Projet de coopération au développement

Collaboration ULB - ISIG

Conception d'un appareil de monitoring de l'énergie électrique visant à améliorer l'utilisation d'un système solaire

CODEPO - Cellule de coopération au développement

de l'École Polytechnique de Bruxelles

Membres de l'équipe :

Dietrich Colin

Esnault Teho

Giot Marie

Niedercorn Eliot

Trouillez Benoît

Superviseurs :

Bastin Orianne

Osée Michel

Verstraeten Maxime

Delchambre Lionel

Année académique 2021 - 2022

Table des matières

1 Introduction **3**

2 Objectifs **4**

2.1 Fonctionnement théorique du dispositif 5

3 Système Solaire **7**

3.1 Structure d'un système solaire 7

3.2 Installation de l'ISIG 8

4 Battery Monitoring System **10**

4.1 Principes 10

4.2 Calcul du SOC et du SOH 10

4.2.1 Définitions 11

4.2.2 Aperçu des méthodes d'estimation du SOC et du SOH 11

4.2.3 Développements théoriques 14

4.2.4 Simulation numérique 17

5 Communication **25**

5.1 Principe 25

5.2 Fonctionnement de Thingstream 25

5.3 Fonctionnement du module click 27

6 Premier prototype **28**

6.1 Liste du matériel du premier prototype 30

6.1.1 Thingstream Click 30

6.1.2 Microcontrôleur Arduino 30

6.1.3 Capteur de courant 31

6.1.4 Convertisseur de tension 33

6.1.5 Thermistance 33

6.1.6 Relais 34

6.1.7 Lecteur de carte SD 35
6.1.8 Alimentation du click 35
6.2 Schéma électrique du premier prototype. 36
6.3 Structure générale du code 39
6.4 Mise en place de la communication avec la plateforme web 40
6.5 Test et résultats du premier prototype à Goma 41
6.6 Problèmes et améliorations du prototype 46

7 Dispositif conçu à Kinshasa 47
7.1 Mise en contexte 47
7.2 Installations de la CAMESKIN 47
7.3 Modifications par rapport au premier prototype 48
7.3.1 Utilisation d'amplificateurs différentiels 48
7.3.2 Utilisation d'un multiplexeur 49
7.3.3 Utilisation de potentiomètres 50
7.3.4 Schéma du circuit électrique du second prototype 51
7.3.5 Mise à jour du code 53
7.3.6 Application 53

8 Conclusion 54
8.1 Installation du premier prototype à Goma 54
8.2 Voyage à Kinshasa 54
8.3 Remerciements 54

A Tableau récapitulatif des différents équipements de l'ISIG 58

B Formalisme des formats Json 59
B.1 Communication du BMS vers la plateforme web 59
B.2 Communication de la plateforme web vers le BMS 60

1 Introduction

Le projet CODEPO 2021-2022 vise à améliorer l'utilisation de systèmes de batteries, par la conception d'un appareil de monitoring de l'énergie, en coopération avec l'Institut Supérieur d'Informatique et de Gestion (ISIG) à Goma. Il s'agit d'un projet pilote qui pourra être généralisé à des systèmes électriques situés en milieu rural où l'accès à un dépannage serait long, difficile voire coûteux.

La réalisation du projet a été répartie en deux parties ; D'une part, l'équipe de l'École Polytechnique de Bruxelles (EPB) a pour rôle de concevoir le dispositif de monitoring et d'envoyer les données du dispositif sur un serveur. D'autre part, l'équipe de l'ISIG a pour rôle de récupérer et d'implémenter ces données sur une plateforme web qui fournit une vue générale du fonctionnement du système en temps réel.

Ce rapport a pour objectif de présenter le travail réalisé par l'équipe de l'EPB. Il est présenté de la manière suivante :

- Le rapport commence par présenter les objectifs du projet et détaille les fonctionnalités attendues du dispositif.
- Dans un deuxième temps, il décrit la structure théorique d'un système solaire, ce qui permet de faciliter la compréhension de l'installation de l'ISIG présentée juste après.
- Ensuite, vient une partie qui expose la théorie liée au monitoring des batteries. Cette partie contient notamment tous les développements théoriques et les résultats obtenus pour la création d'un algorithme qui permet d'obtenir l'état de charge des batteries.
- Quatrièmement, une partie sur la manière dont communique le dispositif est présentée. Il y est expliqué les services et le protocole de communication utilisés pour échanger les informations de notre dispositif avec un serveur.
- En outre, la conception du premier prototype, le matériel utilisé, ainsi que les résultats obtenus lors de l'envoi du prototype à l'ISIG sont présentés.
- La partie suivante porte sur le second prototype et les modifications apportées par rapport au premier.
- Finalement, les objectifs de l'équipe lors de son voyage à Goma sont repris dans les parties 8 et 9.

2 Objectifs

Ce projet a pour objectif de concevoir un dispositif de monitoring d'un système de batteries capable d'envoyer les données d'intérêt sur un serveur. L'objectif de l'équipe de l'ISIG étant de récupérer et d'implémenter ces données sur une plateforme web.

La conception du dispositif peut être décomposée en 7 objectifs classés par ordre de priorité :

1. Mesure du niveau de charge des batteries et estimation du temps d'utilisation restant.
2. Envoi de données d'intérêt vers un serveur.
3. Développement de la plateforme web permettant de réceptionner et d'afficher les données d'intérêt.
4. Monitoring de la puissance reçue par les panneaux solaires afin de vérifier qu'elle soit cohérente avec la météo.
5. Envoi de messages d'alertes par le dispositif en cas de dysfonctionnement.
6. Optimisation du dispositif (prix, robustesse, taille, facilité d'utilisation).
7. Universaliser le dispositif pour une utilisation en milieu rural (adaptation à différents types de batteries, environnements différents, communication).

Monitoring du système de batteries [1]

Le dispositif doit être capable de fournir une approximation en temps réel du niveau de charge des batteries appelé SOC (State Of Charge). Ces niveaux sont obtenus à partir des mesures de tension et de courant provenant des capteurs. Ces mesures permettent également de surveiller que les batteries ne soient pas en surtension ou sous-tension. La mesure de la température permet de vérifier que le système ne subit aucune surchauffe.
Tandis que le calcul du SOC est réalisé en temps réel et est ensuite envoyée vers la plateforme web, c'est l'analyse à posteriori des données envoyées qui permet de déterminer une approximation de l'état de santé des batteries appelé SOH (State Of Health).

1. Les notions de SOC et SOH introduites ici sont définies dans la section 4

Puissance des panneaux solaires

La mesure de la puissance fournie par les panneaux solaires permet de vérifier l'état de ceux-ci. Cela peut être fait en comparant la puissance théorique fournie par les panneaux photovoltaique du à l'ensoleillement présent avec la puissance mesurée. Cet écart peut être directement calculé sur la plateforme web.

Messages d'alerte

Le dispositif doit être capable d'envoyer des messages d'alertes lorsque certains dysfonctionnements se présentent comme par exemple lorsque les batteries sont en surtension, sous-tension, surchauffe ou que les panneaux solaires ne produisent pas la bonne puissance. Ces messages permettront d'envoyer un technicien lorsque ces problèmes se présentent.

Pour finir, il faut souligner que les objectifs de ce projet ont été initialement établis à partir d'un cahier des charges proposé par l'ISIG ainsi que plusieurs échanges avec eux. Au fur et à mesure de l'année, pour diverses raisons, certains objectifs ont été modifiés (le cahier des charges initial est disponible dans le rapport du Q1 [2].

2.1 Fonctionnement théorique du dispositif

Le fonctionnement du dispositif peut être résumé en le décomposant en 3 différents modules :

- Le module d'acquisition qui consiste en l'acquisition des données nécessaire au fonctionnement du dispositif par le biais de capteurs.
- Le module de traitement qui consiste au traitement des données mesurés afin d'obtenir les données d'intérêts du projet.
- Le module de communication qui consiste à envoyer ces données d'intérêts sur la plateforme web.

La figure 1 représente le fonctionnement du dispositif, en reprenant les différentes données d'entrées et de sorties. Le bloc hardware comprend le module de traitement et de communication.

2. Disponible comme "RapportQ1" sur `https://github.com/Marie210/CODEPO`

FIGURE 1 – Schéma de fonctionnement du dispositif. Le bloc hardware comprend le module de traitement et de communication.

3 Système Solaire

Cette section a pour objectif d'introduire dans un premier temps la structure ainsi que les éléments principaux d'un système solaire, et de présenter dans un second temps l'installation actuelle de l'ISIG.

3.1 Structure d'un système solaire

Cette partie est grandement inspirée du cours dispensé à l'ULB [5] donné par le professeur Gyselinck sur les énergies renouvelables.

FIGURE 2 – Éléments principaux d'une installation solaire

Un système solaire est en général constitué des éléments suivants (voir figure 2) :

1. **Panneaux photovoltaiques** : Dispositif convertissant une partie du rayonement solaire en énergie électrique via l'effet photovoltaique.
2. **Régulateur de tension** (Charge Controller) : Module de contrôle de la charge des batteries évitant d'éventuels surtensions provenant des panneaux photovoltaiques . Il existe principalement deux types de charge controller :
   — **PWM** (Pulse Width Modulation) : Bien que son prix soit le plus faible, il possède plusieurs défauts. En effet, la tension nominale des panneaux solaire doit être égale à

celle du battery pack, ce qui le rend difficilement ajustable (si l'on veut changer les batteries pour avoir une plus grande tension, il faudra également changer le charge controller).

— **MPPT** (Maximum Power Point Tracking) : Celui-ci possède un prix plus élevé mais est beaucoup plus ajustable. En effet, la tension nominale des panneaux solaires doit seulement être au moins 30% au-dessus de la tension nominale des batteries. De plus, lorsque la puissance fournie par les panneaux solaires varie, il s'adapte plus rapidement pour fournir une puissance équivalente aux batteries (temps de réponse plus rapide). Enfin, pour une même puissance, celui-ci reçoit en entrée une tension élevée avec un courant faible et renvoie une tension plus basse avec un courant plus élevé aux batteries. Il est intéressant de noter qu'un PWM peut transmettre une puissance aux batteries équivalente à un MPPT, mais celle-ci ne pourra jamais être plus élevée que la puissance transmise par un MPPT.

3. **Inverseur** : Module électrique permettant d'accéder à une seconde source d'énergie en cas de défaut de la source principale.
4. **Batteries** : Toutes les batteries servant à stocker l'énergie produite par les panneaux solaires sont rassemblées dans un battery pack. Chaque batterie contenue dans ce pack est appelée une cellule. Ces cellules peuvent être soit connectées en série (afin d'augmenter la tension) ou en parallèle (afin d'augmenter le courant).

3.2 Installation de l'ISIG

L'ensemble des équipements électriques (hormis les panneaux solaires) de l'ISIG sont placés dans une salle de dimensions $4m$ x $3m$ x $3m$ (voir figure 3 et 4). La température ambiante moyenne est approximativement de 21°C avec deux extrêmes pouvant atteindre 24°C (La journée) et 16°C (La nuit). L'installation électrice de l'ISIG est représenté sur la figure 3. L'onduleur est alimenté par une tension de $48V_{DC}$ et produit en sortie une tension de $220V_{AC}$ qui est utilisée pour les équipements critiques de l'ISIG (Ceux devant être en permanence alimentés). L'onduleur permet de convertir la tension continue fournie par les batteries en tension alternative mais joue également le rôle d'un inverseur. En effet, celui-ci est couplé à la source de la Société Nationale d'Électricité (SNEL) et au groupe électrogène pour recharger les batteries en cas de baisse de l'ensoleillement

ou de panne. L'annexe A synthétise les caractéristiques techniques (marque, modèles, tension, etc.) des différents équipements utilisés dans l'installation solaire.

FIGURE 3 – Installation des batteries et de l'installation solaire de l'ISIG

FIGURE 4 – Panneaux solaires installés à l'ISIG

4 Battery Monitoring System

4.1 Principes

Un *Battery Monitoring System* (BMS), ou système de gestion de batteries, est un système électronique qui permet de monitorer la charge et la décharge d'une batterie seule ou d'un pack de batteries. Dans le cadre de ce projet, le monitoring consiste à mesurer la tension, le courant et la température des batteries. Ainsi, à partir de ces grandeurs, le dispositif est capable de déterminer le pourcentage restant des batteries (SOC) et leur état de santé (SOH). En outre, ces mesures permettent également de détecter certains dysfonctionnements potentiels tels que :

— Une sur/sous-tension.

— Un courant ou une température trop élevé.

— Une puissance trop faible fournie par les panneaux solaires.

Toutes ces données collectées sont également intéressantes lorsqu'un technicien est requis pour faire un diagnostic afin de réparer un défaut du système. Un stockage des données collectées par le BMS peut alors permettre d'afficher ces données sur une plateforme web et d'en déduire des informations sur l'état des batteries sur le long terme [3].

Un serveur recevra, à une fréquence choisie par l'utilisateur, les données provenant du *BMS*. Il est également possible de stocker ces données sur une carte SD à l'intérieur du *BMS*, cette fonctionnalité permet d'avoir un historique beaucoup plus précis de la décharge des batteries car elle ne nécessite pas l'envoi de messages par le *BMS*. Ceci permet donc de pallier à un éventuel dysfonctionnement du module de communication.

4.2 Calcul du SOC et du SOH

Les méthodes selon lesquelles les batteries stockent leur énergie sont variées et souvent complexes. Cela empêche donc de déterminer directement le pourcentage d'une batterie seulement à partir de quelques mesures effectuées sur celle-ci (ex : pour accéder au SOC d'une batterie lithium, il faudrait pouvoir l'ouvrir afin de mesurer la concentration d'ions restants). Ainsi, différentes techniques ont été développées afin de déduire une approximation du SOC et du SOH à partir des propriétés externes d'une batterie.

3. Par exemple, observer qu'une batterie se décharge beaucoup plus vite que les autres.

4.2.1 Définitions

Le SOC est défini comme étant le quotient entre la capacité $Q(t)$ $[Ah]$ disponible dans la batterie au temps t et la charge maximum Q_{max} $[Ah]$ qui peut être stockée dans la batterie :

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}(t)} \, 100\% \tag{1}$$

Une batterie totalement rechargée possède la capacité maximale Q_{max}. Celle-ci est en générale proche de la capacité nominale Q_n lorsque la batterie est neuve et diminue lorsque la batterie vieillit. Ainsi, on peut mesurer l'état de la batterie selon la formule suivante :

$$SOH(t) = \frac{Q_{max}(t)}{Q_n} \, 100\% \tag{2}$$

Ce paramètre permet donc de rendre compte de l'état de santé de la batterie et ainsi de considérer son vieillissement.

4.2.2 Aperçu des méthodes d'estimation du SOC et du SOH

Les articles [1], [2] et [8] présentent différentes techniques d'estimation du SOC. Celles-ci peuvent être rassemblées selon trois catégories :

1. **Méthodes de mesure directe** : elles consistent à utiliser certains des attributs physiques de la batterie tels que l'impédance ou la tension de sortie. Parmi ces méthodes , les deux principales sont :
   - **Méthode de tension à circuit ouvert** : détermine le SOC en mesurant la tension à circuit ouvert U_{OCV} de la batterie. Cela nécessite donc de débrancher les charges connectées à la batteries et d'attendre un temps suffisamment long (pour que le transitoire de la batterie se dissipe, cela peut prendre jusqu'à plusieurs heures [3]) pour pouvoir mesurer U_{OCV}. De plus, les mesures ainsi que la relation donnant le SOC en fonction de U_{OCV} ne sont pas très précises.
   - **Méthode de tension terminale** : mesure la tension aux bornes U_t de la batterie pendant qu'elle est connectée à une charge, et détermine le SOC à partir de celle-ci. La relation SOC-U_t est souvent non linéaire et peut parfois être quasi constante pendant une longue période de temps puis chuter à la fin de la courbe de décharge. Cette méthode dépend donc du modèle de batterie et n'est pas très précise.
2. **Méthode de Comptage** : Une méthode de comptage consiste à faire un bilan des courant

entrant et sortant d'une batterie afin d'estimer son SOC. La méthode la plus connue est le **Coulomb counting**. Elle mesure le courant de charge/décharge d'une batterie et l'intègre au cours du temps selon la formule suivante :

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{Q_{max}} \int_{t_0}^{t} I(t)\ \eta_c\, dt \tag{3}$$

Ce qui donne sous forme discrète :

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{1}{Q_{max}} I(t)\eta_c \Delta t \tag{4}$$

avec η_c le rendement de Coulomb de la batterie (ce paramètre est en général fourni par le fabriquant). Cette méthode est assez simple à réaliser et est très répandue mais présente également de nombreux défauts. En effet, l'erreur sur l'estimation initiale du SOC ainsi que les erreurs d'estimations dûs au bruit sur les mesures s'accumuleront tout au long de l'utilisation et ne seront jamais corrigées. De plus, cette méthode ne prend pas en compte le vieillissement des batteries, qui engendre une évolution de ses paramètres.

Ainsi, le risque avec une telle méthode lorsqu'elle est implémentée sur des batteries en milieu rural (donc difficile d'accès pour un technicien) est que l'erreur s'amplifie rapidement jusqu'à ce que l'algorithme ne soit plus capable de déterminer une bonne approximation du SOC. Il faudrait alors qu'un technicien intervienne afin de réajuster les paramètres et de réinitialiser l'algorithme.

3. **Méthodes adaptatives** : ces méthodes sont capables de se réajuster dans un environnement variable de manière autonome. Étant donné la nature évolutive des paramètres d'une batterie (variable selon l'environnement, le temps, l'usage, etc.) et la relation non linéaire du SOC en fonction de ceux-ci, ces méthodes sont les plus précises mais également les plus coûteuses (aussi bien au niveau du temps de calcul qu'au niveau de la difficulté d'implémentation). Parmi celles-ci, les deux méthodes principales utilisent

   — les **réseaux de neurones** : cela consiste à entraîner une intelligence artificielle sur un grand nombre de données. Celle-ci est précise puisqu'elle dépend d'un grand nombre de facteurs et est capable de s'adapter. Cependant les réseaux de neurones présente de gros inconvénients lors du monitoring notamment le fait qu'ils ont tendances a produire des erreurs à cause d'un entraînement inadapté aux situations pouvant subvenir lors du monitoring de batteries (ex : chute brutale de tension , élévation de température). De plus, cette méthode nécessite un grand ensemble de données, or ces dernières ne sont

pas toujours disponibles.

— le **filtre de Kalman** : permet d'estimer les états d'un système dynamique à partir d'une série de mesures incomplètes ou bruitées. Ainsi, en mesurant les paramètres instantanés d'une batterie et en les faisant passer dans un filtre de Kalman et donc dans une boucle de rétroaction, on peut estimer l'état de la batterie, c'est à dire son SOC et son SOH. De plus, la boucle de rétroaction permet d'éviter l'accumulation d'erreur et de s'adapter aux changements que peut subir une batterie.

Méthodes	Avantages	Désavantages	Précision	Robustesse
Look-up table methods - Méthodes de mesure directe - Méthodes de tension à circuit ouvert	- Implémentation facile - Faible coût de calcul - Performance en temps réel satisfaisante	- Sensible à des facteurs incertains, tels que la température, le vieillissement et les cycles d'utilisations - Nécessite une calibration régulière (OCV de la batterie, etc)	Mauvaise	Bonne
Méthode de Comptage - Coulomb counting - Etc.	- Implémentation facile - Faible coût de calcul - Performance en temps réel très bonne	- Nécessite une valeur initiale précise - Utilise un calcul en boucle ouverte (pas de correction) - Sensible au bruit sur les mesures et le vieillissement des batteries	Moyenne	Mauvaise
Méthodes adaptatives - Filtre de Kalman	- Haute précision - Contrôle en boucle fermée - Performance en temps réel bonne - Forte adaptabilité	- Nécessite un bon modèle - Coût de calcul élevé	Bonne	Bonne
- Réseaux de neurones	- Haute précision - Adapté aux phénomènes non linéaires	- Haute complexité de calcul - Très dépendant des données d'entraînement	Très bonne	Mauvaise

FIGURE 5 – Tableau récapitulatif des différentes méthodes d'estimation du SOC.

La figure 5 compare les différentes méthodes d'estimation du SOC. Il a ainsi été décidé d'utiliser un filtre de Kalman étendu (l'adjectif étendu signifie que l'algorithme est également applicable aux phénomènes non-linéaires). Cette méthode présente en effet le meilleur compromis entre robustesse, précision et performance en temps réel. Elle permet donc de rendre l'estimation du SOC la plus autonome possible (pas besoin de calibration régulière, etc). De plus, un système solaire en milieu rural étant en général difficile d'accès pour un technicien, cette méthode minimise l'entretien nécessaire et devrait fonctionner tout au long de la durée de vie des batteries. Enfin, les paramètres du modèle de la batterie devant également pouvoir changer selon le vieillissement de la batterie,

un second filtre de Kalman étendu est utilisé afin d'estimer de manière continue ces paramètres. Ainsi, l'algorithme mis en place est un **double filtre de Kalman étendu** permettant à la fois d'estimer le SOC et de mettre à jour les paramètres de la batteries.

4.2.3 Développements théoriques

FIGURE 6 – Schéma du filtre de kalman

Le fonctionnement du filtre de Kalman est schématisé sur la figure 6. Celui-ci peut être résumé selon les étapes suivantes :

1. Le courant $I_c(k)$ est mesuré à l'instant k et une première estimation du SOC est réalisée par comptage de Coulomb (en prenant le $SOC(k-1)$ de l'instant précédent).
2. Cette première estimation du SOC est ensuite injectée dans la relation SOC-OCV afin d'en déduire une estimation de la tension à circuit ouvert $U_{OCV}(k)$ de la batterie.
3. Un modèle de la batterie (voir figure 7) permet de calculer une estimation $\hat{U}_t(k)$ de la tension de sortie U_t à l'instant k. Ce calcul est effectué à partir des valeur de $U_{OCV}(k)$ et $I_c(k)$ en utilisant la relation (5).
4. L'estimation $\hat{U}_t(k)$ est comparée à la tension mesurée $U_t(k)$. L'erreur de l'estimation $e(k)$ est fournie au double filtre de Kalman étendu qui fournit alors une nouvelle estimation du SOC et met à jour les paramètres du modèle de la batterie.

FIGURE 7 – Circuit équivalent de la batterie (modèle du second ordre)

La qualité du modèle choisi pour la batterie influence directement la précision de l'estimation du SOC. En général [8] [11], quel que soit le type de batterie, le circuit équivalent correspond à la tension à circuit ouvert U_{OCV} à laquelle on ajoute une résistance série R_0 pour modéliser les chutes de tension aux bornes de la batterie ainsi que des paires RC afin de modéliser sa réponse transitoire. Dans notre cas, il a été décidé d'utiliser un modèle RC du second ordre (voire figure 7) afin d'avoir un bon compromis entre la qualité du modèle et le temps d'exécution de l'algorithme. La tension de terminal est donnée selon l'équation suivante :

$$U_t = U_{OCV} - R_0 I_c - U_1 - U_2 \tag{5}$$

Avec I_c le courant de charge et U_1, U_2 étant respectivement les tensions aux bornes des paires R_1C_1 et R_2C_2. La relation non-linéaire entre le SoC et U_{OCV} est approximée par un polynôme du 5ème ordre [4] :

$$U_{OCV}(SOC) = \sum_{i=0}^{5} k_i \; SOC^{\,i} \tag{6}$$

Estimation du SOC

Les calculs développés dans cette partie sont tirés des articles [4], [10] et [11].

Le premier filtre de Kalman sert à fournir une estimation du SOC. Celui-ci est représenté par le sys-

tème suivant : $$\begin{cases} X_{k+1} = f(X_K, I_{c,k}, \theta_k) + w_k \\ y_k = U_{t,k} = h(X_K, I_{c,k}, \theta_k) + v_k \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f(X_K, I_{c,k}, \theta_k) = F_k X_k + B_k I_{c,k} \\ F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-\Delta t}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\frac{-\Delta t}{\tau_2}} \end{bmatrix} \\ B_k = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_c \Delta t}{Q_{max}} \\ R_1(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\tau_2}}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

avec le vecteur d'état du premier filtre de Kalman $X = [SOC, U1, U2]^T$ et $\theta_k = [R_0, R_1, R_2, \tau_1, \tau_2]^T$ le vecteur d'état du second filtre contenant les paramètres de la batterie ($\tau_1 = R_1 C_1$ et $\tau_2 = R_2 C_2$). La matrice F_k est la matrice de transition d'état et B_k la matrice d'entrée de la grandeur de contrôle. La fonction h et son jacobien sont donnés par les équations suivantes :

$$h(X_k, I_{c,k}, \theta_k) = U_{OCV} - R_0 I_{c,k} - U_{1,k} - U_{2,k} \quad (9)$$

$$H_{x,k} = \frac{\partial h}{\partial X_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial UOCV}{\partial SOC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Enfin, il reste à définir w_k et v_k :

— $w_k \sim \mathcal{N}(0,\, Q_k^x)$ est le bruit gaussien du processus avec Q_k^x la matrice de covariance du bruit du processus.

— $v_k \sim \mathcal{N}(0,\, \Sigma_k^x)$ est le bruit gaussien de la mesure avec Σ_k^x la matrice de covariance du bruit de la mesure.

Estimation des paramètres de la batterie

Le second filtre de Kalman sert à fournir une estimation des paramètres de la batterie. Celui-ci est représenté par le système suivant :

$$\begin{cases} \theta_{k+1} = \theta_k + r_k \\ d_k = h(X_K, I_{c,k}, \theta_k) + c_k \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} H_{\theta,k} = \frac{dk}{d\theta_k} = \frac{\partial h}{\partial \theta_k} + \frac{\partial h}{\partial X_k} . \frac{dX_k}{d\theta_k} \\ \frac{\partial h}{\partial \theta_k} = \begin{bmatrix} -I_{c,k} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \frac{\partial h}{\partial X_k} = H_{x,k} \\ \frac{dX_k}{d\theta_k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} & 0 & a_{22} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} a_{11} = -I_{c,k}(e^{\frac{\Delta t}{\tau_1^2}} - 1) \\ a_{12} = \dfrac{\Delta t}{\tau_1^2}(U_{1,k} - R_1 I_{c,k})e^{\frac{\Delta t}{\tau_1}} \end{cases} \quad (13) \qquad \begin{cases} a_{21} = -I_{c,k}(e^{\frac{\Delta t}{\tau_2^2}} - 1) \\ a_{22} = \dfrac{\Delta t}{\tau_2^2}(U_{2,k} - R_2 I_{c,k})e^{\frac{\Delta t}{\tau_2}} \end{cases} \quad (14)$$

Enfin, il reste à définir w_k et v_k :

— $r_k \sim \mathcal{N}(0, Q_k^\theta)$ est un petit bruit blanc avec Q_k^θ la matrice de covariance de la partie des paramètres dépendante du temps.

— $c_k \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_k^\theta)$ est le bruit de mesure correspondant au senseur de courant avec Σ_k^θ la matrice de covariance correspondante.

Algorithme du double filtre de Kalman étendu

L'algorithme utilisé est synthétisé dans le tableau ci-dessous. On voit notamment apparaître les gain de Kalman des deux filtres K_k^x et K_k^θ ainsi que les matrices d'estimation de la covariance de l'erreur P_k^x et P_k^θ.

Algorithm 1 Algorithme du double filtre de Kalman étendu

(1) Initialisation : $X_0, \theta_0, Q_0^x, Q_0^\theta, \Sigma_0^x, \Sigma_0^\theta, P_0^x, P_0^\theta$
(2) Prédiction :
$X_k = F_{k-1}X_{k-1} + B_{k-1}I_{c,k-1}$
$\theta_k = \theta_{k-1}$
$P_k^x = F_{k-1}P_{k-1}^x F_{k-1}^T + Q_k^x$
$P_k^\theta = P_{k-1}^\theta + Q_k^\theta$
for $i \leftarrow 0$ to N **do**
(3) EKF :
- Gain de Kalman :
$K_{k+1}^x = P_{k+1}^x H_k^{xT}(H_k^x P_k^x H_k^{xT} + \Sigma_k^x)^{-1}$
$K_{k+1}^\theta = P_{k+1}^\theta H_k^{\theta T}(H_k^\theta P_k^\theta H_k^{\theta T} + \Sigma_k^\theta)^{-1}$
- Estimation des vecteurs d'état :
$X_{k+1} = X_k + K_{k+1}^x(y_k - h(X_k, I_{c,k}, \theta_k))$
$\theta_{k+1} = \theta_k + K_{k+1}^\theta(y_k - h(X_k, I_{c,k}, \theta_k))$
- Mise à jour de la matrice de covariance de l'erreur :
$P_{k+1}^x = P_k^x(1 - K_{k+1}^x H_k^x)$
$P_{k+1}^\theta = P_k^\theta(1 - K_{k+1}^\theta H_k^\theta)$
end for

4.2.4 Simulation numérique

La simulation numérique a été réalisée avec *Matlab*. Toutes les données servant à tester l'algorithme dans cette section sont tirées d'un dataset fourni par l'université de Wisconsin-Madison

[6]. Cet ensemble de données fournit une multitude de tests de décharge effectués sur une batterie lithium de 2.9 Ah et de tension nominale d'environ 4V. La simulation se divise en deux parties principales.

Tout d'abord, une batterie est déchargée par des pulsations de courants assez courtes et espacées par des temps de repos plus longs. Ce type de test est appelé *Hybrid Pulse Power Characterisation test* (ou HPPC test [3]) et permet d'une part de déterminer la relation entre le SOC et la tension à circuit ouvert, et d'autre part de déterminer les paramètres du modèle de la batterie en faisant des régressions linéaires et exponentielles sur les réponses transitoires et de régime de la batterie. Ensuite, une fois que les paramètres du modèle ont été déterminés, le double filtre de Kalman étendu est appliqué sur une courbe de charge ou de décharge quelconque de la batterie. L'objectif de cette partie est alors d'une part de vérifier que les valeurs de SOC calculées sont correctes, et d'autre part de vérifier que l'algorithme corrige les valeurs des paramètres du modèle lorsqu'on introduit initialement des erreurs dans ceux-ci mais également dans le SOC.

Estimation des paramètres :

- **La première étape** consiste à analyser la courbe de décharge HPPC de la batterie (fig. 8) et d'identifier les pulsations (fig. 9).
- **La seconde étape** permet de fournir une première estimation de R_0 et de la tension à circuit ouvert U_{OCV}. Celle-ci est réalisée en analysant le voltage immédiatement avant et après qu'une pulsation de courant soit appliquée ou retirée.
- **La troisième étape** réalise des régressions exponentielles sur plusieurs réponses transitoires (fig. 10) de la batterie afin de déterminer les temps de relaxation τ_1 et τ_2.
- **La quatrième étape** fait de la régression linéaire sur chacune (fig. 11) des pulsation afin de déterminer les paramètres R_1 et R_2.

Ainsi, toutes les valeurs des paramètres ont pu être calculées. Leurs valeurs moyennes sont telles que : $R_0 = 0.04\Omega$, $R_1 = 0.02\Omega$, $R_2 = 0.08\Omega$, $\tau_1 = 3.78s$ et $\tau_2 = 63.86s$. Finalement, on obtient un modèle de la batterie qui permet de simuler la tension de sortie à partir du courant d'entrée et de comparer aux données réelles (fig. 12).

FIGURE 8 – Test HPPC

FIGURE 9 – Identification des pulsations

FIGURE 10 – Estimation des temps de relaxations

FIGURE 11 – Fit linéaire sur le transitoire de la batterie

FIGURE 12 – Simulation de la batterie

Résultats du double filtre de Kalman étendu

Une fois que les paramètres du modèle ont été déterminés, on introduit une erreur initiale de 100% sur les paramètres ainsi qu'une erreur de 20% sur la valeur du SOC initial (celui-ci est initialement à 80% alors que sa valeur réelle est de 100%). L'objectif est alors de vérifier que le double filtre de Kalman corrige bien les valeurs des paramètres et donne une bonne approximation du SOC. Pour ce faire, une courbe de charge/décharge correspondant à une utilisation de la batterie par une voiture a été utilisée. On peut voir sur la figure 14 que l'erreur sur l'estimation du SOC varie entre des extrêmes de -5% et 7% par rapport au Coulomb Counting (voir fig. 13), ce qui indique une tendance à se rapprocher de l'évalution du SOC par la méthode de Coulomb Counting. On voit également sur cette figure que l'erreur de 20% initialement introduite est corrigée en environ 2-3 minutes.

De même, on peut observer sur la figure 16 que l'erreur sur l'estimation de la tension de sortie de la batterie varie entre des extrêmes de $-0.25V$ et $0.4V$(voir fig. 15). Ensuite, les paramètres R_0, R_1 et τ_1 se rapprochent plus ou moins rapidement de leurs valeurs réelles (fig. 17 et 18). Cependant, la seconde paire R_2C_2 ne varie que très légèrement et reste éloignée de sa valeur réelle. Ceci peut s'expliquer par le fait que cet état local fournit également une bonne approximation du SOC et ne

change donc pas considérablement.

FIGURE 13 – Évolution de la valeur du SOC en fonction du temps.

FIGURE 14 – Évolution de l'erreur de l'estimation du SOC en fonction du temps.

FIGURE 15 – Évolution de la tension à la sortie de la batterie en fonction du temps.

FIGURE 16 – Évolution de l'erreur entre l'estimation de la tension à sortie de la batterie et la tension mesurée en fonction du temps.

FIGURE 17 – Évolution des valeurs des résistances du circuit équivalent en fonction du temps.

FIGURE 18 – Évolution des valeurs des temps caractéristiques τ_1 et τ_2 des pairs RC du circuit équivalent en fonction du temps.

5 Communication

5.1 Principe

Le dispositif doit pouvoir envoyer les données d'intérêts au serveur sans connexion internet afin d'être adaptable à des milieux plus reculés que l'ISIG. Il a été décidé d'utiliser un module "Thingstream Click", par la suite référé comme le "click", qui permet de communiquer avec des serveurs via la technologie "Unstructured Supplementary Service Data" (USSD). Cette technologie présente l'avantage de nécessiter uniquement une couverture de réseau téléphonique, disponible même dans les endroits peu accessibles de la République Démocratique Congo (RDC). Elle ressemble au principe du "SMS" à la différence qu'elle ouvre un canal de connexion entre deux appareils en temps réel, ce qui permet des échanges de messages très rapides.
De plus des modules de communication Thingstream Click avaient été utilisé lors du précédent projet CODEPO,le groupe a donc pu bénéficier de l'expertise des groupes précédent pour employer ce module.

5.2 Fonctionnement de Thingstream

L'entreprise U-Blox qui propose le produit "Thingstream" [4] et le matériel associé tel que le click, définit son produit comme un "Internet of Things communication service". Thingstream offre une plateforme depuis laquelle il est possible de gérer son "réseau d'objets". Ce réseau permet notamment d'ajouter un nombre non-limité de clicks ou de n'importe quel appareil possédant une adresse IP.

Tous ces objets utilisent le protocole MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) pour communiquer entre eux. Ce protocole suit un principe de "publish/subscribe" à des sujets ("topics"). C'est-à-dire que sur le réseau utilisé, il existe une série de "topics" auxquels les objets peuvent s'abonner et sur lesquels ils peuvent publier des messages à destination de tous les autres abonnés. Les topics peuvent eux-même posséder plusieurs sous-topics et sous-sous-topics et dans ce cas, leurs abonnés reçoivent également tous les messages publiés dans les sous-topics.

4. Dont le site est consultable ici : `https://thingstream.io/`

L'échange des messages se fait via le broker Thingstream. Celui-ci stocke les messages quand ils sont publiés et les délivre à leurs destinataires quand ceux-ci se connectent à lui. Ce principe permet aux clicks de ne pas toujours devoir être actifs. Un module pourrait par exemple rester inactif et se réveiller seulement toutes les heures pour vérifier ses messages et envoyer les données qu'il a récoltées. L'envoi de message du "Thingstream Click " est schématisé sur la figure 19.

FIGURE 19 – Communication entre le "Thingstream Click" et le serveur de l'ISIG.

On peut y voir le click s'abonner à deux topics pouvant être soit un topic "Père" ou "Fils" et y postant un message. Un topic "Père" est un sujet possédant une plus grande accessibilité qu'un topic "Fils". En effet, le topic "Fils" possède des atttributs que le "Père" n'a pas forcément. On dit que le sujet "Fils" dérive du sujet "Père".
Pas forcément au même moment, le serveur de l'ISIG se connecte à ces deux topics et récupère donc le message posté quelques instant auparavant par le click. La situation peut également être inversée, le click recevant le message envoyé par le serveur de l'ISIG.

Les messages du protocole MQTT possèdent une propriété appelé la qualité de service. Elle caractérise l'envoi et la réception d'un message :

— Une qualité de service -1 correspond à l'envoi d'un message sans confirmation de réception

de la part du serveur.

— Une qualité de service 0 correspond à l'envoi d'un message au maximum une fois, à la différence de la -1, une connexion entre le click et le serveur est nécessaire.

— Une qualité de service 1 correspond à l'envoi d'un message au minimum une fois, le click continue d'envoyer le message jusqu'à recevoir une confirmation de réception du serveur.

— Une qualité de service 2 correspond à l'envoi d'un message exactement une fois, cette fonctionnalité est à utiliser dans un cas où recevoir plusieurs fois le même message est néfaste.

5.3 Fonctionnement du module click

Le module click est un petit dispositif électronique connecté à un micro-contrôleur et alimenté en 5V. Le micro-contrôleur communique avec lui en lui envoyant des commandes AT. Ce sont des commandes, classiquement utilisées dans le domaine des télécommunications, qui permettent de commander le click via des instructions simples. Les commandes AT les plus basiques pour l'utilisation du Thingstream Click sont reprises ci-dessous : [7]) :

— "AT+IOTCREATE" : Cette commande correspond à l'initialisation du click.

— "AT+IOTCONNECT=true" : Cette commande correspond à la recherche et à la connexion d'un réseau téléphonique accesible.

— "AT+IOTPUBLISH="temperature",1,"23 degres" : Cette commande correspond à l'envoi d'un message par le click. Dans l'exemple repris précédemment, le click publie le message "23 degres" dans le topic "temperature" avec une qualité de service valant 1.

— AT+IOTSUBSCRIBE="temperature" : Cette commande correspond à l'abonnement du click à un topic. Une fois abonné, le click reçevra tous les messages envoyés à ce topic. Dans l'exemple repris ci-dessus, le click s'abonne au topic "temperature".

— "AT+IOTDISCONNECT" : Cette commande correspond à la déconnexion et l'arrêt du click.

L'enchaînement classique d'instructions consiste en les étapes suivantes : initialiser le click, se connecter à un réseau, recevoir ou envoyer un message sur un topic, se déconnecter.

6 Premier prototype

Cette section reprend une explication du fonctionnement du premier prototype envoyé à Goma ainsi qu'une description des différents composants le constituant. Enfin, le deuxième prototype (toujours en cours de développement) sera brièvement présenté ainsi que les améliorations apportées à ce dernier par rapport à son prédécesseur.

Un prototype a été réalisé durant le deuxième quadrimestre afin de valider le travail effectué et de trouver des améliorations ou des problèmes potentiels. Celui-ci a été envoyé en RDC pour être testé sur le terrain. Plus d'informations concernant l'usage du prototype se trouve dans son guide d'utilisation [5].

FIGURE 20 – Prototype envoyé en RDC

5. Disponible comme "Guide_Utilisation_Proto1" sur `https://github.com/Marie210/CODEPO`

FIGURE 21 – Vue intérieur du prototype.

Plus précisément, le prototype possède 3 modes d'utilisation différents correspondant à 2 tests de décharge et un mode d'utilisation normale, ceux-ci sont sélectionnables à l'aide de boutons présents en-dessous d'un écran LCD.

Ces 3 modes de fonctionnement sont les suivants :

1. **Utilisation normale** : Ce mode correspond au fonctionnement normal du dispositif. C'est à dire à l'évaluation de la tension, du courant, de la température et du SOC des batteries monitorées ainsi qu'à l'envoi de ces paramètres via le Thingstream Click.
2. **Test HPPC** : Ce mode correspond à une décharge HPPC à l'aide d'appels périodiques de courants avec un long temps de repos. Comme présenté dans la section 4.2.4, ce test permet de déterminer une première approximation des paramètres du circuit équivalent de la batterie.
3. **Décharge à faible courant** : Ce mode correspond à une décharge à faible courant permettant d'estimer la relation SOC-OCV de la batterie.

6.1 Liste du matériel du premier prototype

6.1.1 Thingstream Click

Le module Thingstream Click est un module de communication permettant l'envoi de données, via un réseau téléphonique et la plateforme WEB Thingstream, à un utilisateur possédant une adresse IP.

FIGURE 22 – Thingstream Click

Le "Thingstream click" ne pouvant pas s'occuper à la fois du traitement des données et de l'envoi et la réception de message, celui-ci est en communication directe avec un microcontrôleur Arduino. L'information provenant des capteurs est donc transmise à l'Arduino qui va ensuite implémenter le double filtre de Kalman pour en déduire le SOC et le SOH . A la suite de ces calculs l'Arduino va stocker l'information sur l'état des batteries dans des String (chaînes de caractères) envoyés au "Thingstream Click" via les commandes AT.

6.1.2 Microcontrôleur Arduino

La carte Arduino est le cerveau du dispositif, elle s'occupe de collecter les données provenant des différents capteurs, de les traiter et de commander au module Thingstream ce qu'il doit envoyer au serveur.

La carte Arduino permet la collecte de données provenant des différents capteurs ainsi qu'un traitement de ces dernières. Celle-ci comporte des pins analogiques et numériques pouvant, comme leurs noms l'indiquent, soit collecter des données sous formes de signaux analogique ou numérique.

Les cartes Arduino possèdent également des pins RX TX utilisées pour transmettre de l'information à un module de communication. Les pins RX et TX correspondant respectivement à la pin de réception et à la pin d'émission. La pin RX de l'Arduino doit donc être branchée à la pin TX du module de communication et inversement. Les pins Gnd et 5V sont quant à elles simplement des pins d'alimentation 5V et de mise à la masse.

FIGURE 23 – Microcontrôleur Arduino

Dans le cadre de ce projet, il a été choisi d'utiliser une carte Arduino Due qui offre la possibilité de transmettre de l'information via plusieurs ports RX TX. Celle-ci possède également un plus grand nombre d'entrées analogiques et numériques permettant donc de brancher plus de capteurs que sur une carte Arduino classique.

Le code est constitué de deux fonctions principales, la fonction setup() et la fonction loop(). La fonction setup étant la pour l'initialisation de la carte Arduino et la fonction loop() tournera quant à elle en boucle pour collecter des données et les exploiter.

6.1.3 Capteur de courant

Le capteur de courant mesure le courant traversant un câble et envoie cette information à la carte Arduino. Il fonctionne par effet Hall (figure 24). Celui-ci permet de calculer le courant débité par les batteries à tout moment sans être invasif pour le circuit. Il est possible d'utiliser deux capteurs différents avec le prototype, le premier permettant une mesure jusqu'à 100 A et le second

FIGURE 24 – Capteur de courant à effet hall de la marque *YHDC* ici le modèle à 20A en courant maximum. La référence des capteurs utilisés est HSTS016L.

jusqu'à 20 A. Étant dans l'incertitude vis à vis du courant réellement débité par le batterie pack, le choix a été fait d'utiliser le capteur de 20 A sur le prototype envoyé à Goma. En effet chacun de ces capteurs présente une erreur de mesure aux environs de 1 % ce qui fait une erreur maximal de 1 A lors de la mesure avec le capteur de 100 A. Cette erreur ne permettant pas d'assurer un bon réglage du double filtre de Kalman il a donc été décidé de ne garder que le capteur à 20 A qui ne présente lui une erreur que de 0,2 A maximum.

Ce capteur retourne en réalité une tension, correspondant à la mesure du courant, sur les pins analogiques de l'Arduino. Il est donc nécessaire d'effectuer une conversion dans le code de manière à traduire cette tension en un courant. Ces valeurs de tension et de courant vont ensuite être envoyées dans le double filtre de Kalman de manière à évaluer le SOC.

Le capteur utilisé fonctionne avec 4 câbles : deux câbles d'alimentation (Ground et VCC) et deux câbles supplémentaires qui donnent des tensions permettant de déterminer le courant mesuré.

6.1.4 Convertisseur de tension

Le convertisseur de tension transforme la tension de la batterie qui alimente le dispositif en une tension de 5V. Cela afin de pouvoir alimenter la carte arduino et les différents composants qui nécessitent une tension de 5V pour fonctionner correctement. Au-delà de cette tension, les composants peuvent subir une défaillance.

L'un des problèmes majeurs lors de la réalisation du prototype fut l'alimentation de l'Arduino et du Thingstream Click via le pack de batteries monitoré à l'ISIG. Ce dernier n'étant constitué que de batteries de 2V il est donc impossible de venir alimenter le BMS en 5V sans utilisé de convertisseur de tension (figure 25). Celui-ci permet alors la conversion d'une tension de 6V, provenant de trois

FIGURE 25 – Convertisseur de tension

batteries 2V en série du pack, en une tension de 5V pouvant alimenter l'ensemble des composants du BMS.

6.1.5 Thermistance

La thermistance est un composant qui permet de mesurer la température ambiante. Ce calcul se fait à partir de la mesure de la tension à ses bornes.

FIGURE 26 – Thermistance

Une donnée importante lors du monitoring des batteries est la température de ces dernières. En effet un échauffement trop important d'une batterie peut traduire un dysfonctionnement de cette dernière et nécessite donc l'envoi d'un technicien pour la changer. Il est donc nécessaire que le BMS puisse envoyer en continu la température des batteries en même temps que le SOC et SOH. Pour ce faire une thermistance est utilisée.
Cette dernière fonctionne sur le principe de la variation de la résistance interne de certain matériaux en fonction de la température. En mesurant cette résistance il est donc possible d'y associer une température avec l'aide de la relation de Steinhart-Hart [9] :

$$T = (A + B\log(R_{th}) + C\log^3(R_{th}))^{-1} \tag{15}$$

où *A,B et C* sont des coefficients sans dimension propres à chaques thermistances, les valeurs des coefficients propre à la thermistance utilisée dans ce projet sont reprises ci-dessous :

$$A = 6,3 * 10^{-4} \quad B = 3,5 * 10^{-4} \quad C = -5,6 * 10^{-7} \tag{16}$$

Pratiquement la mesure de température se fait via la fonction *mesureTempérature()* du code Arduino.

6.1.6 Relais

Le relais est un interrupteur commandable par l'Arduino, il permet de réaliser les tests HPPC présentés précédemment en connectant périodiquement la batterie à une faible résistance de manière à produire les appels de courant nécessaire au test HPPC.

FIGURE 27 – Relais

6.1.7 Lecteur de carte SD

Le lecteur de carte SD enregistre les données mesurées lors des tests ou lors du monitoring par le dispositif sur une carte SD.

FIGURE 28 – Lecteur de carte SD

6.1.8 Alimentation du click

Un problème rencontré lors de tests avec le dispositif de communication est que l'Arduino n'arrive pas à fournir assez de courant au Click ; Il a été remarqué à l'aide d'un oscilloscope que lors d'une tentative de connexion, le click nécessite une grande quantité de courant en pique. Il a été conclu que l'Arduino ne parvient pas à fournir ce courant, ce qui empêche le Click de se connecter.

Une source de tension externe a alors été utilisée pour résoudre ce problème, et la connexion a été établie avec succès.

6.2 Schéma électrique du premier prototype.

Tous les éléments présentés à la section précédente sont repris sur le schéma électrique de la figure 31. On y voit un PCB conçu à l'aide du logiciel EasyEDA (voir figure 30). Celui-ci a été imprimé à l'ULB.

On retrouve sur le schéma de la figure 29 : le switch, le convertisseur de tension, le *Thingstream Click*[6] ainsi que plusieurs résistances montées comme diviseurs résistifs pour permettre la bonne mesure du courant et de la tension à l'aide de l'Arduino Due. Plusieurs capacités de découplage sont également reprises pour éviter toute chute de tension brutale qui pourrait empêcher la bonne alimentation du *Thingstream Click*.

6. Le Click n'est pas directement alimenté par le 5V en sortie du régulateur de tension puisque plusieurs problèmes d'envoie du Click apparaissaient lorsque ce dernier était alimenté avec le 5V. Il est alors alimenté avec le 6V en entrée du régulateur via un cable USB.

FIGURE 29 – Schéma du circuit électrique du PCB.

Figure 30 – PCB modélisé avec EasyEDA

On observe sur la figure 31 l'ensemble des éléments précédemment décrit mais également des connections permettant de connecter des pinces d'alimentation et de mesures. Deux pinces d'alimentation viennent donc se connecter sur du 6V, deux pinces viennent se connecter sur la batterie à monitorer, une autre vient se connecter à la borne positive de la batterie à monitorer (afin de pouvoir tirer du courant de la batterie pour un test HPPC), et deux dernières se connectent à une résistance de décharge.

FIGURE 31 – Schéma de câblage du premier *BMS*.

6.3 Structure générale du code

Le code peut être divisé en 7 blocs interagissant les uns avec les autres en boucles (figure 32).

FIGURE 32 – Structure en blocs du code implémenté sur l'Arduino.

L'interaction des différents blocs peut être vue comme ceci :

— Tout d'abord, l'initialisation du module Thingstream Click s'exécute à la demande de l'utilisateur au démarage du *BMS*.

— Le main va ensuite faire appel aux différents capteurs pour mesurer toutes les données nécessaire aux filtres de Kalman.

— Les données sont ensuite envoyées aux fonctions présentes dans le package "extended_Kalman_filter". Ce groupe de fonction utilise les données fournies par le bloc *Mesures* pour calculer le *SOC*.

— Ces mesures vont ensuite être envoyées au Module *Thingstream Click* pour être transmises au serveur de l'ISIG. En parallèle l'écran LCD et la carte SD sont mis à jour.

— Le code réitère ensuite l'ensemble des blocs sauf le code d'initialisation du module *Click* qui lui n'a besoin d'être exécuté qu'une seule fois.

6.4 Mise en place de la communication avec la plateforme web

Un code Arduino permettant de faire communiquer le Click avec la plateforme thingstream a été réalisé, cela a permis d'envoyer et de recevoir des messages depuis la carte Arduino.
Avec le langage Python, il a également été établi une communication entre un PC et le microcontrôleur via la plateforme thingstream. Pour cela, un code similaire à celui du groupe CODEPO de l'année passée a été utilisé. Ce code utilise la librairie Paho-MQTT dédiée à la communication

avec un broker MQTT. Il est donc possible de s'abonner à des topics afin de recevoir les messages publiés par le microcontrôleur. Il faut donc voir le PC sur lequel est exécuté le code Python comme un thing du protocole MQTT.

De plus, deux types de formats Json ont été mis en place, en collaboration avec les étudiants de l'ISIG, afin de communiquer avec la plateforme web. En effet, le format des messages circulant entre la plateforme web et le BMS peuvent être rassemblés selon 2 catégories correspondant respectivement à chacun de ces deux formats : Les messages envoyés depuis le BMS vers la plateforme web et inversement (Ces deux types de messages sont expliqués plus en profondeur dans l'annexe B.)

Un aperçu de la plateforme web développée par les étudiants de l'ISIG est représentée sur la figure 33.

FIGURE 33 – Aperçu de la plateforme web développée par les étudiants de l'ISIG.

6.5 Test et résultats du premier prototype à Goma

Le prototype a pu être envoyé à l'ISIG afin d'être testé sur place. L'objectif principal a été de caractériser les batteries utilisées par l'ISIG. Pour ce faire, un test HPPC a été réalisé sur une batterie pendant une durée d'environ 2h30. Des pulsations de courant d'amplitude comprises entre 8A et 9A pendant 30 secondes circulaient à intervalles réguliers dans une résistance externe. Chacune de ces pulsations étaient espacées d'un temps de repos de 1 minute. Les résultats de ce test sont présentés sur la figure 34 et la figure 35. On observe sur ces dernières les pulsations de courant permettant d'étudier les réponses transitoires et de régime de la batterie. À partir de ces mesures il a ensuite été possible d'estimer les paramètres du circuit équivalent selon la même méthode qu'à

la section 4.2.4. Ceux-ci sont repris dans la figure 1.

Il est important de noter que des tests d'une durée plus longue ainsi que d'autres courbes de décharges en utilisation normale aurait également été très utiles dans la caractérisation du premier prototype. Cependant, dû à l'impossibilité de l'ISIG de déconnecter ses batteries durant la semaine (car celles-ci sont utilisées), il a été décider de réaliser un test un dimanche et durant une durée écourtée.

FIGURE 34 – Test HPPC réalisé sur les batteries de l'ISIG.

FIGURE 35 – Test HPPC réalisé sur les batteries de l'ISIG.

R_0	R_1	R_2	τ_1	τ_2
$3.3 \cdot 10^{-2}\ \Omega$	$2.7 \cdot 10^{-3}\ \Omega$	$6.1 \cdot 10^{-4}\ \Omega$	28 s	1.24 s

TABLE 1 – Valeurs des paramètres du circuit équivalent des batteries à l'ISIG.

Ensuite, il a également été possible d'obtenir une datasheet des batteries de l'ISIG. Celle-ci a ainsi permis de déterminer la relation entre la tension à circuit ouvert OCV et le SOC représentée sur la figure 36.

FIGURE 36 – Relation entre la tension à circuit ouvert OCV et le SOC des batteries de l'ISIG.

Enfin, les résultats du test ont également permis de simuler le filtre de Kalman. On peut voir l'estimation du SOC en fonction du temps sur la figure 37. Le pourcentage de batterie est passé d'environ 100% à 98.4%. Sachant que 95 pulsations de courant d'environ $8.5A$ ont chacune été écoulée pendant $30s$. Connaissant la capacité nominale des batteries $650Ah$, il est possible de réaliser le calcul suivant afin de vérifier la cohérence du résultat :

$$SOC = \frac{Q_n - I \cdot T \cdot N}{Q_n} \approx 0.99 \tag{17}$$

Avec

— Q_n la capacité nominale de la batterie

— I le courant

— N le nombre de pulsations

— T durée d'une pulsation de courant

L'estimation du SOC obtenu semble donc relativement proche de cette première estimation. De plus, on peut voir (figure 38) que l'erreur sur la tension estimée par le filtre de Kalman par rapport à la tension réelle mesurée aux bornes de la batterie est bornée après un certain temps entre -0.05V et 0.05V.

FIGURE 37 – Estimation du SOC réalisé par le filtre de Kalman sur la courbe de test HPPC réalisée à l'ISIG.

FIGURE 38 – Erreur entre la tension estimée V_{est} et la tension réelle V_t exprimée en volt.

Quelques fonctionnalités du prototype ont cependant eu un problèmes de fonctionnement : la mesure de température a donné des valeurs fausses à partir d'un moment et le Click n'a pas réussi à ce connecter au broker Thingstream. Plusieurs hypothèses sont évoquées telles que l'endomma-

gement du matériel lors du voyage vers la RDC ou une simple déconnection de fils.

6.6 Problèmes et améliorations du prototype

´Prise en compte des modifications du premier PCB sur le nouveau - Plusieurs pistes ont dues être coupées et reconnectées avec des petits câbles. D'abord, un groupe de 3 pistes a du être modifiée à cause du **footprint** mal modélisé d'un des composants (Relais) dans le logiciel de conception de PCB, ce qui a mené à une inversion des pôles et au fait que le composant a pris plus de place que prévu sur la carte, entraînant une gêne pour d'autres composants. Ensuite, une dernière piste a due être modifiée pour pouvoir effectuer des tests HPPC sur une batterie différente de celle sur laquelle le prototype s'alimente ; en effet, le PCB avait été initialement designé pour monitorer des batteries alimentant directement le système. Cela n'était pas possible pour le premier prototype qui doit pouvoir se connecter à une batterie unique de 2V (insuffisant pour alimenter le système).

Implémentation d'un multiplexeur - Ce dernier permettrait de monitorer un grand nombre de batteries (ou de packs de batteries) sans se soucier du nombre de pins de sortie de l'Arduino. Notons par contre que plus le nombre de packs est élevé, plus cela peut avoir un impact sur le temps de calcul du microcontrôleur qui doit pouvoir effectuer l'itération du filtre de Kalman de tous les packs avant les prochaines mesures consécutives des tensions et courants.

Mesure des courants et tensions des panneaux solaires - Avec cette mesure, le prototype pourrait rapidement constater si la puissance fournie par les panneaux est cohérente vis à vis des données météorologique, et dans le cas où ce dernier ne le serait pas, il pourrait envoyer une alerte à la plateforme web.

Ajout d'une prise de terre reliée à la boite - Le prototype travaille avec des tensions et des courants élevés, si il devait y avoir une défaillance à un endroit dans le circuit, étant donné que la boite est en métal, cela pourrait être très dangereux à manipuler pour un technicien ou un élève. Certaines mesures ont déjà été prises pour isoler le circuit de la boite, comme surélever le PCB et les composants dans le boîtier ainsi que placer du papier collant aux endroits où la peinture isolante a été enlevée. Mais une prise de terre reste une mesure nécessaire pour la sécurité du prototype.

7 Dispositif conçu à Kinshasa

7.1 Mise en contexte

Malheureusement, suite à une augmentation des tensions entre des groupes rebelles et l'armée congolaise dans la province du Kivu, la CODEPO a décidé d'annuler le voyage à Goma vers la fin du mois de juin. Il a donc fallu trouver rapidement une alternative pertinente pour maintenir le projet.

La CODEPO avec l'aide de ULB coopération ont heureusement trouvée comme nouveau partenaire la CAMESKIN [7] qui est une ASBL situé à Kinshasa s'occupant de la distribution de médicaments dans la région de Kinshasa. Les étudiants ont donc pu partir, du 11 juillet au 6 août, pour une durée de 4 semaines afin de réaliser un dispositif de monitoring pour le système solaire de la CAMESKIN. Le cahier des charges est resté le même, sauf que les dirigeants de la Cameskin ont insisté sur leur intérêt de recevoir un code permettant de vérifier si la puissance fournie réellement par les panneaux solaires est cohérente avec la puissance que ceux-ci pourraient fournir en théorie.

7.2 Installations de la CAMESKIN

Durant le séjour, un document reprenant les installations solaires de la CAMESKIN a été rédigé et est accessible sur [8]. De plus deux schémas unifilaires des installations ont été numériquement réalisés et sont accessibles sur [9].

Comme indiqués dans ces documents, la CAMESKIN possède 5 systèmes de batteries différents alimentés par un parc de 50 panneaux solaires. Étant donné que les étudiants avaient prévu seulement assez de matériel pour concevoir un dispositif de monitoring pour un système de batteries, il a été envisagé pendant le séjour de trouver sur place le matériel pour réaliser d'autres prototypes. Malheureusement par faute de temps cela n'a pas été possible.

Après discussion avec les ingénieurs de la Cameskin, il a été décidé de monitorer le système de

7. https://www.cameskin.org/
8. https://docs.google.com/document/d/1QPzYXTgUT2cBHYCFnkYNwr2TuteRMnRYPlaYcaUDGDM/edit?usp=sharing
9. https://drive.google.com/file/d/1x56EIqbTSfTPF3UWeTwyz0el7KtcdIWJ/view?usp=sharing et https://drive.google.com/file/d/14EcGZfeCbejHptSCsI0DCsjYWOiHT92Y/view?usp=sharing

batteries qui fournit en électricité le bâtiment administratif, ce choix est justifié par le fait qu'il s'agit du système le moins important si un dysfonctionnement survient dû au dispositif. Ce système est constitué de 20 batteries 12V. Elles sont placées en 5 sous-systèmes, chacun constitué de 4 batteries en série, qui sont mis en parallèle. Le système de batteries est relié à 20 panneaux solaires et à la Société National d'Electricité (SNEL), il fournit en électricité le bâtiment administratif de la Cameskin.

7.3 Modifications par rapport au premier prototype

7.3.1 Utilisation d'amplificateurs différentiels

Deux manières de mesurer les tensions différentielle au sein du pack de batteries ont été considérées :

— Prendre une mesure de tension à chaque noeud séparant les sous-packs de batteries par rapport à la masse et en déduire ensuite leurs tensions différentielles en les soustrayant les unes aux autres.

— Utiliser des amplificateurs différentiels.

Il a été décidé d'utiliser la seconde méthode. En effet, le manque de précision de l'Arduino sur les mesures de tensions implique que la propagation d'erreur lors de la soustraction de deux tensions deviendra non négligeable. De plus, les tensions à mesurer sont abaissées à environ $12V$ et l'erreur de quantification de l'ADC de l'Arduino est moindre. Ainsi la seconde méthode permet de résoudre ce problème en plaçant un amplificateur différentiel aux bornes de chaque batterie. Chacun d'entre eux délivrera alors directement la tension différentielle.

Les amplificateurs différentiels utilisés sont des LT6375. Ils acceptent des tensions d'alimentations allant de $3.3.V$ à $50.V$, une tension d'entrée en mode commun de $\pm 270V$, et ont un gain unitaire. Pour 4 sous-packs de batteries, il faut alors 3 amplificateurs différentiels puisque la mesure sur le pack directement connecté à la masse ne nécessite pas de mesure différentielle.

FIGURE 39 – Image de l'amplificateur LT6375.

7.3.2 Utilisation d'un multiplexeur

Pour empêcher l'utilisation d'un trop grand nombre de pins analogiques lors des mesures de tension, un multiplexeur est utilisé. Ce dernier permet de réduire le nombre d'entrées analogiques de l'Arduino DUE. Cependant le nombre maximum de groupes de batteries monitorables est égale au nombre d'entrées du multiplexeur. De plus, les multiplexeurs permettent de mesurer des tensions de 12V, ceci réduit le nombre de diviseurs résistifs nécessaires à 1 seul en sortie de ce dernier.

Le multiplexeur utilisé est un TMUX4051. Celui-ci peut être alimenté par une source de tension de maximum $24V$ et peut avoir jusqu'à 8 entrées d'une tension maximale de $24V$. De plus, il y a également 3 pins digitales connectées à l'Arduino afin de pouvoir sélectionner l'une des 8 entrées. Un schéma récapitulatif du circuit permettant de prendre la mesure de la tension sur les différents sous-packs de batteries est représenté ci-dessous.

FIGURE 40 – Image du multiplexeur TMUX4051.

FIGURE 41 – Schéma récapitulatif du circuit comprenant les amplificateurs différentiels, le multiplexeur et le diviseur résistif.

7.3.3 Utilisation de potentiomètres

Un potentiomètres est une résistance avec une valeur variable qu'on peut manuellement modifier. Elles sont utilisés afin de faire varier des diviseurs résistifs au sein de du dispositif. Les potentiomètres utilisées ont des valeurs maximales allant jusqu'à $20k\Omega$.

FIGURE 42 – Image d'un potentiomètre.

7.3.4 Schéma du circuit électrique du second prototype

La figure 43 représente le schéma électrique du second prototype. Comme il l'a été dit précédemment, afin de généraliser l'utilisation de ce second prototype, il a été réalisé de telle manière à pouvoir monitorer un nombre variable de batteries (allant de 1 à 6 batteries).

Ainsi, on peut y voir les cinq amplificateurs différentiels permettant de prendre des mesures de tensions différentielles, ainsi qu'une mesure sur la première batterie directement par rapport à la masse, qui sont toutes reliées à un multiplexeur. La sortie de ce multiplexeur est connectée à un diviseur résistif qui est constitué d'un potentiomètre (permettant de s'adapter à différents types de batterie avec des tensions nominales variées).

Un capteur de courant ainsi qu'un diviseur résistif ont aussi été ajouté par rapport au premier PCB afin de monitorer la puissance fournie par les panneaux solaires.

On observe également les six thermistances permettant de mesurer les températures des 6 batteries, elles aussi reliées à un multiplexeur.

De plus, l'arduino DUE est directement emboîtée sur le PCB afin d'avoir un prototype plus robuste.

On observe enfin que deux régulateurs step-down sont utilisés, l'un permettant d'alimenter les composant avec du 5V, et l'autre permettant d'alimenter les multiplexeur.

FIGURE 43 – Schéma électrique du PCB du second prototype.

7.3.5 Mise à jour du code

Pour ce second prototype, le code a été mis à jour afin de gérer les mesures simultanées de tensions des sous-packs ainsi que les itérations correspondantes du filtre de Kalman.

Afin d'éviter d'être dépendant du temps de calcul de l'Arduino , l'ensemble des mesures pour les différentes batteries sont prises à intervalles régulier via le multiplexeur. Ces mesures sont ensuite envoyées aux différents filtres de Kalman pour le calcul du SOC de chacune des batteries.

7.3.6 Application

Étant donné que le partenariat avec l'ISIG a été suspendu, les étudiants ont dû eux-même développer un programme capable de recevoir et traiter les données du dispositif. Ce programme a pris la forme d'une application Python pour simplifier le travail des employés de la Cameskin qui n'étaient pas formés en code.

L'application permet de de recevoir les données du dispositif grâce à la librairies MQTT Paho. Elle va ensuite rechercher des données météorologiques d'un des aéroports de Kinshasa sur un site en libre accès et à partir de l'ensoleillement, elle calcule la puissance théorique que les panneaux pourraient fournir, toutes les deux heures, de 8h à 16h. Il a été estimé qu'en dehors de ces heures-là, l'ensoleillement n'est pas assez important pour avoir un impact notable. Le programme compare ensuite cette puissance avec la puissance réelle et envoie une alerte si les deux ne sont pas cohérentes entre elles. Un des éléments à prendre en compte dans l'installation de la Cameskin est que la puissance en entrée des batteries ne peux pas dépasser les 1300W. L'alerte ne s'affiche donc que si la puissance réelle est significativement en dessous de 1300W alors que les panneaux pourraient produire théoriquement plus que ça.

Le format Json a également été modifié pour être plus compact. Donc, le programme contient plusieurs fonctions de traitement supplémentaires pour mettre toutes les données sous forme de deux fichiers CSV : un contenant les informations sur les batteries et un autre avec les informations sur les panneaux solaires. Ces CSV sont plus détaillés dans le guide d'utilisation.

8 Conclusion

8.1 Installation du premier prototype à Goma

Le premier prototype est bien arrivé à Goma et a été testé le dimanche 8 mai 2022. Ce test a permis de vérifier que le filtre de Kalman est bien capable de prédire le comportement et l'état d'une des batteries de l'ISIG, grâce aux mesures récupérées lors d'un test HPPC. Cependant, certaines fonctionnalités du prototype telles que la communication via Thingstream et la mesure de température ont rencontré quelques problèmes qui devront être étudiés plus en profondeur. Le groupe émet plusieurs hypothèses quant à ces problèmes. Le prototype aurait pu subir des secousses ou des coups lors de son transport et certains composants pourraient être abîmés ou simplement déconnectés. Une autre hypothèse pourrait être que le réseau téléphonique n'est pas bien accessible depuis la pièce et que le capteur de température a été posé à un endroit qui a chauffé pendant les prises de mesures.

8.2 Voyage à Kinshasa

Le voyage à Kinshasa s'est bien déroulé et a permis de créer l'application et d'installer le prototype sur place. Le temps fut un peu court pour adapter le projet à la Cameskin. Les étudiants auraient aimé faire plus de tests avec le prototype et passer plus de temps à l'adapter au milieu congolais, mais au vu des conditions exceptionnelle dans lesquelles s'est déroulée la fin du projet, le résultat final est satisfaisant.

8.3 Remerciements

L'ensemble de l'équipe est très reconnaissant de pouvoir prendre part à ce projet. Celui-ci est une réelle opportunité de lier et d'appliquer les multiples compétences de l'ingénieur sur un cas concret, et surtout de pouvoir rencontrer et travailler avec nos homologues à l'autre bout du monde.

Merci à Orianne, Maxime, Lionel et Michel, nos tuteurs de nous avoir accompagnés au long de ce projet et pour nous avoir partagés leurs connaissances et leurs avis éclairés.

Merci à Geoffrey de nous avoir apporté son aide technique et son expérience tout au long de l'année.

Merci à Josué Isamuna et aux étudiants de l'ISIG pour leur collaboration.

Merci au BEAMS, à l'Ares, à la CODEPO, à la Cameskin et à ULB coopération d'avoir rendu ce projet possible.

Merci à Antoine Nonclercq et à ULB coopération d'avoir su régir rapidement pour nous permettre de partir malgré les problèmes de dernière minute.

Références

[1] Eyyüp Aslan et Yusuf Yasa. « A Review on The Battery State of Charge Estimation Methods For Electric Vehicle Battery Management Systems ». In : 1er nov. 2019, p. 281-285.

[2] Matúš Danko et al. « Overview of batteries State of Charge estimation methods ». In : *Transportation Research Procedia*. TRANSCOM 2019 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport 40 (1er jan. 2019), p. 186-192. issn : 2352-1465.

[3] S. David. « Pulse power characterisation for lithium ion cells in automotive applications - Small and large signal cell impedance analysis ». Thèse de doct. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2016.

[4] Jing Hou et al. « Adaptive Dual Extended Kalman Filter Based on Variational Bayesian Approximation for Joint Estimation of Lithium-Ion Battery State of Charge and Model Parameters ». In : *Applied Sciences* 9 (26 avr. 2019), p. 1726.

[5] Gyselinck Johan. *Renewable Energy Technology*.

[6] Phillip Kollmeyer. *Panasonic 18650PF Li-ion Battery Data*. 21 juin 2018. url : `https://data.mendeley.com/datasets/wykht8y7tg/1` (visité le 12/05/2022).

[7] MikroElektronika. *AT COMMAND*. url : `https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/%5C%20thingstream_click/at-command-manual-thingstream-click.pdf` (visité le 12/05/2022).

[8] Hao Mu et Rui Xiong. « Chapter 1 - Modeling, Evaluation, and State Estimation for Batteries ». In : *Modeling, Dynamics and Control of Electrified Vehicles*. Sous la dir. d'Hui Zhang, Dongpu Cao et Haiping Du. Woodhead Publishing, 1er jan. 2018, p. 1-38. isbn : 978-0-12-812786-5.

[9] John S. Steinhart et Stanley R. Hart. « Calibration curves for thermistors ». In : *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* 15.4 (1er août 1968), p. 497-503. issn : 0011-7471.

[10] Ngoc-Tham Tran, Abdul Basit Khan et Woojin Choi. « State of Charge and State of Health Estimation of AGM VRLA Batteries by Employing a Dual Extended Kalman Filter and an ARX Model for Online Parameter Estimation ». In : *Energies* 10.1 (jan. 2017). Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 137.

[11] Shifei Yuan, Hongjie Wu et Chengliang Yin. « State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model ». In : *Energies* 6 (17 jan. 2013), p. 444-470.

A Tableau récapitulatif des différents équipements de l'ISIG

N°	Désignation	Quantité	Marque	Modèle	Fabriquant	Détails techniques
1	Paneaux solaires type 1	14		SY-PVSY027	Thunder Solar Tech CO, LTD	- Maximum Power : Pmax : 100W - Maximum Power Voltage : Vmp : 17.5V - Maximum Power Current : Imp : 5.71A - Open Circuit Voltage : Voc : 21.37V - Short Circuit Current : Isc : 6.17A - Max System Voltage : 1000V - Test Condition : AM15 E = 1000W/m (TC = 25°C) - Size : 1480mm x 510mm x 30mm Une partie de ces panneaux sont orientes vers l'Ouest et d'autres vers le Sud
2	Paneaux solaires type 2	10		SY-PVSY027	Thunder Solar Tech CO, LTD	- Maximum Power : Pmax : 120W - Maximum Power Voltage : Vmp : 17.5V - Maximum Power Current : Imp : 6.8A - Open Circuit Voltage : Voc : 21.6V - Short Circuit Current : Isc : 7.4A - Max System Voltage : 1000V - Test Condition : AM15 E = 1000W/m (TC = 25°C) - Size : 1480mm x 670mm x 35mm Une partie de ces panneaux sont orientes vers l'Ouest et d'autres vers le Sud
3	Batteries	24	AGISSON	TCB+650A	Made in Taiwan 2018	- Normal Voltage : 2V – 10h 1.8V / Cell (25°C) - Cycle Voltage : 2.35V/Cell - Loat Voltage : 2.23V/Cell (35°C) - Capacity : 650AH - Temperature Coefficient : -3.3mV/Cell/°C
4	Régulateur de tension	1	RAGGIE (MPPT Solar Charge Controller)	RG-HL30A		- Battery Voltage : 12V/24V/48V - Max Solar Voc : 150VDC - Solar VMP : 12V 18VDC ∼80VDC - Max Input : 12V - 420W ; 24V - 840W ; 48V - 1650W
5	Onduleur	1	Luminous	Home UPS	Luminous Power Technologies PVT LTD New Delhi 110058 (India)	- Capacity : 5KVA / 48V - Serial : 160407131B

Table 2 – Tableaux rassemblant les caractéristiques techniques des équipements de l'ISIG

B Formalisme des formats Json

B.1 Communication du BMS vers la plateforme web

Ces messages envoyés depuis le BMS ont pour objectifs d'être directement réceptionnés sur la plateforme web afin d'y être affichés en temps réel. Les messages sont envoyés au format JSON et suivent la structure suivante :

- **"batteries"** :
  contient la liste des batteries qui sont en train d'être monitorées par le SH. Chacune de ces batteries contient 5 caractéristiques :
  1. *"id"* : le numéro d'identification de la batterie.
  2. " soc " : le pourcentage d'utilisation restante de la batterie (exprimé en pourcentage).
  3. *"soh"* : le niveau de vie des batteries caractérisant l'affaiblissement de celles-ci. Pour l'instant trois valeurs sont indiquées (" low ",“ medium " et " good ") afin de caractériser l'usage des batteries.
  4. *"voltage"* : la tension aux bornes de la batterie (exprimée en volts).
  5. *"current"* : le courant entrant/sortant de la batterie (exprimé en ampères).
  6. *"temperature"* : température de la batterie (en degrés celsius).
- **"total"** :
  contient les informations ("id", "soc", "soh", "voltage" et "current") de l'ensemble du pack de batteries.
- **"solarPannels"** :
  contient les caractéristiques des panneaux solaires qui rechargent les batteries. Il contient 3 caractéristiques :
  1. *"current"* : le courant fourni par les panneaux solaires (exprimé en ampères).
  2. *"voltage"* : la tension d'alimentation fournie par les panneaux solaires (exprimée en volts).
  3. *"power"* : la puissance fournie par les panneaux solaires (exprimée en watts).
- *"alertes"* : contient une liste de messages textes à pouvoir afficher sur la plateforme web.

B.2 Communication de la plateforme web vers le BMS

Les commandes envoyées depuis la plateforme web vers le BMS se font à l'aide du script python *"PublishMQTT.py"*. Plus précisément, un envoi de message se fait par le biais de la méthode publish de la classe Client.

Cette méthode prend 3 arguments en entrée :

1. Le nom du **topic** au format STRING (pour le 1er prototype, le topic s'appelle *"TEST1"*).
2. La **commande** à envoyer au format STRING. Par exemple :
   *message = *{ \"option\" : \"A\", \"value\" : \"on\" }*".
3. Le **quality of service**, ayant pour valeur 1.

Afin de pouvoir être correctement reçues par le BMS, les commandes doivent être exprimées au format STRING et commencer par les deux caractères *"*" et terminer par les caractères "*"*. Ce format permet ainsi de distinguer les commandes envoyées depuis la plateforme web des messages qui sont envoyés depuis le BMS.

De plus, les différents types de commandes peuvent être rassemblées selon 4 catégories : A, B, C et D (avec par exemple "option" = "A"). Les 4 catégories de commande sont les suivantes :

- **A** : Permet de mettre le BMS en pause (avec "value" = "pause") ou de le redémarrer (avec "value" = "on").
- **B** : Permet de restarter tout le BMS.
- **C** : Permet de changer certaines valeurs de paramètres utilisés par le BMS.
- **D** : Permet de changer le mode de fonctionnement du SH. Il existe 3 modes de fonctionnement :
  1. *"mode" = 0* : fonctionnement normal du SH (filtre de kaleman).
  2. *"mode" = 1* : test de décharge HPPC des batteries.
  3. *"mode" = 2* : test de décharge à courant faible des batteries.