Loi de gestion d'énergie appliquée à un véhicule hybride parallèle pourvu d'un double système de stockage électrique

T. MIRO PADOVANI, A. KETFI-CHERIF

G. COLIN, Y. CHAMAILLARD

Système étudié

✓ Système Mild hybride

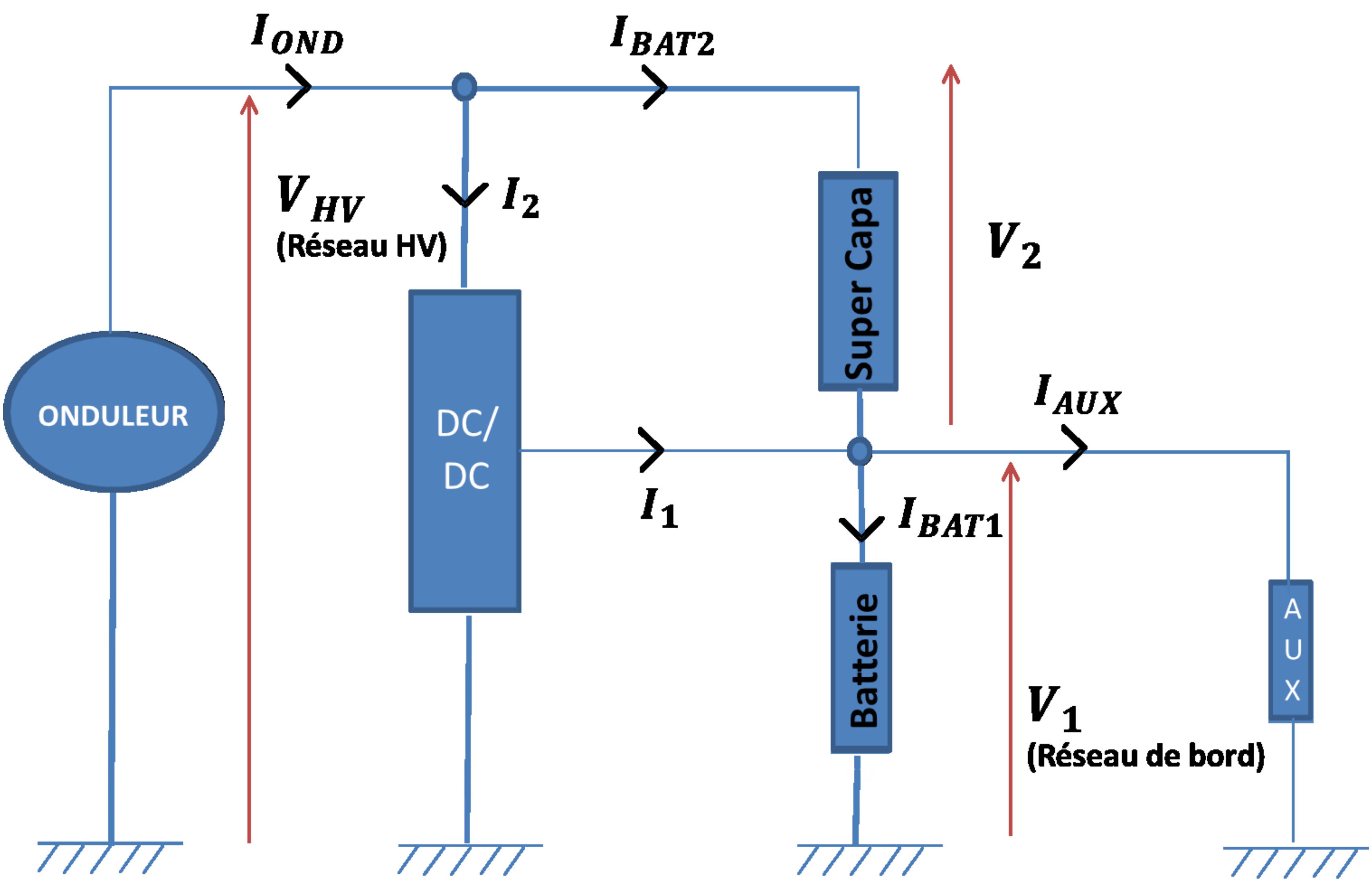
- Machine électrique :
  - Alterno-demarreur renforcé
  - Relié au vilebrequin
  - Faible puissance : 10 kW environ

- Stockage électrique:
  - Pack batterie Li-ion 14V

  Associé en série avec :
  - Pack de super capacités 36V (Double layer capacitor (DLC))

  Reliés par
  - Un convertisseur DCDC réversible
  - Tension du réseau de traction ≈ 50V
  - Niveau d'énergie embarquée : faible

Schéma électrique



Mise en équations du système

$$\begin{cases} V_1.I_1 = \eta.V_{HV}.I_2 \\ I_{AUX} = \dfrac{P_{AUX}}{V_1} \\ I_{OND} = \dfrac{P_{ond}}{V_{HV}} \\ P_{DCDC} = I_1.V_1 \\ I_{BAT2} = I_{OND} - I_2 \\ I_{BAT1} = I_1 + I_{BAT2} - I_{AUX} \\ V_{HV} = V_1 + V_2 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} I_2 = \dfrac{P_{DCDC}}{\eta.V_{HV}} \\ I_{BAT2} = \dfrac{P_{ond}}{V_{HV}} - I_2 \\ I_{BAT1} = \dfrac{P_{DCDC}}{V_1} + I_{BAT2} - \dfrac{P_{AUX}}{V_1} \end{cases}$$

$$\boldsymbol{u} = \begin{Bmatrix} P_{ond} \\ P_{DCDC} \end{Bmatrix};\ P_{AUX}$$

$$\begin{cases} V_1 = OCV_{BAT1} + R_{BAT1}.I_{BAT1} \\ V_2 = OCV_{BAT2} + R_{BAT2}.I_{BAT2} \\ V_{HV} = V_1 + V_2 \end{cases}$$

Dynamique des états

$$\boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} SOE_{BAT1} \\ SOE_{BAT2} \end{Bmatrix}$$

$$S\dot{O}E_{BAT1}(x_1, \boldsymbol{u}) = \frac{OCV_{BAT1}(x_1).\, I_{BAT1}(x_1, \boldsymbol{u})}{Emax_{BAT1}}$$

$$SOE_{BAT1}(t) = SOE_{BAT1}(t = t_0) + \frac{1}{Emax_{BAT1}} \int_{t0}^{t} OCV_{BAT1}\,(t).\, I_{BAT1}(t).\, dt$$

$$S\dot{O}E_{BAT2}(x_2, \boldsymbol{u}) = \frac{OCV_{BAT2}(x_2).\, I_{BAT2}(x_2, \boldsymbol{u})}{Emax_{BAT2}}$$

$$SOE_{BAT2}(t) = SOE_{BAT2}(t = t_0) + \frac{1}{Emax_{BAT2}} \int_{t0}^{t} OCV_{BAT2}\,(t).\, I_{BAT2}(t).\, dt$$

Problème de commande optimale

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{fuel}(\boldsymbol{u}(t), t).\,dt + \phi(\boldsymbol{x}(t_f))$$

Avec :

$$\phi\left(\boldsymbol{x}(t_f)\right) = \begin{cases} 0 \; si \; \boldsymbol{x}(t_f) \geq \; \boldsymbol{x}_{Target} \\ \infty \; sinon \end{cases}$$

$$\boldsymbol{u} = \begin{Bmatrix} P_{ond} \\ P_{DCDC} \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} SOE_{BAT1} \\ SOE_{BAT2} \end{Bmatrix}$$

Sujet à :

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), t) \\ \boldsymbol{u} \in \mu(t) \\ \boldsymbol{x} \; \in \chi \\ \boldsymbol{x}(t=0) = \boldsymbol{x_0} \end{cases}$$

Expression des contraintes

✓ **Contraintes sur les actionneurs**

$$\underline{P}_{ond} \leq P_{ond} \leq \overline{P}_{ond}$$
$$\underline{P}_{DCDC} \leq P_{DCDC} \leq \overline{P}_{DCDC}$$

✓ **Contraintes sur les états**

$$\underline{SoE}_{BAT1} \leq SoE_{BAT1} \leq \overline{SoE}_{BAT1}$$
$$\underline{SoE}_{BAT2} \leq SoE_{BAT2} \leq \overline{SoE}_{BAT2}$$

✓ **Contraintes couplées commandes-états**

$$\underline{V}_1 \leq V_1 \leq \overline{V}_1$$
$$\frac{\underline{V}_1 - OCV_{BAT1}(x_1)}{R_{BAT1}(x_1)} \leq I_{BAT1}(\boldsymbol{u}) \leq \frac{\overline{V}_1 - OCV_{BAT1}(x_1)}{R_{BAT1}(x_1)}$$

$$\frac{\underline{P}_{BAT1}}{V_1} \leq I_{BAT1}(\boldsymbol{u}) \leq \frac{\overline{P}_{BAT1}}{V_1}$$

$$\underline{P}_{BAT2} \leq P_{BAT2}(\boldsymbol{u}) \leq \overline{P}_{BAT2}$$

Formalisation des contraintes de commande

$$\begin{cases} \underline{P}_{DCDC} \leq P_{DCDC} \leq \overline{P}_{DCDC} \\ \underline{P}_{ond} \leq P_{ond} \leq \overline{P}_{ond} \\ \dfrac{\underline{P}_{BAT2}}{V_2} V_{HV} \leq P_{ond} - \dfrac{1}{\eta} P_{dcdc} \leq \dfrac{\overline{P}_{BAT2}}{V_2} V_{HV} \\ (\underline{P}_{BAT1} + P_{AUX}) \dfrac{V_{HV}}{V_1} \leq P_{ond} + \left(\dfrac{V_{HV}}{V_1} - \dfrac{1}{\eta} \right) P_{dcdc} \leq (\overline{P}_{BAT1} + P_{AUX}) \dfrac{V_{HV}}{V_1} \end{cases}$$

- ✓ **Ecriture générale** ➡

$$\begin{cases} \underline{x} \leq x \leq \overline{x} \\ \underline{y} \leq y \leq \overline{y} \\ \underline{z} \leq y + \alpha x \leq \overline{z} \\ \underline{w} \leq y + \beta x \leq \overline{w} \end{cases} \quad \text{avec,} \quad \boldsymbol{u} = \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$$

Formalisation des contraintes de commande

$$\begin{cases} \underline{x} \leq x \leq \overline{x} \\ \underline{y} \leq y \leq \overline{y} \\ \underline{z} \leq y + \alpha x \leq \overline{z} \\ \underline{w} \leq y + \beta x \leq \overline{w} \end{cases}$$

- ✓ **Expression des limites sur y en fonction de x**

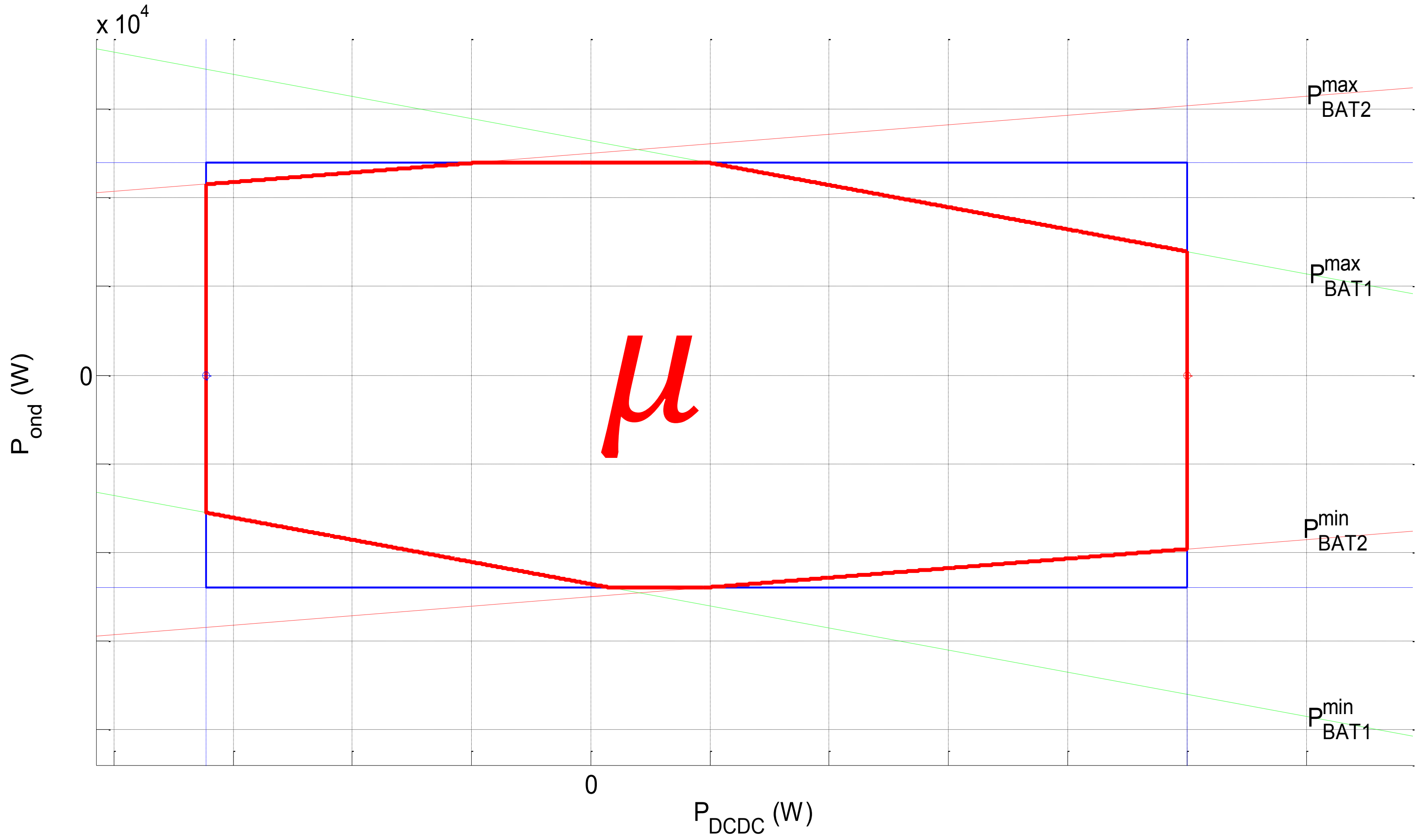
$$\max\left(\underline{y}, \underline{z} - \alpha x, \underline{w} - \beta x\right) \leq y \leq \min(\overline{y}, \overline{z} - \alpha x, \overline{w} - \beta x)$$

- ✓ **On en déduit les limitations sur x**

$$\max\left(\underline{x}, \frac{\underline{w} - \overline{y}}{\beta}, \frac{\overline{z} - \underline{y}}{\alpha}, \frac{\underline{w} - \overline{z}}{\beta - \alpha}\right) \leq x \leq \min\left(\overline{x}, \frac{\overline{w} - \underline{y}}{\beta}, \frac{\underline{z} - \overline{y}}{\alpha}, \frac{\underline{z} - \overline{w}}{\alpha - \beta}\right)$$

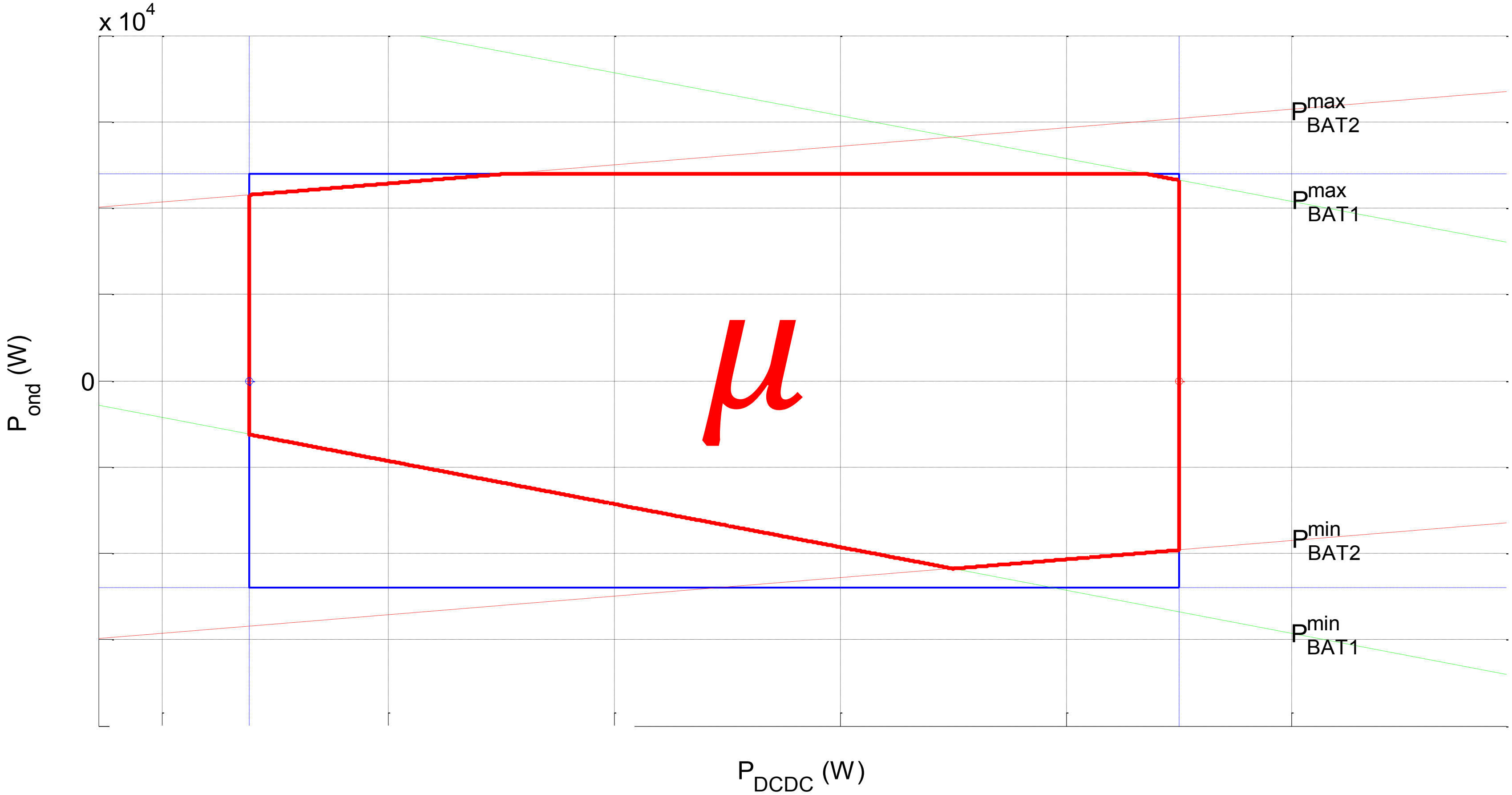
Représentation du domaine de commande

✓ **Paramètres nominaux**



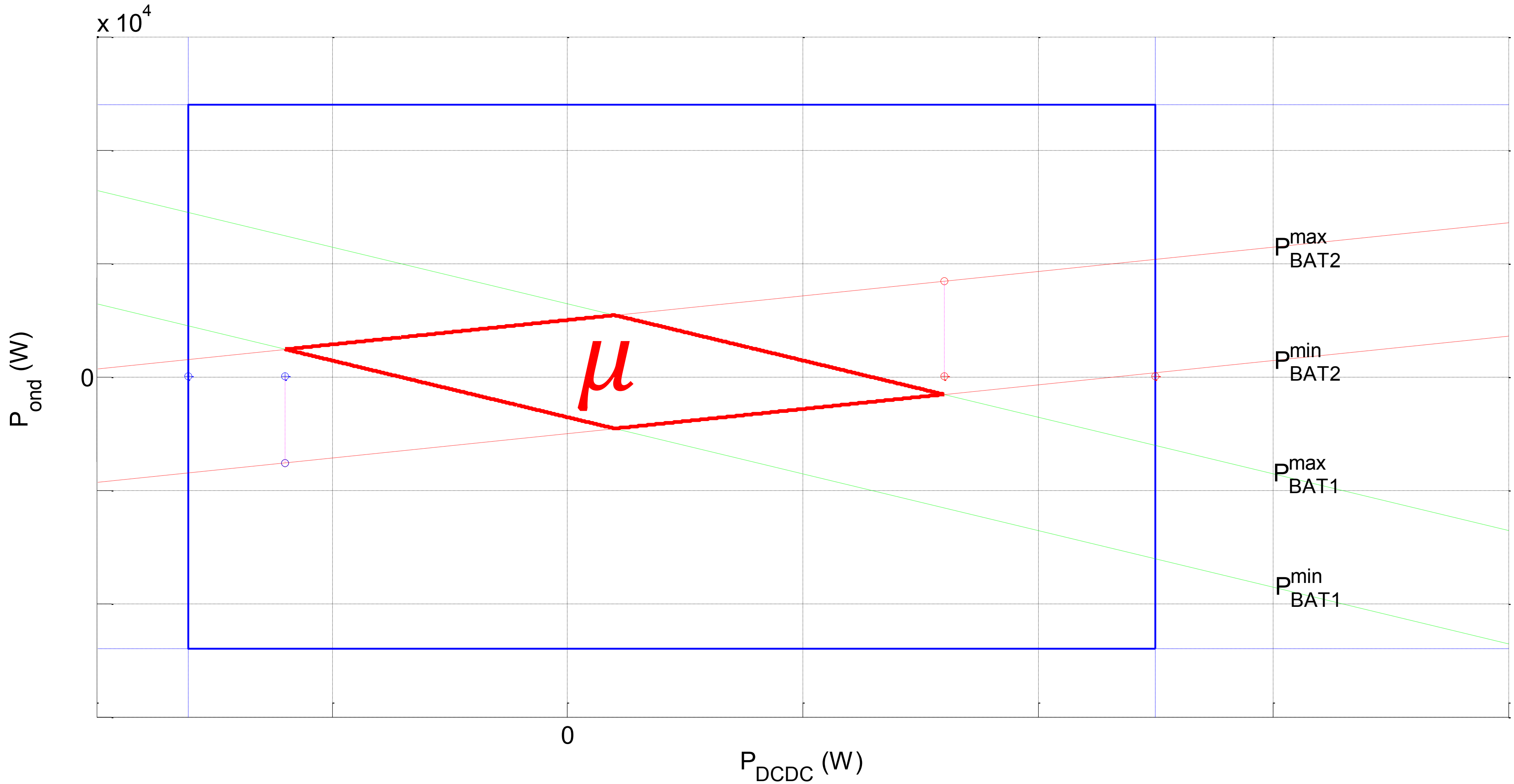
Représentation du domaine de commande

- ✓ **Forte consommation accessoires sur le 14V**



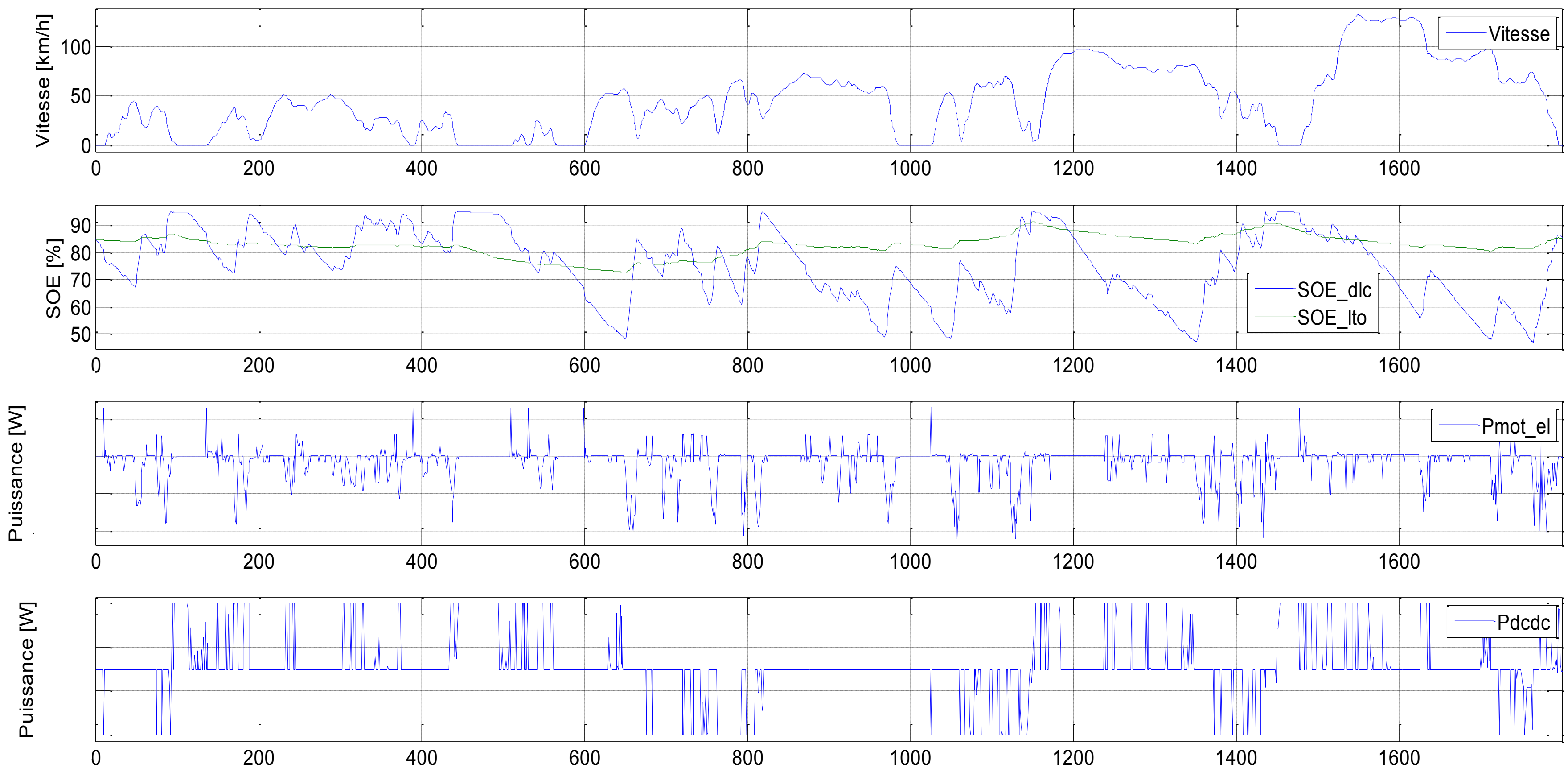
Représentation du domaine de commande

✓ **Conditions dégradées**



Solution optimale

- ✓ **Résolution du problème de commande optimale hors ligne, via la programmation dynamique**



Résolution en-ligne

✓ Commande en ligne retenue :

- Application de l'equivalent consumption minimization strategy (ECMS)
- Stratégie dérivée du principe du Maximum de Pontryagin

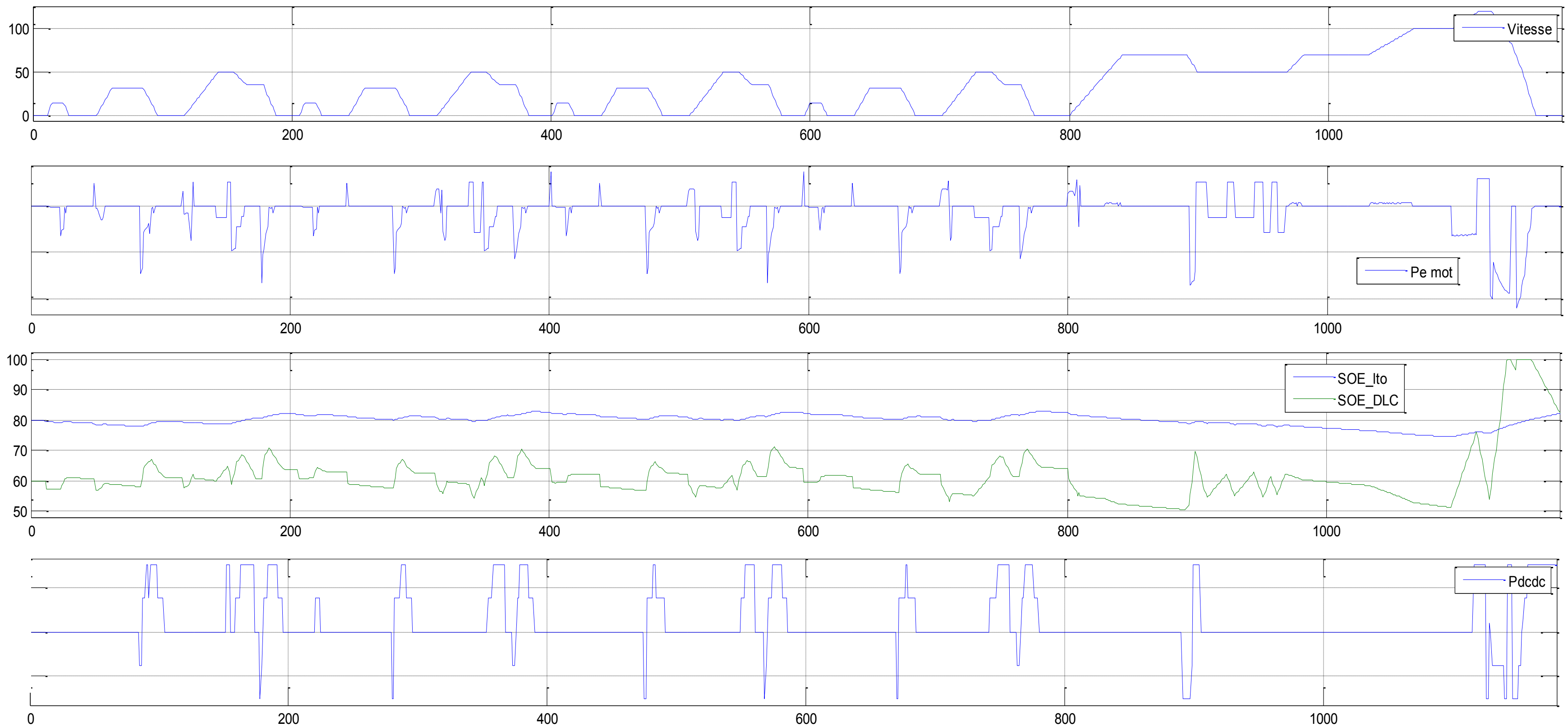
$$\boldsymbol{u}_{opt}(t) = argmin(H(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{x}, t))$$

$$H(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{x}, t) = \dot{m}_{carb}(u_1, t).PCI + s_1(t).P_{ech1}(\boldsymbol{u}, x_1, t) + s_2(t).P_{ech2}(\boldsymbol{u}, x_2, t)$$

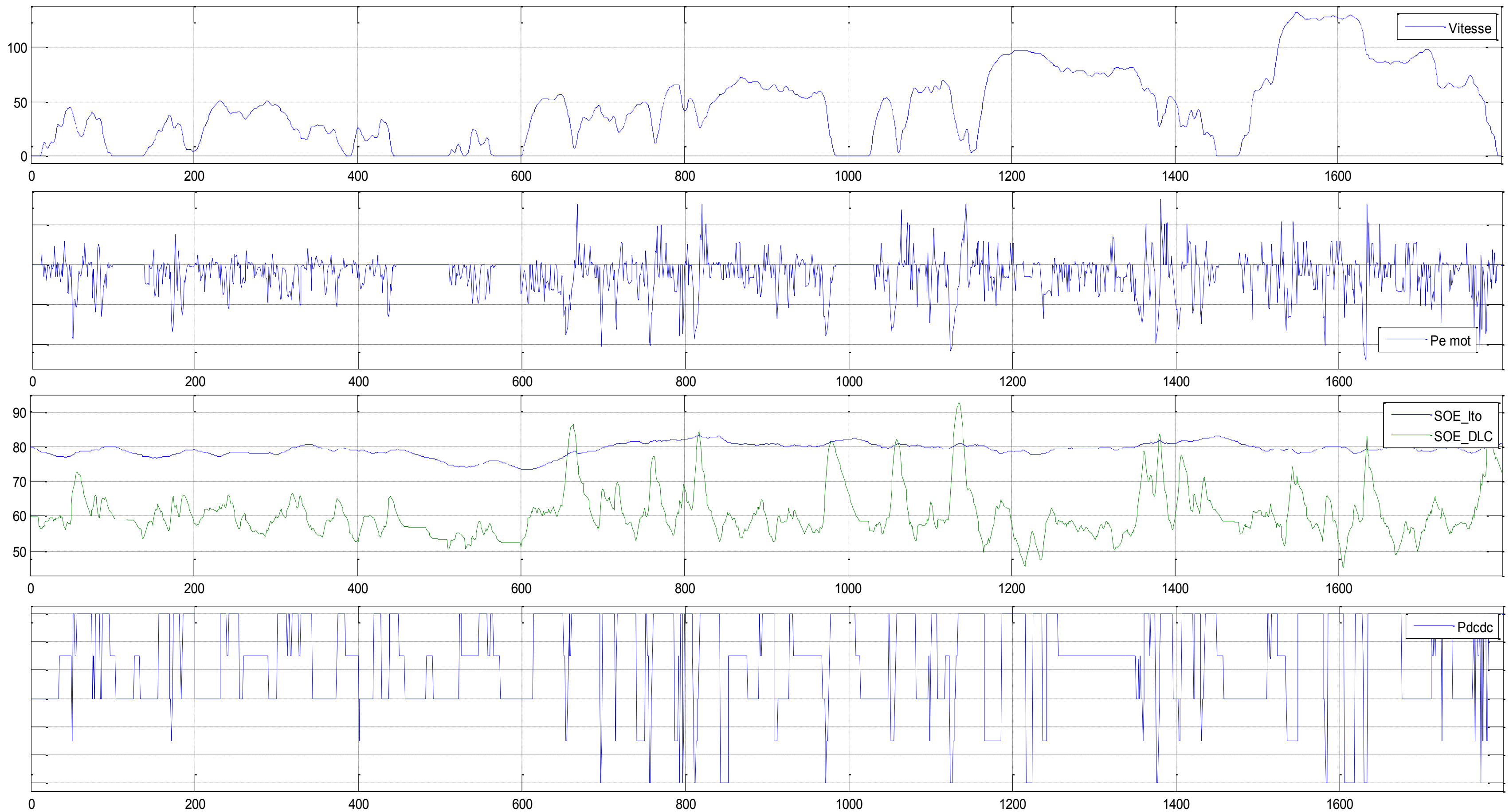
$$\boldsymbol{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{ond} \\ P_{DCDC} \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} SoE_{BAT1} \\ SoE_{BAT2} \end{Bmatrix},$$

Avec adaptation en ligne des facteurs d'équivalence s_1 *et* s_2 pour réguler les SoE autour d'une valeur cible

Commande en ligne : résultats

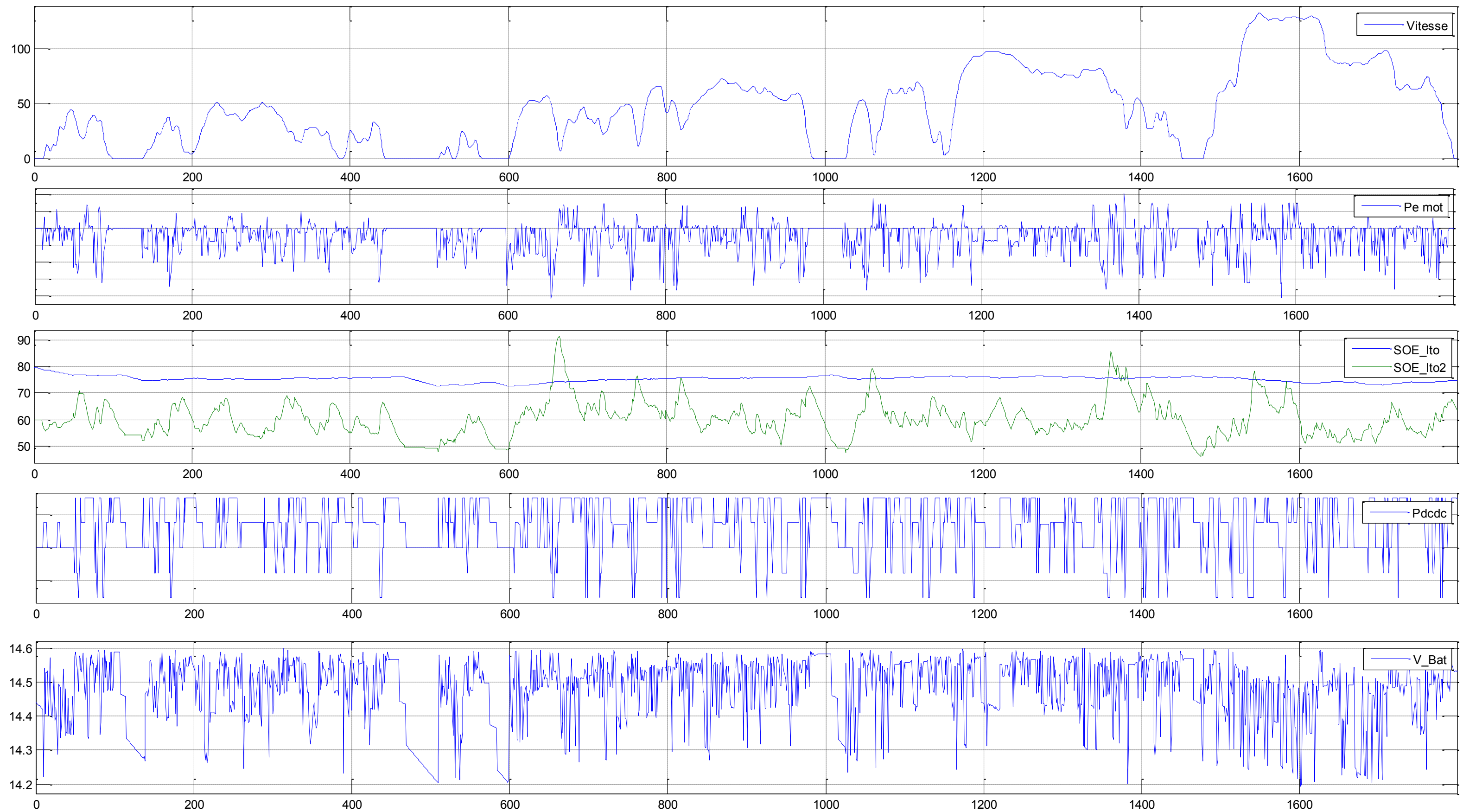


Commande en ligne : résultats



Commande en ligne : résultats

✓ **Cas de contraintes fortes sur la puissance batterie $(14,2 \leq V_1 \leq 14,6)$**



Conclusion

- ✓ **Problème de commande optimale :**
  - ➢ 2 commandes, 2 états
  - ➢ Contraintes couplées commandes-états

- ✓ **Intérêt d'évaluer à priori le domaine de commande**

- ✓ **L'optimisation énergétique contribue à préserver l'état de santé de la batterie Li-ion**

- ✓ **ECMS en ligne bien adaptée à la commande du système à 2 états**

Merci pour votre attention