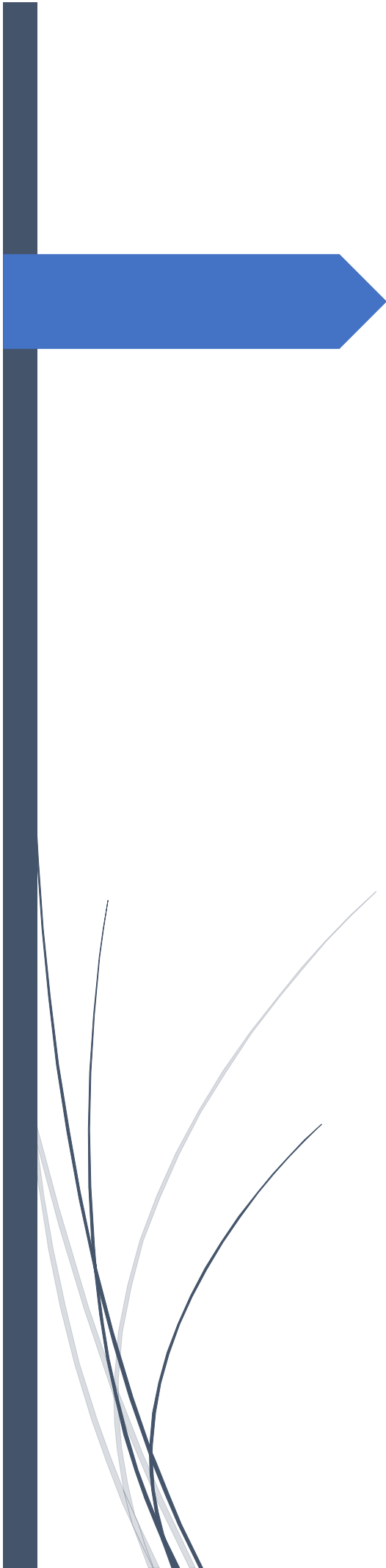




Note d'application

Filtre de Kalman unscented (UKF)

Eya WALHA

E5

Table des matières

1. Introduction.....	2
Contexte	2
Objectif	2
2. Modèle de Batterie.....	2
3. Introduction à l'Unscented Kalman Filter (UKF).....	4
4. Mise en Œuvre Pratique.....	6
5. Exemple d'Application.....	9
6. Conclusion	11

1. Introduction

Contexte

Les batteries sont des éléments essentiels des systèmes modernes, alimentant divers dispositifs, des véhicules électriques aux systèmes de stockage d'énergie. Une gestion optimale des batteries repose sur une estimation précise de l'état de charge (SOC), une mesure de la capacité restante disponible par rapport à la capacité totale de la batterie. Cette estimation est cruciale pour garantir la sécurité, prolonger la durée de vie des batteries, et optimiser leur performance.

Cependant, estimer le SOC avec précision est un défi majeur en raison des facteurs suivants :

- **Non-linéarité des systèmes** : Le comportement des batteries, comme la relation entre la tension et le SOC, est hautement non linéaire.
- **Bruit des mesures** : Les capteurs de tension et de courant introduisent du bruit et des imprécisions dans les mesures, rendant difficile une estimation fiable.
- **Facteurs dynamiques** : Les variations de température, les charges ou décharges rapides, et le vieillissement de la batterie influencent les paramètres électriques et chimiques, compliquant encore davantage l'estimation.

Objectif

Cette note d'application vise à :

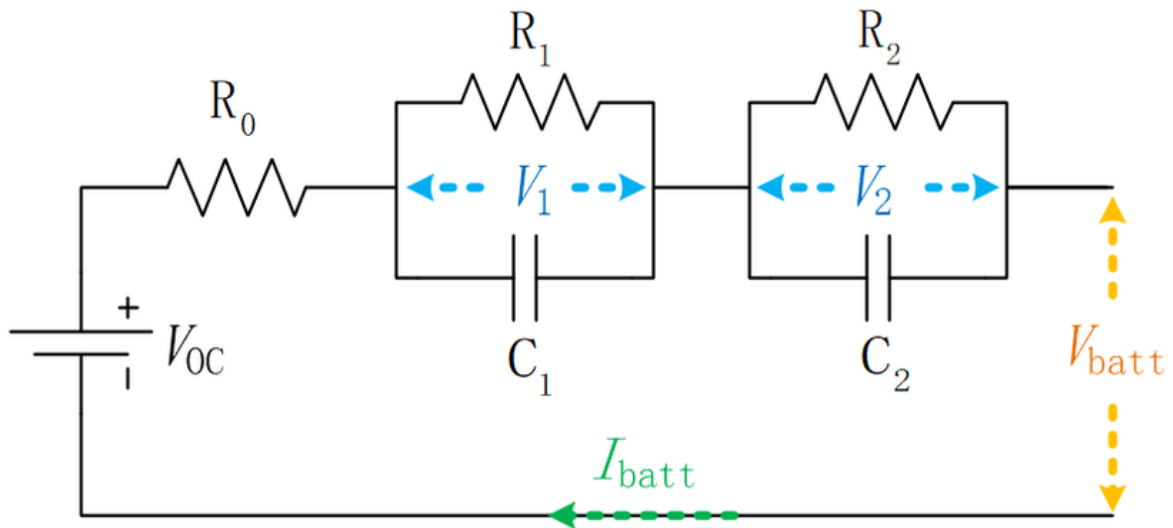
1. Présenter l'**Unscented Kalman Filter (UKF)** comme une méthode avancée pour gérer les non-linéarités et le bruit lors de l'estimation du SOC.
2. Fournir un guide pratique pour la mise en œuvre de l'UKF en utilisant un modèle de batterie basé sur le **modèle électrique équivalent à deux boucles RC (2RC)**.

2. Modèle de Batterie

Présentation du Modèle Mathématique

Pour modéliser le comportement de la batterie, nous utilisons un modèle électrique équivalent à deux branches RC (**2RC model**). Ce modèle est largement utilisé pour capturer les dynamiques transitoires et stationnaires des batteries avec relativement simple à implémenter.

Le modèle **2RC** représente la batterie comme un circuit électrique composé des éléments suivants :



1. **Une source de tension (VOC) :**
 - Représente la tension à circuit ouvert (Open Circuit Voltage), qui dépend du SOC.
 - (VOC) est une fonction non linéaire du SOC.
2. **Une résistance interne (R0) :**
 - Modélise les pertes ohmiques dans la batterie dues au passage du courant.
3. **Deux réseaux RC (R1, C1 et R2, C2) :**
 - Capturent les effets dynamiques de polarisation et de diffusion dans la batterie.
 - Ces réseaux introduisent des transitoires dans la réponse en tension lors de changements rapides de courant.
4. **Courant (I) :**
 - Courant mesuré (positif pour la décharge, négatif pour la charge).

Équations du Modèle

Les équations différentielles du modèle 2RC sont formulées comme suit :

1. **Dynamique des tensions des circuits RC :**

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_1 + \frac{1}{C_1} I$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2 C_2} V_2 + \frac{1}{C_2} I$$

où V1 et V2 représentent les tensions sur les condensateurs C1 et C2.

2. **Tension de la batterie (V) :**

$$V = V_{OC} - R_0 I - V_1 - V_2$$

3. **Dynamique du SOC :** Le SOC est défini par l'intégration du courant au fil du temps :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_{nom}} \int_{t_0}^t I(t) dt$$

où Q_{nom} est la capacité nominale de la batterie (en Ah).

Paramètres Essentiels

Les paramètres à estimer pour l'UKF incluent :

- SOC : L'état de charge, qui est la variable principale à estimer.
- V_1, V_2 : Les tensions transitoires des circuits RC.
- R_0, R_1, R_2, C_1, C_2 : Les paramètres du modèle électrique, qui peuvent varier avec la température et le vieillissement de la batterie.

Relation avec le SOC

- La tension à circuit ouvert (VOC) est utilisée comme une fonction non linéaire du SOC. Une table ou une fonction empirique est généralement utilisée pour exprimer cette relation, obtenue à partir de tests expérimentaux.
- Le SOC est indirectement observé en comparant la tension mesurée (V_{meas}) avec la tension estimée (V_{est}) par le modèle. Cette comparaison permet à l'UKF d'ajuster dynamiquement le SOC et les autres états du système.

En utilisant ce modèle 2RC, l'UKF peut exploiter les équations différentielles pour propager l'état de la batterie dans le temps et ajuster les estimations en fonction des mesures réelles. Cette approche permet de gérer les non-linéarités et le bruit pour obtenir une estimation précise et fiable du SOC.

3. Introduction à l'Unscented Kalman Filter (UKF)

Principe de Base de l'UKF

L'Unscented Kalman Filter (UKF) est une méthode avancée de filtrage statistique conçue pour traiter les systèmes non linéaires de manière plus efficace que l'Extended Kalman Filter (EKF). Alors que l'EKF repose sur la linéarisation des équations du système autour d'un point d'équilibre (en utilisant des dérivées partielles pour créer une approximation linéaire), l'UKF adopte une approche différente basée sur le concept d'approximation probabiliste.

Concept Fondamental

L'UKF utilise une technique appelée **Unscented Transform (UT)**, qui permet d'approximer une distribution de probabilité en générant un ensemble de points représentatifs appelés **sigma-points**. Ces points capturent les informations essentielles sur la distribution statistique de l'état du système et sont propagés à travers les équations non linéaires sans nécessiter de linéarisation explicite.

Avantages pour l'Estimation du SOC

L'UKF est particulièrement adapté à l'estimation de l'état de charge (SOC) des batteries en raison des caractéristiques suivantes :

1. Gestion des Non-Linéarités :

- Le modèle de batterie basé sur le modèle 2RC comporte des relations non linéaires complexes entre la tension, le courant, et le SOC. L'UKF gère ces non-linéarités sans les approximations introduites par les linéarisation de l'EKF.

2. Robustesse au Bruit de Mesure :

- Les capteurs de courant et de tension dans les systèmes de gestion de batterie (BMS) sont souvent bruités. L'UKF utilise des matrices de bruit de processus et de mesure pour filtrer efficacement ces incertitudes.

3. Précision dans les Conditions Dynamiques :

- Lors des cycles de charge et décharge rapides ou des changements de température, l'UKF maintient une précision élevée en capturant les dynamiques transitoires grâce à la propagation des sigma-points.

4. Adaptation aux Paramètres Variables :

- L'UKF est capable de s'adapter aux variations des paramètres du modèle (résistances et capacités) dues au vieillissement ou à d'autres facteurs, offrant une estimation fiable même pour des batteries vieillissantes.

Étapes Clés de l'UKF

1. Génération des Sigma-Points :

- À partir de l'état estimé $\mathbf{x}$ et de la matrice de covariance associée $\mathbf{P}$, l'UKF génère un ensemble de sigma-points (χ_i) qui représentent la distribution gaussienne de l'état. Ces points sont choisis de manière à capturer les statistiques d'ordre 1 et 2 (moyenne et covariance).
- Les sigma-points sont générés selon :

$$\chi_0 = \mathbf{x}, \quad \chi_i = \mathbf{x} \pm \sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}}$$

- Les pondérations sont générés selon :

$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n + \lambda}$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{n + \lambda} (1 - \alpha^2 + \beta)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(n + \lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2n$$

$$\sum_{i=0}^{2n} W_i = 1$$

Où :

— n est la dimension de l'état,

— α, β, λ sont des paramètres de réglage (souvent choisis en fonction de la dimension de l'état et d'autres critères d'optimisation).

2. Propagation des Sigma-Points à Travers le Modèle :

- Chaque sigma-point est propagé indépendamment à travers les équations non linéaires du modèle dynamique et du modèle d'observation :

$$\chi_i^{(t+1)} = f(\chi_i^{(t)})$$

où f est la fonction représentant la dynamique du système.

3. Calcul des Moyennes et Covariances :

- Après propagation, une nouvelle estimation de l'état et de la covariance est calculée en pondérant les sigma-points :

$$\hat{\mathbf{x}} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(m)} \chi_i$$

$$\mathbf{P} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\chi_i - \hat{\mathbf{x}})(\chi_i - \hat{\mathbf{x}})^T$$

où $w_i^{(m)}$ et $w_i^{(c)}$ sont les poids associés à chaque sigma-point.

4. Mise à Jour avec les Mesures :

- Les sigma-points sont également propagés à travers le modèle d'observation pour générer une prédiction des mesures.
- Une étape de fusion des informations (prédiction et observation) est réalisée pour mettre à jour l'état et la covariance.

4. Mise en Œuvre Pratique

L'estimation du SOC avec l'Unscented Kalman Filter (UKF) repose sur la définition du **vecteur d'état** et des **fonctions dynamiques** qui décrivent le comportement de la batterie. Voici les détails nécessaires pour compléter cette mise en œuvre.

Définition du Vecteur d'État

Le vecteur d'état $\mathbf{x}$ regroupe toutes les variables nécessaires à la modélisation de la dynamique de la batterie. Pour un modèle 2RC, il est défini comme suit :

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} SOC \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

- SOC : État de charge de la batterie (grandeur principale à estimer).
- V1 : Tension transitoire associée au premier circuit RC.
- V2 : Tension transitoire associée au second circuit RC.

Fonction de Transition d'État (f)

La fonction $f(\mathbf{x}, I)$ décrit la dynamique du système et permet de prédire l'évolution des états dans le temps. Pour le modèle 2RC :

$$f(\mathbf{x}, I) = \begin{bmatrix} SOC(t+1) \\ V_1(t+1) \\ V_2(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC(t) - \frac{\Delta t}{Q_{nom}} I(t) \\ V_1(t) - \frac{\Delta t}{R_1 C_1} V_1(t) + \frac{\Delta t}{C_1} I(t) \\ V_2(t) - \frac{\Delta t}{R_2 C_2} V_2(t) + \frac{\Delta t}{C_2} I(t) \end{bmatrix}$$

- Q_{nom} : Capacité nominale de la batterie (en Ah).
- R_1, C_1, R_2, C_2 : Paramètres du modèle électrique équivalent.
- Δt : Intervalle de temps entre deux mesures successives.

Fonction d'Observation (h)

La fonction $h(\mathbf{x})$ relie le vecteur d'état aux mesures disponibles, telles que la tension de la batterie :

$$h(\mathbf{x}) = V_{OC}(SOC) - R_0 I - V_1 - V_2$$

- $V_{OC}(SOC)$: Tension à circuit ouvert, qui est une fonction non linéaire du SOC. Cette relation est généralement obtenue par des tests expérimentaux et stockée sous forme d'une table ou d'une équation empirique.
- R_0 : Résistance interne de la batterie.

Mise en Œuvre Complète de l'UKF

1. Initialisation

- **Vecteur d'état initial :**

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} SOC_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- SOC_0 est une estimation initiale du SOC (par exemple, 80%).
- V_1 et V_2 sont initialisés à zéro (pas de tension transitoire au départ).

- **Covariance initiale (P_0) :**

- La matrice P_0 représente l'incertitude initiale de l'état. Une estimation élevée ($P_0 > 0$) reflète une grande incertitude.

- **Matrice de bruit de processus (Q) :**

- Modélise l'incertitude associée aux dynamiques du système (modèle de batterie). Les valeurs doivent être ajustées pour refléter les imprécisions du modèle.

- **Matrice de bruit de mesure (R) :**

- Représente le bruit des capteurs de tension et de courant. Ces valeurs sont généralement obtenues à partir des spécifications du fabricant des capteurs.

2. Propagation des Sigma-Points

1. **Génération des Sigma-Points :**

À partir du vecteur d'état x et de la covariance P , générez les sigma-points χ_i .

2. **Propagation des Sigma-Points à travers $f(\cdot)$:**

Chaque sigma-point est mis à jour selon la fonction $f(\cdot)$, qui inclut les dynamiques du modèle 2RC.

3. Mise à Jour des Observations

1. **Calcul des Sigma-Points des Observations :**

Propagez les sigma-points à travers $h(\cdot)$ pour obtenir les prédictions des mesures (V_{pred}).

2. **Erreur d'Innovation :**

Comparez la mesure réelle de tension (V_{meas}) avec la prédiction :

$$y = V_{meas} - V_{pred}$$

4. Mise à Jour des États

- **Calcul du Gain de Kalman (K) :**

$$K = P_{xz} P_z^{-1}$$

où :

- P_{xz} est la covariance croisée entre les états et les mesures.
- P_z est la covariance des mesures.

- **Mise à jour du Vecteur d'État :**

$$x_{t+1} = x_{pred} + Ky$$

- **Mise à jour de la Covariance :**

$$\mathbf{P}_{t+1} = \mathbf{P}_{pred} - \mathbf{K} \mathbf{P}_z \mathbf{K}^T$$

5. Exemple d'Application

Simulation : Estimation du SOC d'une batterie Li-ion avec l'UKF

Contexte de la simulation : Dans cette simulation, nous utilisons l'Unscented Kalman Filter (UKF) pour estimer l'état de charge (SOC) d'une batterie lithium-ion. Le SOC est comparé à une méthode traditionnelle de comptage de Coulomb (Coulomb Counting), qui sert de base pour évaluer les performances de l'UKF.

Données et paramètres du modèle :

1. Modèle de Batterie : Modèle équivalent à deux boucles RC (2RC).

- Paramètres électriques :

R0 = 0.023
 R1 = 0.05985
 C1 = 7345.99
 R2 = 0.0068
 C2 = 1073.25

- Capacité nominale (Qnom) : 5 Ah .

2. Conditions Initiales :

- SOC initial : SOC0=90% (valeur de départ estimée).
- l'incertitude initiale de l'état (P0) : $1 \cdot 10^{-6}$
- Bruit de processus (Q) : $1 \cdot 10^{-9}$ (ajusté pour le modèle dynamique).
- Bruit de mesure (R) : 0.1 (selon la précision du capteur de tension).

3. Entrées :

- Courant (I) : Charge/décharge dynamique simulée sur 6000 étapes de temps.
- Tension mesurée (Vmeas) : tension mesurée aux bornes de la batterie

Méthodes Comparées :

1. UKF Estimation :

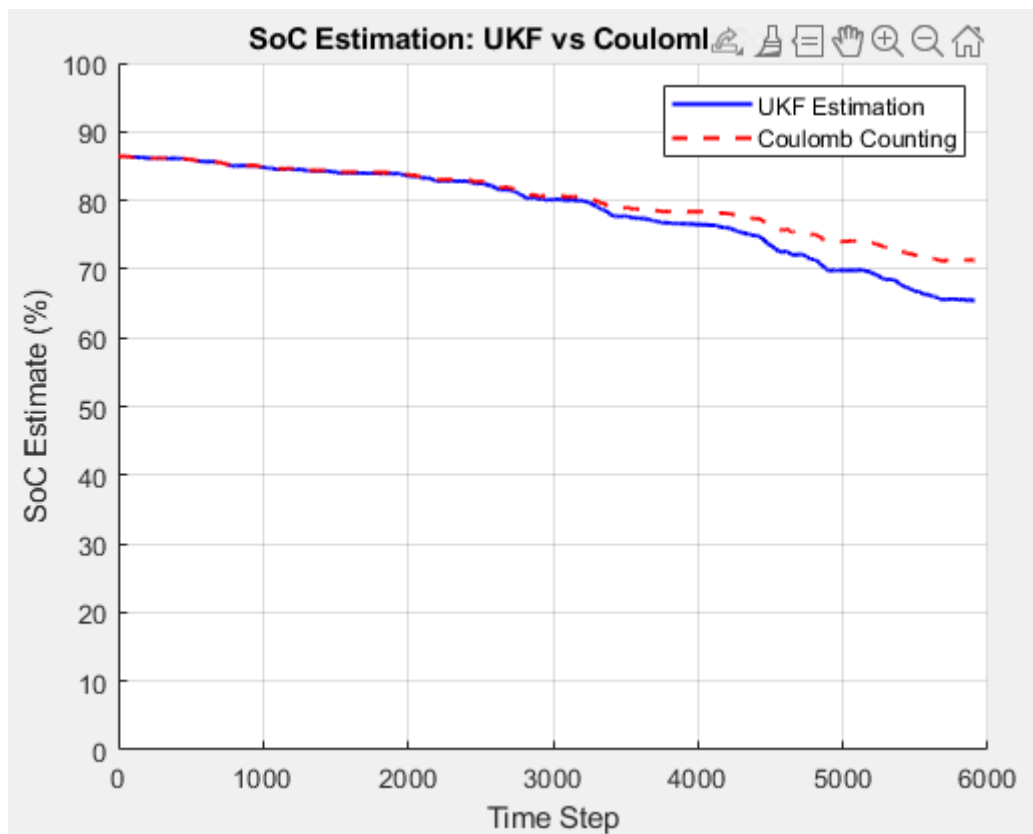
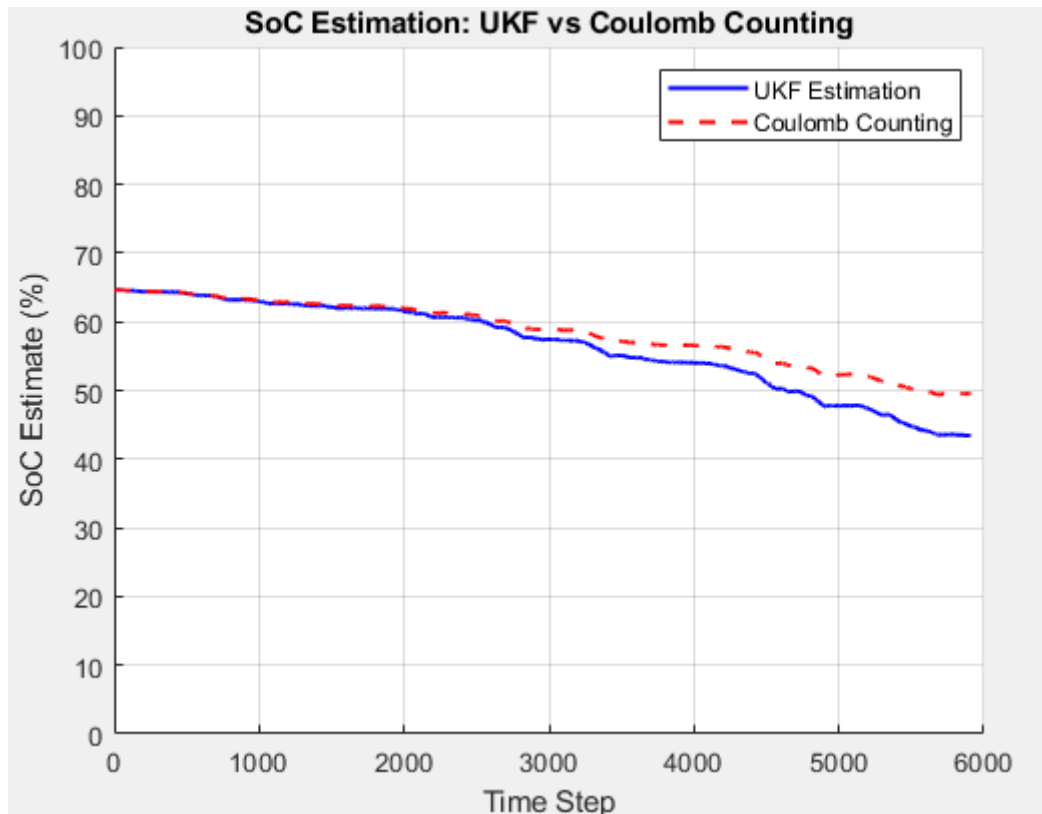
- Utilise les dynamiques du modèle 2RC et les mesures de tension pour estimer le SOC.
- Ajuste les états en temps réel à partir des erreurs entre la tension prédite et la tension mesurée.

2. Coulomb Counting :

- Intègre le courant au fil du temps, sans correction dynamique.
- Fortement sensible aux erreurs initiales et au bruit dans les mesures de courant.

Résultats :

Graphique : SOC Estimation (UKF vs Coulomb Counting)



Profil	SOC initial	Coulomb	UKF	Recalage
1	64.66%	49.53%	43.43%	43.67%
2	86.43%	71.30%	65.43%	64.66%

Analyse des résultats :

• **Profil 1 :**

- L'UKF donne une estimation presque identique à la vérité terrain avec une erreur d'environ **-0.24%**, ce qui est négligeable.
- En revanche, la méthode de Coulomb Counting affiche une erreur significative de **+5.86%**, résultant d'une dérive accumulée.

• **Profil 2 :**

- L'UKF reste proche de la vérité terrain avec une erreur de seulement **+0.77%**.
- La méthode de Coulomb Counting, quant à elle, montre une erreur importante de **+6.64%**, ce qui confirme sa tendance à dériver au fil du temps.

• Dans les deux profils, l'UKF se rapproche fortement des valeurs de recalage (vérité terrain) :

- Profil 1 : 43.42% (UKF) contre 43.67% (référence).
- Profil 2 : 65.43% (UKF) contre 64.66% (référence).

• En revanche, la méthode de Coulomb Counting présente des écarts importants, prouvant qu'elle n'est pas fiable pour des estimations précises sur le long terme.

6. Conclusion

- **L'UKF** surpasse largement la méthode de Coulomb Counting en termes de précision, robustesse et capacité à gérer les non-linéarités des systèmes de batterie.
- La méthode de Coulomb Counting, bien que simple à implémenter, n'est pas adaptée pour des estimations précises et fiables du SOC, en particulier dans des environnements complexes ou bruités.
- **Recommandation** : Utiliser l'UKF pour des applications nécessitant une gestion précise des batteries, comme dans les véhicules électriques ou les systèmes de stockage d'énergie.