

Prédiction de durée de vie restante de batteries lithium-ion : une approche frugale à base de données

Antoine Gaignard*,
Franck Cazaurang*, Christophe Farges*

*Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400, Talence, France

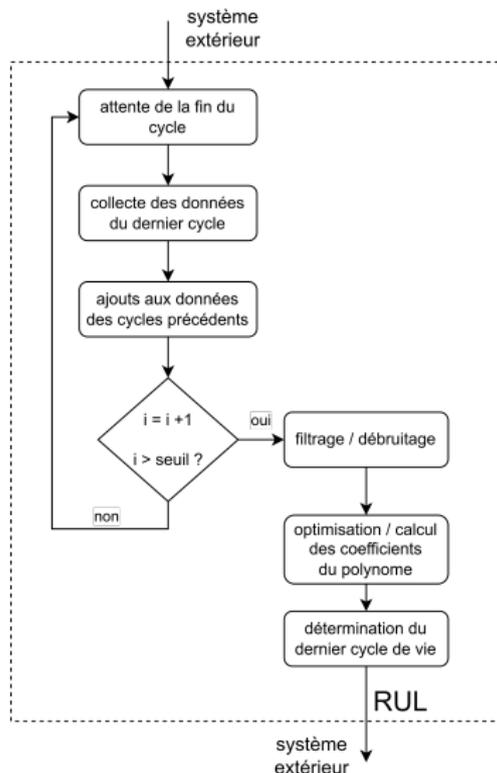
3ème Congrès Annuel de la SAGIP



université
de **BORDEAUX**



- **Maintenance prédictive:** estimation fin de vie composants. Support d'application: **batteries lithium-ion**
- **Objectif:** optimiser interventions humaines et usage des pièces. Batteries: **remplacement batteries usées.**
- **Élément clé:** calcul durée de vie restante (RUL).
- Méthode: sans modèle. **Approche polynomiale**, optimisation coefficients polynôme sur données de CALCE.
- Optimisation : **moindres carrés linéaires sous contraintes linéaires.**



- Éléments de contexte

- Éléments de contexte
- I - Présentation des données utilisées

- Éléments de contexte
- I - Présentation des données utilisées
- II - Évolution de la capacité au cours du temps

- Éléments de contexte
- I - Présentation des données utilisées
- II - Évolution de la capacité au cours du temps
- III - Calcul et représentation du RUL

- Éléments de contexte
- I - Présentation des données utilisées
- II - Évolution de la capacité au cours du temps
- III - Calcul et représentation du RUL
- Conclusion

- Éléments de contexte
- I - Présentation des données utilisées
- II - Évolution de la capacité au cours du temps
- III - Calcul et représentation du RUL
- Conclusion
- Questions-réponses

- **Maintenance curative:** réaction à **imprévu ou panne**. Peut entraîner interruptions en cascade, utilisation pièces au maximum.

- **Maintenance curative:** réaction à **imprévu ou panne**. Peut entraîner interruptions en cascade, utilisation pièces au maximum.
- **Maintenance préventive périodique:** à **intervalles réguliers**, implique considération de **durée de vie moyenne**, utilisation partielle pièces.

- **Maintenance curative:** réaction à **imprévu ou panne**. Peut entraîner interruptions en cascade, utilisation pièces au maximum.
- **Maintenance préventive périodique:** à **intervalles réguliers**, implique considération de **durée de vie moyenne**, utilisation partielle pièces.
- **Maintenance conditionnelle:** surveillance état des pièces par capteur. Changement pièce quand dépassement **seuil**

- **Maintenance curative:** réaction à **imprévu ou panne**. Peut entraîner interruptions en cascade, utilisation pièces au maximum.
- **Maintenance préventive périodique:** à **intervalles réguliers**, implique considération de **durée de vie moyenne**, utilisation partielle pièces.
- **Maintenance conditionnelle:** surveillance état des pièces par capteur. Changement pièce quand dépassement **seuil**
- **Maintenance prédictive:** **estimation** de l'état futur, planification maintenance à l'avance, **besoin calcul réguliers**.

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.
- Méthodes simples (espérance de vie moyenne, écart-type) et approches complexes (réseaux de neurones).

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.
- Méthodes simples (espérance de vie moyenne, écart-type) et approches complexes (réseaux de neurones).
- **Avantage :**

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.
- Méthodes simples (espérance de vie moyenne, écart-type) et approches complexes (réseaux de neurones).
- **Avantage :**
 - Ne nécessitent pas la connaissance des équations physiques du système.

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.
- Méthodes simples (espérance de vie moyenne, écart-type) et approches complexes (réseaux de neurones).
- **Avantage :**
 - Ne nécessitent pas la connaissance des équations physiques du système.
- **Inconvénients :**

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.
- Méthodes simples (espérance de vie moyenne, écart-type) et approches complexes (réseaux de neurones).
- **Avantage :**
 - Ne nécessitent pas la connaissance des équations physiques du système.
- **Inconvénients :**
 - Dépendantes des données disponibles : peu de données ou de mauvaise qualité = résultats peu fiables.

- Techniques statistiques et "modèles boîtes noires" → estimer RUL à partir **données historiques**.
- Méthodes simples (espérance de vie moyenne, écart-type) et approches complexes (réseaux de neurones).
- **Avantage :**
 - Ne nécessitent pas la connaissance des équations physiques du système.
- **Inconvénients :**
 - Dépendantes des données disponibles : peu de données ou de mauvaise qualité = résultats peu fiables.
 - Temps d'entraînement long (heures/jours selon réseaux).

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

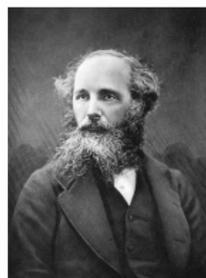


Figure: James Clerk Maxwell

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.
- **Avantages :**

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

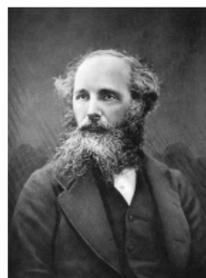


Figure: James Clerk Maxwell

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.
- **Avantages :**
 - Nécessitent peu de données pour identification paramètres.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

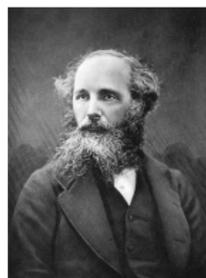


Figure: James Clerk Maxwell

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.
- **Avantages :**
 - Nécessitent peu de données pour identification paramètres.
 - Résultats plus facilement interprétables grâce fondement physique.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

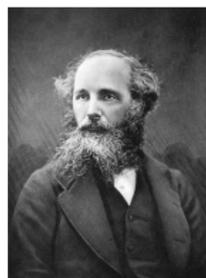


Figure: James Clerk Maxwell

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.
- **Avantages :**
 - Nécessitent peu de données pour identification paramètres.
 - Résultats plus facilement interprétables grâce fondement physique.
 - Peuvent être utilisées dans conditions expérimentales variées.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

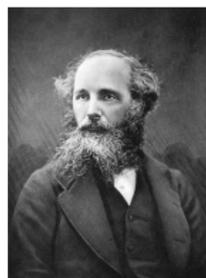


Figure: James Clerk Maxwell

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.
- **Avantages :**
 - Nécessitent peu de données pour identification paramètres.
 - Résultats plus facilement interprétables grâce fondement physique.
 - Peuvent être utilisées dans conditions expérimentales variées.
- **Inconvénient :**

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

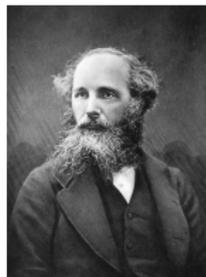


Figure: James Clerk Maxwell

- Equations physiques, chimiques, etc, pour **modéliser comportement**.
- **Avantages :**
 - Nécessitent peu de données pour identification paramètres.
 - Résultats plus facilement interprétables grâce fondement physique.
 - Peuvent être utilisées dans conditions expérimentales variées.
- **Inconvénient :**
 - Nécessitent connaissance approfondie des phénomènes physiques.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

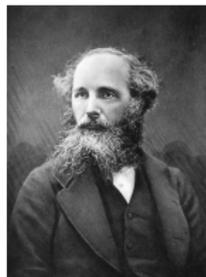


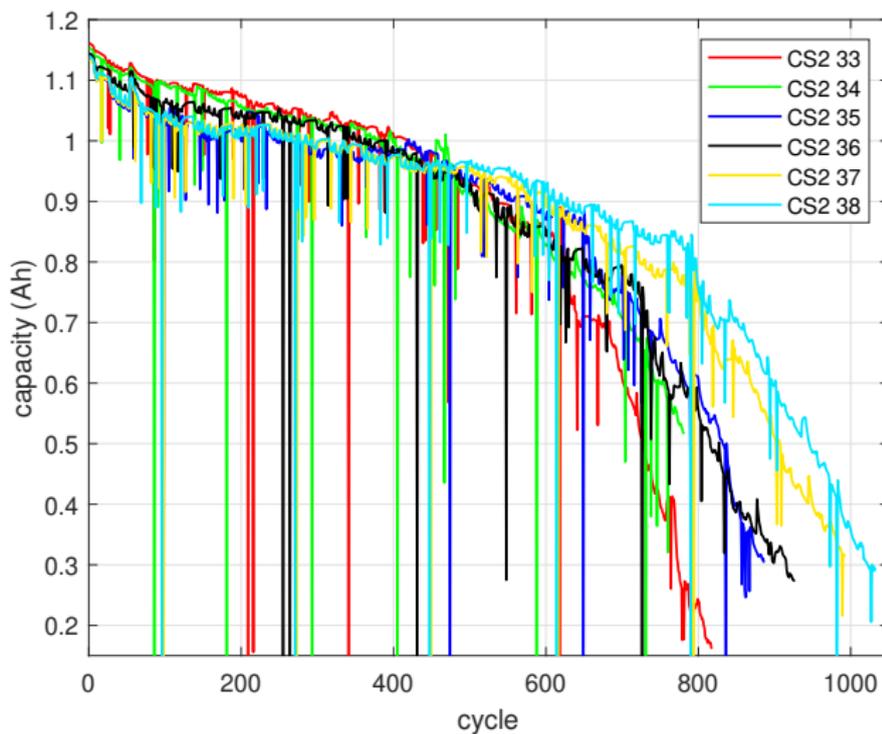
Figure: James Clerk Maxwell

I - Présentation des données

- Données expérimentales proviennent de **CALCE** (Université du Maryland).
- Tests de cyclage sur batteries CS2-33, CS2-34, CS2-35, CS2-36, CS2-37 et CS2-38. **Conditions de cyclage identiques** (hors courant)
- Caractéristiques des batteries :
 - Capacité nominale : 1.1 A h
 - Batteries 33 et 34 : courant constant de 0.55 A (0,5 C)
 - Batteries 35 à 38 : courant constant de 1.1 A (1 C)
- **Paramètre utile** pour calcul du RUL: **capacité**, calculée par intégration du courant pendant charge ou décharge (**Coulomb counting**).
- Cycles décharges et charges complet (0 à 100 % de State of Charge (SOC))



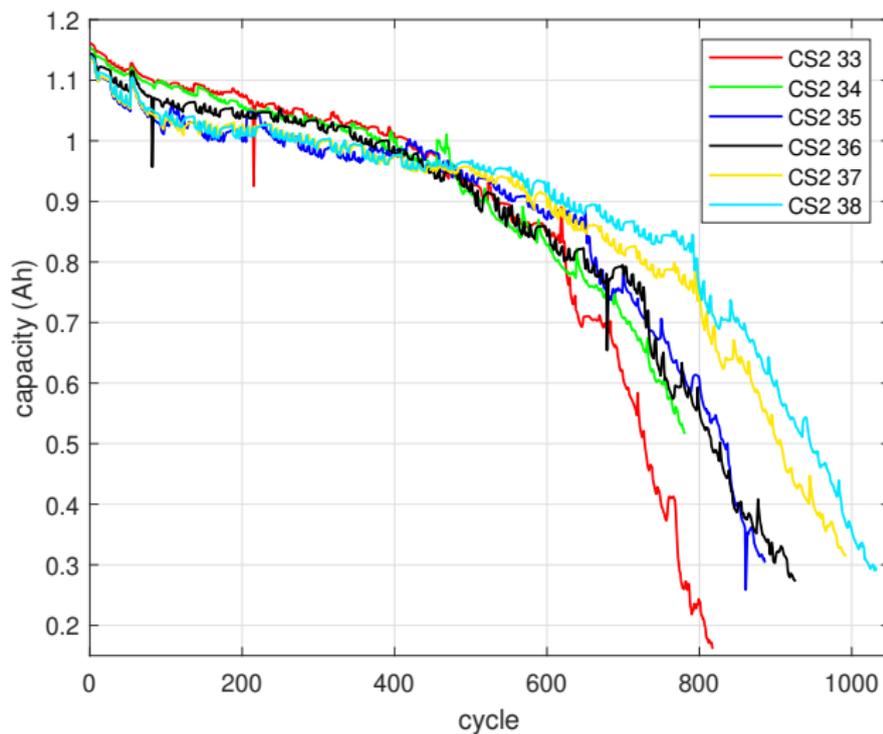
I - Tracé de la capacité non filtrée au cours des cycles



I - Explication du préfiltrage

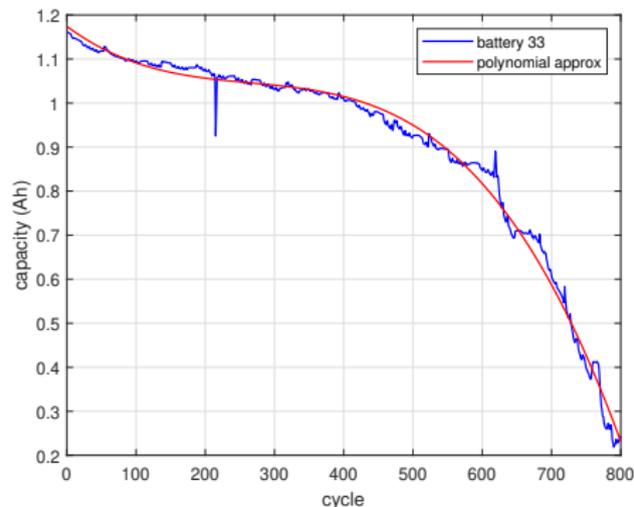
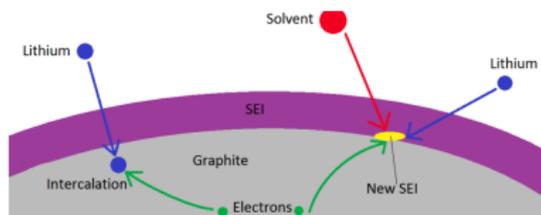
- Données brutes contiennent valeurs aberrantes, fluctuations brutales capacité.
- Pré-filtrage des données :
 - Si capacité **chute de plus de 0.1 A** en un cycle ($\approx 10\%$ capacité initiale) alors **valeur fausse**.
 - **Constatation:** pas deux points erronés consécutifs.
 - Points supprimés remplacés par **capacité moyenne entre cycles précédents et suivants**.
 - Seuil 0.1 A heuristique, élimine faux points sans affecter données valides.
 - Remplacement des points aberrants par moyennes suppose **chute de capacité localement linéaire**.

II - Tracé de la capacité filtrée au cours des cycles



II - Approximation de l'évolution de la capacité

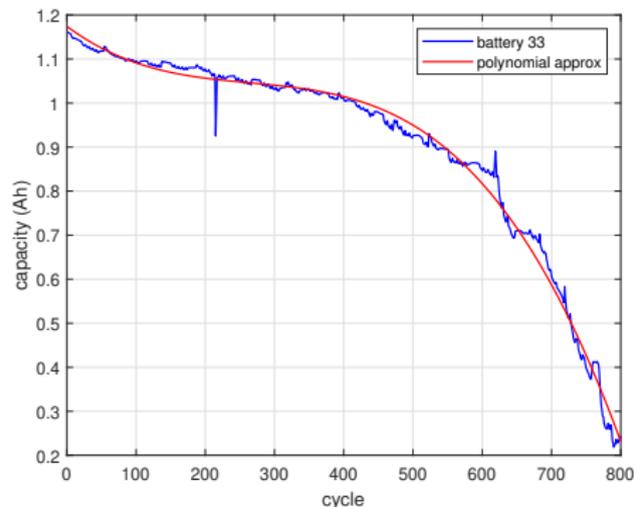
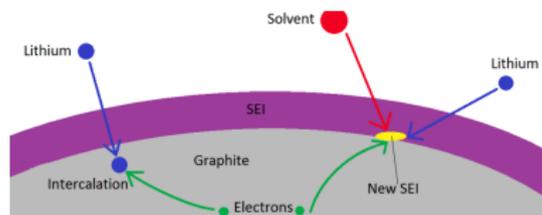
- chute brutale capacité au début due formation couche initiale SEI.



$$C_{\text{poly}}(N) = \frac{a}{3} \cdot N^3 + \frac{b}{2} \cdot N^2 + c \cdot N + d \quad (1)$$

II - Approximation de l'évolution de la capacité

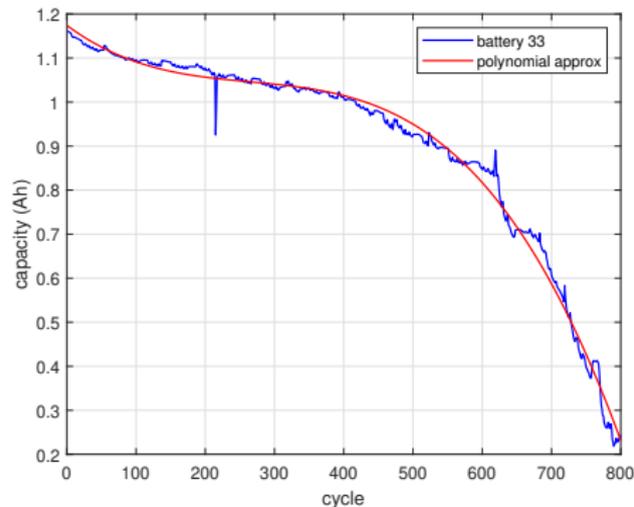
- **chute brutale capacité au début** due formation **couche initiale SEI**.
- **baisse modérée** milieu, croissance lente couche SEI et autres phénomènes.



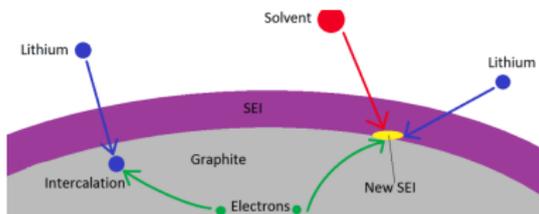
$$C_{\text{poly}}(N) = \frac{a}{3} \cdot N^3 + \frac{b}{2} \cdot N^2 + c \cdot N + d \quad (1)$$

II - Approximation de l'évolution de la capacité

- **chute brutale capacité au début** due formation **couche initiale SEI**.
- **baisse modérée** milieu, croissance lente couche SEI et autres phénomènes.
- **fin de vie, lithium plating** décroissance rapide capacité.

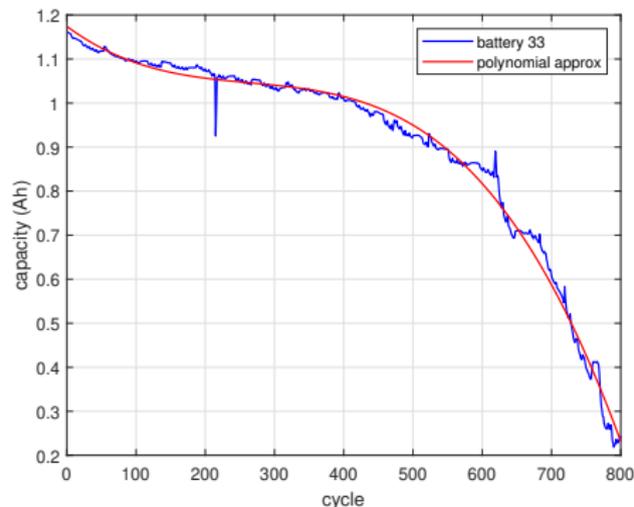


$$C_{\text{poly}}(N) = \frac{a}{3} \cdot N^3 + \frac{b}{2} \cdot N^2 + c \cdot N + d \quad (1)$$

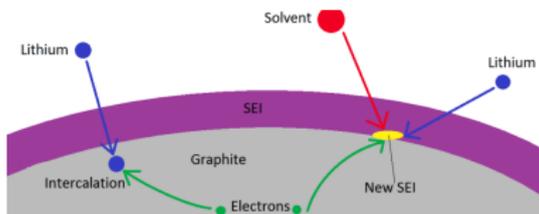


II - Approximation de l'évolution de la capacité

- **chute brutale capacité au début** due formation **couche initiale SEI**.
- **baisse modérée** milieu, croissance lente couche SEI et autres phénomènes.
- **fin de vie, lithium plating** décroissance rapide capacité.
- Comportements modélisés par **polynôme de degré trois**.



$$C_{\text{poly}}(N) = \frac{a}{3} \cdot N^3 + \frac{b}{2} \cdot N^2 + c \cdot N + d \quad (1)$$



II - Détermination des coefficients du polynôme

$$\min_{\theta} \frac{1}{2} \|M \cdot \theta - C_{\text{mes}}\|_2^2 \quad (2)$$

tel que:

II - Détermination des coefficients du polynôme

$$\min_{\theta} \frac{1}{2} \|M \cdot \theta - C_{\text{mes}}\|_2^2 \quad (2)$$

tel que:

$$\begin{bmatrix} -2N_1^{\min} & -1 & 0 & 0 \\ 2N_1^{\max} & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} N_1^2 & N_1 & 1 & 0 \\ N_2^2 & N_2 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{\text{total}}^2 & N_{\text{total}} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ici, $N_1^{\min} = 150$ et $N_1^{\max} = 600$

II - Détermination des coefficients du polynôme

$$\min_{\theta} \frac{1}{2} \|M \cdot \theta - C_{\text{mes}}\|_2^2 \quad (2)$$

tel que:

$$\begin{bmatrix} -2N_1^{\min} & -1 & 0 & 0 \\ 2N_1^{\max} & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} N_1^2 & N_1 & 1 & 0 \\ N_2^2 & N_2 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{\text{total}}^2 & N_{\text{total}} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \theta \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ici, $N_1^{\min} = 150$ et $N_1^{\max} = 600$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{N^3}{3} & \frac{N^2}{2} & N & 1 \end{bmatrix}, \quad C_{\text{mes}} = \begin{bmatrix} C_{\text{mes}}(0) \\ \vdots \\ C_{\text{mes}}(N) \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (4)$$

A temps continu, fin de vie (N_f) solution de:

$$\frac{a}{3} \cdot N^3 + \frac{b}{2} \cdot N^2 + c \cdot N + d = 0.7 \cdot C_{\text{mes}}(0) \quad (5)$$

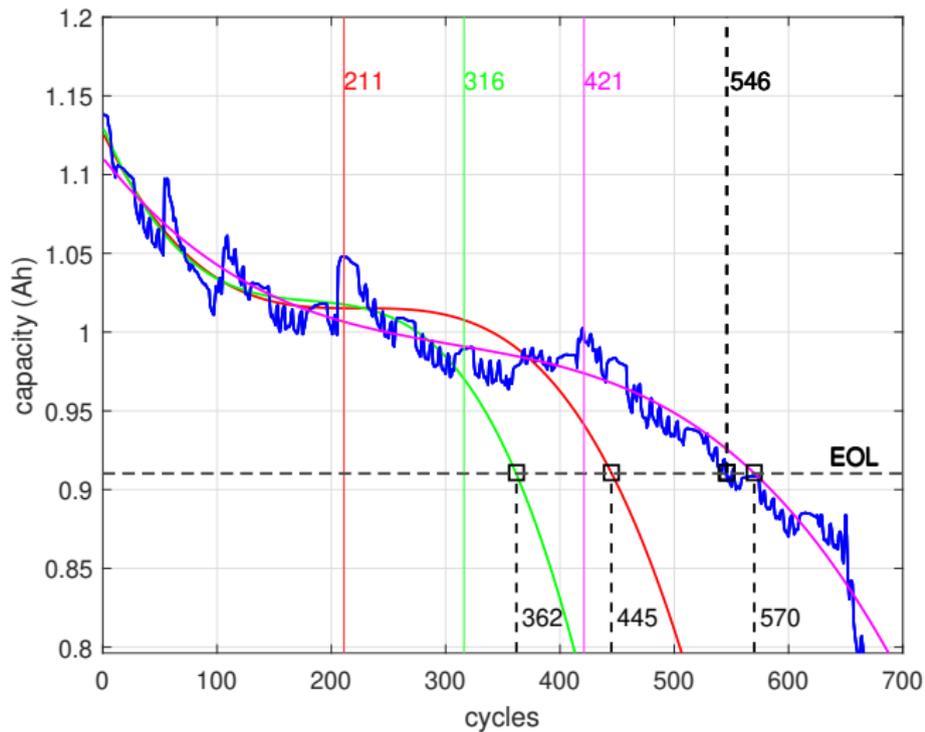
Cycle n'a de sens que si $N \in \mathbb{N} \rightarrow$ cycle fin vie (N_{final}) plus petit entier tel que:

$$\frac{a}{3} \cdot N_{\text{final}}^3 + \frac{b}{2} \cdot N_{\text{final}}^2 + c \cdot N_{\text{final}} + d \leq 0.7 \cdot C_{\text{mes}}(0) \quad (6)$$

Durée de vie restant est différence entre cycle actuel et cycle fin de vie:

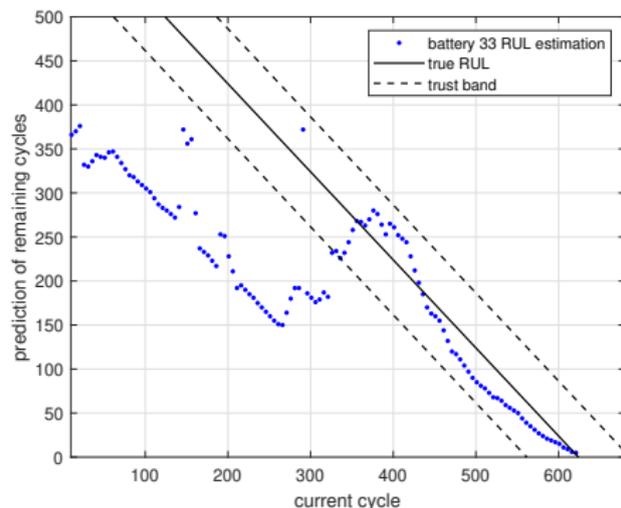
$$RUL(N) = N_{\text{final}} - N. \quad (7)$$

III - Visualisation graphique du calcul de RUL



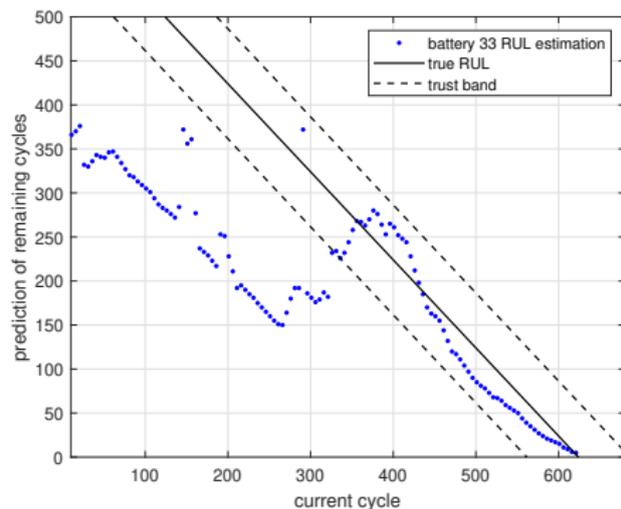
III - interprétation graphique du RUL

- $N_{\text{tube}10}$: courbe RUL entre dans bande de $\pm 10\%$ autour RUL réel.



III - interprétation graphique du RUL

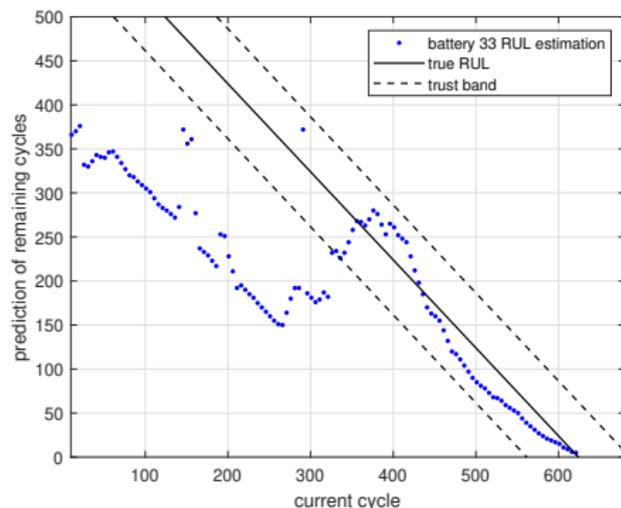
- $N_{\text{tube}10}$: courbe RUL entre dans bande de $\pm 10\%$ autour RUL réel.
- $N_{0.7}$: fin de vie réelle.



III - interprétation graphique du RUL

- $N_{\text{tube}10}$: courbe RUL entre dans bande de $\pm 10\%$ autour RUL réel.
- $N_{0.7}$: fin de vie réelle.
- L'horizon de prédiction défini par :

$$P_H = N_{0.7} - N_{\text{tube}10}$$

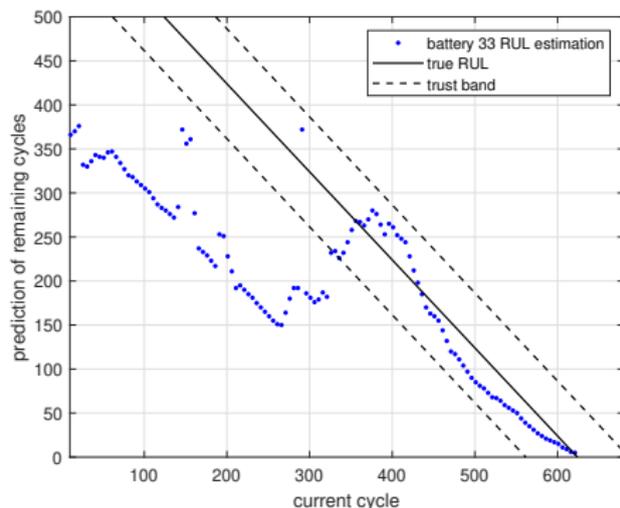


III - interprétation graphique du RUL

- $N_{\text{tube}10}$: courbe RUL entre dans bande de $\pm 10\%$ autour RUL réel.
- $N_{0.7}$: fin de vie réelle.
- L'horizon de prédiction défini par :

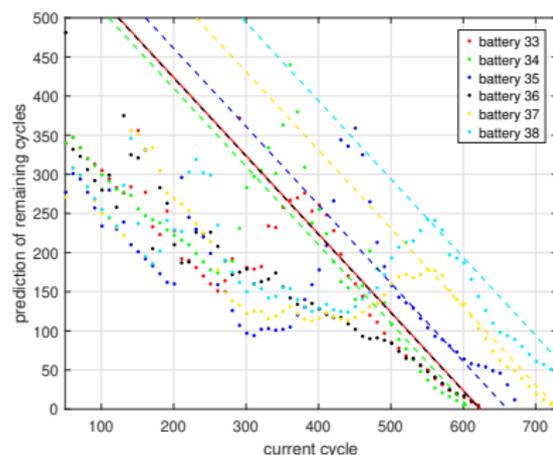
$$P_H = N_{0.7} - N_{\text{tube}10}$$

- P_H élevé = plus de temps pour organiser la maintenance.



III - Résultats

| | $N_{0.7}$ | $N_{\text{tube}10}$ | P_H abs | P_H rel (%) |
|--------|-----------|---------------------|-----------|---------------|
| bat 33 | 624 | 331 | 293 | 46.9 |
| bat 34 | 610 | 386 | 224 | 36.7 |
| bat 35 | 661 | 478 | 183 | 27.7 |
| bat 36 | 623 | 476 | 147 | 23.6 |
| bat 37 | 731 | 501 | 230 | 31.5 |
| bat 38 | 794 | 511 | 283 | 35.6 |
| mean | 673 | 447 | 227 | 33.6 |



| | MLP | RNN | LSTM | GRU | Dual-LSTM | polynomial |
|----------------|------|------|------|------|-----------|------------|
| total time (s) | 1400 | 3500 | 8680 | 6860 | 8960 | 193 |

Table: temps de calcul RUL

- **Approximation simple** capacité batterie proposée → **polynôme de degré trois**.

Conclusion

- **Approximation simple** capacité batterie proposée → **polynôme de degré trois**.
- Permet utilisation **algorithme et contraintes linéaires** dans processus d'optimisation → **optimum global**

- **Approximation simple** capacité batterie proposée → **polynôme de degré trois**.
- Permet utilisation **algorithme et contraintes linéaires** dans processus d'optimisation → **optimum global**
- **Prédictions fiables dès moitié de vie** batterie, → planification maintenance aisée.

- **Approximation simple** capacité batterie proposée → **polynôme de degré trois**.
- Permet utilisation **algorithme et contraintes linéaires** dans processus d'optimisation → **optimum global**
- **Prédictions fiables dès moitié de vie** batterie, → planification maintenance aisée.
- En moyenne, prédiction entre bande **10 % autour vrai RUL** avec plus de **30 % de durée de vie restante**.

- **Approximation simple** capacité batterie proposée → **polynôme de degré trois**.
- Permet utilisation **algorithme et contraintes linéaires** dans processus d'optimisation → **optimum global**
- **Prédictions fiables dès moitié de vie** batterie, → planification maintenance aisée.
- En moyenne, prédiction entre bande **10 % autour vrai RUL** avec plus de **30 % de durée de vie restante**.
- Nécessite **ni beaucoup de données ni temps d'entraînement importants**, contrairement aux approches réseaux de neurones.

- **Approximation simple** capacité batterie proposée → **polynôme de degré trois**.
- Permet utilisation **algorithme et contraintes linéaires** dans processus d'optimisation → **optimum global**
- **Prédictions fiables dès moitié de vie** batterie, → planification maintenance aisée.
- En moyenne, prédiction entre bande **10 % autour vrai RUL** avec plus de **30 % de durée de vie restante**.
- Nécessite **ni beaucoup de données ni temps d'entraînement importants**, contrairement aux approches réseaux de neurones.
- Résultats serviront comme **référence de comparaison**, en particulier pour approches basées modèles physiques.