



ECOLE
POLYTECHNIQUE
DE BRUXELLES



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 principaux	4
2.1	Fonctionnalités liées aux entrées (INPUT)	5
2.2	Fonctionnalités liées aux sorties (OUTPUT)	5
3	Système Solaire	7
3.1	Structure d'un système solaire	7
3.2	Installation de l'ISIG	8
4	Battery Management System	10
4.1	Principes	10
4.2	Détection de défauts et protection des batteries	11
4.3	Calcul du SoC et du SoH	12
4.3.1	Définitions	12
4.3.2	Aperçu des méthodes d'estimation du SoC et du SoH	12
4.3.3	Développements théoriques	14
4.3.4	Simulation numérique	18
5	Communication	23
5.1	Principe	23
5.2	Fonctionnement de Thingstream	23
5.3	Fonctionnement du module Click	24
6	Matériel	24
6.1	Microcontrôleur Arduino	25
6.2	Montage Intermédiaire	26
6.3	Multiplexeur	27
6.4	Consommation du module thingstream	27
6.5	Résultats	27

7 Objectifs pour le deuxième quadrimestre	28
A Tableau récapitulatif des différents équipements de l'ISIG	29

1 Introduction

Le projet CODEPO 2021-2022 vise à améliorer l'utilisation de systèmes de panneaux solaires, par la conception d'un appareil de monitoring et de management de l'énergie, en coopération avec l'Institut Supérieur d'Informatique et de gestion (ISIG). Il s'agit d'un projet pilote qui pourra être généralisé à des systèmes solaires 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'ULB 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 à pour rôle d'implémenter ces données sur une plateforme web qui fournit une vue générale du fonctionnement du système en temps réel.

Ce rapport de mi-parcours a pour objectif de présenter les progrès réalisés tout au long du premier quadrimestre par l'équipe de l'ULB. Il est présenté de la manière suivante :

Le rapport commence par un cahier des charges qui recense 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 présenté juste après.

Ensuite, vient une partie qui expose toute la théorie liée au management 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.

Une dernière section porte sur le matériel utilisé, principalement le microcontrôleur et le dispositif de communication, et les résultats obtenus avec ceux-ci.

Finalement, les objectifs pour le second quadrimestre sont présentés.

2 Objectifs principaux

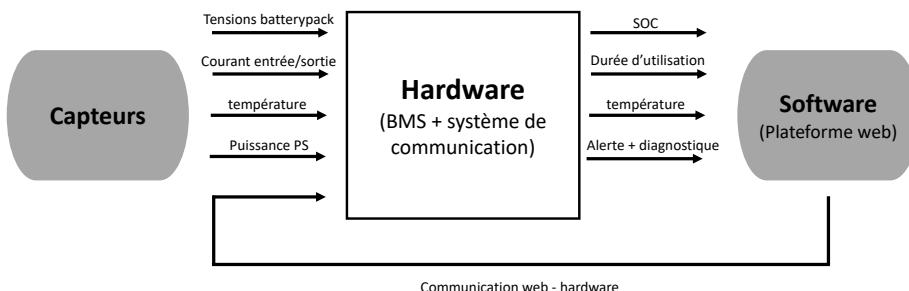


FIGURE 1 – Schéma du cahier des charges

Les objectifs principaux du projet peuvent être résumés en 8 points (classés dans l'ordre de priorité) :

1. Mesure du pourcentage du battery pack (et estimation du temps d'utilisation restant).
2. Système de communication (réception et envoi de données avec la plateforme web).
3. Développement de la plateforme web permettant de réceptionner et d'envoyer des données avec le prototype.
4. Autonomie du système (contrôle de température par ventilation, coupure si surtension/sous-tension).
5. Gestion des panneaux solaires. (Vérifier que la puissance reçue est cohérente avec la météo)
6. Diagnostique réalisé par le BMS, et envoi de messages d'alertes en cas de dysfonctionnement urgent.
7. Optimisation du dispositif (prix, robustesse, taille, facilité d'utilisation).
8. Universaliser le prototype pour une utilisation en milieu rural (adaptation à différents types de batteries, environnements différents, communication).

La figure 1 représente les entrées et sortie de la partie hardware développée par les étudiants de l'EPB.

2.1 Fonctionnalités liées aux entrées (INPUT)

Tension et courant entrée/sortie du battery pack

Le module hardware doit être capable de fournir une approximation en temps réel du niveau de charge des batteries, on appelle ce niveau le SOC (State Of Charge). Ce niveau est obtenu à partir des mesures de tension et de courants fournies par les capteurs. Ces mesures permettent également de surveiller que les batteries ne soient pas en surtension ou sous-tension.

Température

La température permet de vérifier que le système ne subit aucune surchauffe. En cas de température trop élevée, le système peut être refroidi par un ventilateur. Si l'effet des ventilateurs n'est pas suffisant pour refroidir le système et qu'une température critique est atteinte, un message d'alerte est envoyé à la plateforme web et coupe éventuellement le système.

Puissance panneaux solaires

La mesure de la puissance fournie par les panneaux solaires permet de vérifier l'état de propreté de ceux-ci. Cela peut être fait en comparant la puissance caractéristique devant être fournie pour l'ensoleillement actuel (fourni par la plateforme web) avec la puissance mesurée. Si l'écart mesuré est trop grand, un message d'alerte est envoyé à la plateforme web afin de nettoyer/réparer les panneaux solaires.

Communications avec la plateforme web

Le dispositif doit être capable de recevoir des instructions à distance (depuis la plateforme web) dans le but d'adapter son comportement. Cela permet à la fois d'ajuster certaines variables (tension nominale, capacité maximale, etc) dans le microcontrôleur afin d'optimiser certaines mesures, mais également d'éteindre le système depuis la plateforme web en cas de dysfonctionnements trop importants.

2.2 Fonctionnalités liées aux sorties (OUTPUT)

Estimation du SOC et durée d'utilisation

Le système doit être capable de communiquer à la plateforme web une estimation du SOC ainsi

qu'une estimation de la durée restante d'utilisation du batterypack.

Alerte et diagnostique

Le système doit être capable de communiquer avec la plateforme web afin de pouvoir lui envoyer des messages d'alertes ainsi qu'un éventuel auto-diagnostique en cas de dysfonctionnement.

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 de l'article [5] réalisé par la société *Northern Arizona Wind and Sun* spécialisée dans les énergies renouvelables.

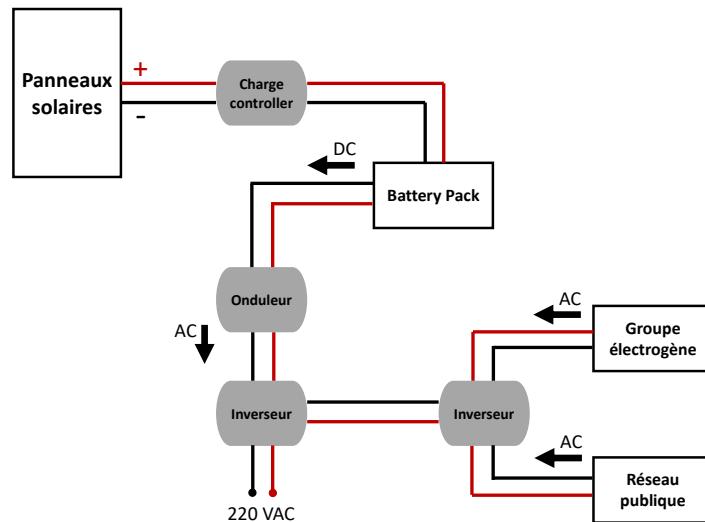


FIGURE 2 – Éléments principaux d'une installation solaire

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

1. **Panneaux solaires**
2. **Régulateur de tension** (Charge Controller) : celui-ci fait le lien entre les panneaux solaires et les batteries afin de s'assurer que celles-ci soient proprement chargées. 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 solaires 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 un voltage élevé avec un courant faible et renvoie un voltage plus bas 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. **Onduleur** : il permet de fournir une tension alternative AC à partir de la tension continue DC délivrée par les batteries. En général, la tension nominale de l'onduleur doit être égale à celle des batteries.
4. **Inverseur** : il permet d'accéder à une seconde source d'énergie (Réseau public ou groupe électrogène) en cas de défaut des batteries ou des panneaux solaires.
5. **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 solaires (Hormis les panneaux solaires) de l'ISIG sont placés dans une salle de dimensions $4m \times 3m \times 3m$ (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).

Le schéma de câblage est représenté sur la figure 3. L'onduleur reçoit à son entrée une tension de 48VDC et produit en sortie une tension de 220VAC 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 SNEL (réseau public de Goma) et au Groupe électrogène pour recharger les batteries en cas de baisse de l'éclairement solaire ou de panne.

L'annexe A synthétise les caractéristiques techniques (Marque, Modèles, Tension, etc.) des différents équipements utilisés dans l'installation solaire.

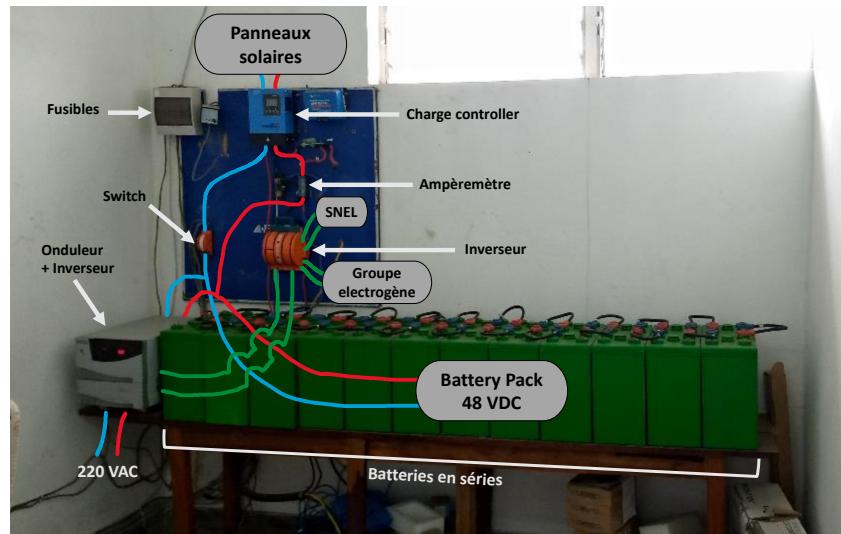


FIGURE 3 – Installation du système solaire de l'ISIG



FIGURE 4 – Panneaux solaires installés à l'ISIG

4 Battery Management System

4.1 Principles

Un *Battery Management System* (BMS), ou système de gestion de batteries, est un système électronique qui permet de protéger et gérer une batterie ou un pack de batteries. La batterie est alors protégée de surtensions, sous-tensions, ou de défauts qui peuvent apparaître ; la détection de ceux-ci est brièvement expliquée dans la prochaine section. En plus de cela, la batterie est également gérée grâce à plusieurs mesures de grandeurs sur celle-ci telles que la tension, le courant qui entre ou sort, la température, etc. Les mesures de ces grandeurs permettent alors au système électronique de réguler ou corriger une quelconque perturbation ou défaut.

Le BMS peut avoir plusieurs fonctionnalités. Comme mentionné ci-dessus, une protection et prévention de défauts en est une mais d'autres sont aussi présentes.

Une estimation du *State of Charge* (SoC), ou taux de charge des batteries présentes dans un pack est une des fonctionnalités importantes du BMS. Cela permet de pouvoir estimer de manière plus ou moins continue la durée d'utilisation restante de chacune des batteries permettant alors de déterminer quelle batterie changer et quand.

Cette dernière fonctionnalité en implique alors une autre : l'équilibrage de plusieurs batteries. En effet, si plusieurs batteries ne sont pas au même niveau de SoC, l'efficacité ainsi que la santé de celles-ci peuvent s'avérer réduites, c'est pourquoi il est conseillé d'équilibrer le taux de charge des batteries appartenant à un même *battery pack*.

Une autre grandeur qui est également à prendre en compte est la température des batteries. Cela permettra de détecter une surchauffe dans le *battery pack* et de pouvoir agir assez rapidement en activant par exemple un ventilateur connecté au microcontrôleur. Une mesure de la température sur la batterie peut donc aussi être prise en charge par le BMS.

Enfin, un stockage des données peut aussi être intéressante afin de pouvoir afficher ces données quelque part ou bien d'en déduire des observations sur le long terme¹. Ce stockage peut se faire sur le microcontrôleur utilisé ou bien par un serveur externe qui traite les données qu'il reçoit du microcontrôleur. Dans notre cas, c'est la seconde option qui est utilisée puisque l'objectif des

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

étudiants de l'ISIG est de pouvoir afficher et traiter ces données sur un interface WEB. En plus de cela, une communication peut également avoir lieu entre l'interface WEB et le microcontrôleur gérant le *battery pack* permettant ainsi un contrôle à distance des batteries.

4.2 Détection de défauts et protection des batteries

Afin de détecter des défauts comme des surtensions ou sous-tensions, il y a plusieurs méthodes. Par exemple, des mesures de la tension sur chaque batterie peut permettre de savoir si on dépasse un certain seuil ou si, au contraire, un court-circuit interne est apparu et que la tension est trop faible. Il est aussi possible d'utiliser des comparateurs ou encore des diodes Zener et fusibles. Cette dernière méthode utilise les diodes comme des limiteurs de tensions : si une surtension ou sous-tension apparaît, la diode est passante et un fusible chauffe et pète déconnectant ainsi la batterie du BMS et permettant ainsi de protéger l'électronique et d'indiquer qu'une batterie subit un défaut.

Comme mentionné dans la section précédente, un équilibrage des batteries est une fonctionnalité importante du BMS puisqu'il protège les batteries et les empêche de nuire à l'efficacité de celles-ci ainsi qu'à leur santé. Pour cela il existe deux types de *cell balancing* : passif ou actif. D'une part, la première consiste en un équilibre de toutes les batteries au niveau de celle qui a le plus petit SoC en dissipant l'excès d'énergie des autres batteries dans des résistances. D'autre part, le *balancing* actif consiste en un transfert d'énergie entre les batteries qui ont plus d'énergie avec celles qui en ont moins ; une capacitance peut absorber l'excès d'énergie d'une batterie et la distribuer à celles qui ont un plus faible SoC. Bien que la seconde méthode semble plus écologique et efficace, chacune de celles-ci a ses propres avantages et inconvénients en ce qui concerne la complexité, l'efficacité, la taille ou le coût.

Étant donné que les batteries utilisées à l'ISIG sont des batteries au plomb et que le balancing n'est pas nécessaire pour ce type de batterie, il a été décidé de ne pas implémenter cette partie dans le BMS.

4.3 Calcul du SoC et du SoH

L'estimation du pourcentage restant d'une batterie (SoC = State of Charge) ainsi que son état de vie (SoH = State of Health) sont des caractéristiques extrêmement importantes lorsqu'on utilise des batteries. Seulement, les batteries stockent l'énergie sous forme d'énergie chimique et il n'est donc pas possible d'accéder directement à ces mesures sans les détruire en même temps (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.

4.3.1 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 :

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

Une batterie totalement rechargée possède la capacité maximale Q_{max} . Celle-ci est en général 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 :

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

4.3.2 Aperçu des méthodes d'estimation du SoC et du SoH

Les articles [1] et [2] 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 batterie et d'attendre un temps suffisamment long (pour que le transitoire de la batterie se dissipe, cela peut prendre jusqu'à plusieurs heures) 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. **Méthodes de Comptage** : elles consistent à faire le bilan des courant entrant et sortant d'une batterie afin d'estimer son SoC. La méthode la plus connue est le **Coulomb counting method**. Elle mesure le courant de charge/décharge d'une batterie et l'intègre au cours du temps selon la formule suivante :

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

Ce qui donne sous forme discrète :

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

avec η_c le rendement de Coulomb de la batterie. Cette méthode est assez simple à réaliser et est très répandue mais présente également de nombreux défauts. En effet, elle ne prend pas en compte le vieillissement des paramètres de la batterie et accumule une erreur tout au long de son calcul qui s'amplifie au fil du temps. 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 adaptative** : ces méthodes sont capables de se réajuster dans un environnement variable de manière autonome. Étant donné la nature chimique 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. 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.
- 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.

Après avoir comparé les différentes méthodes, il a 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 étant une des plus robustes et des plus précises, elle permet de rendre le BMS le plus autonome possible. 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.

4.3.3 Développements théoriques

Les développements présentés dans cette partie sont grandement basés sur les articles [4], [6] et [7].

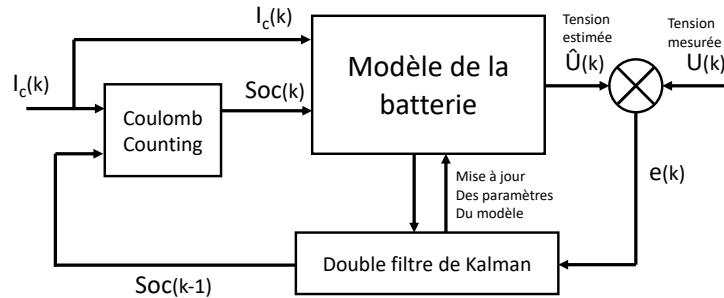


FIGURE 5 – Schéma du filtre de kalman

Le fonctionnement du filtre de Kalman est schématisé sur la figure 5. 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. Un modèle de la batterie permet de calculer une estimation $\hat{U}(k)$ de la tension de sortie U_t à l'instant k.
3. L'estimation $\hat{U}(k)$ est comparée à la tension mesurée $U(k)$. 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.

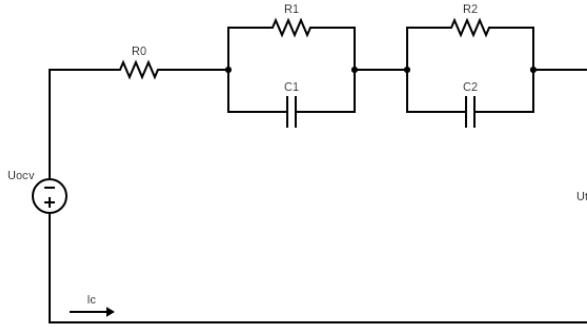


FIGURE 6 – Circuit équivalent de la batterie (modèle du second ordre)

La qualité du modèle choisi pour la batterie influence directement la précision de l'estimation du SOC. En général, 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 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 :

$$U_t = U_{OCV} - R_0 I_c - U_1 - U_2 \quad (5)$$

Avec I_c le courant de charge et U_1 , U_2 étant respectivement les tensions aux bornes des paires $R_1 C_1$ et $R_2 C_2$.

La relation non-linéaire entre le SoC et U_{OCV} est approximée selon un polynôme du 11^{ème} ordre :

$$U_{OCV}(SOC) = \sum_{i=0}^{11} k_i SOC^i \quad (6)$$

Estimation du SoC

Le premier filtre de Kalman sert à fournir une estimation du SoC. Celui-ci est représenté par le système suivant :

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

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

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 :

$$h(X_k, I_{c,k}, \theta_k) = U_{OCV} - R_0 I_{c,k} - U_{1,k} - U_{2,k} \quad (9) \quad H_{x,k} = \frac{\partial h}{\partial X_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_{OCV}}{\partial SOC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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 :

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

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

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

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

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 en (1). 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

4.3.4 Simulation numérique

La simulation numérique a été réalisé avec *Matlab*. Celle-ci 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. 7) et d'identifier les pulsations (fig. 8).

La seconde étape permet de fournir une première estimation de R_0 et de la tension à circuit ouvert U_{OCV} (notée E_m sur la figure 9). 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 (fig. 11).

La quatrième étape fait de la régression linéaire sur chacune (fig. 12) des pulsations afin de déterminer les paramètres R_1 et R_2 (fig. 13).

Ainsi, toutes les valeurs des paramètres ont pu être calculées. Leurs valeurs moyennes sont telles que : $R_0 = 0.0451[\Omega]$, $R_1 = 0.0222[\Omega]$, $R_2 = 0.0418[\Omega]$, $\tau_1 = 3.7887[s]$ et $\tau_2 = 63.8628[s]$.

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. 14).

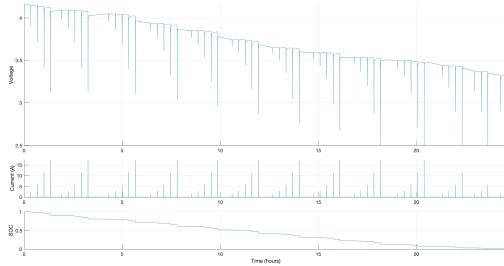


FIGURE 7 – Test HPPC

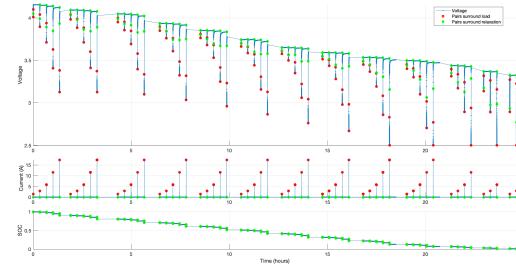


FIGURE 8 – Identification des pulsations

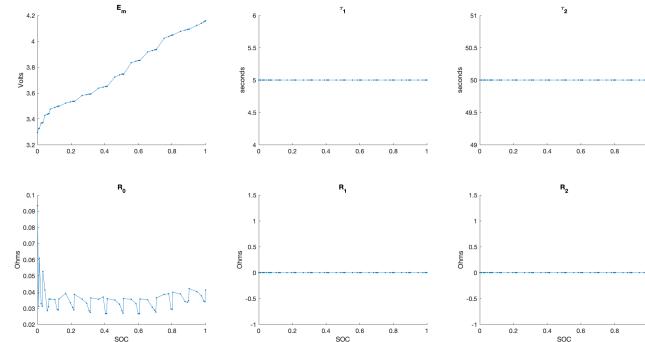


FIGURE 9 – Première estimation de la relation SOC- U_{OCV} et de R_0

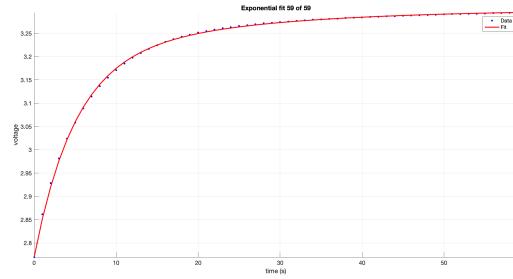


FIGURE 10 – Estimation des temps de relaxations

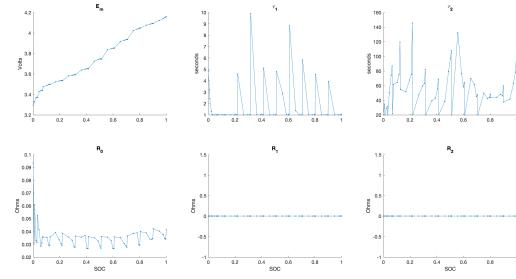


FIGURE 11 – Estimation de τ_1 et τ_2

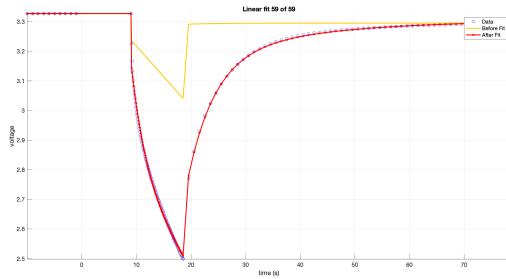


FIGURE 12 – Fit linéaire sur le transitoire de la batterie

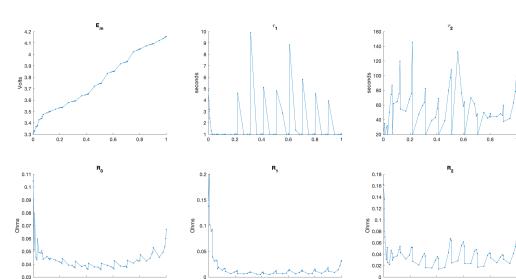


FIGURE 13 – Estimation finale des paramètres

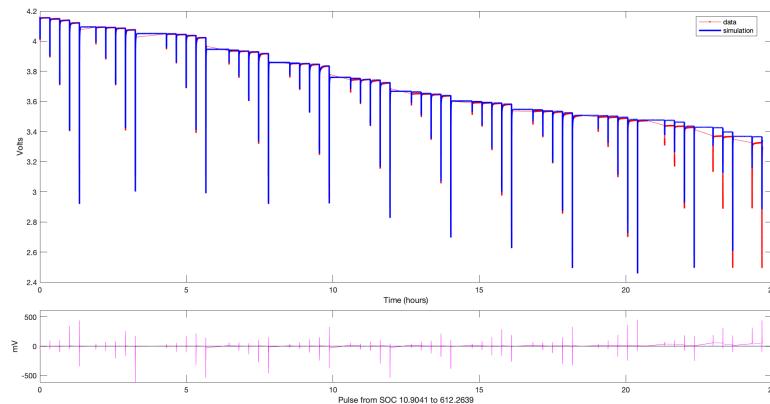


FIGURE 14 – Simulation de la batterie

Résultat 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 que peut voir sur la figure 16 que l'erreur sur l'estimation du SoC varie entre des extrêmes de -5% et 7% et que globalement l'estimation fournie par l'algorithme est relativement bonne (voir fig. 15). De même, on peut voir sur la figure 18 que l'erreur sur l'estimation de la tension de sortie de la batterie varie entre des extrêmes de -0.25[V] et 0.4[V] et que de nouveau l'estimation fournie par l'algorithme est relativement bonne (voir fig. 17). Ensuite, les paramètres R_0 , R_1 et τ_1 se rapprochent plus ou moins rapidement de leurs valeurs réelles (fig. 19, 20 et 22). Cependant, la seconde paire R_2C_2 (fig. 21 et 23) 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.

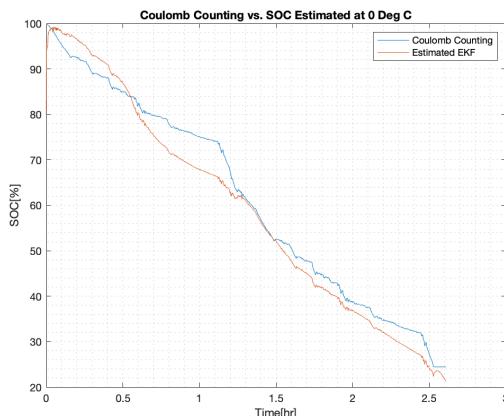


FIGURE 15 – Évolution de la valeur du SoC

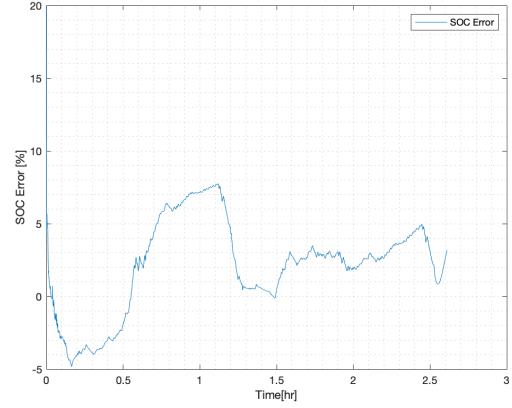


FIGURE 16 – Évolution de l'erreur de l'estimation du SoC

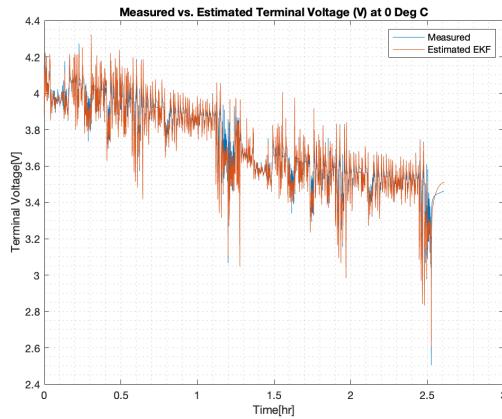


FIGURE 17 – Évolution de la tension de sortie de la batterie

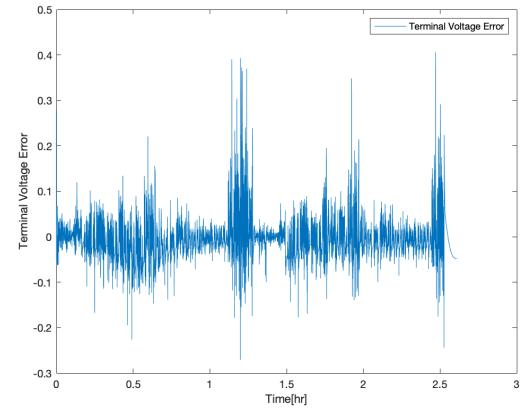


FIGURE 18 – Évolution de l'erreur de l'estimation de la tension de sortie de la batterie

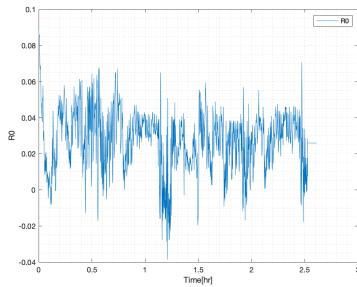


FIGURE 19 – Évolution de la valeur de R_0

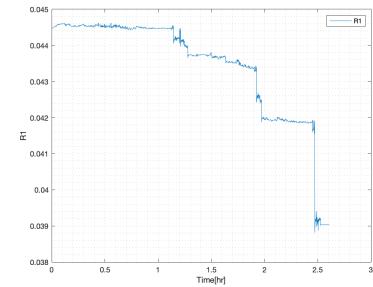


FIGURE 20 – Évolution de la valeur de R_1

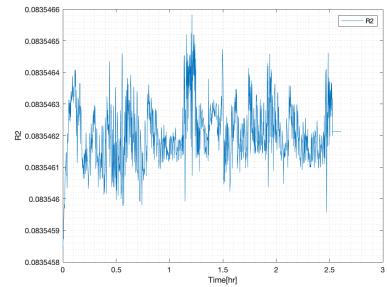


FIGURE 21 – Évolution de la valeur de R_2

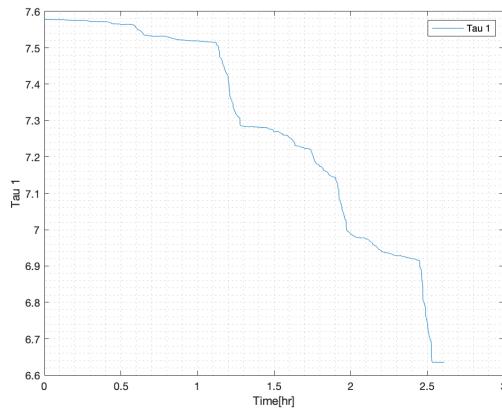


FIGURE 22 – Évolution de la valeur de τ_1

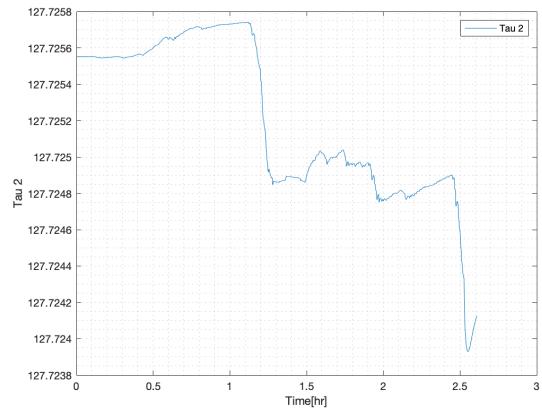


FIGURE 23 – Évolution de la valeur de τ_2

5 Communication

5.1 Principe

Le module de communication doit pouvoir fonctionner sans connexion internet afin d'être adaptable à des milieux plus reculés que l'ISIG. Comme les précédents groupes CODEPO, nous avons choisi un module "Thingstream Click" qui nous permet de communiquer avec des serveurs via la technologie USSD. Cette technologie nécessite uniquement une couverture réseau téléphonique, disponible même dans les endroits peu accessibles de la RDC.

5.2 Fonctionnement de Thingstream

L'entreprise U-Blox qui propose le produit "Thingstream" et le matériel associé tel que le module Click, définit son produit comme un "Internet of Things communication service". Thingstream nous offre une plateforme depuis laquelle gérer notre "réseau d'objets". Réseau auquel nous pouvons ajouter un nombre non-limité de modules Click ou de n'importe quel appareil possédant une adresse IP.

Tous ces objets utilisent le protocole MQTT pour communiquer entre eux. Ce protocole suit un principe de "publish/subscribe". C'est-à-dire que sur notre réseau, 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.

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 connecteront à lui. Ce principe permet aux modules Click 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 24.

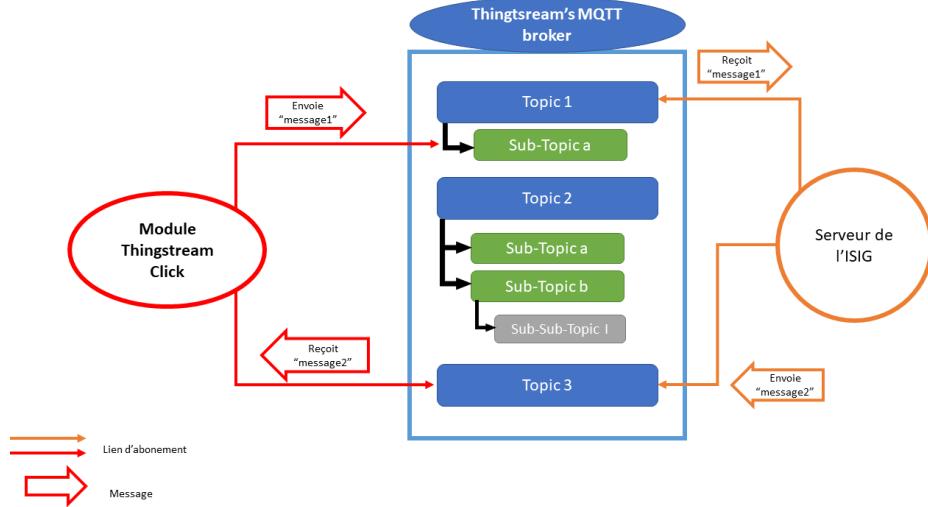


FIGURE 24 – Communication entre le "Thingstream Click" et le serveur de l'ISIG.

On peut y voir le "Click" s'abonner à deux Topics pouvant être soit un topic "Père" ou "Fils" et en y postant un message. 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 "Thingstream Click". La situation peut également être inversée, le "Click" recevant le message envoyé par le serveur de l'ISIG.

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. L'enchaînement d'instructions classique est : créer une connexion, se connecter, recevoir ou envoyer un message sur un topic, se déconnecter.

6 Matériel

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 direct 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 certaines commandes : les commandes AT. Cette section décrira brièvement le fonctionnement des différents modules ainsi que le montage effectué et les résultats obtenus.

6.1 Microcontrôleur Arduino

La carte Arduino permet la collecte de données provenant de nos différents capteurs ainsi qu'un traitement de ces données. Celle-ci est constituée de pins analogiques et numériques pouvant comme leurs nom l'indique soit collecter des données sous formes de signaux analogique ou numérique. Les cartes Arduino possèdent également des pins RX TX utilisés 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 sont simplement des pins d'alimentation 5V et de mise à la masse.

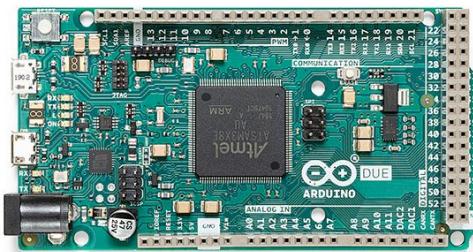


FIGURE 25 – Microcontrôleur Arduino

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 port RX TX. Celle-ci possède également un plus grand nombre d'entrée analogique et numérique on peut donc 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 travailler.

6.2 Montage Intermédiaire

Le montage provisoire de l'Arduino et du "Thingstream Click" est représenté sur la figure 26.

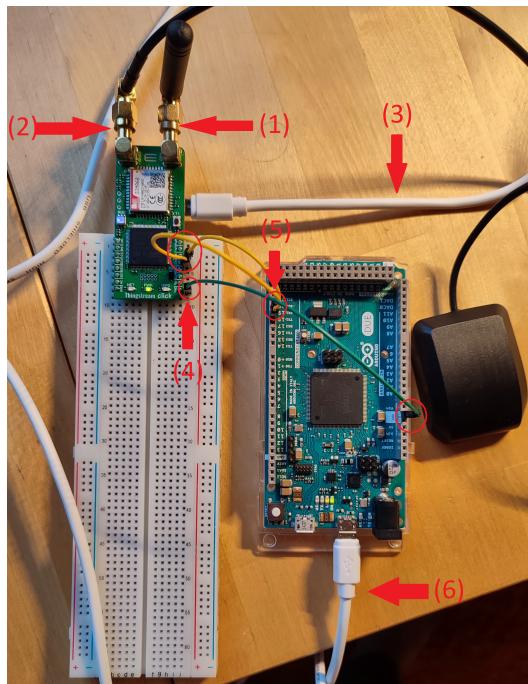


FIGURE 26 – Montage de l'Arduino et du Thingstream Click

On y retrouve :

- L'antenne GSM utilisée pour les communication avec la plateforme Thingstream (1).
- L'antenne GPS utilisée pour transmettre les coordonnées exactes du montages à l'ISIG dans l'éventualité d'une utilisation du projet en zone rurale (2).
- L'alimentation externe du Click par son port micro USB (3).
- Le pin de masse commune du Click relié au pin de masse de l'Arduino (4).
- Les pins de communication RX et TX de l'Arduino branché respectivement au pin TX et RX du Thingstream Click (5).
- Le port d'alimentation micro USB de l'Arduino alimenté indépendamment du Thingstream Click (6).

6.3 Multiplexeur

Comme il y a 24 batteries à monitorer, il faudra effectuer plusieurs mesures. Pour cela, un multiplexeur peut être une solution ; C'est un dispositif électronique qui permet le transport de plusieurs mesures sur une même pin. Cela se fait en transportant les mesures sur différents intervalles temporelles, un correspondant à chaque mesure. Ainsi l'Arduino pourra recevoir plusieurs mesures sur une seule pin.

6.4 Consommation du module thingstream

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 pompe une grande quantité de courant en pique. Il a été conclu que l'Arduino ne parvient pas à fournir ce courant et ce qui empêche au Click de se connecter. Une source de tension externe a été utilisé pour résoudre ce problème, et la connexion a été établi avec succès ce qui n'était jamais arriver avec l'Arduino comme alimentation.

6.5 Résultats

Un code Arduino permettant de faire communiquer le Click avec la plateforme thingstream a été réalisé, cela à permis d'envoyer et de recevoir des messages depuis la carte Arduino.

Avec le langage Python, il a également été établit une communication entre un PC, la plateforme thingstream et le microcontrôleur. Pour cela, un code similaire à celui du groupe CODEPO de l'année passé a été utilisé. Ce code utilise la librairie Paho-MQTT dédié 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.

7 Objectifs pour le deuxième quadrimestre

Il reste plusieurs objectifs à accomplir avant d'avoir un dispositif fonctionnel :

- Réaliser les tests HPPC sur une batterie.
- Implémenter le filtre de Kalman dans la carte Arduino. Jusqu'à présent, tous les codes sur le filtre de Kalman ont été réalisé en Matlab, il faut donc implémenter les codes dans le langage Arduino.
- Gérer les temps d'écoute du Thingstream Click. Celui-ci ne doit pas rester allumé en permanence, il reste à établir la fréquence à laquelle le Click doit envoyer les mesures.
- Mettre en place la mesure des tensions au bornes des différentes batteries et tester l'ensemble du prototype sur un pack de batteries 48V. Les mesures de tensions peuvent se faire par le biais d'un multiplexeur.
- Concevoir un système d'alimentation permettant d'alimenter le "Thingstream Click" et l'Arduino. Par exemple une alimentation par le pack de batteries à l'aide d'un diviseur résistif.
- Un professeur de l'ISIG vient du 21 janvier au 21 avril en Belgique, il faut donc préparer un prototype qu'il pourrait ramener en RDC pour une série de tests.

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	<ul style="list-style-type: none"> - 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 <p>Une partie de ces panneaux sont orientées vers l'Ouest et d'autres vers le Sud</p>
2	Paneaux solaires type 2	10		SY-PVSY027	Thunder Solar Tech CO, LTD	<ul style="list-style-type: none"> - 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 <p>Une partie de ces panneaux sont orientées vers l'Ouest et d'autres vers le Sud</p>
3	Batteries	24	AGISSON	TCB+650A	Made in Taiwan 2018	<ul style="list-style-type: none"> - Normal Voltage : 2V – 10h 1.8V / Cell (25°C) - Cycle Voltage : 2.35V/Cell - Load 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		<ul style="list-style-type: none"> - 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)	<ul style="list-style-type: none"> - Capacity : 5KVA / 48V - Serial : 160407131B

TABLE 1 – Tableaux rassemblant les caractéristiques techniques des équipements de l'ISIG

Références

- [1] Eyyüp ASLAN et Yusuf YASA. « A Review on The Battery State of Charge Estimation Methods For Electric Vehicle Battery Management Systems ». In : 1^{er} 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 (1^{er} 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] Northern Arizona Wind SUN. *What Components are Typically used in an Off-Grid Solar Power System ?* Northern Arizona Wind & Sun. URL : <https://www.solar-electric.com/learning-center/what-components-typically-used-off-grid-solar-power-system/> (visité le 12/12/2021).
- [6] 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.
- [7] 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.