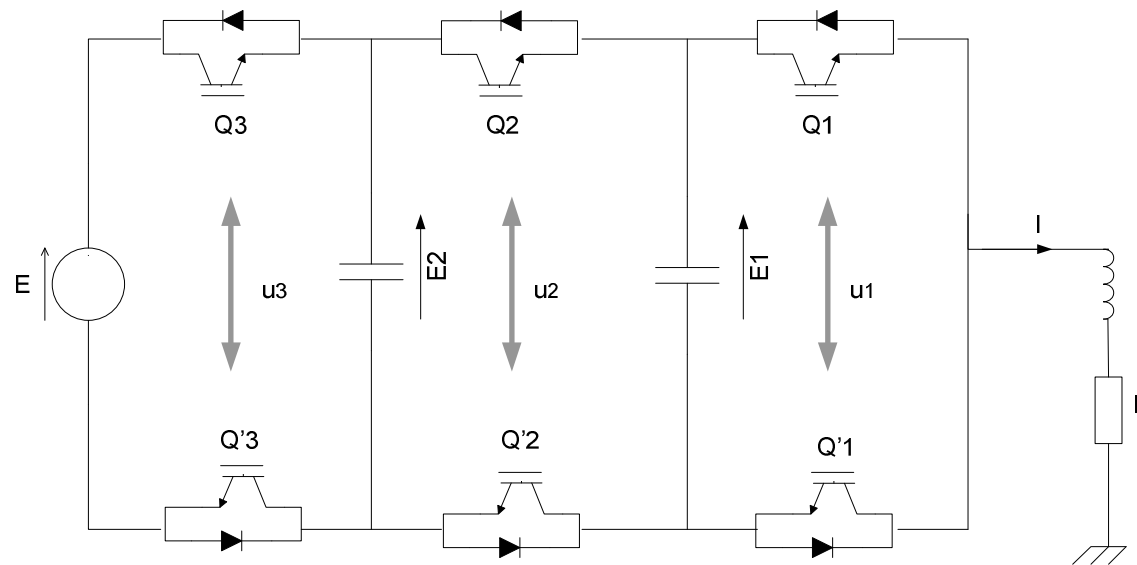

Observateur adaptatif associé à une commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire

Mohamed Trabelsi (AMPERE)

Malek Ghanes (ECS)

Convertisseur à 3cellules de commutation lié à une charge passive de type RL



Avec:

- I le courant de charge
- E_1 et E_2 les tensions aux bornes des condensateurs
- u_i la commande de l'interrupteur Q_i
- E la tension d'alimentation continue

- ❑ **Commande prédictive**
 - **Objectif: asservir le courant dans la charge**
 - **Contrainte: maîtriser et maintenir les tensions aux bornes des condensateurs à des niveaux bien définis**

- ❑ **Observateur adaptatif**
 - **Objectif: estimer les tensions aux bornes des condensateurs à partir de la mesure du courant de charge**

- ❑ **Mise en oeuvre: banc expérimental, carte dSpace**

- ❑ **Position du problème**

- ❑ **Commande prédictive directe**

- ❑ **Conception de l'observateur adaptatif**

- ❑ **Résultats expérimentaux**

- ❑ **Conclusions et perspectives**

- ❑ **Position du problème**

- ❑ **Commande prédictive**

- ❑ **Conception de l'observateur adaptatif**

- ❑ **Résultats expérimentaux**

- ❑ **Conclusions et perspectives**

□ **Avantages:**

- **Mieux répartir la tension totale au niveau de chaque cellule de commutation**
- **Diminuer les contraintes harmoniques sur la tension de charge (multiniveaux)**

□ **Inconvénients:**

- **Commande délicate (Maîtrise des tensions des condensateurs)**
- **Utilisation de capteurs de tensions flottantes pour mesurer les tensions aux bornes des condensateurs**
- **Problème de coût si le nombre de cellules de commutation est grand**

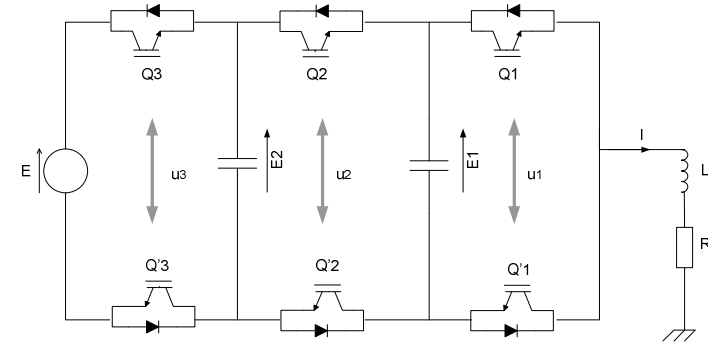
□ **Solution:**

- **Commande prédictive directe**
- **Observateur adaptatif: reconstruire ces tensions à partir de la mesure du courant de charge**

- ❑ Position du problème
- ❑ **Commande prédictive**
- ❑ Conception de l'observateur adaptatif
- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Conclusions et perspectives

□ **Modèle dynamique:**

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_1(t) \\ \dot{E}_2(t) \\ \dot{I}(t) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{u_2 - u_1}{C_1} \\ 0 & 0 & \frac{u_3 - u_2}{C_2} \\ \frac{u_1 - u_2}{L} & \frac{u_2 - u_3}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}}_{A(u)} \cdot \begin{pmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ I(t) \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \cdot u_3 \end{pmatrix}}_{B(u)} \cdot E$$



□ **Configurations: 2 états de commutation pour chaque cellule**

➔ **8 configurations possibles**

$$\underline{U}_i(t), i = 1, \dots, 8 \text{ avec } U_i = [u_3 \ u_2 \ u_1]$$

➔
$$\dot{\underline{X}}_i(t) = A_i \cdot \underline{X}(t) + B_i$$

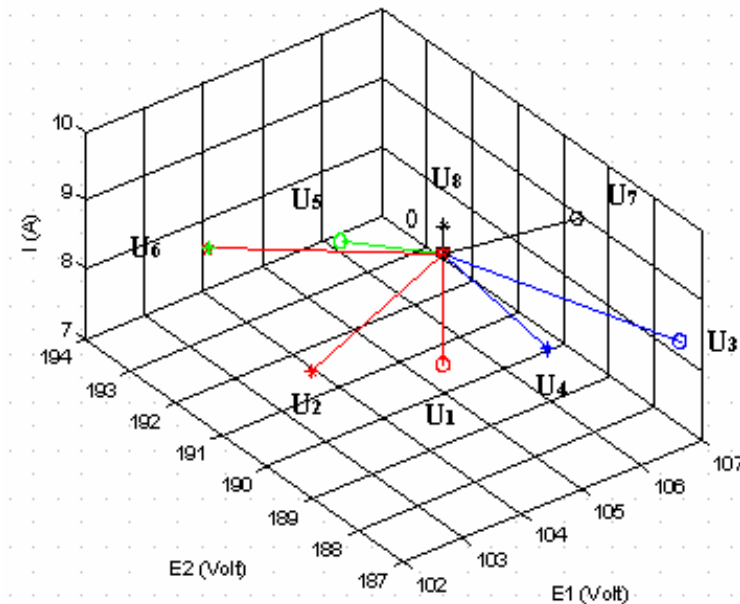
□ **Modèle discret:**

$$\underline{X}_i(k+1) = \phi_i(T_e) \cdot \underline{X}(k) + \Psi_i(T_e) \cdot B_i$$

□ Modèle simplifié:

- Contrainte temps réel
- Période d'échantillonnage petite: les trajectoires dans l'espace d'état sont considérées rectilignes

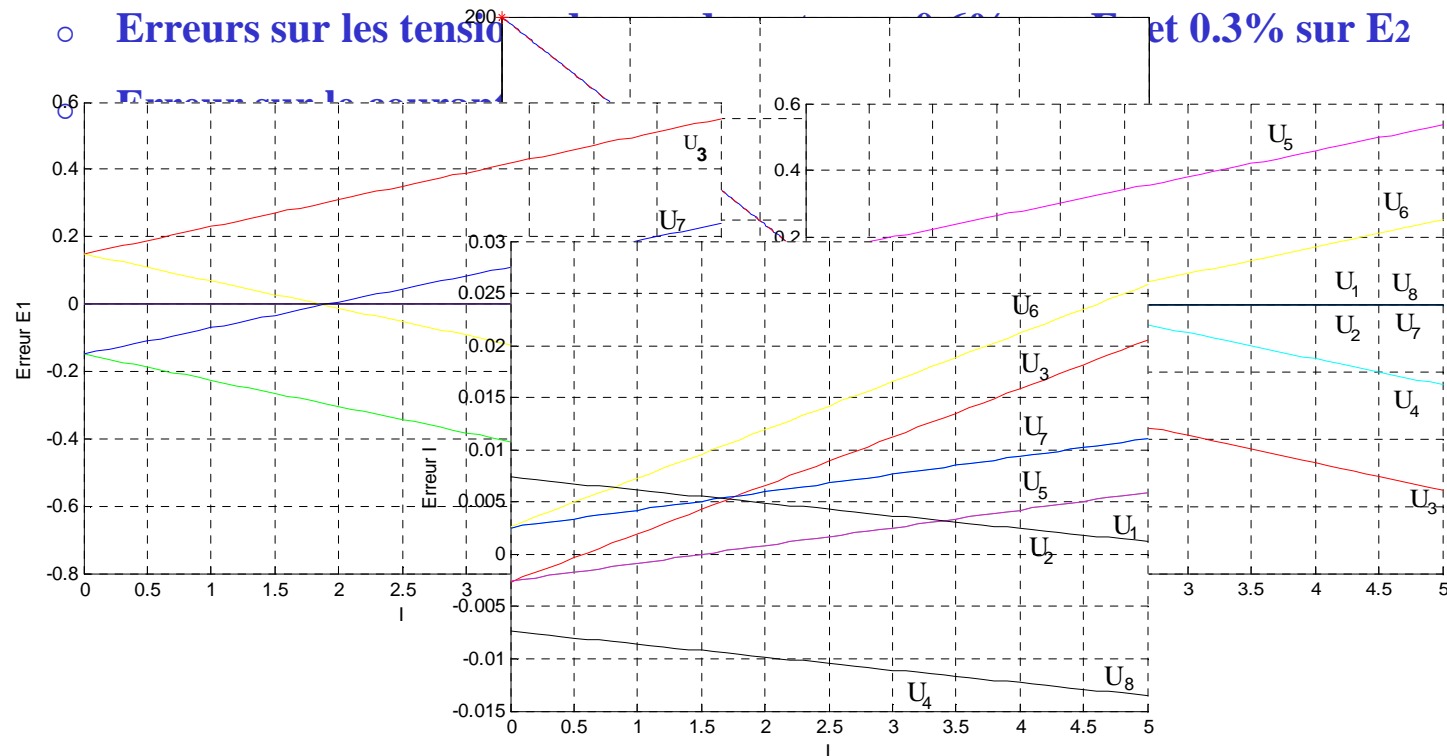
$$\tilde{\underline{X}}_i(k+1) = \underline{X}(k) + \underline{\dot{X}}_i(t) \cdot T_e$$



❑ Validité du modèle simplifié:

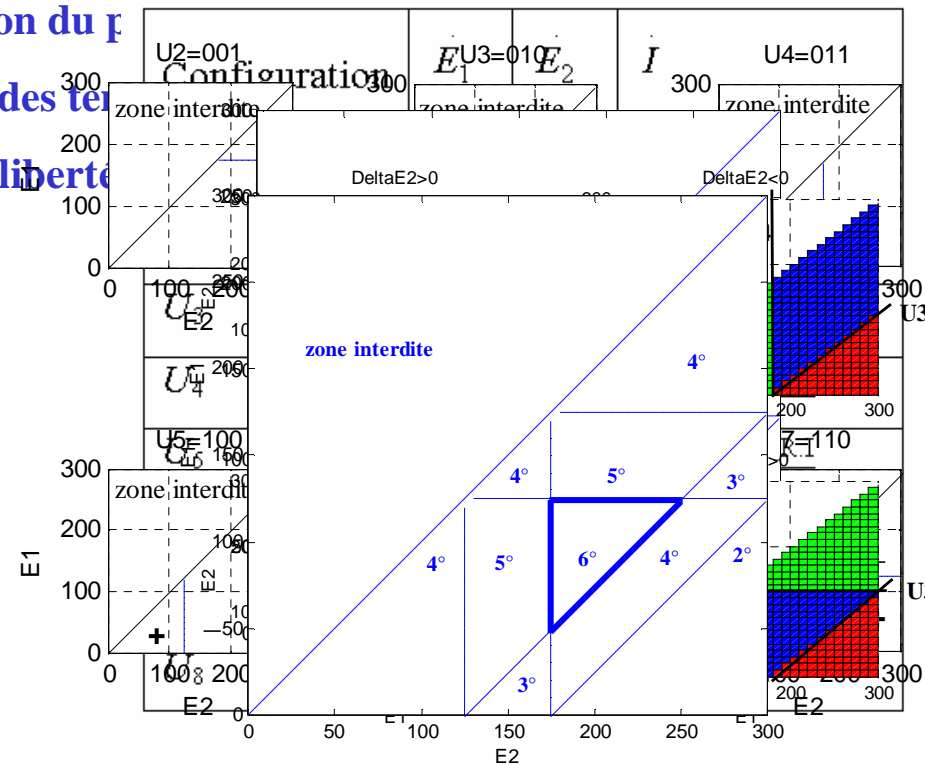
- Comparer le modèle discret et le modèle simplifié

- Erreurs sur les tensions E_1 et E_2 et 0.3% sur E_2



❑ Choix des tensions de référence:

- Référence classique: $E_{1c}=E/3$ et $E_{2c}=2.E/3$
- Evolution des variables d'état
- Iso accroissement du courant de charge
- Délimitation du p
- Evolution des te
- Degrés de liberté



- **Stratégie de commande: pour chaque période d'échantillonnage T_e**
 - **Mesure des tensions des condensateurs $E_1(k)$, $E_2(k)$ et du courant de charge $I(k)$**
 - **Prédiction du vecteur d'état $\tilde{\underline{X}}_i(k+1) = [\tilde{E}_{1i}(k+1) \quad \tilde{E}_{2i}(k+1) \quad \tilde{I}_i(k+1)]^T$ pour les 8 états de commande possibles**
 - **Choix de la configuration \underline{U}_i permettant de minimiser la distance entre $\tilde{\underline{X}}_i(k+1)$ et l'état de référence $\underline{X}_c = [E_{1c} \quad E_{2c} \quad I_c]^T$**
 - **Application de la configuration choisie durant la prochaine période d'échantillonnage**

❑ Problème:

- Facteur d'échelle des composantes du vecteur d'état

❑ Solution:

- Normalisation des variables d'état

$$\begin{cases} \Delta E_1 = \left| \max(\tilde{E}_{1i}(k+1)) - \min(\tilde{E}_{1i}(k+1)) \right| \\ \Delta E_2 = \left| \max(\tilde{E}_{2i}(k+1)) - \min(\tilde{E}_{2i}(k+1)) \right| \\ \Delta I = \left| \max(\tilde{I}_i(k+1)) - \min(\tilde{I}_i(k+1)) \right| \end{cases}$$

❑ Calcul de la distance

$$\text{dist}_i = \sqrt{\left(\frac{E_{1c} - \tilde{E}_{1i}}{\Delta E_1}\right)^2 + \left(\frac{E_{2c} - \tilde{E}_{2i}}{\Delta E_2}\right)^2 + \left(\frac{I_c - \tilde{I}_i}{\mu \cdot \Delta I}\right)^2}$$

- ❑ Position du problème
- ❑ Commande prédictive
- ❑ **Conception de l'observateur adaptatif**
- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Conclusions et perspectives

□ Rappel sur l'observateur adaptatif :

- **Système affine en l'état:**

$$\Sigma_{SA} : \begin{cases} \dot{x}(t) = A(u(t))x(t) + g(u(t), y(t)) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

où $x \in \mathbb{R}^n$ est l'état, $u \in \mathbb{R}^m$ est la commande et $y \in \mathbb{R}^p$ est la sortie.

La matrice A dépend de l'entrée et $g(u(t), y(t))$ est une injection entrée-sortie $g(u(t), y(t))$.

Si l'entrée u est persistante, dans le sens qu'il existe $\alpha, \beta, T > 0$ et $t_0 > 0$ et tel que pour toute condition initiale x_0 on a:

$$\alpha I \leq \int_t^{t+T} \Phi_{u, x_0}^T(\tau, t) C^T C \Phi_{u, x_0}(\tau, t) d\tau \leq \beta I$$

où Φ_{u, x_0} est la matrice de transition du système

$$\begin{cases} \dot{x} = A(u)x \\ y = Cx \end{cases}$$

- Alors un observateur exponentiel pour le système affine est donné par :

$$O_{SA} : \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A(u(t))\hat{x}(t) + g(u(t), y(t)) - P^{-1}C^T(\hat{y}(t) - y(t)) \\ \dot{P}(t) = -\theta P(t) - A^T(u(t))P(t) - P(t)A(u(t)) + 2C^T C \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

avec θ positif constant, suffisamment large et tel que pour toute matrice symétrique positive $P(0)$:

$$\forall \theta \geq \theta_0 \exists \gamma > 0, \delta > 0, t_0 > 0 : \forall t \geq t_0, \gamma I \leq P(t) \leq \delta I$$

Preuve: soit l'erreur d'estimation $\varepsilon(t) = \hat{x}(t) - x(t)$, sa dynamique est donnée par:

$$\dot{\varepsilon} = (A(u(t)) - P^{-1}C^T C)\varepsilon(t)$$

Considérons maintenant la fonction candidate de Lyapunov $V(\varepsilon(t)) = \varepsilon(t)^T P \varepsilon(t)$

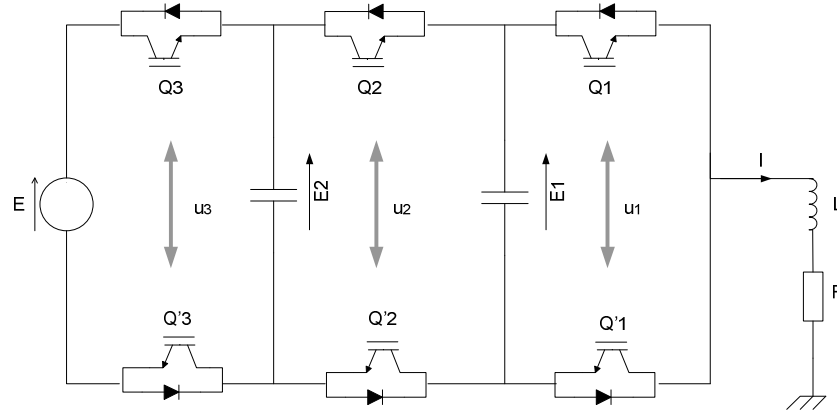
Sa dérivée tout au long de la dynamique d'erreur est:

$$\dot{V}(\varepsilon(t)) = -\theta V(\varepsilon(t))$$

Alors la convergence exponentielle de l'observateur est prouvée

□ Application au convertisseur à 3 cellules (au modèle dynamique):

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_1(t) \\ \dot{E}_2(t) \\ \dot{I}(t) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{u_2 - u_1}{C_1} \\ 0 & 0 & \frac{u_3 - u_2}{C_2} \\ \frac{u_1 - u_2}{L} & \frac{u_2 - u_3}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}}_{A(u)} \cdot \begin{pmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ I(t) \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \cdot u_3 \end{pmatrix}}_{B(u)} \cdot E$$



On pose $q_1 = u_2 - u_1, q_2 = u_3 - u_2$

□ **Problème:**

- Sur une période d'échantillonnage, seule la quantité $q_1 E_1 + q_2 E_2$ (la somme ou la différence des tensions) est observable à partir de la mesure du courant de charge
- Pour estimer les 2 tensions, il faut au moins 2 périodes (2 configurations)

□ **Solution:**

- Considérer des modèles affines d'ordre 2 interconnectés et construire l'observateur sur la base de ces modèles

□ Modèle interconnecté:

$$\sum_j: \begin{cases} \dot{X}_1(t) = A(q_1)X_1(t) + B(q,y) + q_2H_1(X_2) \\ \dot{X}_2(t) = A(q_2)X_2(t) + B(q,y) + q_1H_2(X_1) \\ y(t) = \bar{C}X_j(t), j = 1, 2 \end{cases}$$

$$X_j = \begin{bmatrix} I \\ E_j \end{bmatrix}, A(q_j) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{q_j}{L} \\ \frac{q_j}{C_j} & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_1(X_2) = -\frac{1}{L}[E_2 \quad 0]^T, H_2(X_1) = -\frac{1}{L}[E_1 \quad 0]^T$$

$$B(q,y) = \begin{bmatrix} \frac{E}{L}u_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$q_j = u_{j+1} - u_j, \bar{C} = [1 \quad 0]^T$$

□ Hypothèse:

- q_j ($j=1,2$) est régulièrement persistante

□ Propriété:

- $H_1(X_2)$ et $H_2(X_1)$ sont globalement Lipchitz par rapport à X_1 et X_2 respectivement

□ Remarque:

- La propriété est vérifiée car les 2 tensions et le courant restent dans un domaine physique
- Pour les 2 configurations où $q_1=q_2=0$ (les condensateurs sont en l'air), ces entrées q_1 et q_2 ne sont pas persistantes. Cette notion de persistance est équivalente à la notion de $Z(TN)$ observabilité (voir [1]).

[1] Kang, W., J-P. Barbot and L. Xu 'On the Observability of Nonlinear and Switched Systems', Springer issue on 'Emergent Problems in Nonlinear Systems and Control', 2009.

□ Observateur adaptatif pour le modèle interconnecté:

$$O_i : \begin{cases} \dot{Z}_1 = A(q_1)Z_1 + B(q, y) + q_2 H_1(Z_2) \\ \quad + |q_1| P_1^{-1} \bar{C}^T (y - \hat{y}) \\ \dot{P}_1 = |q_1| [-\rho_1 P_1 - A^T(q_1)P_1 \\ \quad - P_1 A(q_1) + 2\bar{C}^T \bar{C}] \\ \dot{Z}_2 = A(q_2)Z_2 + B(q, y) + q_1 H_2(Z_1) \\ \quad + |q_2| P_2^{-1} \bar{C}^T (y - \hat{y}) \\ \dot{P}_2 = |q_2| [-\rho_2 P_2 - A^T(q_2)P_2 \\ \quad - P_2 A(q_2) + 2\bar{C}^T \bar{C}] \\ \hat{y} = \bar{C} Z_j \end{cases} \quad \begin{cases} Z_j = \begin{bmatrix} I \\ \hat{E}_j \end{bmatrix}, \quad H_1(Z_2) = -\frac{1}{L} [\hat{E}_2 \quad 0]^T, \\ H_2(Z_1) = -\frac{1}{L} [\hat{E}_1 \quad 0]^T \\ \rho_1 > 0 \text{ and } \rho_2 > 0 \\ q_j = u_{j+1} - u_j, \quad \bar{C} = [1 \quad 0]^T \end{cases}$$

□ Remarques:

- $P_1^{-1} \bar{C}^T$ et $P_2^{-1} \bar{C}^T$ sont les gains de l'observateur
- **Quand $q_1=0$ (resp. $q_2=0$), la tension E_1 (resp. E_2) est constante (inobservable), l'observateur est figé et fonctionne en estimateur (sans gains de correction). Dans le cas où les 2 configurations pour qui $q_1=q_2=0$, ces 2 entrées ne sont pas persistantes.**
- P_1 et P_2 sont définies positives et symétriques

□ Analyse de stabilité de l'observateur:

- Soit $\varepsilon_1 = X_1 - Z_1$ et $\varepsilon_2 = X_2 - Z_2$ les erreurs d'estimations entre le modèle et l'observateur . La dynamique de ces erreurs est donnée par:

$$\Sigma_\varepsilon : \begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 &= [A(q_1) - |q_1|P_1^{-1}\bar{C}^T\bar{C}]\varepsilon_1 \\ &+ q_2[H_1(X_2) - H_1(Z_2)] \\ \dot{\varepsilon}_2 &= [A(q_2) - |q_2|P_2^{-1}\bar{C}^T\bar{C}]\varepsilon_2 \\ &+ q_1[H_2(X_1) - H_2(Z_1)] \end{cases}$$

□ Proposition:

Soit une séquence d'intervalle $\{t_0, \dots, t_N\}$. Pour une séquence de commande $[q^0, \dots, q^N]$ régulièrement persistante avec q^N la valeur de $q = [q_1, q_2]$ dans l'intervalle de temps $[t_N, t_{N+1}]$ alors l'observateur interconnecté est un observateur adaptatif hybride du modèle interconnecté du convertisseur à 3 cellules

□ Preuve de la proposition:

- Soit la fonction de Lyapunov candidate

$$V = |q_1| \epsilon_1^T P_1 \epsilon_1 + |q_2| \epsilon_2^T P_2 \epsilon_2 = |q_1| V_1 + |q_2| V_2.$$

- 1ère période d'échantillonnage où $|q_1|=1$ et $|q_2|=0$ (la tension E_1 est observable et E_2 est inobservable): on reconstruit uniquement E_1 , E_2 reste constante

$$V = \epsilon_1^T P_1 \epsilon_1 = V_1.$$

- Sa dynamique est:

$$\dot{V}_1 = -\rho_1 V_1$$

- Pendant cette période, on choisit $\rho_1 > 0$ suffisamment grand pour faire converger E_1 , E_2 reste constante (le courant ne traverse pas le condensateur 2).

□ Preuve de la proposition:

- Soit la fonction de Lyapunov candidate

$$V = |q_1| \epsilon_1^T P_1 \epsilon_1 + |q_2| \epsilon_2^T P_2 \epsilon_2 = |q_1| V_1 + |q_2| V_2.$$

- 1ère période d'échantillonnage où $|q_1|=0$ et $|q_2|=1$ (la tension E_2 est observable et E_1 est inobservable): on reconstruit uniquement E_2 , E_1 reste constante

$$V = \epsilon_2^T P_2 \epsilon_2 = V_2.$$

- Sa dynamique est:

$$\dot{V}_2 = -\rho_2 V_2$$

- Pendant cette période, on choisit $\rho_2 > 0$ suffisamment grand pour faire converger E_2 , E_1 reste constante (le courant ne traverse pas le condensateur 1).

□ Preuve de la proposition:

- **Conclusion:** après 2 séquences de commande $[q^0, q^1]$ avec q^0 et q^1 sont les valeurs de $q = [q_1, q_2]$ pendant les 2 périodes d'échantillonnage respectivement, les 2 tensions E_1 et E_2 sont estimées à partir de la mesure du courant
- **Remarque:** pendant la période d'échantillonnage où $|q_1|=|q_2|=1$, on estime la somme de E_1 et E_2

$$V = \epsilon_1^T P_1 \epsilon_1 + \epsilon_2^T P_2 \epsilon_2 = V_1 + V_2. \quad \dot{V} \leq -\theta(V_1 + V_1) \leq -\theta V.$$

□ Observateur discret:

- Pour implémenter l'observateur, nous avons discrétiser les équations de l'observateur interconnecté avec une approximation de Taylor à l'ordre 2 avec une période d'échantillonnage T_e fixe

□ Observateur discret:

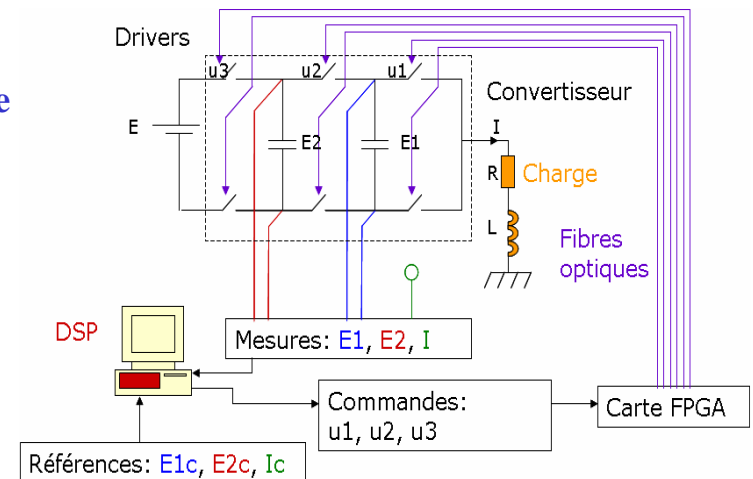
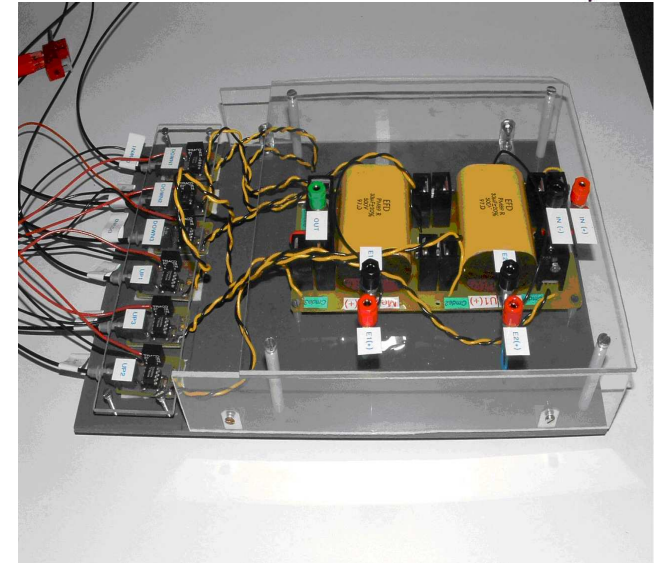
$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1((k+1)T_e) = F_1 Z_1(kT_e) + G_1 [B(q, y) + q_2 H_1] \\ \quad + G_1 |q_1| P_1(kT_e)^{-1} \bar{C}^T [y(kT_e) - \hat{y}(kT_e)] \\ Z_2((k+1)T_e) = F_2 Z_2(kT_e) + G_2 [B(q, y) + q_1 H_2] \\ \quad + G_2 |q_2| P_2(kT_e)^{-1} \bar{C}^T [y(kT_e) - \hat{y}(kT_e)] \\ \hat{y}(kT_e) = \bar{C} Z_j(kT_e) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_j = I + A(q_j) * Te + A(q_j)^2 * \frac{Te^2}{2} \\ G_j = I * Te + A(q_j) * \frac{Te^2}{2} + A(q_j)^2 * \frac{Te^3}{6} \\ F_{wj} = I + A_{Pj} * Te + A_{Pj}^2 * \frac{Te^2}{2} \\ G_{wj} = (I * Te + A_{Pj} * \frac{Te^2}{2} + A_{Pj}^2 * \frac{Te^3}{6}) B_{Pj}, \\ j = 1, 2. \end{array} \right.$$

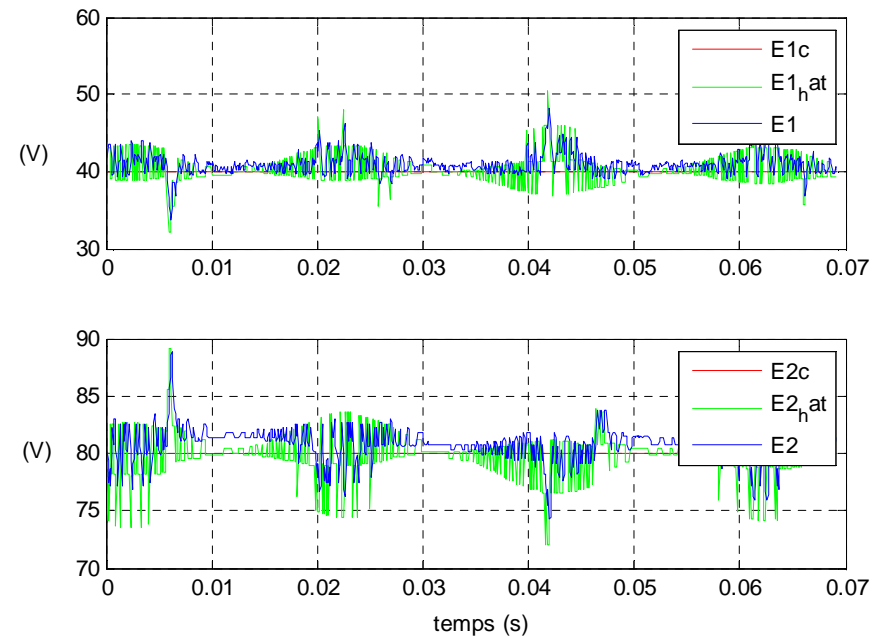
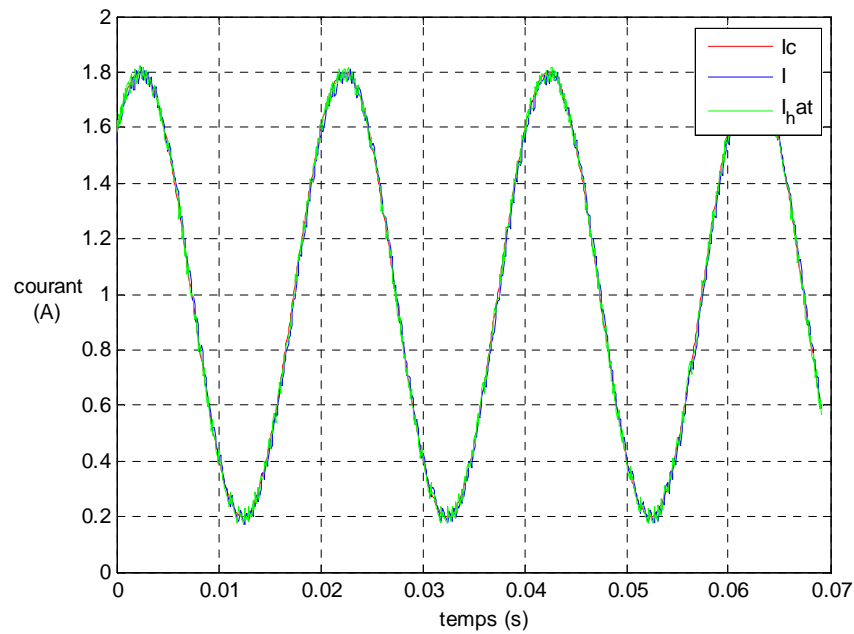
- ❑ Position du problème
- ❑ Commande prédictive
- ❑ Conception de l'observateur adaptatif
- ❑ **Résultats expérimentaux**
- ❑ Conclusions et perspectives

□ Présentation du banc expérimental

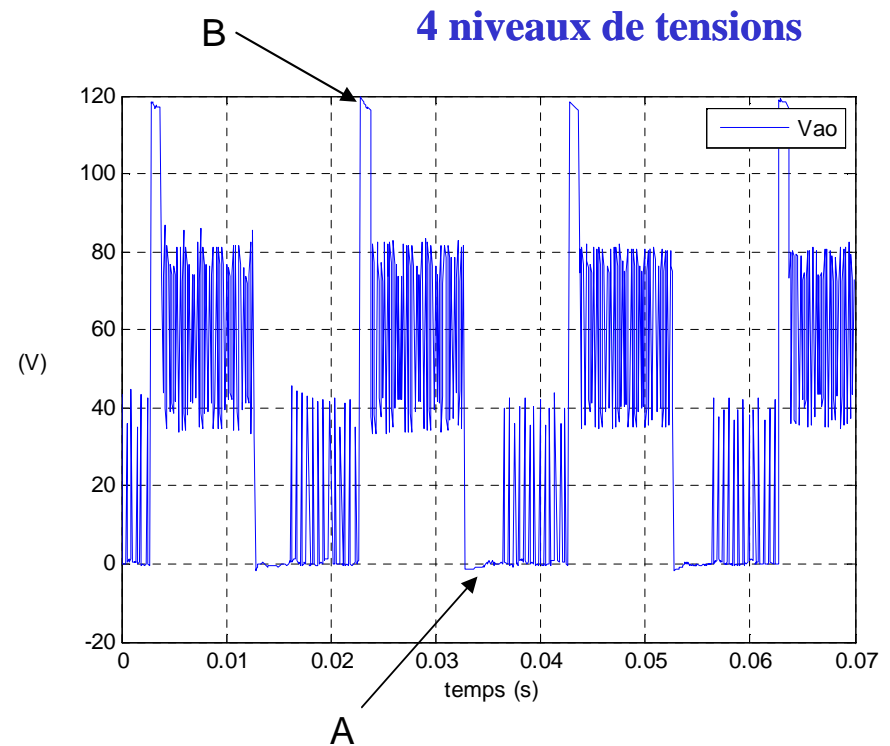
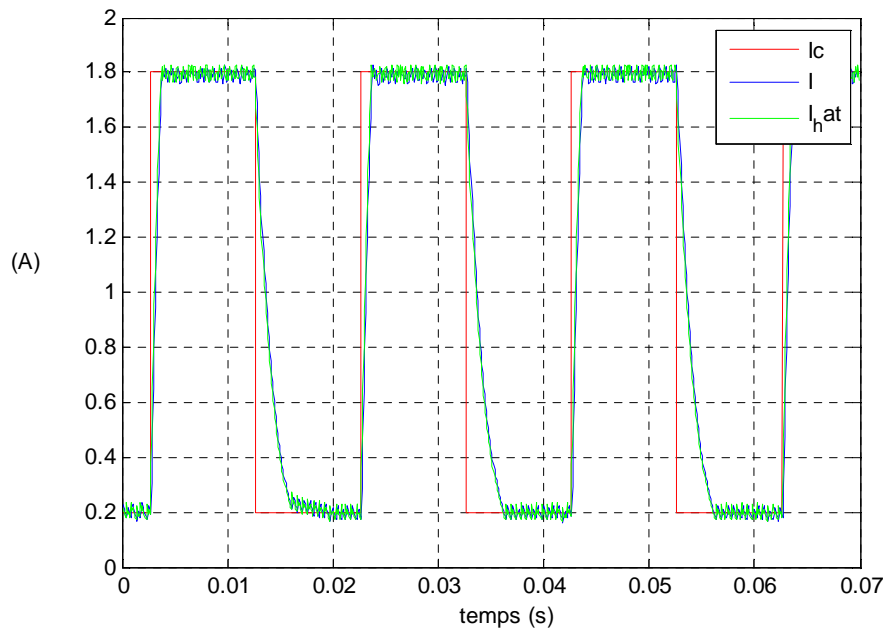
- Drivers: transformer le signal optique en signal électrique
- Alimentation des drivers à 12V DC
- Transistors: MOS
- Charge RL: $R=330\Omega$, $L=50\text{mH}$
- Deux capacités: $C1=C2= 33\mu\text{F}$
- Une alimentation à 120V
- Un algorithme en langage C implanté sur la carte dSpace 1104
- Une carte FPGA qui envoie la commande via les fibres optiques et qui gère les temps morts



- **Résultats:** $E = 120V$, $E_{1c} = \frac{E}{3} = 40V$, $E_{2c} = \frac{2E}{3} = 80V$



- Résultats : $E = 120V, E_{1c} = \frac{E}{3} = 40V, E_{2c} = \frac{2E}{3} = 80V$



A: (non observable)

B: (non observable)

- ❑ Position du problème

- ❑ Commande prédictive

- ❑ Conception de l'observateur adaptatif

- ❑ Résultats expérimentaux

- ❑ **Conclusions et perspectives**

- ❑ **Synthèse d'une commande prédictive qui permet d'asservir conjointement le courant et les tensions**
 - Validation du modèle simplifié
 - Choix des tensions de référence
 - Normalisation de l'espace d'état

- ❑ **Synthèse d'un observateur adaptatif hybride pour estimer les tensions aux bornes des condensateurs (basé sur le modèle hybride du convertisseur)**

- ❑ **Résultats expérimentaux (Commande+Observateur)**

- ❑ **Démontrer la convergence globale « commande+observateur » (en cours)**

- ❑ **Appliquer l'approche commande-observateur sur un convertisseur à 3 cellules alimentant un moteur à courant continu**

- ❑ **Adapter l'observateur synthétisé avec une autre approche de commande (commande par inversion de modèle)**

Merci pour votre attention