



ARCHITECTURE DU SYSTÈME DE BORD COMMANDANT LA CISAILLE D'UN AÉROSTAT LÉTAL

BUREAU D'ETUDE INDUSTRIEL
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

MIRC Frédéri - Intervenant CNES

BERSON Marin, KANE Ismaël, HOZJAN Thibaut, MARCHAL Matthieu,
AVOINE Paul, BALANÇA Maxime

Table des matières

I	Introduction	4
II	Glossaire	5
III	Documents applicables et de référence	6
IV	Architecture matérielle	7
IV.1	Architecture d'un aérostat non-légal	7
IV.1.1	Architecture globale du système de bord	7
IV.1.2	Architecture du calculateur	9
IV.1.3	Cisaille et sa commande	13
IV.1.4	Architecture du module de communication	15
IV.1.5	Architecture du module de positionnement	17
IV.1.6	Architecture de la batterie	18
IV.1.7	Module de réchauffage	21
IV.2	Étude de la panne avance sur un aérostat légal	24
IV.3	Étude de la panne retard sur un aérostat légal	26
IV.3.1	Répertoire des pannes possibles	26
IV.3.2	Solutions possibles pour l'architecture finale	27
V	Architecture Logicielle	29
V.1	Architecture générale	29
V.1.1	Criticité logiciel sur les processeurs	29
V.2	Diagrammes de séquences essentiels à la compréhension du système	30
V.2.1	Fonction critique de commande de la cisaille	30
V.2.2	Fonction de positionnement	32
V.2.3	Fonction de chauffage	32
V.3	Fonctions du microcontrôleur 1	32
V.3.1	UC1M1 : Commander interrupteur 1 Cisaille	32
V.3.2	UC2M1 : Commander Onduleur Cisaille	34
V.3.3	UC3M1 : Vérifier État Batterie	34
V.3.4	UC4M1 : Récupérer la position	35
V.3.5	UC5M1 : Envoyer Position	35
V.3.6	UC6M1 : Sécurité Fonction Chauffage	35
V.3.7	UC7M1 : Sauvegarder les télémessures	36
V.3.8	UC8M1 : Sauvegarder les anomalies	36
V.3.9	UC9M1 : Lecture des mémoires	36
V.4	Fonctions du microcontrôleur 2	37
V.4.1	UC1M2 : Commander interrupteur 2 Cisaille	37
V.4.2	UC2M2 : Commander Chauffage	37

VI Conclusion	38
VII Annexes	39
VII.1 Diagramme des UseCases	39
VII.2 Diagramme de séquence de la fonction commande cisaille	40
VII.3 AMDEC	40

I Introduction

Ce document est un compte rendu de nos études sur l'architecture du système bord d'un aérostat. Ce système de bord doit comporter trois fonctions et être autonome en énergie pour fonctionner correctement. La première fonction est la gestion de la séparation du ballon à la fin de la mission. Elle consiste à contrôler une cisaille pyrotechnique pour que celle-ci coupe le câble reliant la nacelle au ballon. La deuxième fonction est la communication avec les opérateurs au sol par des modems de communication utilisant les constellations Iridium et Inmarsat, et enfin la troisième est le positionnement via le GPS de l'aérostat. Pour assurer le bon fonctionnement de ce système, trois sous-fonctions nécessaires sont identifiées : Une fonction servant à maintenir le système à température minimal de -25°C et permettant d'assurer le bon fonctionnement des composants électriques, une fonction de stockage des données permettant de stocker les informations sur les anomalies ainsi que les données de télémétrie, et bien sûr la gestion d'une source d'énergie dédiée permettant l'autonomie énergétique du système tout au long de la mission.

Ce document est décomposé en deux parties. La première concerne l'architecture matérielle du système de bord pour l'aérostat. Elle définit les éléments qui composent le système de bord et comment ceux-ci sont protégés vis-à-vis des pannes avances et des pannes retard. La seconde partie présente l'architecture logicielle en définissant les différentes fonctions et leurs interactions avec les composants du système de bord de l'aérostat.

II Glossaire

GPS - Global Positioning System

AMDEC - Failure Mode Effects and Criticality Analysis

MODEM - Modulator-Demodulator

OS - Operating System

I/O - Input/Output

CAN - Controller Area Network

USB - Universal Serial Bus

I2C - Inter-Integrated Circuit

SPI - Serial Peripheral Interface

UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter

GPIO - General Purpose Input/Output

RAM - Random Access Memory

FRAM - Ferroelectric RAM

MRAM - Magnetoresistive RAM

SRAM - Static RAM

DRAM - Dynamic RAM

STT - Spin-Transfer Torque

MLI/PWM - Pulse Width Modulation

TNC - Terminal Node Controller

SAIF - Submeter Class Augmentation with Integrity Function

QZSS - Quasi-Zenith Satellite System

LNA - Low-Noise Amplifier

III Documents applicables et de référence

Documents applicables :

- (DA1) Règlement de sauvegarde de vol de l'activité "Ballons", volume 2, règles de conception et d'exploitation, RNC-CNES-R-ST-12-02, 03 juin 2013
- (DA2) Spécification assurance produit de la sous-direction "Ballons", BL-SPAP-00-88-CNES, 01 novembre 2022

Documents de référence :

- (DR1) *Data.Sheet.MP.176065.xlr* Rechargeable Li-ion cell, Document technique PDF, 31157-2-0418
Edition : Avril 2018
- (DR2) Davey Bickford Fiche technique amorce inflammateur électrique FT3- 5201 B03 indice C
- (DR3) BALLONS BPS et BSO - Mise à feu par décharge capacitive de la cisaille LXT C5025 avec initiateur DB 5201 B03, Denis DILHAN (Consulting and Training in Pyrotechnics and Pyroshocks)
- (DR4) *NEO-M8* Subtitle u-blox M8 concurrent GNSS modules, Data Sheet UBX-15031086, 05-Aug-2016
- (DR5) OGi Modem Hardware Guide T401, Version 05 Nov 2019, owned by ORBCOMM®
- (DR6) General Description of Model A3LA-R, Version 1.0 March 1st, 2012, <https://www.nalresearch.com/support/documentation-downloads/>
- (DR7) AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) matérielle du système bord d'un aérostat légal, February, 2024, (Voir annexe ou document joint à celui-ci)

IV Architecture matérielle

La description de l'architecture matérielle est composée de 3 sous-parties. La première présente les différents composants choisis pour un système de bord pour un aérostat non-légal, c'est-à-dire un aérostat qui ne comporte pas de risque mortel et donc aucun mécanisme ou système pour prévenir d'une potentielle panne. Cette partie explicitera également tous les outils choisis pour composer le système bord. La seconde partie étudiera, dans le cadre d'un aérostat légal, le cas de la panne avance et les solutions que nous avons choisies pour prévenir cette panne. Enfin, une partie examinera le cas de la panne retard et ses solutions, tout comme la panne avance. Dans l'étude des pannes, le système nécessite une robustesse à la défaillance d'un composant.

Ce document est accompagné d'une analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC).

IV.1 Architecture d'un aérostat non-légal

Cette première partie aborde une architecture dans le cadre d'un aérostat **non légal**. Pour pouvoir gérer les 3 fonctions principales et les 2 sous-fonctions de l'aérostat faisant partie de ce système de bord, nous avons défini plusieurs blocs qu'il est nécessaire d'avoir. Pour rappel les 5 fonctions que ce système de bord doit réaliser sont :

- Séparation de la charge utile et du ballon
- Localisation de l'aérostat
- Communication avec l'aérostat
- Maintien d'une bonne température de fonctionnement
- Stockage
 - Enregistrement des anomalies
 - Stockage des télémesures

Pour le bon fonctionnement de ces fonctions, il est impératif que le système soit autonome en énergie.

IV.1.1 Architecture globale du système de bord

L'architecture du système de bord est structurée en 5 parties qui seront développées plus tard :

- La cisaille

La cisaille pyrotechnique est l'actionneur qui va permettre de rompre le câble reliant la charge utile au ballon. Elle est commandée par le calculateur.
- Le module de positionnement

Le module de positionnement permet de géolocaliser le ballon à l'aide d'un modem et d'une antenne dédiée. Il transmet ces informations au calculateur.
- Le module de communication

Le module de communication sert à faire le lien entre le calculateur et les opérateurs afin de transmettre aux opérateurs des informations sur les états important de l'aérostat, il permet

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

aussi aux opérateurs de transmettre des commandes à l'aérostat sur certaines actions qu'il peut faire (exemple : séparation avec le ballon).

- Le module de chauffage

Le module de chauffage sert à chauffer tous les équipements présents dans la nacelle à une température supérieure ou égale à -25°C afin de garantir le bon fonctionnement des composants.

- Le calculateur

Il constitue le point central du module, c'est lui qui centralise toutes les informations, envoie les informations de commande et les ordres aux actionneurs, s'occupe de relayer les informations aux opérateurs via le module de communication, gère l'utilisation de la batterie et le chauffage, et stocke également les données nécessaires.

- La batterie

La batterie permet d'alimenter toutes les parties électriques des équipements présents sur la nacelle.

L'architecture globale du système est la suivante :

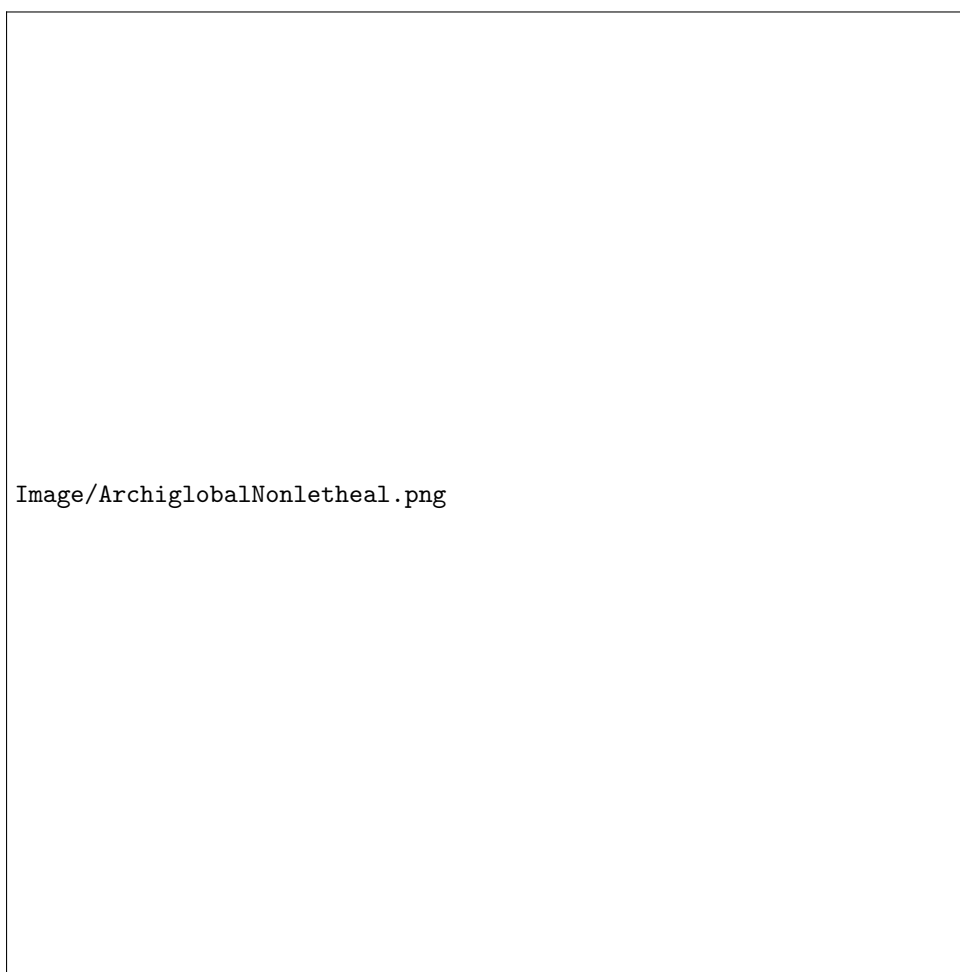


FIGURE 1 – Architecture simplifiée du système de bord d'un aérostat non-légal

IV.1.2 Architecture du calculateur

Le calculateur à pour base un microcontrôleur, ce microcontrôleur à accès aux 2 mémoires internes, il est en interface direct avec les module de communication et de positionnement, pour ce qui est de la commande du chauffage et de la cisaille il est interfacé avec des blocs puissances qui convertissent et modulent l'énergie nécessaire pour ces actionneurs en suivant la commande transmise par le microcontrôleur. Un bloc distribution d'énergie est nécessaire pour transformer l'énergie en provenance de la batterie et alimenter tous les autres blocs.

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

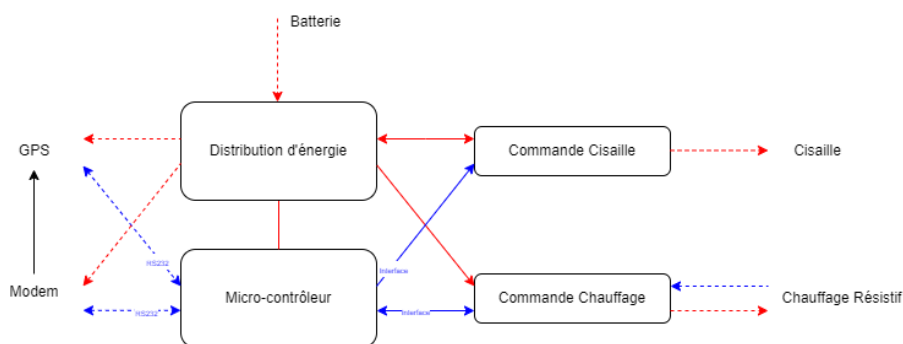


FIGURE 2 – Architecture du calculateur d'un aérostat non-légal

Microcontrôleur

Pour le microcontrôleur, nous avons fait le choix du NUCLEO-H743ZI. Il s'agit d'une carte microcontrôleur largement distribuée réalisée par STMicroelectronics. Cette carte est issue de la gamme STM32. Le microcontrôleur de cette carte est fait pour fonctionner entre -45 et 125 degrés celsius avec une protection contre les rayonnements ionisants.

Cette carte permet d'utiliser RTLinux en OS ou encore ZephyrOS et possède de nombreuses I/O comme des ports CAN, USB, UART, I2C, SPI et Ethernet. Il y a également une large gamme de GPIO.

Une autre carte qui peut-être utilisée est la STM32F7 qui est du même type avec des fréquences d'horloge plus élevées.

Stockage

Cette section traite des moyens de sauvegarde des Télémessures et des Anomalies.

Nous devons enregistrer les télémessures pour reconstituer le contexte et le suivi de vol après coup, permettant une étude et une analyse approfondies ultérieures. De plus, la sauvegarde des anomalies est nécessaire pour retracer l'état du système pendant la mission.

Le volume estimé de ces sauvegardes est d'environ **1 Go** pour les télémessures et **1 ko** pour l'historique des anomalies durant la mission. Par conséquent, le choix d'une mémoire associée aux microcontrôleurs doit prendre en compte les conditions de fonctionnement en vol, y compris les plages de températures. De plus, le composant choisi doit résister aux bits flips. En effet, en altitude, nous sommes exposés à des radiations de particules telles que des ions lourds ou des gerbes d'énergie résultant d'un effet avalanche, qui peuvent exciter les jonctions PN de nos thyristors composant l'espace de stockage et donc corrompre par moment les données des mémoires embarquées.

Ainsi, le composant choisi doit être testé pour sa sensibilité aux radiations dans les environnements de travail et les altitudes.

Le choix de la mémoire dépendra de plusieurs facteurs spécifiques à notre application, tels que les

exigences de stockage, la fréquence d'accès, la tolérance aux radiations, la consommation d'énergie, et d'autres contraintes. Puisque l'environnement inclut des conditions difficiles telles que l'altitude et les radiations, une mémoire FRAM (*Ferroelectric RAM*) pourrait être une option intéressante.

La MRAM et la FRAM sont deux technologies de mémoire non volatile qui présentent de nombreux avantages par rapport aux autres technologies de mémoire. Cependant, elles présentent également quelques différences importantes.

La FRAM, ou *Ferroelectric Random Access Memory*, est une technologie de mémoire non volatile qui utilise les propriétés ferroélectriques des matériaux pour stocker des données.

La FRAM est composée de cellules, qui sont des structures à deux couches, chacune constituée d'un matériau ferroélectrique et d'un matériau conducteur. Les deux couches sont séparées par une couche isolante. Le moment dipolaire électrique du matériau ferroélectrique détermine l'état de la cellule FRAM. Une polarité positive représente un bit 1 et une polarité négative représente un bit 0.

Pour écrire une donnée dans une cellule FRAM, on utilise un courant électrique pour inverser la polarité du moment dipolaire électrique du matériau ferroélectrique.

Pour lire une donnée dans une cellule FRAM, on utilise un courant électrique pour mesurer la polarité du moment dipolaire électrique du matériau ferroélectrique.

Voici alors ses propriétés :

- **Résistance aux radiations** : La mémoire FRAM est connue pour sa robustesse face aux radiations, un avantage critique dans des environnements spatiaux ou à haute altitude exposés à des radiations cosmiques.
- **Non volatilité** : La FRAM est non volatile, conservant les données même en cas de coupure d'alimentation, essentiel pour garantir la préservation des données critiques.
- **Vitesse** : La FRAM offre une vitesse d'écriture rapide, comparable à celle de la SRAM, bénéfique pour les applications nécessitant un accès rapide aux données.
- **Faible consommation d'énergie** : Comparée à certaines autres technologies de mémoire, la FRAM peut avoir une faible consommation d'énergie, important dans des applications où l'alimentation est limitée.
- **Durabilité** : La FRAM a une durée de vie d'écriture/effacement plus élevée par rapport à certaines autres mémoires, crucial pour des applications avec des cycles d'écriture fréquents.

Inconvénients potentiels :

- **Vitesse d'Écriture Limitée** : Bien que rapide, la FRAM peut ne pas être aussi rapide que la SRAM ou la DRAM dans certaines applications nécessitant un accès très rapide aux données.
- **Cycle d'Écriture Limité** : Bien que la durée de vie d'écriture/effacement de la FRAM soit généralement élevée, elle n'est pas illimitée. Cela peut être un inconvénient sur des missions de quelques jours.

- **Coût** : Les composants FRAM peuvent être plus coûteux à produire que d'autres types de mémoires, ce qui peut être limitant pour des applications nécessitant des coûts réduits.

Sur le même principe, la MRAM ou Magnetoresistive Random Access Memory, est une technologie de mémoire non volatile qui utilise les propriétés magnétiques des matériaux pour stocker des données.

La MRAM est composée de cellules MRAM, qui sont des structures à deux couches, chacune constituée d'un matériau ferromagnétique et d'un matériau non ferromagnétique. Les deux couches sont séparées par une couche isolante, où la polarité du moment magnétique du matériau ferromagnétique détermine l'état de la cellule MRAM.

Les deux technologies partagent de nombreuses similitudes, notamment :

Non volatilité : les données stockées dans la FRAM ou la MRAM sont conservées même en cas de coupure d'alimentation.

Vitesse : la FRAM et la MRAM sont des technologies de mémoire rapides, avec des vitesses d'accès comparables à celles de la SRAM.

Résistance aux radiations : la FRAM et la MRAM sont des technologies de mémoire résistantes aux radiations, ce qui les rend adaptées aux applications spatiales ou à haute altitude.

Cependant, il existe également quelques différences importantes entre les deux technologies :

Capacité : la capacité de la FRAM est généralement plus élevée que celle de la MRAM.

Coût : la FRAM est généralement moins coûteuse que la MRAM.

Choix de la Mémoire

FRAM (Ferroelectric RAM)

- **Avantages** : Non-volatilité, faible consommation d'énergie, bonne durabilité, et capacité modérée.
- **Utilisation avec RTLinux** : Suffisante pour gérer les opérations du système tout en offrant une capacité de stockage adéquate.
- **Utilisation avec ZephyrOS** : Excellente en raison de la faible consommation d'énergie et de la taille compacte.

MRAM (Magnetoresistive RAM)

- **Avantages** : Non-volatilité, résistance aux radiations, et vitesses d'accès rapides.
- **Inconvénients** : Coût plus élevé et capacité inférieure par rapport à la FRAM.
- **Utilisation** : Peut être envisagée pour des applications spécifiques nécessitant une résistance accrue aux radiations ou une vitesse d'accès plus rapide.

En considérant les exigences des deux systèmes d'exploitation et les caractéristiques de l'environnement de l'aérostat, la FRAM semble être le meilleur choix. Elle offre un bon équilibre entre capacité, durabilité, coût, et faible consommation d'énergie, ce qui est essentiel pour les systèmes embarqués dans des

aérostats létaux. La MRAM peut être considérée pour des scénarios nécessitant une meilleure résistance aux radiations et des vitesses d'accès plus rapides.

Modèles existants :

Microchip Technology propose des modules FRAM de la série M24C. Ces modules sont disponibles en capacités allant de 8 Ko à 1 Mo. Cypress Semiconductor propose des modules FRAM de la série IS25FR. Ces modules sont disponibles en capacités allant de 8 Ko à 128 Mo.

IV.1.3 Cisaille et sa commande

Concernant la cisaille pyrotechnique, nous avons comme objectif de la déclencher à distance. Pour se faire, il faut envoyer un signal d'énergie suffisante au bout d'un câble long de 20 mètres qui permet de déclencher l'initiateur qui coupe le câble et permet de séparer le ballon du reste de l'équipement.

Pour le moment ce qui est utilisé sur le système est un super condensateur en entrée du câble qui permet d'envoyer assez d'énergie pour qu'après les pertes par effet Joules dissipé dans le câble liant l'initiateur à la nacelle commande, l'initiateur se déclenche. Lors de la présentation du système, nous avons pu mettre en évidence que la mise en place d'un condensateur apporte de nombreux problèmes (Redimensionnement pour chaque type de ballon, complément de qualification du condensateur à chaque fois...). Il nous est alors venu que le problème source est la perte par effet joules.

Or, ce problème se retrouve dans de nombreux domaines et notamment dans le transport d'énergie. Pour régler ce problème de pertes énergétique, RTE utilise la haute tension. Il nous est alors venu l'idée qu'il était possible d'implémenter cette solution au sein de notre système. Mais plusieurs difficultés et contraintes sont alors apparus du fait de l'environnement d'utilisation.

- **Température :** Il faut que le système puisse fonctionner dans la nacelle à -30°C et au niveau de l'initiateur à -50°C.
- **Composants passifs :** Il faut qu'au niveau de l'initiateur il n'y ai pas de composant actif.

Ces deux limitations sont des limitations fortes mais peuvent être dépassés. La solution que nous avons trouvée est :

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

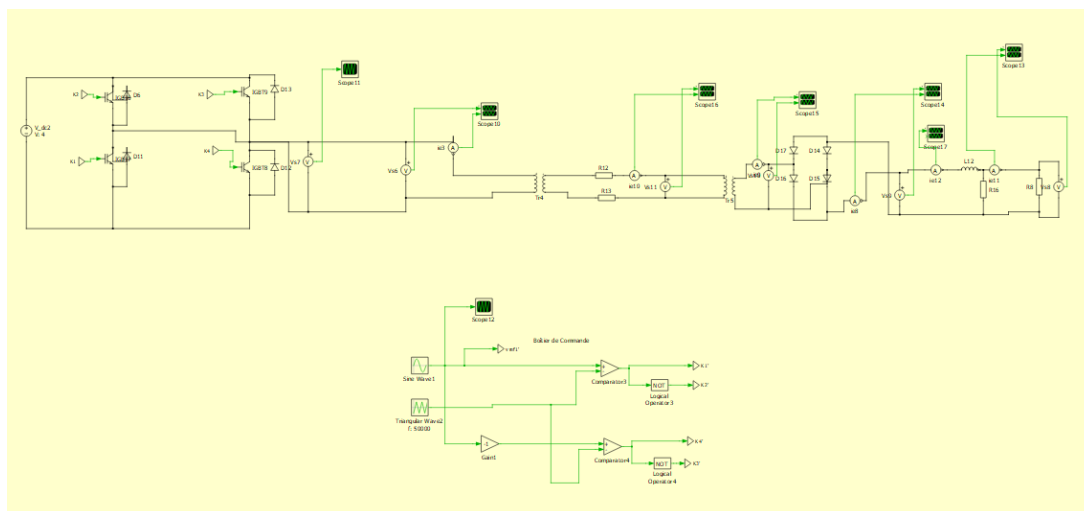


FIGURE 3 – Schéma PLECS de la commande de la cisaille pyrotechnique

Nous pouvons voir plusieurs parties sur ce schéma. Nous avons tout d'abord la source de tension qui représente la sortie DC/DC 5V (sortie utilisée par tous les appareils à notre disposition qui ont besoin d'être alimentés.). Ensuite, nous avons la mise en place d'un onduleur MLI. Cela nous permet d'avoir une composante alternative pour ensuite pouvoir faire monter la tension à l'aide d'un transformateur (qui ne fonctionne que sur les composantes alternatives). Nous avons ensuite le câble représenté par une résistance puis un nouveau transformateur pour abaisser la tension. Nous redressons ensuite le courant à l'aide d'un pont à diode, puis nous filtrons le courant afin d'avoir un signal continu qui permet de déclencher l'initiateur. Cette solution a plusieurs avantages, elle permet de ne pas avoir de condensateur dans le système et elle permet également de limiter les pertes thermiques. Nous avons pour réaliser ce schéma les valeurs pour les résistances, les transformateurs et la bobine, les valeurs suivantes : $N_{Transfo_1} = 75$, $N_{Transfo_2} = 1/75$, $R_{ligne} = R_{12} = R_{13} = 1W$, $R_{filtre} = 10W$ et $L_{filtre} = 418e^{-6}H$

Avec ces valeurs, nous obtenons les résultats suivants : avec une tension continue de 5 V au départ :

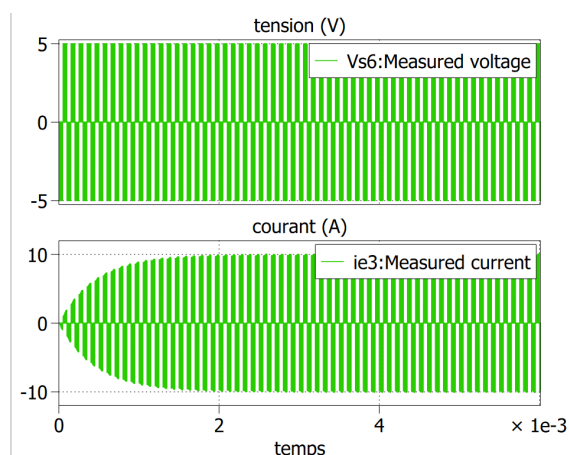


FIGURE 4 – Tension et courant après ondulation

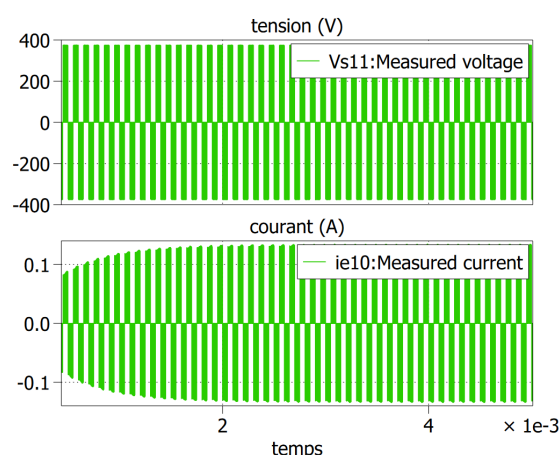


FIGURE 5 – Tension et courant dans le câble

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

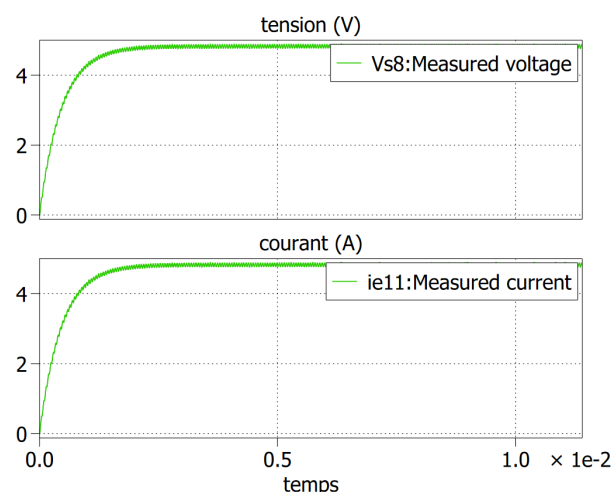


FIGURE 6 – Tension et courant au niveau de la cisaille

On peut alors observer qu'en simulation, le résultat à l'air de fonctionner et d'être cohérent. Bien que certaines difficultés sont à considérer comme l'utilisation de la haute tension dans le câble (400V). Nous allons par la suite trouver les composants sur le marché qui pourrait correspondre au produit présenté.

IV.1.4 Architecture du module de communication

Le module de communication est assuré par un modem satellitaire de communication qui doit être connecté à une antenne dédiée. Le cahier des charges demande d'utiliser des modems qualifiés pour l'environnement ballons et connu du CNES pour leur services passés. Deux références sont données : l'A3LA-R utilisant la constellation Iridium et l'OGi utilisant la constellation Inmarsat. Dans les 2 cas, le modem de communication doit être connecté à une antenne passive qui lui convient. Pour le modem A3LA-R une seule est disponible, la TNC Iridium antenna 50Ω, pour le modem OGi, il y a plusieurs choix possibles, une antenne standard ayant une élévation de minimum 20° et un gain de 4,5Bic et une antenne à élévation basse avec une élévation minimale de -15° et un gain de 2,5Bic.

Les 2 antennes du modem OGi Inmarsat peuvent permettre de s'adapter à la mission, la couverture Inmarsat étant gérée par 4 satellites géostationnaires, ce qui couvre mal les hautes latitudes. Ainsi une antenne à élévation basse peut être intéressante pour une mission qui serait haute en latitude afin de bien viser les satellites, cependant ayant un gain plus faible, pour une mission plus proche de l'équateur l'antenne standard pourrait suffire en termes d'élévation et donc il serait possible de profiter d'une meilleure qualité de communication grâce à son meilleur gain.

Dans tous les cas le module de communication est composé d'un modem d'une antenne passive. Le modem se trouve dans la même nacelle que la majeure partie de ce système, et l'antenne pouvant poser des problèmes d'interférence avec les signaux électriques des autres équipements, elle est placée à l'extérieur de la nacelle. Étant passive elle n'a pas besoin d'être chauffée. Son architecture est donc la suivante.

Architecture du système de bord d'un aérostat légal



FIGURE 7 – Architecture du module de communication

Les caractéristiques importantes de chacune des solutions sont les suivantes :

Caractéristiques	A2LA-R Iridium	OGi Inmarsat
Tension d'alimentation	2 modes [4, 5; 5, 5] ou [5; 32]	[5; 15]
Température de fonctionnement	de -30 à 70°C	de -40 à 85°C
Fréquence de réception	entre 1616 et 1626,5 MHz	entre 1518 et 1559 MHz
Fréquence d'émission	entre 1616 et 1626,5 MHz	entre 1626,5 et 1660,5 MHz
Dimensions et poids du modem	$102 \times 61 \times 24\text{mm}$, 198g	$70 \times 40 \times 9,5\text{mm}$, 20g
Altitude max d'utilisation nominale	6km	12,2km
Connecteur	Standard PCE	mini PCI
Messages en émission/réception	short-burst data 1890o / 1960o short-messaging 160 caractères	10 000o / 6399o
Débit	2.4ko/s	?
Puissance moyenne consommée	0,5W	1,1W
Système de localisation intégré	oui	oui

TABLE 1 – Comparaison des modems de communication

En comparant ces 2 solutions, il est possible de sortir certains avantages pour chacun des 2 modems. OGi Inmarsat possède les avantages :

- Il est plus compact et plus léger, ce qui peut être très important dans un système embarqué ;
- Son altitude maximale de fonctionnement est plus grande, même si dans les 2 cas elle est inférieure à l'altitude moyenne des ballons (40km), ces outils ont été sélectionnés dans le cahier des charges car ils ont déjà été utilisés en conditions réelles et donc testés à ces altitudes, cependant prendre un produit avec une altitude maximale plus proche peut nous permettre d'espérer une meilleure qualité de communication ;
- La taille maximale des messages est supérieure, cela ouvre plus de possibilité et potentiellement moins de perte de temps dans les protocoles de communication ;

quand au modem A2LA-R Iridium :

- Il possède une meilleure couverture satellite notamment au niveau des pôles ;
- Sa plage de fréquence de réception n'interfère pas avec la localisation GPS contrairement à OGi Inmarsat ;

- Il consomme moins d'énergie.

Les 2 modems ont leurs avantages et inconvénients mais en considérant que la consommation d'énergie est certainement dérisoire en comparaison de celle du module de chauffage, qu'un aérostat n'est pas un système nécessitant un positionnement instantané et qu'il est possible d'attendre la fin d'une réception avant de recalculer la position et enfin en considérant que l'antenne à basse élévation peut compenser la moins bonne couverture satellite du modem Imsarsat, à en choisir qu'un des 2, OGi Inmarsat semble plus adéquat.

IV.1.5 Architecture du module de positionnement

Solution choisie : u-blox NEO-M8

Avantages : Le NEO-M8M est optimisé pour des applications sensibles aux coûts, tandis que le NEO-M8N/M8Q offre les meilleures performances et une intégration RF plus facile. Le NEO-M8N, en particulier, garantit des performances élevées à des niveaux de consommation d'énergie réduits. De plus, le NEO-M8N est évolutif grâce à une mémoire flash interne permettant des mises à jour futures du firmware.

Caractéristiques GPS : Les modules NEO-M8 sont conçus pour recevoir et suivre les signaux L1C/A émis à 1575.42 MHz par le système de positionnement global (GPS). Ils offrent également des fonctionnalités de système d'augmentation telles que le signal SAIF du système QZZS couvrant le Japon et l'Australie, le signal L1 de IMES au Japon, et la correction différentielle GPS (D-GPS) conformément à la spécification RTCM 10402.3. Il est associé à une antenne (gain entre 15 à 50 dB) qu'on choisie passive ou active selon l'amplificateur LNA. Le module est alimenté en 3.3V et tire un courant maximum avoisinant les 50 mA. L'acquisition de la position de l'aérostat peut se redonder de part la plage de constellations accessibles (GNSS : GPS, Galileo, BeiDou, Glonass, ..).

Fonctions additionnelles :

- **Odomètre :** Le module NEO-M8N fournit des informations sur la distance parcourue au sol en mètres.
- **Data Logging :** Le module peut être utilisé dans des applications de journalisation des données, stockant en continu les informations de position, de vitesse et de temps dans une mémoire flash SQI embarquée. Les données, y compris la distance de l'odomètre, peuvent être téléchargées ultérieurement pour une analyse approfondie ou une conversion vers un outil de cartographie.

Gestion de l'Alimentation : La technologie u-blox M8 offre une architecture économe en énergie, avec un convertisseur DC/DC intégré pour réduire la consommation d'énergie, et des modes de fonctionnement configurables pour optimiser la performance ou la consommation d'énergie selon les besoins.

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

Cette section détaille les caractéristiques et avantages du module NEO-M8, mettant en lumière son adéquation pour la fonction de positionnement dans l'aérostat. Ces fonctionnalités contribuent à la fiabilité du système de bord, en particulier dans des scénarios critiques où la précision du positionnement est cruciale.

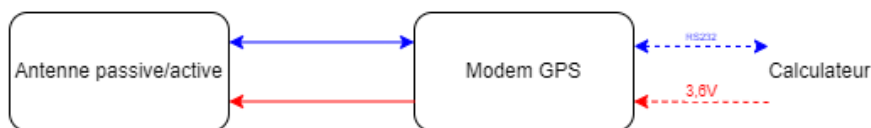


FIGURE 8 – Architecture du module de positionnement GPS

IV.1.6 Architecture de la batterie

Pour réaliser l'architecture de la batterie, nous allons utiliser les différentes datasheet mise à notre disposition pour trouver la puissance utilisée par tous les appareils du système. Et nous en déduirons ensuite la tension et donc le nombre de cellule nécessaire en série et en parallèle pour la batterie. On obtient alors le tableau ci-dessous.

Éléments	GPS (NEO) avec antenne	Inmarsat	Iridium	Carte électronique	Chauffage
Tension(V)	3 V	5 V -13 V	4-5,5V/5-32V	5V	/
Intensité (A)	50 mA	1 - Sleep : 2-23mA 2 - GPS acquisition : 150 mA 3 - Sattellite com receive : 170 mA 4 - Transmit : 2000 mA	1 - Standy : 80 mA 2 - Data call : 350 mA 3 - During transmit : 1 400 mA	300 mA	
Puissance (W)	0.15 W	1 - 0.13 W 2 - 0.83 W 3 - 0.9 W 4 - 11 W	1 - 0.4 W 2 - 1,75 W 3 - 7 W	1,5 W	15 W

On remarquera que nous ne prenons pas en compte le système de la cisaille dans nos calculs car la consommation de ce module se fera sur un temps très court et avec une puissance qui n'est pas suffisante pour être regardé ici. Il faudra seulement s'assurer de prendre une marge sur la puissance disponible par le pack de batterie pour que la consommation en pic, avec la cisaille puisse être atteint facilement. De même, on négligera pour la suite toutes les pertes dû à la conversion de puissance.

Ce tableau nous donne l'intensité PIC des composants.

On regarde maintenant l'utilisation moyenne pour chaque composant. :

Le GPS avec antenne fonctionne en continue donc : $P_{\mu GPS} = 0.063W$

L'antenne Inmarsat fonctionne en transmission 20ms toutes les secondes. Le reste du temps elle se placera en receive. Cela nous donne :

$$P_{\mu Inmarsat} = P_{transmit Inmarsat} * 20/1000 + P_{receive Inmarsat} * 980/1000 = 1,102W = 1,1W \quad (1)$$

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

De même on obtient pour l'antenne iridium :

$$P_{\mu Iridium} = P_{transmit_Iridium} * 20/1000 + P_{standby_Iridium} * 980/1000 = 1,102W = 0.532W \quad (2)$$

On a pour la carte électronique une consommation continue d'où :

$$P_{\mu carteElec} = 1.5W \quad (3)$$

Et enfin la puissance moyenne pour le chauffage nous est donnée par le cahier des charges qui nous dit que nous avons un rapport cyclique de 15% d'où :

$$P_{\mu Chauffage} = 0.15 * 15W = 2.25W \quad (4)$$

Ce qui nous donne finalement, pour les consommations moyenne :

Elément	GPS (NEO) avec antenne	Imnsarsat	Iridium	Carte électronique	Chauffage
Puissance moyenne	0.063 W	1.1 W	0.532 W	1.5 W	2.25 W

Finalement, on obtient avec notre architecture qui prend en compte la panne avance et la panne retard (Veuillez consulter la Figure 13 page 22 pour plus de détails).

La puissance instantanée pour le système 1 est alors donnée par :

$$P_{systeme1} = P_{GPS} + P_{Inmarsat} + P_{CarteElec1} + P_{CarteElec2} + P_{Chauffage} = 27,7W \quad (5)$$

Et pour le système 2 :

$$P_{systeme2} = P_{GPS} + P_{Iridium} + P_{CarteElec1} + P_{CarteElec2} + P_{Chauffage} = 23,7W \quad (6)$$

Et la puissance moyenne que doit fournir le pack de batterie 1 au système composé du module de communication Inmarsat est alors donnée par :

$$P_{\mu systeme1} = P_{\mu GPS} + P_{\mu Inmarsat} + P_{\mu CarteElec1} + P_{\mu CarteElec2} + P_{\mu Chauffage} = 6.413W \quad (7)$$

Et pour le système 2

$$P_{\mu systeme2} = P_{\mu GPS} + P_{\mu Iridium} + P_{\mu CarteElec1} + P_{\mu CarteElec2} + P_{\mu Chauffage} = 5.845W \quad (8)$$

Nous allons choisir, pour notre batterie, une tension V_{bus} qui dépasse la tension nécessaire pour l'Iridium. En effet il est plus efficace d'abaisser la tension que de l'élever, et cela apporte dans un deuxième temps moins de problème pour notre système (condensateur ...).

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

Nos cellules ont pour caractéristiques :



Electrical characteristics	
Typical capacity [at C/5 rate, +25°C, 2.5V cut-off] ⁽¹⁾	6.8 Ah
Nominal voltage	3.65 V
Nominal energy	24.8 Wh
Recommended maximum discharge current ⁽²⁾	Continuous 14.0 A (-2C rate) Pulses 27.0 A (-4C rate)
Physical characteristics [sleeved cell]	
Thickness ⁽³⁾	19.6 mm
Width	60.1 mm
Height (including terminals)	65.2 mm
Typical weight	~150 g
Volume (including terminals)	0.068 l
IEC cell designation	INP20/61/66
Operating conditions	
Typical cut-off voltage	2.5 V
Charging method	Constant current/Constant voltage
Charging voltage	4.2 ± 0.05 V
Maximum continuous charge current ⁽⁴⁾	6.8 A (1C rate)
Operating temperatures ⁽⁵⁾	Charge -30°C to +60°C Discharge -35°C to +60°C
Storage & transportation temperatures ⁽⁶⁾	Recommended +10°C to +30°C Allowable -40°C to +60°C

⁽¹⁾ Can vary depending on temperature and discharge rate.
⁽²⁾ Can vary depending on temperatures. Consult Saft.
⁽³⁾ At beginning of life, 100% State-of-Charge. Can increase with temperature during battery lifetime.
⁽⁴⁾ For optimised operation below 0°C consult Saft.

FIGURE 9 – Caractéristiques d'une cellule de la batterie

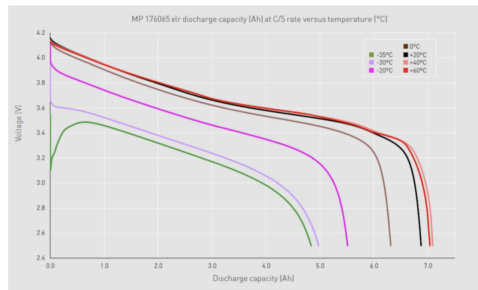


FIGURE 10 – Autonomie d'une cellule de la batterie

D'après le graphique, on remarque que la température extérieure influence les performances de la batterie. Dans le cas de l'aérostat le système doit être conçu pour fonctionner à -25°C. Ce qui signifie que l'autonomie d'une cellule C_{cell} passe de 6.8 Ah à 5 Ah et sa tension nominale $V_{cell/nom}$ vaut 3.5V.

On choisit donc un système avec quatres batteries en série, ce qui nous permettra d'avoir une tension de bus nominal de : $V_{bus/nom} = 3.5 \times 4 = 14V$ et des tensions max et min de : $V_{bus/max} = 4.2 \times 4 = 16.8V$ et $V_{bus/min} = 2.5 \times 4 = 10V$. Nous placerons alors un DC/DC convertter pour obtenir une tension utilisable constant à 5 V et un autre pour alimenter le GPS à 3 V. (Réalisation du modèle de l'alimentation du système)

Ce choix nous permet d'obtenir l'intensité moyenne à la sortie du convertisseur DC/DC. Elle s'obtient par :

$$I_{\mu\text{-}DC/DC1} = P_{\mu\text{-}systeme1}/V_{systeme} = 6.413/5 = 1.28A \quad (9)$$

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

$$I_{\mu\cdot DC/DC1} = P_{\mu\cdot systeme2}/V_{systeme} = 5.845/5 = 1.169A \quad (10)$$

Ce qui nous donne à la sortie de la batterie :

$$I_{batterie} = U_{DC/DC}/U_{batt} \times I_{\mu\cdot batterie1} = 0.64A \quad (11)$$

$$I_{batterie} = U_{DC/DC}/U_{batt} \times I_{\mu\cdot batterie1} = 0.584A \quad (12)$$

(je néglige la différence de tension pour la consommation du GPS étant donnée la différence faible). Ainsi, avec le temps d'utilisation de l'aérostat qui est : la capacité de la batterie nous donne : $T_{utilisation} = 3jours = 24 \times 3 = 72heures$ La capacité de la batterie est alors de :

$$C_{batt1} = 65.52Ah \quad (13)$$

$$C_{batt2} = 59.76Ah \quad (14)$$

Ce qui nous donne une énergie de :

$$E_{batt} = 327.6Wh \quad (15)$$

Ce qui fait que nous utilisons un nombre de cellule de :

$$N_{cell1} = 2 \times C_{batt}/C_{cell} = 26.2cellules \quad (16)$$

Ainsi, on a 14 branches en parallèle constituées de 2 cellules en série pour la première batterie et :

$$N_{cell2} = 2 \times C_{batt}/C_{cell} = 23.9cellules \quad (17)$$

pour la deuxième batterie.

On réalise donc les deux mêmes batteries composées de 27 cellules. (4 parallèles * 7 séries)

Pour la suite nous étudierons l'impact de la température sur l'autonomie des cellules et sur la batterie.

La batterie en plus des cellules sera contrôlée par un BMS (Battery Management System). Il nous permettra de garder le contrôle sur cette dernière (pas de surtension...). Ce BMS pourra également être choisit pour transmettre des informations sur l'état de la batterie au système comme l'état de charge, la température, l'équilibre entre les cellules.

IV.1.7 Module de réchauffage

Durant la mission, l'aérostat évolue dans un environnement critique où les températures extérieures peuvent descendre jusqu'à $-50^{\circ}C$, avec des variations qui peuvent être rapides notamment lors de la phase de décollage. Le module de réchauffage actif doit ainsi garantir que l'ensemble des constituants matériels de l'aérostat évolue à des températures supérieures à leur température minimale de fonctionnement. Le module doit également être commandable afin de minimiser les coûts énergétiques. Le cahier des charges impose une température minimale de fonctionnement de $-25^{\circ}C$ et un rapport cyclique de 15% en moyenne sur 24h.

De manière générale, il existe de nombreuses méthodes de réchauffages actifs des systèmes embarqués. Nous pouvons noter cependant que les principales techniques utilisées sont :

- Le réchauffage par conduction (résistif)
- Le réchauffage par rayonnement (lampes infrarouges, utilisation des rayonnements externes)

Après l'analyse de la mise en oeuvre pratique de ces différentes méthodes, il vient assez rapidement que le réchauffage par conduction est la meilleure solution pour les systèmes qui composent notre aérostat.

Notre solution est donc basée sur l'utilisation de rubans chauffants à faible consommation d'énergie. Comme mentionné précédemment, ce système comporte de nombreux avantages :

Efficacité Énergétique : D'une part, ces rubans chauffants modernes utilisent des technologies à faible consommation d'énergie, ce qui permet de répondre à la contrainte de puissance de chauffe requise (15W).

Flexibilité et adaptabilité : Sous forme de rubans, ces derniers sont flexibles et peuvent être adaptés pour envelopper les composants matériels du système, assurant ainsi un chauffage uniforme et efficace. L'ergonomie est sans aucun doute respectée car la forme de cette solution contribue à maintenir un poids optimal

Contrôle Précis de la Température : Au travers de l'intégration d'un contrôleur de température, le réglage précis de la chaleur émise est possible. En effet, les différents capteurs de température vont surveiller de manière continue l'environnement du ballon, et ajustent la puissance de chauffe en conséquence. Par ailleurs, la modulation du rapport cyclique (15% sur 24h) est permise grâce au système de contrôle. Enfin, la sécurité abordée précédemment est assurée par les capteurs de surchauffe ainsi que les fusibles thermiques qui accompagnent de manière générale de type de rubans. Les conditions difficiles dans lesquelles le système va évoluer seront compensées par la durabilité de fonctionnement de ce système de chauffage étant donné qu'ils sont conçus de façon à être résistants aux faibles températures.



FIGURE 11 – Représentation d'un ruban chauffant

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

Caractéristique	Description
Efficacité énergétique	Faible consommation d'énergie (15W).
Flexibilité et adaptabilité	Rubans flexibles pour envelopper les composants, assurant un chauffage uniforme. Ergonomie respectée pour un poids optimal.
Contrôle précis de la température	Intégration d'un contrôleur de température pour un réglage précis. Les capteurs surveillent en continu l'environnement. Modulation du rapport cyclique (15% sur 24h). Sécurité assurée par capteurs de surchauffe et fusibles thermiques.
Durabilité à basses températures	Conçus pour être résistants aux faibles températures.
Poids	Optimal en raison de la flexibilité des rubans.

TABLE 2 – Caractéristiques des rubans chauffants

IV.2 Étude de la panne avance sur un aérostat légal

Dans cette partie, nous allons réaliser une étude de la panne avance. Pour cette étude, le principal cas de panne avance est le déclenchement de la cisaille de manière intempestive.

Cette panne peut affecter trois ensembles principaux du système, dont la défaillance pourrait causer un cas de panne avance. Ces ensembles sont listés de manière exhaustive ci-dessous :

1. Défaut du système d'alimentation entraînant une surtension au niveau de la batterie ou du système DC/DC problématique dans le sens où cela peut propager un défaut sur les composants pilotant l'interrupteur de commande de la cisaille.
2. Défaut du calculateur entraînant la fermeture de l'interrupteur de commande de la cisaille en raison d'une mauvaise instruction du calculateur
3. Défaut du module de communication entraînant la réception d'une instruction de déclenchement par le système
4. Défaut du point de vue de l'opérateur : déclenchement de la cisaille par l'opérateur par erreur
5. Défaut du système de chauffage entraînant une propagation de panne thermique conduisant à la commande de la cisaille

Afin de traiter ces cas de panne avance, on propose différentes solutions :

1. **Alimentation du bloc de la cisaille** : Mise en place d'un interrupteur entre l'initiateur de la cisaille et l'alimentation. Cet interrupteur est contrôlé par le microcontrôleur du calculateur. Cependant, l'interrupteur devient un mode commun de défaillance. Il doit donc être redondé et contrôlé par un autre calculateur n'ayant pas de mode commun de défaillance avec le premier calculateur.
2. **Défaut module de communication** : Cette panne est négligée car nous considérons que les solutions choisies sont grandement distribuées et ainsi qu'un dysfonctionnement entraînant une mauvaise interprétation d'un message est improbable. Intrusion et brouillage des communications.
3. **Défaut du système de chauffage** : Mise en place d'un interrupteur naturellement fermé piloté par le microcontrôleur 1 afin de pouvoir couper l'alimentation du chauffage en cas d'emballement de la température afin d'éviter toute propagation de panne thermique. En plus de ça un thermoswitch est placé sur l'alimentation de la batterie afin d'éteindre complètement le système défectueux qui pourrait créer un feu et détruire tout l'aérostat. Cependant une étude précise des conséquences de surchauffe sur un point chaud seraient nécessaires, mais l'étude précise d'une panne due au chauffage ne rentre pas dans le cadre de notre cahier des charges.

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

En prenant en compte la panne avance, on peut donc proposer l'architecture suivante :

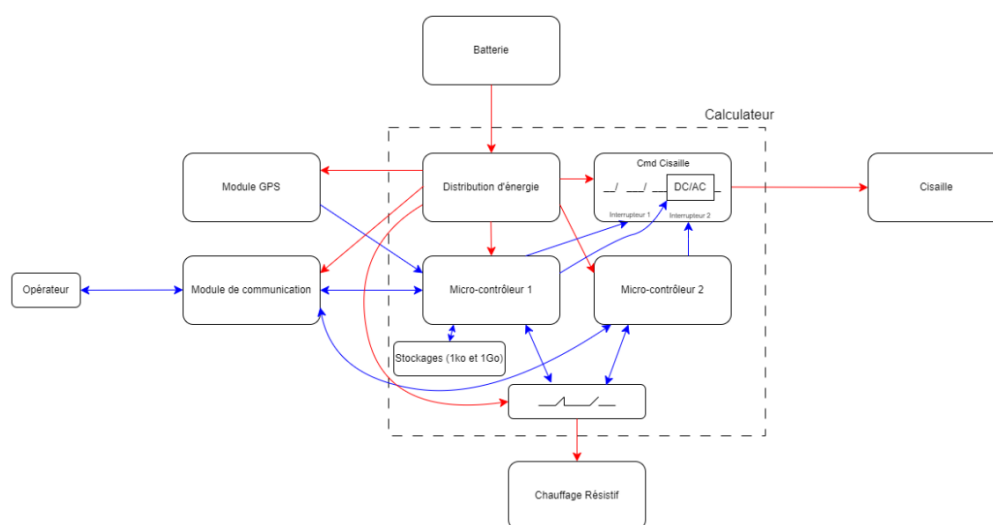


FIGURE 12 – Architecture du système de bord en prenant en compte la panne avance

La solution a donc consisté à ajouter un microcontrôleur. Les 2 microcontrôleurs composant le calculateur reçoivent donc tous les 2 les messages du modem. Or, le modem est fiable de part l'hypothèse largement répandue.

IV.3 Étude de la panne retard sur un aérostat légal

À présent, il est important d'étudier le cas de la panne retard. La panne retard de notre système correspondrait en définitive à toute défaillance qui empêcherait ou retarderait le bon déclenchement de la cisaille au moment souhaité.

Cette panne peut provenir de la défaillance de n'importe lequel des composants du schéma précédent. Toute défaillance devient critique en ce qui concerne la panne retard.

IV.3.1 Répertoire des pannes possibles

Défaut du module de communication :

- Défaillance du câble entre l'antenne et le modem ;
- Défaillance de l'antenne ;
- Défaillance du modem de communication ;
- Défaillance de la transmission due à la constellation (satellite perdu ou service en maintenance) ;

Criticité : Risque de perte de contrôle.

Solutions possibles : Redondance de tout le module, chaque module utilisant une constellation différente.

Défaut du module GPS :

- Défaillance du câble entre l'antenne et le modem ;
- Défaillance de l'antenne ;
- Défaillance du modem de localisation ;
- Perturbations extérieures du signal empêchant la localisation ;

Criticité : Perte de position pouvant entraîner des erreurs de décision opérateur.

Solutions possibles : Redondance du module, monitoring des mesures avec une évaluation des valeurs aberrantes entre deux mesures.

Défaut de la batterie :

- Défaillance des cellules de la batterie (sous-tension ou surtension) ;
- Défaillance des câbles d'alimentation ;

Criticité : Perte de l'alimentation, feu.

Solutions possibles : Redondance de la batterie, des câbles d'alimentation, ajout de protection de surtension/surcourants, mise en place d'un BMS performant.

Défaut du module de chauffage :

- Défaillance des résistances ;
- Défaillance des câbles ;

Criticité : Perte du système de chauffe ou surchauffe entraînant une inutilisabilité de certains composants.

Solutions possibles : Redondance des éléments, protection contre la surchauffe (thermo-switch et surveillance d'un microcontrôleur sur le hacheur pour pouvoir le couper si un sur-courant est détecté).

Défaut du calculateur :

- Défaillance d'un des microcontrôleurs (arrêt complet, défaut de décision sur le déclenchement cisaille, sur la gestion du chauffage, ...);
- Défaillance sur les différentes interfaces (câblage) ;
- Défaillance du système de distribution d'énergie ;
- Défaillance du bloc de commande du chauffage ;

Criticité : Risque de perte de contrôle, comportement incohérent des microcontrôleurs.

Solutions possibles : Redondance de tout le module avec une possible surveillance d'un calculateur sur l'autre.

Défaut de la cisaille :

- Défaillance d'un composant du bloc de transformation d'énergie pour la commande cisaille ;
- Défaillance de la cisaille ;
- Défaillance des contacteurs prévenant de la panne avance ;

Criticité : Risque d'impossibilité de séparer la charge utile du ballon.

Solutions possibles : Redondance de tous ces modules.

IV.3.2 Solutions possibles pour l'architecture finale

La première solution que nous avons trouvée est une redondance simple de toute l'architecture avec seulement le module de communication qui est différent d'une solution à l'autre afin d'avoir accès aux 2 constellations Iridium et Inmarsat. Nous avons réfléchi à d'autres possibilités pour essayer de limiter le nombre d'équipements électroniques, mais nous n'avons trouvé aucune solution qui pouvait résoudre à la fois la panne retard et la panne avance. Nous sommes donc restés sur la redondance simple de toute l'architecture avec une architecture équipée du modem de communication A2LA-R et une avec le modem OGi. L'idée globale est d'instaurer une redondance des éléments matériels. En effet, on réalise un système secondaire en parallèle du premier qui possède les mêmes composants matériels et qui offre ainsi une tolérance à la panne retard.

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

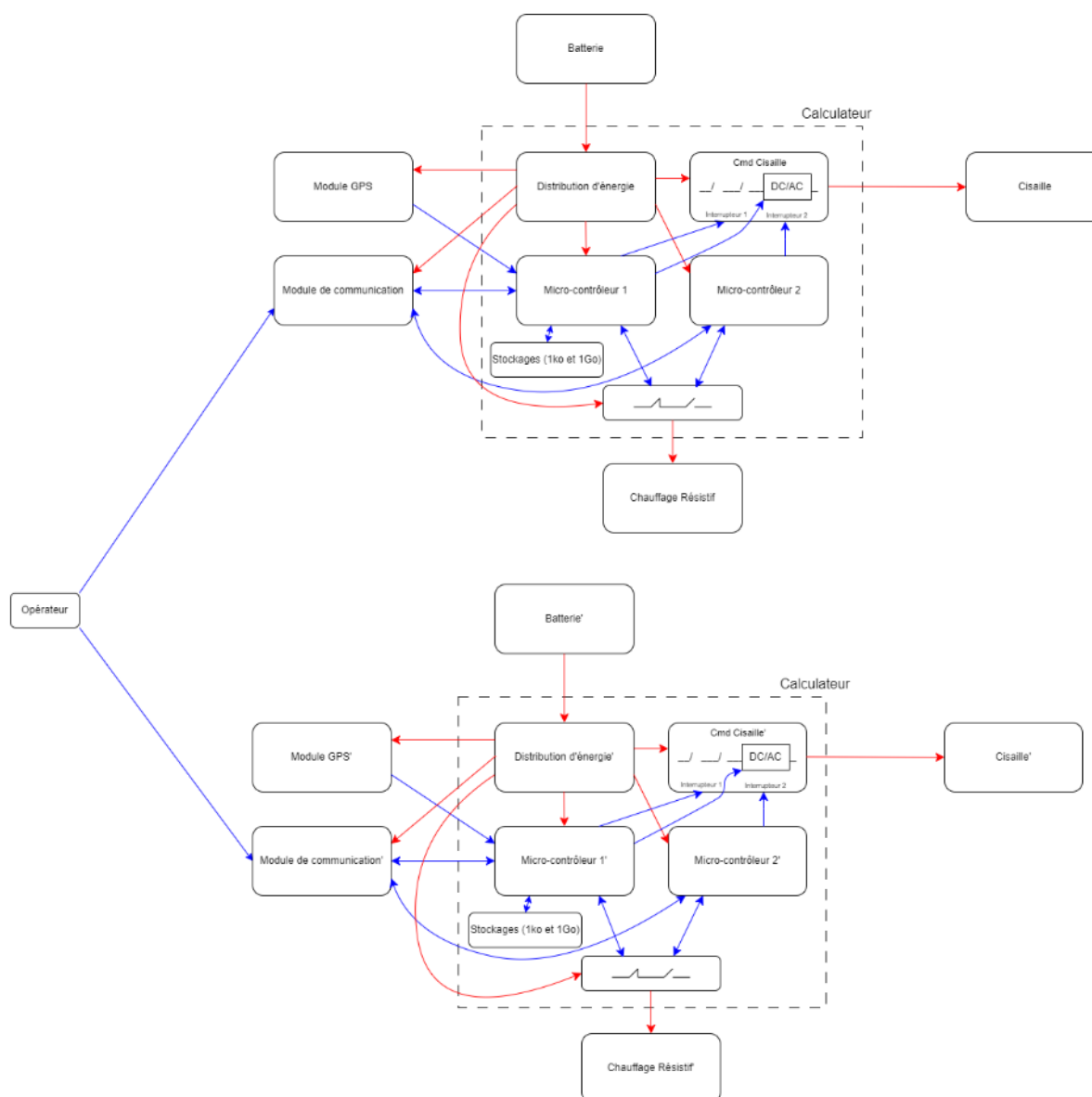


FIGURE 13 – Architecture du système de bord en prenant en compte la panne retard

Pour éviter toute propagation d'une simple panne d'une architecture sur l'autre, il est nécessaire de surveiller les pannes pouvant causer des effets rédhibitoires sur tout le système tel qu'un feu. Donc cela prend en compte les fonctions de chauffage et la batterie.

- Surveillance continue et capteurs de défaillance ;
- Surveillance des paramètres en temps réel (tensions/courants de bus, température) ;
- Tests de redondance ;
- Monitoring de la commande chauffage par les deux microcontrôleurs.

V Architecture Logicielle

La description de l'architecture matérielle est composée de 2 sous-parties. La première présente les différents cas d'utilisations pour le système et comment ceux-ci interagissent avec les composants du système de bord. La seconde partie présente, pour chaque cas d'utilisation, les acteurs extérieurs, les pré-conditions, le déroulement normal, le déroulement en cas de défaillance ainsi que les post-conditions pour ces différents déroulements.

De plus, une étude de la criticité des logiciels de chaque microcontrôleur permet de définir quelles méthodes de développement seront à mettre en place pour prévenir des défaillances simples.

V.1 Architecture générale

De manière générale, l'architecture logicielle du système de bord de l'aérostat est définie par le diagramme UML ci-dessous, il est aussi disponible en plus grand format en annexe :

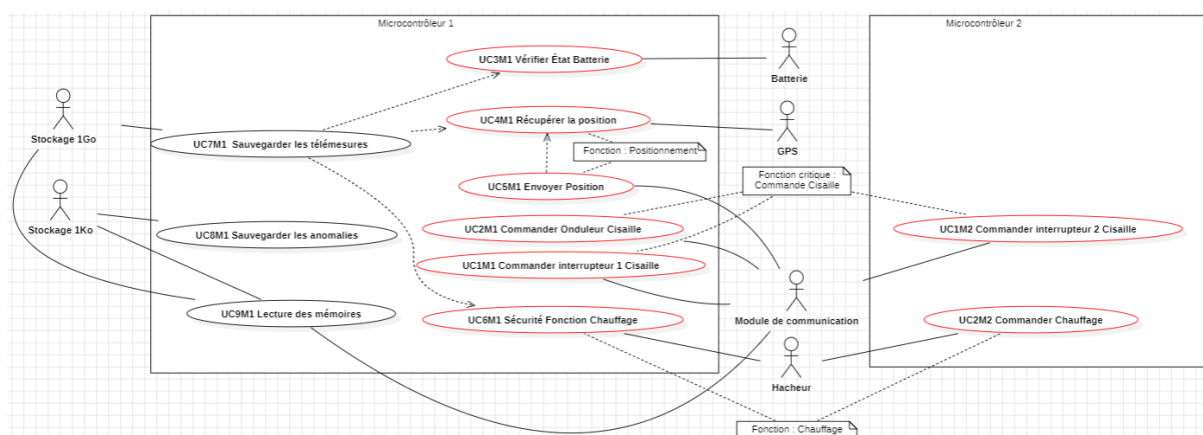


FIGURE 14 – Diagramme des cas d'utilisation de l'architecture logiciel du système de bord

V.1.1 Criticité logiciel sur les processeurs

La criticité logicielle dans les systèmes embarqués est d'une importance capitale en raison des conséquences significatives que des défaillances logicielles peuvent avoir sur la sécurité, la fiabilité et les performances des systèmes. La défaillance d'un composant logiciel peut entraîner des conséquences graves, voir catastrophiques, allant à la perte de vies humaines.

C'est pourquoi, il est normal de définir pour chaque logiciel présent dans le système le niveau de criticité souhaité. Cependant, plus la criticité est élevée, et plus les contraintes sur le code sont importantes ce qui rends beaucoup plus difficile l'évolution du logiciel. Deux possibilités pour la criticité logiciel, soit nous pouvons développer un logiciel de criticité B qui pourra être mit sur les microcontrôleur du système principal et secondaire, soit 2 logiciel différent de niveau de criticité C pour que le système principal et secondaire n'est pas le même logiciel et que la redondance du système le sécurise.

Un logiciel de criticité B rends l'évolution de ce logiciel très compliqué en comparaison à un logiciel de

criticité C, nous avons identifié le microcontrôleur 2 comme ayant moins de chance de subir des évolutions car connecté à moins de capteurs et d'actionneurs extérieurs que le 1. Le logiciel de ce microcontrôleur peut donc être développé avec une criticité B. Pour le logiciel du microcontrôleur 1, nous préconisons plutôt un logiciel de criticité C. En effet ce microcontrôleur permettant de gérer beaucoup de capteurs et d'actionneurs et permettant aussi d'enregistrer les télémesures, il a de forte chance de subir des évolutions dû à un changement de matériel par exemple. L'évolutivité est donc priorisée.

V.2 Diagrammes de séquences essentiels à la compréhension du système

Certaines des fonctions principales du système bord font appels aux 2 microcontrôleurs et à différents UseCases. Nous avons donc réalisé des diagrammes de séquences généraux de ces fonctions afin d'améliorer la compréhension globale du système. Ces fonctions principales sont la commande de la cisaille, le positionnement et le chauffage, elles sont écrites sous forme de notes dans le diagramme des UseCases de la partie précédente.

V.2.1 Fonction critique de commande de la cisaille

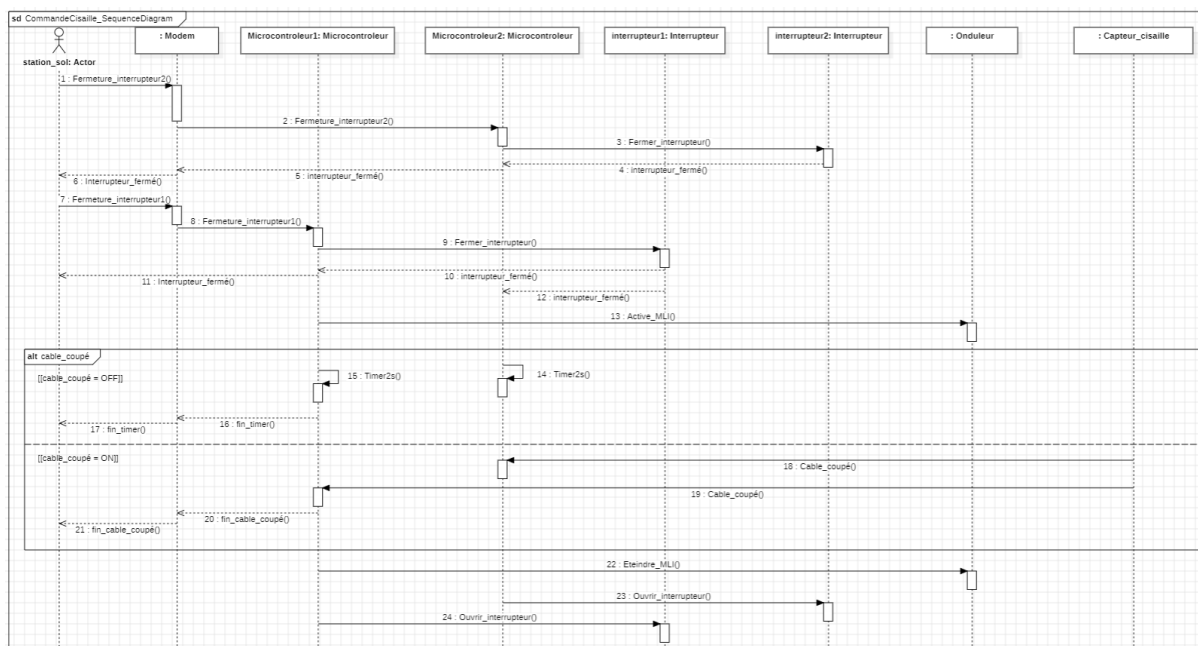


FIGURE 15 – Diagramme de séquence de la commande cisaille

Voici le diagramme de séquence en déroulement normal de la cisaille (aussi disponible en annexe). On peut le décrire de la manière suivante :

- Le système est opérationnel
- L'opérateur souhaite déclencher la séparation, ballon-nacelle.

Déroulement Normal :

- L'opérateur appuis sur le bouton 1
- Le bouton transmet l'ordre au modem de fermer l'interrupteur 2 au micro-contrôleur 2
- Le micro-contrôleur 2 transmet l'ordre à l'interrupteur de se fermer.

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

- L'interrupteur 2 transmet au micro-contrôleur 2 qu'il est bien fermé.
- Le micro-contrôleur 2 transmet l'information de fermeture, au modem
- Le modem transmet l'information de fermeture à l'opérateur
- L'opérateur appuis sur le bouton 2
- Le bouton transmet l'ordre au modem de fermer l'interrupteur 1 au micro-contrôleur 1
- Le micro-contrôleur 1 transmet l'ordre à l'interrupteur de se fermer.
- L'interrupteur 1 transmet au micro-contrôleur 1 et au micro-contrôleur 2 qu'il est bien fermé.
- Le micro-contrôleur 1 transmet l'information de fermeture, au modem
- Le modem transmet l'information de fermeture à l'opérateur
- Le micro-contrôleur 1 lance la MLI sur l'onduleur
- On lance dans le même temps des timers de 2 secondes qui sont interruptibles si le capteur_cisaille envoie le signal câble_coupé().(*)
- cas 1 : Le câble n'est jamais coupé : Le timer se termine et on envoie au modem qui envoie à l'opérateur que le câble n'est jamais coupé.
- cas 2 : le câble est coupé : le capteur cisaille envoie câble_coupé() aux deux micro-contrôleur. Le micro-contrôleur 1 envoie l'information au modem qui envoie à l'opérateur que le câble est coupé.(**)
- le micro-contrôleur 1 arrête la MLI
- le micro-contrôleur 1 ouvre l'interrupteur 1
- le micro-contrôleur 2 ouvre l'interrupteur 2

(*) : La mise en place de ces deux cas sont importants. Ils permettent en effet de couper l'alimentation de l'initiateur peu importe ce qui arrive au système. Pour rappel, nous envoyons dans le câble du 400 V, il est donc important de s'assurer de sa mise hors tension.

(**) On parle ici de câble_coupé() pour désigner un signal envoyé au micro-contrôleur 1 qui est émis par un des capteurs qui nous assure la séparation entre la nacelle et le ballon. Plusieurs choix sont possibles, comme un capteur de mise hors tension ou un accéléromètre.

V.2.2 Fonction de positionnement

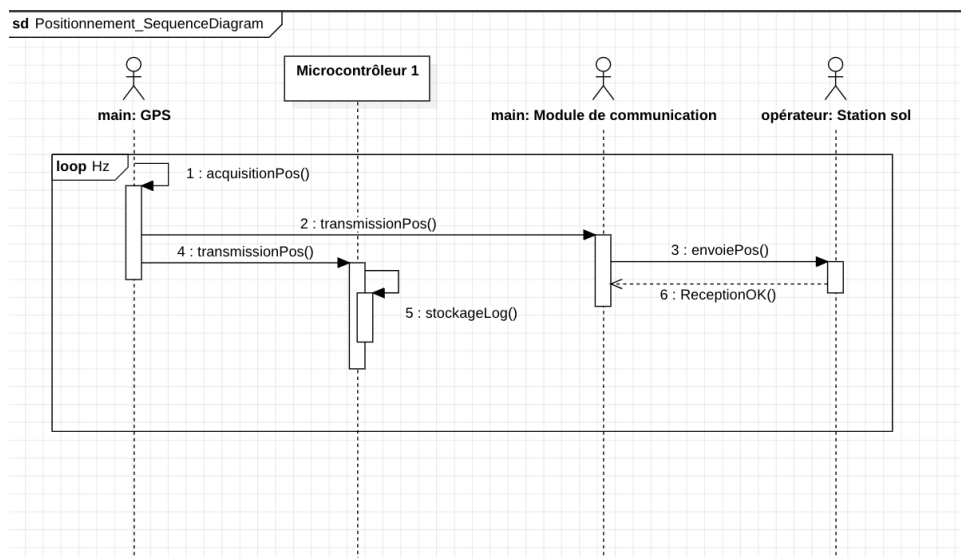


FIGURE 16 – Diagramme de séquence nominal Positionnement

Séquence simple et haut niveau de la fonction critique concernant l'acquisition et communication de l'aérostat, impliquant le GPS et le module de communication par bloc de redondance.

V.2.3 Fonction de chauffage

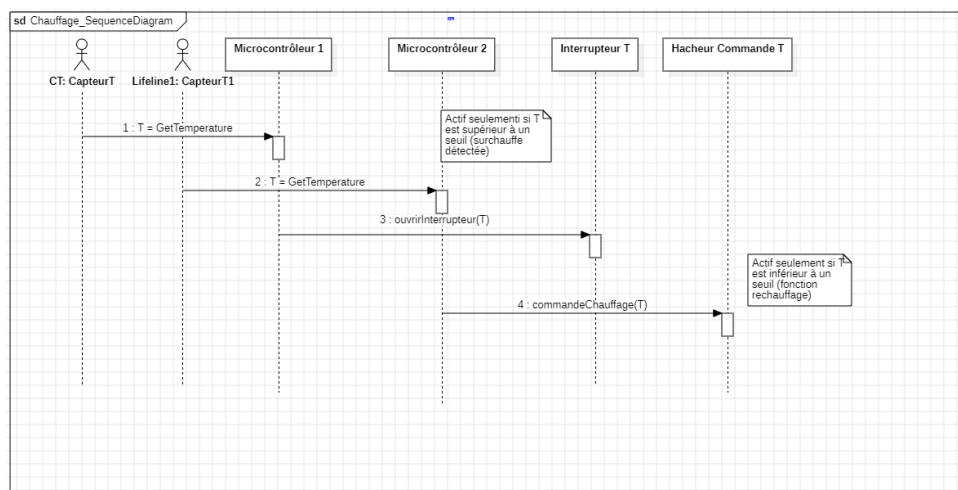


FIGURE 17 – Diagramme de séquence nominal de la fonction chauffage

Séquence simple et haut niveau de la fonction critique concernant la commande et la sécurité du système de réchauffage, impliquant les capteurs de températures et le hacheur de commande.

V.3 Fonctions du microcontrôleur 1

V.3.1 UC1M1 : Commander interrupteur 1 Cisaille

Cas d'utilisation : Commander interrupteur 1 de la cisaille lorsque le message de commande est reçu

Acteurs : Module de communication

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : Module de communication actif et en bon fonctionnement, microcontrôleur actif et en bon fonctionnement, ordre donné par l'opérateur.

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Le module de communication communique au microcontrôleur 1 l'ordre de fermer l'interrupteur.
- L'interrupteur se ferme et renvoie à l'acteur une notification de bon fonctionnement.
- Post-conditions : Notification de bon fonctionnement / interrupteur fermé

V.3.2 UC2M1 : Commander Onduleur Cisaille

Cas d'utilisation : Commander l'Onduleur de la cisaille lorsque les interrupteurs sont fermés

Acteurs : Onduleur (composé de 4 IGBT(ou MOFSET)) et Interrupteurs

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : Module de communication actif et en bon fonctionnement, microcontrôleur actif et en bon fonctionnement, Onduleur alimenté et en bon état de fonctionnement et interrupteurs alimentés et en bon état de fonctionnement.

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Les deux interrupteurs sont fermés.
- Le microcontrôleur donne alors les signaux correspondant à chaque IGBT pour faire fonctionner l'onduleur.
 - Signal IGBT1 : +Sinus – Porteuse
 - Signal IGBT2 : $\overline{\text{Signal IGBT1}}$
 - Signal IGBT3 : –Sinus + Porteuse
 - Signal IGBT4 : $\overline{\text{Signal IGBT3}}$
- La cisaille notifie que le câble a été coupé.
- Le microcontrôleur 1 ouvre l'interrupteur 1
- Post-conditions : Arrêt de la génération des signaux des IGBTs.

V.3.3 UC3M1 : Vérifier État Batterie

Cas d'utilisation : Vérifier l'état de la batterie périodiquement

Acteurs : -

Point de Vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions :

- Le système est opérationnel
- Le microcontrôleur1 souhaite vérifier l'état de la batterie

Déroulement Normal :

- Le microcontrôleur1 initie une demande de vérification de l'état de la batterie
- Le Système d'Alimentation transmet cette demande au Capteur de Batterie
- Le Capteur de Batterie effectue une mesure détaillée de l'état de la batterie
- Les résultats de la mesure sont renvoyés au Système d'Alimentation
- Le Système d'Alimentation transmet les résultats au microcontrôleur1.
- Le microcontrôleur1 reçoit les informations sur l'état de la batterie

Post-conditions :

- Le microcontrôleur1 dispose des données actualisées sur l'état de la batterie.

Déroulement Alternatif :

- Exception 1 : Perte d'information sur la batterie
- Variante 1 : Message "Erreur état batterie"
- Exception 2 : Mesures hors des seuils acceptables
- Variante 2 : Actions correctives sur la consommation de la batterie. Message "Correction de alimentation de la batterie"

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

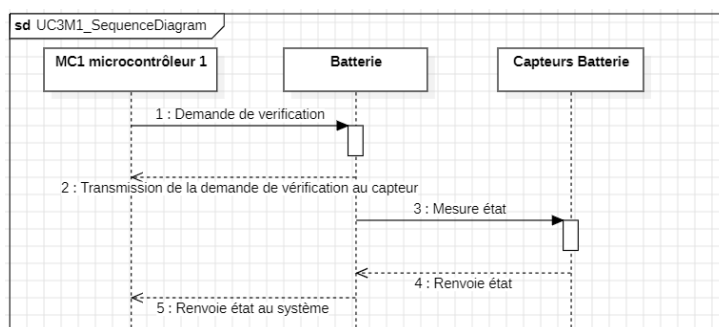


FIGURE 18 – Diagramme de séquence de UC3M1 : Vérifier État Batterie

V.3.4 UC4M1 : Récupérer la position

Cas d'utilisation : Récupérer la position périodiquement

Acteurs : GPS

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : GPS actif et en bon fonctionnement, microcontrôleur 1 actif et en bon fonctionnement, ordre donné par l'opérateur.

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Le microcontrôleur 1 ouvre une requête au GPS, lançant l'acquisition de la position de l'aérostat. La position est ensuite communiquée au microcontrôleur 1. Une étape de traitement interne permet de vérifier l'information.
- Post-conditions : -

V.3.5 UC5M1 : Envoyer Position

Cas d'utilisation : Envoyer la position périodiquement

Acteurs : Module de communication

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : UC4M1 récupérer position fonctionnel, module de communication prêt à utilisation

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Le microcontrôleur 1 transmet les données au module de communication, qui entre en procédure d'envoi.
- Post-conditions : Notification de fin de communication

V.3.6 UC6M1 : Sécurité Fonction Chauffage

Cas d'utilisation : Éviter toute dégradation matérielle dû à une surchauffe

Acteurs : Capteur de température, interrupteur NF de commande chauffage

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : -

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Une surchauffe est détectée ou le système ne chauffe pas/pas correctement les composants. On coupe le système de chauffage et on envoie une anomalie.
- Post-conditions : Message "Défaillance chauffage détectée"

V.3.7 UC7M1 : Sauvegarder les télémesures

Cas d'utilisation : Sauvegarde périodique des télémesures de l'aérostat

Acteurs : UC3M1, UC4M1 et UC6M1

Point de vue : Microcontrôleur1

Pré-conditions : Avoir correctement mis à jour les télémesures

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Toutes les minutes, le microcontrôleur 1 écrit dans la mémoire les télémesures (État de la batterie, position GPS, Température du système bord, d'autres sont ajoutables) en faisant correspondre une heure de relevé dans le stockage de 1Go
- Post-conditions : Les données ont bien été sauvegardés

Déroulement alternatif :

- Exceptions : Une télémesure n'a pas pu être récupéré
- Variantes : Écrire dans la mémoire "X" à la place de cette télémesure et renvoyer une anomalie

V.3.8 UC8M1 : Sauvegarder les anomalies

Cas d'utilisation : Sauvegarde des anomalies détectées par le Microcontrôleur 1

Acteurs : Tous les autres UseCase

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : Avoir détecté une anomalie

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Lorsqu'une anomalie est détectée, l'heure et la source de l'anomalie sont enregistrés dans le stockage 1ko
- Post-conditions : Anomalie correctement enregistrée

Déroulement alternatif :

- Exceptions : Erreur lors de l'écriture dans la mémoire
- Variantes : Relancer une seule fois une tentative d'écriture et envoyer message "Erreur lors de l'écriture dans mémoire"

V.3.9 UC9M1 : Lecture des mémoires

Cas d'utilisation : Demande de lecture d'un opérateur via le module de communication

Acteurs : Module de communication

Point de vue : Microcontrôleur 1

Pré-conditions : Un type d'information est demandé par le module de communication

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Lecture des informations (télémesures ou anomalies suivant la demande) et renvoie des données stockées au module de communication
- Post-conditions : Transmission correctement effectuée

Déroulement alternatif :

- Exceptions : Aucune données dans la mémoire
- Variantes : Message "Mémoire vide" renvoyé au module de communication

V.4 Fonctions du microcontrôleur 2

V.4.1 UC1M2 : Commander interrupteur 2 Cisaille

Cas d'utilisation : Commander interrupteur 2 de la cisaille lorsque le message de commande est reçu

Acteurs : Module de communication

Point de vue : Microcontrôleur 2

Pré-conditions : Module de communication actif et en bon fonctionnement, microcontrôleur actif et en bon fonctionnement, ordre donné par l'opérateur.

Déroulement Normal :

- Description détaillée : Le module de communication communique au microcontrôleur l'ordre de fermer l'interrupteur. L'interrupteur se ferme et renvoie à l'acteur une notification de bon fonctionnement.
- Postconditions : Notification de bon fonctionnement / interrupteur fermé

V.4.2 UC2M2 : Commander Chauffage

Cas d'utilisation : Commander le chauffage résistif pour maintenir la température de la nacelle à -25°C

Acteurs : Capteur T

Point de vue : Microcontrôleur 2

Pré-conditions : Un composant est proche de la température minimale de fonctionnement

Déroulement Normal :

- Description : Le circuit de chauffage est activé pour le composant
- Post-conditions :
 - La marge de sécurité en température est atteinte
 - On évalue le rapport cyclique sur les dernières 24h (max 15%)

Déroulement Alternatif :

- Exceptions : Le rapport cyclique maximum sur 24h est atteint (15%)
- Variantes : Message "Rapport cyclique maximal atteint sur les dernières 24h (15%)"

VI Conclusion

L'architecture de bord présentée dans ce document est une solution permettant la gestion des trois fonctions demandées par le cahier des charge, c'est à dire la localisation de l'aérostat, la communication entre celui-ci et les opérateurs au sol ainsi que la séparation de la charge utile du ballon.

D'une part, l'architecture matérielle a été adaptée pour répondre aux contraintes de létalité liée a des défaillances simples pouvant entraîner un déclenchement intempestif de la cisaille (panne avance). Également redondante, l'architecture permet de prévenir les défaillances simples susceptibles de provoquer une panne retard. Cette architecture garantit ainsi la résilience du système de bord face à tous les types de défaillances simples.

D'autre part, les fonctions de l'architecture logicielle ont également été étudiées pour faire face aux cas de défaillances simples. Une analyse de la criticité de ces logiciels aide également à déterminer les méthodes de développement à utiliser pour les composants logiciels du système de bord.

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) concernant cette architecture finale a été réalisée simultanément avec d'autres analyses, confirmant ainsi la robustesse du système face à des défaillances simples. Cette approche a également permis de vérifier la performance du système dans des scénarios de pannes avance et retard.

VII Annexes

VII.1 Diagramme des UseCases

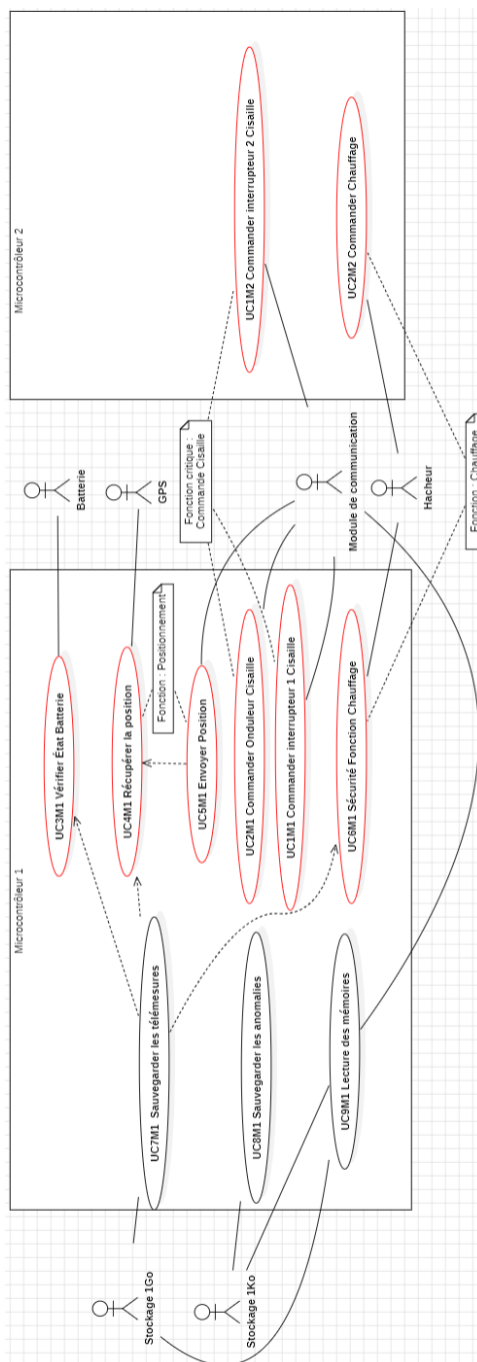


FIGURE 19 – Diagramme des cas d'utilisation de l'architecture logiciel du système de bord

VII.2 Diagramme de séquence de la fonction commande cisaille

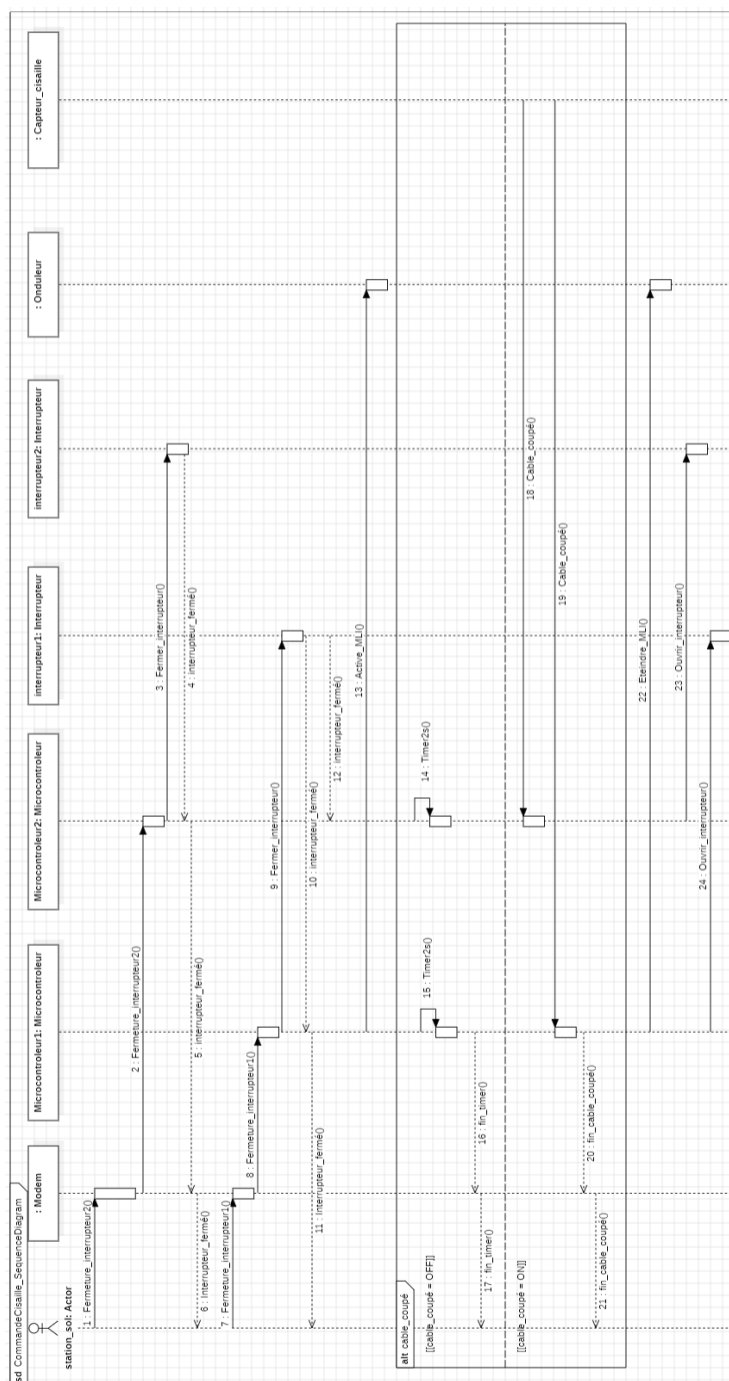


FIGURE 20 – Diagramme de séquence de la commande cisaille

VII.3 AMDEC

Architecture du système de bord d'un aérostat légal

COMPOSANT OU SOUS-ENSEMBLE		AMDEC du système bord d'un aérostat légal - CNES - ENSEIHT			INDICE DE DETECTABILITE			CRITICITE ACTUELLE		Remarques
		Modes de défaillance	CAUSES MODE DE DEFAILLANCE	EFFETS SUR LE SYSTEME	INDICE DE FREQUENCE	INDICE DE GRAVITE				
Cisaille + initiateur	Non déclenchement de la cisaille		Un défaut conduisant à l'impossibilité d'activer une cisaille (défaut de la cisaille, défaut du contacteur provenant de la panne avance)	Perte de la fonction de séparation sur le système principal. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la séparation de l'aérostat.	Jamais	10		B		
	Déclenchement intempestif de la cisaille		Un défaut conduisant à la fermeture d'un des 2 d'alimentation, défaut du calculateur, défaut du module de communication, ordre opérateur erroné)	Le second interrupteur reste ouvert, la cisaille n'est donc pas commandée	Jamais	10		B		Nécessité de ségréguer ou de protéger tout mode commun de défaillance telle qu'une coupure de tension, un court-circuit, des interrupteurs physiquement éloignés pour les opérateurs, micro-contrôleur différents pour chacun des interrupteurs...
Commande Cisaille	Impossibilité de commander l'ouverture de la cisaille		Un défaut conduisant à l'impossibilité de commander l'ouverture de la cisaille (défaut du bloc de communication, défaut d'un microcontrôleur, défaut d'un interrupteur de la commande cisaille)	Perte de la fonction de séparation sur le système principal. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la séparation de l'aérostat.	Jamais	10		B		
	Impossibilité d'émettre/de recevoir		Un défaut conduisant à l'impossibilité de communiquer (Défaillance de l'antenne, du câble entre l'antenne et le modem, du modem de communication, de la transmission due à la constellation utilisée)	Perte de la fonction de communication sur le système principal. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la communication de l'aérostat.	Jamais	10		B		
Module GPS	Impossibilité d'émettre/de recevoir		Un défaut conduisant à l'impossibilité d'émettre ou de recevoir les données GPS (défaillance matérielle ou logicielle)	Perte de la fonction de localisation sur le système principal. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la localisation de l'aérostat.	Jamais	10		B		
	Arrêt du système sur un ou plusieurs composants		Un défaut conduisant à l'arrêt du système de chauffage (Défaillance du capteur T, d'un câble, du calculateur, du système d'alimentation)	Perte de la fonction de chauffage sur le système principal. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet le chauffage du système secondaire.	Jamais	10		B		
Chauffage résistif	Emballlement du système		Un défaut conduisant à une augmentation excessive de la température (capteur T, d'un câble, du calculateur, du système d'alimentation)	La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la détection de l'élévation de température puis ouvrir l'interrupteur de sécurité. Ainsi, il n'y a pas d'emballement du système.	Jamais	10		B		
	Perte d'alimentation de la batterie		Un défaut conduisant à l'arrêt de l'alimentation de la batterie (Problème de court-circuit, problème de sur-tension, défaut câbles d'alim)	Perte intégrale du système principale. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la commande de l'aérostat.	Jamais	10		B		mise en place de capteur de tension et de courant pour visualiser un défaut.
Alimentation (Batterie)	Sous-performance du système		Un défaut conduisant à un arrêt partiel du système (défaillance d'une ou de certaines cellules qui réduise la tension dispo, défaillance des convertisseurs DCDC, mauvaise connexion)	Mise en place de protection de sous-tension pour mettre hors tension l'ensemble du système. La redondance des éléments matériels sur le système secondaire permet la commandabilité de l'aérostat.	Jamais	10		B		
* Lorsque l'on parle de - Redondance des éléments matériels. On réalise en fait un deuxième système en parallèle du premier qui a les mêmes composants matérielles et qui offre ainsi une tolérance à la panne retard. (voir le schéma panne avance + panne retard)										

FIGURE 21 – AMDEC du système bord