

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines

Jimmy Lauber

Ingénieur ENSIMEV

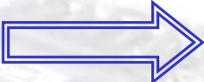
Moteur à allumage commandé avec EGR :
modélisation et commande non linéaires

Introduction générale

- De plus en plus de véhicules :
 - problèmes de pollution \Rightarrow nouvelles normes anti-pollution
 - carburant : source d'énergie limitée

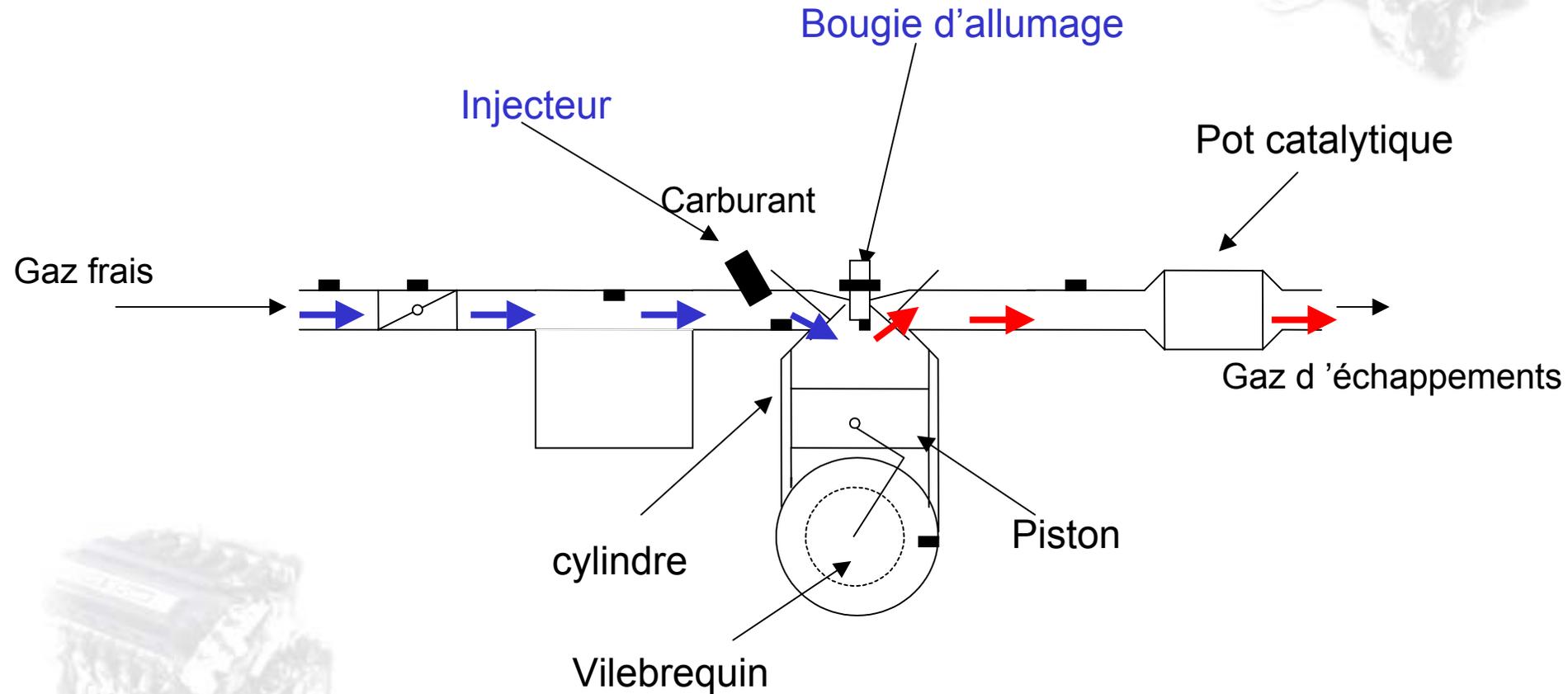
 Meilleure **gestion des moteurs thermiques**

- Moteur : actionneurs mécaniques vers actionneurs électroniques :
 - injection électronique
 - papillon motorisé...

 Plus de degrés de liberté
Système de plus en plus **complexe à commander**

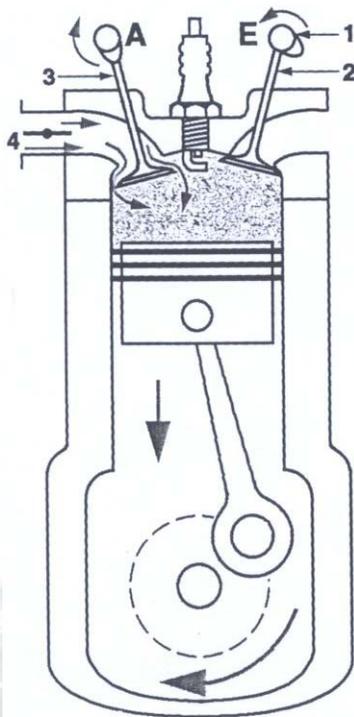
Introduction générale

- Schéma de principe :

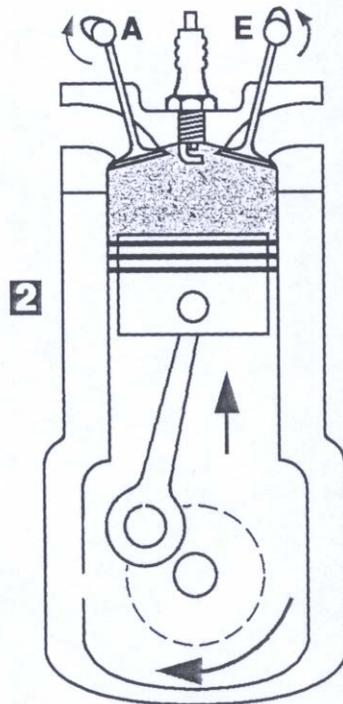


Introduction générale

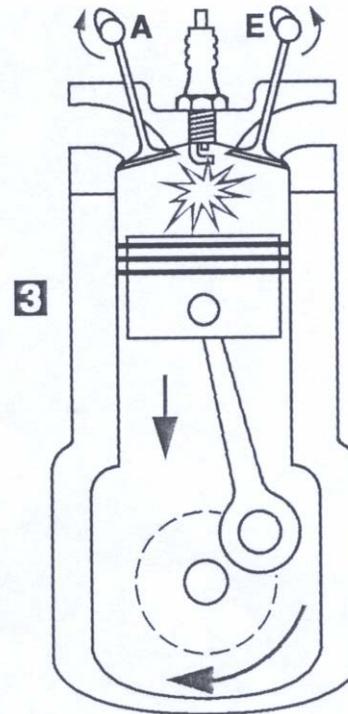
- Cycle 4 temps :



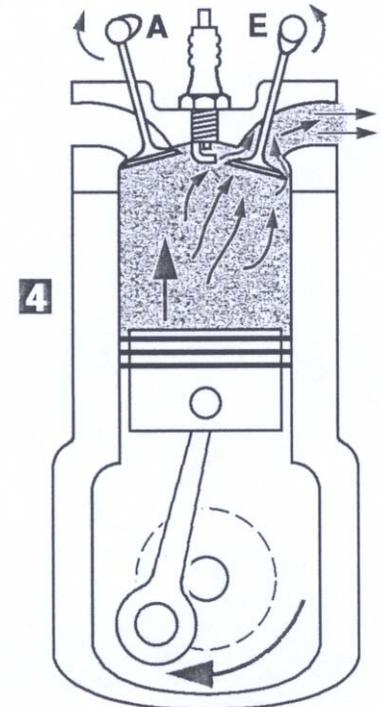
Admission



Compression



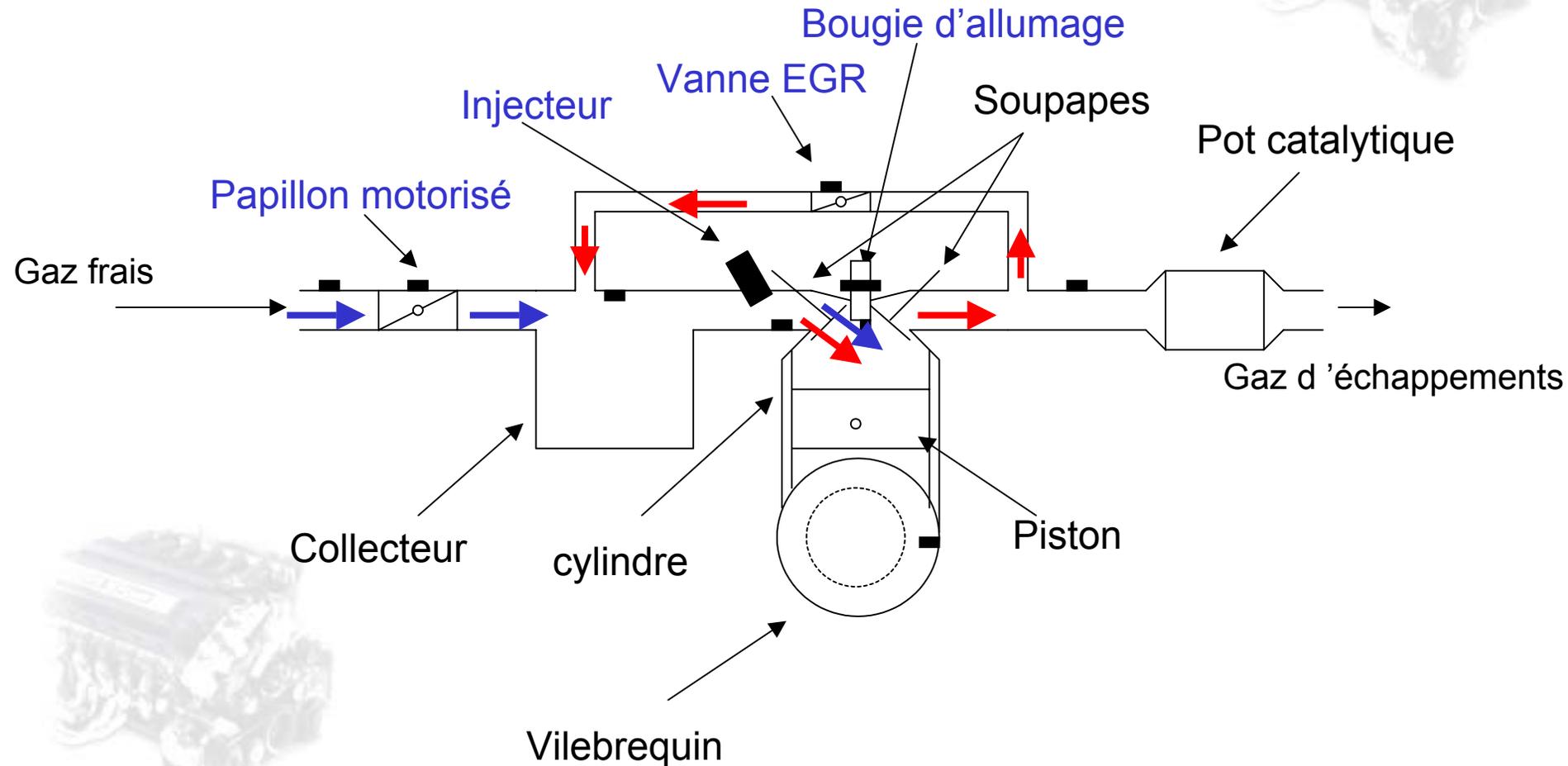
Explosion-détente



Echappement

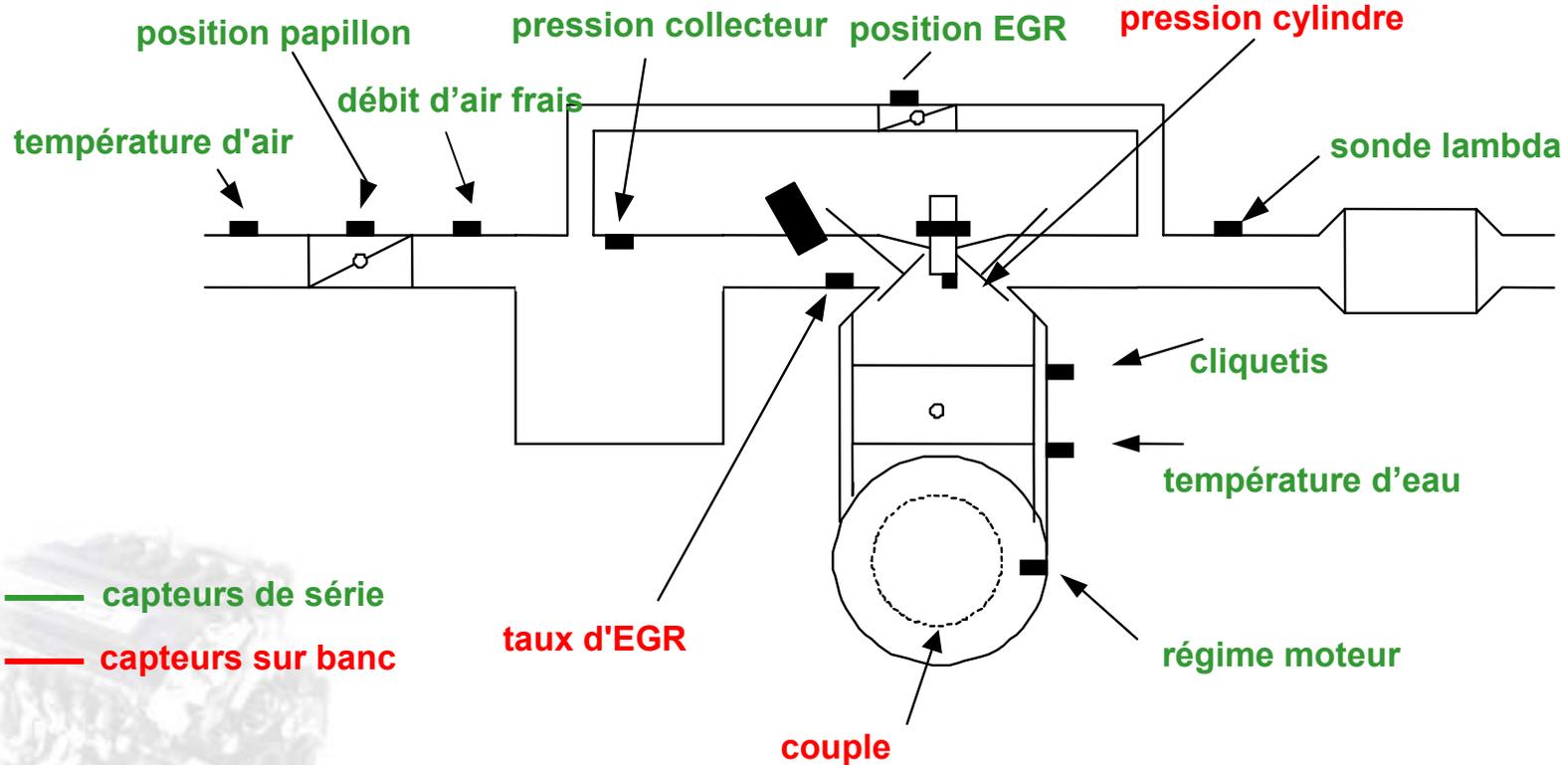
Introduction générale

- Actionneurs d'un moteur à allumage commandé avec EGR :



Introduction générale

- Capteurs d'un moteur à allumage commandé avec EGR :



Introduction générale

- Le moteur fait intervenir des phénomènes :
 - mécanique
 - chimique
 - thermodynamique

⇒ Difficile à modéliser

- Dans l'industrie, les commandes sont basées sur des cartographies.

⇒ Demande beaucoup de temps d'essais (bancs moteur)

⇒ Comportement statique du moteur

- Pour améliorer les performances :

- prendre en compte les phénomènes transitoires

⇒ **Modélisation dynamique du moteur**

Plan Général



- I. Modélisation et commande dans les moteurs à allumage commandé**
- II. Modélisation et commande floue**
- III. Application au moteur**
- IV. Conclusions et perspectives**



Etat de l'art : Modélisation



Les objectifs de commande sont les suivants :

- régulation en couple du moteur
- minimisation des émissions de polluants

Entrées

Position papillon

Position vanne EGR

Injection d'essence

Avance à l'allumage

Moteur

Sorties

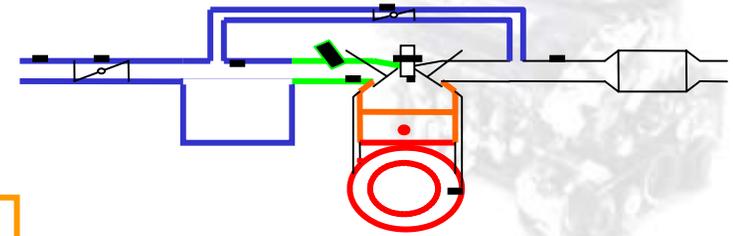
Couple moteur

Émissions polluantes

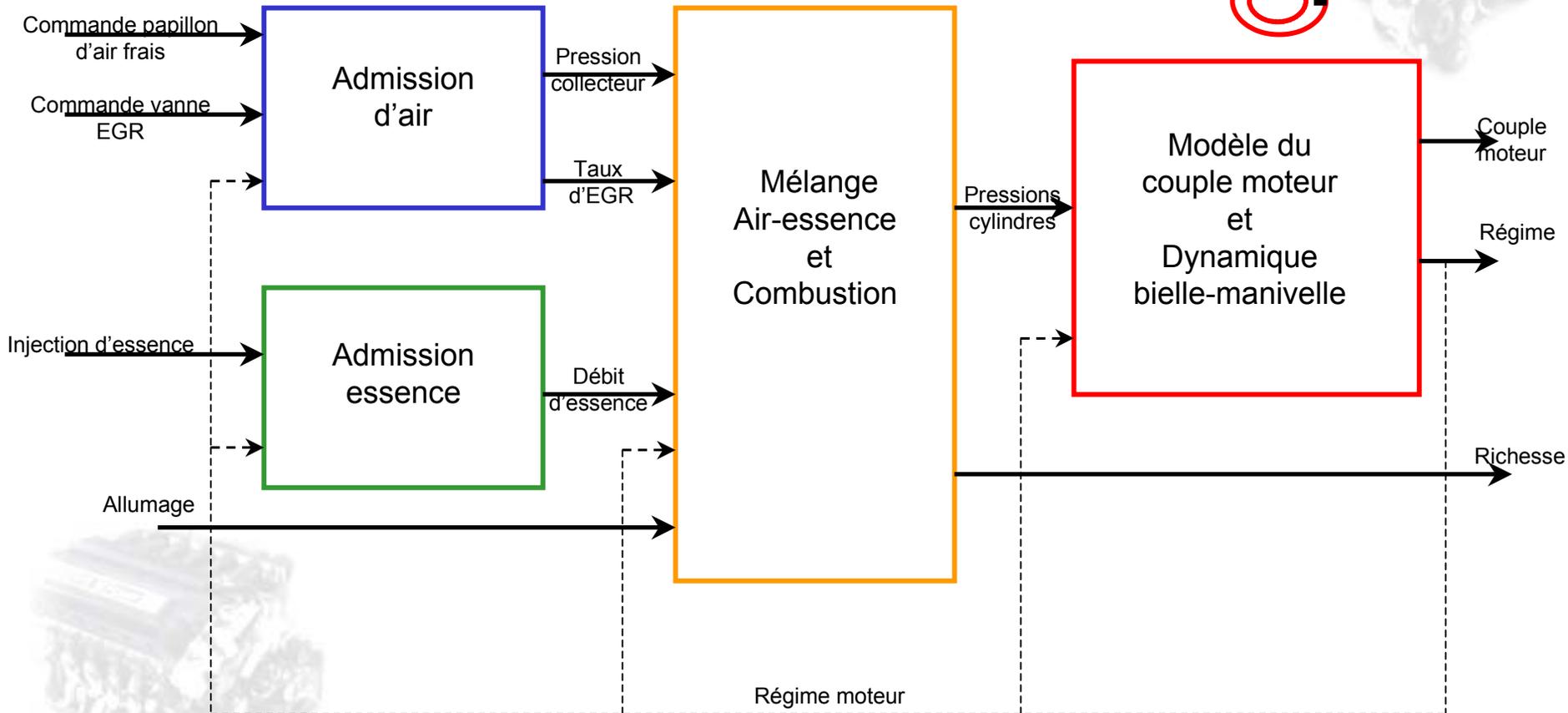


Approche par bloc fonctionnel

Etat de l'art : Modélisation

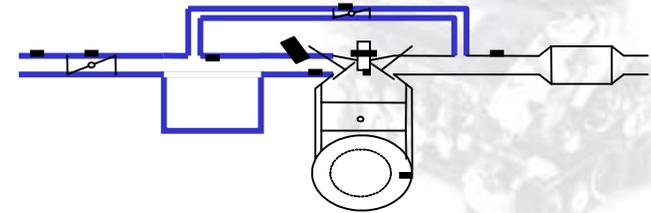
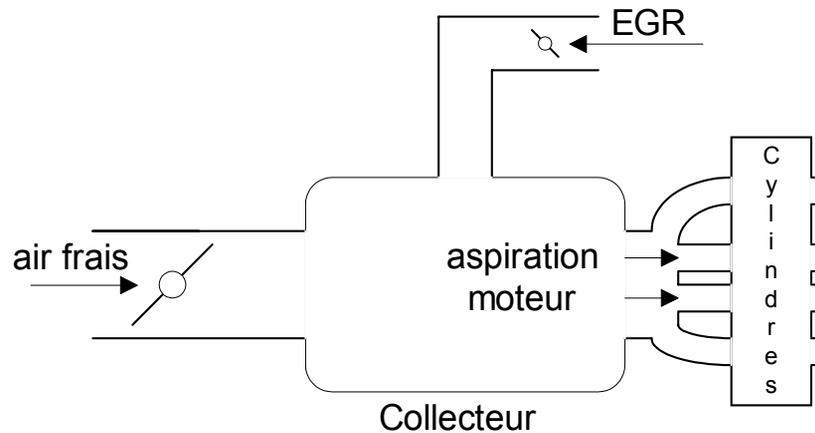


• Schéma fonctionnel :



Etat de l'art : Modélisation

- bloc « Admission d'air » :



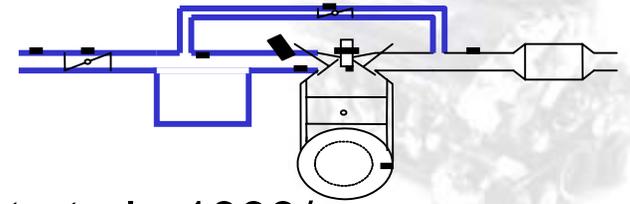
- Modèle de connaissance utilisé pour la pression dans le collecteur :

/Weeks et Moskwa, 1995/

$$\dot{P}_{col} = \frac{RT_{col}}{V_{col}} \left(\dot{m}_{af} + \dot{m}_{egr} - \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{cyl_i} \right) + P_{col} \frac{\dot{T}_{col}}{T_{col}}$$

/Bidan 1989/, /Bortolet 1998/, /Van Nieuwstadt et al. 2000/

Etat de l'art : Modélisation



- Modèle de type « boîte grise » :

- Algorithme de classification flou /Bortolet et al., 1999/ :

si ϕ_{af} est $f_{af}(i)$ et ϕ_{egr} est $f_{egr}(j)$ et N est $f_N(k)$ et P_{col} est $f_{P_{col}}(l)$

alors $\dot{P}_{col} = a_i \phi_{af} + b_j \phi_{egr} + c_k N + d_l P_{col} + e_{ijkl}$

- formule issue de l'expérimentation /Kang et Grizzle, 1999/:

$$\dot{m}_{cyl} = \alpha_1 + \alpha_2 \dot{m}_{af} N + \alpha_3 \dot{m}_{af}^2 N + \alpha_4 N^2 \dot{m}_{af}$$

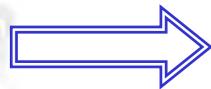
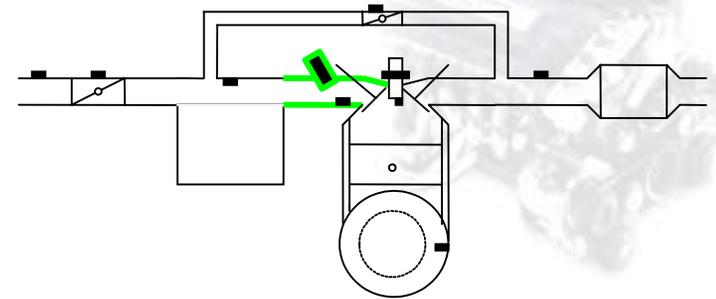
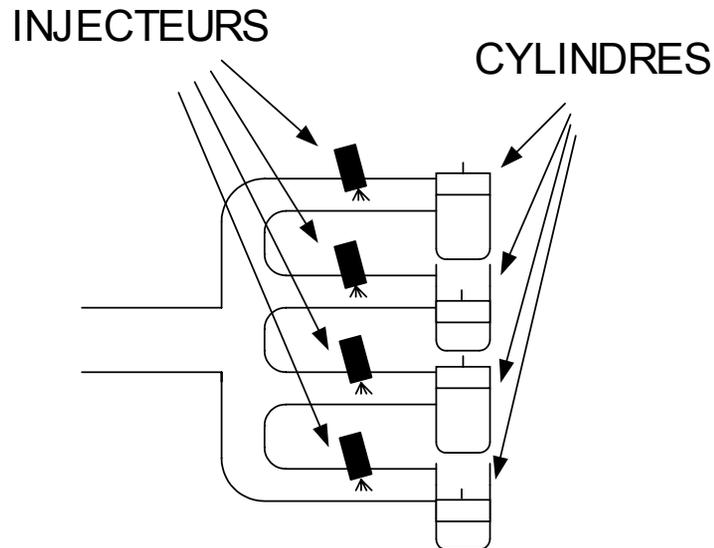
$$\Rightarrow \dot{P}_{col} = \frac{RT_{col}}{V_{col}} (\dot{m}_{af} + \dot{m}_{egr} - \dot{m}_{cyl})$$

- Taux d'EGR :

$$x_{egr} = \frac{\bar{m}_{egr}}{\bar{m}_{af}}$$

Etat de l'art : Modélisation

- bloc « Admission d'essence » :

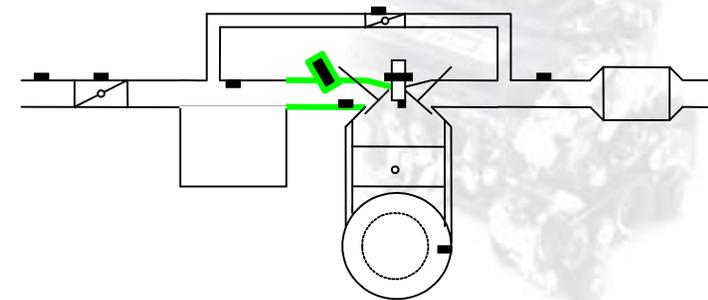


Injection dans la pipe d'admission de chaque cylindre

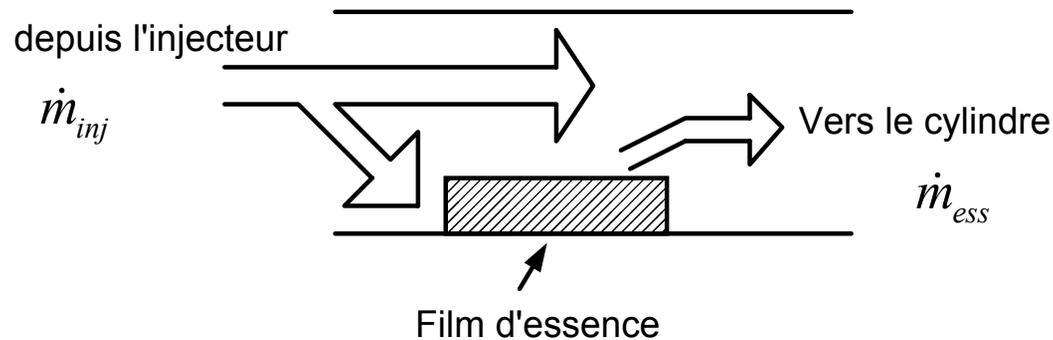


Apparition du **phénomène de mouillage**

Etat de l'art : Modélisation



- Phénomène de mouillage :



- Modèles utilisés :

/Aquino, 1981/ /Bortolet 1998/ /Kiencke et Nielsen 2000/ :

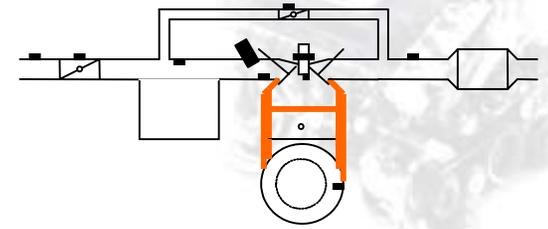
$$\frac{\dot{m}_{ess}}{\dot{m}_{inj}} = (1 - c) + \frac{c}{1 + \tau p}$$

/Bidan, 1989/ /Chaumerliac, 1995/, /Weeks et Moskwa, 1995/ :

$$\frac{\dot{m}_{ess}}{\dot{m}_{inj}} = \left[(1 - c) + \frac{c}{1 + \tau p} \right] e^{-\tau_d p}$$

Etat de l'art : Modélisation

- bloc « Mélange air-essence / Combustion » :
- richesse du mélange :



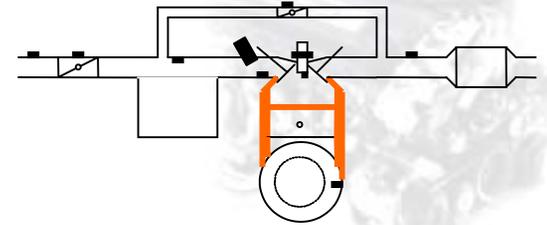
$$r_i = \frac{\lambda_s m_{ess}}{m_{af}} \Rightarrow \text{mesure retardée}$$



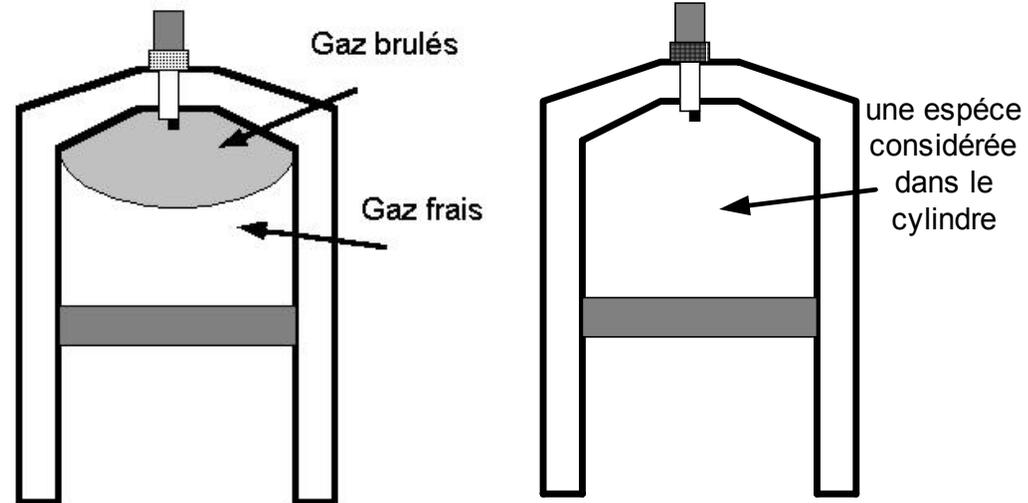
Pas de valeur optimale

Etat de l'art : Modélisation

- Modèles de combustion /Torredeme 1994/, /Truquet 1997/ :



- modèle 1 zone $\Rightarrow \frac{\partial T_{cyl}}{\partial \theta} = \frac{1}{mc_{vmel}} \left(-P_{cyl} \frac{\partial V_{cyl}}{\partial \theta} + \frac{\partial Q_t}{\partial \theta} + \frac{\partial Q_c}{\partial \theta} + (h_{adm} - u_{adm}) \frac{\partial m_{adm}}{\partial \theta} + (h_{ech} - u_{ech}) \frac{\partial m_{ech}}{\partial \theta} \right)$
- ~~modèles 2 zones~~
- ~~modèles multizones~~



Bonne approximation de la pression cylindre



Etat de l'art : Modélisation

- bloc « Modèle du couple moteur et dynamique bielle-manivelle » :
 - Modèles issus de lois physiques :

$$J\ddot{\theta} = C_m - C_r$$

$$J(\theta)\ddot{\theta} = C_m - C_r \quad /Dupraz, 1998/$$



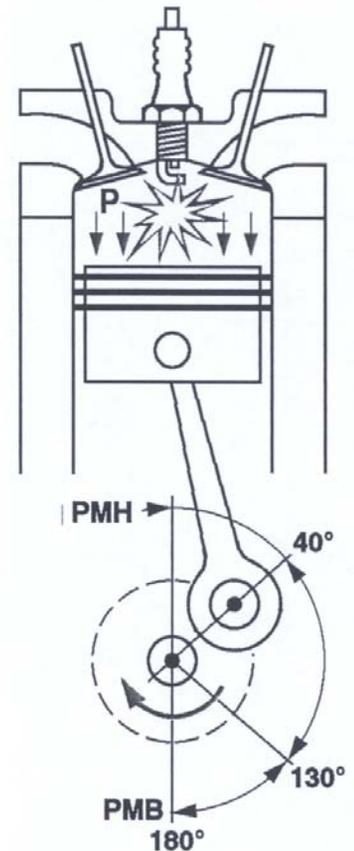
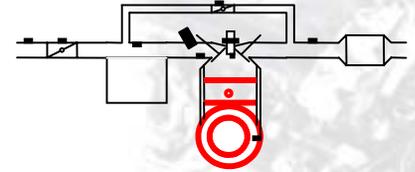
Calcul du **couple moteur instantané**

/Swoboda, 1984/

$$C_m = \sum_{i=1}^4 a_{1_i}(\theta) P_{cyl_i}(\theta) + a_2(\theta, \dot{\theta})$$

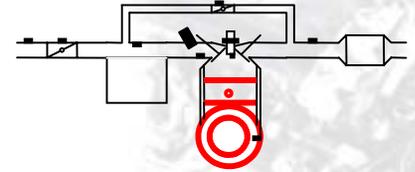
/Kiencke et Nielsen, 2000/

$$C_m = \sum_{i=1}^4 (P_{cyl_i} - P_0) A_p r f_1(\theta)$$



Etat de l'art : Modélisation

- bloc « Modèle du couple moteur et dynamique bielle-manivelle » :



- Modèles issus de l'expérimentation :

➡ Calcul du **couple moteur moyen**

/Chaumerliac, 1995/

$$C_m = \beta_1 \bar{m}_{af} + \beta_2 \bar{m}_{af} (r_i - 1) + \beta_3 \bar{m}_{af} (r_i - 1)^2 + \beta_4 + \beta_5 \dot{\theta} + \beta_6 \dot{\theta}^2$$

/Kang et Grizzle, 1999/

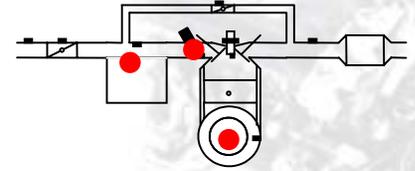
$$C_m = \gamma_1 + \gamma_2 \dot{m}_{af} + \gamma_3 r_i + \gamma_4 r_i^2 + \gamma_5 a_v + \gamma_6 a_v^2 + \gamma_7 \dot{\theta} + \gamma_8 \dot{\theta}^2 \\ + \gamma_9 \dot{\theta} a_v + \gamma_{10} a_v \dot{m}_{af} + \gamma_{11} a_v^2 \dot{m}_{af} + \gamma_{12} a_v \dot{m}_{egr}$$

➡ **Modèle dynamique du moteur avec EGR**
(Matlab/Simulink)

Etat de l'art : Estimation

- problématique :

- peu de capteurs disponibles de série
- certaines grandeurs ne sont pas mesurables sur banc d'essais



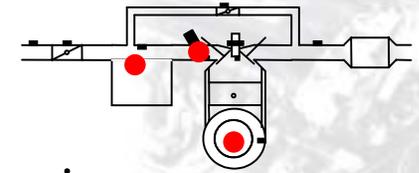
⇒ réaliser une **estimation en temps-réel**

⇒ utilisation d'**observateurs** :

- charge en air du moteur
- dynamique de l'injection d'essence
- couples moteurs instantané et moyen



Etat de l'art : Estimation



- Charge en air : /Stotsky et Kolmanovsky, 2002/

⇒ Observateur à **entrée inconnue** : grand gain $\dot{\hat{m}}_{cyl}$

- Dynamique essence : /Arsie et al., 2003/

⇒ Observateur basé sur **un filtre de Kalman** \hat{c} et $\hat{\tau}$

- Couple instantané et moyen : /Rizzoni, 1989/, /Drakunov et al., 1995/,
/Wang et al, 1997/, /Dupraz, 1998/ et /Kiencke et Nielsen, 2000/

⇒ Observateur **linéaire à entrée inconnue**

Observateur à **modes glissants**

Estimation en considérant des grandeurs
constantes par morceaux



Etat de l'art : Commande

• Types de régulation :

- **PID** /Petridis et Shenton, 2003/ /Buckland et Grizzle, 2000/
/Kiencke et Nielsen, 2000/
- **LQG** /Stefanopoulou et al., 1994/
- H_{∞} /Ingram et al., 2003a, 2003b/
- **Linéarisation entrée/sortie** /Guzzella et al., 1997/
- **CLF** /Kang et Grizzle, 1999/
- **Modes glissants** /Khalid Khan et Spurgeon, 2001/
- **Commande floue** /Bortolet, 1998/ /Passaquay, 2000/

couple

Etat de l'art : en résumé

- Synthèse sur la modélisation :

- l'admission d'air
- l'injection d'essence
- la combustion
- le calcul du couple



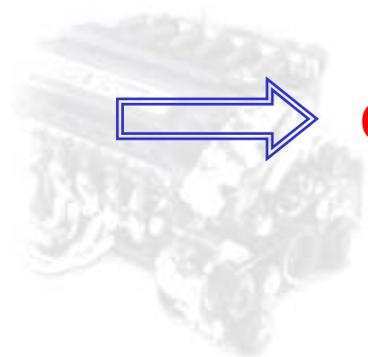
Modèles **non linéaires** à **retards variables**



Développement de **lois de commandes non linéaires**



Commande floue des modèles Takagi-Sugeno (TS)



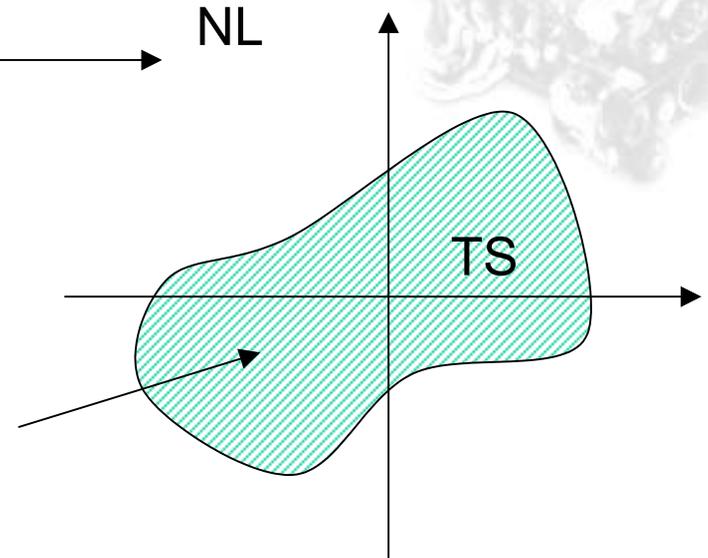
Modèles TS /Takagi et Sugeno 1985/

- Soit le système non linéaire :

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \longrightarrow \text{NL}$$

- **Modélisation floue de type TS**

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))C_i x(t) \end{cases}$$



avec : r le nombre de sous-modèles

$z(t)$ le vecteur de prémisse



Non-linéarités dans les termes $h_i(z(t)) \geq 0$

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$$

Modélisation et commande floue : généralités

Exemple :

$$\dot{x}(t) = x(t) \cos(x(t)) \quad x \in \mathbb{R}$$

⇒ « Reporter » la **non linéarité dans les prémisses**.

Considérons $f(x) = \cos(x(t))$ avec $f_{\min} = -1$ $f_{\max} = 1$

$$\Rightarrow \cos(x(t)) = \underbrace{\frac{\cos(x)+1}{2}}_{h_1(x)} \cdot 1 + \underbrace{\frac{1-\cos(x)}{2}}_{h_2(x)} \cdot (-1)$$

⇒ Si x est $h_1(x)$ alors $\dot{x}(t) = 1 \cdot x(t)$

Si x est $h_2(x)$ alors $\dot{x}(t) = (-1) \cdot x(t)$

⇒ **nb de règles** = 2^{nl}

nl = nombre de non linéarités prises en compte

Modélisation et commande floue : généralités



- Notations : Soit $Y \in \{A, B, C, H, P, \dots\}$

$$Y_z = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) Y_i, \quad Y_z^{-1} = \left(\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) Y_i \right)^{-1}$$

$$\text{et } Y_{zz} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) Y_{ij}$$



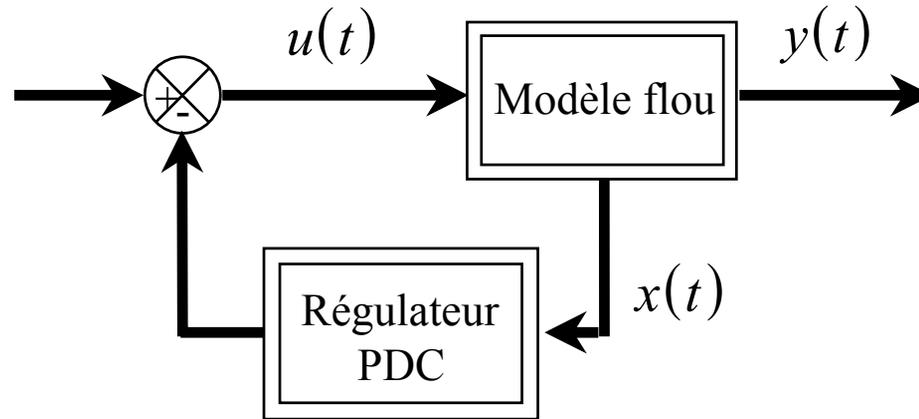
Réécriture du modèle flou TS :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_z x(t) + B_z u(t) \\ y(t) = C_z x(t) \end{cases}$$



Modélisation et commande floue : généralités

- **Commande floue de type PDC** /Wang et al., 1996/ :



$$u(t) = -F_z x(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t)$$

- Synthèse de la commande : calcul des gains F_i



utilisation d'une **fonction de Lyapunov**



outils **LMI (Linear Matrix Inequalities)**

/Boyd S. et al., 1994/

Modélisation et commande floue : généralités



- Stabilisation par fonction de Lyapunov quadratique :

$$P > 0, \quad V(x) = x^T P x$$

- **Conditions suffisantes de stabilisation :**

En posant : $\Upsilon_{ij} = (A_i - B_i F_j)^T P + P (A_i - B_i F_j)$

$$\dot{V} = x^T \Upsilon_{zz} x = x^T \left(\sum_{i=1}^r h_i^2 \Upsilon_{ii} + \sum_{i < j}^r h_i h_j (\Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji}) \right) x < 0$$

⇒ conditions classiques $\forall i, j \in \{1, \dots, r\}$,

$$\Upsilon_{ii} < 0$$

$$(1 \leq i < j \leq r), \quad \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} \leq 0$$



Modélisation et commande floue : généralités



- **Conditions suffisantes de stabilisation :**

En posant : $\Upsilon_{ij} = (A_i - B_i F_j)^T P + P (A_i - B_i F_j)$

⇒ conditions de **/Kim & Lee, 2000/** $Q_{ii} > 0$, $Q_{ij} = Q_{ij}^T$

$$\forall i \in \{1, \dots, r\}, \quad \Upsilon_{ii} + Q_{ii} < 0$$

$$(1 \leq i < j \leq r), \quad \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} + 2Q_{ij} \leq 0$$

$$\begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1r} \\ Q_{12} & Q_{22} & \cdots & Q_{2r} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Q_{1r} & Q_{2r} & \cdots & Q_{rr} \end{pmatrix} > 0$$

⇒ Bon compromis entre **conservativité** et **complexité**

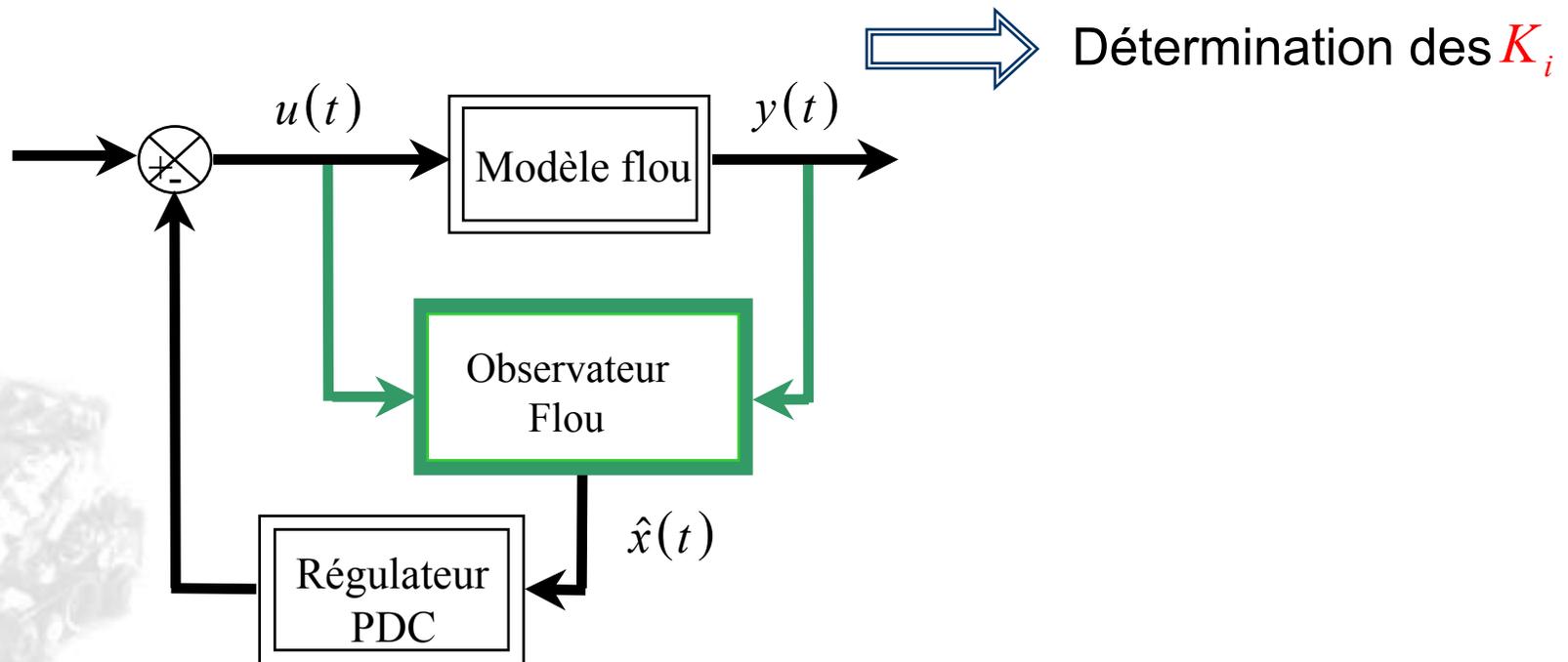
Conditions utilisées dans tous les théorèmes de la suite



Modélisation et commande floue : généralités

- Observateur

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\hat{z}(t)) (A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i (y(t) - \hat{y}(t))) \\ \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\hat{z}(t)) C_i \hat{x}(t) \end{cases}$$



Modélisation et commande floue : généralités



- Variables de **prémises mesurables** : $h_i(\hat{z}(t)) \rightarrow h_i(z(t))$

$$\text{avec : } G_{ij} = \begin{bmatrix} A_i - B_i F_j & B_i F_j \\ 0 & A_i - K_i C_j \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r h_i^2(z) G_{ii} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t) - \hat{x}(t) \end{bmatrix} + \sum_{i < j}^r h_i(z) h_j(z) (G_{ij} + G_{ji}) \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t) - \hat{x}(t) \end{bmatrix}$$



Il existe alors un **principe de séparation** du calcul de la commande et de l'observateur /Ma et al., 1998/, /Yoneyama et al., 2001/

Déterminer F_j et vérifier l'existence de P_c

Déterminer K_i et vérifier l'existence de P_o



Modélisation et commande floue : généralités

- Variables de **prémisse non mesurables**, $h_i(\hat{z}(t))$

⇒ apparition d'une triple somme $h_i(z(t))h_j(z(t))h_k(\hat{z}(t))$

$$G_{ijk} = \begin{bmatrix} A_i - B_i F_k & B_i F_k \\ A_i - A_j - (B_i - B_j) F_k + K_j (C_i - C_j) & A_j - K_j C_k + (B_i - B_j) F_k \end{bmatrix}$$

⇒ **pas de principe de séparation**

- Plus de LMI possibles : calculer les gains *a priori* puis trouver une matrice commune *a posteriori* $P > 0, 2n \times 2n$

Des conditions moins restrictives sont disponibles /Blanco 2001/
/Yoneyama et al., 2001/ ⇒ mais **pas de mise sous forme de LMI** ...

Travaux réalisés

| | Rejet | Retard | Robuste |
|--|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Commande (retour d'état) | | Théorèmes 3.2 & 3.3 (p.74,76) | Théorèmes 3.4 & 3.5 (p.81,84) |
| Commande & observation (retour d'état) | Théorème 2.2 (p.60) | | Théorème 3.6 (p.87) |

Quelques propriétés matricielles

- “Continu” (EMC) /Peaucelle et al., 2000/

$$\text{Trouver } X > 0, \Phi, \Psi, \text{ telles que } \begin{bmatrix} \Phi A^T + A \Phi^T + Y & X - \Phi + A \Psi \\ X - \Phi^T + \Psi^T A^T & -\Psi - \Psi^T \end{bmatrix} < 0$$

$$\Leftrightarrow \text{Trouver } X > 0, \text{ telle que } X A^T + A X + Y < 0$$

- “Discret” (EMD) /Peaucelle et al., 2000/

$$\text{Trouver } X > 0, \text{ telle que } Y + A^T X A < 0$$



$$\text{Trouver } X > 0, \text{ telles que } \begin{bmatrix} Y & A^T \\ A & -X^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{CS : complément de Schur})$$



$$\text{Trouver } X > 0, \Phi, \Psi, \text{ telles que } \begin{bmatrix} Y + A^T \Phi^T + \Phi A & -\Phi + A^T \Psi \\ -\Phi^T + \Psi^T A & X - \Psi - \Psi^T \end{bmatrix} < 0$$

Modélisation et commande floue : robuste



- Modèle flou considéré :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_z + \Delta A_z(t))x(t) + (B_z + \Delta B_z(t))u(t) \\ y(t) = (C_z + \Delta C_z(t))x(t) \end{cases}$$

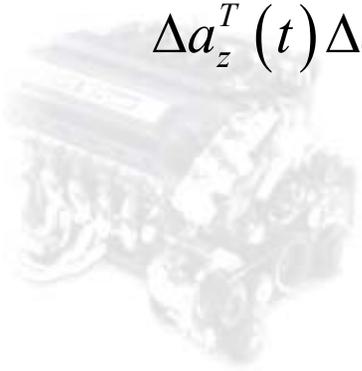
avec les incertitudes :

$$\Delta A_z = Ha\Delta a_z(t)Ea_z \quad \Delta B_z = Hb\Delta b_z(t)Eb_z \quad \Delta C_z = Hc\Delta c_z(t)Ec_z$$

⇒ $Ha, Hb, Hc, Ea_i, Eb_i, Ec_i$ matrices constantes

telles que :

$$\Delta a_z^T(t)\Delta a_z(t) \leq I \quad \Delta b_z^T(t)\Delta b_z(t) \leq I \quad \Delta c_z^T(t)\Delta c_z(t) \leq I$$



Modélisation et commande floue : robuste

- Soit le Modèle flou incertain :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{16} h_i(\hat{z}(t)) \left[(A_i + \Delta A_i(t))x(t) + B_i u(t) \right]$$

⇒ 16 règles + incertitudes + prémises non mesurables

- **Réduction de règles** : certaines non linéarités sont traitées comme des incertitudes

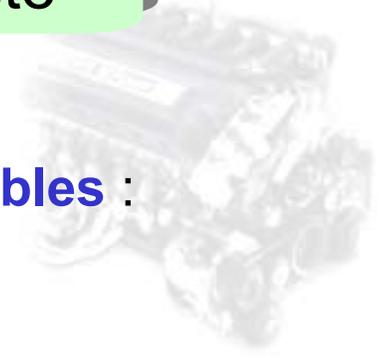
$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 h'_i(\hat{z}(t)) \left[(A'_i + \Delta A'_i(t))x(t) + B'_i u(t) \right]$$

⇒ **4 règles** + incertitudes + prémises non mesurables

- Intérêt :

⇒ Moins de conditions LMI à résoudre

Modélisation et commande floue : robuste



- **Réduction de règles** + **garder des prémisses mesurables** :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 h_i''(z(t)) \left[(A_i'' + \Delta A_i''(t)) x(t) + B_i'' u(t) \right]$$

⇒ **2 règles** + incertitudes + **prémisses mesurables**

- Intérêt :

⇒ Calcul d'un **observateur** et trouver des **conditions de stabilisation globales** ($h_i(\hat{z}(t)) \rightarrow h_i(z(t))$)



Modélisation et commande floue : robuste



- Commande basée sur une PDC :

$$u(t) = -F_z x(t)$$

- Le système bouclé complet devient :

$$\dot{x}(t) = (A_z - B_z F_z + \Delta A_z - \Delta B_z F_z) x(t)$$

- On considère la fonction de Lyapunov : $P > 0$, $V(x) = x^T P x$

avec taux de décroissance, alors la stabilité est assurée si :

$$\dot{V}(x) + 2\alpha V(x) < 0$$



Modélisation et commande floue : robuste

- Après quelques calculs :

$$XA_z^T + A_z X - M_z^T B_z^T - B_z M_z + 2\alpha X + \tau a_z^{-1} X E a_z^T E a_z X \\ + \tau a_z H a H a^T + \tau b_z^{-1} M_z^T E b_z^T E b_z M_z + \tau b_z H b H b^T < 0$$

⇒ Le problème n'est pas LMI

- En appliquant le complément de Schur (CS) :

$$Y_{ijSchur} = X A_i^T + A_i X - M_j^T B_i^T - B_i M_j + 2\alpha X + \tau a_i H a H a^T + \tau b_i H b H b^T$$

$$Y_{zzSchur} = \begin{bmatrix} Y_{zzSchur} & (*) & (*) \\ E a_z X & -\tau a_z I & 0 \\ E b_z M_z & 0 & -\tau b_z I \end{bmatrix} < 0$$

⇒ Par congruence avec $\begin{bmatrix} I & \tau a_z^{-1} X E a_z^T & \tau b_z^{-1} M_z^T E b_z^T \end{bmatrix}$

Modélisation et commande floue : robuste

$$XA_z^T + A_z X - M_z^T B_z^T - B_z M_z + 2\alpha X + \tau a_z HaHa^T + \tau b_z HbHb^T \\ + \tau a_z^{-1} XEa_z^T Ea_z X + \tau b_z^{-1} M_z^T Eb_z^T Eb_z M_z < 0$$

$$Y_{ij} = \Phi_j A_i^T + A_i \Phi_j^T - M_j^T B_i^T - B_i M_j + 2\alpha X + Ha\Phi a_i^T + \Phi a_i Ha^T + Hb\Phi b_i^T + \Phi b_i Hb^T$$

$$Y_{zz} = \begin{bmatrix} Y_{zz} & (*) & (*) & (*) & (*) & (*) \\ -\Phi a_z^T + \Psi a_z^T Ha^T & \tau a_z I - \Psi a_z - \Psi a_z^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Ea_z X & 0 & -\tau a_z I & 0 & 0 & 0 \\ -\Phi b_z^T + \Psi b_z^T Hb^T & 0 & 0 & \tau b_z I - \Psi b_z - \Psi b_z^T & 0 & 0 \\ Eb_z M_z & 0 & 0 & 0 & -\tau b_z I & 0 \\ X - \Phi_z^T + \Psi_z^T A_z^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Psi_z - \Psi_z^T \end{bmatrix} < 0$$

⇒ Congruence : $\begin{bmatrix} I & Ha & \tau a_z^{-1} X^T Ea_z^T & Hb & \tau b_z^{-1} X^T Eb_z^T & A_z^T \end{bmatrix}$

- Remarque : $Y_{zzSchur}$ est équivalent à Y_{zz}
mais conditions avec $Y_{ijSchur} \subset$ conditions avec Y_{ij}

Modélisation et commande floue : robuste

Exemple :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \left(\cos^2(x_2(t)) - \frac{1}{1+x_1^2(t)} \right) x_2(t) + \left(1 + \frac{1}{1+x_1^2(t)} \right) u(t) \\ \dot{x}_2(t) = b \left(1 + \frac{1}{1+x_1^2(t)} \right) \sin(x_2(t)) - 1,5x_1(t) - 3x_2(t) + (a \cos^2(x_2(t)) - 2)u(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases}$$

➔ Les non-linéarités sont : $\cos^2(x_2(t))$, $\frac{1}{1+x_1^2(t)}$, $\sin(x_2(t))$

La sortie mesurée est : $x_1(t)$

Modélisation et commande floue : robuste



- Découpage exact à 8 règles : $x_1(t) \in \mathbb{R}$ $x_2(t) \in \mathbb{R}$

$$\cos^2(x_2) = (1 - \cos^2(x_2)) \cdot 0 + \cos^2(x_2) \cdot 1 = w_{10} \cdot 0 + w_{11} \cdot 1$$

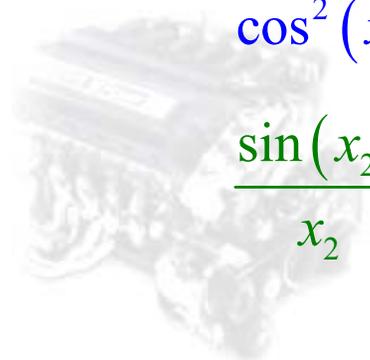
$$\frac{\sin(x_2)}{x_2} = \frac{1 - \sin(x_2)/x_2}{1 - \rho} \cdot \rho + \frac{\sin(x_2)/x_2 - \rho}{1 - \rho} \cdot 1 = w_{20} \cdot \rho + w_{21} \cdot 1$$

$$\frac{1}{1 + x_1^2} = \left(1 - \frac{1}{1 + x_1^2}\right) \cdot 0 + \frac{1}{1 + x_1^2} \cdot 1 = w_{30} \cdot 0 + w_{31} \cdot 1$$

- Découpage avec incertitudes à 2 règles :

$$\cos^2(x_2) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Delta_1(x_2) \quad |\Delta_1(x_2)| \leq 1$$

$$\frac{\sin(x_2)}{x_2} = \frac{1 + \rho}{2} + \frac{1 - \rho}{2} \Delta_2(x_2) \quad |\Delta_2(x_2)| \leq 1$$



Modélisation et commande floue : robuste

- Observateur flou:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_z \hat{x}(t) + B_z u(t) + K_z (y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C_z \hat{x}(t) \end{cases}$$

⇒ prémisses mesurables

- Commande robuste avec observateur :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\tilde{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_z + \Delta A_z - (B_z + \Delta B_z) F_z & (B_z + \Delta B_z) F_z \\ \Delta A_z + K_z \Delta C_z - \Delta B_z F_z & A_z - K_z C_z + \Delta B_z F_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \tilde{x}(t) \end{bmatrix}$$

avec : $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$

- Soit la fonction de Lyapunov : $X(t) = \begin{bmatrix} x(t) & \tilde{x}(t) \end{bmatrix}^T$

$$\bar{P} = \bar{P}^T = \begin{bmatrix} P_c & 0 \\ 0 & P_o \end{bmatrix} > 0, \quad V(X) = X^T \bar{P} X$$

Modélisation et commande floue : robuste

- **Théorème robuste + observateur :**

La boucle fermée complète est globalement asymptotiquement stable, si les conditions suivantes vérifiées :

$$\begin{aligned} & \left(A_z^T - F_z^T B_z^T \right) P_c + P_c \left(A_z - B_z F_z \right) + P_c \left(\frac{1}{\varepsilon a_z} H_a H_a^T + \frac{1}{\varepsilon b_z} H_b H_b^T + \frac{1}{\mu_z} I \right) P_c \\ & \quad + 2\varepsilon a_z E a_z^T E a_z + \varepsilon b_z \left(1 + \frac{1}{\delta} \right) F_z^T E b_z^T E b_z F_z + \varepsilon c_z E c_z^T E c_z < 0 \\ & \left(A_z^T - C_z^T K_z^T \right) P_o + P_o \left(A_z - K_z C_z \right) + F_z^T \left(\varepsilon b_z (1 + \delta) E b_z^T E b_z + \mu_z B_z^T B_z \right) F_z \\ & \quad + P_o \left(\frac{1}{\varepsilon a_z} H_a H_a^T + \frac{1}{\varepsilon b_z} H_b H_b^T + \frac{1}{\varepsilon c_z} K_z H_c H_c^T K_z^T \right) P_o < 0 \end{aligned}$$



problème pas LMI

Modélisation et commande floue : robuste

- On pose $X_c = P_c^{-1}$ et $M_z = F_z P_c^{-1}$

$$X_c A_z^T + A_z X_c - M_z^T B_z^T - B_z M_z + \left(\frac{1}{\varepsilon a_z} H_a H_a^T + \frac{1}{\varepsilon b_z} H_b H_b^T + \frac{1}{\mu_z} I \right)$$

$$+ 2\varepsilon a_z X_c E a_z^T E a_z X_c + \varepsilon b_z \left(1 + \frac{1}{\delta} \right) M_z^T E b_z^T E b_z M_z + \varepsilon c_z X_c E c_z^T E c_z X_c < 0$$

- On pose $N_z = P_o K_z$

$$A_z^T P_o + P_o A_z - C_z^T N_z^T - N_z C_z + F_z^T \left(\varepsilon b_z (1 + \delta) E b_z^T E b_z + \mu_z B_z^T B_z \right) F_z$$

$$+ P_o \left(\frac{1}{\varepsilon a_z} H_a H_a^T + \frac{1}{\varepsilon b_z} H_b H_b^T \right) P_o + \frac{1}{\varepsilon c_z} N_z H_c H_c^T N_z^T < 0$$



couplage sur F_z entre les deux inégalités

Modélisation et commande floue : robuste

- En utilisant les transformations matricielles **EMC**, **EMD**, **CS**:

⇒ 5 problèmes LMI sont définis à partir des conditions précédentes

⇒ un algorithme de résolution du problème est alors défini sans garantie de trouver une solution

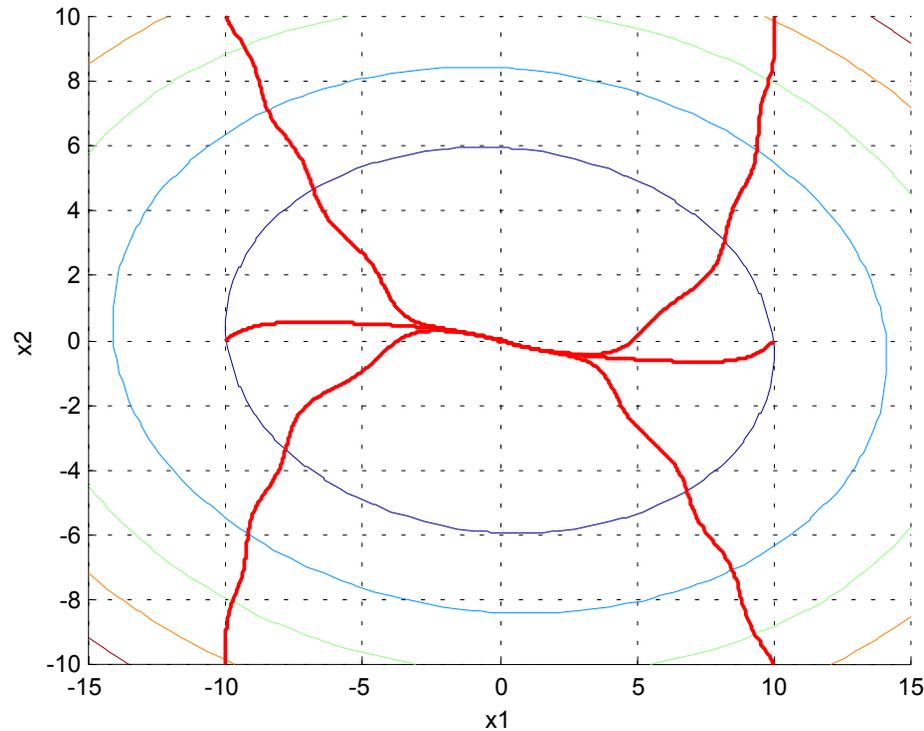
- Application à l'exemple précédent avec : $a = 1, \alpha = 0,2$

⇒ l'algorithme donne les matrices :

$$P_c = \begin{bmatrix} 0,1257 & 0,0123 \\ 0,0123 & 0,2264 \end{bmatrix} \quad P_o = \begin{bmatrix} 20,2868 & 0,0008 \\ 0,0008 & 0,1509 \end{bmatrix}$$

Modélisation et commande floue : robuste

- Trajectoires dans l'espace d'état :



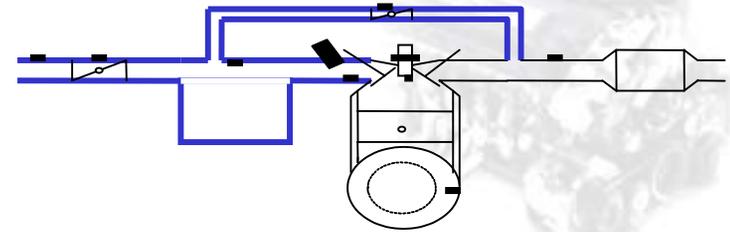
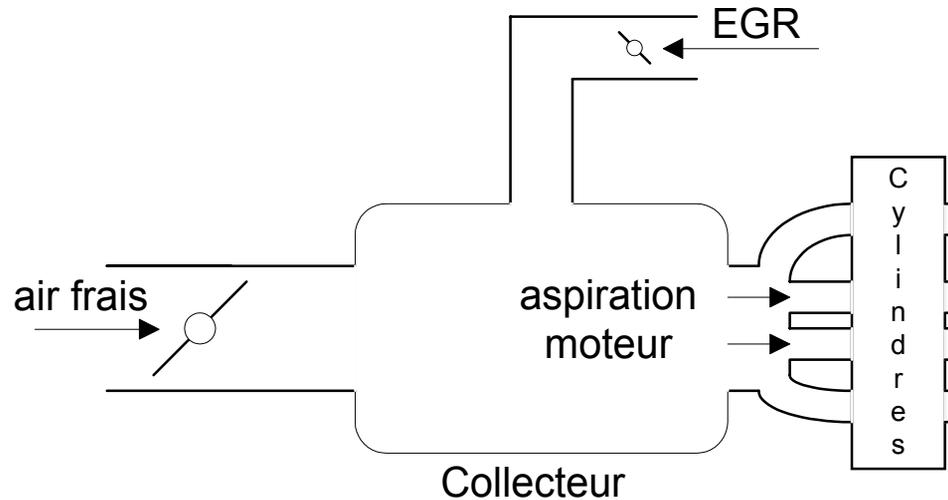
Application des outils théoriques au moteur thermique

Application au moteur

| | Rejet | Retard | Robuste |
|---------------------------|--------------------|---------------|----------------------------|
| Commande | | Régulation de | Couples moteur moyen et |
| Commande & observation | Admission d'air | richesse | instantané |

Application au moteur : admission air

- Admission d'air :



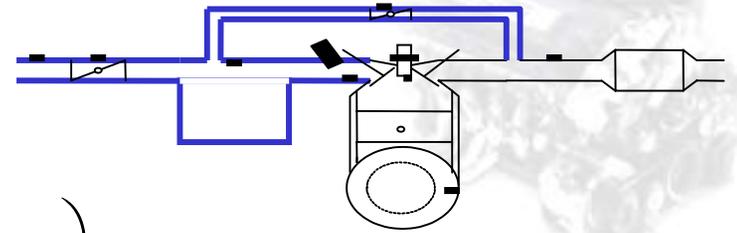
➡ Deux actionneurs

➡ Deux grandeurs à réguler :

- la pression dans le collecteur P_{col}

- le taux d'EGR R_{egr}

Application au moteur : admission air



- Dynamiques mises en jeu :

$$\dot{P}_{\text{col}} = \frac{1}{C} \left(\dot{m}_{\text{af}} + \dot{m}_{\text{egr}} - \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{\text{cyl}_i} \right)$$

- Les dynamiques des actionneurs **commandés** en angle sont du **1er ordre** :

$$\dot{\Phi}_{\text{af}} = \frac{1}{\tau_{\text{af}}} \left(k\Phi_{\text{af_cmd}} - \Phi_{\text{af}} \right)$$

$$\dot{\Phi}_{\text{egr}} = \frac{1}{\tau_{\text{egr}}} \left(k\Phi_{\text{egr_cmd}} - \Phi_{\text{egr}} \right)$$

Objectif : **réaliser le suivi d'une trajectoire de référence pour la pression collecteur**



Deux approches avec ou sans mesure des positions des actionneurs



Application au moteur : admission air



- Le paramètre suivant est introduit : $\alpha(t) \in [0,1]$

$$\dot{m}_{\text{egr}} = \alpha(t) \dot{m}_{\text{af}}$$

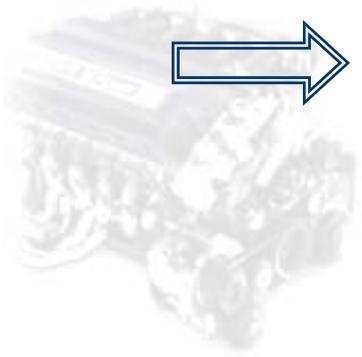
$$\Rightarrow \dot{P}_{\text{col}} = \frac{1}{C} \left((1 + \alpha(t)) \dot{m}_{\text{af}} - \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{\text{cyl}_i} \right)$$

- Cas 1 : pas de mesure

$$\Rightarrow \text{nouvelle commande : } v_{\text{af}} = \dot{m}_{\text{af}}(P_{\text{col}}, \Phi_{\text{af}})$$

Régulateur linéarisant à 2 paramètres et à structure intégrale

$$\Rightarrow \text{commandes : } \begin{aligned} \Phi_{\text{af_cmd}} &= \dot{m}_{\text{af}}^{-1}(P_{\text{col}}, v_{\text{af}}) \\ \Phi_{\text{egr_cmd}} &= \dot{m}_{\text{egr}}^{-1}(P_{\text{col}}, \alpha(t) v_{\text{af}}) \end{aligned}$$



Application au moteur : admission air

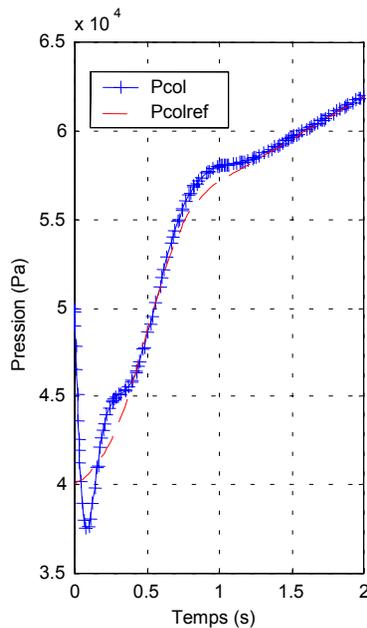


- Cas 2 : dynamique des actionneurs

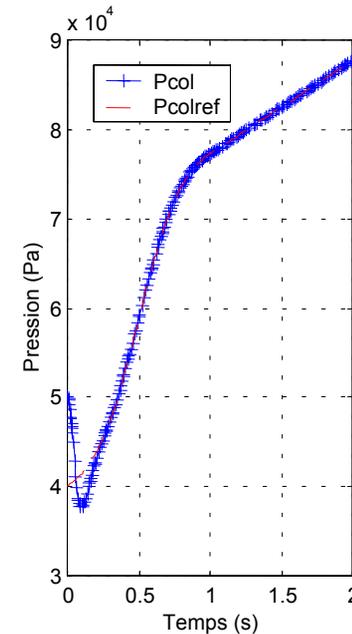
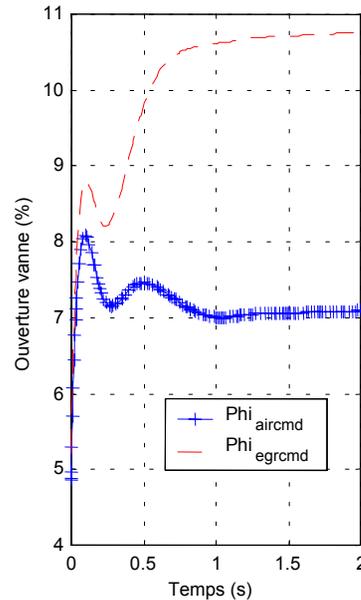
Régulateur linéarisant à 3 paramètres et à structure intégrale



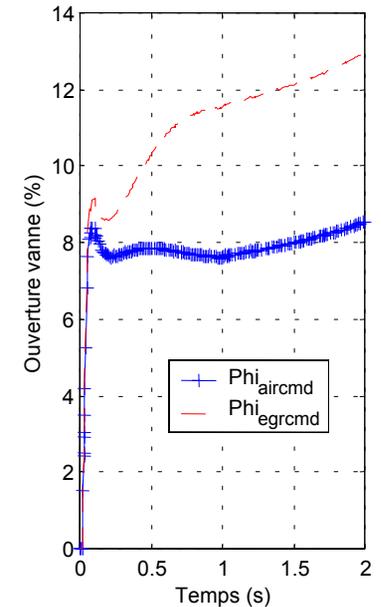
même méthode que précédemment



Cas 1



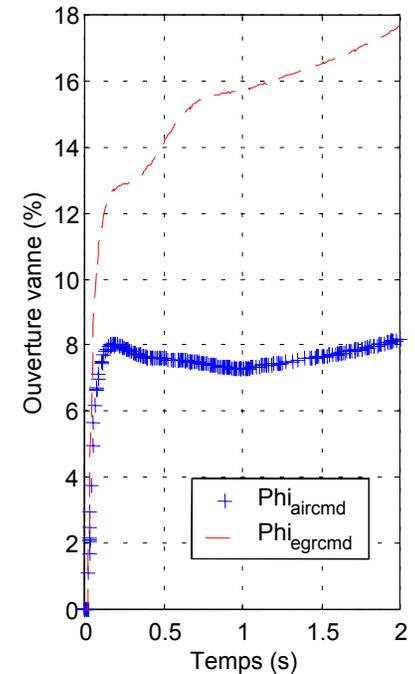
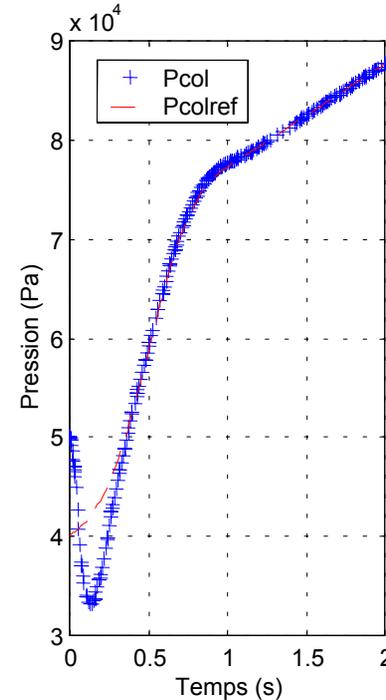
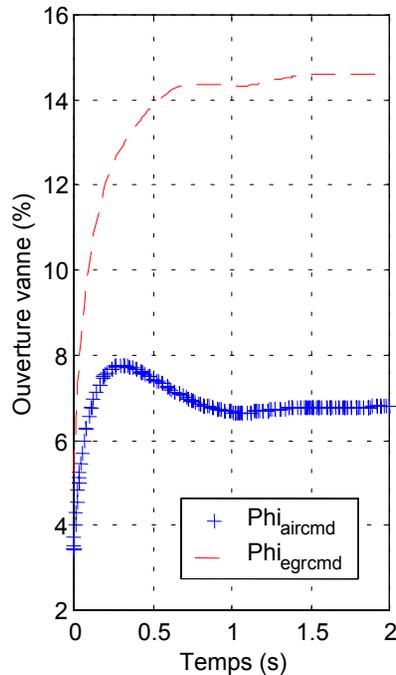
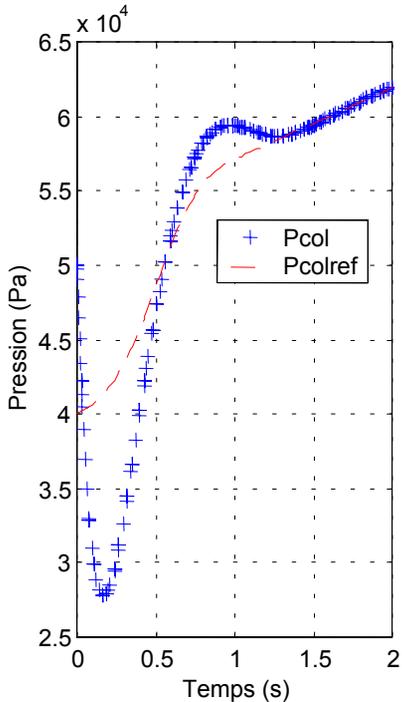
Cas 2



Application au moteur : admission air



- Test de robustesse (erreurs sur les débits) :



Cas 1

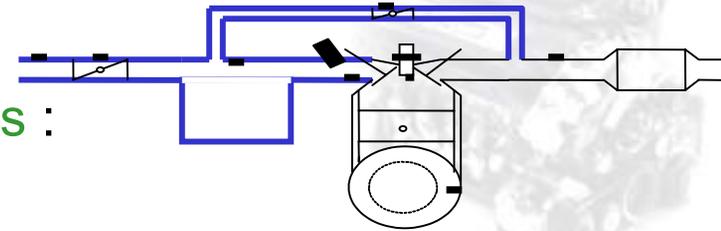
Cas 2



Commande 2 est plus robuste

Application au moteur : admission air

- Commande floue **avec rejet de perturbations** :
- Dynamiques mises en jeu :



$$\dot{P}_{\text{col}} = \frac{1}{C} \left(\dot{m}_{\text{af}} + \dot{m}_{\text{egr}} - \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{\text{cyl}_i} \right)$$

$$\dot{x}_{\text{egr}} = \frac{\dot{m}_{\text{egr}}}{\bar{m}_{\text{af}}} - \frac{\dot{m}_{\text{af}}}{\bar{m}_{\text{af}}} x_{\text{egr}}$$

- Les dynamiques des actionneurs commandés en angle sont du 1er ordre :

$$\dot{\Phi}_{\text{af}} = \frac{1}{\tau_{\text{af}}} \left(k\Phi_{\text{af_cmd}} - \Phi_{\text{af}} \right)$$

$$\dot{\Phi}_{\text{egr}} = \frac{1}{\tau_{\text{egr}}} \left(k\Phi_{\text{egr_cmd}} - \Phi_{\text{egr}} \right)$$



Application au moteur : admission air



- Le modèle se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \\ \dot{x}_2 = f_{21}(x_1, x_3, x_4) - f_{22}(x_1, x_3)x_2 \\ \dot{x}_3 = a_3x_3 + b_3u_1 \\ \dot{x}_4 = a_4x_4 + b_4u_2 \end{cases} \quad \text{et } y = [x_1 \ x_2]^T$$

avec $x_1 = P_{\text{col}}$, $x_2 = x_{\text{egr}}$, $x_3 = \Phi_{\text{air}}$, $x_4 = \Phi_{\text{egr}}$

$u_1 = \Phi_{\text{air_cmd}}$, $u_2 = \Phi_{\text{egr_cmd}}$

- Obtention du modèle flou :



NL dans les fonctions $f_1(x)$, $f_{21}(x)$, $f_{22}(x)$

Application au moteur : admission air

- Réécriture du modèle :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_{1d}x_1 + \lambda_1x_3 \\ \dot{x}_2 = f_{21d}x_1 - f_{22d}x_2 + \lambda_2x_4 \\ \dot{x}_3 = a_3x_3 + b_3u_1 \\ \dot{x}_4 = a_4x_4 + b_4u_2 \end{cases} \quad \text{et } y = [x_1 \ x_2]^T$$

avec $f_{1d} = (f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) - \lambda_1x_3)/x_1$

$$f_{21d} = (f_{21}(x_1, x_3, x_4) - \lambda_2x_4)/x_1$$

$$f_{22d} = (f_{22}(x_1, x_3))/x_1$$

⇒ Découpage des fonctions $f_{1d}(x)$, $f_{21d}(x)$, $f_{22d}(x)$

⇒ λ_1, λ_2 choisis pour obtenir des sous-modèles commandables et observables

Application au moteur : admission air

- Modèle flou à huit règles :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_z x(t) + B_z u(t) \\ y(t) = C_z x(t) \end{cases}$$

avec

$$A_i = \begin{pmatrix} f_{1d} & 0 & \lambda_1 & 0 \\ f_{21d} & f_{22d} & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 \end{pmatrix} \quad B_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & b_4 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \end{pmatrix}^T \quad C_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

⇒ application du rejet de perturbations

⇒ reconstruction des **perturbations lentement variables**

Application au moteur : admission air

- Observateur flou :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \bar{A}_z \hat{x}(t) + \bar{B}_z u(t) + \bar{K}_z (y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = \bar{C}_z \hat{x}(t) \end{cases}$$

avec $\hat{x}(t) = \left(\hat{d}_1 \quad \hat{d}_2 \quad \hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{x}_3 \quad \hat{x}_4 \right)^T$

et la matrice de perturbation $D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$

➡ les variables de prémisses dépendent des variables mesurées

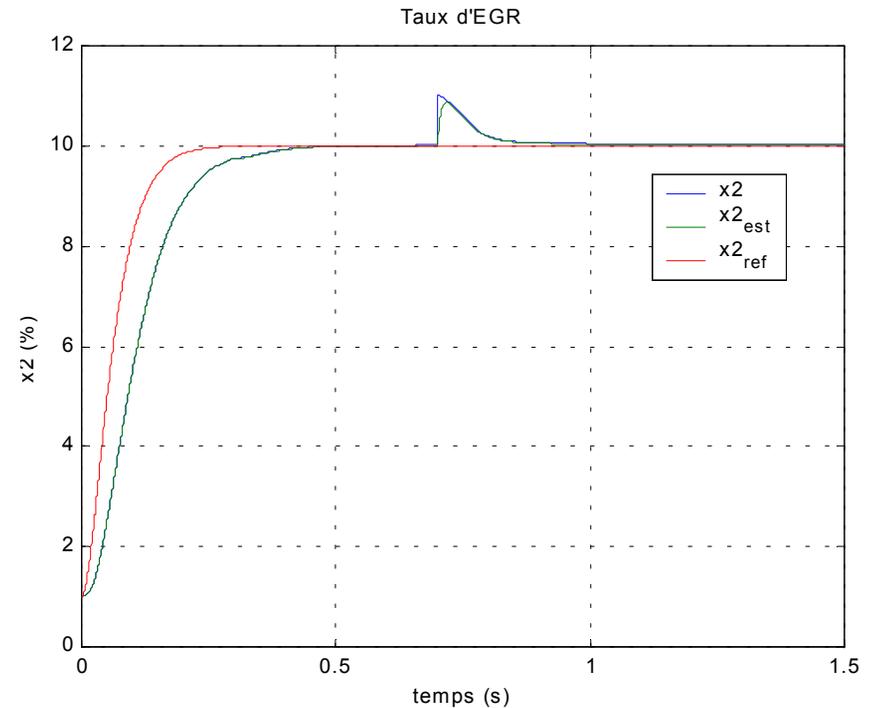
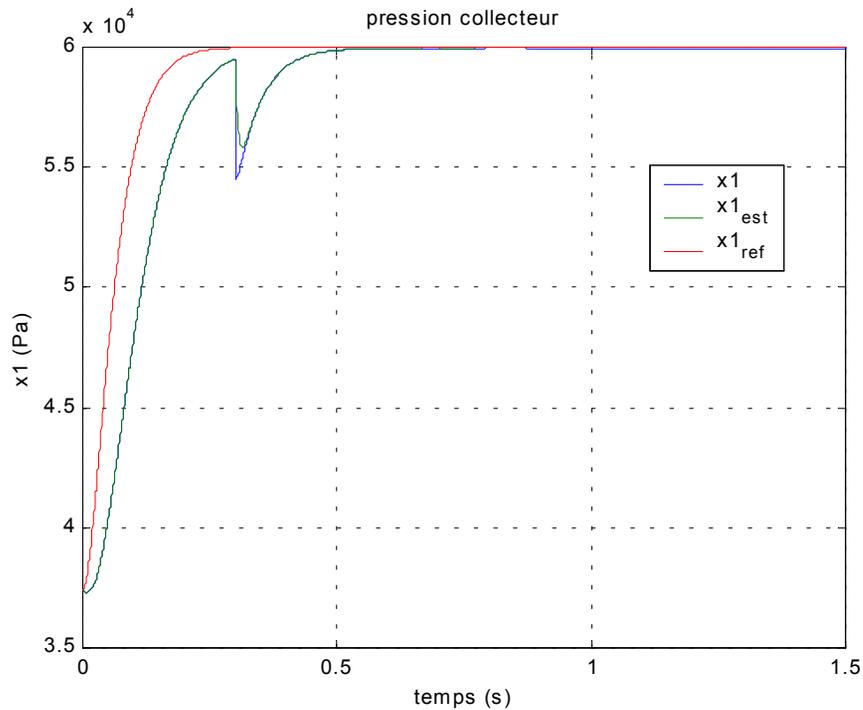
$$x_1, x_2, x_3, x_4$$

➡ principe de séparation applicable

Application au moteur : admission air



• Résultats de simulation:



Suivi des consignes

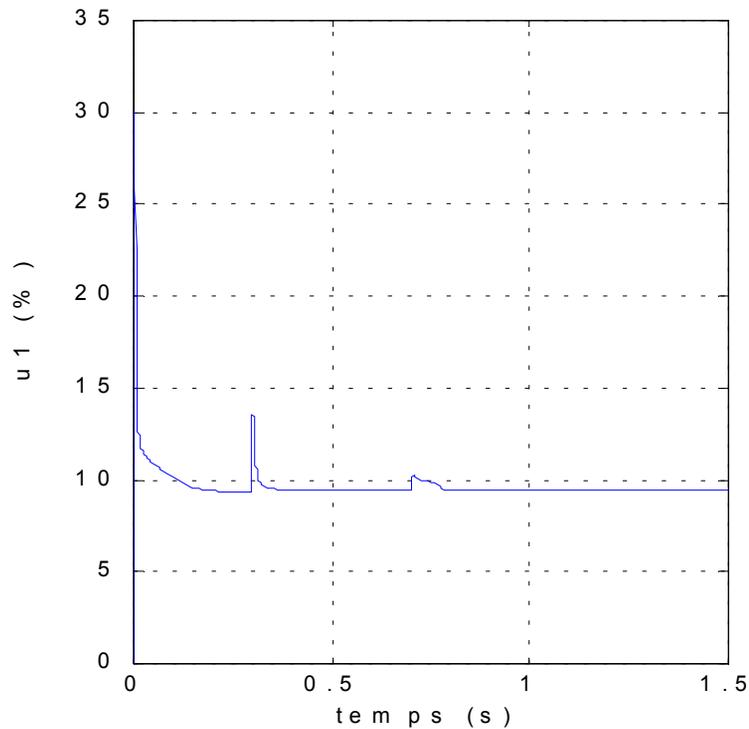


Application au moteur : admission air

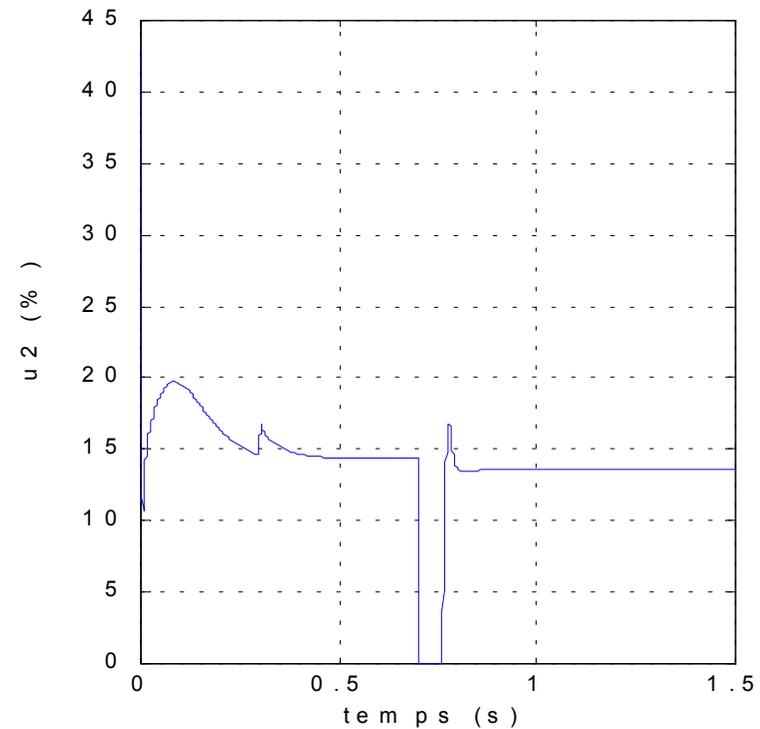
- Résultats de simulation:



Air



EGR



Commandes

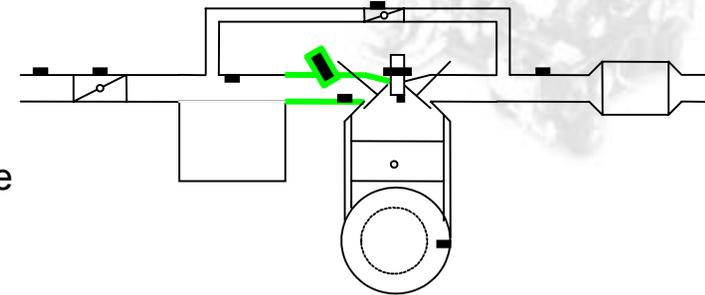
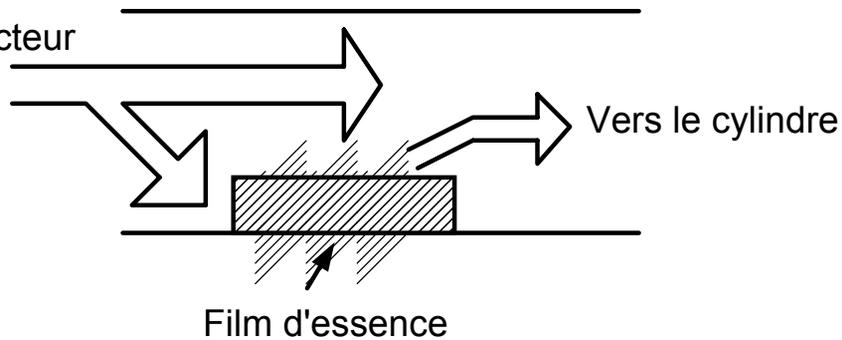


Application au moteur : richesse

- Commande de la richesse par la quantité d'essence

injectée :

depuis l'injecteur



Compensation du phénomène de mouillage :

$$C_{a\varphi}(p) = \frac{1 + \tau_n p}{1 + (1 - c_n) \tau_n p}$$



Réécriture du modèle :

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_i = \frac{\dot{m}_{af_cyl}}{\lambda_s \bar{m}_{ess}} - \frac{\lambda_i}{\bar{m}_{ess}} (u(t) + \Delta u(t)) \\ \dot{\lambda}(t) = \frac{1}{\tau_\lambda} (\lambda_i(t - t_1(\theta)) - \lambda(t)) \end{cases}$$

Application au moteur : richesse

- Comparaison de lois de commande :
 - application de la commande floue
 - modes glissants d'ordre 1

- Commande floue :

➡ Obtention d'un **modèle flou à quatre règles** en découpant :

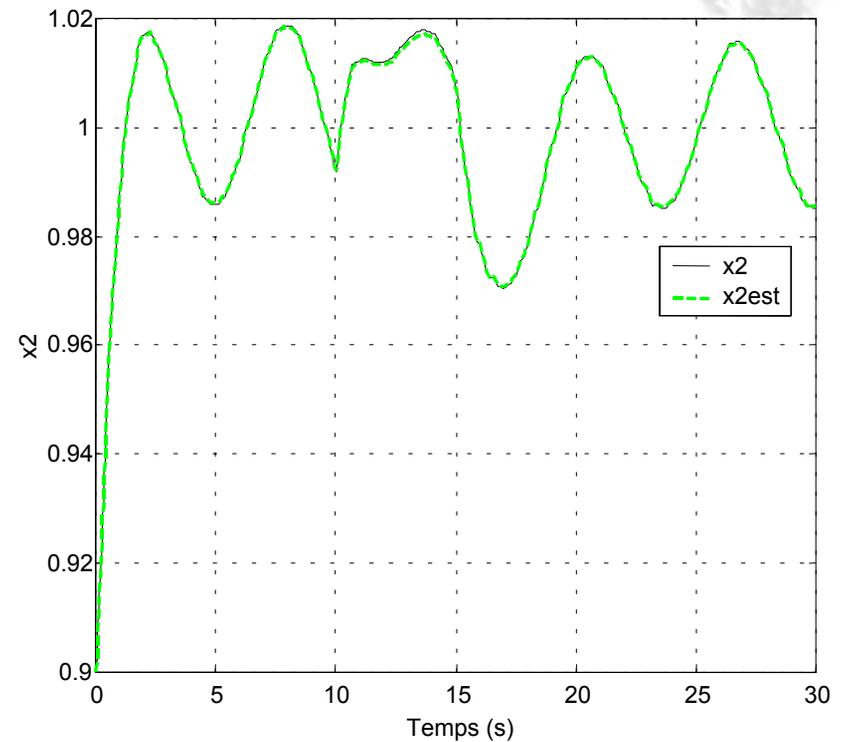
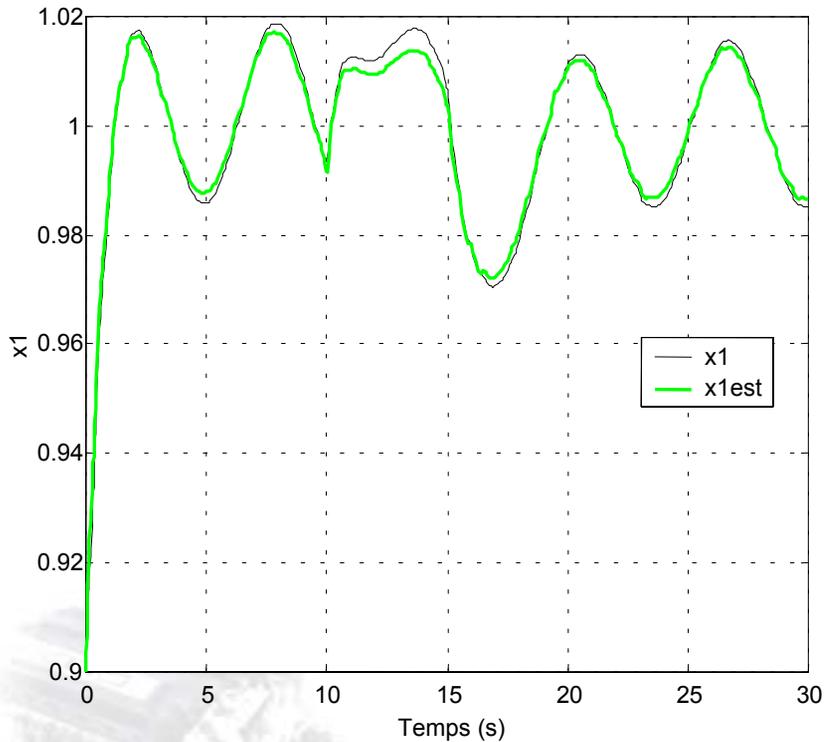
$$\frac{\lambda_i(t) \dot{m}_{af_cyl}(t)}{\lambda_s \bar{m}_{ess}(t)} \quad \text{et} \quad \frac{\lambda_i(t)}{\bar{m}_{ess}(t)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(z(t)) (A_{1i}x(t) + A_{2i}x(t - \tau(t)) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(z(t)) (C_{1i}x(t) + C_{2i}x(t - \tau(t))) \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} x(t) = \begin{bmatrix} \lambda_i(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} \\ y(t) = \lambda(t) \end{array}$$

➡ Calcul d'un **observateur sur le système sans retard** pour $\lambda_i(t)$

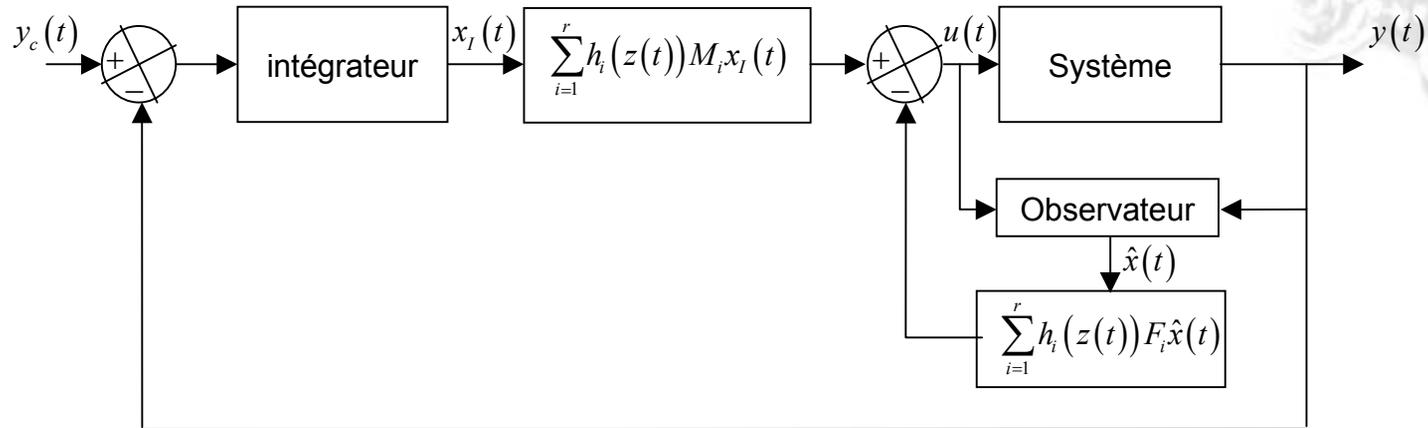
Application au moteur : richesse

- Observateur : retard = 0.025 s



Application au moteur : richesse

- Ajout d'une structure intégrale pour annuler les erreurs stationnaires :



$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(z(t)) (A'_{1i} X(t) + A'_{2i} X(t - \tau(t)) + B'_i u(t)) + B y_c(t) \\ y(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(z(t)) (C'_{1i} X(t) + C'_{2i} X(t - \tau(t))) \end{cases} \quad \text{avec } X(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x_I(t) \end{bmatrix}$$

- **Commande floue PDC** : $u(t) = -\sum_{i=1}^4 h_i(z(t)) F'_i X(t)$



Application du théorème retard (théorème 3.3, p.76):

$$F'_1 = [5,8 \ 4,5 \ -4,6] \cdot 10^{-3} \quad F'_2 = [6,5 \ 4,6 \ -4,7] \cdot 10^{-3} \quad F'_3 = [3,3 \ 2,3 \ -2,5] \cdot 10^{-3} \quad F'_4 = [3,7 \ 2,3 \ -2,5] \cdot 10^{-3}$$

Application au moteur : richesse

- Modes glissants d'ordre 1 :



Choix de la **surface de glissement** :

$$s = k_P e(t) + k_I \int_0^t e(v) dv + k_D \dot{e}(t)$$

avec : $e(t) = \lambda(t) - 1$

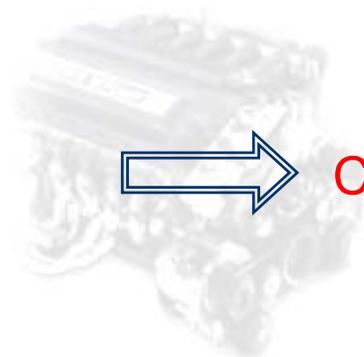


La commande obtenue vérifie :

$$\begin{cases} u(t) = k \beta \operatorname{sgn}(s) \\ k \geq |\Delta f(t)| \end{cases}$$

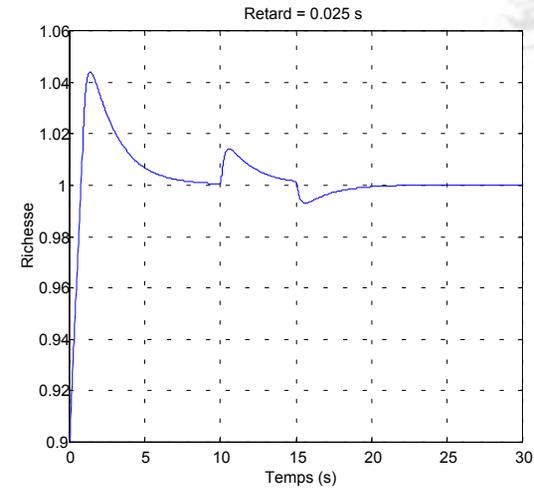
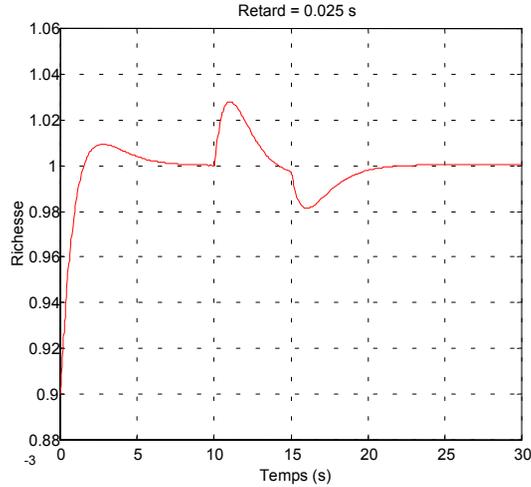


Comparaison des deux lois de commandes



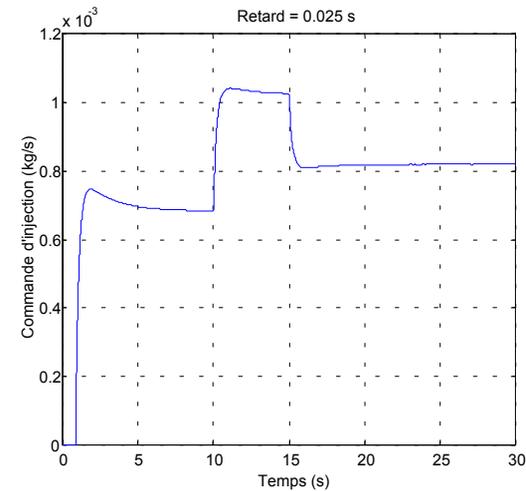
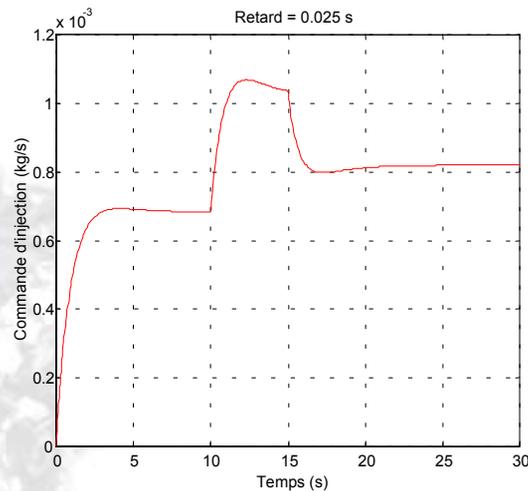
Application au moteur : richesse

- Comparaison des deux commandes : Retard : $0,025\text{ s}$



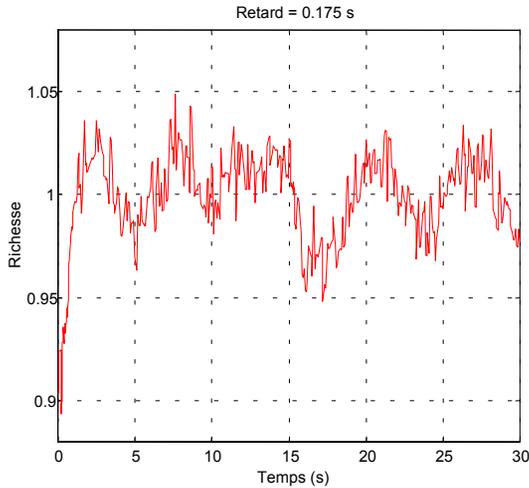
TS

MG

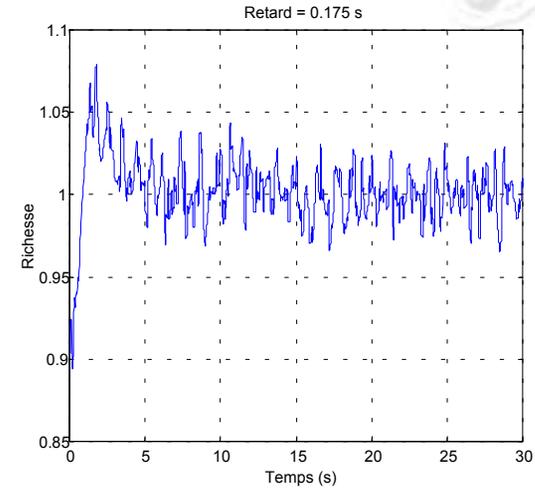


Application au moteur : richesse

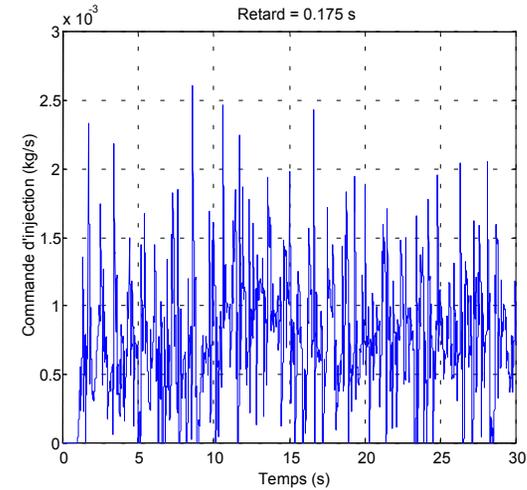
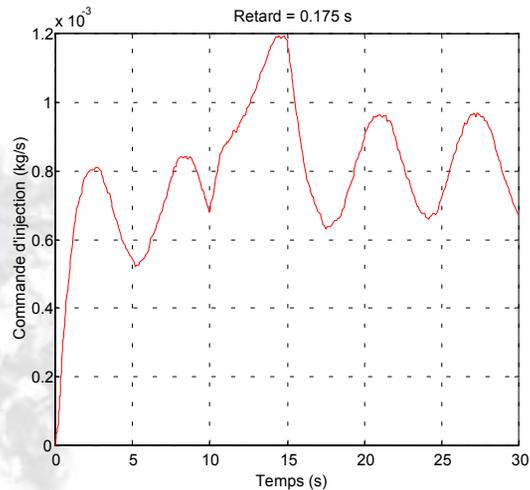
- Comparaison des deux commandes : Retard : $0,175\text{ s}$



TS



MG



Application au moteur thermique : couple

- Objectifs :

- le couple n'est pas mesuré de série
 - ⇒ estimation du couple
- le conducteur génère une consigne de couple via la pédale
 - ⇒ nécessité d'une commande en couple moyen

- Mise en œuvre :

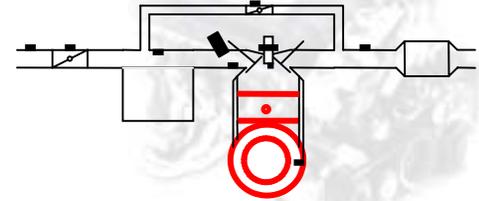
- estimation du couple moteur instantané basé sur un observateur à entrée inconnue
- commande floue robuste du couple moyen



Application au moteur thermique : couple

- Modèle considéré :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J}(C_m - C_r) \end{cases} \quad \text{avec } x_1 = \theta, \quad x_2 = \dot{\theta}$$



- **Observateur à entrée inconnue** basé sur /Stotsky et Kolmanovsky, 2002/ :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2(t) = k \operatorname{sgn}(s(t)) \\ \dot{s}(t) = \frac{1}{J}(C_m(t) - C_r(t)) - k \operatorname{sgn}(s(t)) \\ \dot{\hat{x}}(t) = \frac{1}{\tau_0}(-\hat{x}(t) + k \operatorname{sgn}(s(t))) \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} s(t) = x_2(t) - \hat{x}_2(t) \\ x(t) = \frac{1}{J}(C_m(t) - C_r(t)) \end{cases}$$



Observation de $x(t)$

Application au moteur thermique : couple

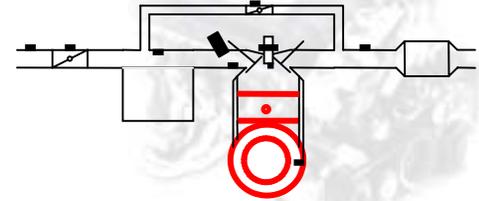
- Séparation des deux couples :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}(t_{PMH}(k)) \approx -\frac{1}{J} C_r(t_{PMH}(k)) \\ t_{PMH}(k) = t_{PMH}(k-1) + \frac{\pi}{2\theta}, \quad k \geq 1 \\ t_{PMH}(0) = t_{PMH_0} \end{array} \right.$$

➡ **Calcul des deux couples**

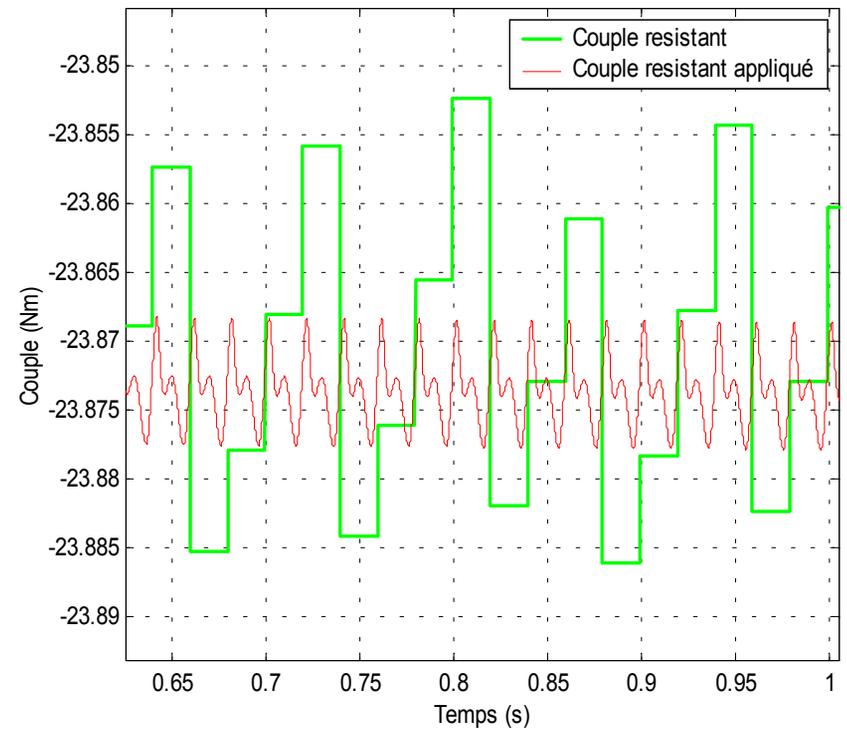
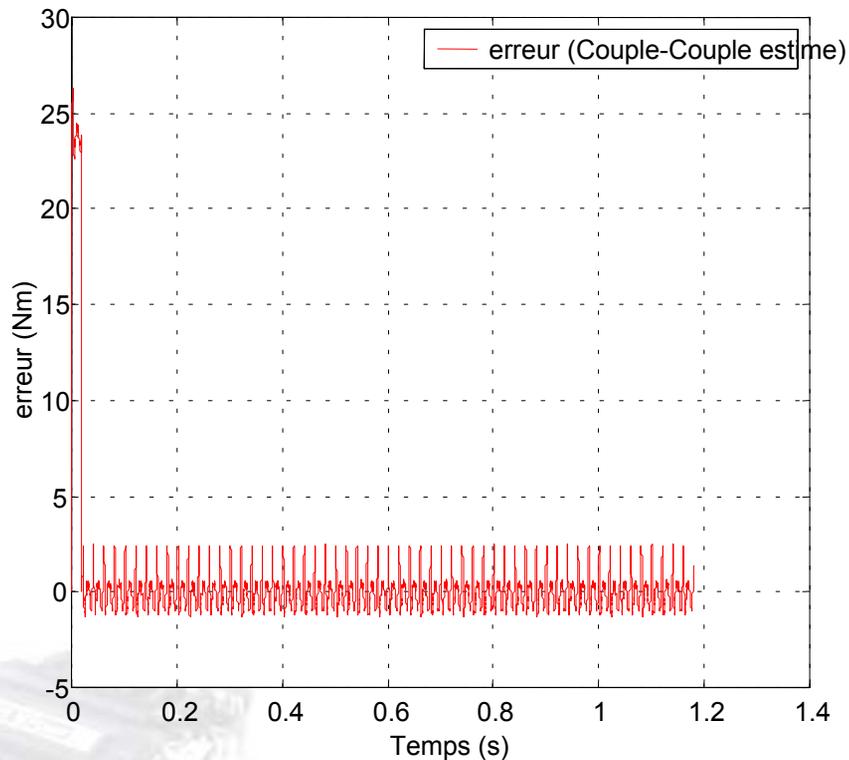
$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{C}_r(t) = \hat{C}_r(t_{PMH}(k)) \\ \frac{1}{J} \hat{C}_m(t) = \hat{x}(t) + \frac{1}{J} \hat{C}_r(t) \end{array} \right.$$

➡ Suppose que le couple résistant varie lentement par rapport au couple moteur instantané



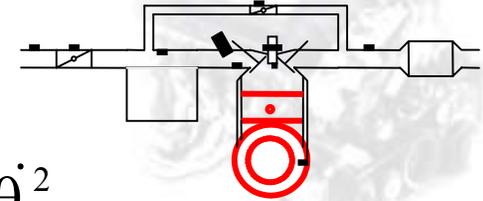
Application au moteur thermique : couple

- Résultats obtenus : $J = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ $\tau_0 = 10^{-4} \text{ s}$



Application au moteur thermique : couple

- Commande floue robuste :



- Modèle du **couple moteur moyen** :

$$C_m = \gamma_1 + \gamma_2 m_a + \gamma_3 r_i + \gamma_4 r_i^2 + \gamma_5 \alpha + \gamma_6 \alpha^2 + \gamma_7 \dot{\theta} + \gamma_8 \dot{\theta}^2 + \gamma_9 \dot{\theta} \alpha + \gamma_{10} \alpha m_a + \gamma_{11} \alpha^2 m_a + \gamma_{12} \alpha \dot{m}_a$$

- La masse d'air : $m_a = \frac{\pi \dot{m}_{cyl}}{\dot{\theta}}$

- Le débit global dans les cylindres est exprimé par :

$$\dot{m}_{cyl} = c_1 + c_2 P_{col} \dot{\theta} + c_3 P_{col}^2 \dot{\theta} + c_4 \dot{\theta}^2 P_{col}$$

- La pression dans le collecteur est donnée par la dynamique :

$$\dot{P}_{col} = \frac{1}{C} \left((1 + x_{egr}) \dot{m}_{af} - \dot{m}_{cyl} \right)$$

- Le modèle de l'actionneur régulé : $\dot{\Phi}_{af} = \frac{1}{\tau_a} (k \Phi_{afcmd} - \Phi_{af})$

Application au moteur thermique : couple



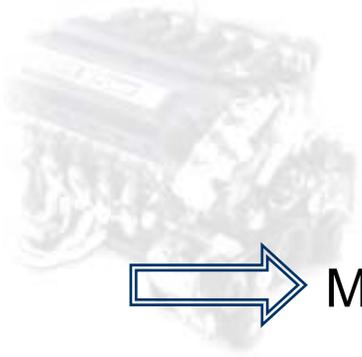
- Obtention du modèle flou :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C} \left(- (x_1 \dot{\theta}) c_3 x_1 + \beta_1(t) x_2 \right) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\tau_a} (k u_1 - x_2) \\ y = \left(\beta_2(t) + \pi a_1 c_2 \right) x_1 \end{cases}$$

- Découpage de la fonction pour les prémisses : $(x_1 \dot{\theta})$
- Découpage des fonctions pour les incertitudes :

$$\forall i \in \{1, 2\}, \quad \beta_i(t) = \beta m_i + \beta r_i \beta_{fi}(t)$$

$$\beta_{fi}(t) \in [-1, 1]$$



Modèle flou à 2 règles

Application au moteur thermique : couple

- Modèle flou à 2 règles :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_z + \Delta A_z(t))x(t) + (B_z + \Delta B_z(t))u(t) \\ y(t) = (C_z + \Delta C_z(t))x(t) \end{cases}$$

avec

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{c_3 \alpha_1}{C} & \frac{\beta m_1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_a} \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{c_3 \alpha_2}{C} & \frac{\beta m_1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_a} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{\tau_a} \end{bmatrix} \quad B_2 = B_1$$

$$C_1 = [\beta m_2 + \pi a_1 c_2 \quad 0] \quad C_2 = C_1 \quad \Delta A_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\beta r_1 \beta_{f1}(t)}{C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Delta A_2 = \Delta A_1$$

$$\Delta B_1 = \Delta B_2 = 0 \quad \Delta C_1 = [\beta r_2 \beta_{f2}(t) \quad 0] \quad \Delta C_2 = \Delta C_1$$



Rajout d'une structure intégrale

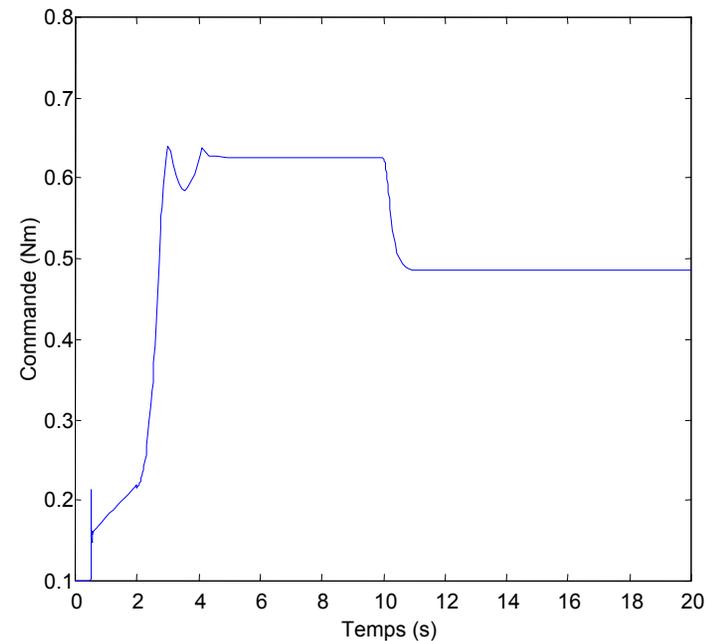
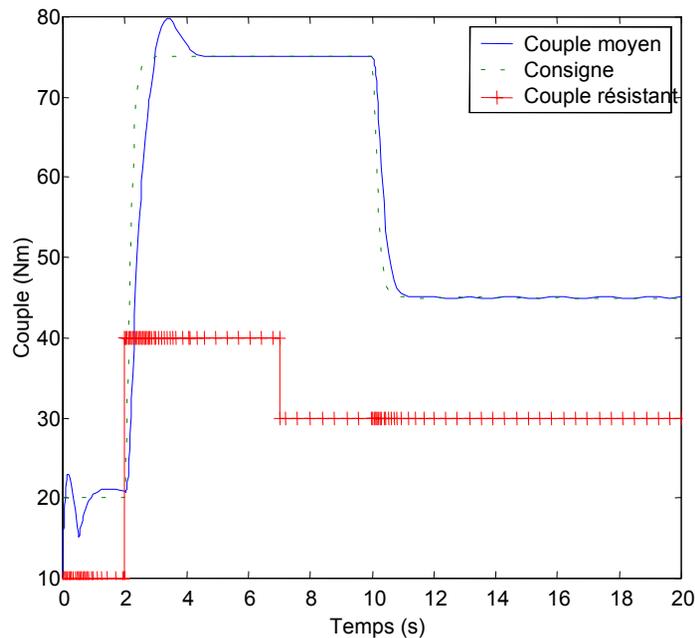
Application au moteur thermique : couple

➔ **Application du théorème *robuste* (théorème 3.5, p.84)**

- Calcul des gains de commande :

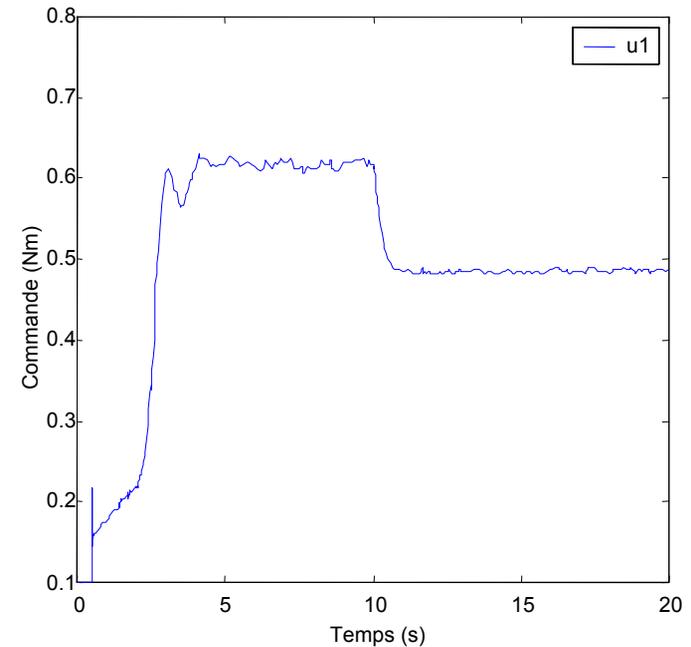
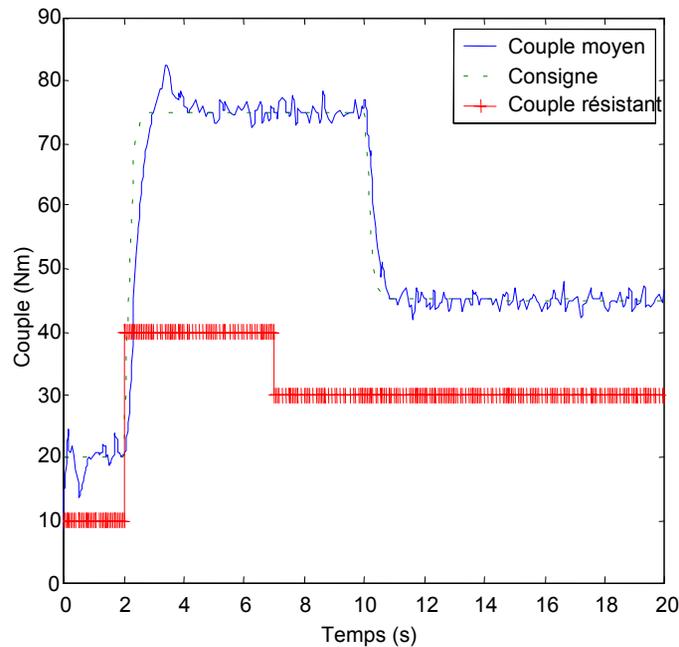
$$F_1' = [-109,9 \quad -13,8 \quad 5,1]$$

$$F_2' = [-83 \quad -10,1 \quad 3,9]$$



Application au moteur thermique : couple

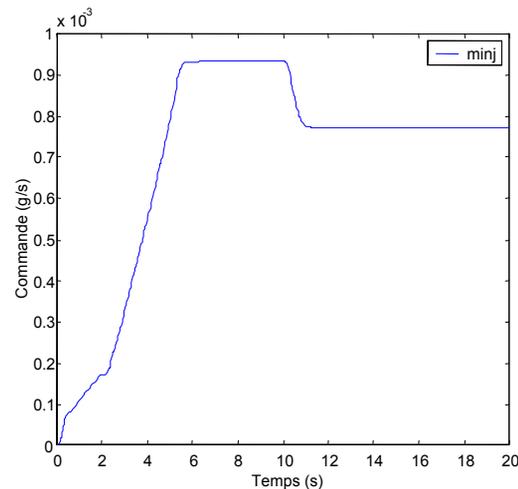
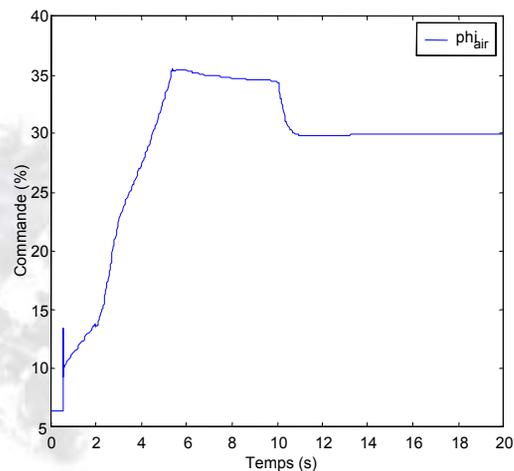
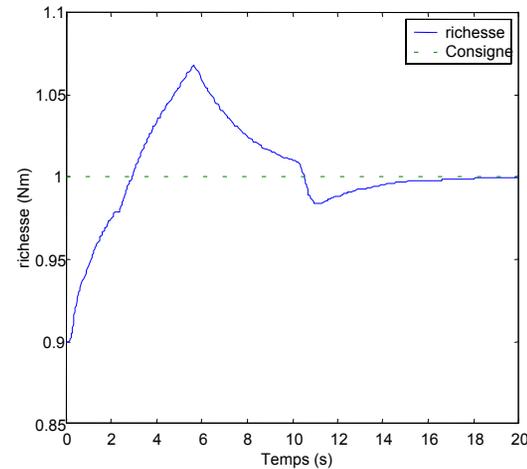
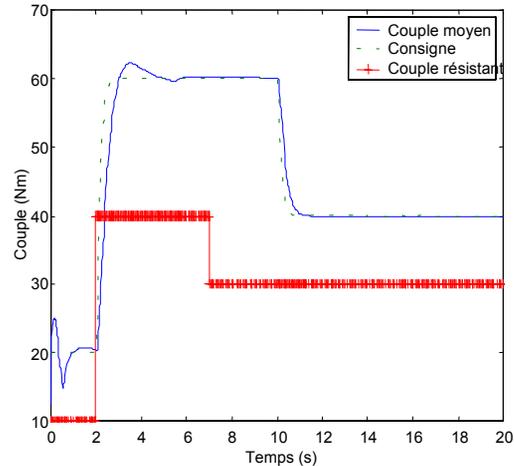
- Courbes avec bruits de mesures et erreurs sur les débits :



Application au moteur thermique : globale

- Vers une commande globale :

retard = 0,175 s



Conclusions et perspectives

- Conclusions :
 - modèle non linéaire de moteur à allumage commandé avec EGR
 - développements théoriques sur la commande floue (retards, robuste)
 - applications et comparaison de lois de commande sur le moteur
 - en parallèle, mise en route d'un banc d'essais moteur



Commande de l'air et de l'EGR

Commande de l'injection d'essence



Conclusions et perspectives

Perspectives :

- développement d'une commande globale en prenant en compte l'avance à l'allumage
- validations des modèles utilisés et des lois de commande sur le banc d'essais moteur en cours de développement



Conclusions et perspectives

Perspectives :

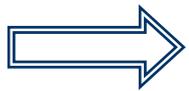
- prise en compte de la **pollution** :
 - identification
 - prise en compte dans la commande
- **intégration numérique** des lois de commande :
 - discrétisation de la commande
 - commande synthétisée en discret (possibilité d'utiliser des fonctions de Lyapunov non quadratique)
- nouveaux développements théoriques :
 - commande floue avec **observateur**,
 - **commande « optimale » floue**



Conclusions et perspectives

Perspective à long terme :

- depuis l'identification de modèles TS jusqu'à la commande :
 - outils d'identification /Gasso, 2000/ /Ronval, 2002/
 - **procédure systématique**



Gain de temps pour la mise au point de la commande
d'un nouveau moteur





Merci de votre attention ...

