

**Encadrants :**

Raphael CAIRE, MCF, Université Grenoble Alpes, Directeur de thèse  
David FREY, MCF, Université Grenoble Alpes, co-encadrant

**Rapporteurs :**

Christian CRISTOFARI, PR, Université de Corse Pascal Paoli  
Hamid BENAHMED, PR, ENS Rennes

**Examineurs:**

Seddik BACHA, PR, Université Grenoble Alpes  
Dhaker ABBES, PR, Université de Lille

**Invité :**

Jean-Marc GUENEE, DG WATTMEN

15 Octobre 2024

Dimensionnement et pilotage optimal de  
batteries connectées au réseau moyenne  
tension pour l'autoconsommation industrielle  
et la réserve de fréquence primaire.

*Laurine Ferrando*

I. Introduction et Contexte

I

II. Energy Management System(EMS)

III. Power Management System(PMS)

IV. Conclusions

# I.1 Contexte de la thèse



Objectif de neutralité carbone fixé par l'Europe pour 2050.



Comment atteindre cet objectif ?

*Imaginer les évolutions possibles de la société et des modes de vies.*

*Institution*



*Entreprise*



*Association*



# I.1 Contexte de la thèse



Objectif de neutralité carbone fixé par l'Europe pour 2050.



Comment atteindre cet objectif ?

→ Ces **scenarios prospectifs** sont basés sur des réflexions autour de choix sociétaux :

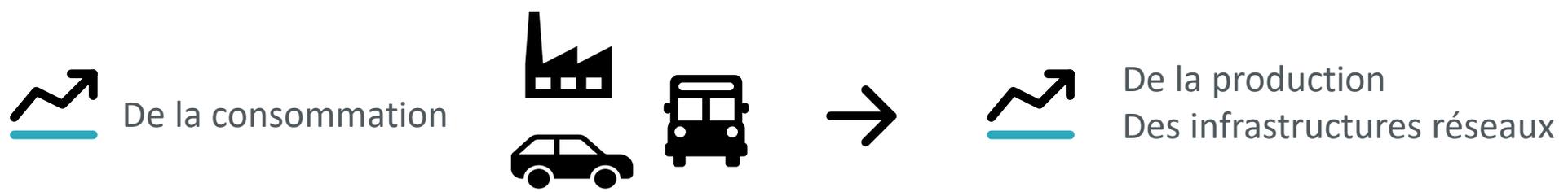
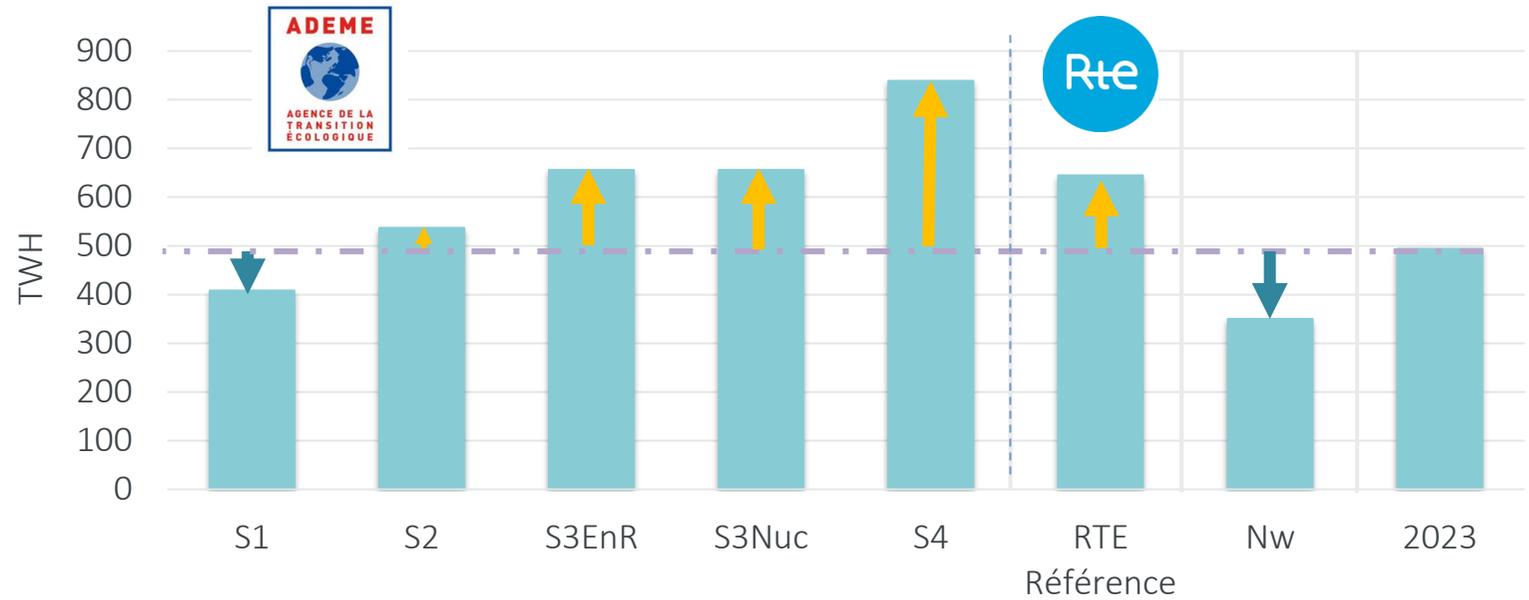


# I.1 Contexte de la thèse



## Quel est l'impact de ces scénarios sur le système électrique ?

### Les scénarios de consommation d'électricité :

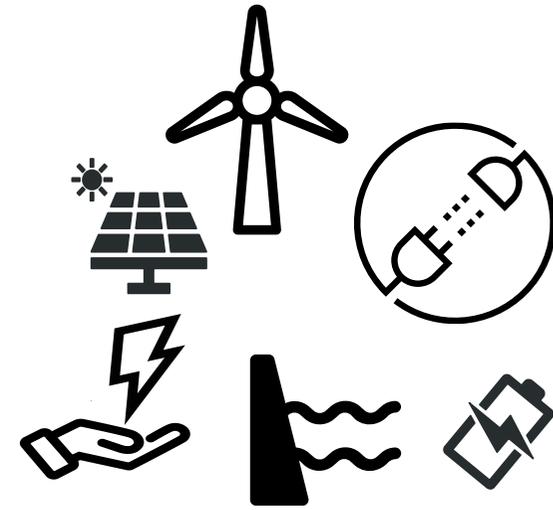




# I.1 Contexte de la thèse

## Des recommandations communes aux différents scenarios

- Développer la flexibilité de la consommation ou accentuer la sobriété
- Renforcer les réseaux nationaux et les interconnexions entre les pays
- Développer les énergies renouvelables
- Développer le stockage d'énergie



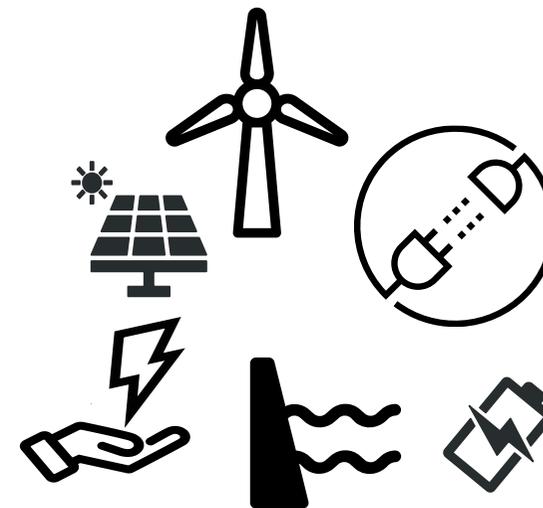
## Les hypothèses concernant la puissance installée de centrales photovoltaïques



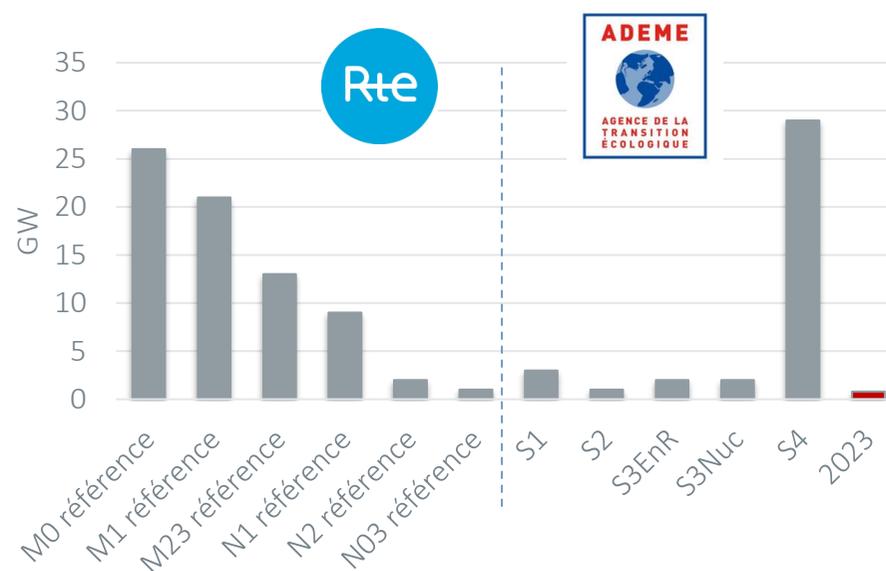
# I.1 Contexte de la thèse

## Des recommandations communes aux différents scenarios

- Développer la flexibilité de la consommation ou accentuer la sobriété
- Renforcer les réseaux nationaux et les interconnexions entre les pays
- Développer les énergies renouvelables
- Développer le stockage d'énergie

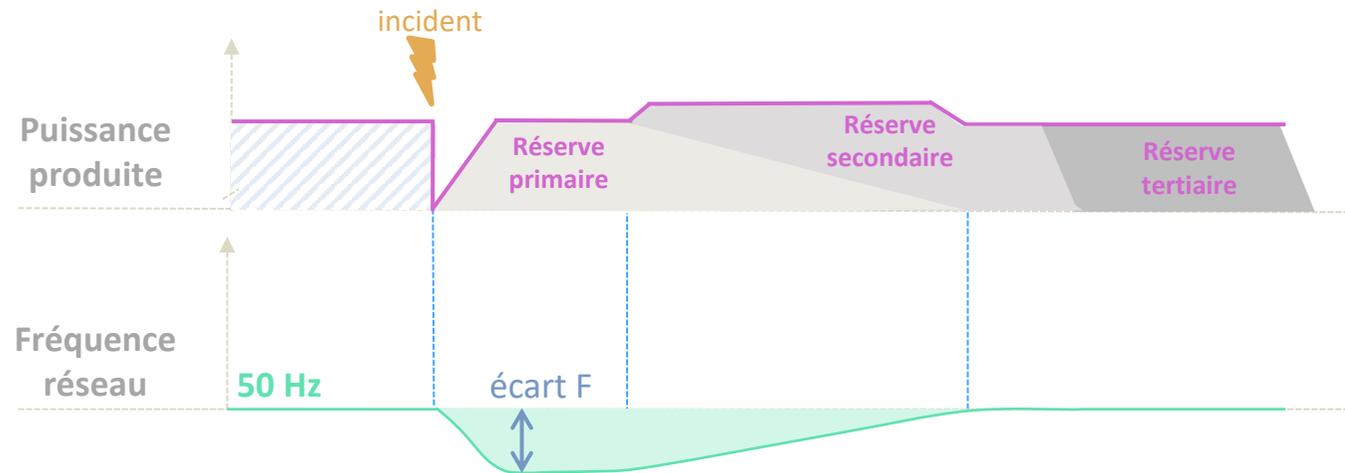


## Les hypothèses concernant la puissance installée de centrales photovoltaïques et de batteries stationnaires



# I.1 Contexte de la thèse

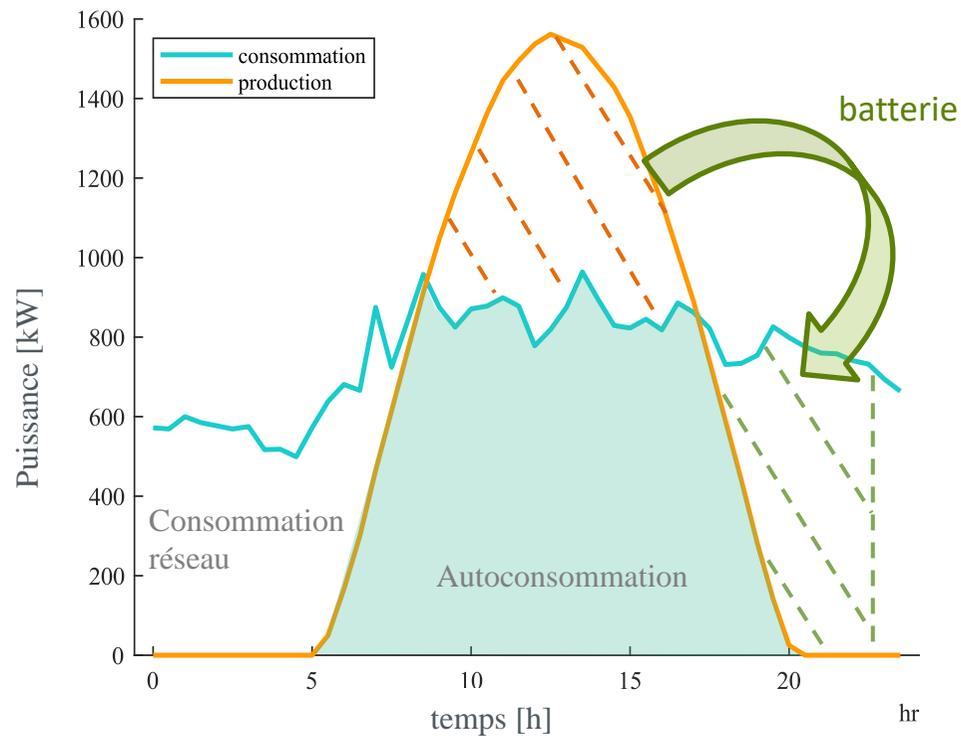
- Quelle est l'utilité du stockage ?
  - Pour le réseau :
    - Participer à l'équilibrage du réseau via les réserves de fréquence.
    - Stocker le surplus d'énergie produite par les ENR.



# I.1 Contexte de la thèse

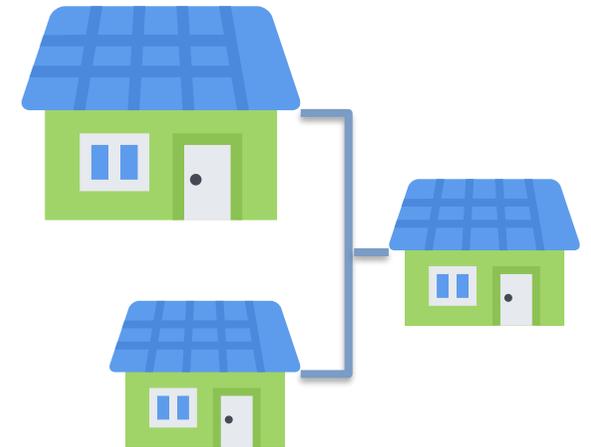
## ▪ Quelle est l'utilité du stockage ?

- **Localement** si associé à du PV et à des consommateurs (Autoconsommation individuelle ou collective AC/ACC) :
  - Réduire les pics de consommation et de production en stockant le surplus.
  - Réduire les contraintes techniques du réseau local.



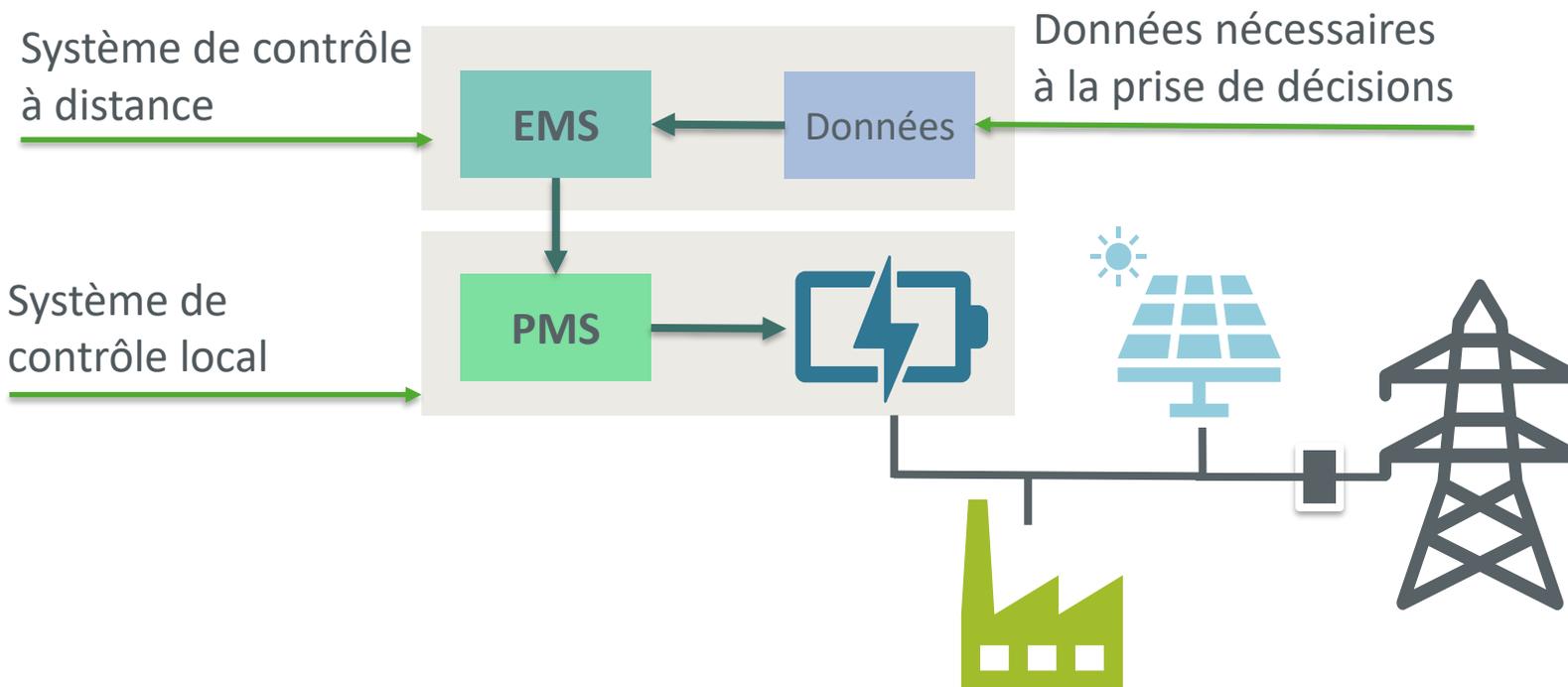
$$AP = 1 - \frac{\sum_i^N P_{sout,i} * \Delta t}{E_{conso}}$$

$$AC = 1 - \frac{\sum_i^N P_{sout,i} * \Delta t}{E_{PV}}$$



# I.2 Questionnements

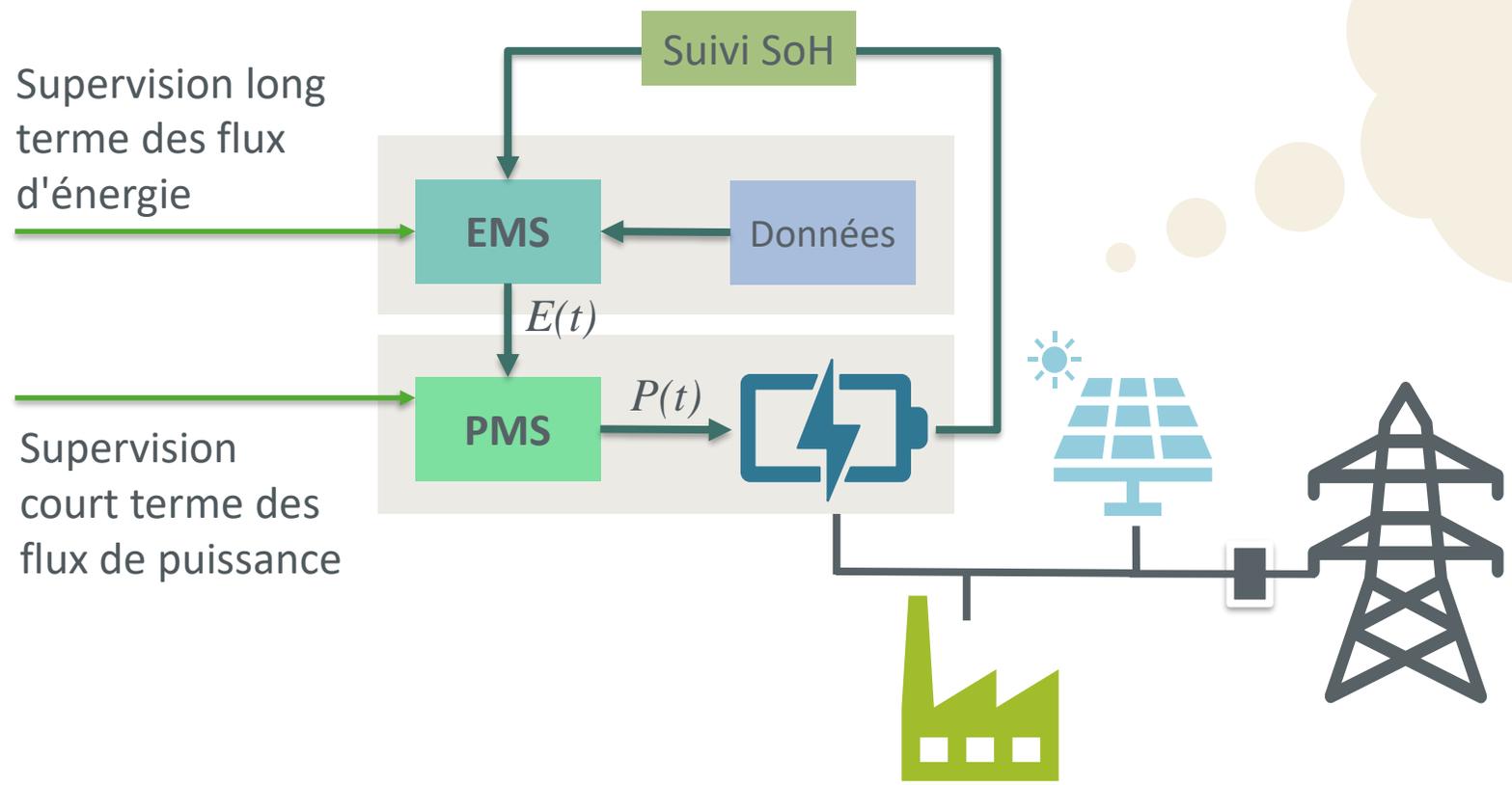
❖ Comment piloter une batterie multiservices (AC + FCR) ?



EMS : Energy Management System  
PMS : Power management System

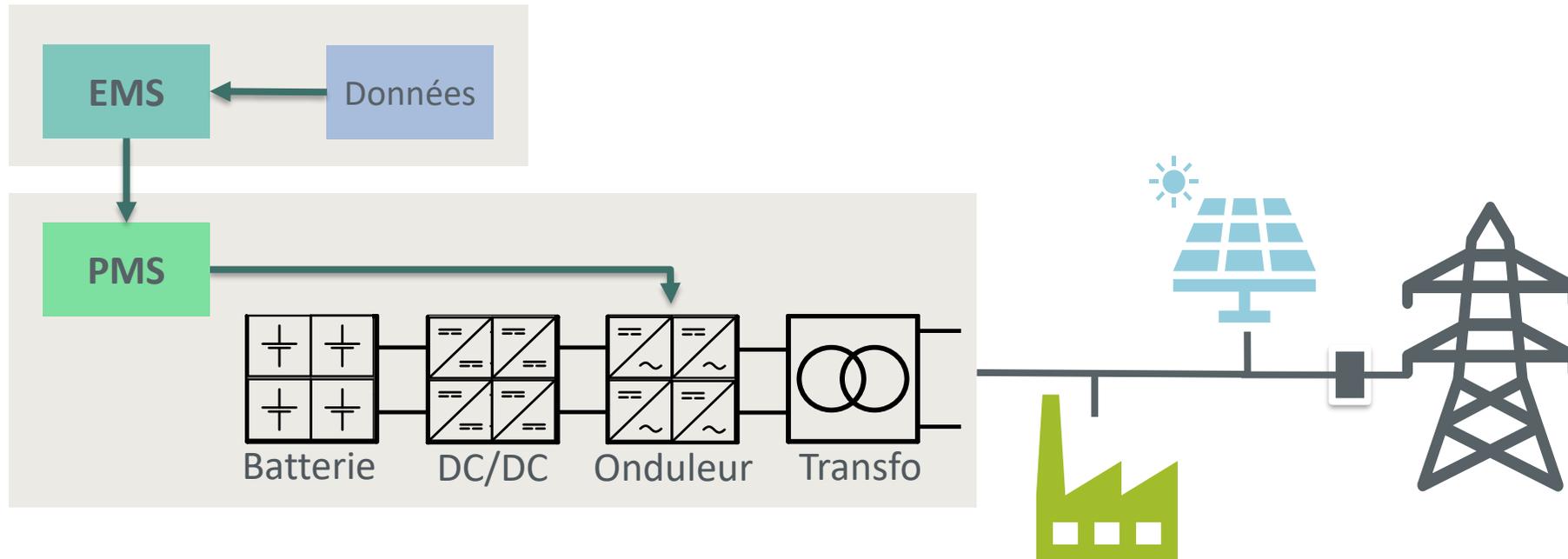
# I.2 Questionnements

- ❖ Comment piloter une batterie multiservices (AC + FCR) ?
- ❖ Peut-on contrôler l'état de santé de la batterie ?

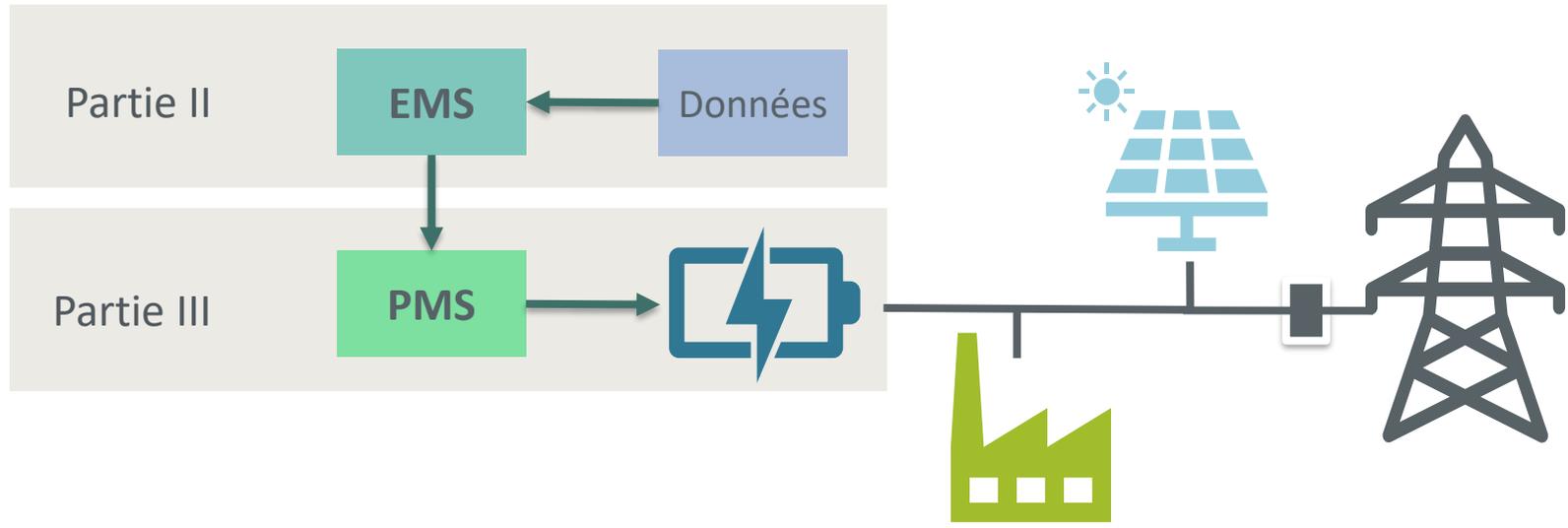


# I.2 Questionnements

- ❖ Est-ce qu'une topologie modulaire est pertinente { pour les convertisseurs ?  
pour les batteries ?



# I.3 Plan de présentation



I. Introduction et Contexte



**II. Energy Management System**



III. Power Management System



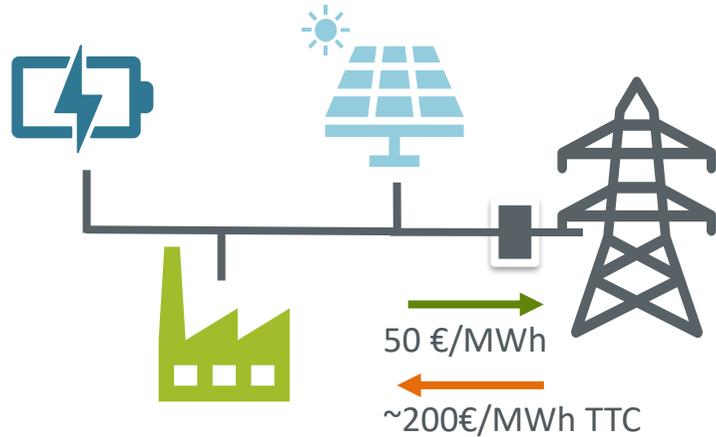
IV. Conclusions



# II.1 Structure de l'EMS multiservices

## Modélisations économiques

### Autoconsommation



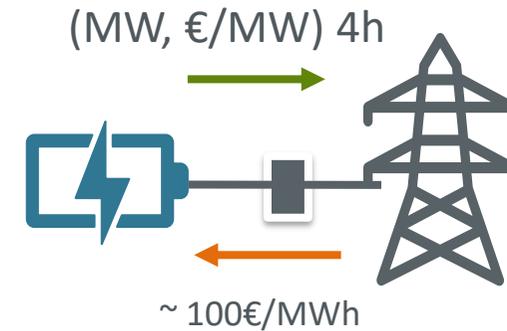
$$Gain = AP \times E_{conso} \times \Pi_{achat} + E_{surplus} \times \Pi_{vente}$$

taux autoproduction →  $AP$   
 énergie consommée →  $E_{conso}$   
 prix énergie fournisseur →  $\Pi_{achat}$   
 énergie surplus →  $E_{surplus}$   
 prix revente réseau →  $\Pi_{vente}$

- Contraintes techniques :
  - Dimensionnement : limite compteur/abonnement

### Réserve de fréquence primaire

#### Marché d'enchères



$$Gain = P_{FCR} \times \Pi_{FCR} - E_{FCR} \times \Pi_m$$

puissance réservée →  $P_{FCR}$   
 prix d'enchère →  $\Pi_{FCR}$   
 énergie activée →  $E_{FCR}$   
 prix de l'énergie marché →  $\Pi_m$

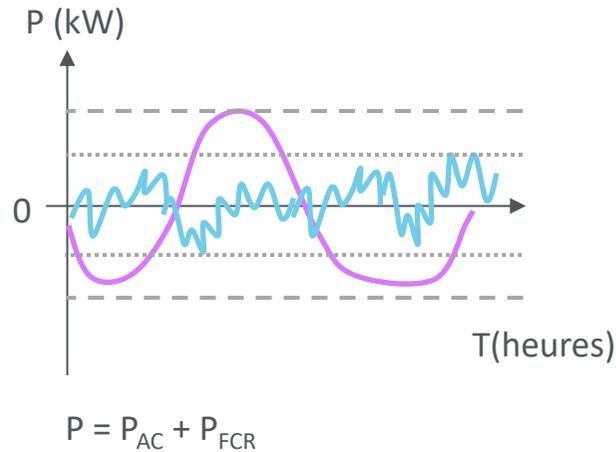
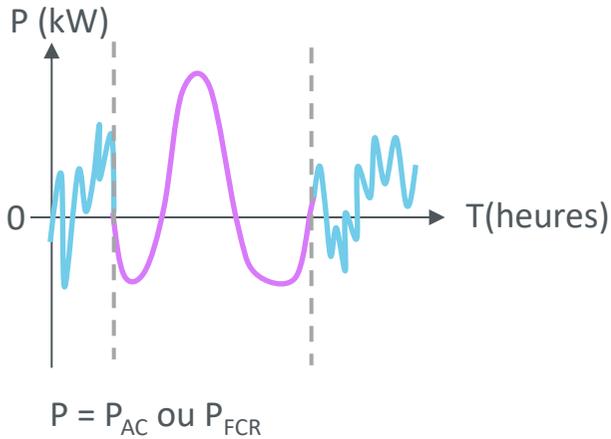
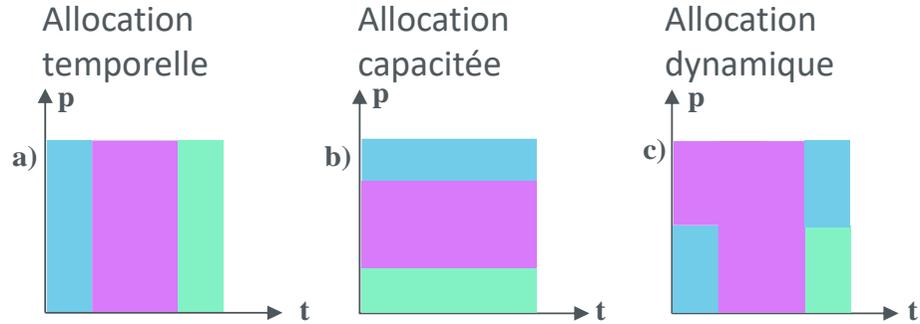
- Contraintes techniques :
  - Offre marché j-1
  - Dimensionnement minimum : 1MW/1MWh
  - Activation : Temps réel
  - Pénalités



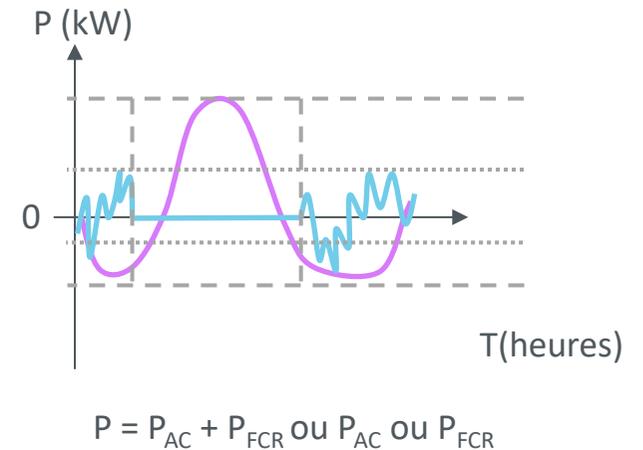
# II.1 Structure de l'EMS multiservices



- Les différentes stratégies : revue de l'état de l'art



→ Puissance réservée pour chaque services fixe dans le temps

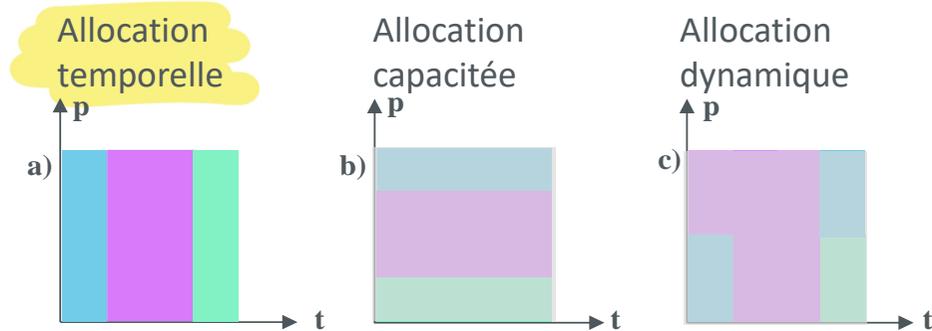


→ Puissance réservée pour chaque services variable dans le temps

## II.1 Structure de l'EMS multiservices



- Les différentes stratégies : revue de l'état de l'art



- Méthode retenue orientée par :

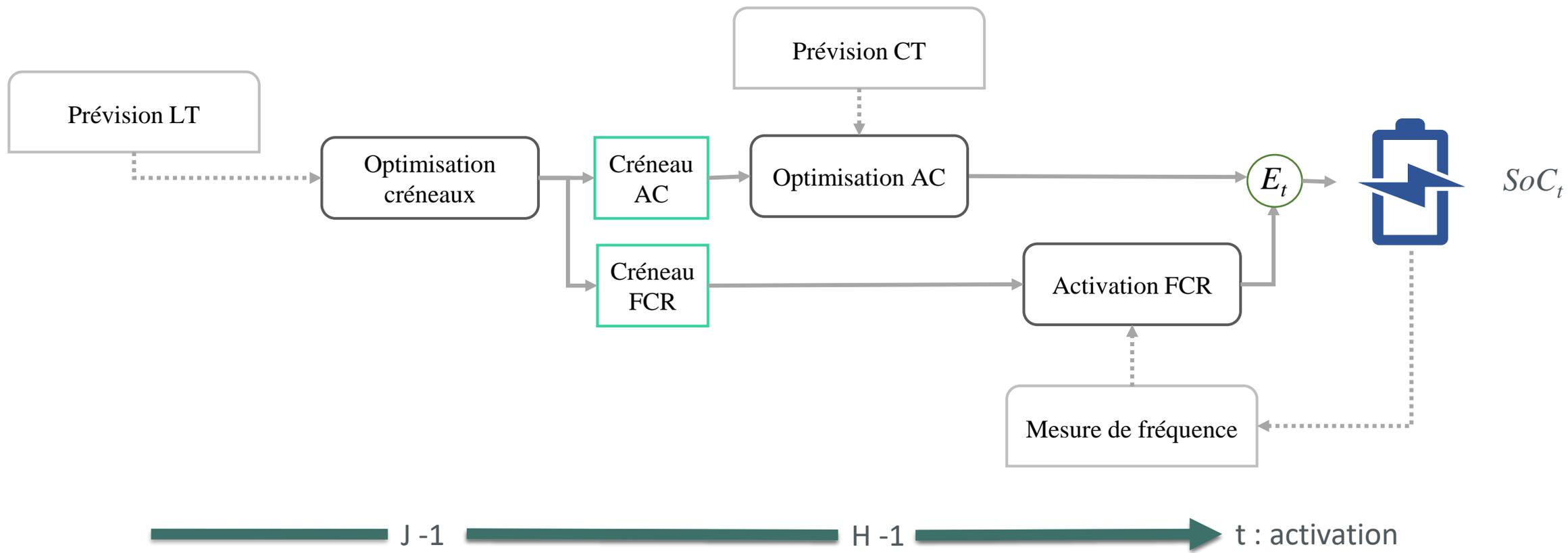
- La réglementation des services sélectionnés :

- Créneau de 4h
- Offre à J-1 FCR
- Vérification de l'activation
- Offre 1MW minimum

- La disponibilité des données prévisionnelles :

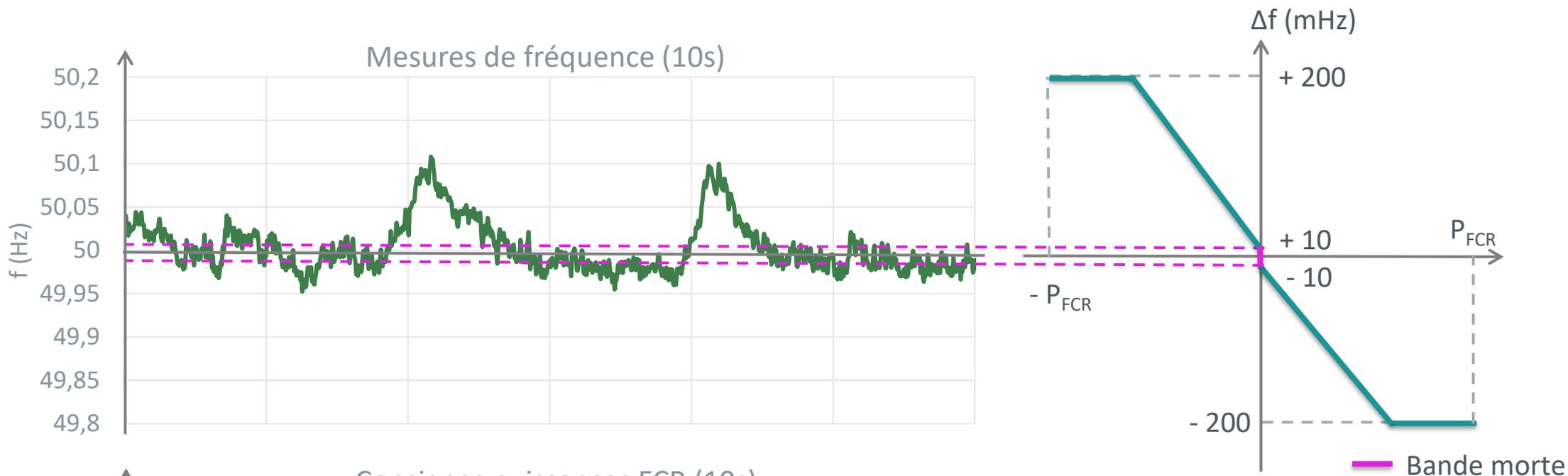
- Puissance produite PV
- Puissance consommée
- Prix FCR
- Puissance activée FCR

# II.1 Structure de l'EMS multiservices



# II.1 Structure de l'EMS multiservice

- Activation de la réserve primaire

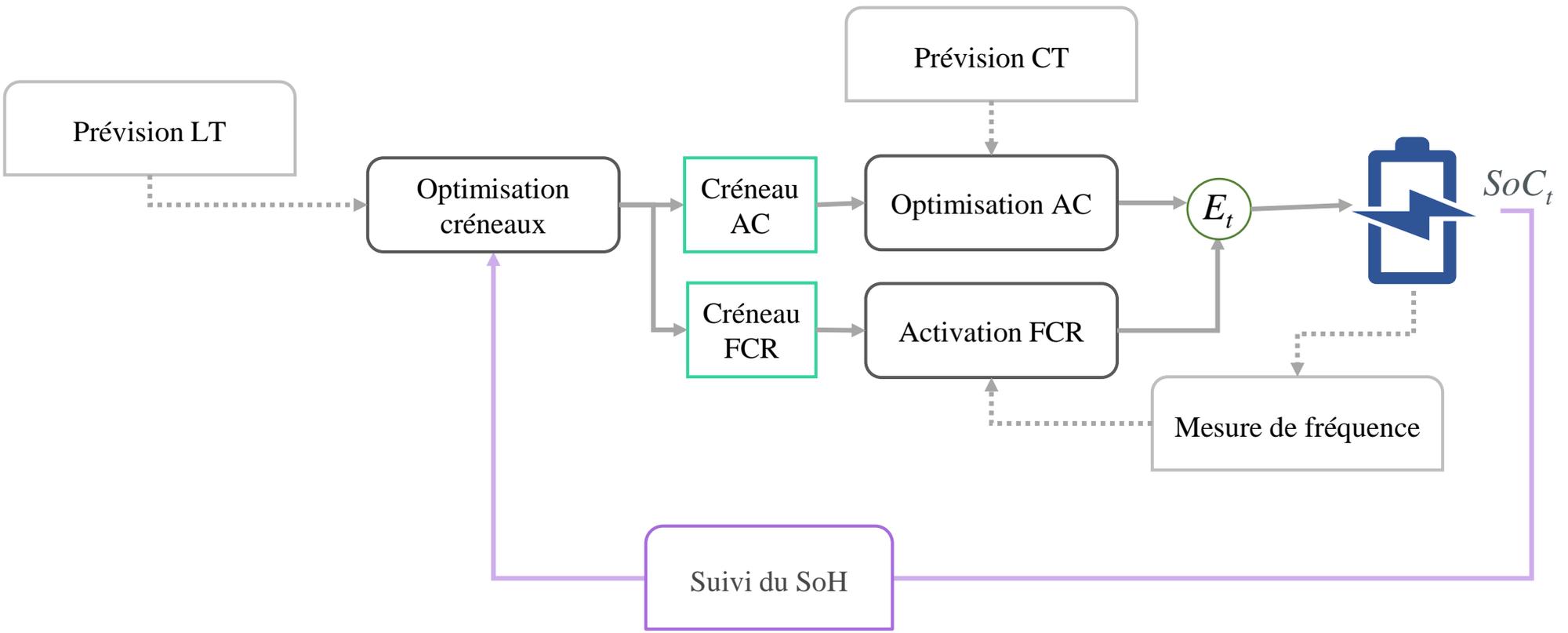


18h – 20h 14/04/2022

# II.1 Structure de l'EMS multiservice



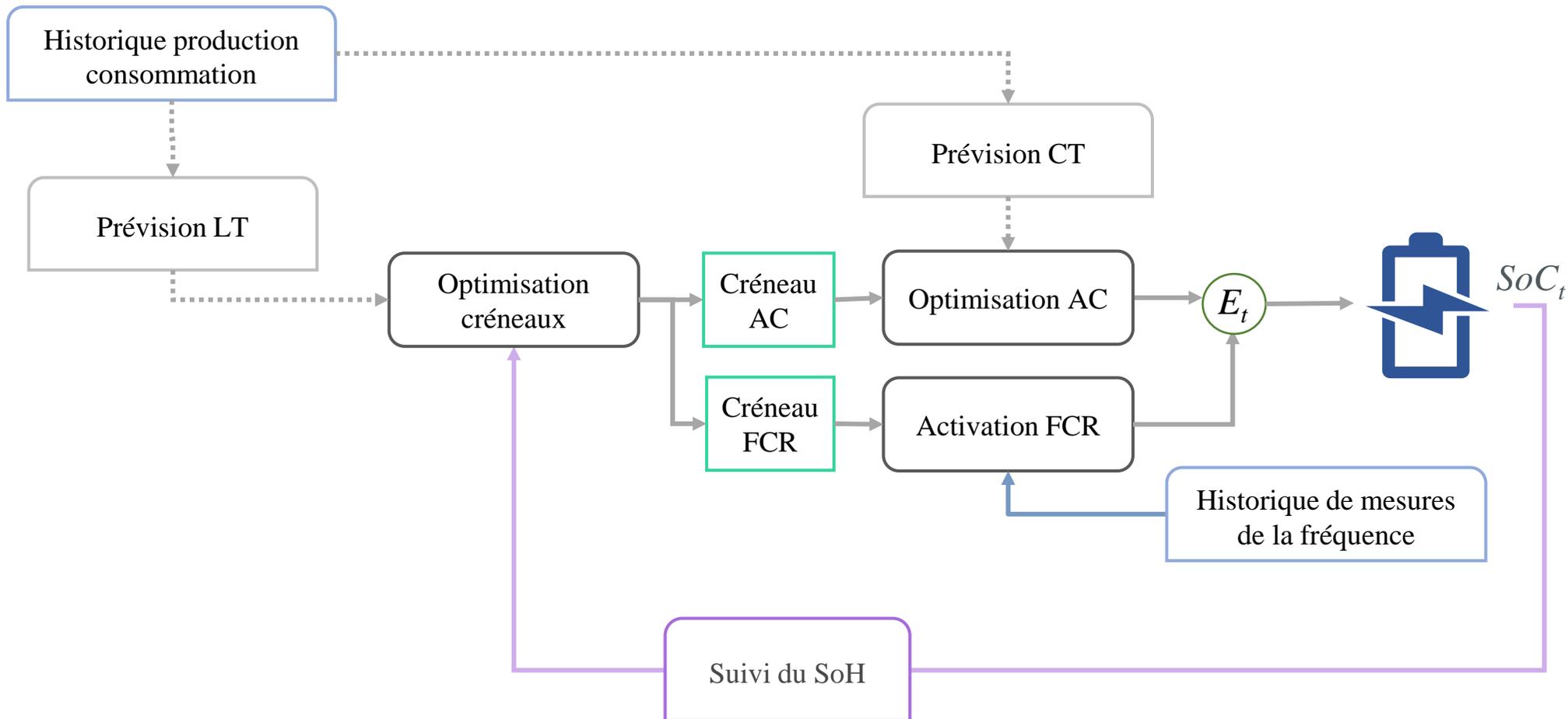
- Boucle de régulation de l'état de santé :



## II.1 Structure de l'EMS multiservices



- Structure retenue pour les tests de validation :



## II.2 Optimisations

- Choix des créneaux :

$$F_{obj} = \min(f_1 - \alpha f_2)$$

Incitation à l'AC

Facture et gains

Énergie autoproduite

The diagram illustrates the objective function  $F_{obj} = \min(f_1 - \alpha f_2)$ . Three blue arrows point from the text labels to the corresponding parts of the equation: 'Facture et gains' points to  $f_1$ , 'Énergie autoproduite' points to  $f_2$ , and 'Incitation à l'AC' points to the coefficient  $\alpha$ .

## II.2 Optimisations



### ▪ Choix des créneaux :

$$F_{obj} = \min(f_1 - \alpha f_2)$$

Incitation à l'AC

Facture moins gains

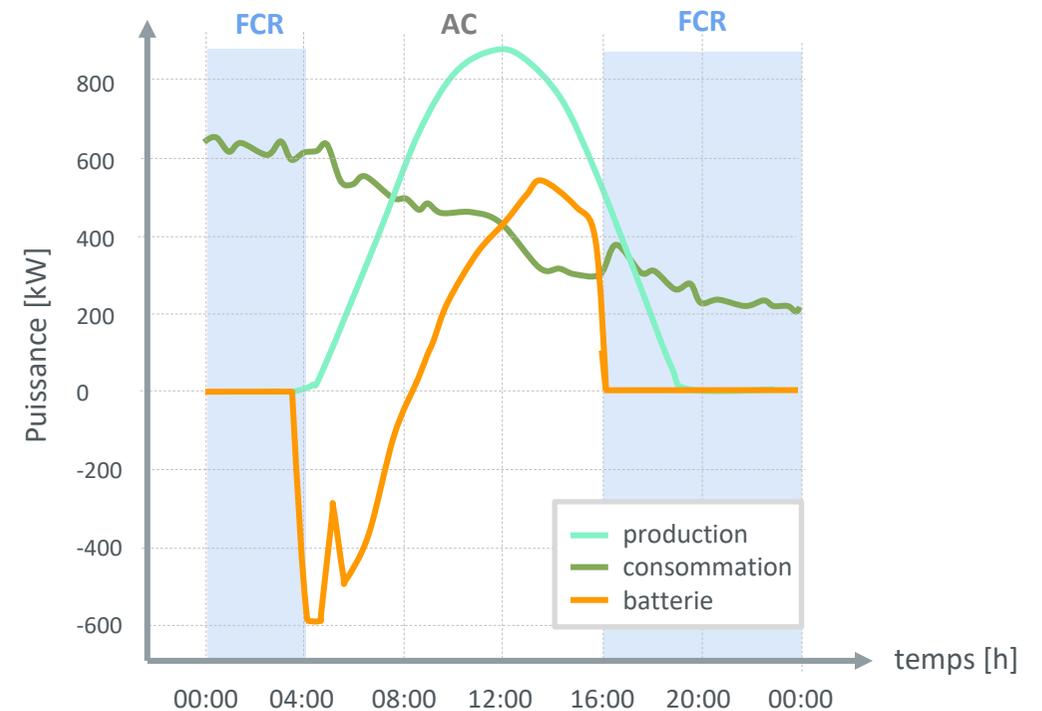
Énergie autoproduite

### ▪ Contraintes physiques :

- Limite SoC
- Limite puissance :  $P_{max}$

### ▪ Contraintes choisies :

- Interdiction de charger et décharger depuis le réseau en mode AC.
- Un seul service sur un créneau de 4h.
- État de charge initial borné pour un créneau FCR.



## II.2 Optimisation



### ■ Maximiser l'autoproduction et l'autoconsommation :

- Entrées :
  - Créneaux FCR/AC
  - prévisions de consommation et de production actualisées
- Sortie :
  - Puissance de consigne sur les créneaux AC
- Contraintes :
  - Revenir dans les bornes de SoC.

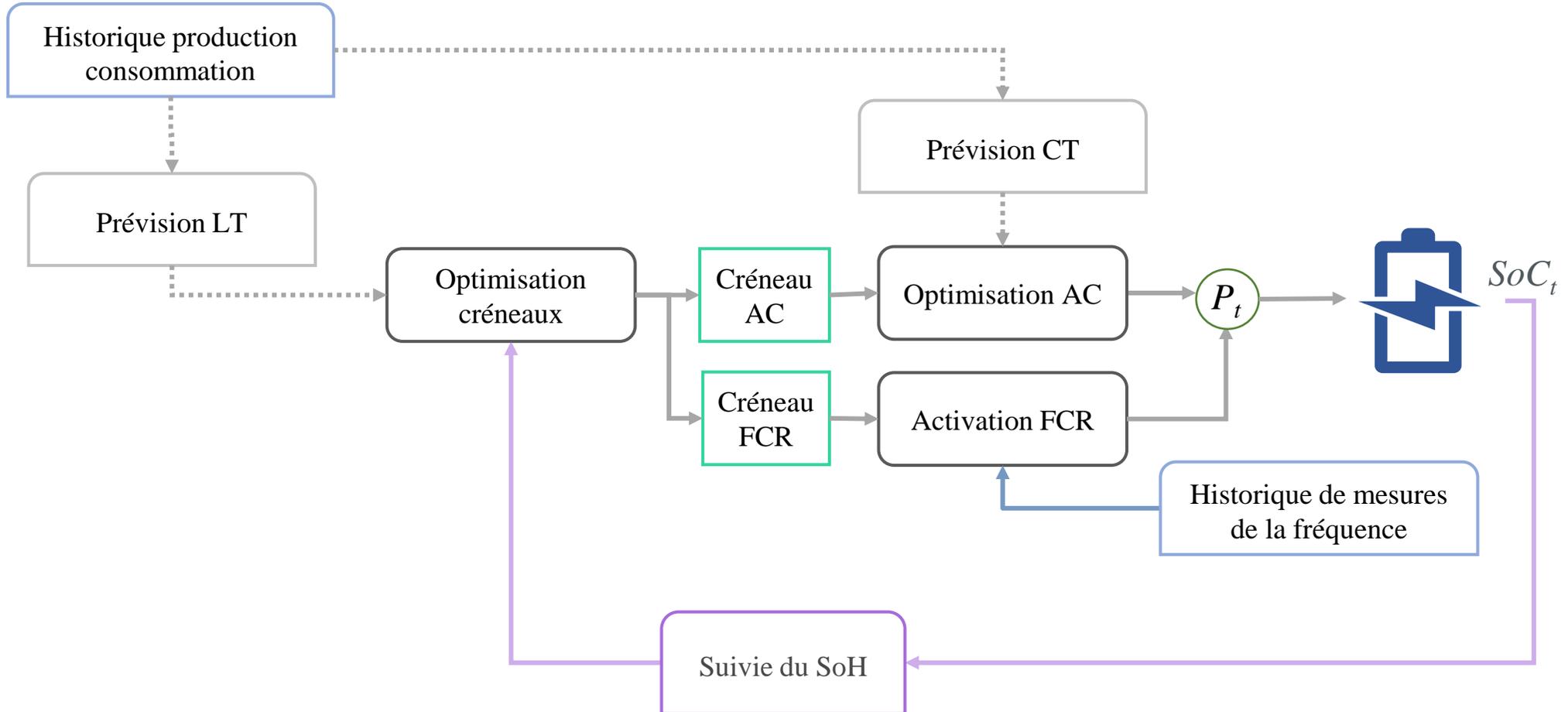
$$f_{obj} = \max \left( \underbrace{\left(1 - \frac{E_{with}}{E_{conso}}\right) * E_{conso} + \left(1 - \frac{E_{incjt}}{E_{PV}}\right) * E_{PV}}_{AP + AC} \right)$$



## II.3 Vieillessement de la batterie



- Structure retenue pour les tests de validations :





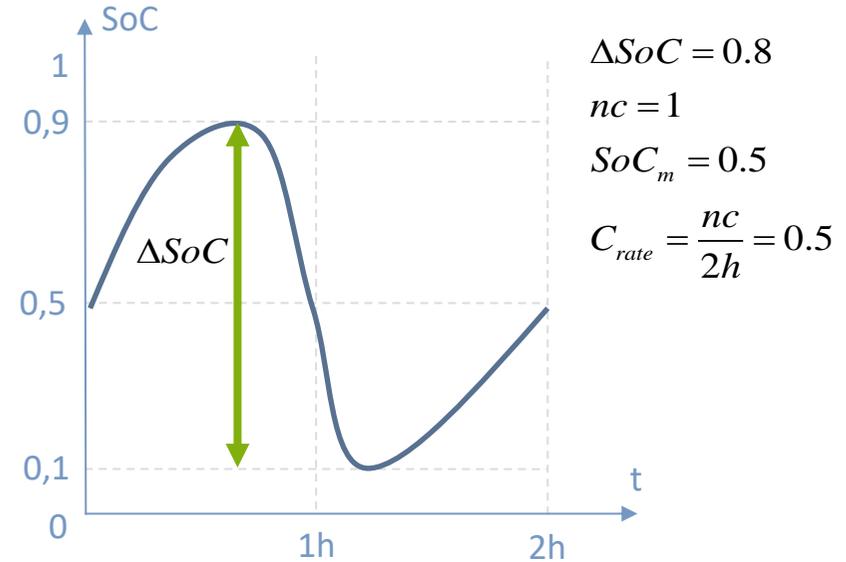
## II.3 Vieillessement de la batterie



### ■ Vieillessement cyclique

- Pertes de capacité dues au cyclage.
- Facteurs d'influence :
  - profondeur de décharge  $\Delta SoC$
  - taux de courant  $C_{rate}$
  - état de charge moyen  $SoC_m$
  - Nombre de cycles équivalents  $nc, Qc(Ah)$
  - Température  $T$

$$Q_{loss\%}^{cycle} = a \times e^{b \times Q_c \times \sigma \times \varepsilon} - c$$



### ■ Vieillessement Calendaire

- Pertes de capacité dues au stockage.
- Facteurs d'influence :
  - état de charge moyen  $SoC_m$
  - Durée de stockage  $t$
  - Température  $T$

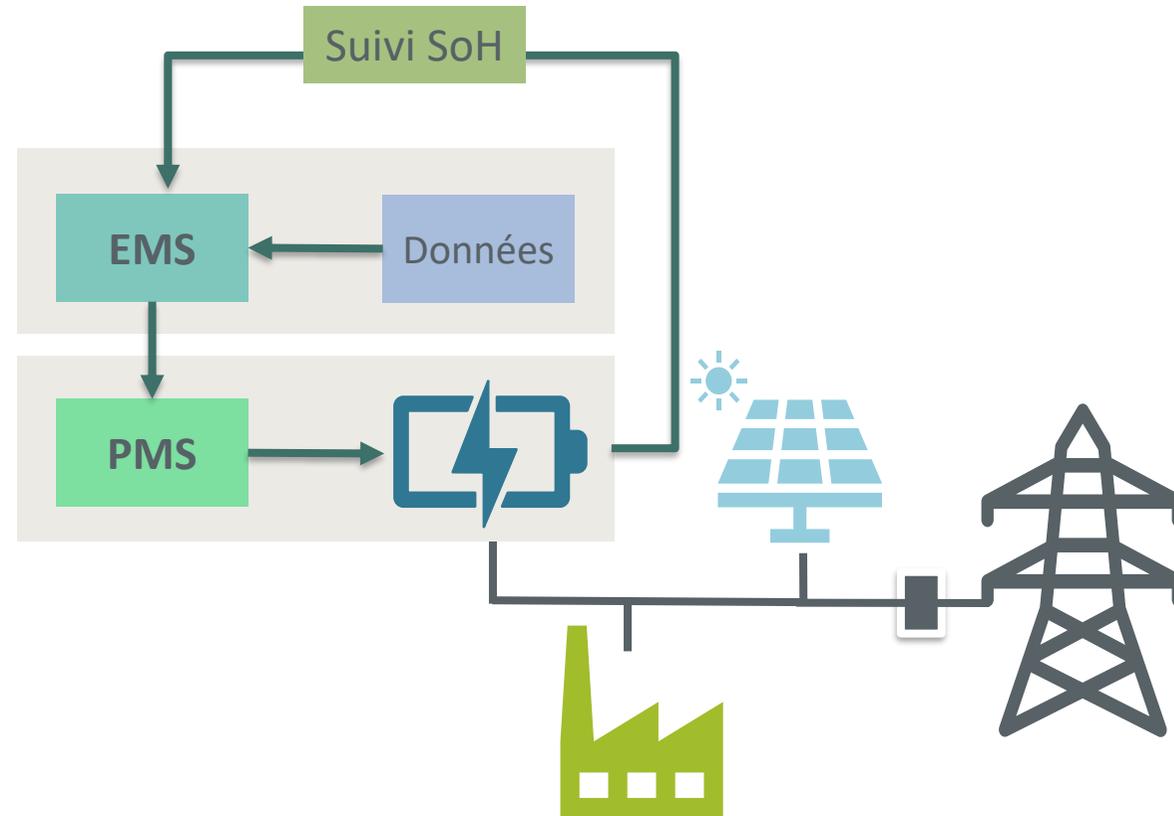
$$Q_{loss\%}^{calendar} = d \times e^{h \times SoC_{moy}} \times t^\phi$$

↑ ↑ ↑ coefficients empiriques (T°, chimie...)

[2] D.-I. Stroe « Degradation Behavior of Lithium-Ion Batteries Based on Lifetime Models and Field Measured Frequency Regulation Mission Profile » nov 2016.

## II.3 Vieillessement de la batterie

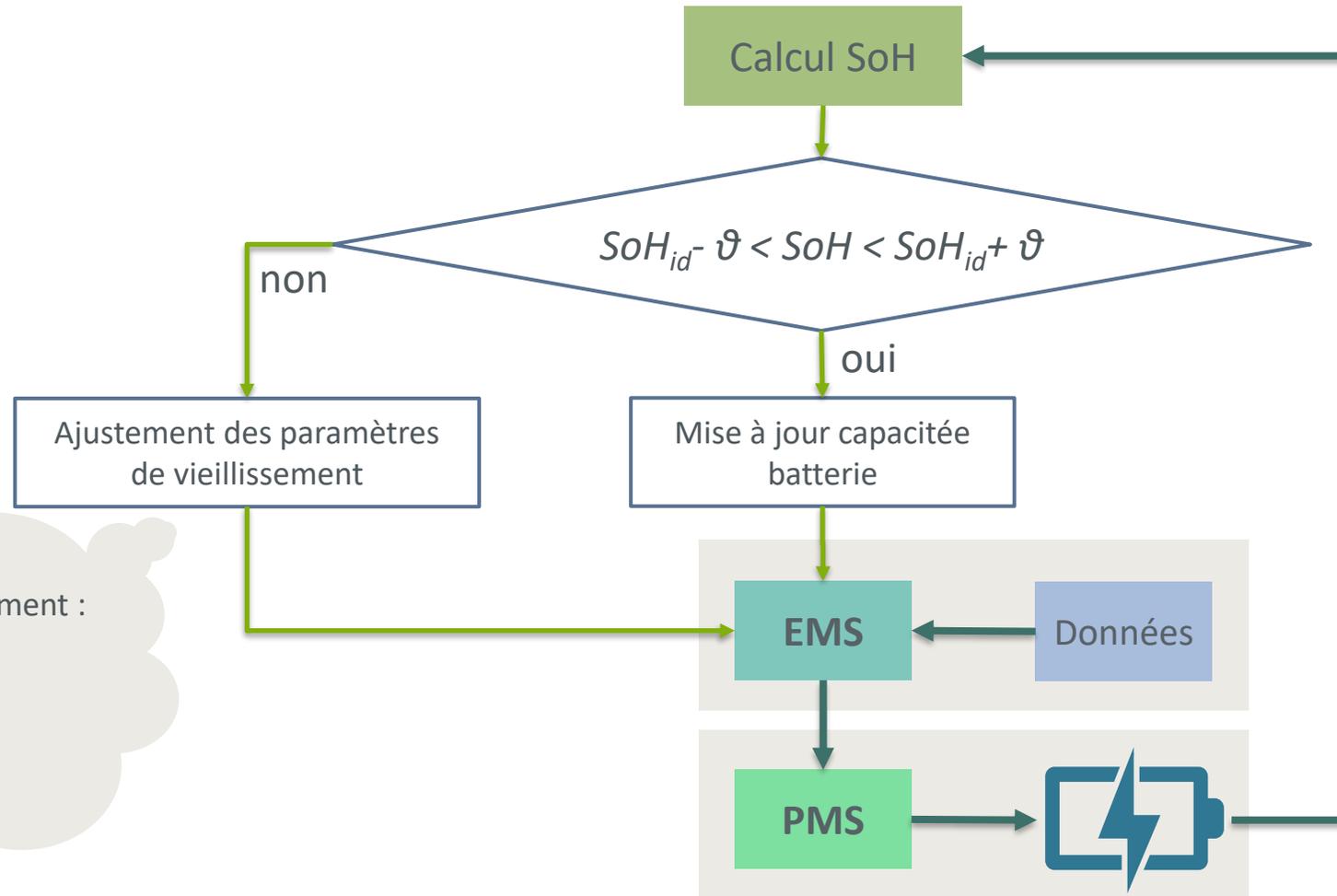
- Méthode suivie du SoH et définition du profil de vieillissement idéal



## II.3 Vieillessement de la batterie



- Méthode suivie du SoH et définition du profil de vieillissement idéal



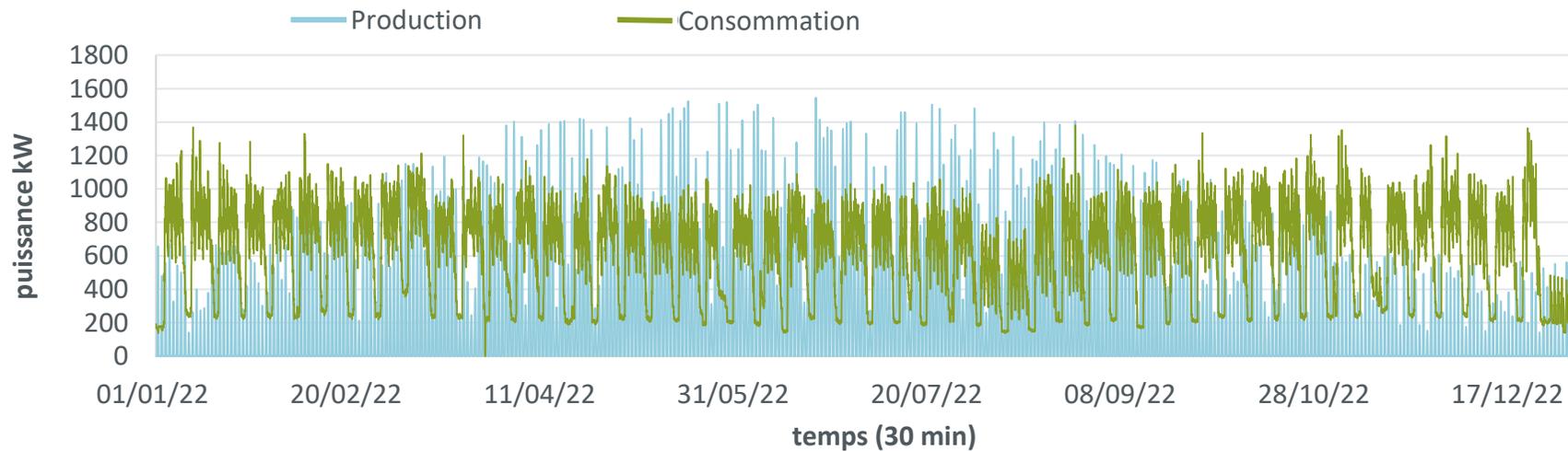
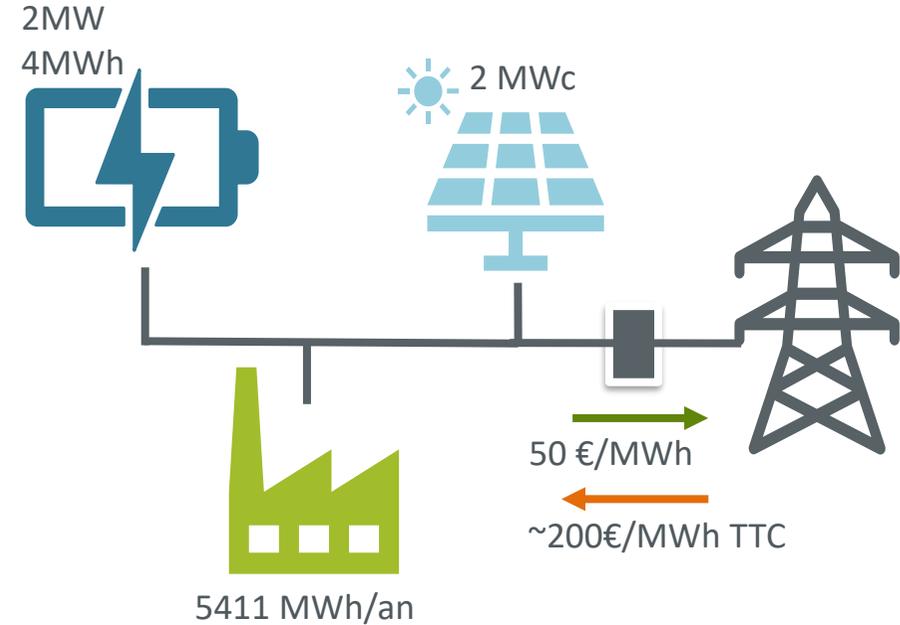
Paramètres de vieillissement :

- SoC min/max
- $\alpha$
- Puissance DB FCR
- Autres limites
- ...

## II.4 Cas d'étude

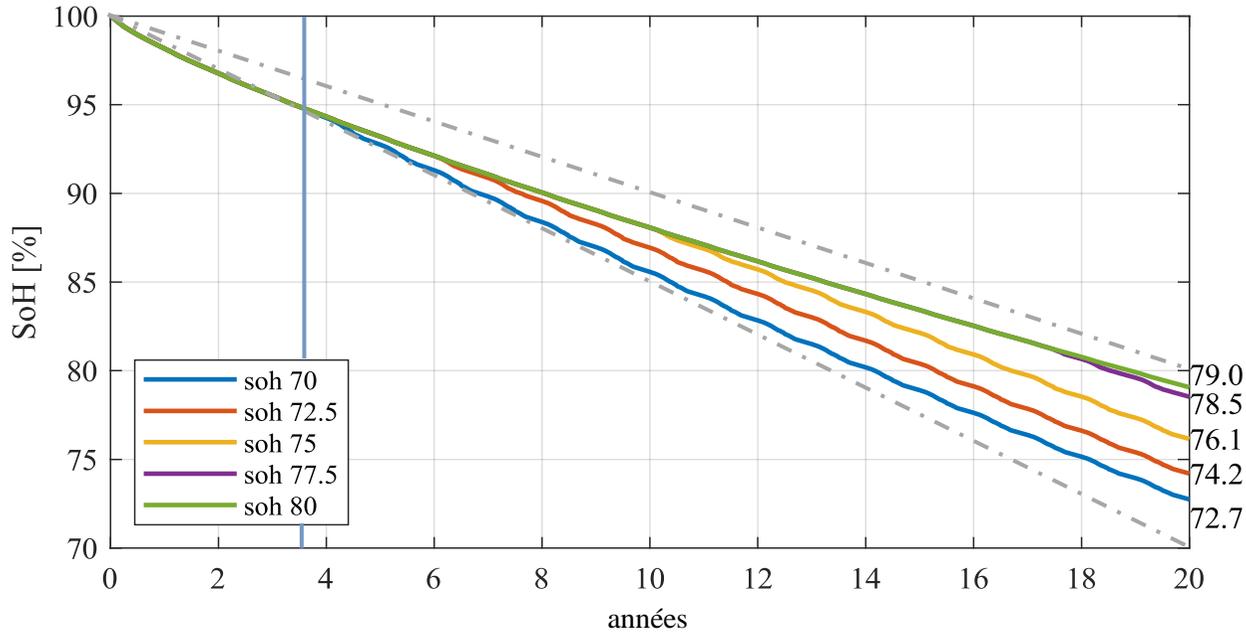
### ■ Définition du cas d'étude :

- Données consommation : industrie manufacturière
- Hypothèses de prix :
  - FCR 2021
  - Investissement initial PV + Batteries : 3,1 M€
  - Taux d'actualisation: 8%

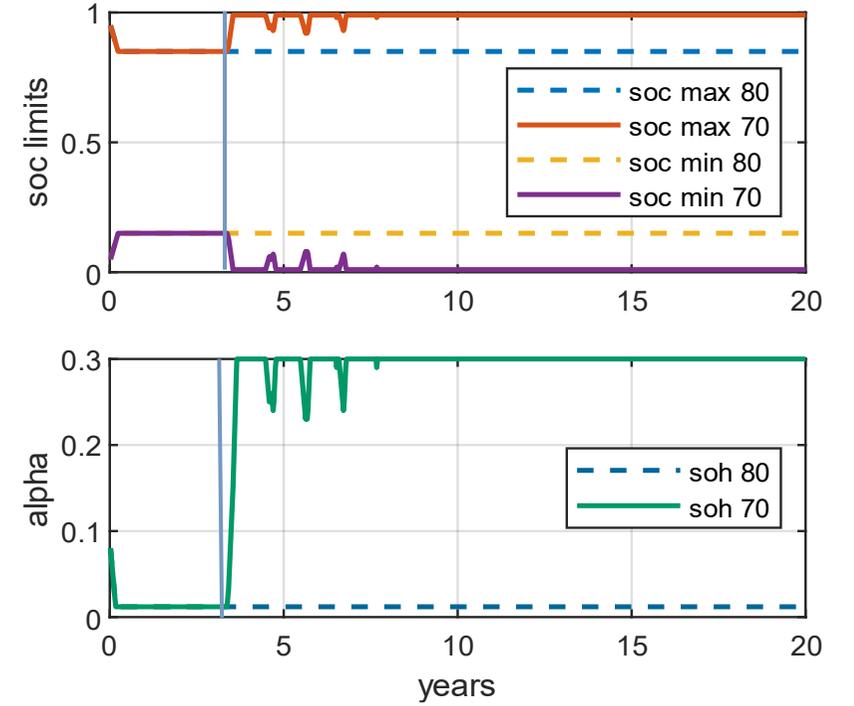


# II.4 Cas d'étude

- Définitions des profils de vieillissement idéaux ?



- Étude :
  - FCR 2021
- Résultats :
  - Profil idéal de vieillissement limité entre 70% et 80%



## II.4 Cas d'étude

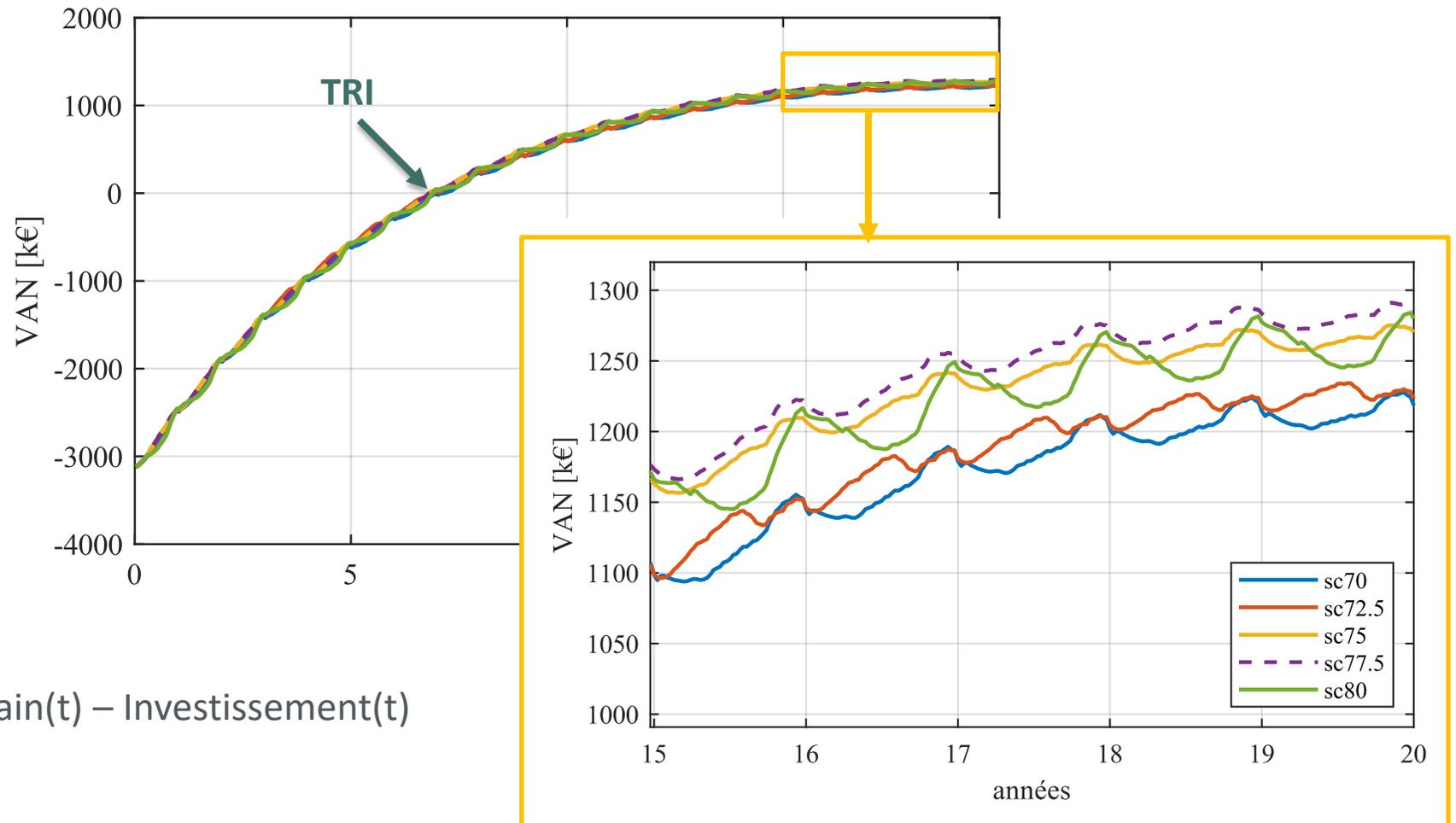
- Quel est influence des profils idéaux sur les résultats économiques ?

○ Étude :

- FCR 2021
- $SoH_{id}$  : 70% à 80 %

○ Résultats éco :

- TRI = 6,5 à 7,2 ans
- $\Delta VAN_{20ans} = 65 \text{ k€}$



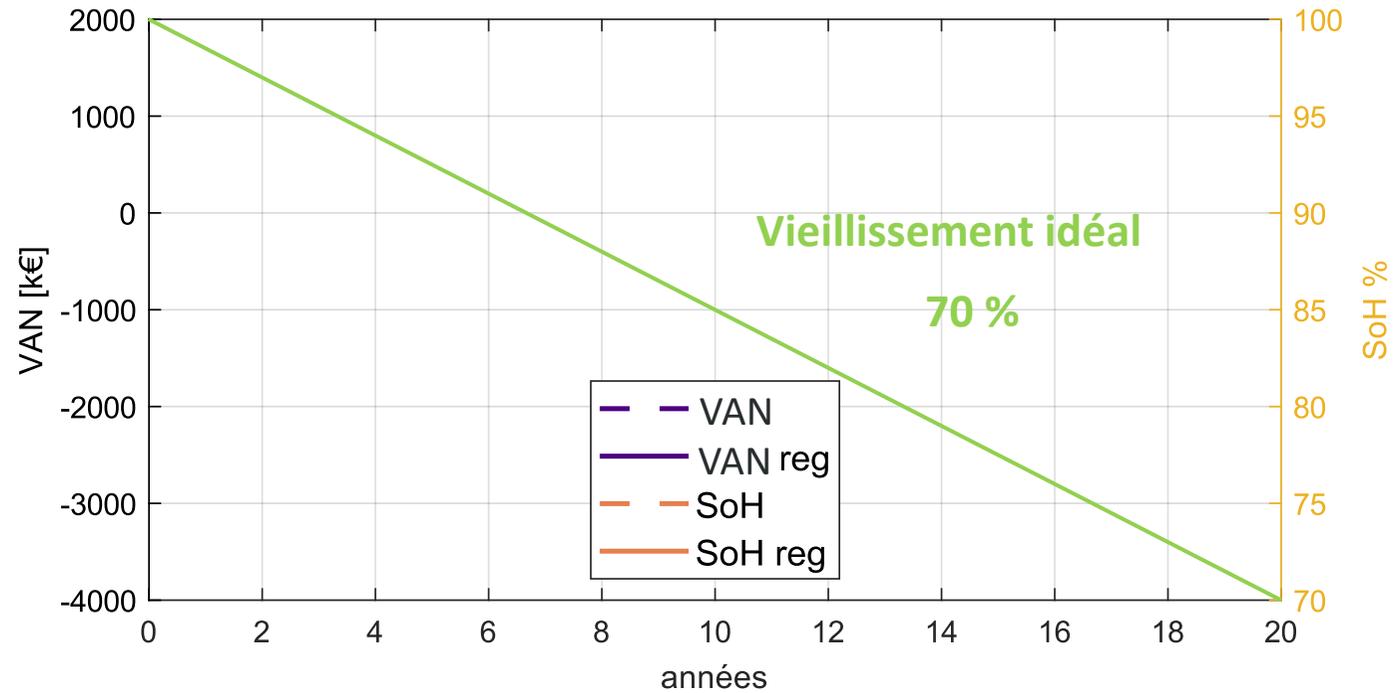
$VAN \text{ (valeur actualisé net)} = Gain(t) - Investissement(t)$

## II.4 Cas d'étude

- Test de la méthode de suivi d'un profil de vieillissement idéal.

○ Étude :

- FCR 2021
- $SoH_{id} : 70\%$



## II.4 Cas d'étude

- Test de la méthode de suivi d'un profil de vieillissement idéal.

○ Étude :

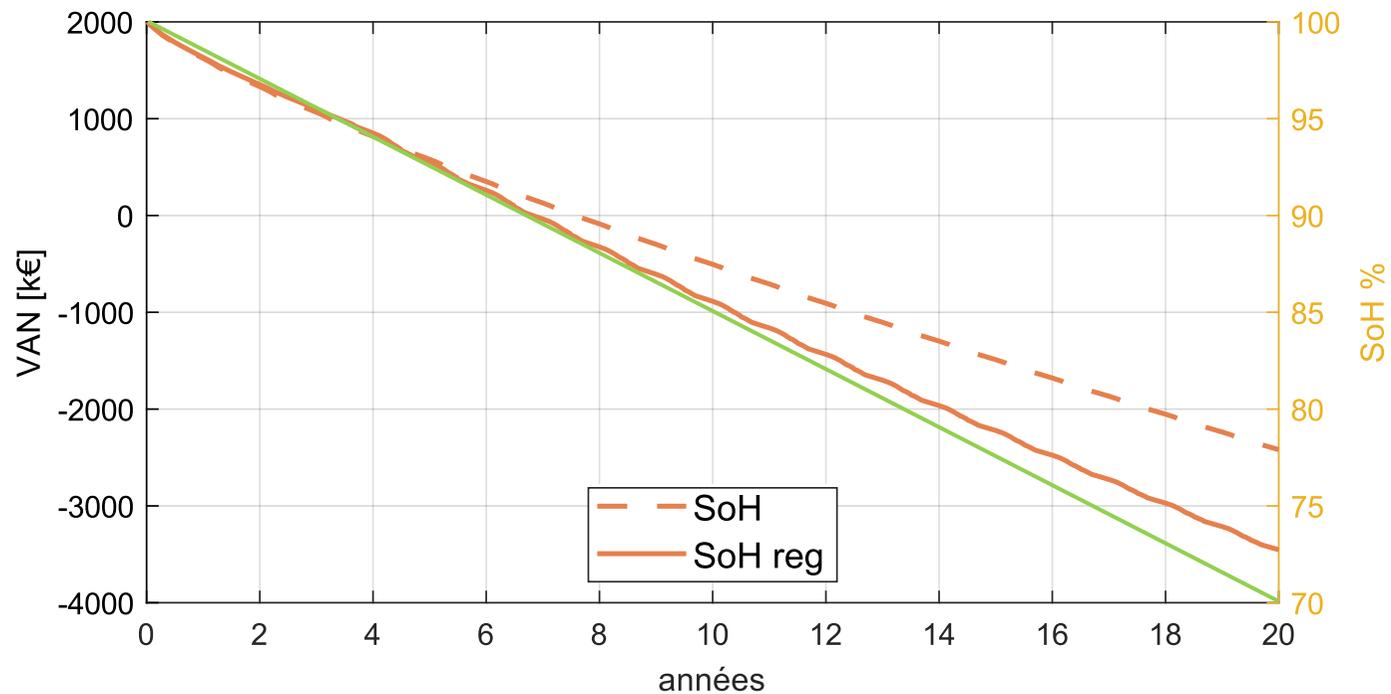
- FCR 2021
- $SoH_{id} : 70\%$

Sans régulation:

○  $SoH_{20ans} = 77,8\%$

Avec régulation :

○  $SoH_{20ans} = 72,6\%$



vieillessement idéal 70%

## II.4 Cas d'étude

- Test de la méthode de suivi d'un profil de vieillissement idéal.

○ Étude :

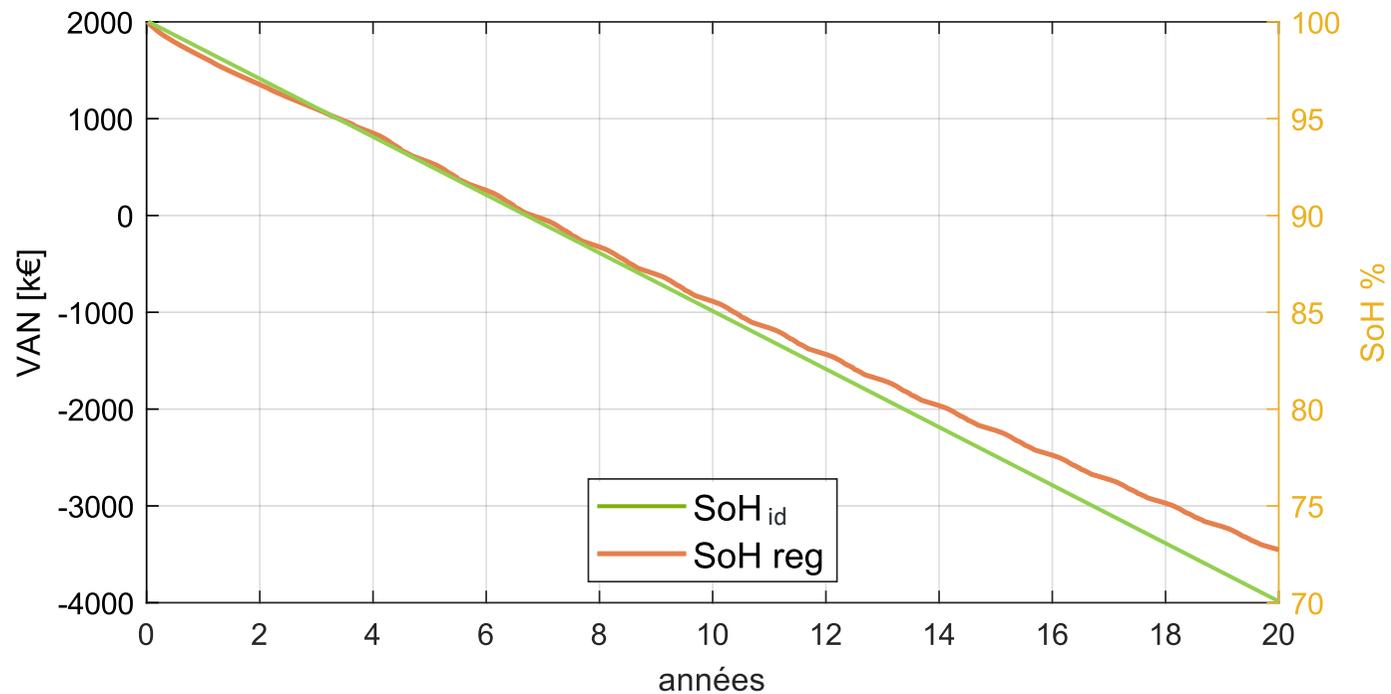
- FCR 2021
- $SoH_{id} : 70\%$

Sans régulation:

○  $SoH_{20ans} = 77,8\%$

Avec régulation :

○  $SoH_{20ans} = 72,6\%$



vieillessement idéal 70%

# II.4 Cas d'étude

- Suivi d'un profil idéal : quels impacts sur les résultats économiques et énergétiques ?

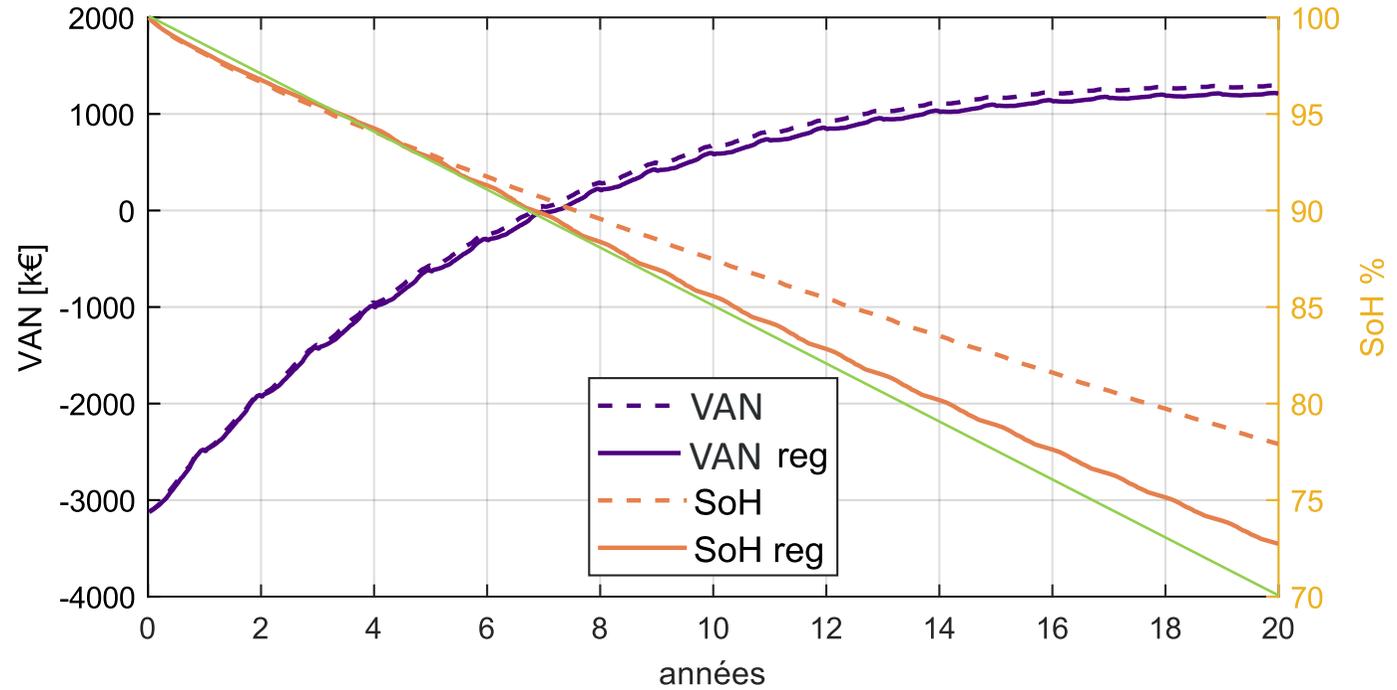
- Étude :

- FCR 2021
- $SoH_{id} : 72,5\%$

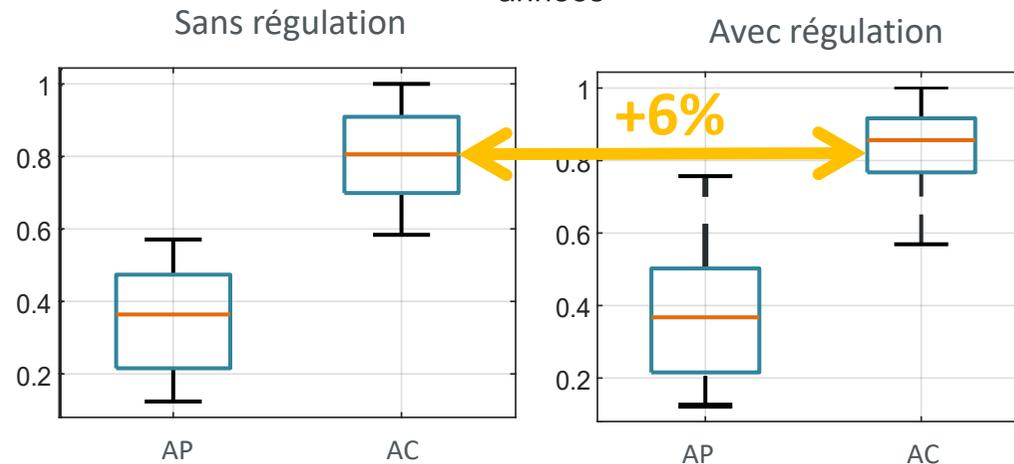
- Résultats éco :

- TRI = 7,3 ans
- $\Delta VAN_{20ans} = 88 \text{ k€}$

- Résultats énergétiques améliorés



illissement idéal 70%



# II.4 Cas d'étude

- Quelle est l'influence des hypothèses de rémunération FCR sur les résultats ?

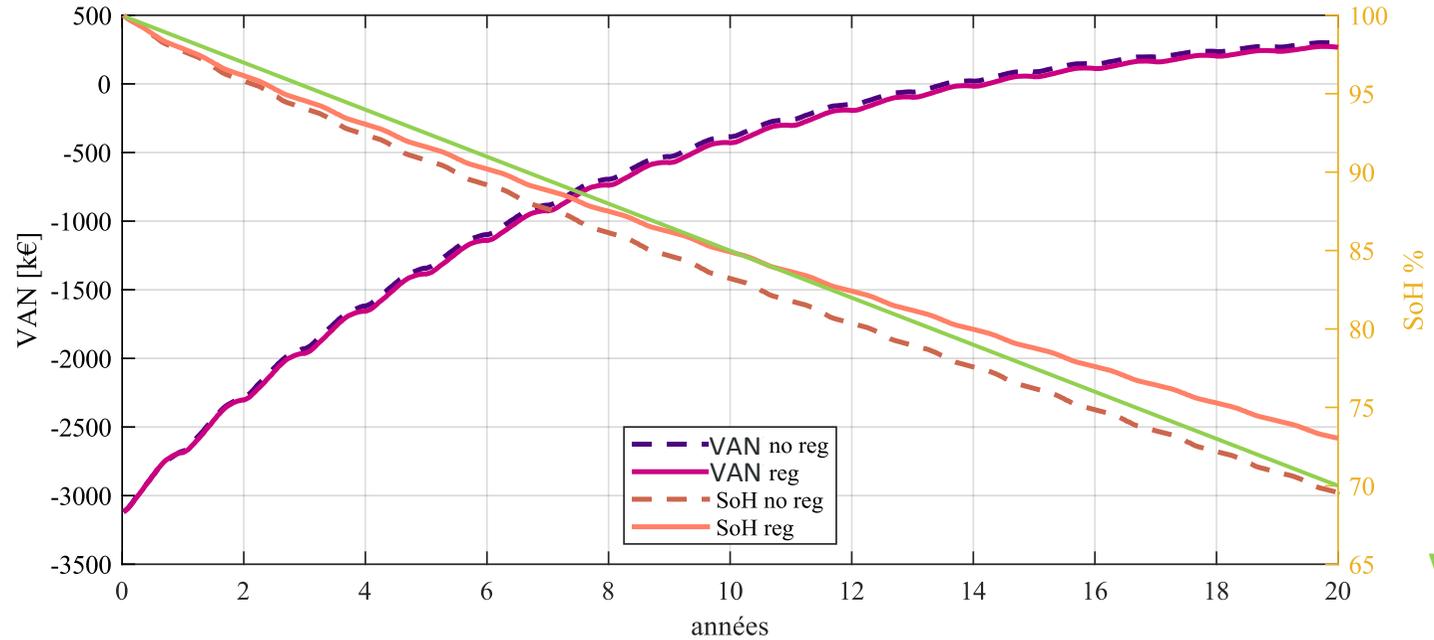
○ Étude :

- **FCR 2023**
- SoH<sub>id</sub> : 72,5%

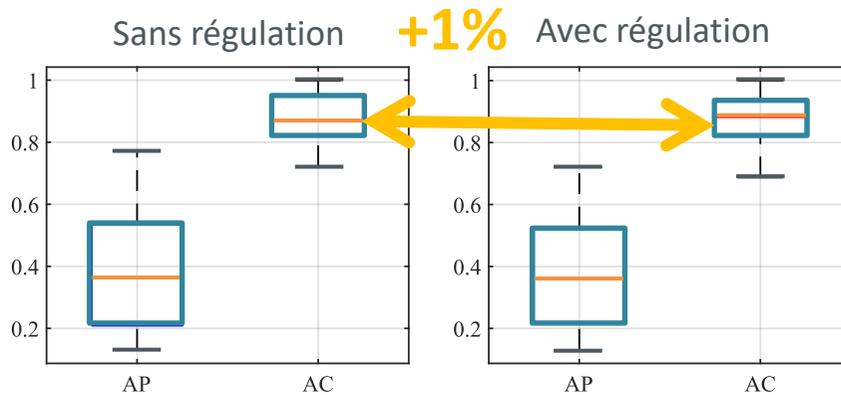
○ Résultats éco :

- TRI = 14 ans
- $\Delta VAN_{20ans} = 20 \text{ k€}$

○ Résultats énergétiques légèrement améliorés



Vieillessement idéal 70%



Revenu majoritairement généré grâce à l'AC implique un vieillissement batterie plus rapide.

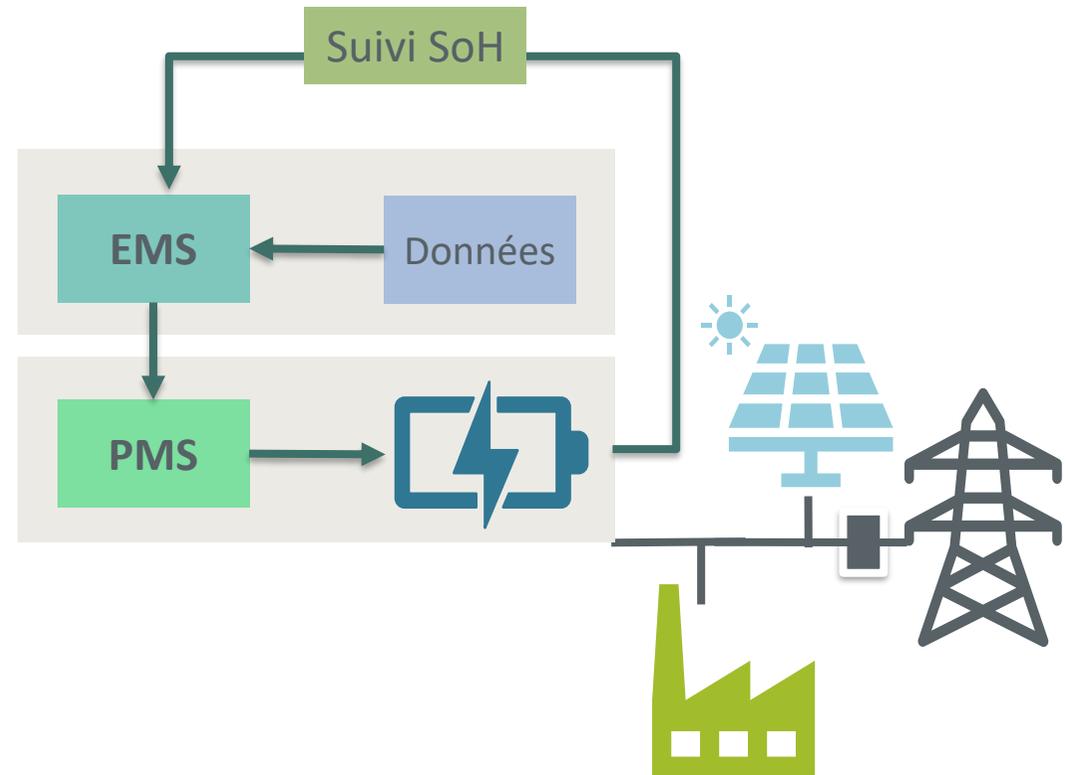
## II.5 Conclusion partielle EMS

### Comment piloter une batterie multiservices ?

- Méthode de contrôle d'une batterie bi-service FCR et autoconsommation.
- Avec allocation temporelle.

### Peut-on gérer l'état de santé de la batterie ?

- Méthode de suivi d'un profil idéal de vieillissement.
- Oui, mais avec un impact les revenus finaux.



I. Introduction et Contexte



II. Energy Management System



III. Power Management System



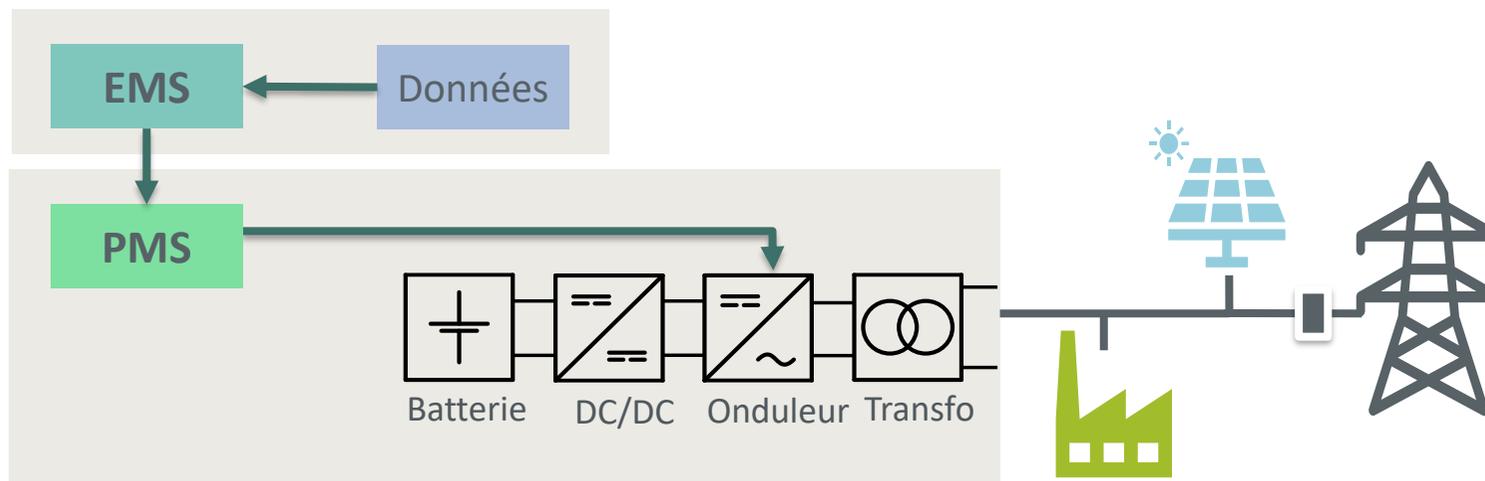
IV. Conclusions



# III.1 Objectifs du PMS

- **Power Management System**

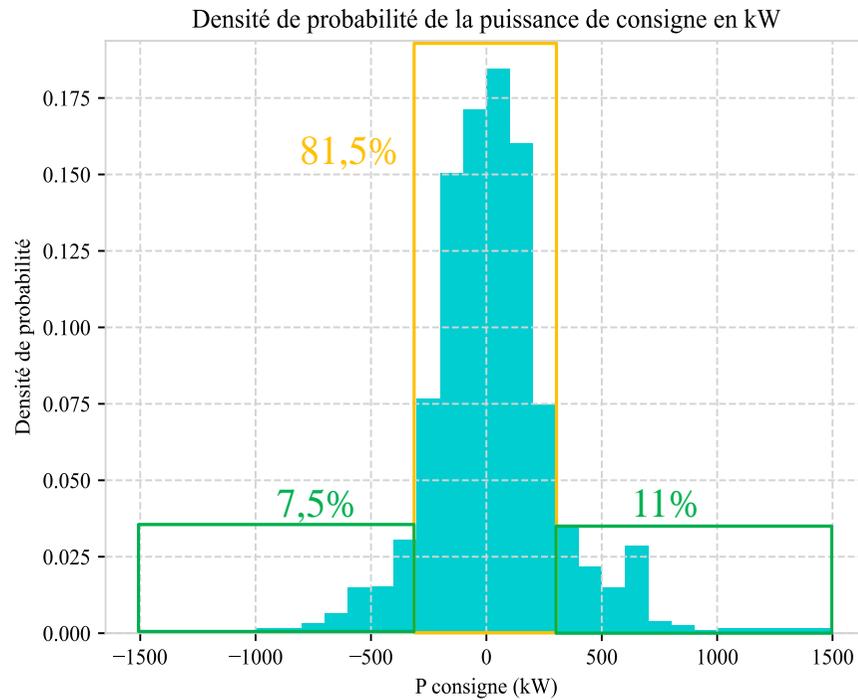
- Adapte les consignes en énergie en consigne de puissance.



➔ Quelles sont les consignes de puissance d'une batterie bi-services ?

# III.1 Objectifs du PMS

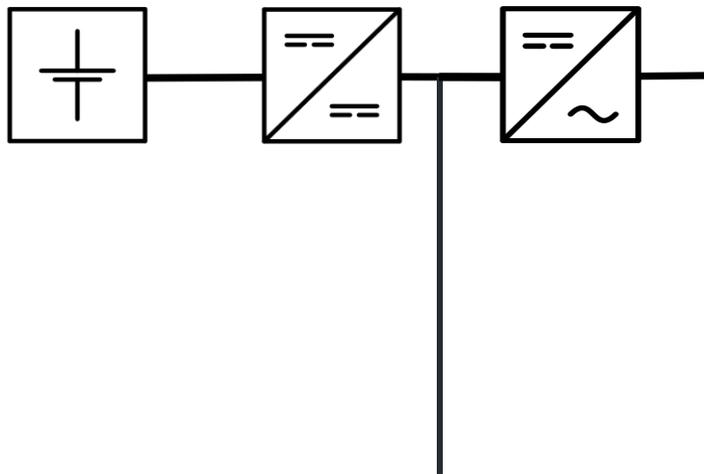
- **Profil de mission et profil de pertes.**
  - + 80% des consignes en puissance < 15% Pmax
  - Zone 0%-15% : Rendement < 90 %



- Étude : FCR 2021
- Batterie 2 MW/ 4MWh

# III.1 Objectifs du PMS

- **Modularité des convertisseurs**
  - Structure modulaire, dimensionnement et répartition de puissance optimale pour minimiser les pertes.



# III.1 Objectifs du PMS

- **Modularité des convertisseurs**

- Structure modulaire, dimensionnement et répartition de puissance optimale pour minimiser les pertes.

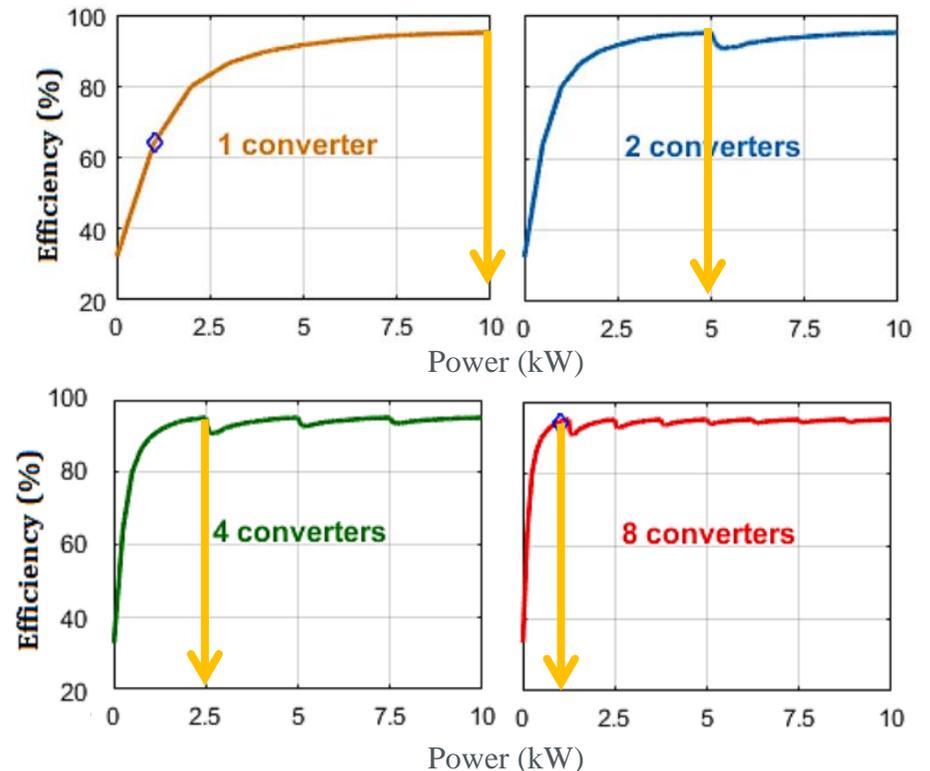
- **Modularité des batteries :**

- Structure modulaire des packs batterie : gestion individuelle du vieillissement minimiser le coût du rétrofit.



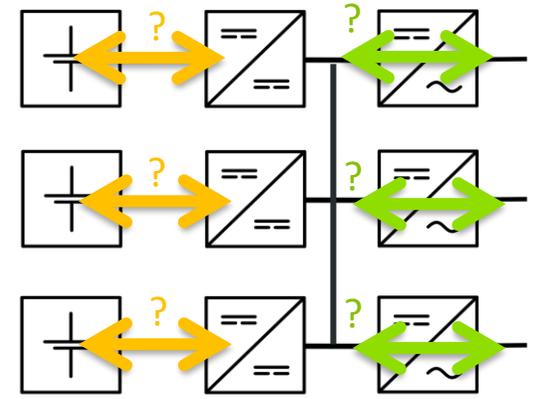
→ Quelle quantité d'énergie ou de puissance ?

→ Quel dimensionnement ?



# III.2 Structure du PMS

- Quelle quantité puissance dans les convertisseurs ?
- Quelles quantité d'énergie dans chaque batterie ?



# III.2 Structure du PMS

- Répartition optimale de la puissance dans les convertisseurs

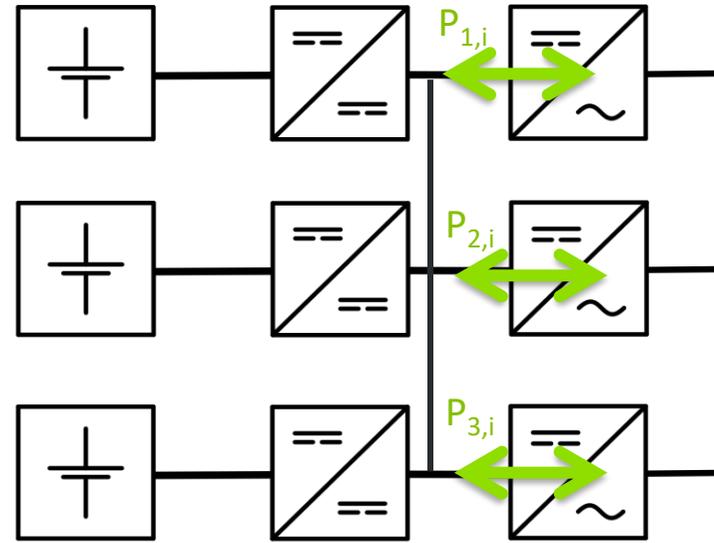
- Minimiser les pertes totales :

$$F_A = \sum_n^N \sum_i^I P_{\max,n} * \left[ x_0 * \left( \frac{P_{n,i}}{P_{\max,n}} \right)^2 + x_1 * \frac{P_{n,i}}{P_{\max,n}} + x_2 * b_{n,i} \right]$$

Puissance consigne
Binaire d'activation

↑
Puissance maximum convertisseur n

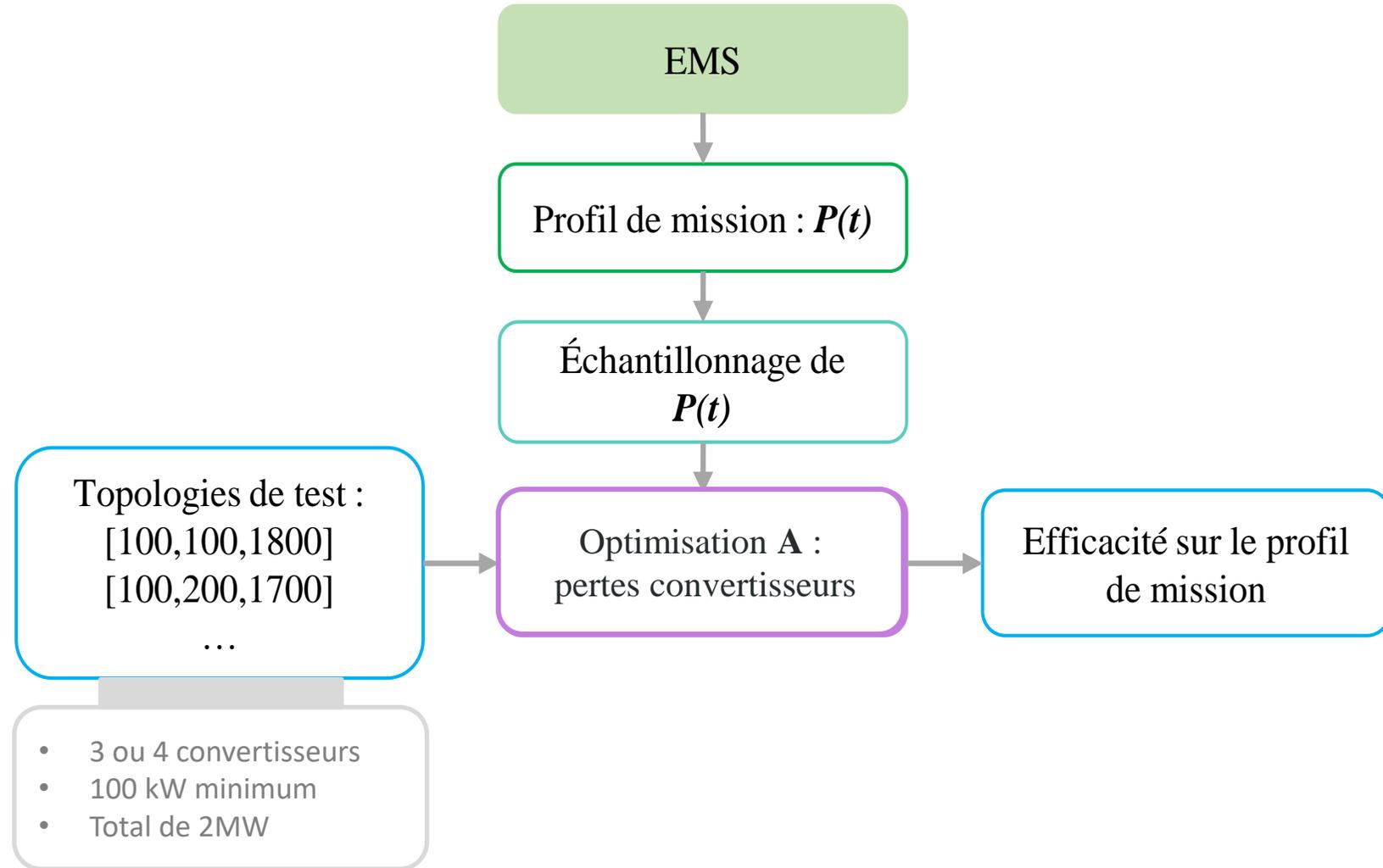
- Profil de perte identique en charge et en décharge
  - Indicateur performance :
- $$eff_E = \frac{\sum_{t=0}^T P_{\text{sortie}}}{\sum_{t=0}^T P_{\text{entrée}}}$$



# III.3 Tests de topologies modulaire



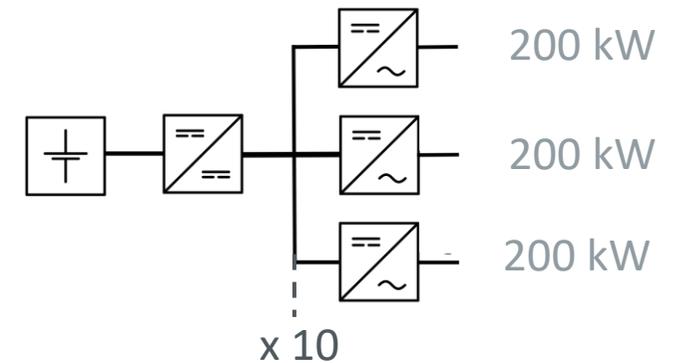
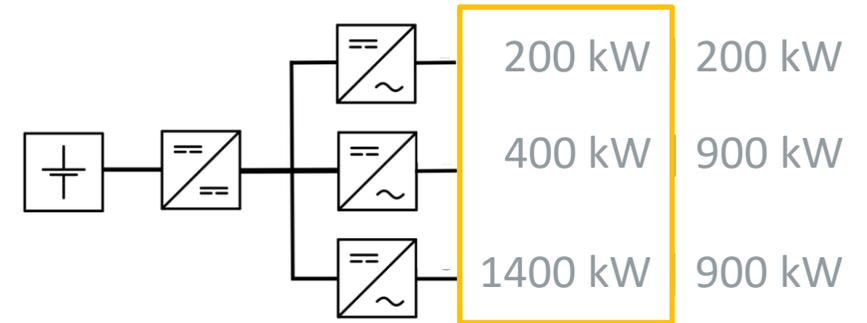
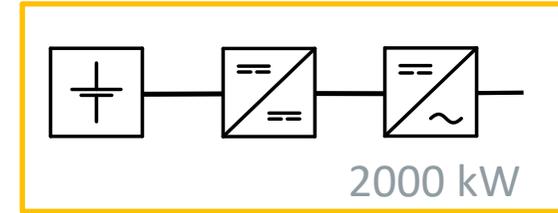
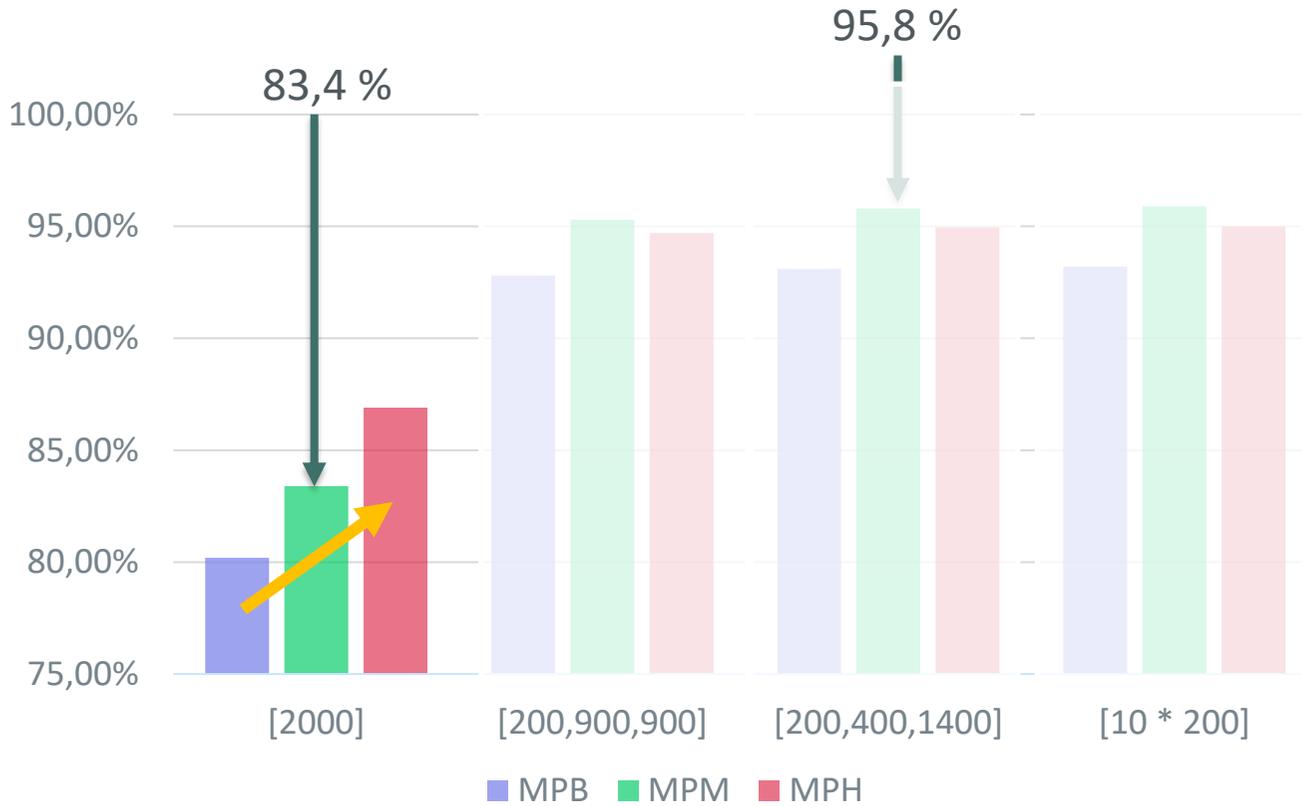
- Procédure de tests des topologies modulaires :



# III.3 Tests de topologies modulaire

## A. Pertes dans les convertisseurs

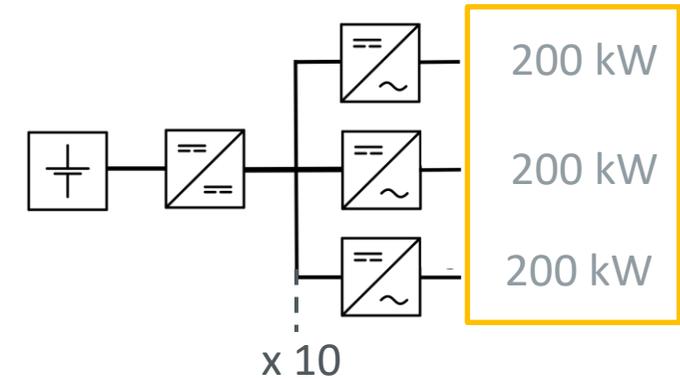
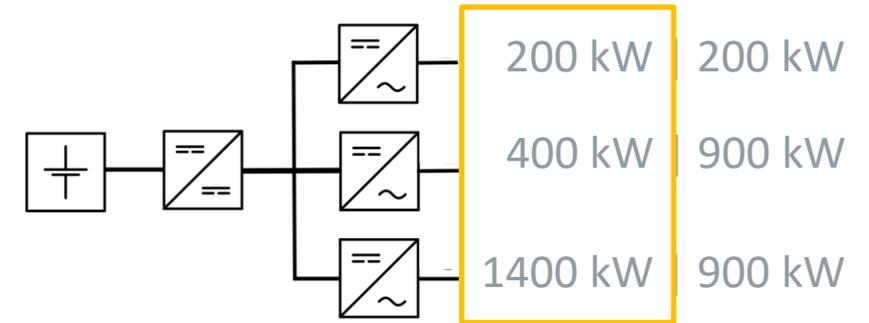
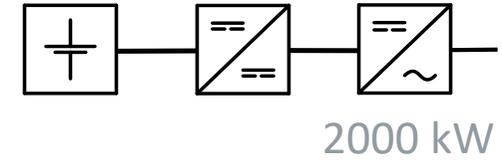
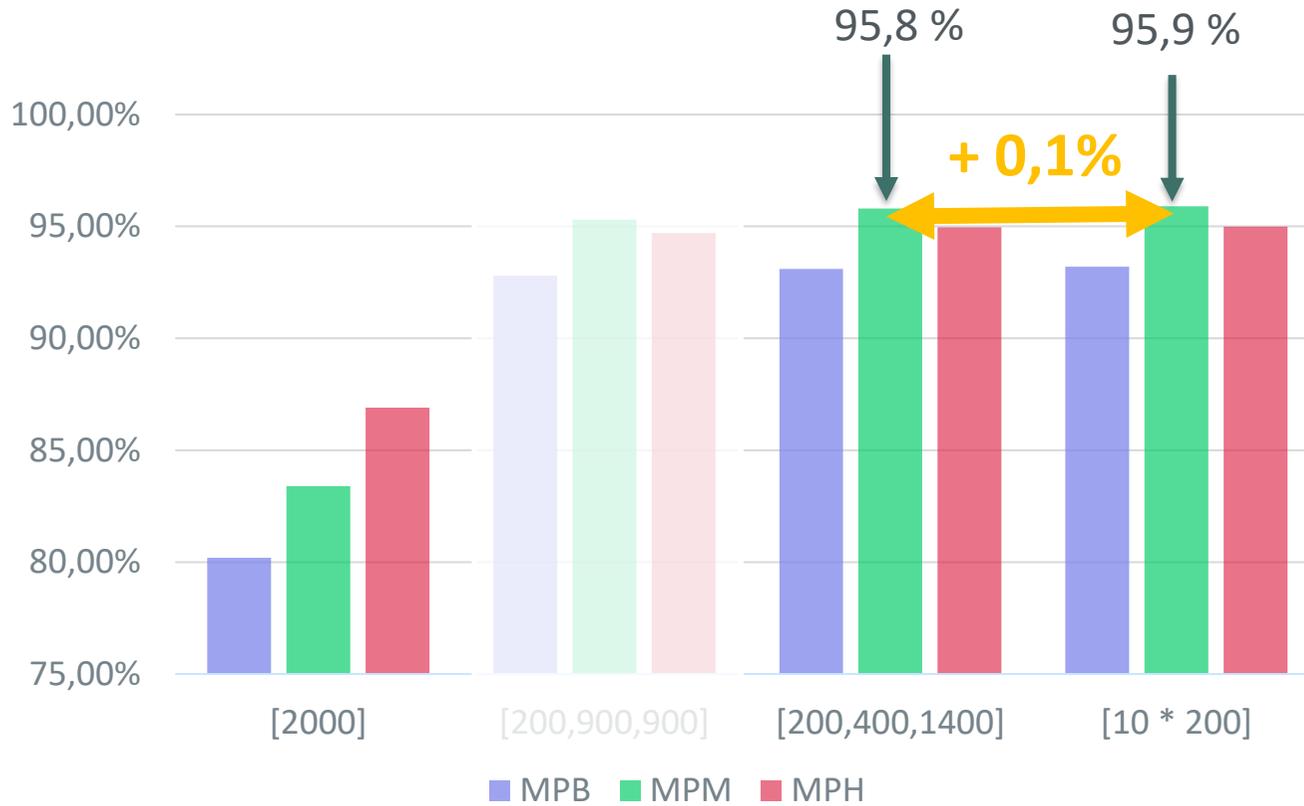
- Efficacité sur le profil de mission



# III.3 Tests de topologies modulaire

## A. Pertes dans les convertisseurs

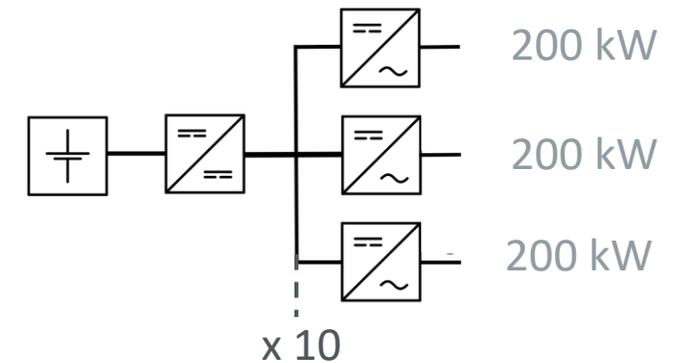
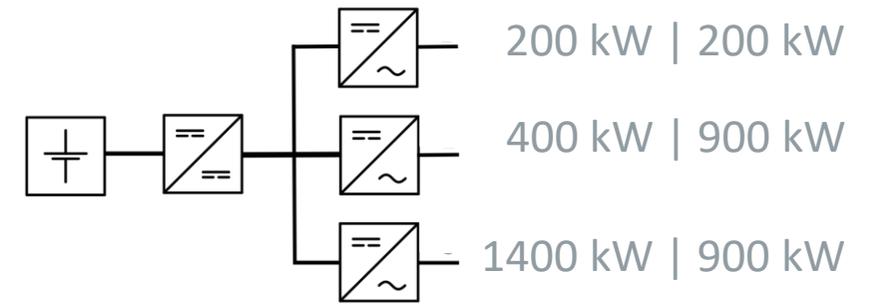
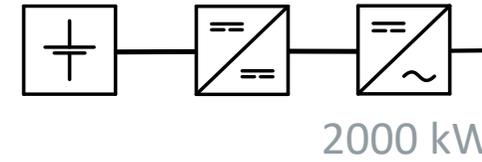
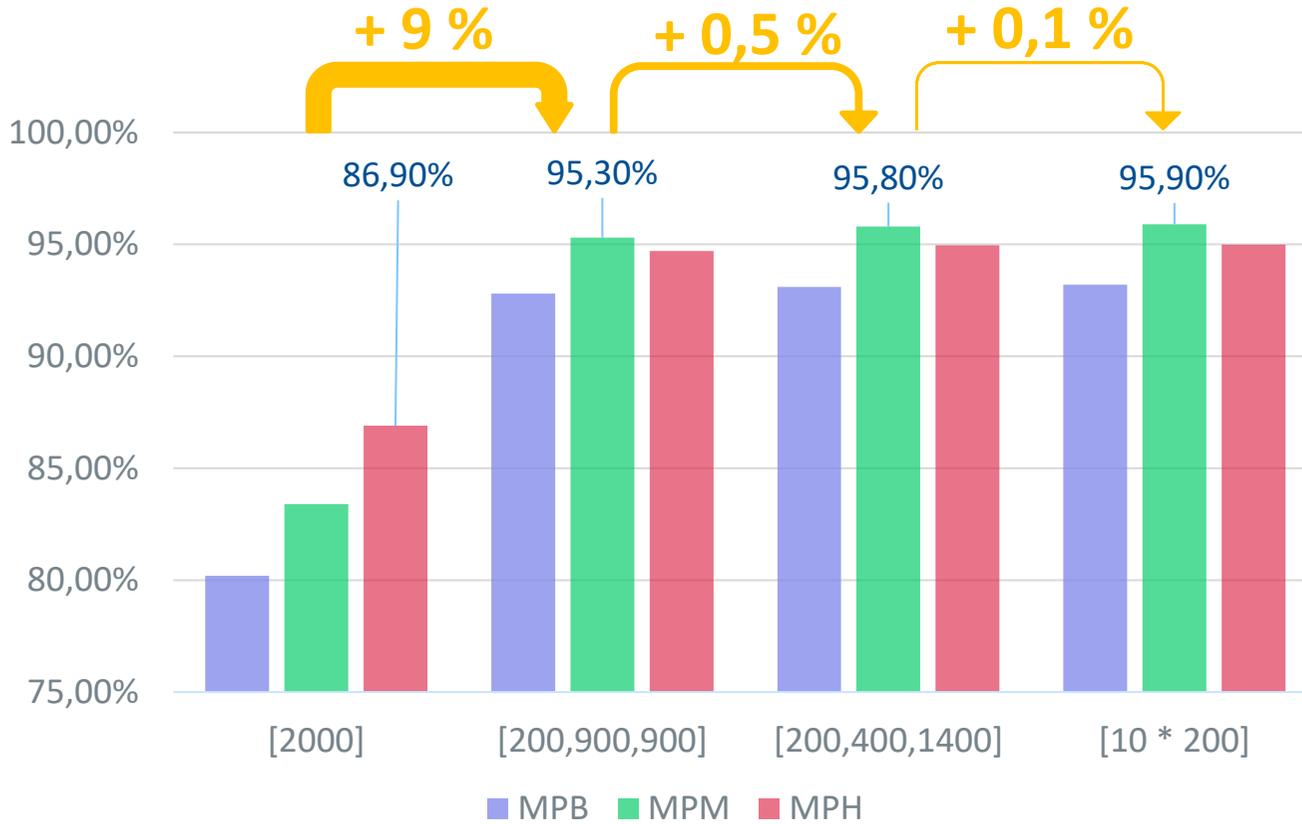
- Efficacité sur le profil de mission



# III.3 Tests de topologies modulaire

## A. Pertes dans les convertisseurs

- Efficacité sur le profil de mission



## III.2 Structure du PMS

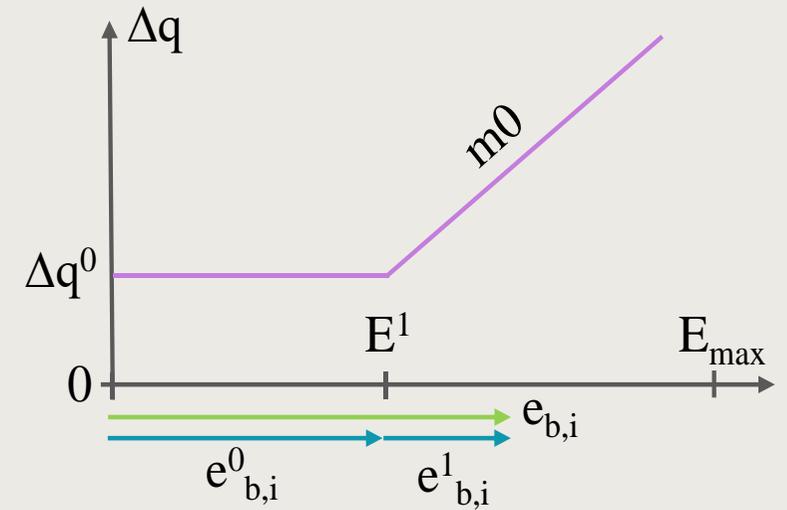
- Répartition optimale de l'énergie dans les batteries
  - Minimiser l'investissement du remplacement des batteries

$$F_B = \sum_b^B \sum_i^I \frac{\Pi^C * C_b * r_{b,i}}{(1+a)^{\frac{i}{12}}}$$

Annotations de l'équation :

- coût (pointe vers  $\Pi^C$ )
- capacité (pointe vers  $C_b$ )
- binaires de remplacement (pointe vers  $r_{b,i}$ )
- mois (pointe vers  $\frac{i}{12}$ )
- taux actualisation (pointe vers  $(1+a)^{\frac{i}{12}}$ )

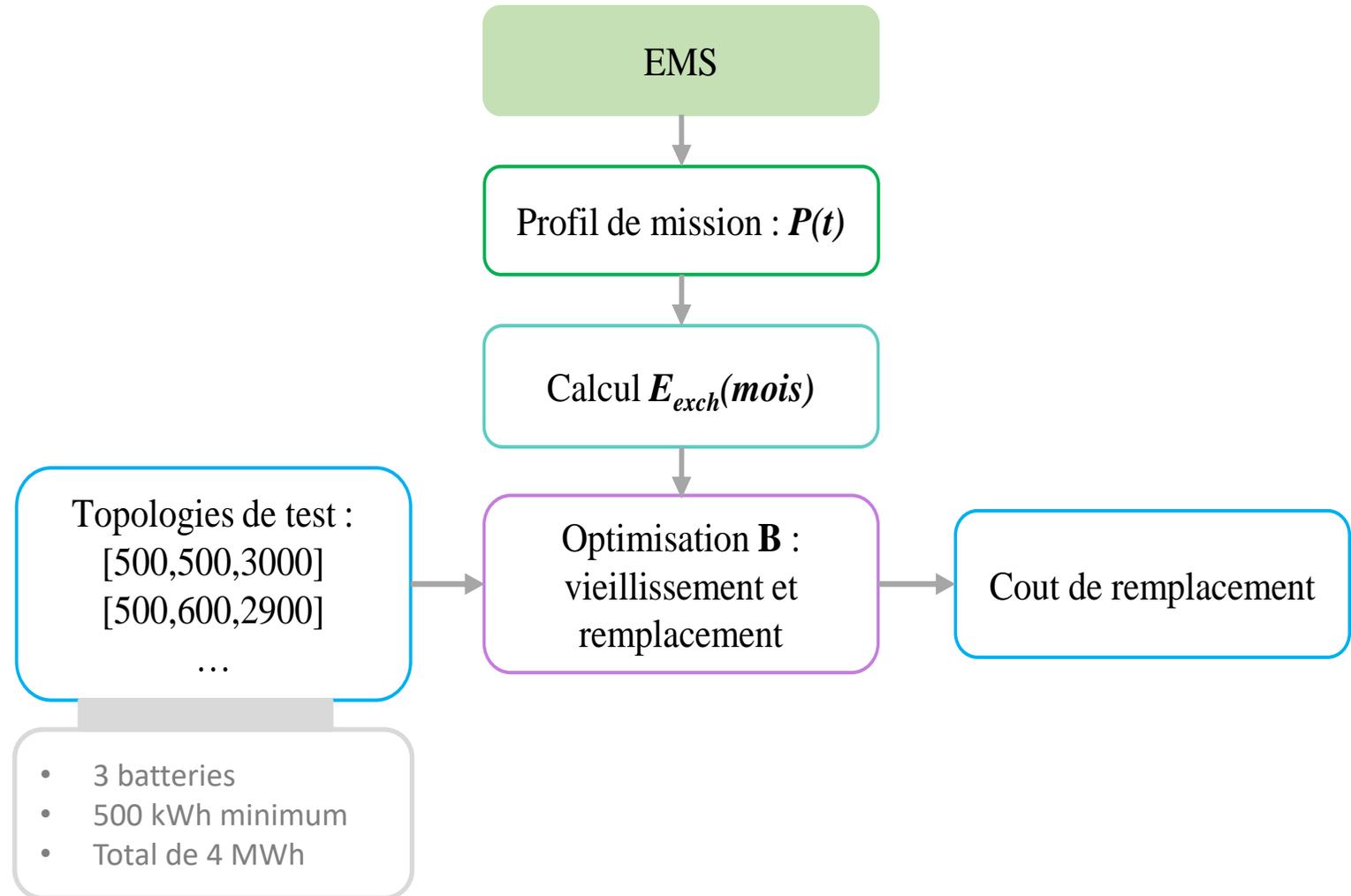
- Modèle de vieillissement simplifié :



# III.3 Tests de topologies modulaire



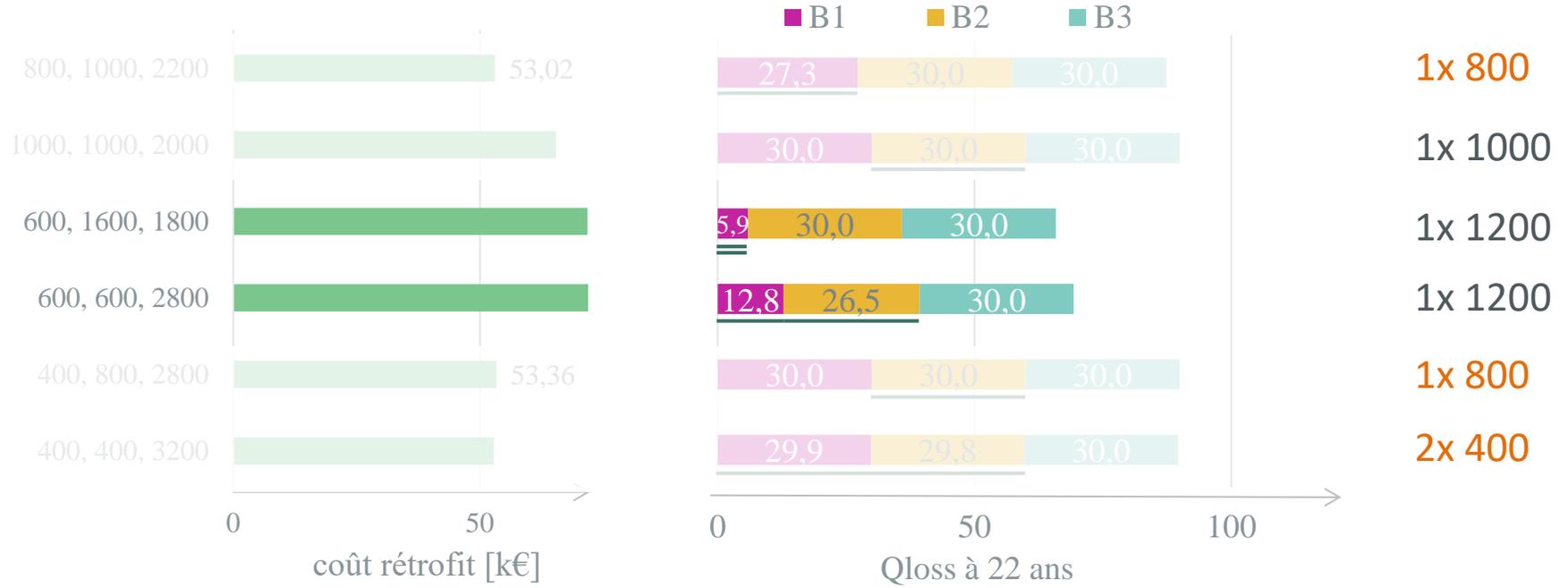
- Répartition optimale de l'énergie dans les batteries



# III.3 Tests de topologies modulaire



## B. Vieillesse des batteries



○ Étude :

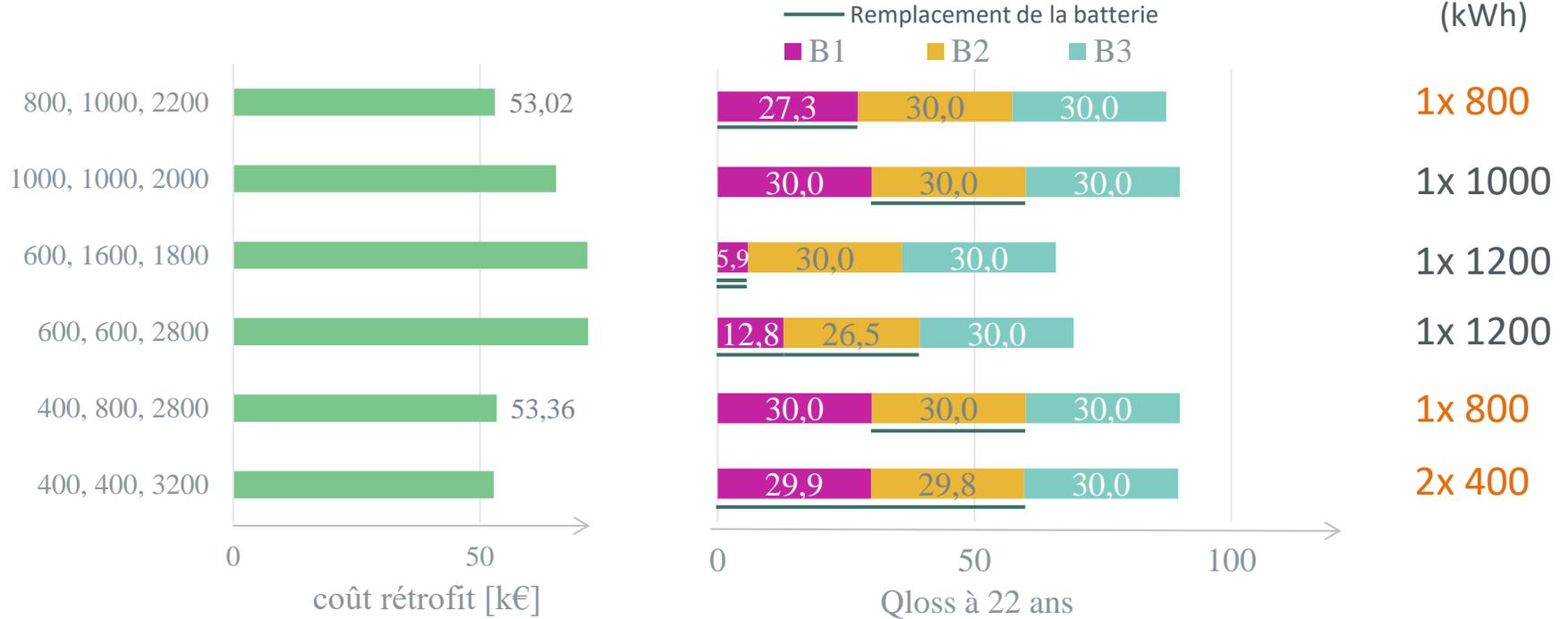
- FCR 2021
- Limit 70% SoH
- 50 cycles par mois max
- Durée projet 20 → 22 ans

○ Résultats :

- Coût de rétrofit optimum : remplacement de 800 kWh.
- Dimensionnement des batteries impact la **stratégie de remplacement** mais peu le coût final.
- La topologie modulaire optimale change selon la **durée de vie souhaitée**.

# III.3 Tests de topologies modulaire

## B. Vieillessement des batteries



### ○ Étude :

- FCR 2021
- Limit 70% SoH
- 50 cycles par mois max
- Durée projet 20 → 22 ans

### ○ Résultats :

- Coût de rétrofit optimum : remplacement de 800 kWh.
- Dimensionnement des batteries impact la **stratégie de remplacement** mais peu le coût final.
- La topologie modulaire optimale change selon la **durée de vie souhaitée**.

I. Introduction et Contexte

II. Energy Management System

III. Power Management System

**IV. Conclusions**



# IV. Conclusions

## Comment piloter une batterie multiservices ?

- **Méthode de contrôle** d'une batterie bi-service FCR et autoconsommation avec allocation temporelle.
  - Il y a un **intérêt économique** pour un industriel.
  - Batterie multiservices : actif utile localement et globalement (acceptabilité)

## Peut-on gérer l'état de santé de la batterie ?

- **Méthode de régulation** de l'état de santé de la batterie : suivi de profil idéal.
  - Oui, mais **l'impact sur les revenus** générés n'est pas négligeable.
  - Contrôle de vieillissement impacte le choix des services.

## Est-ce qu'une topologie modulaire est pertinente ?

- Oui, la modularité des convertisseurs permet une **amélioration de l'efficacité** sur le profil de mission proposé.
  - La réduction des pertes n'est pas proportionnelle au nombre de convertisseur.
- L'intérêt de la modularité et le dimensionnement des batteries dépend fortement de la **durée de vie souhaitée**.

# IV. Perspectives :



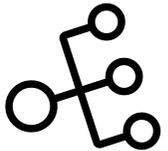
## ■ Méthode de contrôle de batterie multiservices :

- Adaptation dans le cadre **d'opérations d'autoconsommation collectives**.
- Élargir le fonctionnement avec de **l'allocation dynamique** (pas de 1MW) **et autre services** (aFRR, DA, ID, NEBEF).
- Prise en compte des **incertitudes** des marchés (prix, activation : travaux Ahmed Mohamed).
  
- Impact de **l'évolution** des prix de marchés et des réglementations (harmonisation européenne des réserves) sur le contrôle de la batterie, son vieillissement, son dimensionnement optimum et les profils de missions qui en découlent.



## ■ Vieillessement des batteries :

- **Modèle de vieillissement de pack** batterie.
- **Expérimentation** de vieillissement de cellules au delà de SoH 80 % pour des usages type stationnaires (<1C).



## ■ Étude de modularité :

- Généralisation à d'autres **profils de mission**.
- **Études des coûts** réels de la modularité (coût des pertes VS coût matériel).
- Jonction des optimisations proposée : limite de vieillissement par pack d'un point de vue transfert de puissance.

# IV. Conclusions

## Quelles sont les valorisations des contributions scientifiques ?

❖ **Brevet déposé N° FR2312977 :**

« Procédé de pilotage d'un système de stockage collectif d'énergie électrique »

❖ **Brevet déposé N° FR2312976 :**

« Méthode d'estimation et de régulation du vieillissement de la batterie dans les processus de gestion de l'énergie par allocation temporelle. »

❖ **Articles :**

L. Ferrando, R. Caire, D. Frey and . Jean-Marc-Geuene, "Integration of battery aging model in ancillary services and self-consumption combined strategies," 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), Rome, Italy, 2023, pp. 731-735, doi: 10.1049/icp.2023.0482.

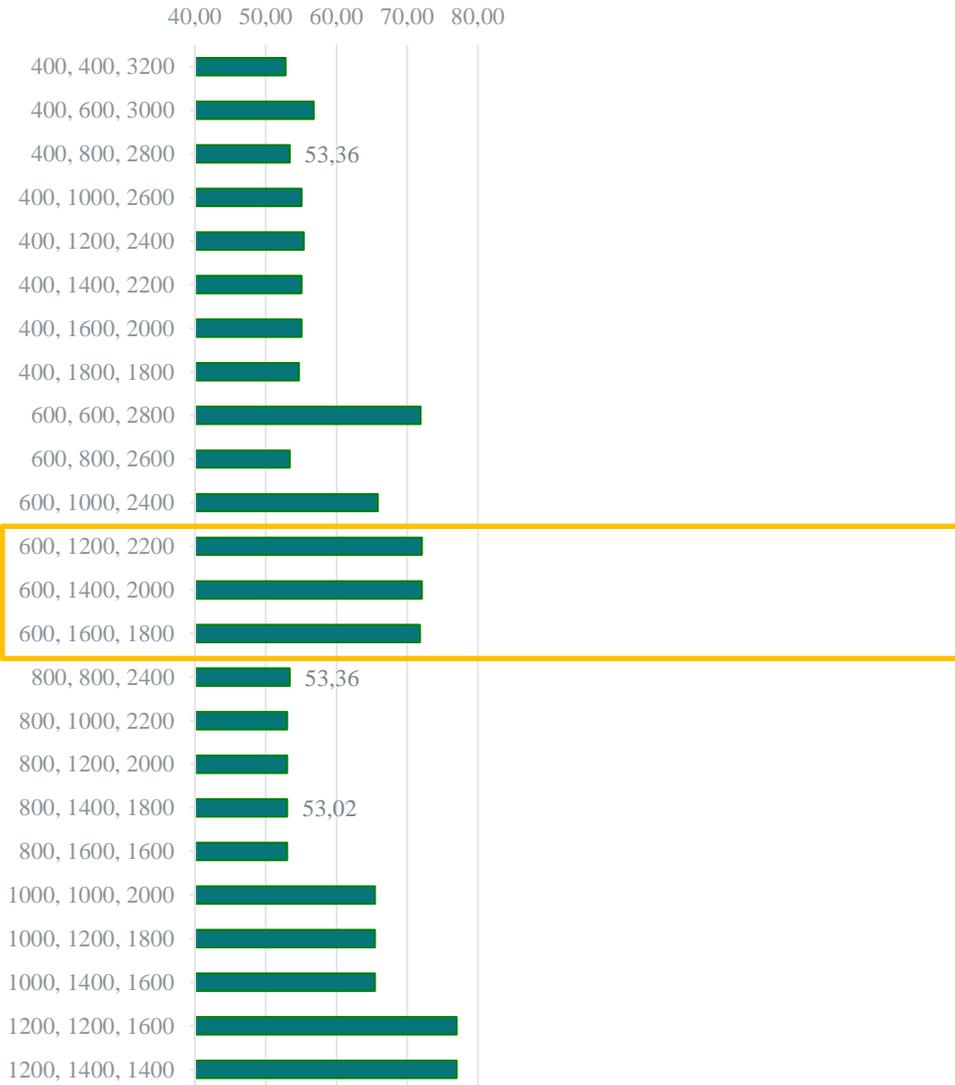
Soumission en attente dans « Journal of Energy Storage » (Juin 2024).

❖ **Développement d'un logiciel de test pour les études de Wattmen : WATTUS**



# III.3 Tests de topologies modulaire

## B. Vieillessement des batteries



coût actualisé de remplacemet [k€]

Topologie	B1	B2	B3
400, 400, 3200	18.25	16.42	0
400, 600, 3000	17.9 ; 18.42	0	0
400, 800, 2800	0	17.17	0
400, 1000, 2600	14.9 ; 18.9	0	0
400, 1200, 2400	14.9 ; 18.7	0	0
400, 1400, 2200	14.9 ; 18.9	0	0
400, 1600, 2000	14.9 ; 19	0	0
400, 1800, 1800	15 ; 19	0	0
600, 600, 2800	20.33	17.00	0
600, 800, 2600	0	17.17	0
600, 1000, 2400	0	17.33	0
600, 1200, 2200	16.3 ; 21.1	0	0
600, 1400, 2000	16.3 ; 21.2	0	0
600, 1600, 1800	16.3 ; 21.3	0	0
800, 800, 2400	17.17	0	0
800, 1000, 2200	17.25	0	0
800, 1200, 2000	17.25	0	0
800, 1400, 1800	17.25	0	0
800, 1600, 1600	17.25	0	0
1000, 1000, 2000	0	17.42	0
1000, 1200, 1800	17.42	0	0
1000, 1400, 1600	17.42	0	0
1200, 1200, 1600	17.67	0	0
1200, 1400, 1400	17.67	0	0