puisque le régulateur MPPT soutire le maximum de puissance du panneau, la tension U mesurée en entrée doit être égale à E/2 = 5,38/2 = 2,69 V. Il faut vérifier cela en mettant un oscilloscope ou un voltmètre de façon à mesurer U.

#### 4. MODULE BMS ET BATTERIES

#### 4.1. PRESENTATION DU SOUS-SYSTEME BATTERIE

La batterie constitue la deuxième source d'énergie du nanosatellite. Elle stocke l'énergie en surplus fournie par les panneaux solaires c'est-à-dire lorsque la demande en énergie des charges utiles est inférieure à l'énergie créée par les panneaux, et délivre de l'énergie au nanosatellite lorsque l'énergie générée par les panneaux n'est pas suffisante pour alimenter les charges utiles.

| Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | X-X-XX      | X-XXXX | XXXX                  |
|--|---------------------------|-------------|--------|-----------------------|
| gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date : | Date : | XX-XX-XX<br>Page : 27 |

Toute batterie est composée de deux électrodes : une cathode et une anode, et d'un électrolyte. Dans le cas du projet IGOSat, il s'agit d'une batterie au lithium LiFePO<sub>4</sub>. La technologie au lithium consiste en une succession d'insertion/désinsertion d'ions Li<sup>+</sup> dans les électrodes, et leur diffusion à travers l'électrolyte.

Lorsqu'on branche une charge à la batterie, celle-ci lui fournit de l'énergie. Le schéma ci-dessous correspond à une batterie au lithium qui fournit de l'énergie à une charge utile. Dans ce cas, les ions Li+ diffusent de l'anode à la cathode, en envoyant des électrons dans le circuit à alimenter, et ces ions s'insèrent dans le réseau de la cathode LiFePO<sub>4</sub> selon l'équation FePO<sub>4</sub><sup>-</sup> + Li<sup>+</sup> + e<sup>-</sup>  $\rightarrow$  LiFePO<sub>4</sub>.



Le schéma ci-dessous correspond à une batterie en charge. C'est le phénomène inverse de la décharge : les ions Li<sup>+</sup> se détachent de la cathode selon l'équation LiFePO<sub>4</sub>  $\rightarrow$  Li<sup>+</sup> + e<sup>-</sup> + FePO<sub>4</sub><sup>-</sup>, ces ions diffusent jusqu'à s'insérer dans le réseau de l'anode alors que les électrons passent dans le circuit externe.



|           | Ionospheric and                        | Réf. : IGOSAT-X           | X-X-XX      | X-XXXX | XXXX                  |
|-----------|--|---------------------------|-------------|--------|-----------------------|
| THE STATE | gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Edition :<br>Révision : 0 | 1<br>Date : | Date : | XX-XX-XX<br>Page : 28 |

Nous pouvons voir avec le schéma ci-dessous l'évolution de la maille cathodique lors de cette charge, c'est-à-dire avec les ions lithium puis sans ces ions lithium (les boules noires sont les ions lithium, les octaèdres sont les  $FeO_6$ , et les tétraèdres les  $PO_4$ ):



L'insertion/désinsertion dans le réseau FePO<sub>4</sub> se fait via l'axe b.

Ces deux phénomènes décrivent le fonctionnement de la batterie. A noter que la batterie ne fera pas de cycles complets de charge/décharge ; les réseaux anodiques et cathodiques ne seront donc jamais totalement déficients en lithium.

## 4.2. PRESENTATION DU SOUS-SYSTEME BMS

Le module BMS permet d'effectuer des mesures en temps réel sur la batterie, et de monitorer la batterie en fixant des seuils limite au-dessus desquels le système se coupera de façon systématique. Ces seuils limite sont importants pour ne pas abimer les batteries, car en effet, les datasheets des batteries spécifient des seuils à ne pas dépasser :

|          | Ionospheric and<br>gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Réf. : IGOSAT-X<br>Edition :<br>Révision : 0 | X-X-XXX-XXXX<br>1 Date :<br>Date : | XXXX<br>XX-XX-XX<br>Page : 29 |
|----------|---|--|------------------------------------|-------------------------------|
| RECOMMEN | DED OPERATING CONDI                                       | TIONS:                                       |                                    |                               |

| Continuous Discharge (A)       | ≤3.2  |
|--------------------------------|-------|
| Pulse Discharge (A) 30 Seconds | 13    |
| Charge Current (A)             | ≤1.6  |
| Charge Voltage Cutoff (V)      | 3.65  |
| Discharge Voltage Cutoff (V)   | 2.50  |
| High Operating Temp (°C)       | 60    |
| Low Operating Temp (°C)        | 20    |
| MAXIMUM OPERATING CONDIT       | IONS: |
| Continuous Discharge (A)       | 12    |
| Pulse Discharge (A) 30 Seconds | 28    |

| Pulse Discharge (A) 30 Seconds | 28  |
|--------------------------------|-----|
| Charge Current (A)             | 3.2 |
| Charge Voltage Cutoff (V)      | 4.1 |
| Discharge Voltage Cutoff (V)   | 2.0 |

La photo ci-dessous présente une capture d'écran du logiciel Param :

| Param V1.1j   |   |   |                             |  | <u> </u>   |
|---|---|---|-----------------------------|--|--|
| ACCOMANNA   MARCHE     Lang.   COM 3   ARRET     Mesures Batterie   Identification   Batterie 1     Identification   Batterie 1   Etat     Etat   ON   ON     Courant   0.94   Ampères     Tension   11.56   Volts     Charge   2.8   Ah (93 %)     Capacité   3.0   Ah     Température   25.0   °C     Temps restant   177   Minutes | Logiciels<br>DIAG<br>SPY<br>100%<br>50% | Paramètres Batterie<br>Mode Discret<br>Disjonction Décharge<br>Disjonction Rapide<br>Disjonction Très Rapide<br>Disjonction Charge<br>Disjonction Température<br>Seuil de coupure Sous<br>Courant de charge | マ<br>マ<br>マ<br>マ<br>-Charge | 2.0<br>3.0<br>1.5<br>72<br>10.2<br>0.0 | Ampères<br>Ampères<br>Ampères<br>°C<br>% de Charge<br>Non Limité |
|   |   |   |                             |  |  |

La partie gauche, "Mesures Batterie", comme son nom l'indique, concerne les mesures que le module BMS effectue sur les batteries : le courant, la tension, l'état de charge selon la capacité des batteries (cette capacité est préalablement entrée manuellement sur le logiciel), la température de la carte, etc. L'état "ON" correspond à l'état normal de fonctionnement ; il passe à l'état "Disjoncté" en cas de souci détecté.



La partie droite, "Paramètres Batterie", correspond à des valeurs de seuils limites que l'utilisateur peut modifier pour monitorer les batteries, ou désactiver. Tout dépassement de seuil entraînera des "coupe-circuits internes" dans les batteries.

- "Disjonction Charge" : permet à l'utilisateur de fixer une valeur maximum de courant entrant au-dessus de laquelle le module BMS "coupe" les batteries.
- "Disjonction Décharge" : permet à l'utilisateur de fixer une valeur maximum de courant de décharge au-dessus de laquelle le module "coupe" les batteries.
- "Disjonction Rapide" : permet à l'utilisateur de fixer une valeur maximum de pulse de courant sortant au-dessus de laquelle le module "coupe" les batteries.
- "Seuil de coupure Sous-Charge" : permet à l'utilisateur de fixer un taux de charge minimum (en %), au-dessous duquel le module BMS "coupe" les batteries.
- "Disjonction Température" : permet à l'utilisateur de fixer une température seuil en °C audessus de laquelle le module BMS "coupe" les batteries.

Pour nos tests, nous disposons de ce module BMS, relié sous forme USB à l'ordinateur. La programmation de la carte est telle que le module nécessite le branchement de 4 batteries à l'interface batteries, mais cette carte sera optimisée plus tard pour être adaptée à une seule batterie ou deux, comme défini dans la phase de dimensionnement. Une interface puissance nous permet de brancher des charges ou un générateur. Les batteries utilisées sont des LiPo.



Nous branchons donc les 4 batteries à l'interface batteries et branchons le module BMS à l'ordinateur.



## 4.3. TEST DU « SEUIL DE COUPURE SOUS-CHARGE »

L'objectif est de vérifier le fonctionnement de la disjonction lorsque le système dépasse un seuil de coupure sous-charge fixé. Cette fonction est importante pour éviter une décharge profonde des batteries.

Nous disposons pour cela :

- du module BMS
- d'un ordinateur
- de 4 batteries LiFePO<sub>4</sub>
- de 10 résistances de charge de 56 ohms

Protocole expérimental : Les batteries étaient initialement chargées à 100%, ce qu'affiche bien le logiciel. Nous entrons manuellement dans le logiciel Param une valeur minimum de charge de 85% (seuil de coupure sous charge). Si l'on branche des charges au module BMS, les batteries sont censées se décharger pour fournir à ces charges l'énergie nécessaire. Le logiciel est censé stopper la décharge en coupant les batteries lorsque l'état celles-ci atteignent cette valeur de 85%. Nous plaçons donc 10 résistances de charge de 56 ohms chacune à l'interface puissance du module BMS.

Résultats : Les batteries se décharges progressivement avec un courant de décharge de 1,94A. Lorsque le taux de charge des batteries descend au seuil de coupure préalablement fixé (85%), le module BMS coupe bien les batteries. L'état passe de "ON" à "Disjoncté", le courant passe à 0A, et le taux de charge ne descend plus. La disjonction fonctionne.

## 4.4. TEST DE LA « DISJONCTION DECHARGE »

L'objectif est de vérifier que la disjonction décharge fonctionne lorsque le courant de décharge dépasse une valeur fixée. Cette fonction est importante pour éviter d'abîmer les batteries. La datasheet spécifie un courant de décharge (« continuous discharge ») à ne pas dépasser de 12 A, mais conseille de rester en-dessous de 3,2 A.

Nous disposons pour cela du même matériel que le test précédent.

Protocole expérimental : Nous plaçons 10 résistances de charge de 56ohms chacune à l'interface puissance du module BMS. Le BMS détecte un courant de 1,94A. Nous entrons alors la valeur



1,5A comme courant maximum de décharge. Normalement, comme le courant qui passe est supérieur au courant maximum que nous avons fixé, le module BMS doit automatiquement couper les batteries.

Résultats : C'est le cas, l'état passe de "ON" à "Disjoncté" et le courant passe à 0A. La disjonction fonctionne.

Suggestions : Il faudrait effectuer ce test avec une résistance variable que l'on ferait augmenter. Ainsi le courant demandé augmenterait aussi progressivement jusqu'à atteindre le courant de décharge maximum fixer, de façon à ce que l'on puisse voir précisément ce passage à l'état disjoncté.

Un test complémentaire consisterait à fixer une valeur de pulse de courant de décharge maximum (rubrique « disjonction rapide »), et de vérifier qu'en demandant un pulse de courant supérieur à cette valeur au module BMS depuis une charge variable, le module « coupe » les batteries.

# 4.5. TEST DE LA « DISJONCTION TEMPERATURE »

Cette fonction est utile pour prévoir une surchauffe de la carte. En effet, d'après la datasheet, le système batterie+chargeur ne doit pas dépasser 60°C, auquel cas les batteries ne seront plus dans leur « operating conditions » et donc ne fonctionneront plus.

Nous ne disposons pour cela du même matériel que précédemment.

De la même manière que précédemment, nous branchons des résistances de charge au module et un courant non nul apparaît. La température initiale détectée par le logiciel est de 24°C, correspondant à la température dans la pièce, et plus précisément la température de la carte située dans le module BMS. Nous fixons alors une température limite de fonctionnement de 5°C au-dessus de laquelle le sous-système doit être coupé. Et en effet, instantanément, l'état passe de "ON" à "Disjoncté" et le courant passe à 0A. La disjonction température fonctionne.

# 4.6. REMARQUE SUR L'EQUILIBRAGE DES ELEMENTS

La datasheet spécifie que le module BMS est capable d'équilibrer la charge entre toutes les batteries. Cette fonction n'est évidemment utile que si l'on met au moins 2 batteries, de façon à ce qu'aucune des batteries ne soit en surcharge ou en sous-charge par rapport aux autres.

Lorsqu'on branche 2 batteries au module BMS, celui-ci arrive à détecter la tension totale et l'état de charge. Une tension d'environ 6V est affichée avec un état de charge de 20%. L'ajout d'une troisième batterie ne modifie pas l'état de charge mais amène la tension à environ 9V. De même



lors de l'ajout d'une quatrième batterie où la tension est amenée à environ 12V.

Nous constatons donc que toutes les batteries ont le même état de charge, même après les charges et décharges partielles que nous avons effectuées précédemment. L'équilibrage des éléments fonctionne.

# 4.7. TEST DE LA « DISJONCTION CHARGE »

L'objectif est de tester le fonctionnement de la disjonction lorsque le courant de charge dépasse le seuil maximal fixé. Cette fonction est importante pour éviter une surcharge des batteries. La datasheet conseille un courant maximum de charge de 1,6 A mais le système peut supporter 3,2 A.

Nous disposons pour ce test :

- du module BMS
- d'un ordinateur
- de 4 batteries LiFePO<sub>4</sub>
- d'un générateur

Nous fixons un courant maximum de charge de 1,5A au-dessus duquel le module BMS devrait couper le système.

Nous branchons un générateur à l'"interface puissance" et envoyons dans un premier temps un courant de 1A, donc inférieur au seuil maximum fixé. Le module BMS affiche bien le passage de ce courant, et l'état du système est "ON".

Nous augmentons alors le courant délivré par le générateur jusqu'au seuil maximum de 1,5A. A ce moment, le logiciel passe de l'état "ON" à "Disjoncté", et le courant passe à 0A. La disjonction fonctionne.

#### 4.8. REMARQUE SUR LA CONSOMMATION DE LA CARTE DU MODULE BMS

En alimentant le module BMS avec une tension de 14V et un courant de 2,04A, c'est-à-dire une puissance de 28.56W +/-0.2W, le logiciel affiche une tension de 12,97V et un courant de 1,84A, soit une puissance de 23.86W +/-0.2W. Il y a donc une perte de 4.7 W +/-0.2W. La carte du module BMS dont nous disposons actuellement consomme donc beaucoup, comme nous l'a signalé le Directeur de l'entreprise Accuwatt qui nous fournit les batteries et le module BMS.



Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite

Ce problème sera réglé car nous allons recevoir une nouvelle carte optimisée, qui consommera donc moins. Cependant il sera intéressant, lors de la réception de cette nouvelle carte, de mesurer à nouveau la perte de puissance en comparant la puissance fournie à l'aide d'un générateur avec la puissance affichée par le module BMS.

## 4.9. MONTAGE : GENERATEUR + MODULE BMS + BATTERIES + CHARGE

Nous avons bien vérifié que lorsqu'on branche des charges à l'interface puissance, les batteries délivrent bien de l'énergie, et lorsqu'on branche un générateur pour envoyer de la puissance dans le module BMS, les batteries se chargent bien.

L'objectif ici est de vérifier que, selon la puissance générée par les panneaux solaires et les besoins de la charge utile, les batteries peuvent se comporter à la fois comme une deuxième source d'énergie si le nanosatellite demande plus d'énergie que ce que les panneaux génèrent, mais aussi comme un stock d'énergie lorsque la puissance générée par les panneaux est supérieure à l'énergie nécessaire pour le nanosatellite, et simplement comme une zone de passage si l'énergie générée par les panneaux correspond parfaitement aux besoins du nanosatellite.

Nous disposons pour cela :

- du module BMS
- d'un ordinateur
- de 4 batteries LiFePO<sub>4</sub>
- de 10 résistances de charge de 56 ohms
- d'un générateur

Protocole expérimental : A l'interface puissance, nous branchons alors à la fois des charges : 10 résistances de 56 ohms demandant un courant de 1,94A, mais aussi un générateur dont nous faisons varier le courant.



Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite



Nous commençons par un courant de 0A. Les batteries se déchargent et fournissent un courant de 1,94A.

Nous augmentons progressivement le courant d'entrée jusqu'à atteindre la même valeur que le courant demandé par les charges. Le logiciel affiche donc un courant de 0A et l'état de charge des batteries restent constant, car en effet ce que génère le générateur suffit à alimenter les charges, les batteries n'ont donc pas à délivrer de l'énergie.

Enfin, nous augmentons le courant d'entrée de façon à dépasser la valeur demander par les charges, et nous constatons que les batteries se chargent et que le logiciel affiche de nouveau une valeur de courant, mais de signe opposé à précédemment. En effet, les batteries stockent le surplus d'énergie générée.

Le système batteries + chargeur fonctionne donc bien.

#### 4.10. PROTOCOLE DE COMMUNICATION RS485

Lorsque le nanosatellite sera dans l'espace, il nous faudra une interface pour communiquer avec la carte BMS et ainsi monitorer les batteries de la même manière que nous l'avons fait précédemment avec le module BMS, mais à longue distance. Le protocole de communication choisi pour cela est le RS485.

Une interface doit être reliée au PC (« contrôleur »), et une autre interface est reliée aux batteries, chargeurs,... (« abonnés »). Il y a donc deux appareils nécessaires à la communication. La communication entre les deux interfaces se fait avec ou sans fil et la distance entre elles dépend des



appareils choisis. Dans notre cas, nous aurons besoin d'une communication sans fil pouvant dépasser 650km de distance.

Le « contrôleur » donne des ordres aux « abonnés », et les « abonnés » fournissent des données sur leur état au « contrôleur ».

Jusqu'à 16 abonnés sur un même réseau :

- 1 contrôleur au maximum
- 6 batteries au maximum (ici 1 ou 2 pour IGOSat)
- 4 chargeurs au maximum (ici 1 pour IGOSat)

Les abonnés communiquent en émettant une trame de 16,7 ms par seconde, composée de 16 caractères de 10 bits chacun (1 start, 8 bits (1 octet) de données (de B7 à B0) et 1 stop). Ces trames sont donc des messages binaires qui seront en temps réèl transmis vers la Terre. La transmission se fait en 9600 bauds (bits par seconde) de manière NRZ asynchrone : le bit 1 est un état significatif et le bit 0 un autre état significatif, il n'y a donc pas d'état intermédiaire. Le « contrôleur » reçoit les messages et les traite. Les algorithmes sont écrits en C++.

Consulter la documentation "AWT.RST.GE.221-06 (RS 485)" pour obtenir plus de détails sur les différents modes et états.

Il est très important pour la suite du projet de bien comprendre et de pouvoir réaliser la communication avec les batteries via le RS485. Ainsi, les différents tests de disjonction pourront être réalisés de la même manière que lorsque le satellite serait en orbite. Pour tout cela, il serait judicieux de prendre contact avec le Directeur d'Accuwatt, notamment en ce qui concerne les éventuels appareillages nécessaires en plus.

#### 4.11. CONCLUSION ET OUVERTURE

Le module BMS avec le logiciel de monitoring fonctionnent bien : les mesures affichées sont correctes et les disjonctions fonctionnent. A noter que lorsque le système passe à l'état disjoncté, il faut manuellement le remettre en marche quand le problème est réglé : cela ne se fait pas automatiquement.

Le reste du travail consiste maintenant à étudier le protocole de communication et attendre la livraison d'une nouvelle carte, qui sera optimisée et adaptée à une seule batterie, pour pouvoir faire des tests avec tout l'assemblage du système électrique.

Des tests de performance à froid pourraient être effectués pour les batteries. Ils consisteraient à refroidir les batteries (à -20°C idéalement, ce qui correspond à la température minimale de



fonctionnement de ces batteries), les brancher au module BMS, et voir si la capacité en Ah affichée sur le logiciel Param a changé ou non.

## 5. CONVERTISSEURS

## 5.1. PRESENTATION DU SOUS-SYSTEME

Les convertisseurs sont les derniers composants du système d'alimentation électrique avant les charges utiles. Il permettent donc d'adapter le courant qu'ils reçoivent au courant nécessaire à la charge utile, en l'augmentant ou en le diminuant.

Le nanosatellite aura 2 types de convertisseurs DC/DC : le LTC3113 et le LTC1153.

La tension d'entrée des convertisseurs sera de 4,8V. Le tableau ci-dessous résume les tensions de sortie que les convertisseurs devront fournir :

| Charge utile       | Tension à fournir |
|--------------------|-------------------|
| Scintillateur      | 5V                |
| Pointeur solaire   | 5V                |
| Carte télécom      | 6 ou 8,4V         |
| Magnétocoupleur    | 2,5V              |
| Ordinateur de bord | 3,3V              |
| GPS                | 3,3V              |

# 5.2. DESIGN DE LA CARTE ELECTRONIQUE

Apres avoir récupéré le rapport de stage de Sylvain. Le convertisseur LTC3113 qui a été testé s'est révélé inefficace et la plaque de test réalisée ne permettait pas d'obtenir la fonction voulue. Ceci est dû à l'éloignement des composants passifs et aux perturbations que subit le signal PWM induit par l'inductance des fils, d'où la nécessité de réaliser un PCB dédié aux tests. L'objectif du convertisseur LTC3113 est de générer une tension régulée aux différents sous-



Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite

systèmes selon le besoin.

Le montage du convertisseur LTC3113 retenu que nous avons modélisé en utilisant le logiciel KiCad est le suivant :



Les pins :

- Pin 1 et 2 (Vout) : Buck-Boost Output Voltage. A low ESR capacitor should be placed from VOUT to PGND.
- Pin 3, 4 et 5(Vin): Power Input for the Converter.
- Pin 6 : Signal ground.
- Pin 7 : Pulse Width Modulation/Burst Mode Selection Input.
- Pin 8 : Programs the Frequency of the Internal Oscillator.
- Pin 9 : Error Amp Output.
- Pin 10 : Feedback Voltage for the Buck-Boost Converter Derived from a Resistor Divider on the BuckBoost Output Voltage.
- Pin 11 : Active High Converter Enable Input.
- Pin 12,13 et 14 : Switch Pin Where Internal Switches A and B are Connected.
- Pin 15 et 16 : Switch Pin Where Internal Switches C and D are Connected.

Suite aux montages chargés que l'ancien stagiaire a réalisé, nous avons jugé intéressant d'effectuer un design informatique d'une carte électronique.

## La modélisation de la carte électronique en utilisant KiCad :

KiCad est une suite de logiciels libres de conception pour l'électronique permettant le dessin de schémas et la conception de circuits imprimés.

KiCad est un logiciel qui fonctionne avec la dimension réelle des composants électroniques, et à chaque composant KiCad associe une empreinte. Exemple : L'empreinte associée au LTC3113 est 16-lead TSSOP.

KiCad est composé des sous logiciels suivants :

kicad : le gestionnaire de projets ;

eeschema : l'éditeur de schémas ;



pcbnew : l'éditeur de circuits imprimés ;

cvpcb : l'utilitaire de sélection des empreintes physiques des composants utilisés dans le schéma ;

gerbview : le visualiseur de fichier Gerber ;

pcbcalculator : outil d'aide à la conception qui permet de calculer des valeurs de résistances, des largeurs de pistes... ;

Pour modéliser notre carte électronique nous avions la possibilité de créer directement le circuit imprimé par l'éditeur de schémas Pcbnew. En faisant ce choix nous étions confrontés à un problème des empreintes des composants (Nous n'arrivions pas à trouver tous les composants dont nous avions besoin pour la construction de notre circuit imprimé).

Pour résoudre ce problème, nous avons dessiné notre circuit en entier dans l'éditeur de schéma eeschema et l'avons exporté ensuite à Pcbnew. La figure ci-dessous montre le schéma construit :



Parfois, il y a quelque composants que nous n'avons pas réussi à trouver sur KiCad : c'est l'exemple du LTC3113. Nous avons donc procédé comme suit :

Nous avons créé un composant à 16 pins qui ressemble à mon LTC3113 et que nous l'avons modifié en utilisant l'éditeur de librairie, le composant que nous avons choisi est le LTC1594CS.

La figure ci-dessous montre comment nous avons pu éditer le pin 13 du LTC1594CS :

| Ionospheric and<br>gamma-ray<br>Observations<br>Satellite | Réf. : IGOSAT-XX-)<br>Edition :<br>Révision : 0 D   | X-XXX-XXXXXXXX<br>1 Date: XX-XX-XX<br>Date:<br>Page: 40   |
|---|---|---|
|   | 1 CHO CSMUX 13   2 CH1 CSADC 9   3 CH2 CLX 12   4 CH3 CLX 12   ad CH3 CLX 12   ad CH3 CLX 12   ad CH4 CH4 14   ad <th>Trikkescrum 127 milmöse<br/>ta iktescrum 127 milmöse<br/>ta iktescrum 127 milmötes<br/>tangsest 198 milmötes</th> | Trikkescrum 127 milmöse<br>ta iktescrum 127 milmöse<br>ta iktescrum 127 milmötes<br>tangsest 198 milmötes |
| Unité Convert Nom Numére Type<br>L nom //LSMUK 12 Latrie  | printer pour le Scheme<br>Visible   | UK Assule:  |

Apres avoir vérifié notre circuit et corrigé toutes les erreurs nous avons créé la Netlist. Le type d'erreurs que nous étions amené à résoudre est le suivant :

| <u>°</u> 27 🖆 🔚 🖛 👩 – E 💷 🔍 🗠 🖼 |  | _ |
|---------------------------------|--|---|
|                                 | ESchema ERC<br>RC Options<br>Rappot d'erreur ERC:<br>Nombre total d'erreurs: 3<br>Nombre de warnings: 3<br>Nombre de varnings: 3<br>Onthe de d'erreurs: 0<br>Créer fichier rappot ERC<br>Uste d'erreurs<br>ErrType(3): Pin connectée à d'autres pins, mais aucune pin pour la piloter<br>• @ (105,41 mm,140,97 mm): Pin 1 (power_in) du composant #PVKB01 non pilotée (Net<br>6).<br>ErrType(3): Pin connectée à d'autres pins, mais aucune pin pour la piloter<br>• @ (105,41 mm,109,22 mm): Pin 1 (power_in) du composant TOP_view1 non pilotée<br>(Net 8).<br>ErrType(3): Problème de conflit entre pins. Sévérité: erreur<br>• @ (81,28 mm,93,98 mm): Pin 1 (power_out) du composant #PVKB02 connectée à<br>• @ (105,41 mm,101,60 mm): pin 5 (output) du composant TOP_view1 (net 11). |   |
|                                 |  | - |
| 4                               |  | , |

Une fois la Netlist créée, il faut l'exporter au PCBnew. Nous associons ainsi à chaque composant une étiquette pour que nous puissions lire la Netlist en PCB.

La figure ci-dessous montre ce procédé de collage d'étiquette :

| Ionospheric and       | Réf. : IGOSAT-XX-X-XXX-XXXXXXXX |
|-----------------------|---------------------------------|
| gamma-ray             | Edition : 1 Date : XX-XX-XX     |
| Observations          | Révision : 0 Date :             |
| Satellite             | Page : 41                       |
| 중 🖄 🕸 🥘 🦊 🗢 🙀 🖉 📲 🛱 🛱 |                                 |

| 1     | C1 -      | 4/11 : C1          | 101                |
|-------|-----------|--------------------|--------------------|
| 2     | C2 -      | 680p : C1          | 2 C1-1             |
| 3     | C3 -      | 12p : C1           | 3 C2               |
| 4     | C4 -      | 47p : C1           | 4 SM0201_r         |
| 5     | C5 -      | 100u : C1          | 5 SM0402           |
| 6     | L1 -      | 2.2u : 2PIN_6mm    | 6 5M0402_c         |
| 7     | R1 -      | 90.9k : R1         | 7 SM0402_r         |
| 8     | R2 -      | 49.9 : R1          | 8 SM0603           |
| 9     | R3 -      | 158k : R1          | 9 SM0603_Capa      |
| 10    | R4 -      | 845k : R1          | 10 SM0603_Resistor |
| 11    | R5 -      | 6.49k : R1         | 11 SM0805          |
| 12    | SW2 -     | SW_PUSH : SW_PUSH  | 12 SM1206          |
| 13 TO | P_view1 - | LTC3113 : tssop-16 | 13 SM1206POL       |
|       |           |                    | 14 SM1210          |
|       |           |                    | 15 SM1210L         |
|       |           |                    | 16 SM1812          |
|       |           |                    |                    |

Et là, c'est une tout autre problématique qui s'impose : il s'agit de consulter la datasheet et de voir la véritable étiquette qui correspond à notre composant.

Prenons l'exemple de l'inductance : en consultant la datasheet nous constatons que les modèles d'inductance que nous devons choisir sont les suivants :

generally decreases with increased inductance.

| Table 1. Representative back boost ourrace mount mutetors |               |             |                       |   |  |  |  |  |  |  |
|---|---------------|-------------|-----------------------|---|--|--|--|--|--|--|
| PART<br>Number  | VALUE<br>(µH) | DCR<br>(mΩ) | MAX DC<br>CURRENT (A) | $\frac{SIZE (mm)}{W \times L \times H}$ |  |  |  |  |  |  |
| CoilCraft (www.coilcraft.com)                             |               |             |                       |   |  |  |  |  |  |  |
| MSS1048   | 2.2           | 7.2         | 8.4                   | $10 \times 10.3 \times 4$               |  |  |  |  |  |  |
| MSS1260   | 2.2           | 12          | 13.9                  | 12.3 × 12.3 × 6                         |  |  |  |  |  |  |
| SER1052   | 2.2           | 4           | 10                    | 10.6 × 10.6 × 5.2                       |  |  |  |  |  |  |
| Toko (www.toko.com)                                       |               |             |                       |   |  |  |  |  |  |  |
| D106C   | 2.4           | 7.7         | 10                    | 10.3 × 10.3 × 6.7                       |  |  |  |  |  |  |
| FDA1055   | 2.2           | 4.8         | 10.5                  | 11.6 × 10.8 × 5.5                       |  |  |  |  |  |  |
| FDA1254   | 2.2           | 4.5         | 14.7                  | 13.5 × 12.6 × 5.4                       |  |  |  |  |  |  |
| Cooper (www.cooperbussmann.com)                           |               |             |                       |   |  |  |  |  |  |  |
| HCP0703   | 2.2           | 18          | 14                    | 7×7.3×3                                 |  |  |  |  |  |  |
| HCP0704   | 2.3           | 16.5        | 11.5                  | 6.8×6.8×4.2                             |  |  |  |  |  |  |
| HC8   | 2.6           | 11.4        | 10                    | 10.9 × 10.4 × 4                         |  |  |  |  |  |  |
| TDK (www.component.tdk.com)                               |               |             |                       |   |  |  |  |  |  |  |
| VLF100040   | 2.2           | 7.9         | 8.2                   | 9.7 × 10 × 4                            |  |  |  |  |  |  |
| RLF12560  | 2.7           | 4.5         | 12                    | 13×13×6                                 |  |  |  |  |  |  |
| VLF12060  | 2.7           | 6.4         | 10                    | 11.7 × 12 × 6                           |  |  |  |  |  |  |

Table 1. Representative Buck-Boost Surface Mount Inductors

En regardant le MSS1048 sur internet, nous remarquons qu'il s'agit d'un composant avec un seul pin comme sur la photo :



Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite



Nous collons ainsi à l'inductance L1 l'étiquette correspondante.

Après avoir lu la Netlist, nous avons deux versions de notre PCB : la première est fausse parce que les étiquettes ne correspondent pas aux étiquettes citées dans la datasheet et la deuxième est plus avancée mais doit être comparée aux cartes modélisés par les autres stagiaires qui travaillent sur le projet.







Il reste à signaler que le pin qui donne en entrée un PWM qui permet de synthétiser notre signal cyclique n'est pas connecté. En effet nous avions deux choix : soit construire un signal triangulaire et le mettre en entrée d'un comparateur et récupérer le signal cyclique en sortie, ce qui n'est pas tout à fait facile, soit fabriquer un composant externe qui nous permettrait d'obtenir le rapport cyclique que nous cherchons et de le coller ensuite à notre LTC3113. Nous avons retenu ce dernier choix.

## 5.3. OUVERTURE

Le design sur KiCad est terminé, nous comptons faire fabriquer la carte pour pouvoir effectuer des tests. Les tests fonctionnels consisteront à mettre un générateur de tension en entrée de la plaque test LTC3113 envoyant 4,8 V au convertisseur, et simuler les composants à alimenter par des résistances de charge, dont les valeurs de charges seront déterminées selon les tensions théoriques mentionnées dans le tableau partie 5.1. Un oscilloscope ou un voltmètre sera branché en parallèle de la charge pour vérifier que la tension de sortie mesurée correspond à la valeur du tableau.





Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite

#### 6. CONCLUSION ET OUVERTURE

Panneau solaire : Nous avons validé le rendement maximal de 30% du panneau solaire. L'augmentation de l'éclairement joue en faveur de ce rendement. Des tests complémentaires en température ont pu démontrer que le rendement du panneau était légèrement supérieur à froid, cependant il serait intéressant d'effectuer des tests de température avec des écarts ambiante/froid et ambiante/chaud supérieurs (de 0 à +50°C par exemple) de façon à conclure plus précisément sur l'influence de la température sur l'efficacité du panneau.

Régulateur MPPT : Le sous-système repère bien le point optimal de puissance du panneau et délivre une puissance constante quel que soit l'éclairement du panneau. Il assure donc bien la fonction MPPT.

Batteries et module BMS : Les batteries assurent bien leur fonction de stockage d'énergie et de deuxième source d'énergie. La charge et la décharge via le module BMS fonctionnent, et ce module BMS permet aussi de prendre des mesures en temps réel sur les batteries et de programmer des disjonctions. Nous attendons la nouvelle carte.

Convertisseurs : Le design de la carte électronique test du convertisseur LTC3113 sur KiCad est terminée, nous attendons de pouvoir la faire fabriquer. Les tests associés consisteront à mettre en entrée une certaine tension via un générateur et des charges en sortie, et vérifier que le convertisseur adapte bien la tension d'entrée à la tension demandée par les charges.

Le fonctionnement général de chaque sous-système du dispositif d'alimentation électrique est validé, le reste du travail consistera surtout en l'assemblage de tous ces composants pour faire des tests sur le fonctionnement de tout le système d'alimentation.



# 7. RUBRIQUE CONTACTS

Cette rubrique permettra aux prochains étudiants d'avoir des contacts.

 Elèves EIDD du Groupe Alimentation électrique : Niriaina Andriamady, Chef d'équipe : Niriaina.Andriamady@gmail.com Thomas Clemenceau : thomas-clemenceau@hotmail.fr Zakariya Rahmouni : rahmouni\_zakariya@hotmail.fr Sohaib Dahhane : dahhane\_wac@hotmail.fr Rabie Dib : rabiedib@hotmail.com

M. Hubert Halloin, Responsable de l'Architecture électrique : hubert.halloin@apc.univ-paris7.fr

M. Marco Agnan, Chef de Projet d'IGOSat : agnan@apc.in2p3.fr

M. Damien Prêle, pour les régulateurs MPPT et les convertisseurs :prele@apc.in2p3.fr

M. Michel Combier, Directeur de l'entreprise Accuwatt qui fournit les batteries et le module BMS : michel.combier@accuwatt.fr