

Commande sans capteur mécanique des actionneurs embarqués

M. Fadel¹, R. Ruelland¹, G. Gateau¹, JC. Hapiot¹, P. Brodeau², JP Carayon²

Présentation M. FADEL

¹Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de Toulouse

²Liebherr Aerospace SA

Sommaire

Introduction

Les actionneurs embarqués

La commande sans capteur
Machines à aimantation sinusoïdale
Machines à aimantation trapézoïdale

Implantation numérique

Apports incessants de l'électronique et de l'informatique en aéronautique (civile et militaire) depuis 50 ans



Localisation, équipements de bord, Navigation
Commandes de vol, Viseurs.....



Diminution de la charge du pilote
Amélioration de la fiabilité, ...

Actuellement, efforts importants sur les organes de puissance

Avions « plus électrique », traitement de l'énergie électrique
Convertisseurs Statiques et actionneurs électriques..

Puissance électrique générée ↗



Gain en Poids/Volume ...mais aussi ... fiabilité!



Expansion du marché aérien



Besoins nouveaux en matière d'actionneurs
Actionneurs électriques compétitifs (faible puissance)

*Souplesse d'utilisation, performances intrinsèques, poids
Fiabilité, Fonctions de contrôle et de diagnostic*



Servo-vérins Electriques

Commande des gouvernes
Sensation artificielle d'effort
Electro-pompes sur système carburant
Traitement de l'air
Entrainement de ventilateurs

Avion < 100places 20 actionneurs traitement de l'air



Machines à aimant grande vitesse 60000 ...100000 tr/mn

Remplacement des équipements hydrauliques ou pneumatiques de faible puissance

Amélioration de l'activité de maintenance et du travail des pilotes

Identification de pannes, surveillance
Dialogue avec les calculateurs, le cockpit

Vannes électriques de régulation des flux d'air
Vannes électro-pneumatiques de récupération d'air

....

Tendance actuelle ...actionneur de plus forte puissance => 10 kW

Compresseur d'air
EHA - Electrohydrostatic Actuator

....

Contraintes plus fortes en température et en vitesse

.... **Commande sans capteur mécanique**

Commande sans capteur mécanique

Consigne de vitesse
Machines à fem trapézoïdales

Consigne de position
Machines à fem sinusoïdales

Reconstruction basse résolution
Type capteur à effet hall

Reconstruction haute résolution
Type Resolver

Faible inductance cyclique et fréquence de commutation !
Montée en vitesse, limite de tension et défluxage si possible ...
Démarrage

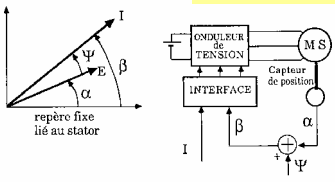
Localisation du rotor ou pré calage

Caractéristique de la charge (couple au démarrage)
Type de rotor (pôles lisses ou saillants)

Reconstruction de la position du rotor

Contrôle en courant :

Autopilotage



Lien rigide entre
Fréquence de rotation
et Fréquence d'alimentation

Mesures disponibles:

Tensions statoriques ou bien tension Bus DC et Cde Onduleur
Courants statoriques (2 mesures)
Point neutre de la machine?

Modèles machines:

Représentation de Park d, q
Représentation de Clarke α , β
Représentation en tension composée ba, ca

Machine sinus

Connaissance de position en continu

Estimation de la position

Observation de la position

Observateur des FEMs

Machines trapézoïdales

Connaissance discrète

Extension des méthodes sinus

Observateur des FEMs

Harmonique 3 des fems

Démarrage

Pré-calage du rotor

Déplacement autorisé
Charge nulle au démarrage
Incertitude sur le sens de rotation

Localisation du rotor

Simple pour les machine à pôles saillants
Plus difficile pour les pôles lisses

Machine sinus

Estimation par intégration du flux

$$V_{\alpha} = R_s I_{\alpha} + \frac{d\varphi_{\alpha}}{dt}$$

$$V_{\beta} = R_s I_{\beta} + \frac{d\varphi_{\beta}}{dt}$$

Transformation de Concordia

$$\varphi_{\alpha} = \int (V_{\alpha} - R_s I_{\alpha}) + \varphi_{\alpha 0}$$

$$\varphi_{\beta} = \int (V_{\beta} - R_s I_{\beta}) + \varphi_{\beta 0}$$

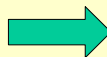
$$\begin{cases} \varphi_{\alpha 0} \\ \varphi_{\beta 0} \end{cases} = \varphi_f \begin{cases} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{cases} \quad \varphi_f = -\sqrt{\frac{3}{2}} M_{sr} I_f$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\varphi_{\alpha} - L I_{\alpha}}{\varphi_{\beta} - L I_{\beta}}$$

$$\hat{\theta} = \operatorname{arctg} \left[\frac{\varphi_{\alpha} - L I_{\alpha}}{\varphi_{\beta} - L I_{\beta}} \right]$$

Tabulation

Conditions initiales



Pré calage ou Localisation

- ++Indépendance par rapport aux paramètres mécaniques
- ++Faible volume de calcul
- Dépendance par rapport aux paramètres électriques
- Sensible à la condition initiale

Machine sinus

Filtre de Kalman

$$\dot{I}_\alpha = -\frac{R}{L} I_\alpha - \frac{1}{L} E_\alpha + \frac{1}{L} V_\alpha \quad E_\alpha = \Phi \cdot \omega \sin(\Theta)$$

$$\dot{I}_\beta = -\frac{R}{L} I_\beta - \frac{1}{L} E_\beta + \frac{1}{L} V_\beta \quad E_\beta = -\Phi \cdot \omega \cos(\Theta)$$

Calculons \dot{E}_α et \dot{E}_β

$$\dot{E}_\alpha = \Phi \cdot \frac{d\omega}{dt} \sin(\Theta) + \Phi \cdot \omega \cdot \frac{d\Theta}{dt} \cos(\Theta)$$

$$\dot{E}_\beta = -\Phi \cdot \frac{d\omega}{dt} \cos(\Theta) - \Phi \cdot \omega \cdot \frac{d\Theta}{dt} \sin(\Theta)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \\ \dot{E}_\alpha \\ \dot{E}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & \omega & -\omega \\ 0 & 0 & \omega & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

$$\dot{E}_\alpha = \frac{d\omega}{dt} \frac{E_\alpha}{\omega} - \omega E_\beta$$

$$\dot{E}_\beta = \frac{d\omega}{dt} \frac{E_\beta}{\omega} + \omega E_\alpha$$

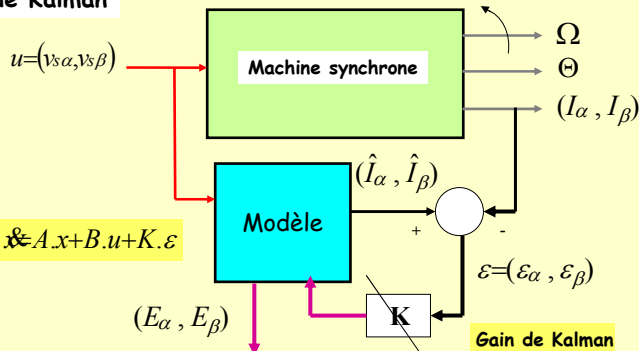
$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$$

$$y = C \cdot x$$

$\frac{d\omega}{\omega}$ Evaluation à surveiller

Filtre de Kalman

Charge Mécanique

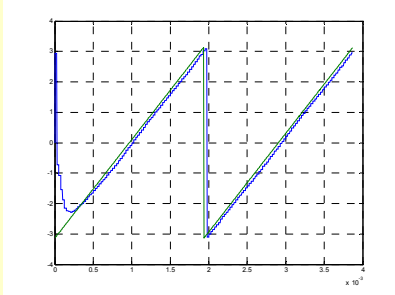


Minimisation de la moyenne des erreurs quadratiques

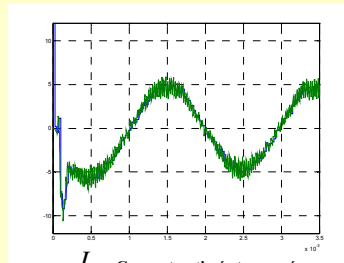
Définir les matrices de covariance du bruit de mesure et d'état

Filtre de Kalman

$N=30\ 000\ tr/mn$



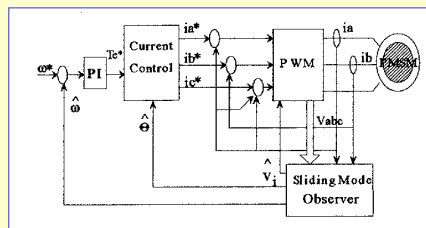
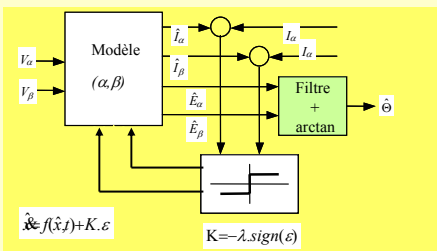
Position



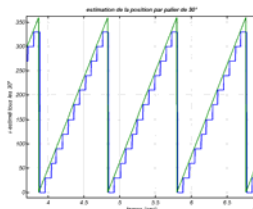
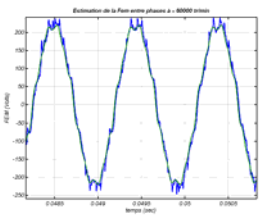
I_α Courant estimé et mesuré

- ++ Robustesse par rapport aux variations paramétriques
- ++ Robustesse par rapport bruits de mesure
- ++ Extension au couple de charge aisée
- - Volume de calcul important

Observateur en régime de glissement



$N=60\ 000\ tr/mn$



- ++ Robustesse
- ++ Simplicité
- - Exigence de rapidité
- - Chattering

Observateur par redondance analytique

Modèle dans le repère diphasé (d,q)

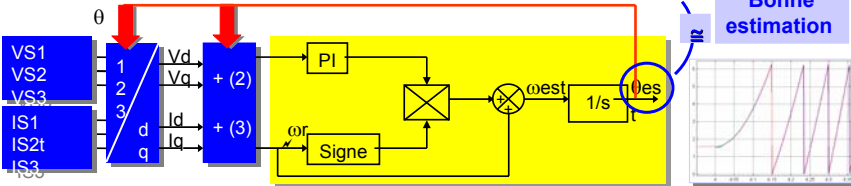
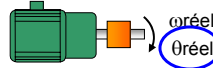
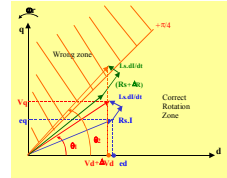
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p.L_s & -\omega_r \cdot L_s \\ \omega_r \cdot L_s & R_s + p.L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + K_e \cdot \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} femd1 &= (V_d - R_s \cdot I_d - L_s \cdot p \cdot I_d) & femd2 &= -\omega_r \cdot L_s \cdot I_q \\ femq1 &= (V_q - R_s \cdot I_q - L_s \cdot p \cdot I_q) & femq2 &= \omega_r \cdot (L_s \cdot I_d - M_s r \cdot I_f) \end{aligned}$$

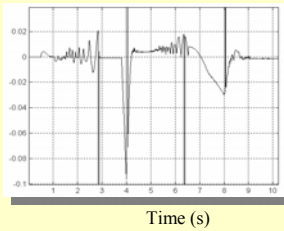
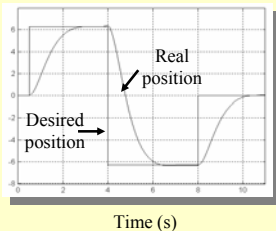
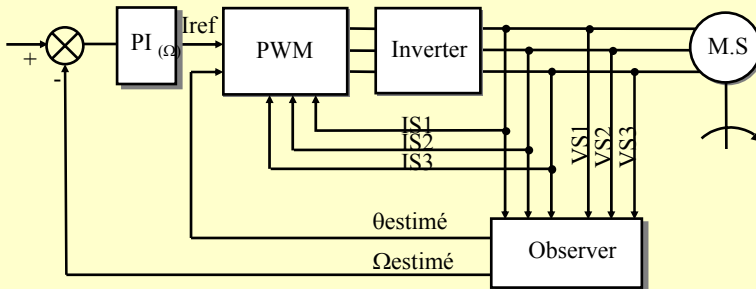
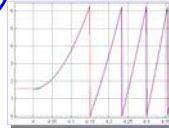
$$\begin{aligned} \varepsilon femd &= femd1 - femd2 \\ \varepsilon femq &= femq1 - femq2 \end{aligned}$$

$$\varepsilon femd = -\omega_r \cdot K_e \cdot \Delta \theta$$

$$\omega_{est}(q) = \frac{V_{qest} - (R_s + p \cdot L_s) \cdot I_{qest}}{k_e + L_s \cdot I_{dest}}$$



Bonne estimation



- ++ Simple
- ++ Faible Vol. calcul
- Calcul Régulateur

Observateur par redondance analytique avec MRAS

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d' \\ u_q' \end{bmatrix}$$

Pôles lisses

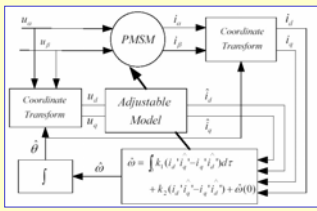
$$i_d' = i_d + \frac{\psi_r}{L}, \quad i_q' = i_q;$$

$$u_d' = u_d + \frac{R\psi_r}{L}, \quad u_q' = u_q;$$

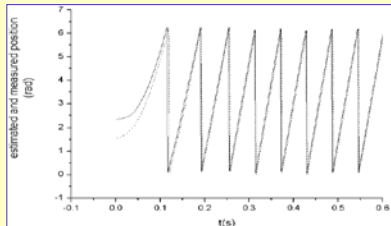
Changement de variable

$$\frac{d}{dt} i' = Ai' + Bu'$$

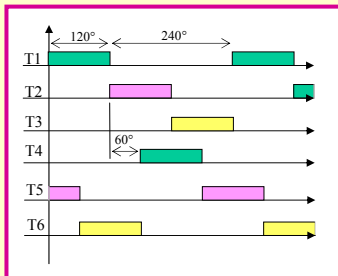
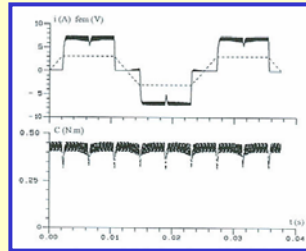
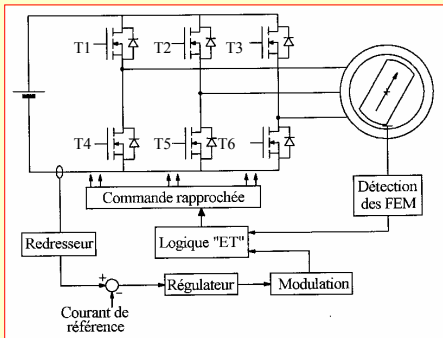
Hyperstabilité au sens de POPOV



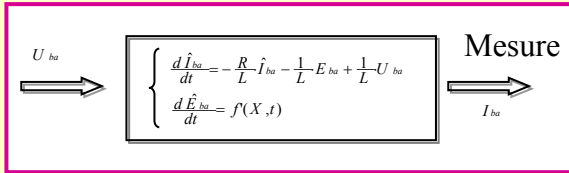
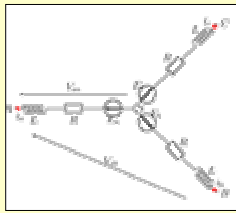
$$\hat{\theta} = \int_0^t \hat{\omega} dt$$



Machine trapèze



Utilisation du modèle ba-ca (tensions composées)



$$V_{ba} = R_s \cdot (I_b - I_a) + L_{cyc} \cdot \frac{d(I_b - I_a)}{dt} + E_b(\theta) - E_a(\theta)$$

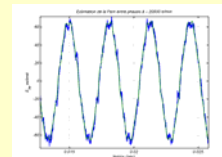
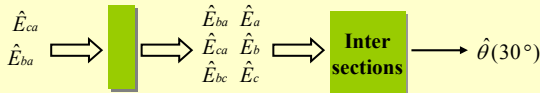
$$\frac{d\hat{E}_{ba}}{dt} = f(X,t) = 0$$

$$V_{ca} = R_s \cdot (I_c - I_a) + L_{cyc} \cdot \frac{d(I_c - I_a)}{dt} + E_c(\theta) - E_a(\theta)$$

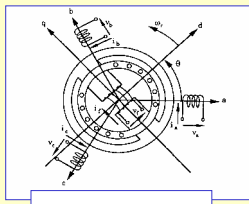
Echantillonnage rapide!

$$X = (I_{ba}, E_{ba}, I_{ca}, E_{ca})$$

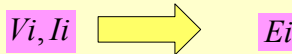
Tabulation



Reconstruction de la Fem et détection du passage par zéro



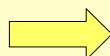
$$\begin{aligned} V1 &= R1 \cdot I1 + E1 + L1 \cdot \frac{dI1}{dt} + M \cdot \frac{dI2}{dt} + M \cdot \frac{dI3}{dt} \\ V2 &= R1 \cdot I2 + E2 + L2 \cdot \frac{dI2}{dt} + M \cdot \frac{dI1}{dt} + M \cdot \frac{dI3}{dt} \\ V3 &= R1 \cdot I3 + E3 + L3 \cdot \frac{dI3}{dt} + M \cdot \frac{dI1}{dt} + M \cdot \frac{dI2}{dt} \end{aligned}$$



Observation indirecte

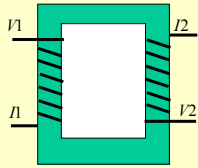
$$I2 + I3 = -I1$$

$$\begin{aligned} E1 &= V1 - R1 \cdot I1 - (L - M) \cdot \frac{dI1}{dt} \\ E2 &= V2 - R2 \cdot I2 - (L - M) \cdot \frac{dI2}{dt} \\ E3 &= V3 - R1 \cdot I3 - (L - M) \cdot \frac{dI3}{dt} \end{aligned}$$



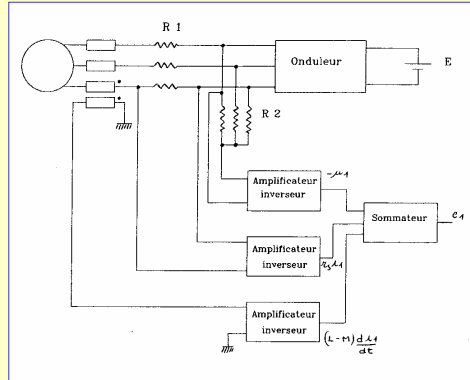
Dérivation du courant !!

Utilisation d'un transformateur série



$$V2 = R2 \cdot I2 + L2 \cdot \frac{dI2}{dt} + M \cdot \frac{dI1}{dt}$$

$$I2 = 0 \quad V2 = M \cdot \frac{dI1}{dt}$$



Extraction de l'harmonique 3 des FEMs

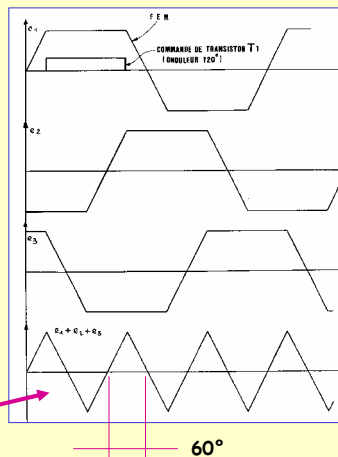
$$V1 = R1 \cdot I1 + E1 + L1 \cdot \frac{dI1}{dt} + M \cdot \frac{dI2}{dt} + M \cdot \frac{dI3}{dt}$$

$$V2 = R1 \cdot I2 + E2 + L2 \cdot \frac{dI2}{dt} + M \cdot \frac{dI1}{dt} + M \cdot \frac{dI3}{dt}$$

$$V3 = R1 \cdot I3 + E3 + L3 \cdot \frac{dI3}{dt} + M \cdot \frac{dI1}{dt} + M \cdot \frac{dI3}{dt}$$

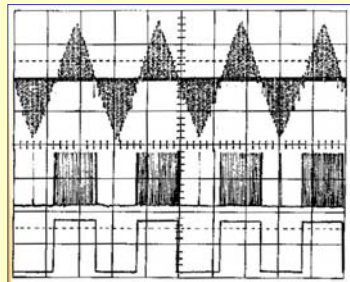
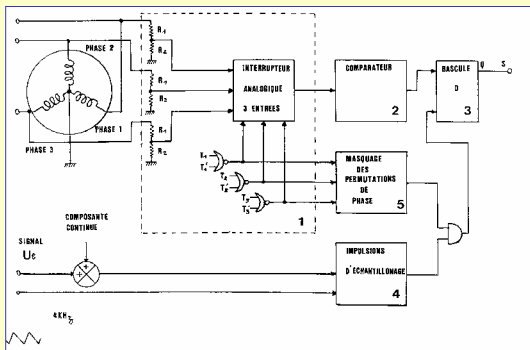
$$I1 + I2 + I3 = 0 \quad \frac{d}{dt} I1 + \frac{d}{dt} I2 + \frac{d}{dt} I3 = 0$$

$$V1 + V2 + V3 = E1 + E2 + E3$$



$$E1 + E2 + E3$$

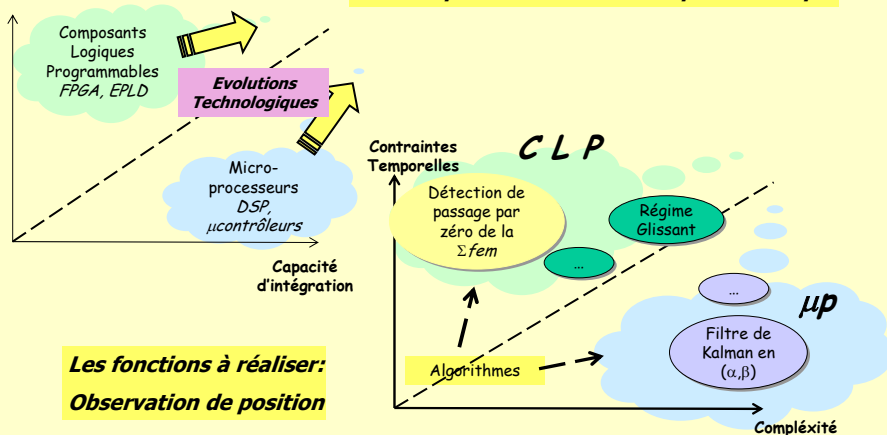
Détection du passage par 0 et synchronisation



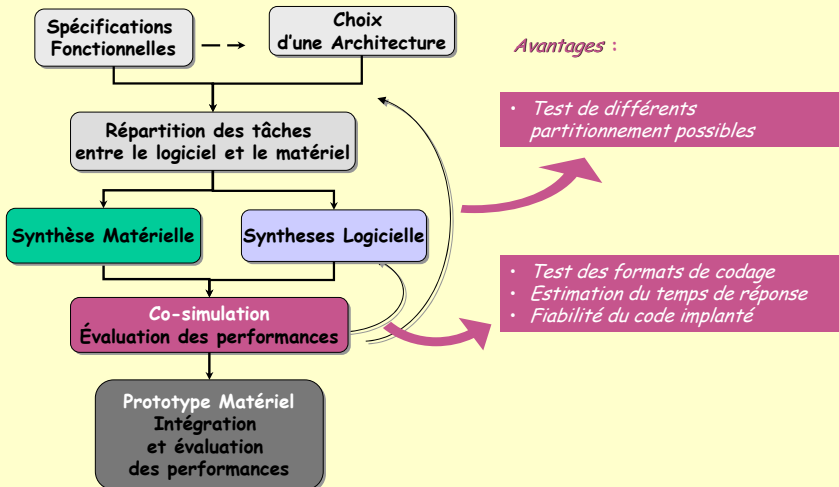
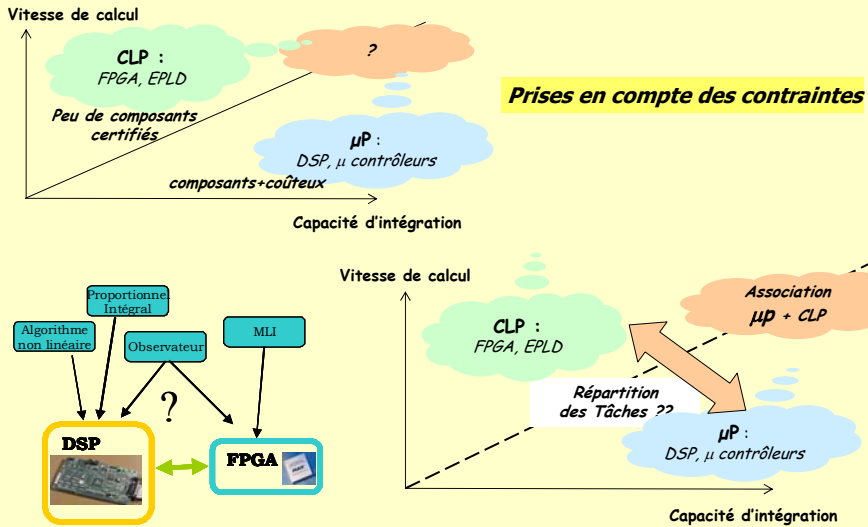
Implantation Numérique de la commande

Vitesse de calcul

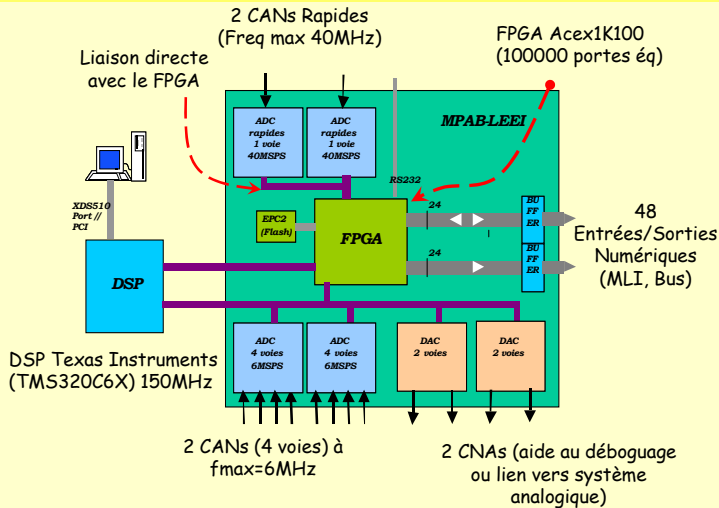
Les Composants de l'électronique numérique



Les fonctions à réaliser:
Observation de position



Validation des algorithmes à l'aide d'une carte de commande versatile



Conclusion

Diverses solutions pour la commande sans capteur de position

Précalage ou localisation

Reconstruction haute ou basse résolution (type de machine)

Régime de fonctionnement (vitesse max)

Variations paramétriques en présence (robustesse)

Moyens de réalisation

Fiabilité !!!