

# **Cahier de conception**

## **Système de protection et de gestion de batterie Li-ion**

Par

Daigneault-St-Arnaud, Christian, DAIC30099006

Gagnon-Bourassa, Julien, GAGJ23108601

Cusson-Larocque, Olivier, CUSO09048905

ELE791 - Projets spéciaux

Deslandes, Dominic

2 juillet 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte . . . . .	1
1.2	Rappel des objectifs . . . . .	1
1.3	Description des parties . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Protection des modules</b>	<b>2</b>
2.1	Lecture de tension des modules . . . . .	2
2.2	Lecture de tension de la batterie . . . . .	6
2.3	Lecture de courant . . . . .	8
2.4	Lecture de température . . . . .	9
2.5	Détection des erreurs . . . . .	10
2.6	Contrôle des contacteurs . . . . .	11
2.7	Signalisation de l'erreur . . . . .	17
2.7.1	Communication CAN . . . . .	17
2.7.2	Témoin lumineux externe . . . . .	17
2.7.3	Témoin lumineux sur le module maître . . . . .	17
2.8	Réinitialisation du système . . . . .	17
2.8.1	Communication CAN . . . . .	17
2.8.2	Communication RS232 . . . . .	18
2.8.3	Interrupteur sur le module maître . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Balancement des modules</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>Compatibilité avec le BMS présentement utilisé</b>	<b>20</b>
4.1	Brochage du connecteurs 22 pattes de Lithium Balance . . . . .	20
4.2	Nouvelle configuration de brochage du connecteurs 22 pattes . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Manipulations et vérifications techniques</b>	<b>22</b>
5.1	Protections . . . . .	22
5.2	Connecteurs . . . . .	22
5.3	Vérifications techniques . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Architecture</b>	<b>23</b>
6.1	Architecture générale . . . . .	23
6.2	Architecture du module de lecture de courant . . . . .	23
6.3	Architecture du module maître . . . . .	24
6.4	Architecture du module esclave . . . . .	24
6.5	Choix technologiques . . . . .	25
6.6	Logiciel . . . . .	26
<b>7</b>	<b>Annexes : Diagrammes fonctionnels</b>	<b>29</b>
7.1	Module maître . . . . .	29
7.2	Module esclave . . . . .	35
7.3	Module de lecture de courant . . . . .	40

# 1 Introduction

## 1.1 Mise en contexte

**Danger des batteries Li-ion :** Dans le domaine des énergies renouvelables, de l'électronique mobile et de l'électrification des transports, les batteries au Lithium-Ion sont de plus en plus populaires. Leur succès vient du fait qu'elles ont une des meilleures densités énergétiques comparativement aux autres chimies de batteries. Par contre, elles sont très réactives et une mauvaise utilisation des ces batteries peut créer des dommages considérables. C'est pourquoi ce type de batteries doit posséder un système de protection pour s'assurer qu'elles fonctionnent à l'intérieur des spécifications prévues par le fabricant.

**Système de protection et de gestion de batteries :** La protection des batteries se fait d'abord par la lecture de la tension des modules, de leur température et du courant. Ensuite, le système vérifie si toutes ces valeurs respectent les limites. Puis, ces informations sont envoyées à d'autres systèmes sur un réseau de communication. De plus, le système contrôle des contacteurs qui relient la batterie à sa charge et son chargeur.

**Projet spécial :** Dans le cadre du cours ELE791, les auteurs réalisent un projet destiné à un club étudiant participant aux diverses compétitions d'ingénierie. Or, les membres du projet font partie du club étudiant Éclipse, club qui fabrique une voiture solaire et qui participe à des compétitions contre d'autres universités à travers le monde. Le but du projet est de faire la conception et la réalisation d'un système de protection et de gestion de batteries de la dixième itération du véhicule solaire.

## 1.2 Rappel des objectifs

Puisque l'ampleur du projet est colossale, l'équipe s'est fixée des objectifs dans le cadre du projet spécial. Ces objectifs, jugés essentiels, doivent être réalisés dans les quatre mois dédiés à ce projet. D'autres objectifs ont déjà été établis, mais ceux-ci seront réalisés une fois le projet spécial terminé, possiblement par d'autres membres d'Éclipse.

Objectifs établis dans le cadre du projet spécial :

- Protection des modules ;
- Balancement des modules ;
- Compatibilité avec le BMS présentement utilisé ;
- Facilitation des manipulations lors des vérifications techniques

Objectifs à réaliser à la suite du projet spécial :

- Contrôle du système de refroidissement ;
- Calcul de l'état de charge ;
- Utilisation de limites dynamiques ;
- Surveillance de la batterie et envoi des informations sur un serveur

### **1.3 Description des parties**

Le document présenté est un cahier de conception qui détaille les différents choix technologiques reliés aux fonctionnalités d'un système de protection de batteries. Il détaille également les circuits électroniques utilisés pour accomplir les objectifs fixés par l'équipe.

Tout d'abord, l'objectif de la protection des modules est abordé, en expliquant les différentes fonctionnalités pour accomplir cette tâche. Ces fonctionnalités consistent à lire la tension et la température des modules, à lire la tension et le courant de la batterie, ainsi qu'à détecter les seuils de sécurisation. De plus, la fonctionnalité du contrôle des contacteurs ainsi que leur précharge sont détaillés. Puis, le document fait mention de la façon dont le système signale les erreurs et comment l'utilisateur peut réinitialiser le système.

Ensuite, il est question du balancement des cellules et les choix du concept. Puis, le rapport explique comment le nouveau système est compatible avec l'ancien. De plus, il mentionne comment les manipulations sont facilitées lors des vérifications techniques.

Finalement, l'architecture des différents modules est détaillée ainsi que les choix technologiques électroniques et logiciels, suivis des diagrammes fonctionnels du système en annexe.

## **2 Protection des modules**

La protection des modules consiste à détecter une surcharge, une décharge excessive, un courant trop élevé et une température trop élevée. Suite à la détection d'une faute, le système de protection doit amener la batterie à un état sécuritaire indépendamment du conducteur. La réglementation exige que des indicateurs de fautes soient installés à l'extérieur du véhicule et sur le tableau de bord. La faute doit être verrouillée et cette dernière doit seulement être effacée manuellement lorsque le véhicule n'est pas en mouvement et que la faute n'est plus présente [1].

Pour détecter les différentes fautes, il est nécessaire d'avoir une lecture de la tension de chaque module, une lecture de la température des modules, une lecture du courant de la batterie et un algorithme de détection pour éviter de déclencher la protection pour un faux positif. Pour amener la batterie dans un état sécuritaire et indiquer qu'il y a une faute, le système doit avoir un bus de communication et un contrôle de l'état de la batterie très robuste. La réinitialisation du système de protection requiert une interface accessible et un algorithme qui vérifie que les conditions sont adéquates.

### **2.1 Lecture de tension des modules**

La majorité de l'information sur la batterie provient de la tension des modules, c'est pourquoi cette mesure doit être très précise et robuste sur toute la plage d'utilisation des modules. Le circuit doit consommer un minimum de courant, être robuste, modulable et précis. Le circuit doit aussi faciliter la vérification technique.

## Solution commerciale

Il existe sur le marché plusieurs circuits qui s'occupent de lire la tension des modules et de communiquer l'information à un microcontrôleur. Les fonctionnalités et le nombre de modules supportés varient d'un vendeur à l'autre. Les points communs sont :

- Le circuit peut être alimenté par les modules ;
- Consommation de courant de quelques mA lorsque le circuit prend les mesures et quelques  $\mu A$  lorsqu'il est en veille ;
- Solution compacte ;
- Lecture précise ;
- Les modules doivent être branchés dans l'ordre ;
- Économique ;
- Fonctionnement bien documenté.

Cette solution est réalisable et demande surtout de bien lire et comprendre la documentation. Le LTC6804 de Linear Technology a été retenu pour son nombre de modules maximum, son prix et sa simplicité d'implémentation. Cette solution répond à la majorité des spécifications, mais elle n'apporte cependant rien de nouveau au système actuellement utilisé et elle ne facilite pas la vérification technique.

## Isolation des lectures

La vérification technique est beaucoup plus facile si les différentes lectures de tensions sont isolées. Ce point est décrit dans la section Manipulations et vérifications techniques.

L'isolation amène plusieurs avantages :

- Les modules n'ont plus besoin d'être branchés en ordre, ce qui élimine le risque d'erreur humaine ;
- Il est possible de débrancher une seule cellule pour venir ensuite la remplacer par une alimentation variable ;
- Le filage dans la batterie peut être mieux organisé et optimisé.

Cette solution comporte cependant plusieurs désavantages :

- Consomme plus de courant (quelques mA par module lors des lectures) ;
- Demande plus de composantes ;
- Plus difficile à implémenter ;
- Plus dispendieux.

Ces différents désavantages ne sont pas majeurs dans le contexte d'Éclipse ; la consommation de courant reste insignifiante comparée à ce que le moteur et le reste des circuits consomment. Le nombre de composants peut être limité en utilisant la bonne topologie et le prix de la carte peut être plus élevé tant qu'il respecte le budget.

## Circuit analogique

Une solution relativement simple et qui ne comporte pas beaucoup de composants est montrée à la figure 1. Ce circuit très compact et simple n'est pas assez précis puisque le gain entre les deux photodiodes varie de 5% pour le HCNR201. Cette erreur ne répond pas aux spécifications de +/- 10mV qui représente une erreur de  $\pm 0.238\%$  ( $\pm 10\text{mV} / 4.2\text{V} \cdot 100\%$ ).

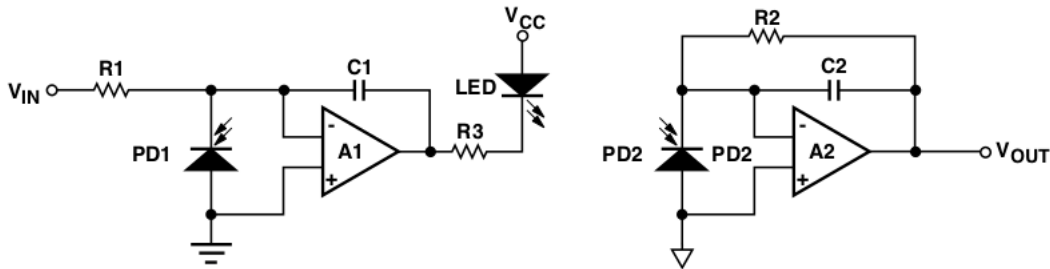


FIGURE 1 – Circuit de lecture de tension isolée analogique [2]

## Lecture d'un voltage de référence avec un ADC

Pour éliminer l'erreur causée par l'amplificateur et l'isolateur tout en réduisant au maximum le nombre de composants, l'ADC mesurerait un voltage de référence alors qu'il serait alimenté par le module comme présenté à la figure 2. Puisque le voltage à l'entrée est connu, la tension du module est donnée par l'équation 1.

$$V_{Module} = \frac{V_{REF}}{Valeur\ ADC} \cdot 2^{nb\ Bits\ adc} \quad (1)$$

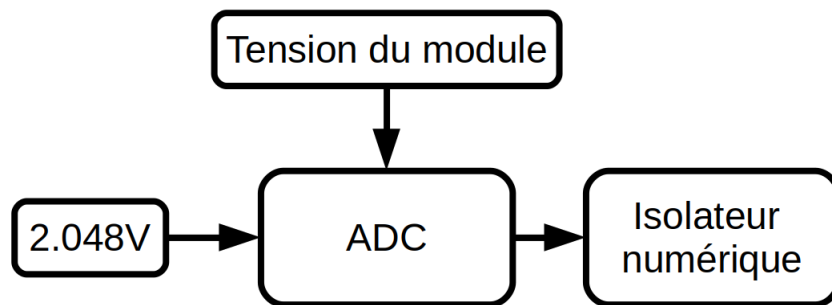


FIGURE 2 – Lecture d'un voltage de référence avec un ADC

Le circuit mesure le LSB qui est donné par  $V_{Module} / 2^{nb\ Bits\ adc}$  pour trouver la tension du module. Bien que cette technique fonctionne, les courbes de la tension du module et de la résolution ne sont pas linéaires par rapport au résultat du ADC. La valeur du voltage de référence a un impact sur la courbe de la résolution. Plus elle est basse, moins la courbe est linéaire et la résolution est moins bonne. Les figures 3 et 4 montrent les performances idéales du circuit à la figure 2 avec une référence de 2.048V et une plage de 2V à 4.2V pour la tension du module.

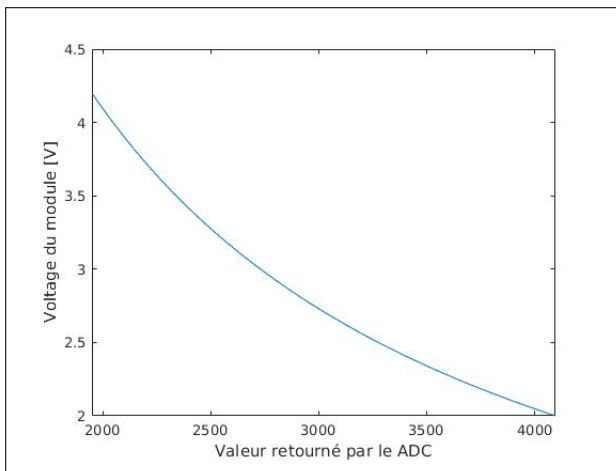


FIGURE 3 – Tension du module en fonction des valeurs du ADC

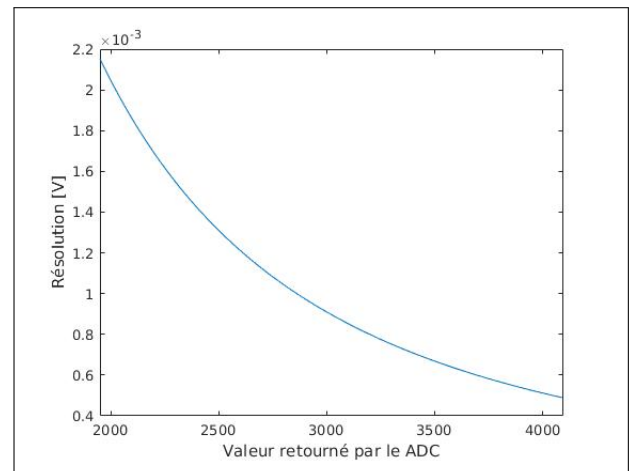


FIGURE 4 – Résolution en fonction des valeurs du ADC

L'écart maximal entre 2 bits est de 2.15 mA. Avec un ADC performant qui a une erreur de  $\pm 1$  LSB, la lecture de tension a une erreur maximale de  $\pm 2.15$  mA lorsque le module est à 4.2V. Cette méthode correspond à la spécification qui demande d'être à  $\pm 10$  mA. L'ADC et la tension de référence consomment très peu de courant, ils nécessitent très peu de composants externes et ils sont abordables. Afin d'avoir une très bonne précision, il est nécessaire de faire une calibration puisque la tolérance de la référence ( $\pm 0.5\%$ ) est plus grande que celle de la spécification ( $\pm 0.238\%$ ). Il existe des références avec des tolérances plus petites que  $\pm 0.238\%$  mais elles sont beaucoup trop dispendieuses pour le projet puisqu'il faut en avoir une pour chaque module.

L'isolation de la mesure se fait au niveau de la communication puisqu'il n'y a aucune erreur causée par l'isolateur de cette façon, contrairement à l'optocoupleur de la solution analogique. L'alimentation de l'isolateur et du ADC doivent dépasser la plage de lecture du module qui est de 2V à 4.5V.

Cette solution est viable, elle respecte les spécifications et elle ne demande pas beaucoup de composants. Le choix des ADC et des isolateurs numériques avec une alimentation qui va de moins de 2V à plus de 5V est toutefois très restreint. Les prix de l'isolateur et de l'ADC sont donc élevés et il est plus difficile de trouver un remplacement dans le cas où un composant n'est plus disponible.

### Configuration classique d'un ADC

Pour utiliser l'ADC avec une configuration classique où l'entrée mesure le voltage du module, un convertisseur de puissance est nécessaire pour maintenir une tension fixe qui est plus élevée que celle du module. Plusieurs composants externes sont nécessaires, mais les coûts sont absorbés par le prix moins élevé de l'ADC et de l'isolateur. Cette topologie permet d'avoir une résolution qui est fixe sur toute la plage des mesures, un contrôle sur le LSB avec l'alimentation de l'ADC et un meilleur choix d'ADC. L'ADC est alimenté par un régulateur linéaire pour avoir un minimum de bruit alors que l'isolateur est alimenté par le convertisseur à commutation. L'isolateur qui commute rapidement ne vient donc pas perturber l'alimentation de l'ADC. Puisque l'alimentation de l'ADC est utilisée comme référence, il est important de faire une calibration pour avoir un LSB qui est très précis afin d'avoir une mesure qui respecte les spécifications. Avec la référence calibrée à 4.5V et un ADC qui a une erreur de  $\pm 1$  LSB, la



précision de la mesure est de  $\pm 1.1$  mV sur toute la plage. La tension du module est donnée par l'équation 2.

$$V_{Module} = \frac{V_{Ref}}{2^{nb\ Bits\ adc}} \cdot \text{Valeur ADC} \quad (2)$$

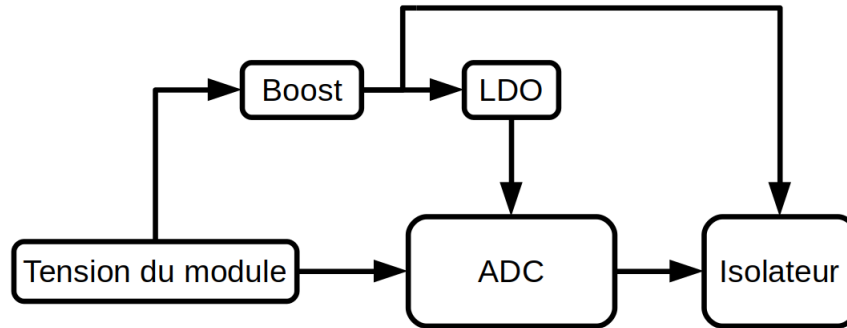


FIGURE 5 – Lecture de la tension du module

Le nombre de composants rend cette solution plus dure à implémenter en raison de l'espace restreint que les modules esclaves peuvent prendre dans la batterie. Les composants devront être choisis en fonction de leurs performances et leur format. Cette topologie offre de bonnes performances et elle n'est pas plus dispendieuse que la solution précédente.

### Choix final

La topologie utilisée pour mesurer la tension des modules sera la configuration classique. Ses performances malgré sa complexité en font le meilleur choix puisqu'il sera impossible de faire une deuxième version de la carte avant la fin du projet. L'option la plus sécuritaire, éprouvée et qui permet un grand choix de pièces est plus avantageuse que la première option qui n'est pas assez précise et la deuxième qui nécessite des composants avec des caractéristiques très restreintes. La solution commerciale a été écartée puisqu'il serait beaucoup plus difficile d'incorporer des sécurités pour les mauvaises manipulations et faciliter la vérification technique.

## 2.2 Lecture de tension de la batterie

Pour valider qu'il n'y ait pas d'erreur avec la lecture de tension des modules, on compare leur somme avec la tension de la batterie. Si l'écart est trop grand entre les deux valeurs, une défaillance pourrait s'être produite. La mesure de la tension de la batterie sert également à estimer l'état de la charge et vérifier la tension durant la précharge.

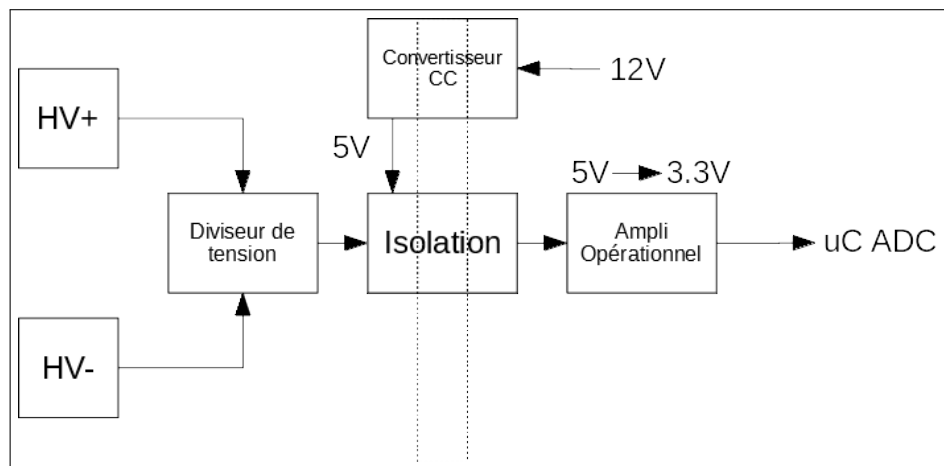


FIGURE 6 – Schéma du circuit de la lecture de tension de la batterie

Tout d’abord, puisque cette lecture est effectuée sur de la haute tension, il est préférable d’isoler le circuit. De plus, chaque polarité de la batterie a son propre connecteur pour éviter l’inversement de polarité. Ils sont également distancés pour empêcher un arc électrique lors de la connexion ou la déconnexion des connecteurs.

Ensuite, toujours sur la partie isolée, un simple diviseur de tension vient réduire la haute tension. On suppose que la plage de la haute tension est de 0-200 V, pour la réduire à une plage de 0-2 V.

Une fois la tension réduite, on isole le signal avec un détecteur de tension de précision, isolé de façon optique. Le détecteur produit ensuite sur le côté non isolé une tension proportionnelle à son alimentation de sortie.

Puisque l’alimentation à l’entrée du détecteur doit être isolée, on utilise un convertisseur de courant continu. Le 12 V de la partie non isolée est converti en 5 V sur la partie isolée pour alimenter le détecteur.

Pour que le microcontrôleur puisse lire la tension avec son ADC, il faut convertir la tension de sortie du détecteur à 3.3 V. Pour ce faire, on utilise un amplificateur opérationnel avec un gain ajusté pour convertir une plage de 0-5 V à 0-3.3 V.

TABLE 1 – Sélection des composantes du lecteur de tension de la batterie

Composantes	Manufacturier	Description	Prix
ACPL-C87A-500E	Broadcom Limited	Détecteur de tension de précision	10.35 \$
LMV321RILT	STMicroelectronics	Amplificateur opérationnel tout usage	0.65 \$
NCS1S2405SC	Murata Power Solutions Inc.	Convertisseur de courant continu	12.29 \$

## 2.3 Lecture de courant

La lecture du courant est essentielle pour éviter que la batterie ne se charge ou se décharge excessivement. Cette information va aussi être utilisée pour l'estimation de l'état de charge, fonctionnalité qui va être implémentée après le cours ELE-791. Pour que l'estimation de charge soit précise sans accumuler une grande erreur, la lecture de courant se doit d'être la plus précise possible sur toute la plage d'utilisation. L'objectif est donc d'avoir une précision qui est beaucoup plus grande que le 2% des spécifications.

Eclipse IX utilise présentement la première technique décrite un peu plus loin. La résistance est cependant loin de la carte qui prend la mesure, ce qui pourrait causer certains problèmes étant donné que les deux fils ont des signaux avec de très faibles voltages qui sont lus par un amplificateur avec une impédance élevée. Afin d'avoir une lecture robuste et mieux protégée du bruit, le circuit de lecture de courant aura sa propre carte au lieu d'être sur la carte maître.

Deux différentes techniques ont été envisagées pour mesurer le courant. La première est de lire la tension aux bornes d'une résistance en série avec la batterie et la deuxième est d'utiliser un capteur à effet Hall.

### Lecture de la tension aux bornes d'une résistance en série avec la batterie

Les résistances "shunt" ont une très grande précision ( $\pm 0.1\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ), elles sont faciles à interfacer et faciles à remplacer lorsque les spécifications changent. Un amplificateur avec une grande impédance d'entrée est nécessaire pour amener le signal analogique de très faible amplitude entre 0V et le voltage de référence de l'ADC. L'amplificateur doit avoir un gain très précis, être thermiquement stable et avoir une bonne atténuation du bruit en mode commun. Le bruit en mode commun peut être réduit en ayant le circuit de lecture référencé à la borne négative de la batterie et en plaçant la résistance en série avec cette même borne.

Pour avoir une bonne lecture avec un minimum de bruit, une configuration avec l'amplificateur avec une sortie différentielle connectée à un ADC avec une entrée différentielle serait la plus robuste et précise puisque le signal serait au-dessus du bruit de fond (noise floor). L'amplificateur PGA281 et le convertisseur analogue à numérique ADC141S626 de Texas Instrument possèdent les différentes caractéristiques recherchées. La résistance de  $250\ \mu\Omega$  d'Eclipse IX serait réutilisée pour Éclipse X.

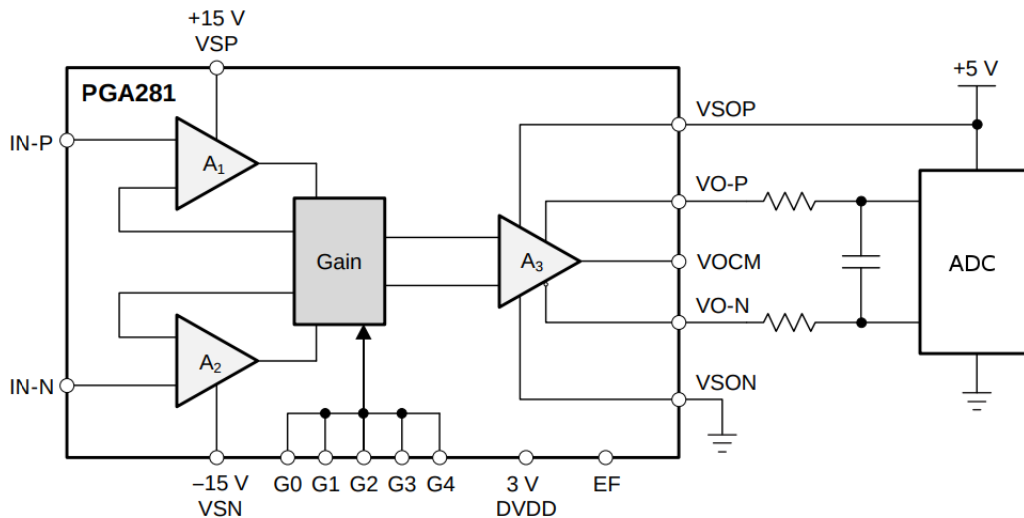


FIGURE 7 – Configuration de l'amplificateur et de l'ADC.

### Capteur à effet Hall

Un capteur à effet Hall a l'avantage de ne pas être intrusif et d'être isolé. Les senseurs ratio métriques en boucle ouverte ont une bonne précision qui correspond aux spécifications. Ils ne sont pas dispendieux et ils sont très faciles à interfacer. Le HO 100-S de LEM n'a pas besoin d'amplificateur et peut ainsi être branché directement sur l'entrée du ADC. Les effets Hall ont besoin de calibration pour éliminer le décalage lorsqu'il n'y a aucun courant. Ces senseurs ont aussi le désavantage d'avoir certaines non-linéarités dans le gain et une hystérésis. Une bonne caractérisation et calibration du senseur réduiraient grandement ces inconvénients.

### Choix final

Le courant sera lu en utilisant la résistance en série avec la borne négative de la batterie. Sa flexibilité, sa robustesse et l'absence de calibration en font la solution la plus facile à implémenter tout en étant plus sûre de respecter les spécifications. Il serait cependant intéressant dans le futur de faire une carte avec le capteur à effet Hall pour avoir une mesure redondante et comparer les deux solutions dans la voiture.

## 2.4 Lecture de température

La lecture de température doit être précise à  $\pm 2^\circ$  et le senseur doit pouvoir être collé sur les modules. Le choix de la technologie a été fait en fonction du format.

### Lecture basée sur le "silicon bandgap"

Les senseurs basés sur la variation de la tension d'une jonction PN d'un transistor (VBE) sont vendus dans des formats tels que le TO-92-3 et le TP-220. Ces formats ne sont pas pratiques et ils demandent un certain effort pour pouvoir avoir un montage qui est propre et qui ne risque pas d'avoir de court-circuit. Pour faciliter l'implémentation, le senseur serait sur un petit circuit imprimé, mais le tout prend plus de place et devient plus difficile à installer.

## **Thermistance NTC**

La thermistance avec un coefficient de température négatif est précise, économique et elle se vend dans un format intéressant qui est une bille avec de longs fils. La bille est facile à fixer au module et elle ne prend presque pas d'espace. La thermistance est simple à interfacer puisque l'ADC lit la tension d'un diviseur de tension composé d'une résistance et de la thermistance. Pour éviter que la thermistance chauffe et donne une température inexacte causée par le courant continu, l'alimentation positive doit être fournie par le microcontrôleur qui va ainsi seulement alimenter le circuit lorsqu'il prend la lecture. Puisque la courbe de température est non-linéaire, une "lookup table" doit être utilisée pour obtenir une grande précision. Le fabricant fournit ces données qui vont ensuite être validées par l'équipe.

## **Choix final**

Les lectures de tensions vont être effectuées par les thermistances NTC pour leur précision, leur simplicité et leur format. Le choix s'est arrêté sur la thermistance NXFT15WB473FA2B150.

## **2.5 Détection des erreurs**

La tâche principale du système de protection est de détecter les erreurs de surcharge, décharge excessive, courant trop élevé et température trop élevée. Ces erreurs doivent être détectées et prises en charge le plus rapidement possible, mais il est encore plus important de ne pas lire une erreur et de sécuriser la batterie pour un faux positif. La modification des seuils doit être simple et rapide sans devoir reprogrammer chaque module esclave.

Les seuils sont déterminés par le fabricant des cellules lithium-ion. Au moment de la rédaction, Éclipse n'a pas encore choisi quelle cellule va être utilisée, mais il est correct d'assumer que les seuils vont être près de 2.5V (voltage minimum), 4.2V (voltage maximum), 60A (courant maximum) et 60 ° (température maximale) pour la conception puisque ce sont les limites de la majorité des chimies. Pour éviter d'entraîner inutilement une sécurisation de la batterie, les différentes lectures devront être filtrées pour éliminer les lectures erronées et les conditions d'erreur extrêmement courtes. Pour avoir une bonne flexibilité et pouvoir changer rapidement la fréquence de coupure, le filtre passe-bas doit être implémenté numériquement dans le microcontrôleur du module esclave. Le module esclave envoie toutes les informations et les résultats de chaque mesure au module maître. C'est aussi lui qui juge si ces valeurs sont en dehors des limites sécuritaires. Dans un tel cas, il en informe le module maître à l'aide d'un message d'erreur qui est prioritaire.

## 2.6 Contrôle des contacteurs

Pour amener la batterie dans un état sécuritaire, il faut pouvoir la débrancher de l'alimentation. Le système utilise donc des contacteurs à haute puissance pour contrôler la connexion de la batterie avec le reste des charges. Le module maître se charge de contrôler ces contacteurs. De plus, il s'occupe de connecter les batteries lors de la mise en marche du système ou de les déconnecter en cas de défaillances pour protéger les modules.

Le système est composé de trois contacteurs, soit deux contacteurs principaux et un pour les MPPTs. L'un des contacteurs principaux est connecté à la borne positive de la batterie et l'autre à la borne négative. On peut voir à la figure suivante un schéma général de la disposition des contacteurs.

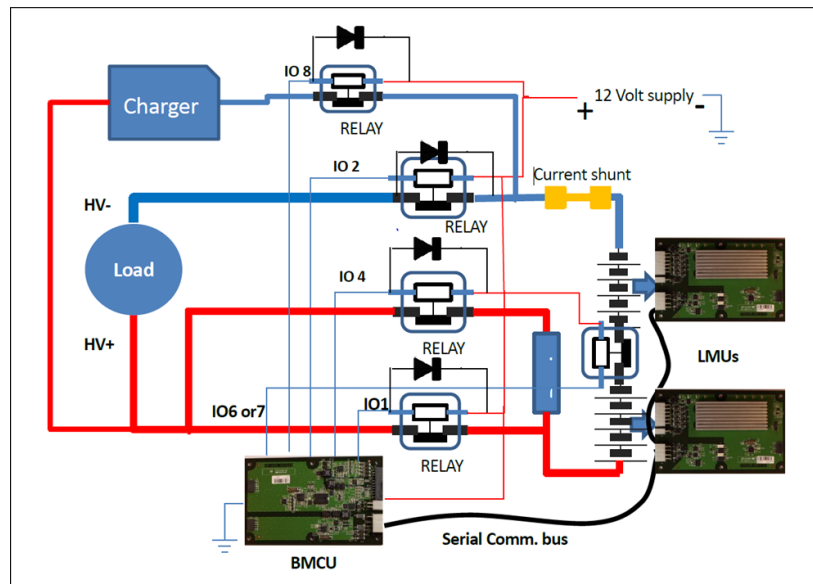


FIGURE 8 – Diagramme général des contacteurs de Lithium Balance [5]

L'enclenchement des contacteurs se fait avec une tension de 12V, qui doit être appliquée à ses bornes. Puisque c'est le microcontrôleur qui envoie la commande d'ouverture ou de fermeture, il doit y avoir une interface de protection entre le 12V aux bornes du contacteur et le 3.3V de la patte GPIO. De façon générale, il n'est pas conseillé d'utiliser des actionneurs mécaniques, tel qu'un relais, pour activer les contacteurs puisqu'ils sont souvent victimes de défaillance.

### Choix des contacteurs

Une commandite d'Autobus Lion a permis au club Éclipse de se procurer trois contacteurs de marque GIGAVAC\_HX21. Il faut donc que le module maître puisse interfacer ces contacteurs. Le système de batterie d'Éclipse 9 utilise des contacteurs EV200 et ceux-ci seront utilisés comme pièce de remplacement. La conception du circuit de contrôle doit donc être compatible avec les deux modèles.

Les spécifications des contacteurs Gigavac montrent que le courant consommé lors de l'ouverture de l'inductance est de 4.3 A. En ajoutant une marge de protection d'un facteur de 1.2, les composantes doivent soutenir un courant allant jusqu'à 5.16 A pendant 75 ms[7].

De plus, ce modèle de contacteur possède un deuxième relais interne pour l'interverrouillage (inter-lock), beaucoup utilisé dans le domaine des véhicules. Dans le cas du présent système, ce relais sera utilisé pour activer un témoin lumineux afin d'avertir l'utilisateur de l'état des contacteurs. Avec les contacteurs EV-200, il faudra court-circuiter deux positions sur le connecteur allant sur le module maître pour activer ce témoin lumineux.

Également, le circuit de contrôle doit répondre aux critères suivants afin d'être jugé sécuritaire [4].

- Prévenir les défaillances qui causent l'ouverture des contacteurs alors qu'ils devraient être fermés
- Prévenir les défaillances qui causent la fermeture des contacteurs alors qu'ils devraient être ouverts
- Prévenir les défaillances qui causent une connexion de la batteries à travers une charge capacitive

### Choix du circuit de contrôle

Plusieurs solutions ont été évaluées pour contrôler les contacteurs. Cette section est très critique et il ne faut absolument pas qu'une défaillance mette en panne la voiture solaire durant la compétition. Le budget n'est donc pas un critère de sélection, mais le choix doit plutôt se faire en fonction d'une solution qui est le plus sécuritaire possible.

### Solution 1 : Contrôle par relais statique (SSR)

Puisque les activateurs ne doivent pas être de nature mécaniquement, on peut utiliser des relais statiques puisqu'ils sont isolés mécaniquement. Le microcontrôleur doit seulement activer une DEL pour l'enclencher. Aussi, dans l'éventualité où le microcontrôleur a une défaillance, le relais statique s'ouvrira, empêchant ainsi le contacteur de rester fermé. Il faut par contre choisir un relais statique capable d'accepter jusqu'à 5.16 A, ce qui limite beaucoup le choix des composantes.

TABLE 2 – Comparaison des relais statiques

Relais statiques	Courant	Résistance	Prix
CPC1907B	6 A	60 mOhm	9.01 \$
CPC1709J	10 A	50 mOhm	10.00 \$
CPC1918J	5.25 A	100 mOhm	14.83 \$

Le prix de ces composantes est similaire et leur courant de charge est assez robuste. Le choix s'est donc fait sur le CPC17907B en raison de son profil plat qui était plus avantageux avec le placement des pièces sur le module maître.

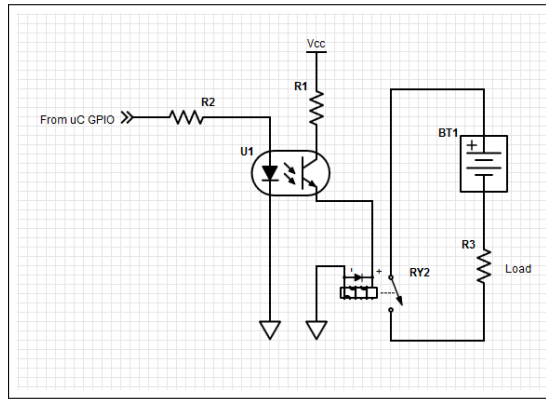


FIGURE 9 – Schéma Solution 1 : Contrôle par relais statique

### Solution 2 : Contrôle par MOSFETs en série

Une façon d'assurer la protection d'un circuit est de rajouter de la redondance. Plusieurs MOSFETs sont mis en série pour augmenter les chances d'ouverture de circuit en cas de défaillances. Plus il y a de composants en série, meilleures sont les chances, mais on augmente aussi le coût. Chaque MOSFET doit être contrôlé individuellement par une patte du microcontrôleur. Également, il est important de s'assurer que la résistance interne des MOSFETs soit constante d'une composante à l'autre. Cela évite l'échauffement du MOSFET ayant la résistance interne la plus élevée, pouvant causer des défaillances.

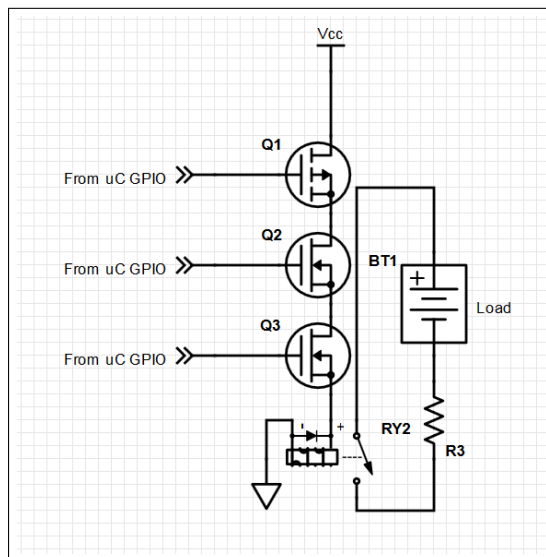


FIGURE 10 – Schéma Solution 2 : Contrôle par MOSFETs en série

### Solution 3 : Circuit d'alimentation à double actionneur

Cette solution provient du livre "A systems approach to Lithium-Ion Battery Management" [4]. L'auteur propose d'utiliser un circuit d'alimentation à double actionneur, soit un actionneur sur le pôle négatif et un sur le pôle positif. Un MOSFET de type P alimente le côté positif (high-side) et un MOSFET de type N est relié au commun sur le circuit du côté négatif (low-side) ce qui offre une sécurité supplémentaire si une des deux composantes venait à faillir. Puisqu'il y a trois contacteurs dans le système, cette



solution requiert d'utiliser un seul MOSFET de type P pour alimenter le côté positif des contacteurs et trois MOSFETs de type N pour le côté négatif de chaque relais.

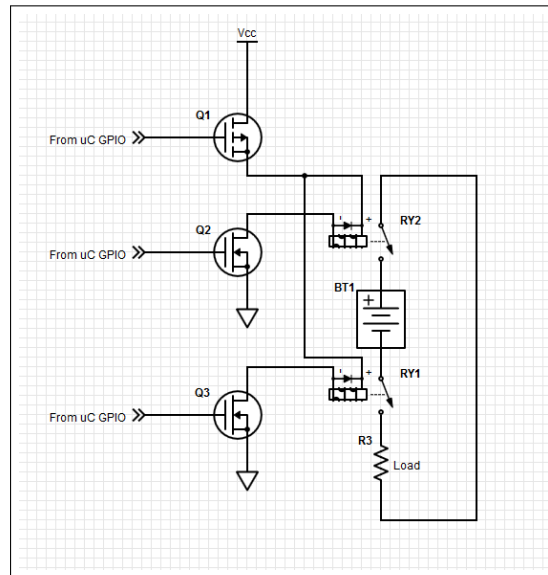


FIGURE 11 – Schéma solution 3 : Circuit d'alimentation à double actionneur

### Choix final

La solution retenue est un mélange de la solution 1 et 3. En ayant un circuit d'alimentation à double actionneur, on évite d'avoir de la redondance. On remplace ainsi les MOSFETs de cette solution par les relais statiques de la solution 1. De cette façon, on s'assure de la plus haute protection tout en ayant le minimum de composantes. Puis, puisqu'on veut éviter de tirer trop de courant du microcontrôleur, on utilise un transistor BJT s'activant avec un faible courant. Le BJT peut ensuite alimenter le relais statique avec l'alimentation 3.3V directement.

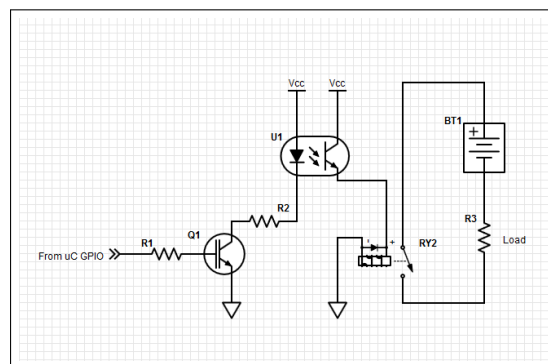


FIGURE 12 – Choix final

## Circuit de précharge

Le contacteur des MPPTs et le contacteur principal sur le pôle positif de la batterie possèdent un circuit de précharge. La précharge permet à la batterie de se connecter à une large charge capacitive. Si la batterie est connectée directement avec une charge capacitive déchargée, le courant transitoire sera limité par l'impédance interne de la batterie, de la charge et des contacteurs. Cette limite ne sera généralement pas assez pour prévenir un courant potentiellement dangereux. Un contacteur qui s'enclenche lorsque la différence de potentiel est trop élevée pourrait le souder et empêcher son ouverture.

Pour prévenir ce problème, on ajoute une résistance en série avec un relais, installés en parallèle du contacteur. Avant d'enclencher le contacteur, un courant limité passe par la résistance, et permet à la tension de monter de façon exponentielle. On compare ensuite la lecture de la charge avec la tension des batteries. Lorsque la tension sur la charge est assez élevée et que la différence de potentiel aux bornes du contacteur est négligeable, le contacteur peut être fermé de façon sécuritaire[4].

La résistance de précharge est dimensionnée pour dissiper la puissance circulant dans la résistance. Pour trouver cette valeur, il faut d'abord calculer la constante de temps[8].

$$\tau = R \cdot C \quad (3)$$

On considère la charge capacitive complète après

$$T = 5 \cdot \tau \quad (4)$$

Par mesure de sécurité, on ajoute 0.5 seconde à ce chiffre.

$$T = T + 0.5 \quad (5)$$

On calcul ensuite l'énergie dissipée par la résistance de précharge.

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad (6)$$

On trouve finalement la puissance totale consommée par la résistance de précharge

$$P = \frac{E}{T} \quad (7)$$

Le temps de précharge doit être judicieusement choisi pour s'assurer que la charge capacitive est assez chargée. D'après ces calculs, avec une résistance de 100 Ohm, une durée de 5.5 secondes sera nécessaire si l'on estime que la charge capacitive est de 10000uF avec une tension maximale de 160 V. On devrait dissiper environ 23.3 W durant cette période. Cependant, des tests devront être effectués durant la réalisation pour ajuster ces valeurs.

TABLE 3 – Sélection de la résistance de précharge

Composante	Manufacturier	Résistance	Dissipation	Prix
TR50JBC100R	Stackpole Electronics Inc.	100 Ohm	50 W	5.81 \$

Le relais doit supporter un courant de 1.6 A. Sa bobine devrait également consommer le moins possible. Un relais tout usage a été choisi.

TABLE 4 – Sélection du relais

Composante	Manufacturier	Courant	Consommation	Prix
ALQ312	Panasonic	10A	16.7 mA	3.34 \$

Pour éviter de polariser à l'inverse les contacteurs avec la précharge, une diode est ajoutée au circuit. Elle doit bloquer une tension minimum de 160 V et pouvoir supporter un courant d'au moins 1.6 A.

TABLE 5 – Sélection de la diode

Composante	Manufacturier	Courant	Tension de blocage	Prix
NRVBS3200T3G	ON Semiconductor	3A	200V	1.37 \$

Ensuite, pour éviter qu'un courant trop élevé ne vienne endommager les composantes, on ajoute un fusible de 2A à action retardée.

La topologie générale du circuit de précharge est présentée à la figure 13.

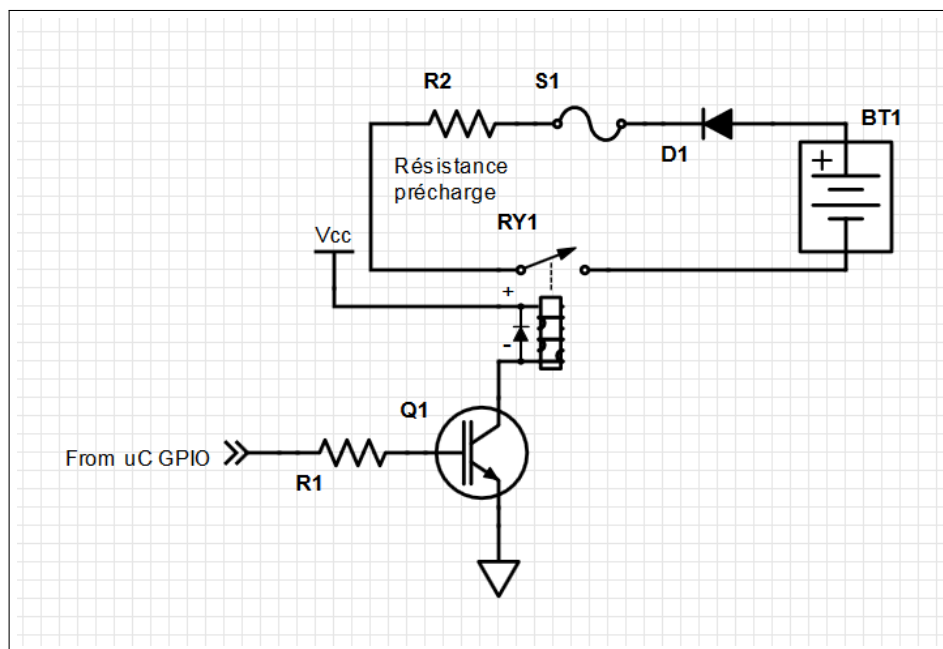


FIGURE 13 – Schéma du circuit de précharge

## 2.7 Signalisation de l'erreur

Le règlement 8.6.B de l'ASC2018[6] stipule que le conducteur doit être informé de l'ouverture des contacteurs causée par le système de protection de batterie lors d'une détection de faute. Des solutions sont présentées pour permettre d'avertir l'utilisateur d'une erreur déclenchée par le système de protection de batterie.

### 2.7.1 Communication CAN

Le module maître, pouvant communiquer avec le reste des systèmes du véhicule, envoie un message CAN. Ce message sera intercepté par la carte de contrôle des lumières du véhicule, située à l'extérieur du système de batterie. La carte se chargera ensuite d'allumer un témoin lumineux visible de l'extérieur du véhicule. Ce même signal peut également être intercepté par le tableau de bord, situé à l'intérieur de l'habitacle.

### 2.7.2 Témoin lumineux externe

Cependant, il est possible que la communication CAN soit interrompue. Pour cette raison, un circuit d'alimentation pour DEL est ajouté sur le module maître. Ce circuit est le même que sur la carte de contrôle des lumières. Cette solution permet donc d'alimenter une bande DEL par le module maître comme le ferait la carte de contrôle des lumières. L'inconvénient de cette solution implique que deux fils doivent sortir du système de batterie pour aller alimenter la bande DEL. Le circuit intégré choisi pour contrôler la bande DEL est le suivant :

TABLE 6 – Sélection de l'alimentation de la bande DEL

Composante	Manufacturier	Courant	Prix
AL8808WT-7	Diodes Incorporated	1A	1.42 \$

### 2.7.3 Témoin lumineux sur le module maître

Pour faciliter le dépannage avec le module maître, une DEL est placée sur la carte pour indiquer à l'utilisateur une défaillance du BMS. Cette solution, si elle est utilisée seule, ne passera pas les qualifications de la compétition. Elle doit être jumelée avec une ou deux des solutions précédentes.

## 2.8 Réinitialisation du système

Lorsqu'une faute est détectée par le système de protection de batterie, les contacteurs restent ouverts. Pour réinitialiser le BMS, il faut que l'utilisateur effectue cette opération de façon manuelle. La réinitialisation peut se faire de trois manières.

### 2.8.1 Communication CAN

Premièrement, on peut réinitialiser le système en envoyant un message CAN au module maître par un autre circuit ou avec un ordinateur branché sur le réseau CAN.

## **2.8.2 Communication RS232**

Deuxièmement, on peut utiliser la communication RS232 en branchant un ordinateur personnel sur le port de communication du module maître. On peut ainsi envoyer une commande de réinitialisation avec l'aide d'un émulateur de terminal tel que Putty.

## **2.8.3 Interrupteur sur le module maître**

Troisièmement, une touche contact est présente sur le module maître pour manuellement réinitialiser le BMS. Cette touche est aussi utilisée comme interrupteur tout usage lors du dépannage de la carte.

# **3 Balancement des modules**

Les différents modules qui composent la batterie n'ont pas exactement la même capacité et la même résistance en série. Ces différences font en sorte que les modules n'atteindront pas un état de charge complet en même temps. Lorsque la batterie est à la fin de sa recharge, les modules doivent être balancés pour que la batterie puisse atteindre un état de charge de 100%. Lors de la compétition, la batterie n'atteint pas un état de charge assez élevé pour balancer les modules, cette étape a donc seulement lieu avant le début de la course. Il existe plusieurs stratégies de balancement qui varient en complexité, en robustesse et en efficacité.

## **Stratégies de balancement**

Pour égaliser les tensions, le courant de recharge des modules qui ont atteint le voltage maximum peut être dissipé ou envoyé vers les modules qui ont un état de charge inférieur.

### **Balancement dissipatif au voltage maximum des modules ("top balancing")**

Le balancement dissipatif a l'avantage d'être plus compacte, plus facile à concevoir et moins dispendieux. Le courant de recharge doit cependant pouvoir être réduit pour ne pas être plus haut que le courant de balancement. Cette technique ne permet pas de balancer avec un grand courant puisque la chaleur dégagée par la résistance et le MOSFET pourrait devenir trop élevée, ce qui pourrait causer une erreur de température. La sensibilité du MOSFET et sa défaillance en court-circuit font en sorte que cette méthode n'est pas très robuste. Un MOSFET en court-circuit ne déclenche aucune erreur et il peut être long avant de détecter qu'un module se vide plus rapidement que les autres. Cette erreur a le potentiel de briser la batterie dans le cas où aucune action externe n'est prise et que le module atteint une tension en dessous du seuil minimum.

Pour remédier à ce problème, un MOSFET contrôlé par un comparateur est mis en série avec le circuit de balancement. Cette redondance permet de couper le circuit lorsque la tension du module n'est pas dans la plage où il peut être balancé. Cette protection est indépendante et matérielle. Elle est tout aussi efficace dans le cas où le MOSFET contrôlé par le PWM est en court-circuit ou si l'erreur provient du microcontrôleur qui envoie un PWM alors qu'il ne devrait pas.

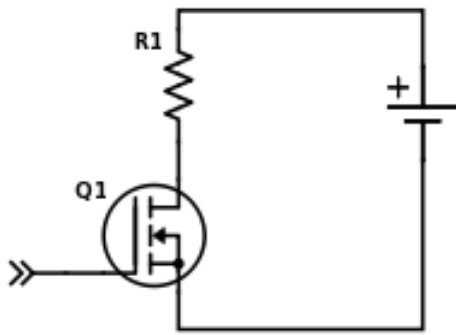


FIGURE 14 – Schéma fonctionnel du balancement dissipatif

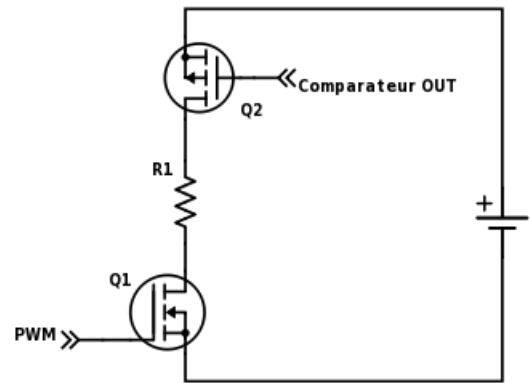


FIGURE 15 – Schéma fonctionnel du balancement dissipatif avec redondance

### Balancement actif

Le balancement actif permet non seulement d'amener l'état de charge à 100%, mais aussi de l'amener à 0%. Les modules qui ont une capacité supérieure peuvent transmettre l'énergie excédentaire aux modules avec une plus petite capacité. L'utilisation de la batterie est ainsi optimisée. Plusieurs topologies existent pour transférer l'énergie telles que des capacitances commutées, deux matrices qui connectent deux différents modules sur un convertisseur DC-DC, l'utilisation d'une inductance couplée pour faire un "flyback" et plusieurs autres variantes.

L'utilisation d'un convertisseur DC-DC "flyback", avec le primaire aux bornes de chaque module et le secondaire aux bornes de la batterie, est la topologie qui s'intègre le mieux pour son nombre de composants limités et sa simplicité d'utilisation. Le balancement actif est surtout utilisé pour des batteries qui ont des modules avec des performances très inégales et/ou des batteries qui ont une très grande durée de vie. Cette solution est plus robuste, puisqu'il suffit d'un fusible en série avec le bobinage primaire pour protéger la batterie d'une défaillance du MOSFET. Le courant de balancement peut aussi être beaucoup plus élevé étant donné qu'il n'y a pas beaucoup de perte.

### Choix final

Le balancement dissipatif est la stratégie qui concorde le mieux aux besoins d'Éclipse X. La grosseur des transformateurs, l'ajout des fils pour connecter les bobinages secondaires, le manque de temps pour implémenter la solution et le faible gain de performance du balancement actif rendent cette solution impossible à utiliser pour le projet. La batterie d'Éclipse a seulement une durée de vie utile de 4 semaines en plus d'être construite avec des modules caractérisés qui ont des performances très semblables. Le balancement actif n'a pas de grande valeur ajoutée par rapport au balancement dissipatif.

## 4 Compatibilité avec le BMS présentement utilisé

Afin que le système soit rétrocompatible avec le BMS de Lithium Balance, il est nécessaire que le connecteur 22 pattes qui relie le module maître avec le reste des modules externes, soit interchangeable entre l'ancien et le nouveau BMS.

### 4.1 Brochage du connecteurs 22 pattes de Lithium Balance

Selon le manuel d'utilisation de Lithium Balance, le brochage du connecteurs 22 pattes est détaillé au tableau 7 [5].

TABLE 7 – Brochage du connecteur de Lithium Balance

Broche	Nom	Direction	Rôle
1	PWM COM	Sortie	Commun du signal de contrôle de la charge
2	ANA 1 OUT	Sortie	Signal analogique relié à la jauge de charge de la batterie
3	ANA 2 OUT	Entrée	Signal analogique pour contrôler le chargeur
4	RS232 RX	Entrée	Réception de la communication RS232
5	ANA IN	Sortie	Non utilisé
6	CAN LO	Sortie	Niveau bas de la communication CAN
7	IO 2	Sortie	Utilisé pour activer le pôle négatif du contacteur principal
8	IO 4	Sortie	Utilisé pour la précharge du contacteur principal
9	IO 6	Sortie	Sortie configurable par l'utilisateur
10	IO 8	Sortie	Sortie configurable par l'utilisateur
11	12V IN	Entrée	Alimentation 12V du système
12	ANA SUPPLY	Entrée	Alimentation externe de 0-30V pour le signal du chargeur
13	PWM 2	Sortie	Modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour le signal de charge
14	RS232 TX	Sortie	Transmission de la communication RS232
15	RS232 GND	Sortie	Commun de la communication RS232
16	CAN HI	Sortie	Niveau haut de la communication CAN
17	IO 1	Sortie	Utilisé pour activer le pôle positif du contacteur principal
18	IO 3	Entrée	Active le mode charge
19	IO 5	Entrée	Active le mode décharge
20	IO 7	Sortie	Sortie configurable par l'utilisateur
21	12V IN	Entrée	Alimentation 12V du système
22	GND	Entrée	Commun du système

## 4.2 Nouvelle configuration de brochage du connecteurs 22 pattes

Certaines fonctions ont été ajoutées ou modifiées sans changer la compatibilité du connecteur. De plus, les broches pouvant être configurées par l'utilisateur ont de nouvelles fonctions. Par exemple, il y a une broche qui est utilisée pour la précharge du contacteur MPPTs et trois alimentations de sortie tout usage pour alimenter des ventilateurs ou autres appareils. Puis, les circuits analogiques sont inclus sur le module maître même s'ils ne sont pas utilisés présentement par la voiture solaire. La nouvelle configuration du connecteur 22 pattes est détaillée par le tableau 8.

TABLE 8 – Nouveau brochage du connecteur de Lithium Balance

Broches	Nom	Direction	Rôle
1	PWM COM	Sortie	Commun du signal de contrôle de la charge
2	ANA 1 OUT	Sortie	Signal analogique tout usage
3	ANA 2 OUT	Entrée	Signal analogique tout usage
4	RS232 RX	Entrée	Réception de la communication RS232
5	ANA IN	Sortie	Entrée analogique tout usage
6	CAN LO	Sortie	Niveau bas de la communication CAN
7	IO 2	Sortie	Utilisé pour activer le pôle négatif du contacteur principal
8	IO 4	Sortie	Utilisé pour la précharge du contacteur principal
9	IO 6	Sortie	Utilisé pour la précharge du contacteur MPPT
10	IO 8	Sortie	Alimentation de sortie tout usage
11	12V IN	Entrée	Alimentation 12V du système
12	ANA SUPPLY	Entrée	Alimentation externe de 0-30V pour le signal du chargeur
13	PWM 2	Sortie	Modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour le signal de charge
14	RS232 TX	Sortie	Transmission de la communication RS232
15	RS232 GND	Sortie	Commun de la communication RS232
16	CAN HI	Sortie	Niveau haut de la communication CAN
17	IO 1	Sortie	Utilisé pour activer le pôle négatif du contacteur principal
18	IO 3	Entrée	Utilisé pour activer le contacteur des MPPTs
19	IO 5	Entrée	Alimentation de sortie tout usage
20	IO 7	Sortie	Alimentation de sortie tout usage
21	12V IN	Entrée	Alimentation 12V du système
22	GND	Entrée	Commun du système



## **5 Manipulations et vérifications techniques**

L'installation du système de protection dans la batterie doit être sécuritaire autant pour l'utilisateur, pour la batterie que pour les circuits. Les différents modules doivent être protégés pour tolérer des erreurs d'inattention et de mauvaise manipulation. La vérification technique lors de la compétition doit prendre moins de 12 manipulations et ses manipulations ne doivent pas être compliquées à exécuter.

### **5.1 Protections**

Le module qui présente des risques lors des manipulations est le module esclave. Le système de protection présentement utilisé exige que des fusibles soient installés en série avec chaque entrée des mesures de tension. Les fils sont très longs et désordonnés et l'inversion de deux connexions peut avoir un effet catastrophique. En utilisant des modules de lecture de tension isolés, un circuit de protection contre une polarité inverse et un fusible directement au connecteur, il est possible d'avoir un filage mieux organisé et beaucoup plus sécuritaire.

### **5.2 Connecteurs**

Les circuits doivent être manipulables facilement et rapidement puisqu'en compétition les membres de l'équipe sont souvent pressés et fatigués. Les connecteurs doivent supporter des gestes brusques, doivent s'insérer rapidement et ne doivent pas permettre d'être branchés à l'envers. Les connecteurs à angle droit avec une broche pour le support mécanique et un détrompeur de la série 6490 de Wurth répondent aux critères.

### **5.3 Vérifications techniques**

Afin de faciliter les vérifications techniques, les lectures de tension sont isolées pour seulement avoir à remplacer un module par une alimentation variable en enlevant seulement un connecteur. La validation de la lecture de courant demande de débrancher la résistance "shunt" puisqu'elle est trop petite et qu'il est impossible pour l'alimentation de fournir assez de courant. Un petit circuit avec un commutateur DPDT pour inverser la polarité et un diviseur de tension remplacera la résistance de lecture. La vérification des senseurs de température consiste seulement à sortir la thermistance et à la chauffer avec un séchoir à cheveux.

## 6 Architecture

### 6.1 Architecture générale

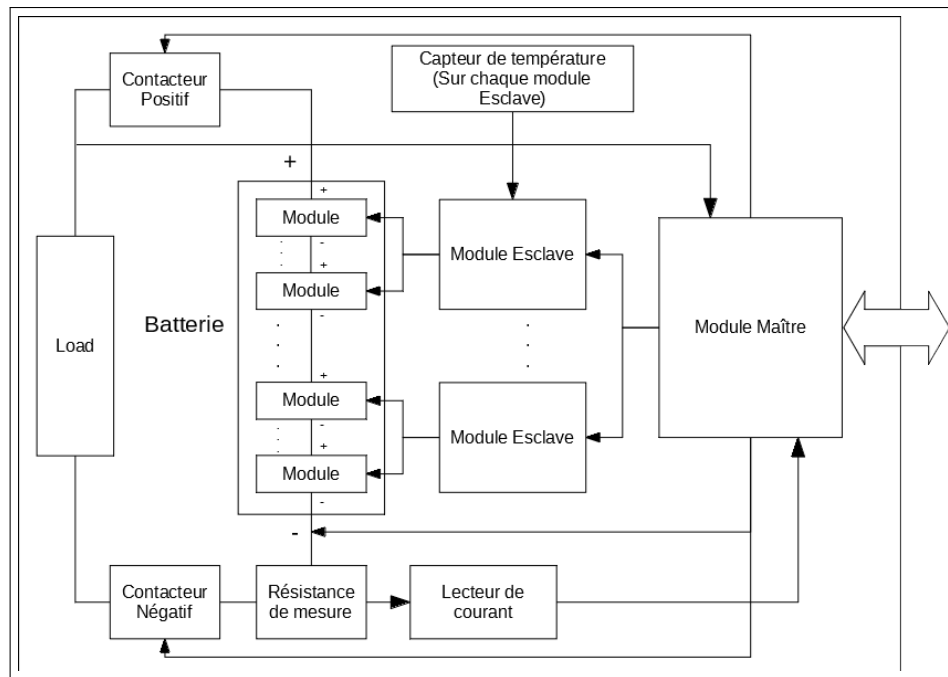


FIGURE 16 – Architecture générale du système de protection et de contrôle

### 6.2 Architecture du module de lecture de courant

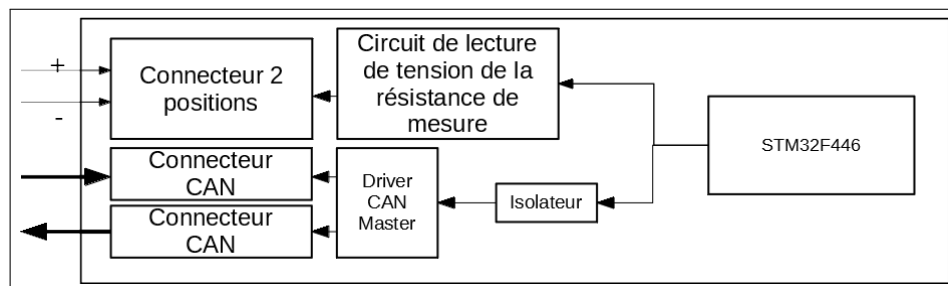


FIGURE 17 – Architecture du module de lecture de courant

## 6.3 Architecture du module maître

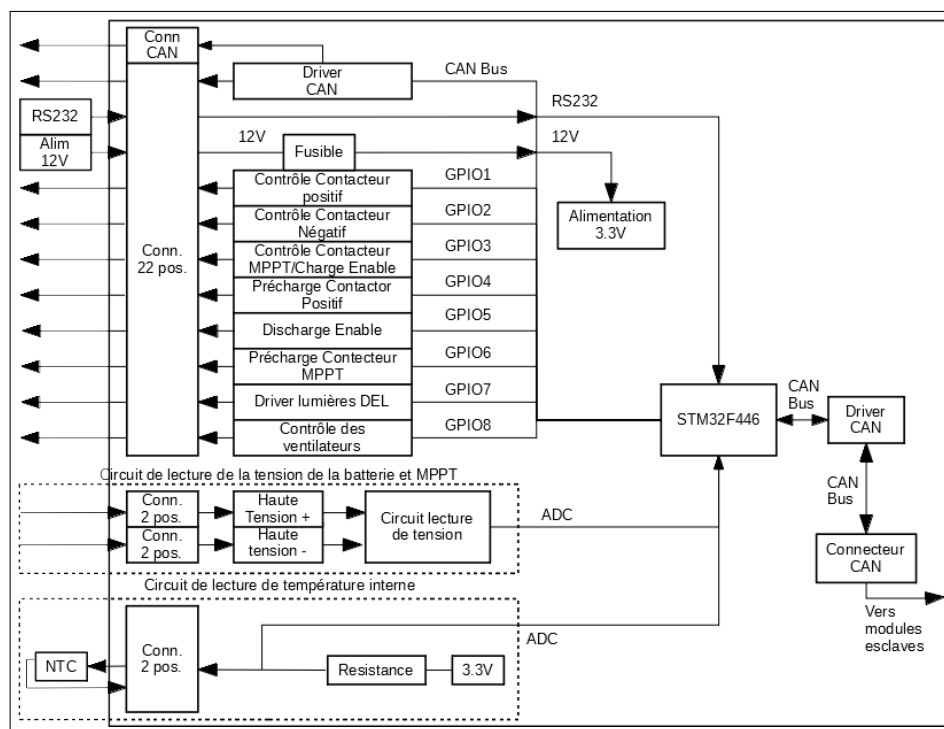


FIGURE 18 – Architecture du module maître

## 6.4 Architecture du module esclave

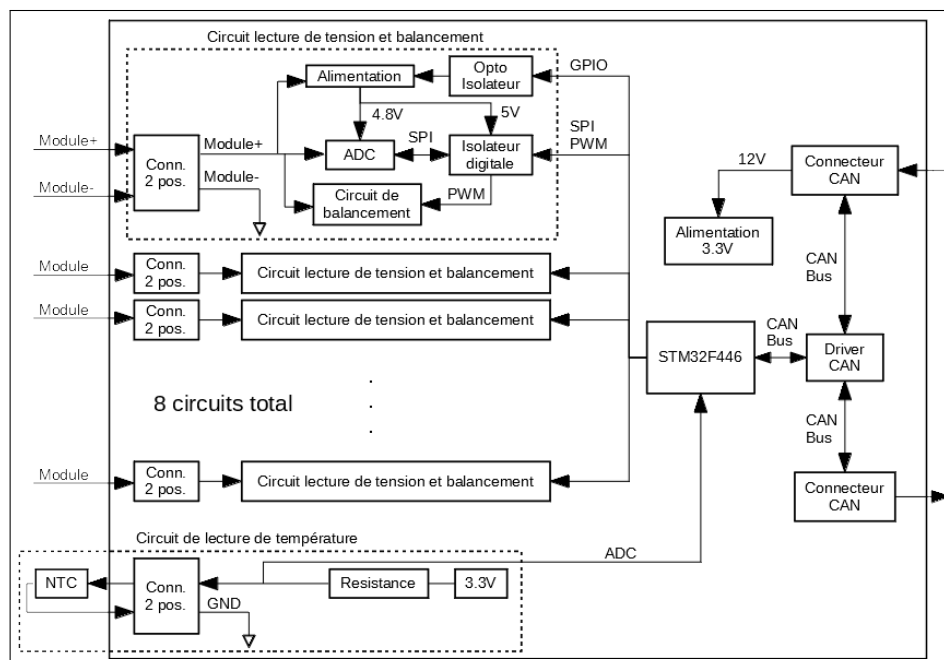


FIGURE 19 – Architecture du module esclave

## 6.5 Choix technologiques

### Système d'exploitation en temps réel

Le système d'exploitation en temps réel (RTOS) est utilisé pour rendre le système plus robuste. Il permet de facilement prioriser les tâches les plus importantes du système ainsi que d'améliorer son déterminisme. De plus, il rend la modification et la maintenance du code très simple grâce à la segmentation de l'application en tâches distinctes. Plusieurs RTOS sont disponibles et offrent des caractéristiques similaires. Les grands différenciateurs sont le coût, la robustesse (évaluée selon son utilisation dans des systèmes critiques), la licence utilisée pour le code et la facilité d'utilisation.

TABLE 9 – Comparaison des RTOS

	Prix	Robustesse	Licence	Facilité
uC/OS-III	Gratuit (pour les étudiants et hobbyistes)	Certifié aérospatial, médical et industriel. Utilisé dans le « rover » Curiosity de la NASA.	Propriétaire mais à sources ouvertes.	Plateforme de développement déjà construite et prête à être utilisée. Connu des membres de l'équipe. Documentation exceptionnelle.
FreeRTOS	Gratuit	Aucune certification. Pour avoir une version certifiée, il faut utiliser une version payante (SafeRTOS).	FreeRTOS Open Source License (GNU GPL modifiée).	Projet de base facilement générable à l'aide d'outils. Bonne documentation.
RTEMS	Gratuit	Aucune information sur les certifications disponible. Utilisé dans l'espace par la NASA et l'ESA.	RTEMS License (GNU GPL modifiée).	Complexe. Bonne documentation.

Notre choix s'est arrêté sur uC/OS-III, surtout à cause de la facilité d'utilisation étant donné qu'une plateforme était déjà disponible et utilisée dans le club Éclipse. Le fait de réutiliser cette même plateforme nous fait gagner du temps et permettra à d'autres membres du club de pouvoir facilement intégrer le projet et l'améliorer au fil du temps. La robustesse du RTOS était aussi un point majeur, puisque le BMS est une application critique pour la vie.

### Protocole de communication

Nous avons le choix d'interfacer les périphériques externes avec plusieurs protocoles de communication. Les deux plus populaires sont le I2C et le SPI. Le I2C nécessite seulement deux traces pour relier tous les périphériques externes avec le microcontrôleur aux dépens d'une plus grande complexité dans la façon de communiquer. Quant au SPI, c'est le contraire. La façon de l'utiliser est très simple, mais il faut trois traces plus une supplémentaire pour chaque périphérique externe. De plus, le SPI peut aller à des vitesses plus grandes que le I2C.

Notre choix s'est arrêté sur le SPI à cause de sa simplicité d'utilisation. Plus le code pour le gérer est simple, plus il est facile à tester et donc plus il a de chance d'être parfaitement robuste rapidement. Le microcontrôleur choisi peut accommoder le nombre de traces supplémentaires nécessaires, ce qui n'entraîne donc aucun coût supplémentaire relié au désavantage du SPI par rapport au I2C.

### **Interruption et interrogation (polling)**

Nous avons décidé de minimiser l'utilisation des interruptions à ce qui est vraiment nécessaire étant donné que lorsqu'une interruption est déclenchée, le système priorise le traitement de celle-ci par rapport au reste des fonctions. Les interruptions sont utiles pour obtenir un temps de réponse très rapide pour les fonctions prioritaires et de la précision pour les bases de temps (time base). Par contre, dépendamment des situations, elles peuvent ajouter une charge non négligeable sur le système et pourraient faire en sorte de le bloquer complètement s'il y avait une erreur de programmation dans les fonctions qui les prennent en charge. Si l'interruption est externe, comme pour un bouton, il est aussi dangereux qu'elle soit déclenchée sans le vouloir à cause d'un « glitch ».

### **Microcontrôleur**

Une multitude de marques de microcontrôleur existent sur le marché. Une des plus populaires est STMicroelectronics avec sa gamme STM32. Celle-ci est basée sur l'architecture la plus répandue pour le développement embarqué, soit l'ARM Cortex-M.

Le choix de cette gamme repose sur plusieurs facteurs distinctifs. Premièrement, des cartes d'évaluation sont offertes à très faible coût, ce qui permet de commencer le développement avant d'avoir reçu le vrai matériel. Ensuite, une suite logicielle permettant d'utiliser les périphériques internes très facilement est disponible. De plus, une plateforme utilisant cette gamme de microcontrôleurs est déjà utilisée par le club scientifique Éclipse. Il y a donc déjà des connaissances acquises quant à son utilisation.

## **6.6 Logiciel**

L'architecture logicielle des trois modules est présentée ici sous forme de pile montrant ainsi les interdépendances entre chaque couche. La première couche est pour l'applicatif. On y trouve les différentes tâches que le module doit effectuer. Ensuite viennent la couche des "middlewares", puis celle des services. Les services sont des bibliothèques logicielles contextualisées qui utilisent les pilotes pour effectuer des tâches de plus haut niveau. Les trois dernières couches sont celles des pilotes, de l'abstraction matérielle et des périphériques matériels internes.

## Module maître

Interruptions : Base de temps du HAL, base de temps du RTOS, CAN #1 (Tx et Rx), CAN #2 (Tx et Rx)  
Interrogations : ADC interne thermistor (x1), Bouton de reprise d'erreur

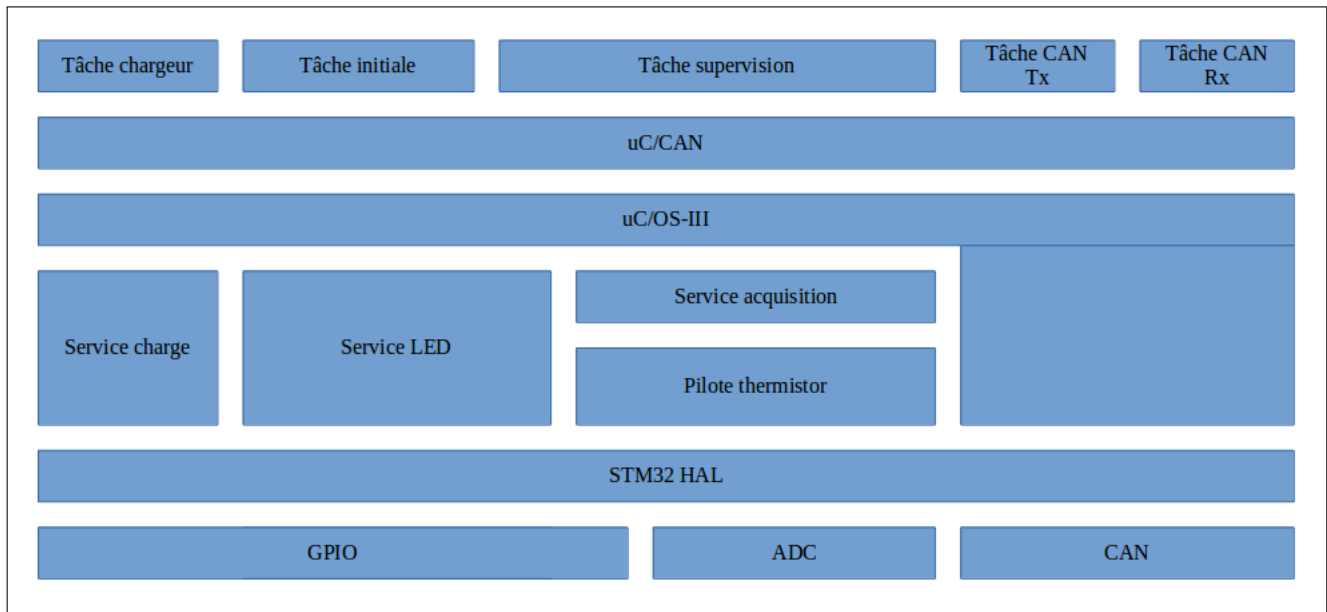


FIGURE 20 – Logiciel du module maître

## Module esclave

Interruptions : Base de temps du HAL, base de temps du RTOS, CAN #1 (Tx et Rx)  
Interrogations : ADC externe cellules (x8), ADC interne thermistor (x2)

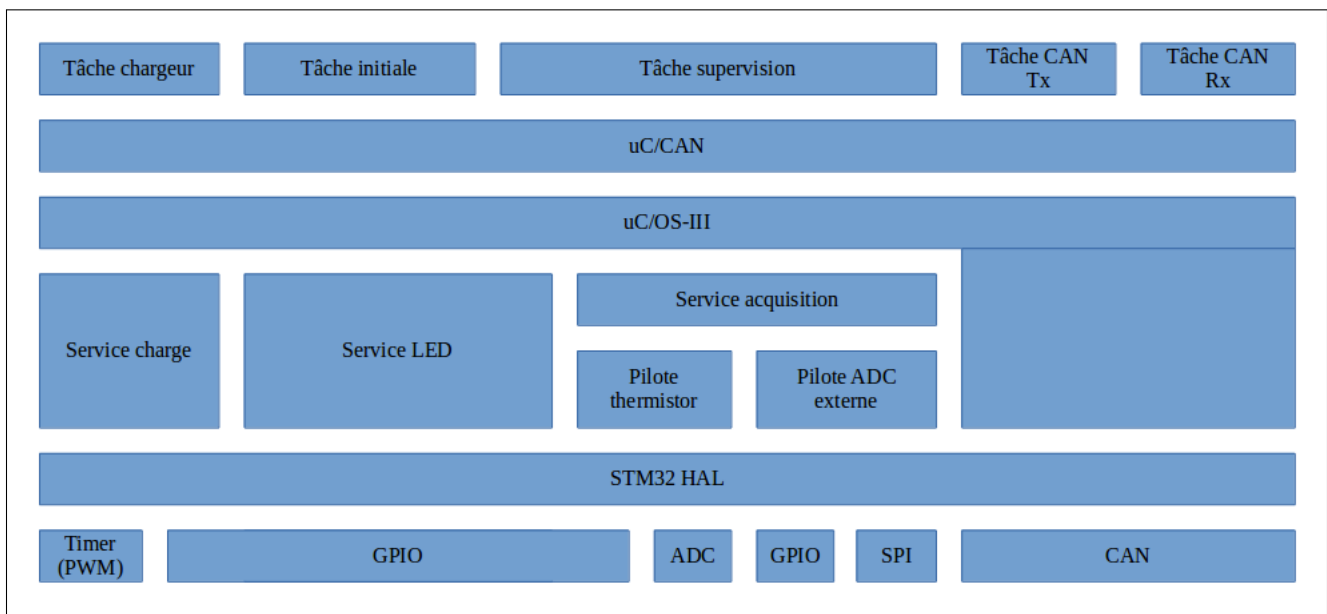


FIGURE 21 – Logiciel du module esclave

## Module de lecture de courant

Interruptions : Base de temps du HAL, base de temps du RTOS, CAN #1 (Tx et Rx)

Interrogations : ADC externe shunt

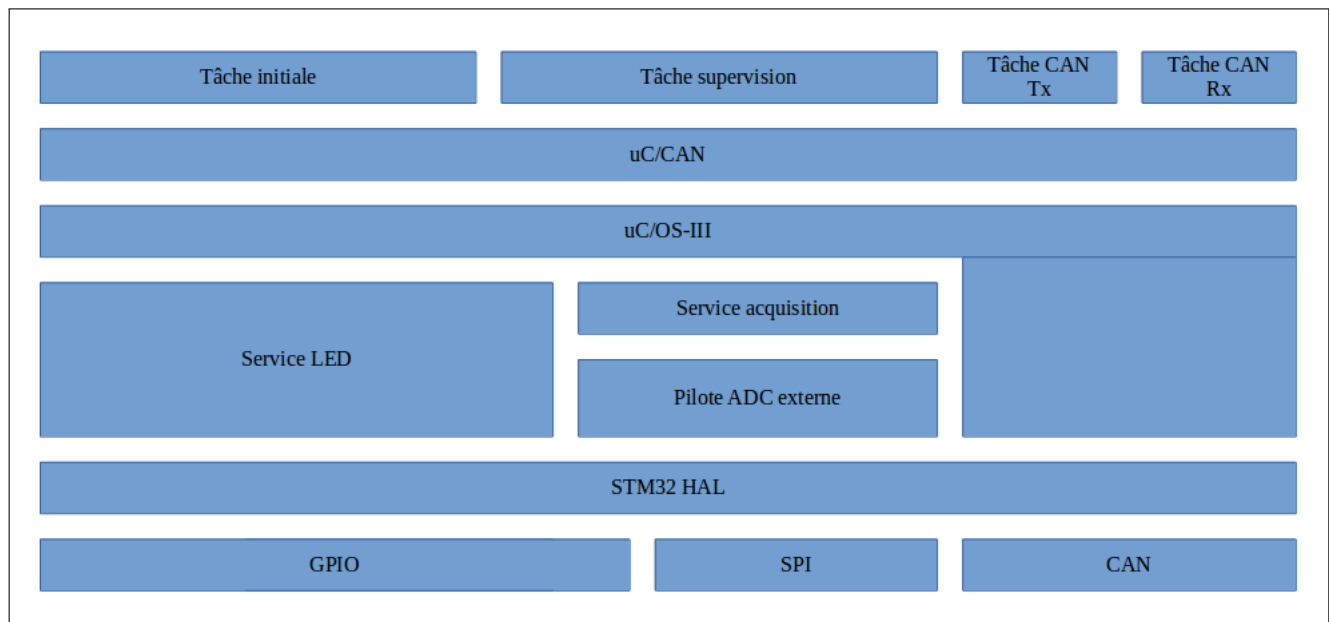


FIGURE 22 – Logiciel du module de lecture de courant

## 7 Annexes : Diagrammes fonctionnels

### 7.1 Module maître

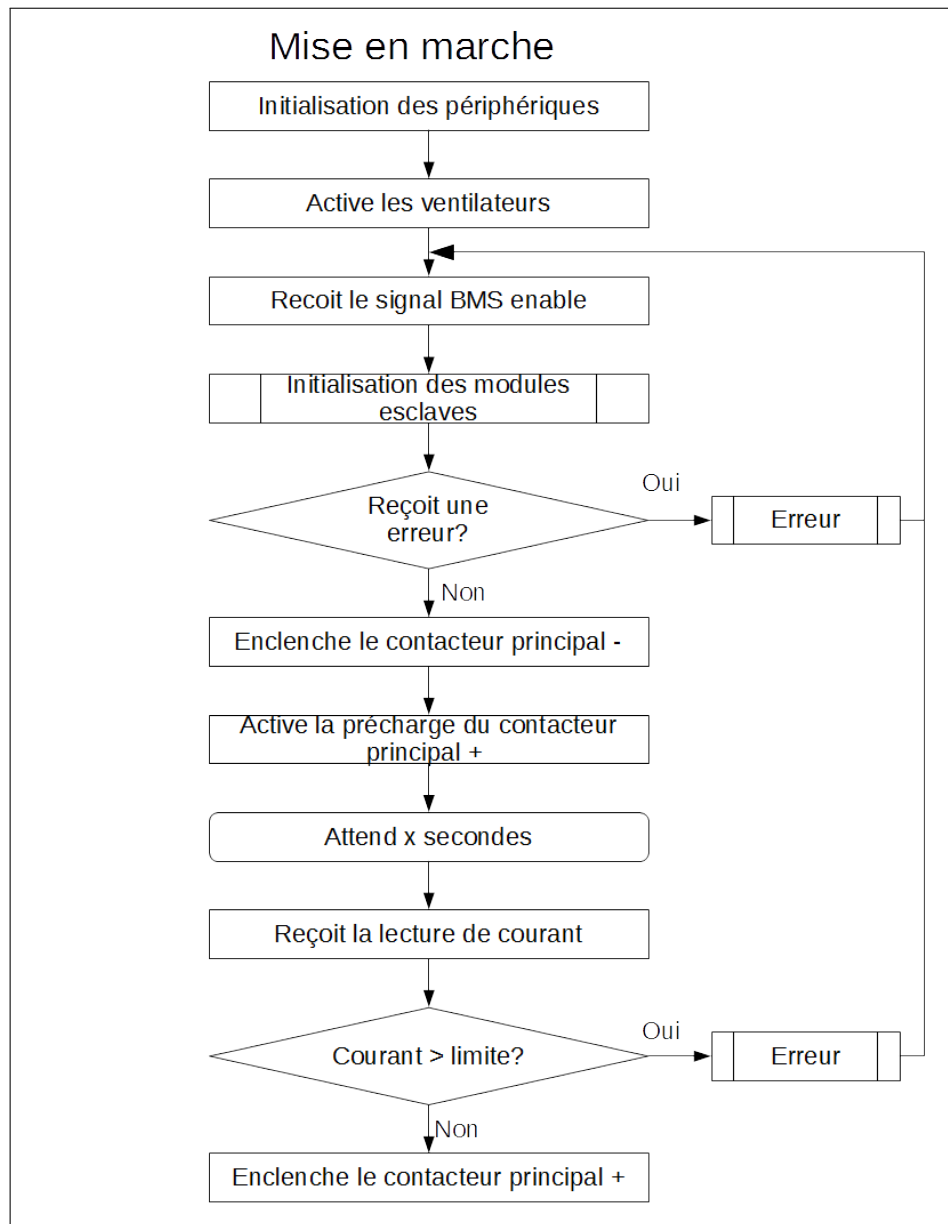


FIGURE 23 – Diagramme module maître : Mise en marche



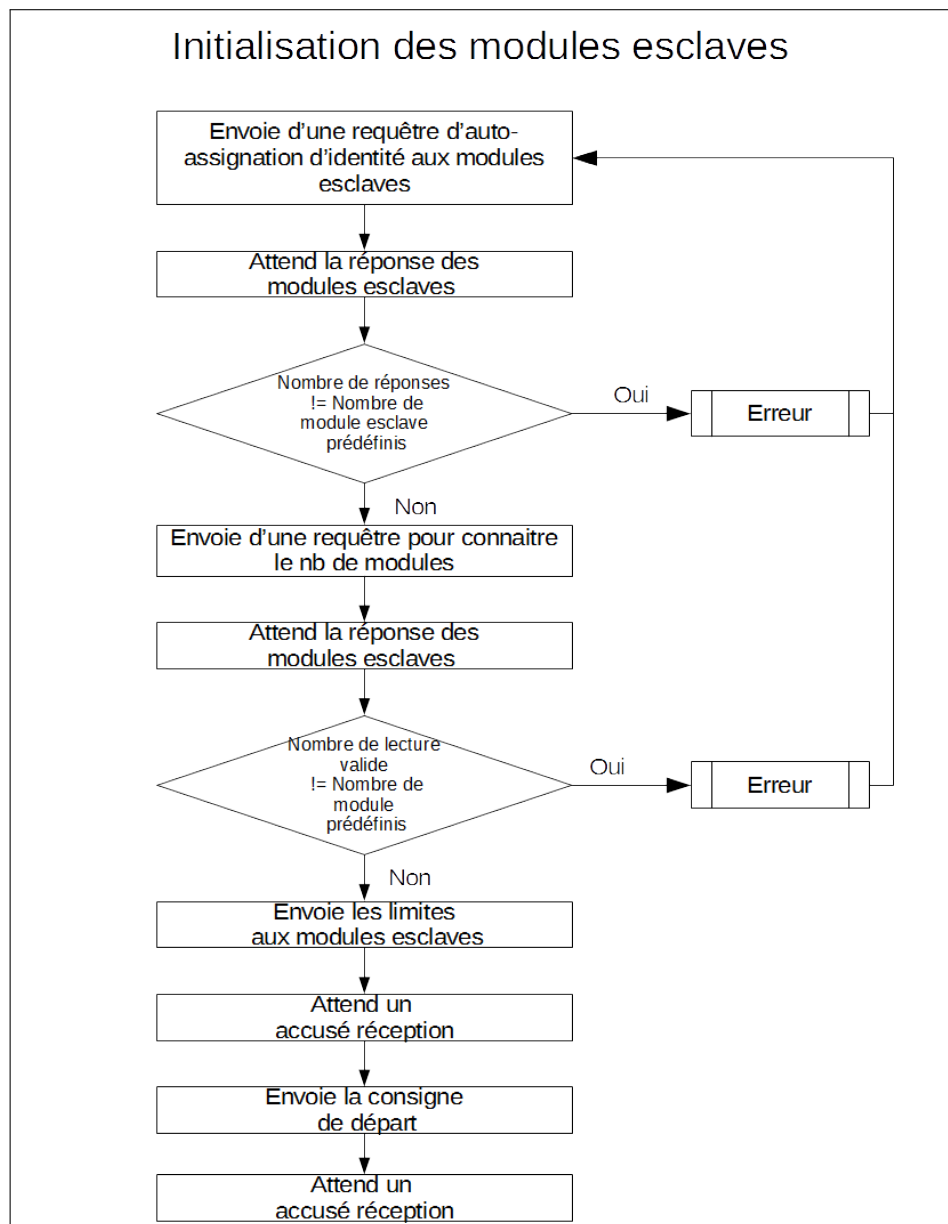


FIGURE 24 – Diagramme module maître : Initialisation des modules esclaves

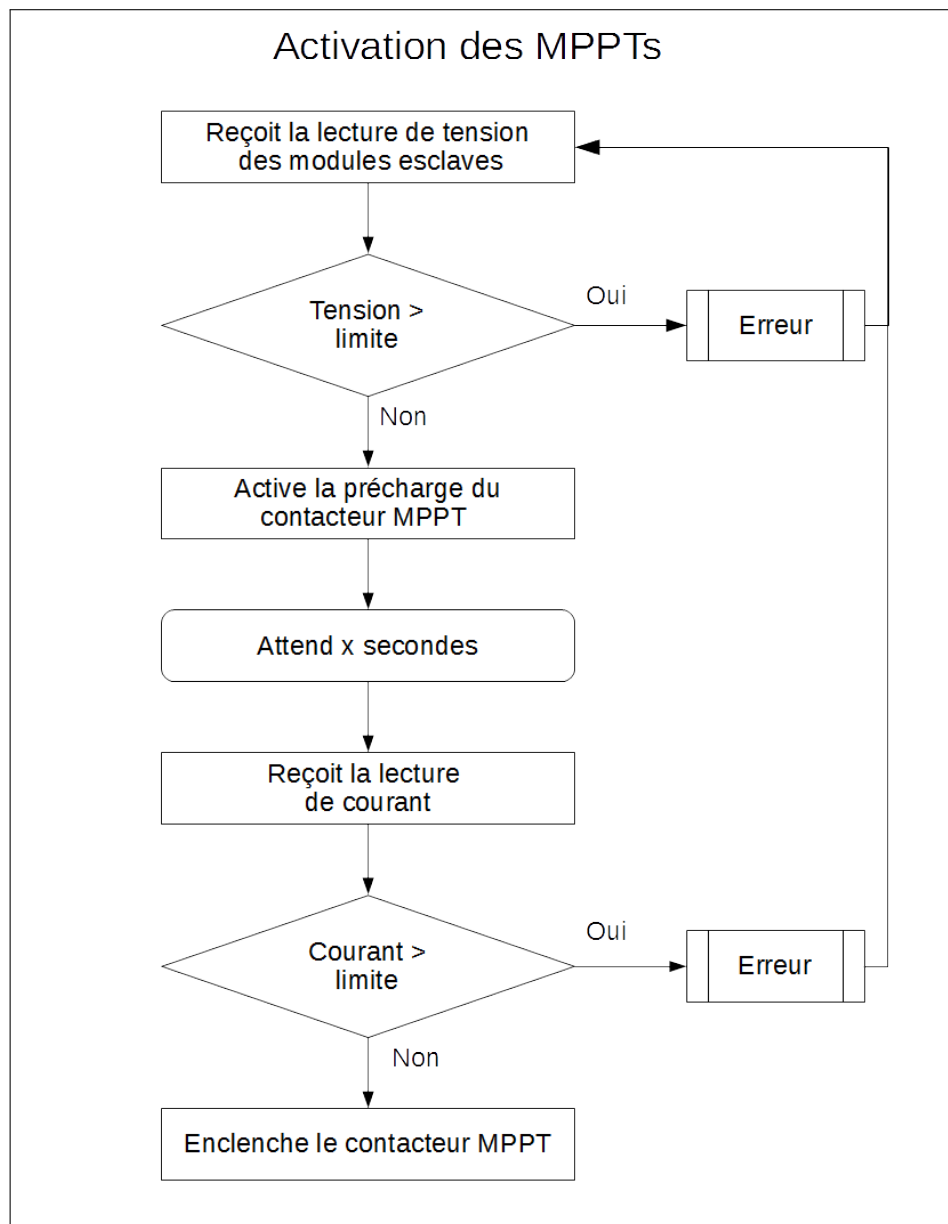


FIGURE 25 – Diagramme module maître : Activation des MPPTs

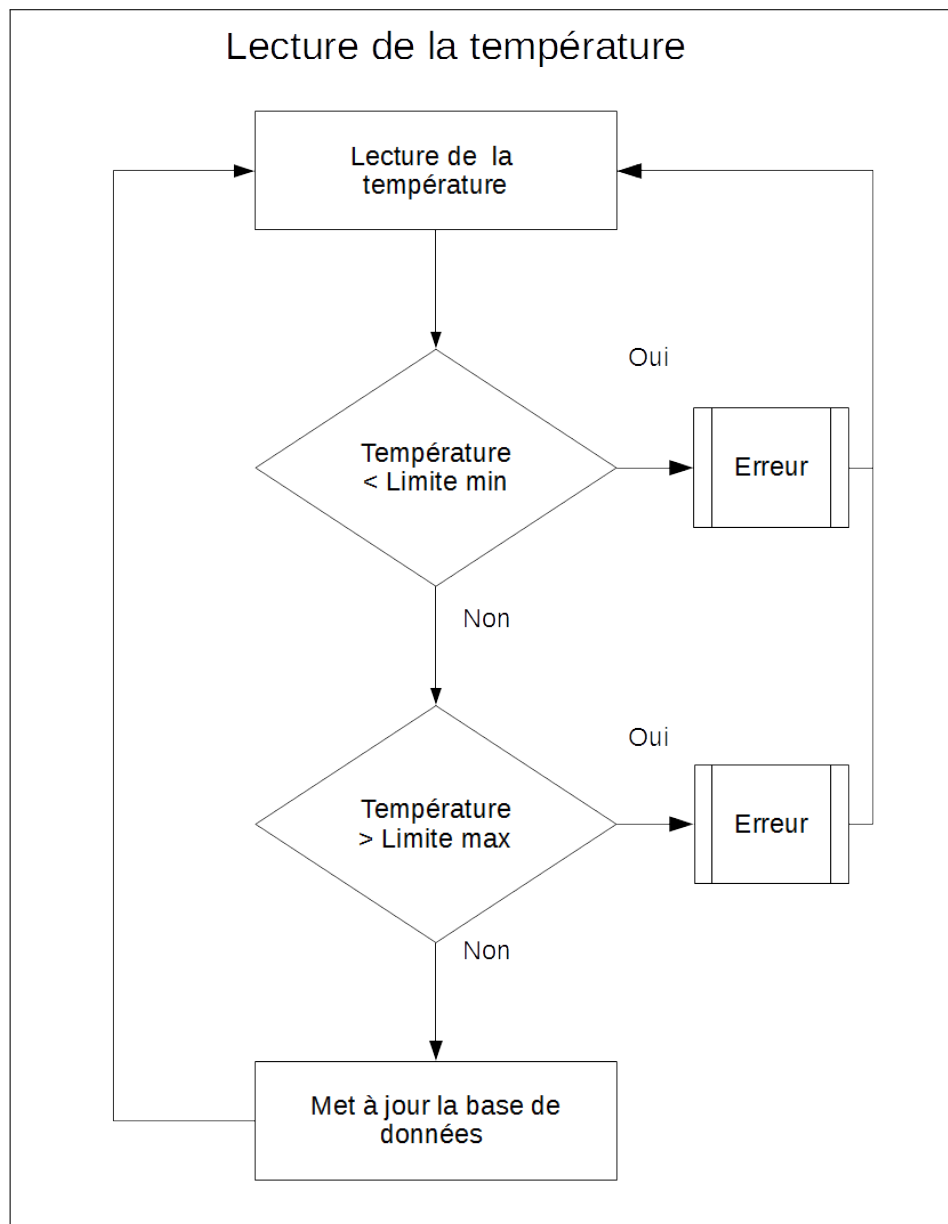


FIGURE 26 – Diagramme module maître : Lecture de la température

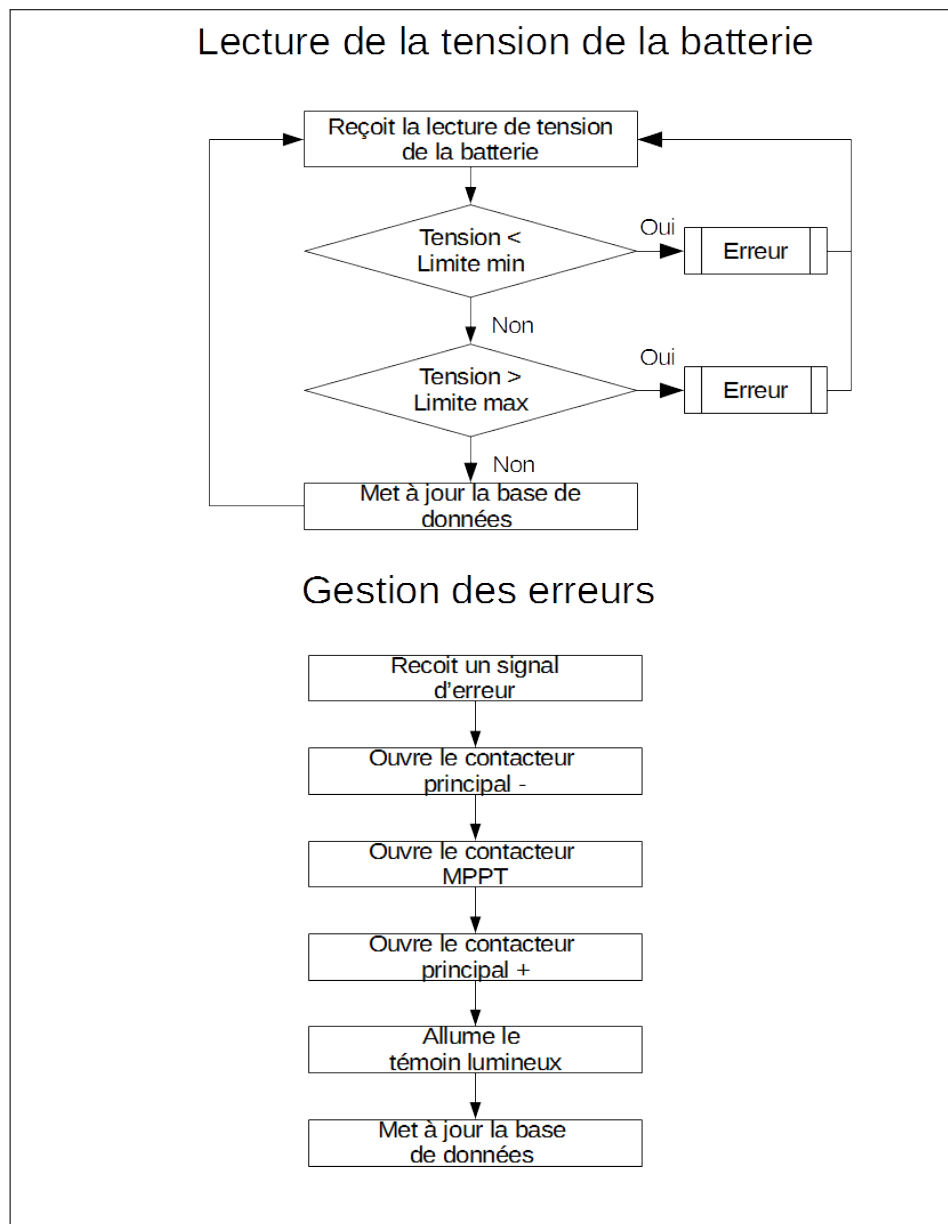


FIGURE 27 – Diagramme module maître : Lecture de la tension de la batterie + Gestion des erreurs

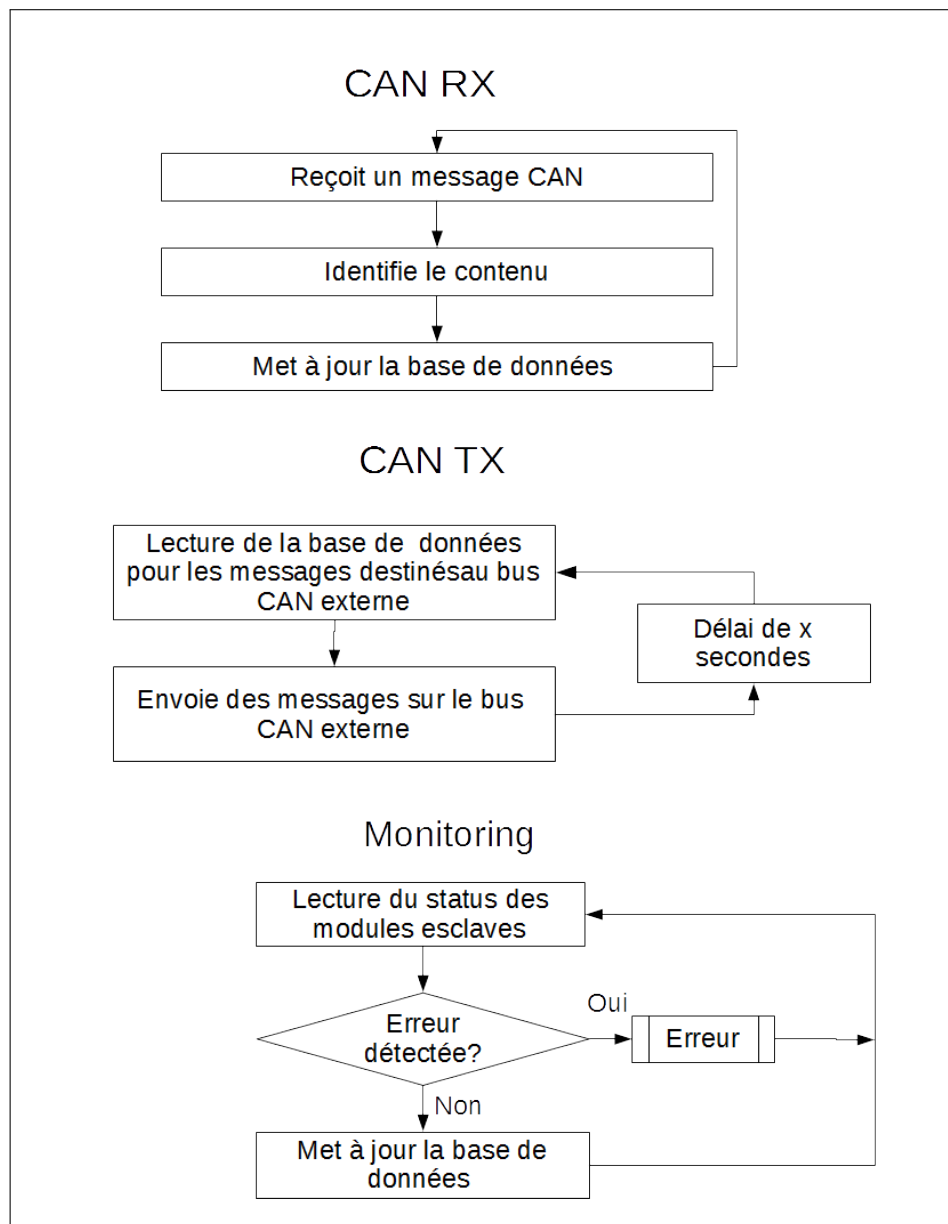


FIGURE 28 – Diagramme module maître : CAN RX + CAN TX + Monitoring

## 7.2 Module esclave

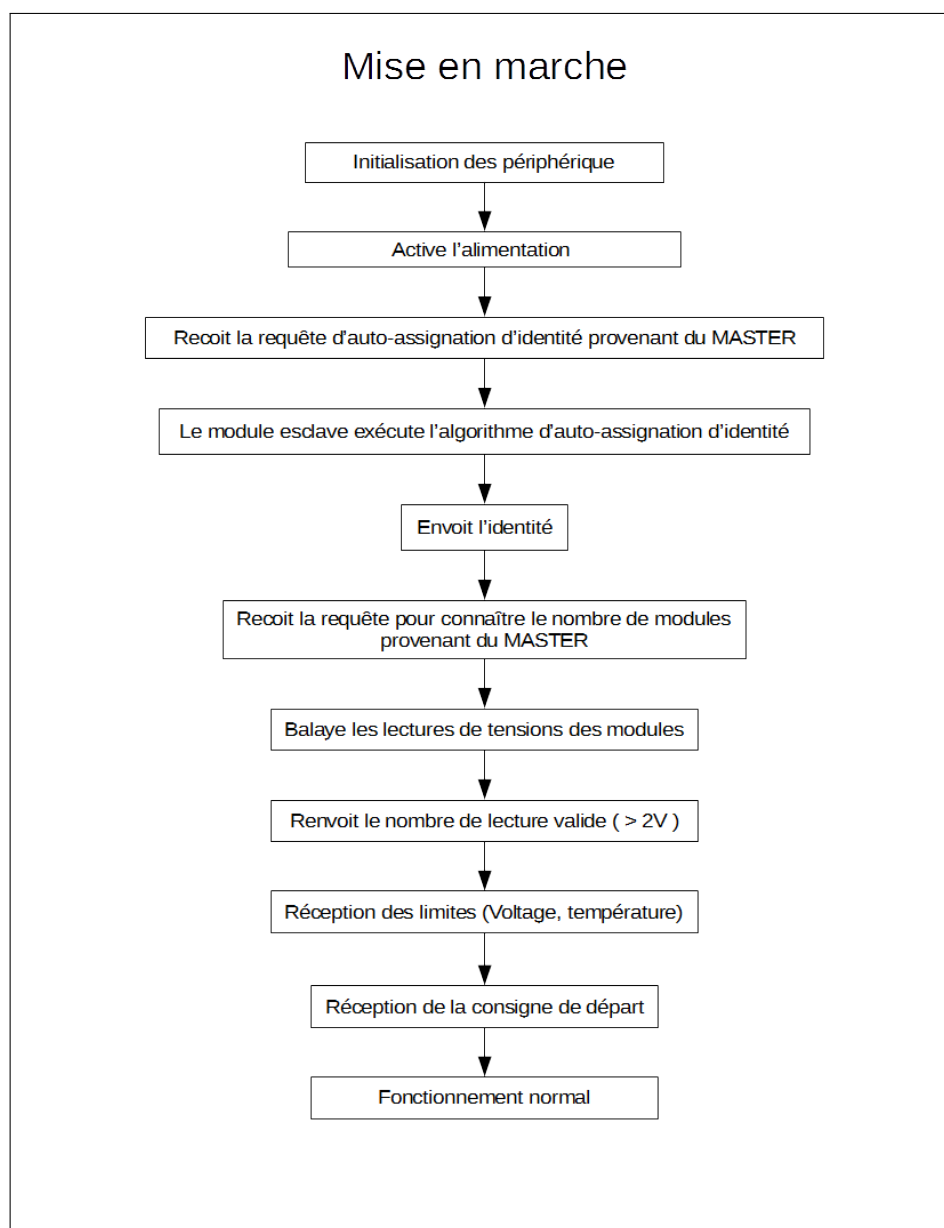


FIGURE 29 – Digramme module esclave : Mise en marche

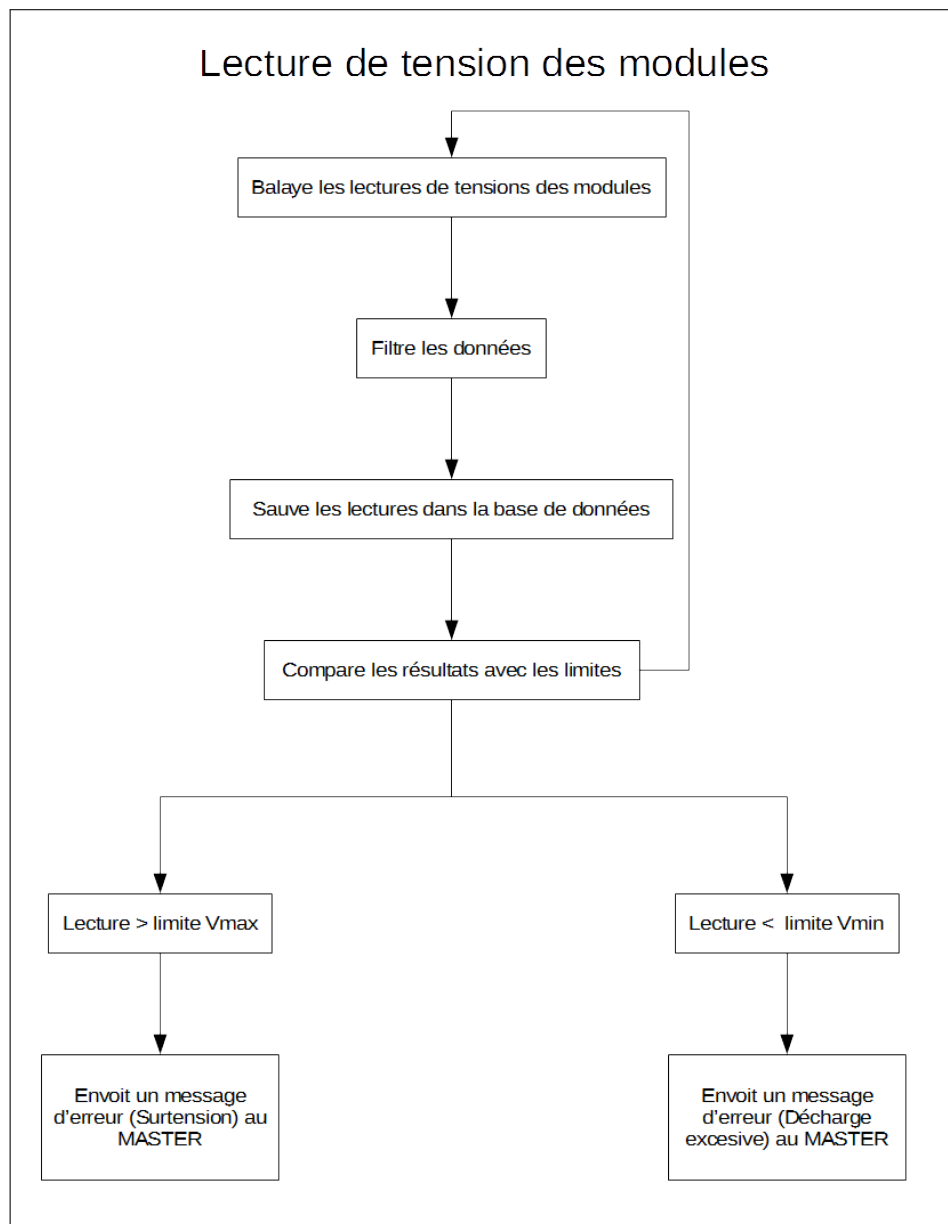


FIGURE 30 – Diagramme module esclave : Lecture de tension des modules

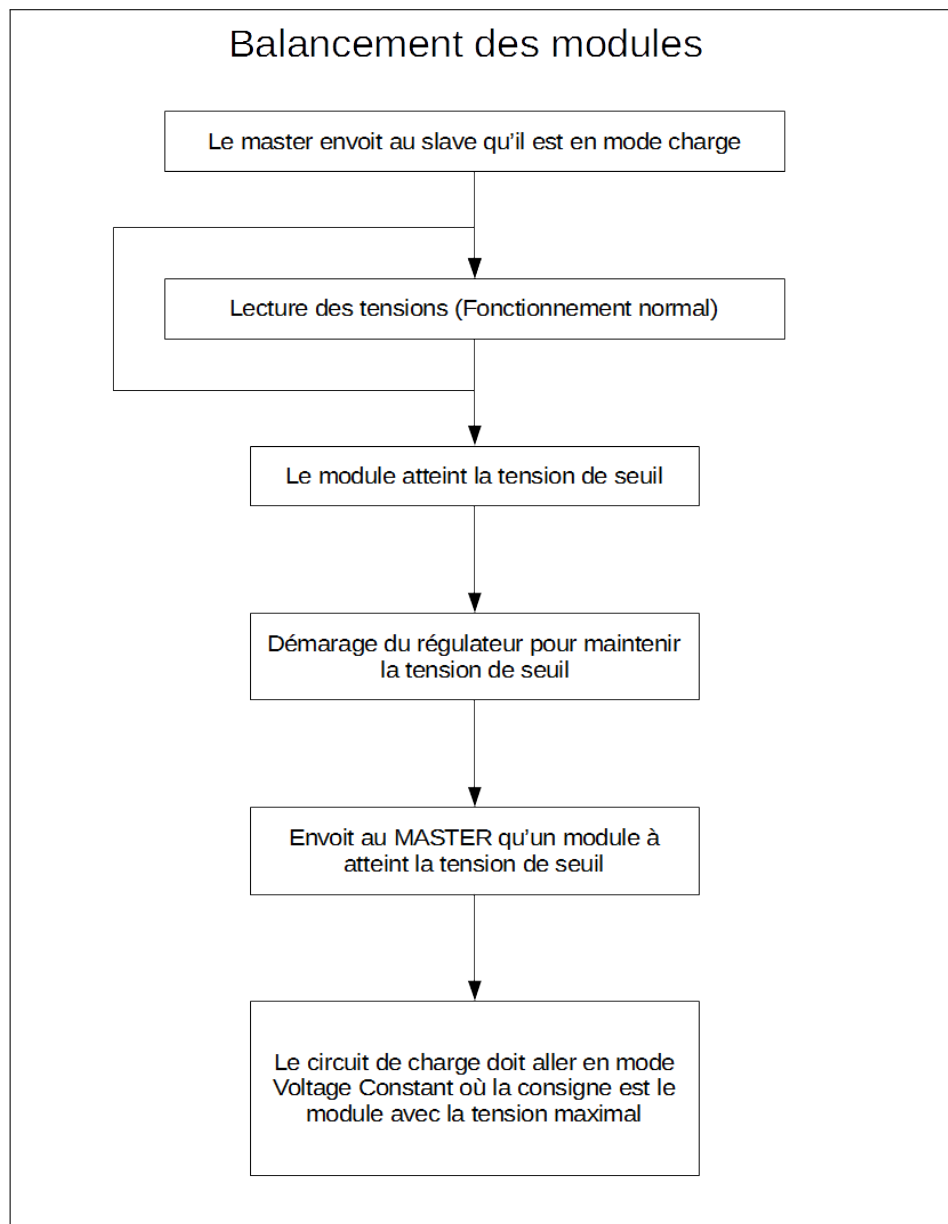


FIGURE 31 – Diagramme module esclave : Balancement des modules



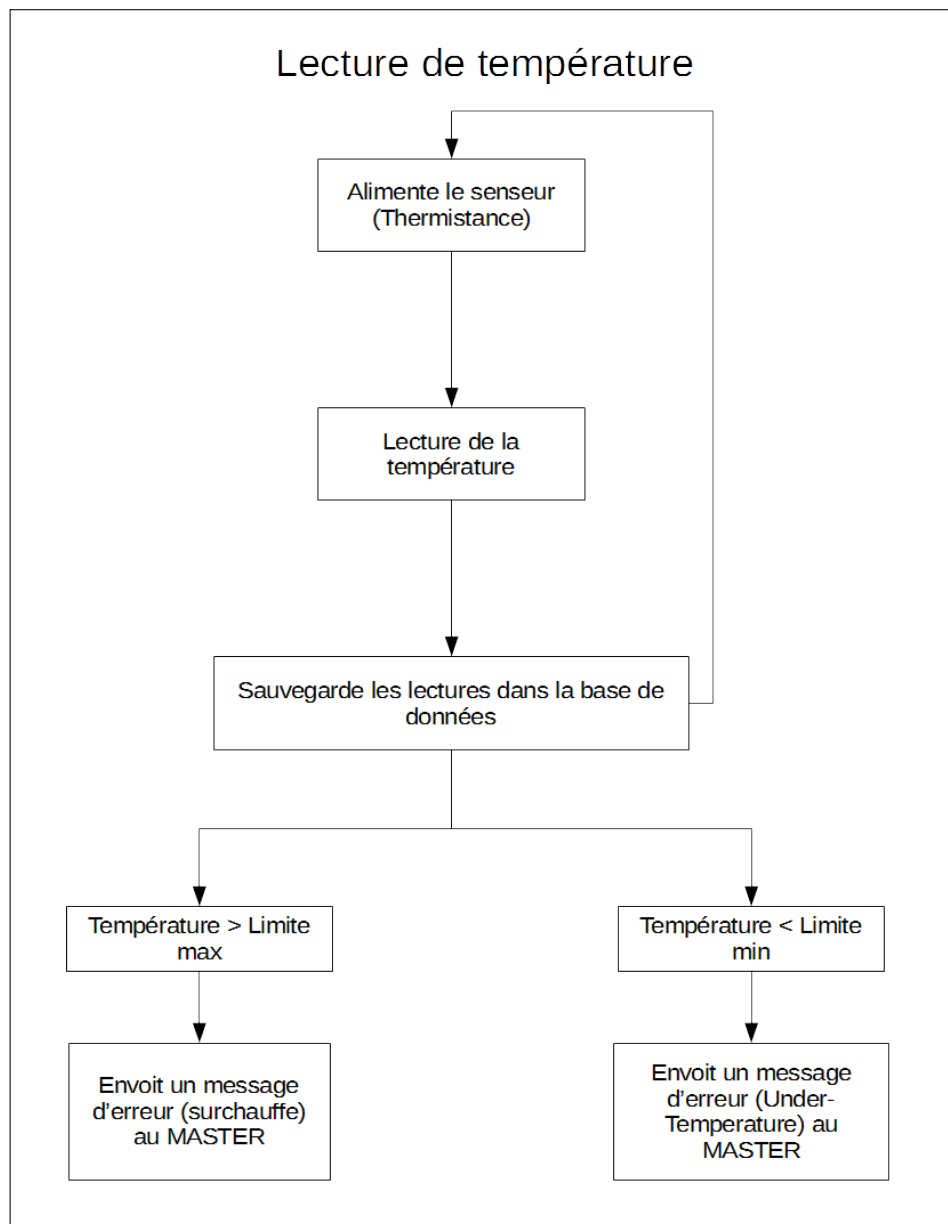


FIGURE 32 – Diagramme module esclave : Lecture de température

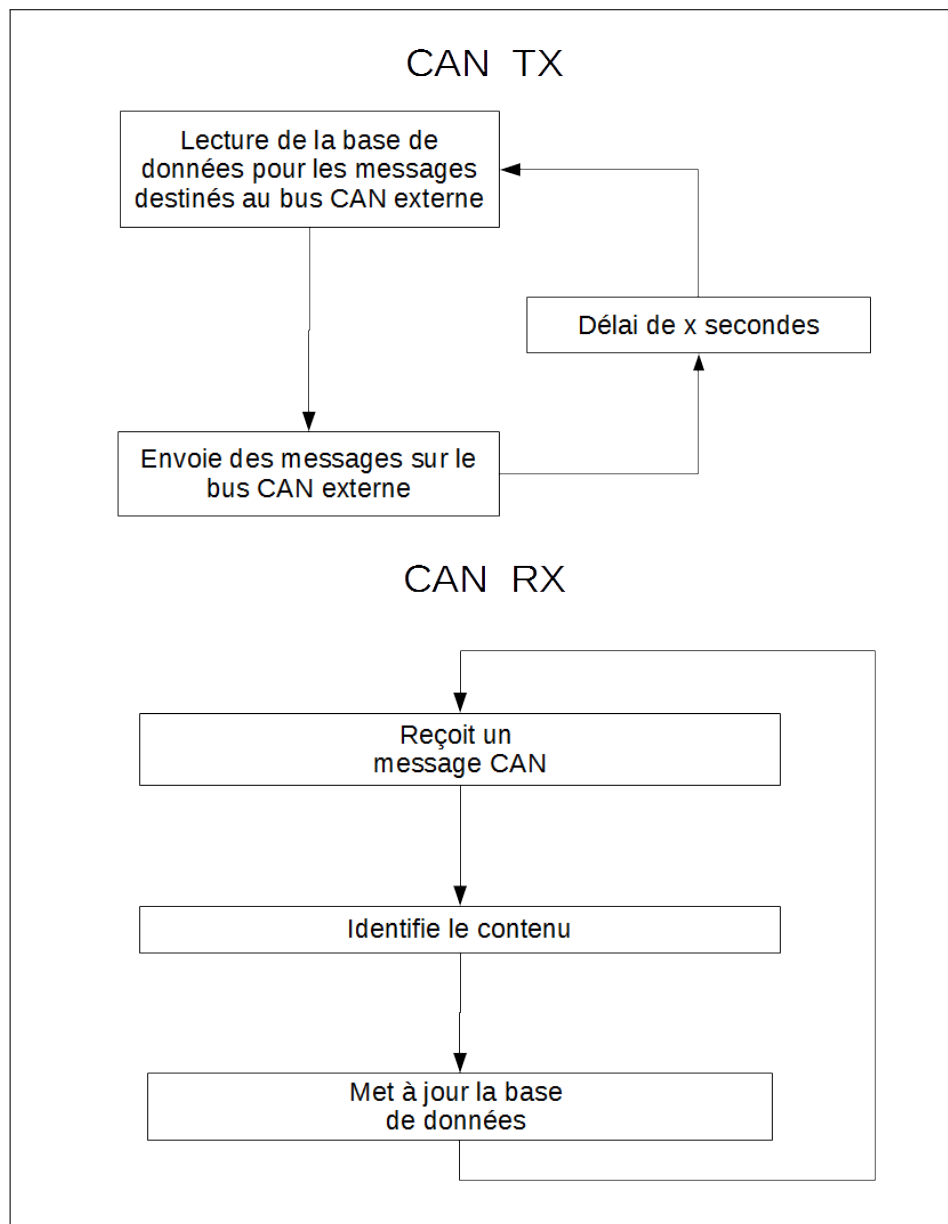


FIGURE 33 – Diagramme module esclave : CAN TX + CAN RX

### 7.3 Module de lecture de courant

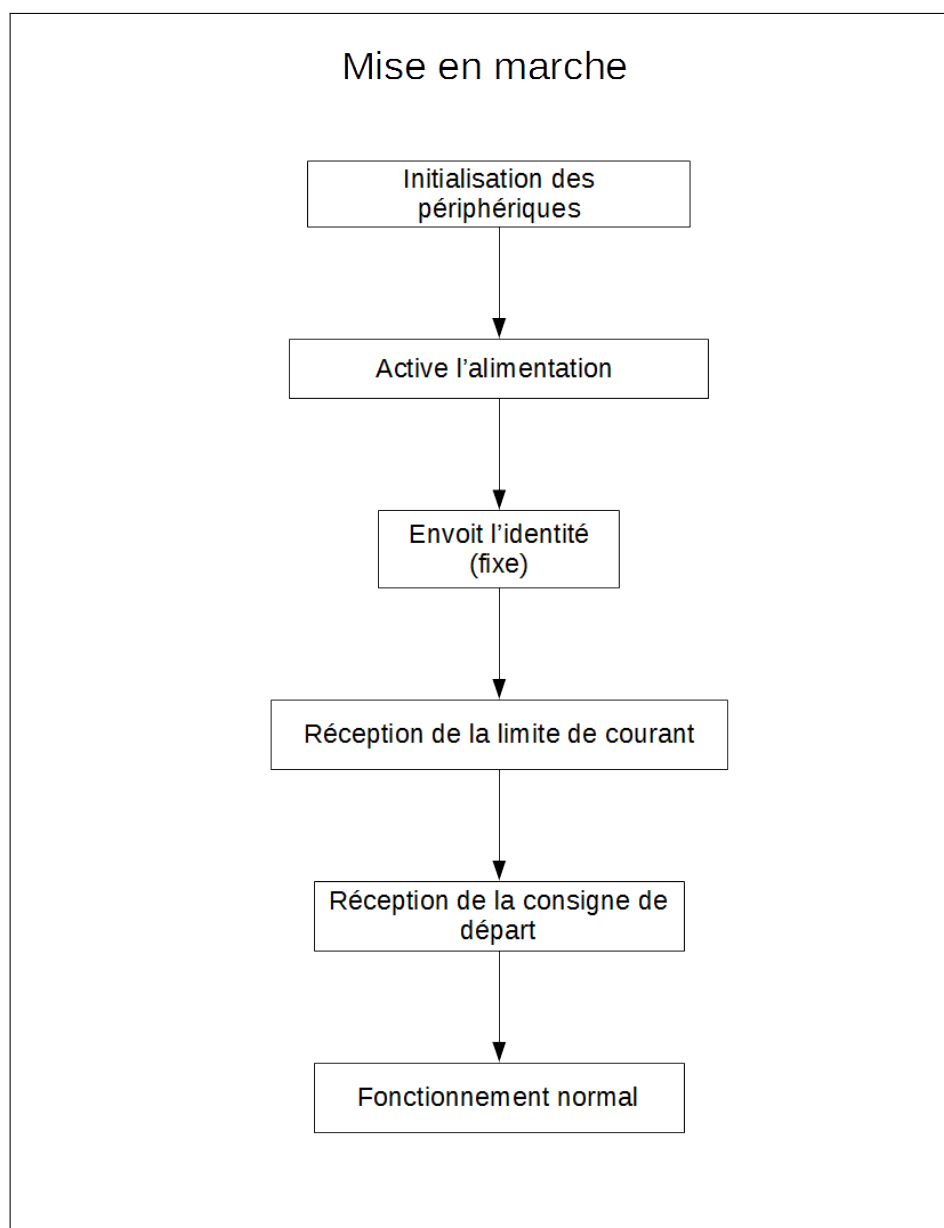


FIGURE 34 – Diagramme module de lecture de courant : Mise en marche

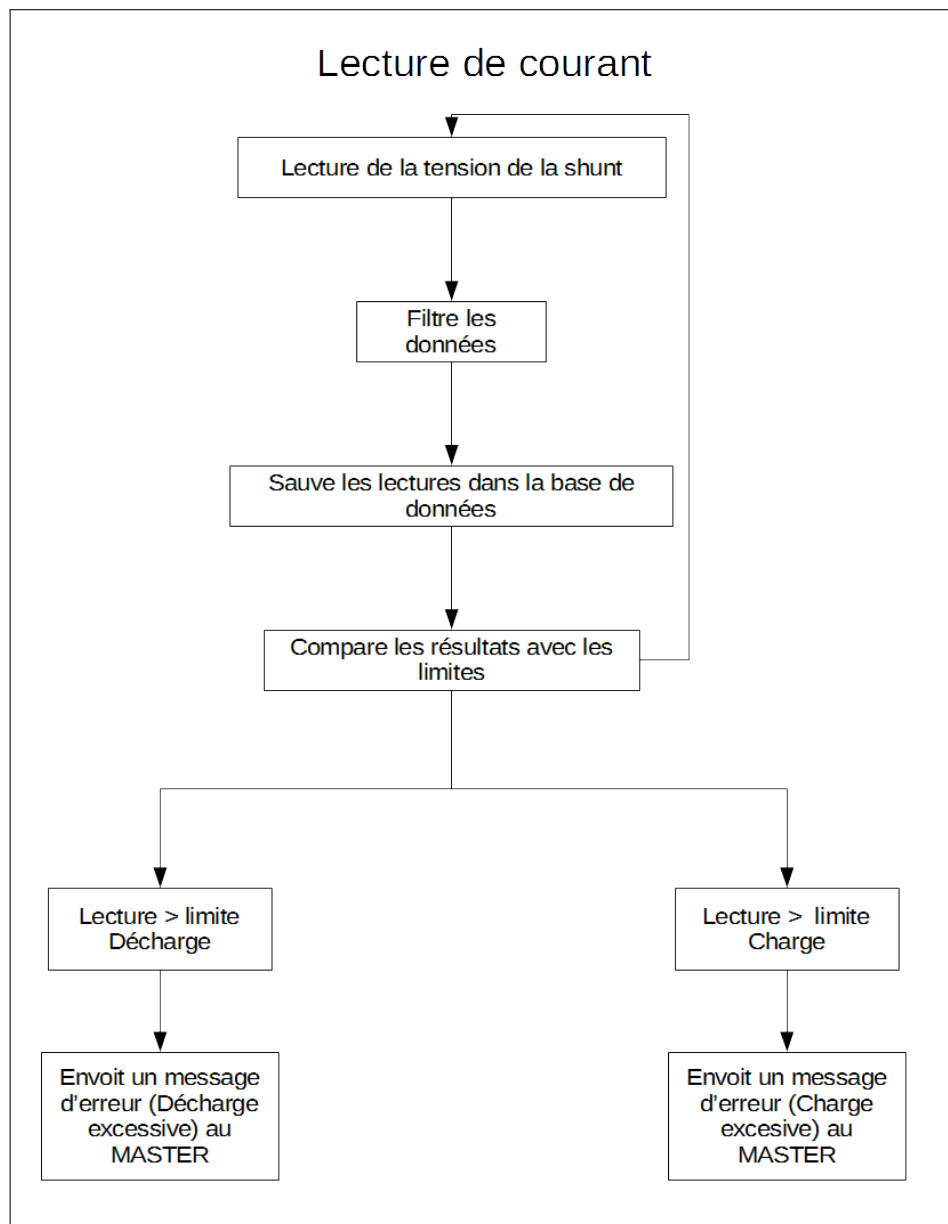


FIGURE 35 – Diagramme module de lecture de courant : Lecture de courant

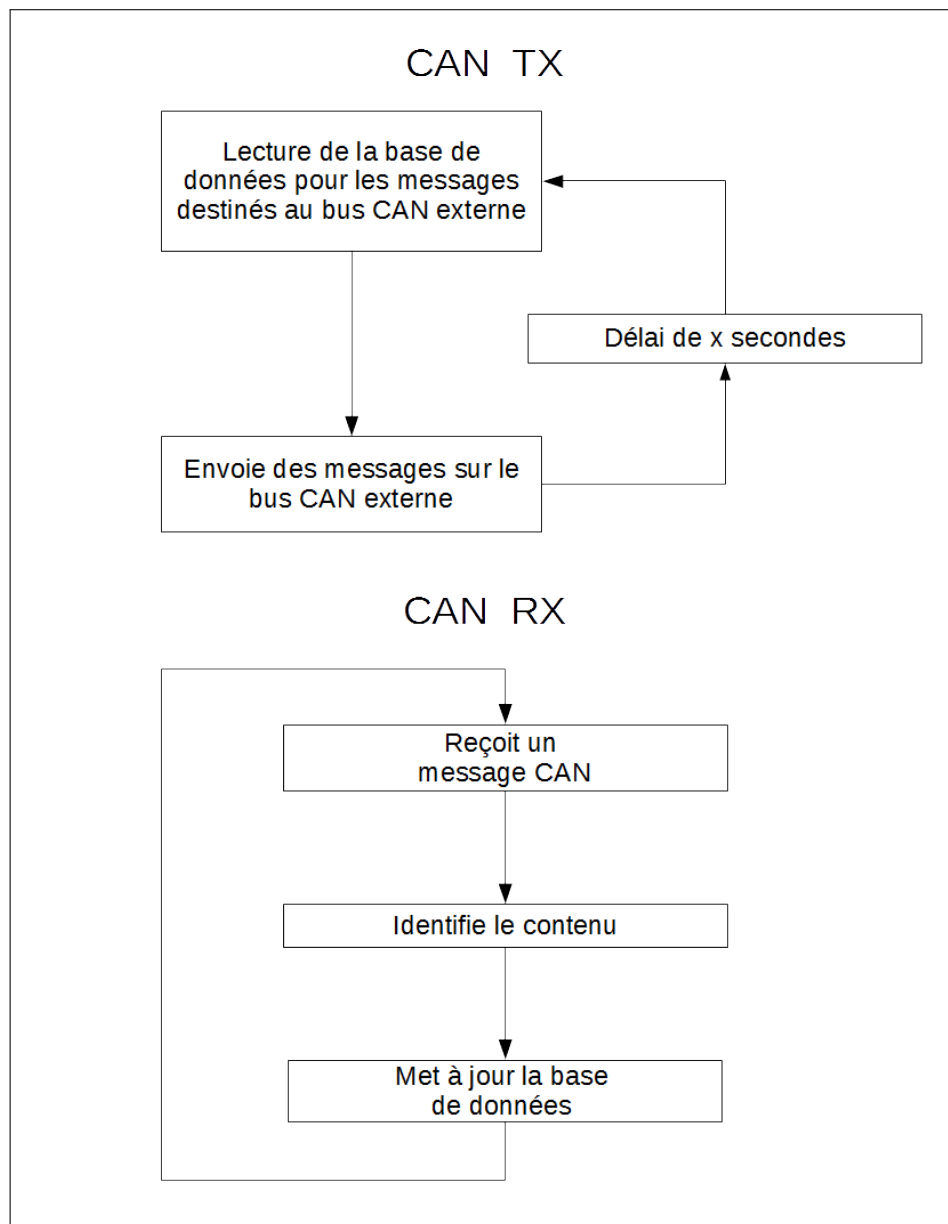


FIGURE 36 – Diagramme module de lecture de courant : CAN TX + CAN RX

## Références

- [1] Christian Daigneault-St-Arnaud, Julien Gagnon-Bourassa, Olivier Cusson-Larocque. *Cahier des charges, Système de protection et de gestion de batterie Li-ion.*
- [2] Avago Technologies. *HCNR200 and HCNR201 Data Sheet.*  
<https://docs.broadcom.com/docs/AV02-0886EN>
- [3] Texas Instruments. *PGA281 Data Sheet.*  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga281.pdf>
- [4] Phillip Weicker. *A System Approach to Lithium-Ion Battery Management.*  
2014 ARTECH HOUSE
- [5] Lithium Balance. *Battery Management System - Version V6.*  
Application Engineering Manual
- [6] The Innovators Educational Foundation. *American Solar Challenge 2018 Regulations Revision A.*  
<http://americansolarchallenge.org/ASC/wp-content/uploads/2016/08/ASC2018-Regs-External->
- [7] Gigavac. *Spécification technique du contacteur HX21.*  
<http://www.gigavac.com/sites/default/files/hx21.pdf>
- [8] Davide Andrea. *Li-Ion BMS : A design guide to DC precharge circuits.*  
<http://liionbms.com/php/precharge.php>