

## Rapport APP 6

APP 6 : Propriété des matériaux et alimentation électrique

Pascal-Emmanuel Lachance, lacp3102

Philippe Gauthier, gaup1302

Travail présenté à Mathieu Massicotte et Abdelaziz Ramzi

Département de génie électrique et informatique

Université de Sherbrooke

28 juillet 2023, Sherbrooke

# 1 Capteurs

## 1.1 Choix du type de thermocouple

Le choix initial des thermocouples est basé sur les températures spécifiées, on cherche à avoir le taux de changement le plus élevé disponible pour nos températures pour être le plus sensible possible. Nous avons trois plages à observer :

- De 5°C à 1090°C
- De 5°C à 1280°C
- De 5°C à 1420°C

Pour la première plage, une thermocouple de type **J** est la plus sensible sur la plage. La deuxième plage va plus haut que ce qu'une thermocouple de type J peut aller, il faut donc prendre un autre type de thermocouple, et nous avons choisis la type **K** car elle est encore la plus sensible sur la plage. Pour la troisième plage, il faut encore changer de type de thermistance, et la seule pouvant se rendre à des températures de 1420°C et plus est la type **S**, que nous sélectionnons pour cette raison.

Thermocouple Type	Lead Metal A (+)	Lead Metal B (-)	Temperature Range (°C)	Seebeck Coefficient (μV/°C at 0°C)
<b>J</b>	Fer	Constantan	-210 à 1200	50,37
<b>K</b>	Chromel	Alumel	-270 à 1370	39,48
<b>S</b>	Platine et 10% Rhodium	Platine	-50 à 1768	10,19

**TABLEAU 1** – Comparaison des types de thermocouples

### **1.1.1 Utilisation de thermocouples par rapport à d'autres technologies**

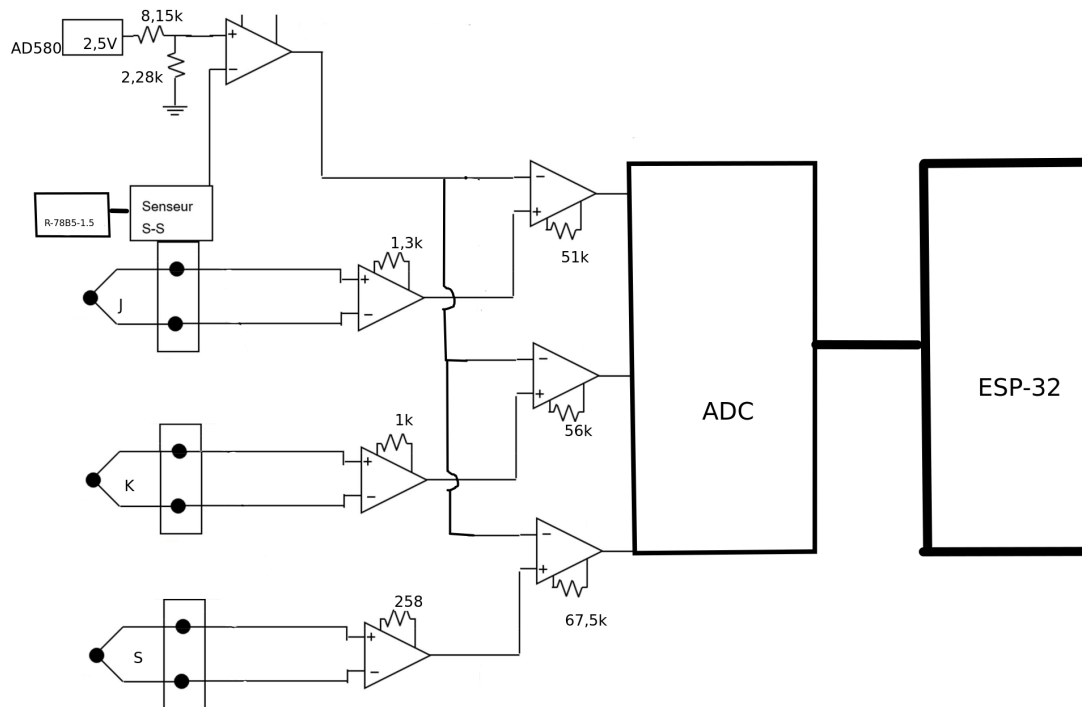
Nous prenons des thermocouples plutôt que des thermistances ou des RTD selon leur résistance aux températures exigées. Des thermocouples sont capables de se rendre jusqu'aux températures de 1420°C demandées. Des RTD par exemple, tendent à opérer jusqu'à seulement 650°C avant de briser; les RTD les plus tolérantes aux hautes température sur Digikey se rendent jusqu'à 850°C. Au niveau des thermistances, les températures possibles sont encore moins élevées, et ne se rendent que jusqu'à 300°C (sur Digikey encore). Cette première barrière est très importante et limite fortement notre choix de technologies aux thermocouples.

## **1.2 Circuit compensation active**

### **1.2.1 Explication des avantages du AD590**

Ce transducteur permet de compenser pour les changements de températures de la jonction de référence sans quoi des changements dans la température ambiante pourrait changer nos mesures dans le four. Utiliser un transducteur solid-state est donc très important pour ne pas avoir de décalage dans nos mesures à cause de la température de la jonction de référence. L'avantage du AD590 en particulier pour cette utilisation est qu'il est très précis, fiable et que sa réponse est très linéaire.

### 1.2.2 Schéma bloc



**FIGURE 1** – Schéma bloc thermocouple

### 1.3 Pseudocode de conversion en température

```
Tant qu'il reste des thermocouples
// On assume qu'on passe chacun des thermocouple une fois
// et que seulement un thermocouple va retourner
// une valeur dans sa plage de température à la fois.

Voltage = Valeur d'entrée * (5/4096) / gain total
// On peut obtenir le voltage en multipliant la valeur numérique
// par la valeur en voltage max divisé par l'entier sur 12 bits le plus grands.
// Pour retrouver la différence de potentielle au borne du thermocouple,
// on doit ensuite diviser par le gain du circuit.

Si thermocouple = type J
    température = voltage / alphaJ
    Si température est entre 5 et 1090
        retourner température
Si thermocouple = type k
    température = voltage / alphaK
    Si température est entre 5 et 1280
        retourner température
Si thermocouple = type S
    température = voltage / alphaS
    Si température est entre 5 et 1420
        retourner température
// Finalement, on divise par le alpha associé au thermocouple
// (dont la courbe devrait être presque linéaire dans sa plage de température)
// pour obtenir la température lue.
```

## 2 Alimentation

### 2.1 Analyse de la consommation

L'analyse de la consommation peut se faire en deux étapes, avant et après le régulateur de tension 5V R-78B5-1.5. Notre analyse de consommation prend en compte le circuit d'évaluation de l'état de charge, qui n'était pas directement spécifié, mais qui semble logique à prendre en compte. Les composantes suivant le régulateur de tension 5V, consistant la "charge utile" du système, consistent principalement en l'ESP32 (nous avons choisi de prendre l'ESP plutôt que l'Argon, vu que nous avons des chiffres précis pris en laboratoire), ainsi que la circuiterie d'évaluation de l'état de charge, l'ADC et les circuits des thermocouples.

Une fois la consommation de la charge utile calculée, on peut calculer les pertes au travers du régulateur de tension et de la circuiterie externe avant le régulateur, qui sont différentes selon la tension de la batterie. La charge après le régulateur agit indépendamment de la tension de la batterie grâce au régulateur, ce qui simplifie les calculs.

Des circuits supplémentaires ont été pris en compte pour certaines composantes. Dans le cas de l'AD590, la consommation de courant a été calculée en fonction de la pire température à la jonction de référence, à 40°C. Pour l'AD580, la consommation du diviseur de tension présenté au procédural 1 a également été prise en compte. La consommation de l'AD622 a été multiplié par 7 car nous avons plusieurs fois la même composante. La consommation de l'AD751 est calculée avec la somme de la consommation analogique et digitale du circuit, que nous mettons sur la même source d'alimentation 5V, mais qui aurait pu être séparée pour brancher le côté analogique sur la sortie 2.5V de l'AD580 et avoir besoin de 2x moins de gain à la sortie des thermocouples. La consommation de courant de l'ESP32 a été mesurée en laboratoire sur son entrée 5V, en roulant le code de l'APP précédent, qui ouvrait un port sur le réseau WiFi et communiquait à toutes les secondes avec un autre serveur Web, ce qu'on trouvait très représentatif de la problématique actuel. Certaines composantes donnaient leur consommation à 5.25V, et une règle de trois a été appliquée pour ramener la consommation à 5V.

La consommation du MAX9929 et du TLV9001 ont été prises en compte après le régulateur de tension car ceux-ci sont alimentés par le régulateur. La consommation du TLV9001 est prise en compte dans les calculs pour les batteries Acide-Plomb et NiMH, mais pas dans les batteries Li-Ion, qui sont monitorés par un BQ29330, dont la consommation est calculée à part, car elle prend sa tension directement des batteries et ne passe pas par le régulateur (un courant de consommation pour son alimentation ainsi que un *leakage current* non-négligeable pour ses entrées). Un diviseur de tension doit être présent entre la batterie et le TLV9001, car ce dernier peut prendre une tension d'entrée de maximum 6V si alimenté à 5V, mais avec des résistances dans les mégaohms, leur ajout

a été calculé dans les nanoampères et considéré très négligeable.

Le facteur principal dans la consommation du circuit reste l'ESP32 (ou l'Argon), c'est pour cette raison que nous nous sommes principalement fiés sur des mesures expérimentales basées sur notre cas d'utilisation. D'autres mesures expérimentales avec un code vide (juste un *void setup()* vide et un *void loop()* vide) nous ont donné des valeurs de 64mA, et certains de nos collègues mesurent plus de 100mA expérimentalement avec d'autre code (probablement avec le Bluetooth du dernier APP encore actif, contrairement à nos mesures).

Circuit	Courant
AD580	1.5mA
Circuit AD580	239.7µA
AD590	313µA
AD622 (x7)	10.5mA
ADS7951	3.95mA
ESP32	77.5mA
MAX9929	30µA + 70µA <sup>1</sup>
TLV9001	70µA
BQ29330	244µA
<b>Total</b>	<b>94mA</b>

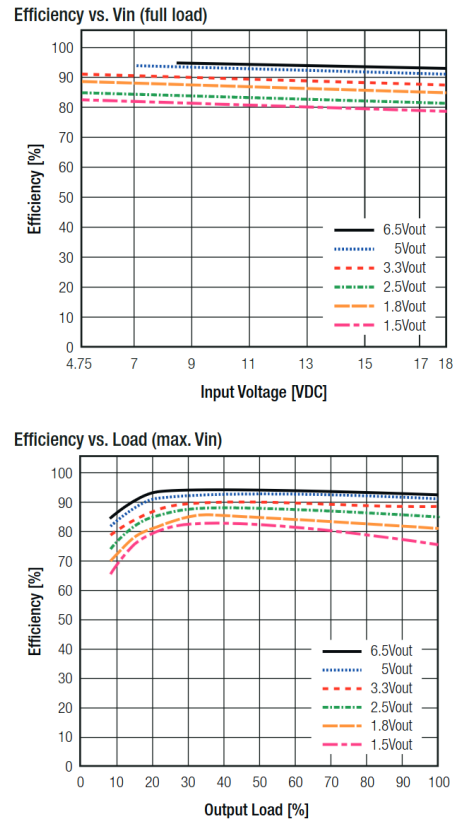


FIGURE 2 – Efficacité du régulateur 5V

Le régulateur R-78B5-1.5 a un certain niveau d'efficacité selon la tension d'entrée et la charge demandée, son efficacité change donc selon la tension d'entrée de la batterie (Figure 2). Nous savons qu'il faut au moins 6.5V à l'entrée du régulateur (voir Choix de la configuration des batteries).

La consommation totale est calculée avec la consommation de la charge utile multipliée par l'inefficacité et la règle de trois nécessaire pour passer d'une tension supérieure à inférieure, ainsi que la consommation du régulateur et de la circuiterie de l'évaluation de l'état de charge externe au régulateur. Vu que le régulateur est de type découpage, et qu'on passe d'une tension plus élevée à une tension plus faible, le Wattage est maintenu, et le courant d'entrée du régulateur devrait être plus faible que son courant de sortie, avec seulement un facteur d'inefficacité dans le chemin d'une règle de trois parfaite.

Batterie	Consommation	Efficacité	Consommation avec inefficacité	Consommation Totale	Capacité demandée (avec marge de 20 %)
<b>Acide-Plomb</b>	9mA	77%	50mA	<b>60mA</b>	<b>8.64Ah</b>
<b>NiMH</b>	6.3mA	77%	73mA	<b>79mA</b>	<b>11.4Ah</b>
<b>Li-Ion</b>	8.1mA	76%	57mA	<b>65mA</b>	<b>9.43Ah</b>

TABLEAU 2 – Consommation totale selon le type de batterie

## 2.2 Choix de la configuration des batteries

Avant de pouvoir configurer la capacité de notre batterie, il faut configurer combien de cellules il faut mettre en cellules pour obtenir une tension désirée, car cette tension vient affecter l'efficacité du système, et dicter quelles composantes peuvent y être utilisées. Le R-78B5-1.5 nécessite une tension d'alimentation d'au moins 6.5V pour correctement réguler à 5V, c'est donc cette tension de 6.5V qui vient dicter la configuration série de nos batterie, dont la tension minimale d'opération doit se trouver au-dessus de ce seuil de 6.5V.

Caractéristique	Acide-Plomb	NiMH	Li-Ion
$V_{min}(V)$	7	1	2.5
$V_{nom}(V)$	12	1.2	3.6
$V_{max}(V)$	13.5	1.35	4.2
Capacité(Ah)	4.9	2.45	3
Poids(g)	5000	55	47
Volume(cm <sup>3</sup> )	973.9	22.7	21.8

TABLEAU 3 – Information sur les cellules

Avec les informations du Tableau 2, on peut en sortir les informations sur la consommation totale des batteries. On sait donc que pour une batterie Acide-Plomb basée sur le LC-P127R2P, cette dernière devrait faire au moins 8.64Ah, une batterie NiMH basée sur le BK260SCP devrait faire au moins 11.38Ah et une batterie Li-Ion basée sur des INR18650HG2 devrait faire au moins 9.43Ah.

Caractéristique	Acide-Plomb	NiMH	Li-Ion
<b>Série</b>	1	7	3
<b>Parallèle</b>	2	5	4
$V_{min}(V)$	7	7	7.5
$V_{nom}(V)$	12	8.4	10.8
$V_{max}(V)$	13.5	9.45	12.6
Capacité(Ah)	9.8	12.25	12
Énergie(Wh)	68.6	85.75	90
Poids(kg)	5	1.925	0.564
Volume(cm <sup>3</sup> )	1948	796	261
Prix(\$)	141.00	330.75	138.00

TABLEAU 4 – Information sur les batteries

1. Pour la résistance  $R_{OUT}$ , voir Estimation de l'état de charge



## 2.3 Choix de la technologie de batteries

Le tableau 4 nous présente les valeurs des configurations minimales des batteries, c'est-à-dire avec la tension la plus faible possiblement fonctionnelle et la capacité la plus petite rentrant dans nos besoins et nos marges présentées dans le Tableau 2. Vu que nous configurons nos batteries selon des paramètres similaires de tension et de courant, leur capacité et énergie seront très similaires entre les cellules, et les facteurs sur lesquels comparer les batteries sont donc le poids, le volume et surtout le prix. Dans ces trois catégories, les batteries Li-Ion INR18650HG2 de HP sont clairement gagnantes. Les batteries au Lithium sont les plus énergétiquement denses, sont simples à fabriquer et ont un énorme marché, elles sont donc très petites et légères, et disponibles à bas prix. Il pourrait être intéressant de refaire le même exercice en comparant des Li-Ion à des Li-Po, qui peuvent aussi être moins chères, mais sont un peu moins dense énergétiquement.

## 2.4 Estimation de l'état de charge

Pour notre estimation de l'état de charge, nous avons choisi de nous concentrer sur les batteries Li-Ion, et d'appliquer la technique du *Coulomb Counting* vu en procédural, en s'informant également sur la tension des batteries pour éviter un dérèglement de notre capacité réelle par rapport à la capacité calculée.

La mesure du courant se fait avec un MAX9929, qui mesure la tension aux bornes d'une résistance *shunt* que nous avons choisi à 50mΩ. Le MAX9929 possède un ampli de transconductance, amplifiant cette différence de tension de 5μA/mV, et sortant ce courant dans une résistance que nous avons calculé à 68.1kΩ. Cette valeur a été calculée en cherchant à maximiser à 5V la tension aux bornes de la résistance  $R_{OUT}$  du MAX9929, dans le cas où le courant demandé par le système est le plus élevé, afin d'avoir la plus grande plage dynamique sur notre ADC ADS7951. Le courant sortant dans la résistance  $R_{OUT}$  est pris en compte dans notre analyse de consommation électrique (71μA).

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{LOAD} \cdot R_{SENSE} \cdot G_m}$$

$$R_{OUT} = \frac{5V}{185mA \cdot 150\% \cdot 50m\Omega \cdot 5A/mV}$$

Pour la lecture de la tension de la batterie, le BQ29330 peut nous sortir la tension totale de la batterie avec un facteur d'atténuation de 18x selon la configuration, qui peut se faire par I2C. Ainsi,

une tension maximale de 12.6V peut se faire lire sans diviseur de tension par l'ADC directement. Le BQ29330 permet aussi de faire d'autre surveillance sur la tension des cellules individuelles et de configurer des avertissements et sécurités.

La tension de la batterie permet d'éviter le *drift*, et une moyenne entre le status de charge théorique, pris d'une *lookup table* et le status de charge mesuré par *Coulomb Counting* nous donne notre status de charge.

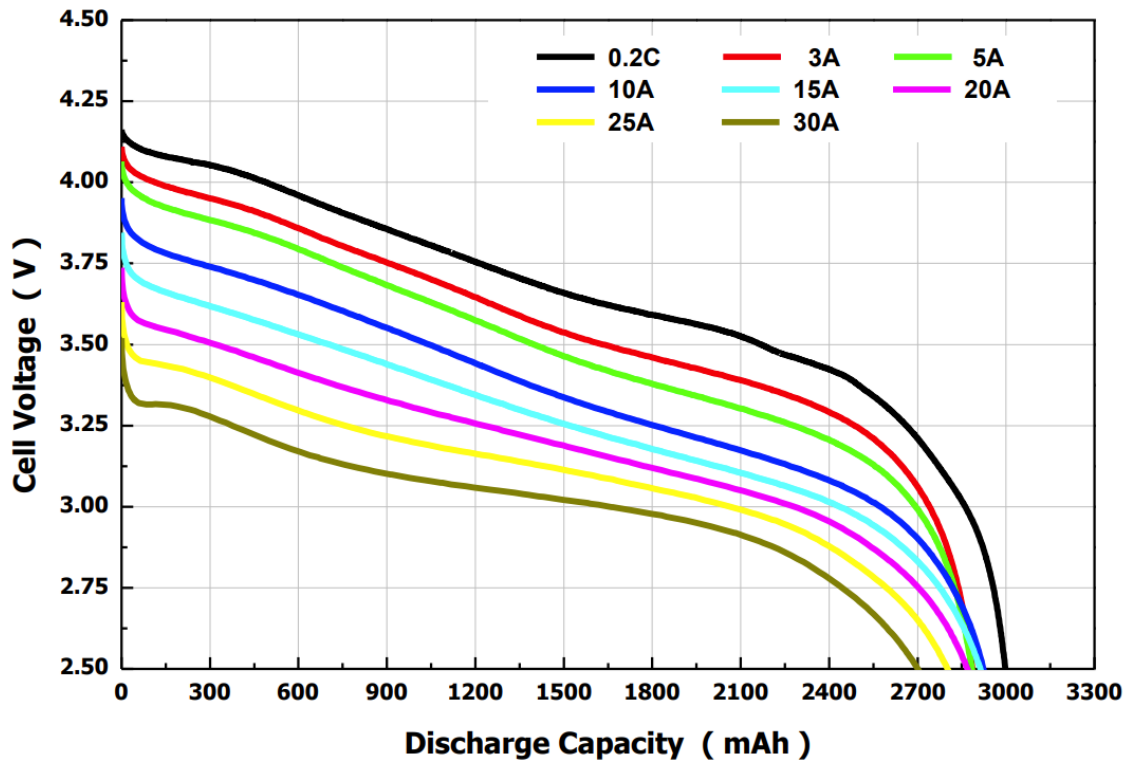
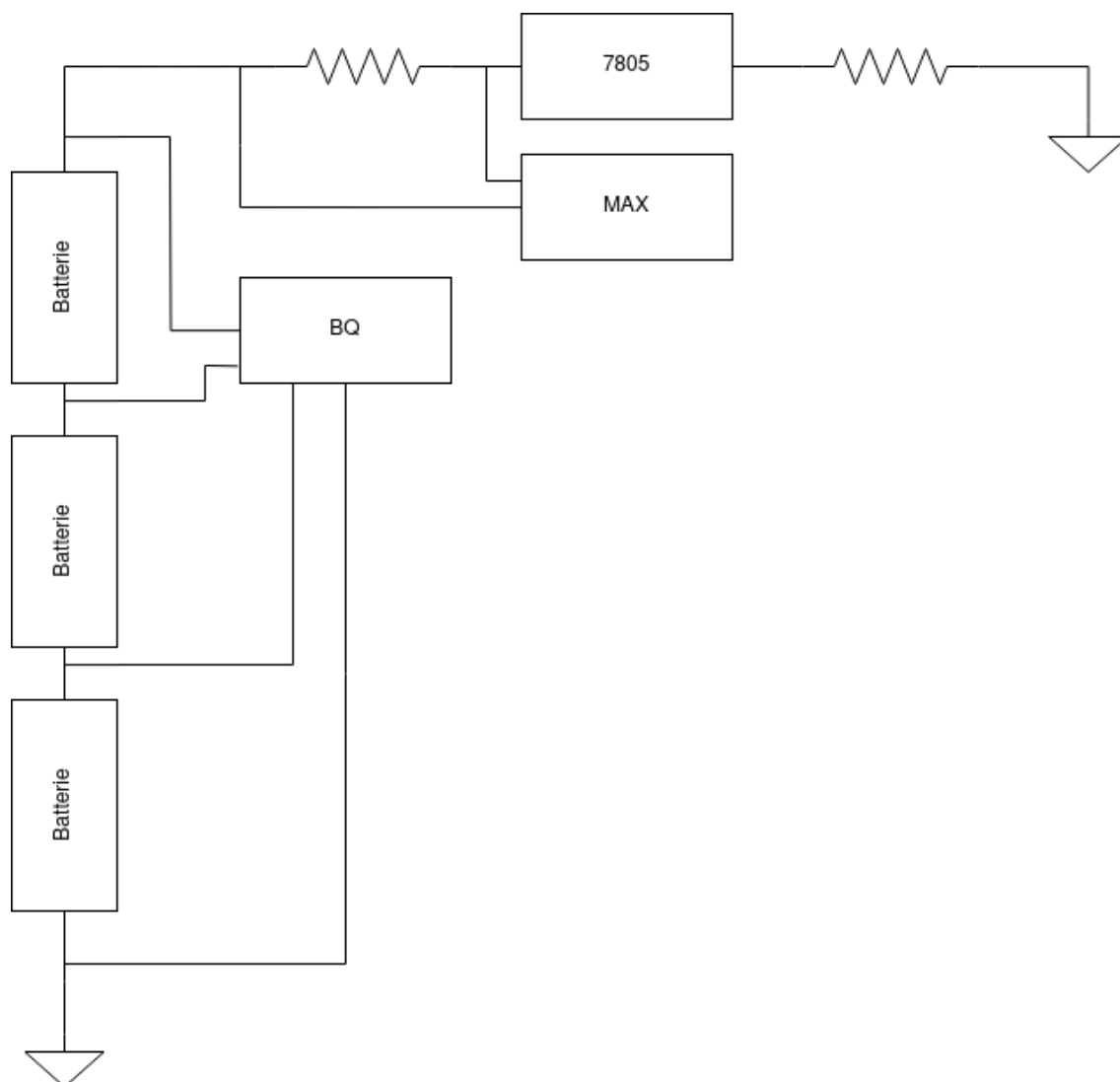


FIGURE 3 – Décharge de la batterie LG 18650HG2<sup>2</sup>

2. Trouvé à <https://www.nkon.nl/sk/k/hg2.pdf>

## 2.5 Schéma bloc



**FIGURE 4** – Schéma bloc alimentation avec cellules Li-Ion

## 2.6 Pseudocode d'estimation de charge

```
const float rSense = 0.05; // 50mOhm
const int rOut = 68100; // 68.1kOhm
const float Gm = 0.005; // 5uA/mV
const float capacity = 3; // 3Ah

float currentTotal = 0;

// À chaque seconde, prendre une mesure du courant sortant mesuré par le MAX9929.
fn calculate_state_of_charge(u16 ADS7951_current_value, u16 ads851_voltage_value)
    -> float:
{
    float vOut = ADS7951_current_value * 5 / 4096;
    // Courant au travers de la résistance shunt.
    float current = vOut / (rSense * rOut * Gm);

    // Additionner cette valeur à la somme des mesure de courant précédente.
    // Diviser par 3600 pour obtenir des ampères heures.
    capacityUsed += current / 3600;

    // Obtenir la tension de la batterie.
    float vBat = ads851_voltage_value * 5 / 4096 * 18;

    // Soustraire ce nombre de la capacité théorique des batteries en Ah.
    float capacityState = capacity - capacityUsed;

    // Obtenir la capacité théorique selon la tension de la battery.
    float lookupCapacity = get_capacity_left_from_voltage_lookup(vBat);

    // Faire la moyenne de la capacité mesurée et de la capacité théorique.
    return (lookupCapacity + capacityState) / 2;
}
```