

THESE de DOCTORAT de L'UNIVERSITE de METZ

# Modélisation et commande de systèmes de conversion de l'énergie pour l'automobile



Présentée par:

Fehd BEN AICHA

**Encadrants et directeurs:**

Karim BENCHERIF

Michel SORINE

Jean Claude VIVALDA

24/11/2008



# Plan de l'exposé

- I.** Contexte de l'étude et objectifs de la thèse
- II.** Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué
- III.** Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible
- IV.** Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique
- V.** Comparaison entre les deux systèmes étudiés
- VI.** Conclusions et perspectives

# I. Contexte de l'étude et objectifs de la thèse

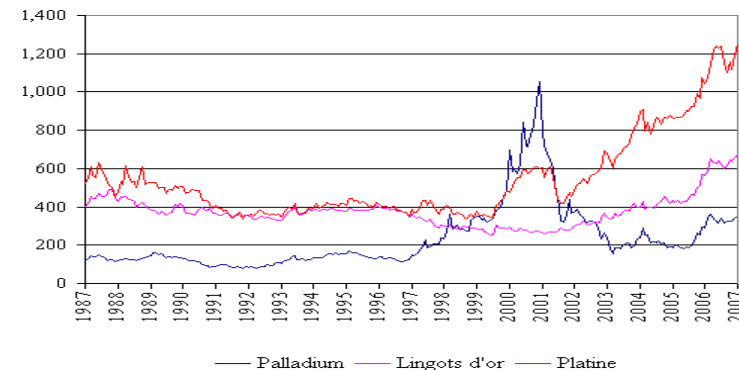
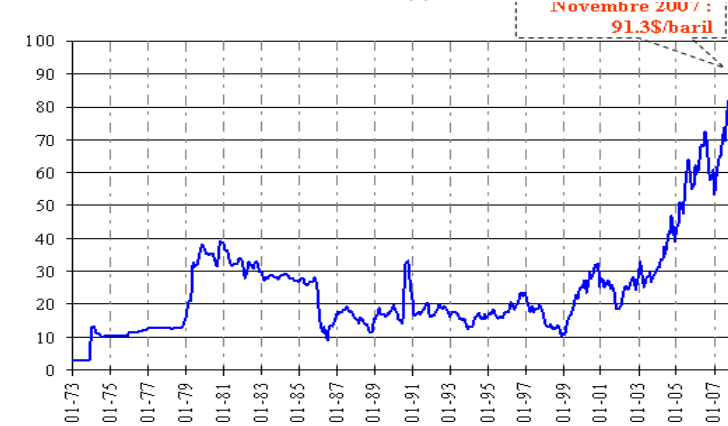
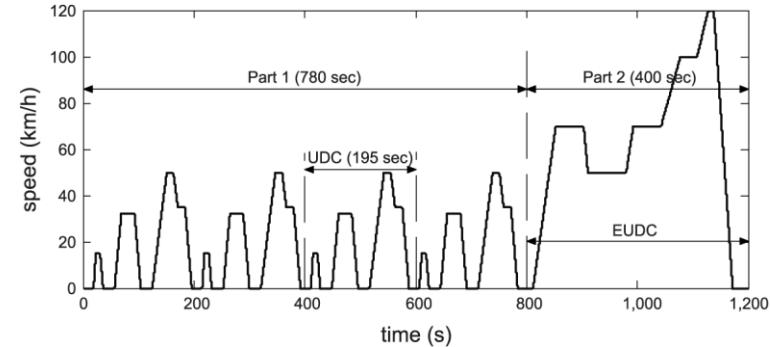
## • Principaux challenges à emporter :

- Respect de l'environnement (Réduire la pollution)
- Coût du système (contraintes industrielles)
- Rendement énergétique (ressources naturelles limitées)
- Barrières technologiques (savoir faire)

## • Objectifs de la thèse:

Etude de deux solutions technologiques pour résoudre des problèmes énergétiques, environnementaux et économiques posés par le transport automobile :

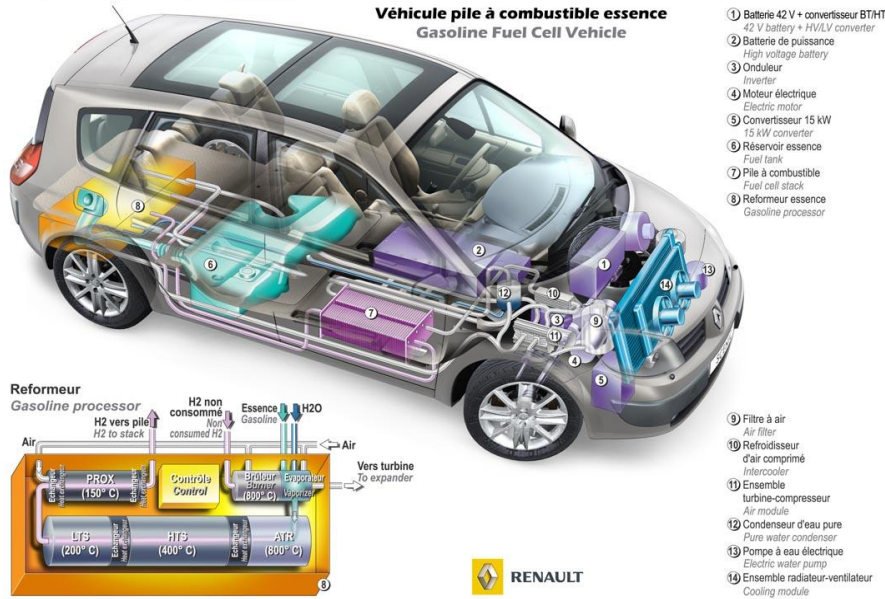
- Développement de modèles réduits
- Développement d'algorithmes de commande et de diagnostic
- Proposition d'une structure commune aux différents solutions étudiées et formalisation d'un problème de commande commun
- Comparaison entre les différentes solutions



# Plan de l'exposé

- I. Contexte de l'étude et objectifs de la thèse
- II. Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué
  - 1) Structure commune aux deux groupes motopropulseurs (GMP) étudiés
  - 2) Problème de commande commun aux deux groupes motopropulseur
- III. Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible
- IV. Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique
- V. Comparaison entre les deux systèmes étudiés
- VI. Conclusions et perspectives

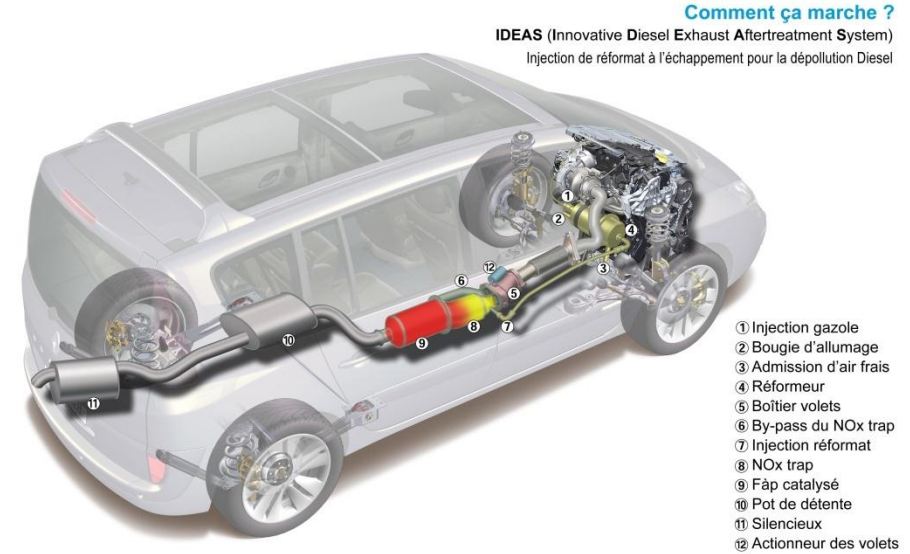
# II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué



Système pile à combustible

RESPIRE

Véhicule PàC à 70 kw équipé d'un reformeur embarqué d'un circuit de suralimentation d'air



Système moteur thermique dépollué

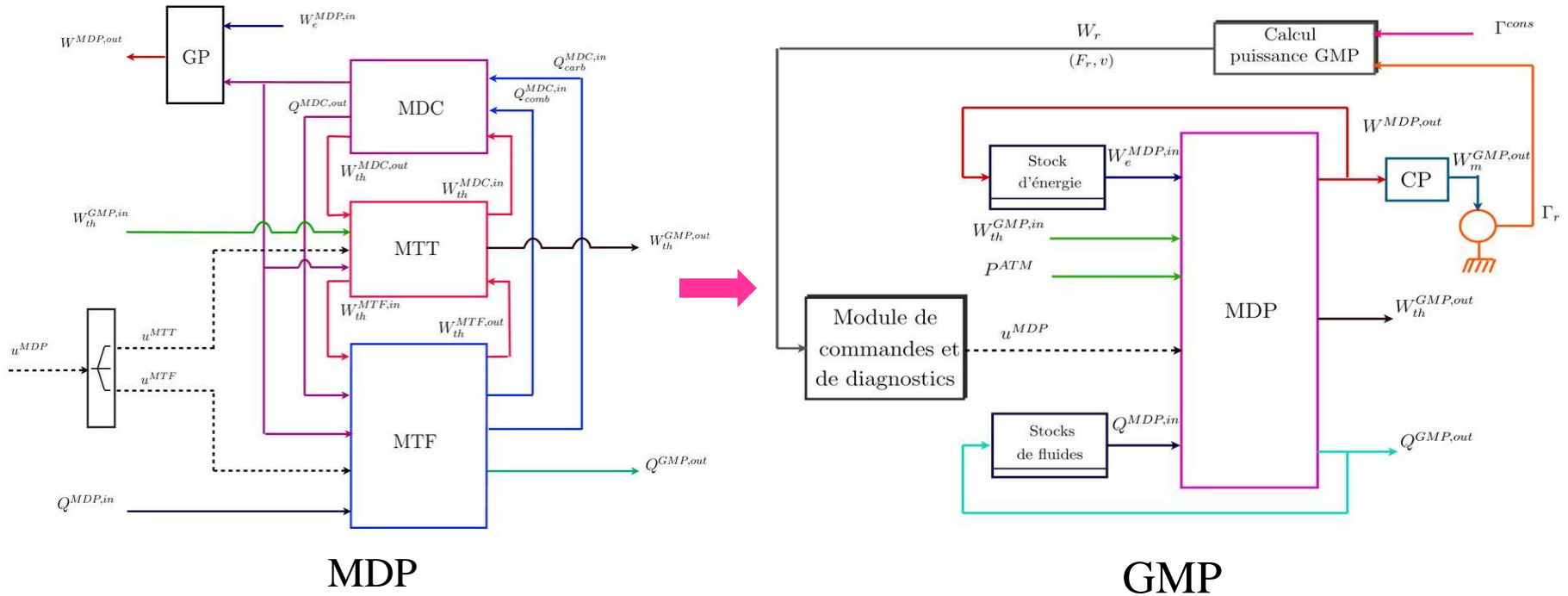
IDEAS

EPM

Véhicule avec moteur thermique Diesel équipé d'un système de dépollution (NOxTrap et filtre à particules)

## II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué

### 1) Structure commune aux deux groupes motopropulseurs (GMP) étudiés



MDC: module de combustion (pile à combustible/moteur thermique)

MTT: module de traitement thermique (pompes, radiateurs, échangeurs de chaleur)

MTF: module de traitement de fluide (système d'air, injecteurs, EGR, NOxTrap, FAP/ reformeur, brûleur)

# II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué

## 3) Problème de commande commun aux deux groupes motopropulseurs

### ❖ Modèle système du GMP

Modèle GMP

$$\begin{aligned}\frac{dX^{MDC}}{dt} &= f^{MDC}(X) \\ \frac{dX^{MTT}}{dt} &= f^{MTT}(X, u^{MTT}) \\ \frac{dX^{MTF}}{dt} &= f^{MTF}(X, u^{MTF}) \\ \frac{dSO_C}{dt} &= f_C(X_m, SO_C, Q_{carb}^{GMP,in}, \Phi^{GMP,in}, \alpha^C) \\ \frac{dSO_F}{dt} &= f_F(X_m, Q_{carb}^{GMP,in}, \Phi^{GMP,in}, \alpha^F)\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= f_X(X, u^{MTT}, u^{MTF}) \\ \frac{dS}{dt} &= f_S(X_m, S, Q_{carb}^{GMP,in}, \Phi^{GMP,in}, \alpha^C, \alpha^F)\end{aligned}$$

La sortie:

$$y = ( W^{MDP,out}, SO_C, SO_F, Q_P, )^T$$

avec

- $SO_C$  état de charge de la batterie
- $SO_F$  état du stock de fluides
- $W^{MDP,out}$  puissance fournie par le MDP
- $\alpha^C$  coefficient de charge/décharge de la batterie
- $Q^{max}$  charge maximale de la batterie
- $I_0^{BAT}$  courant maximal débité par la batterie

Modèle de la batterie

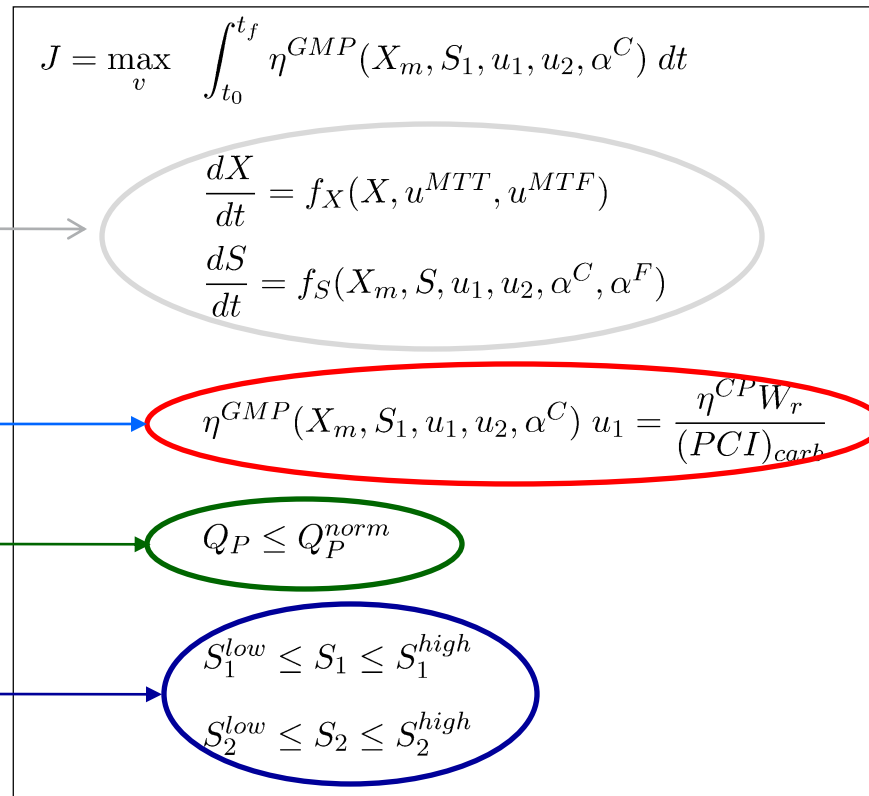
$$\frac{dSO_C}{dt} = |\alpha^C|_+ \frac{I^{MDC}}{Q^{max}} - |\alpha^C|_- \frac{I_0^{BAT}(SO_C)}{Q^{max}}$$

## II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué

### 3) Problème de commande commun aux deux groupes motopropulseurs

#### ❖ Enoncé du problème de commande

Il s'agit de maximiser le rendement  $\eta^{GMP}$  sous contraintes d'agrement de conduite (volonté conducteur:  $h(X_m, S, Q_{carb}^{GMP,in}, \Phi^{GMP,in}, \alpha^C, \alpha^F) = W_r$ ), d'autonomie (états du stock de fluides) et de normes de pollution (débit de polluant produit).



#### Commande v

$$v = (u_1, u_2, \alpha^C, \alpha^F, u^{MTT}, u^{MTF})$$

avec

$$S_1 = SO_C$$

$$S_2 = SO_F$$

$$u_1 = Q_{carb}^{GMP,in}$$

$$u_2 = \Phi^{GMP,in}$$



# II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué

## 3) Problème de commande commun aux deux groupes motopropulseurs

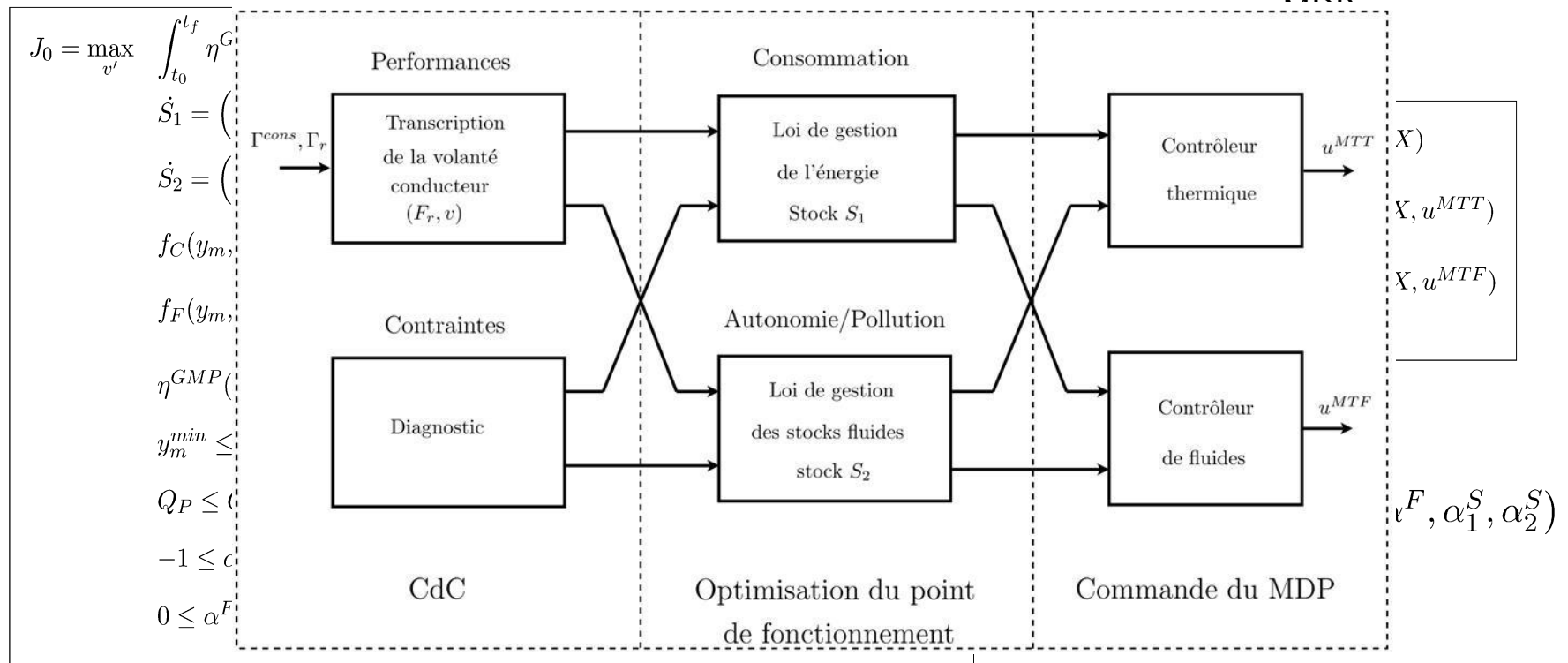
### ❖ Réduction du problème de commande

➡ Forme triangulaire de la représentation d'état ➔ Backstepping

➡ Transformation d'une contrainte sur l'état par une contrainte sur la commande

Optimisation point de fonctionnement

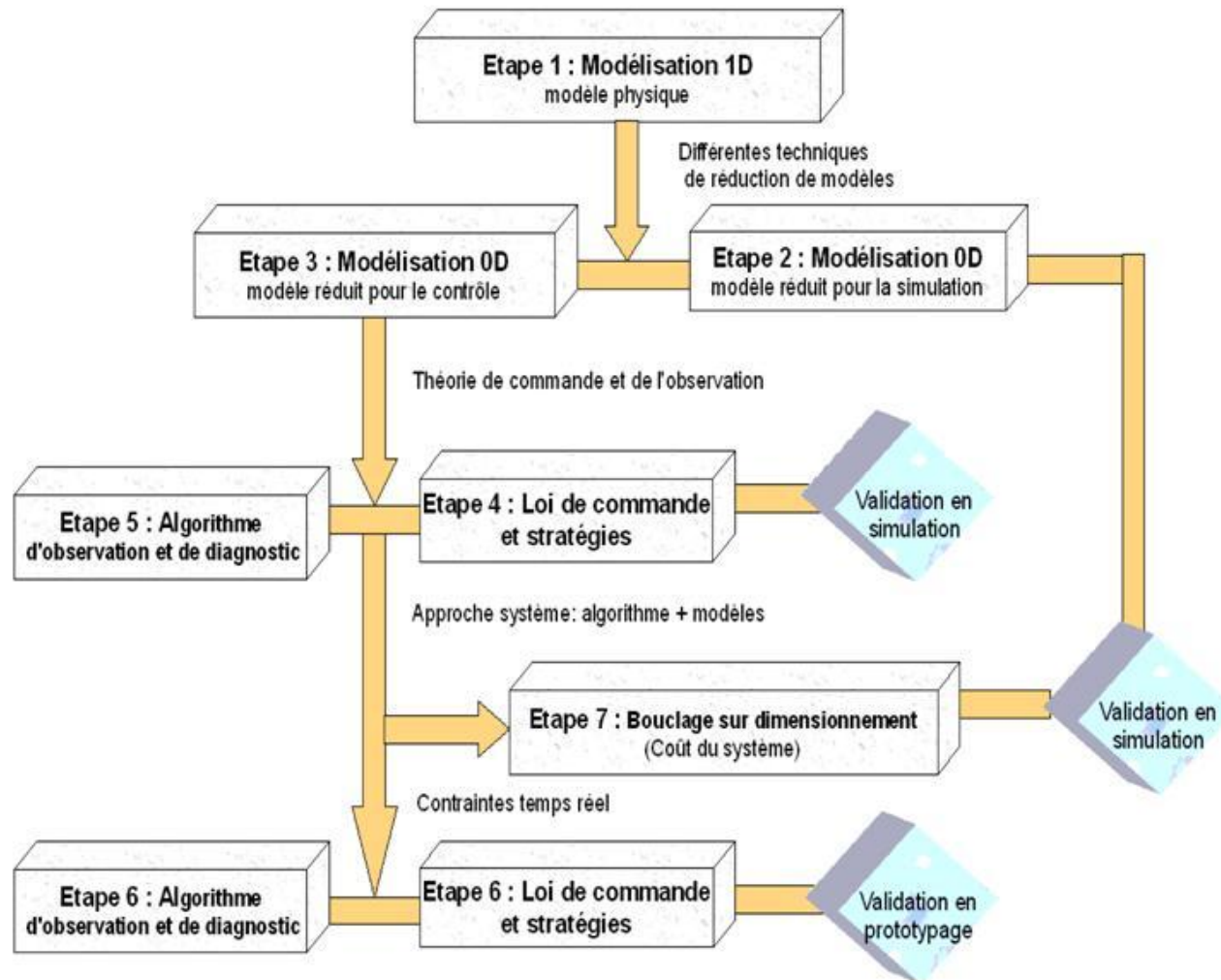
Commande du module de puissance



## II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué

### 3) Problème de commande commun aux deux groupes motopropulseur (4)

❖ Démarche suivie pour résoudre le problème d'optimisation posé



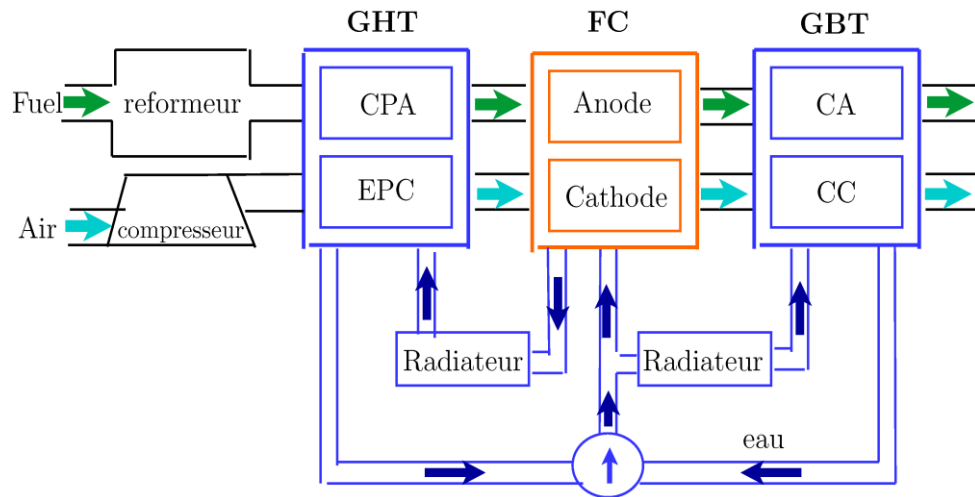
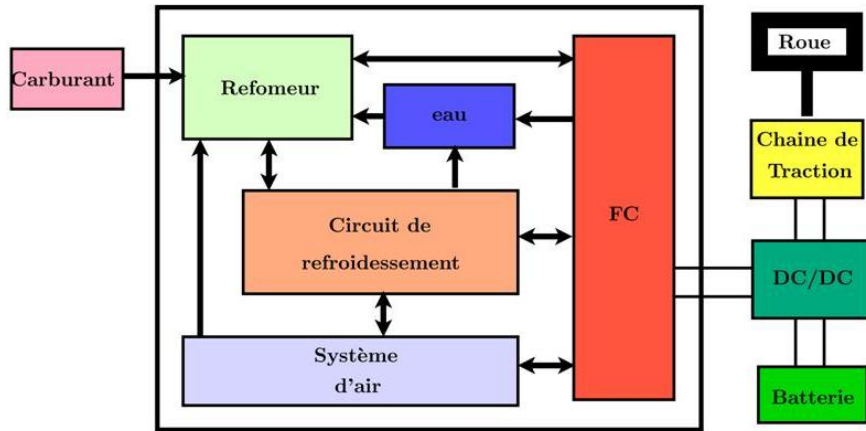
# Plan de l'exposé

- I. Contexte de l'étude et objectifs de la thèse**
- II. Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué**
- III. Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible**
  - 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques au GMP étudié
  - 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué
  - 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)
- IV. Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique**
- V. Comparaison entre les deux systèmes étudiés**
- VI. Conclusions et perspectives**

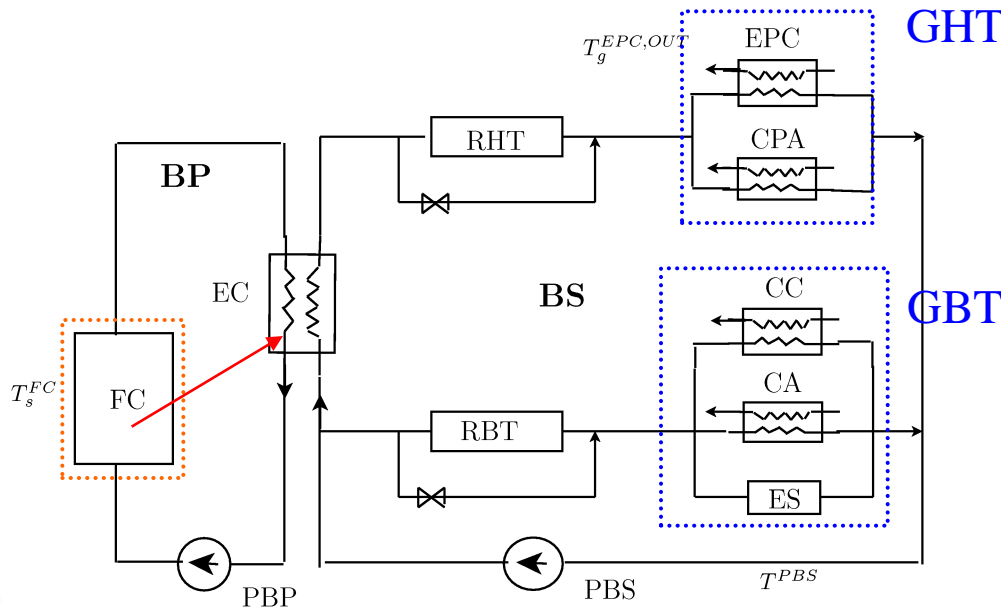
# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques au GMP étudié

### Vue fonctionnelle



### Vue structurelle



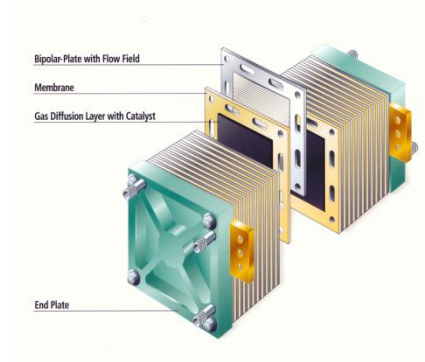
### Thermique MDP (TMP)

- FC
- 5 échangeurs
- 2 radiateurs
- 2 pompes
- 2 vannes

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

- Modèle d'un échangeur
- Modèle de la thermique pile
- Modèle des radiateurs, de la pompe et des conduites
- Modèle de condensation
- Bilan d'eau
- Modèle système



# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

### ❖ Modélisation 0D de la pile (MDC)

#### Modèle chimique

$$Q^{FC,out} = (Q_i^{X,out}) \quad X \in \{AN, CAT\} \quad i \in \{H_2, CO_2, N_2, v\}$$

$$Q_e^{FC} = n_v^{AN,in} M_{H_2Ov} + n_v^{CAT,in} M_{H_2Ov} + \frac{N_{cell} I (R^{AN} - 1)}{2F} M_{H_2O} - n_v^{AN,out} M_{H_2Ov} - n_v^{CAT,out} M_{H_2Ov}$$

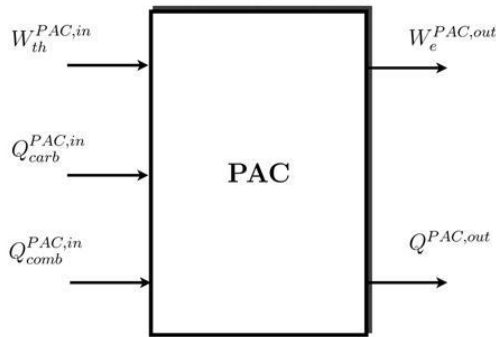
(REF: Ana Stefanopoulou)

#### Modèle électrique

$$U_{cellule} = E^{eq} - \eta_{act,total} - \eta_{ohm} - \eta_{diff,total} - \eta_{CO}$$

$$U_{stack} = f_U(T, I, P, C, \Theta)$$

#### Modèle thermique



#### Phase 1 : Modélisation 1D

modèle physique

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K_g^{can} S}{V} (T_g - T_s) + \frac{L_v}{V} (C_{H_2Og} - C_{H_2Og}^{sat})$$

Utilisation de techniques de réduction de modèles



Collocation orthogonale

#### Phase 0 : Modélisation 0D

Modèle pour la simulation

- L'équation d'état de la thermique de la pile

$$\dot{T}_s^{FC} = \frac{1}{m_s C_{p_s}} (W_{g,s}^{cat} + W_{g,s}^{an} + W_{e,s} + W_{c,s})$$

$$T_c^{FC,out} = -v_c \frac{(T_c^{FC,out} - T_c^{FC,in})}{L_c} + \frac{N_{cell} N_{can} K_c A_c}{\rho_c C_{p_c} V_c} (T_s^{FC} - T_c^{FC,out})$$

- L'équation de sortie  $y^{FC} = (T_s^{FC}, T_c^{FC,OUT})^T$

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

### ❖ Modélisation 0D d'un échangeur de chaleur

Phase 1 : Modélisation 1D  
modèle physique

$$\begin{aligned} \rho A_g \frac{\partial Q_v(z,t)}{\partial t} &= -Q_v \frac{\partial Q_v(z,t)}{\partial z} - \frac{\rho v A_g}{\tau} \left| Q_v(z,t) \left( 1 - \frac{P_{sat}}{P_v} \right) \right|_+ \\ \rho_g A_g C_{p_g} \frac{\partial T_g(z,t)}{\partial t} &= -Q_g C_{p_g} \frac{\partial T_g(z,t)}{\partial z} - K_g P_m (T_g(z,t) - T_p(z,t)) + \frac{1}{M_e} \frac{\partial Q_v(z,t)}{\partial z} L_v \\ \rho_c A_c C_{p_c} \frac{\partial T_c(z,t)}{\partial t} &= -Q_c C_{p_c} \frac{\partial T_c(z,t)}{\partial z} + K_c P_m (T_p(z,t) - T_c(z,t)) + K_{elm} \frac{Q_c}{Q_c + Q_0} \\ \rho_p A_p C_{p_p} \frac{\partial T_p(z,t)}{\partial t} &= K_g P_m (T_g(z,t) - T_p(z,t)) - K_c P_m (T_p(z,t) - T_c(z,t)) \end{aligned}$$

Les conditions aux limites sont:

$$\begin{array}{l|l} Q_v(0,t) = Q_v^{in} & Q_v(L,t) = Q_v^{out} \\ T_g(0,t) = T_g^{in} & T_g(L,t) = T_g^{out} \\ T_c(L,t) = T_c^{in} & T_c(0,t) = T_c^{out} \end{array}$$

Utilisation de techniques de réduction de modèles

Intégration spatiale

$$\int dz$$

Phase 2 : Modélisation 0D  
modèle physique

- Équation d'état

$$\dot{T}^E = A^E T^E + u^E B^E T^E + u^E b + v^E$$

- Équation de sortie

$$\begin{aligned} T^{E,OUT} &= C T^E - T^{E,IN} \\ Q_v^{OUT} &= f_q(Q_v^{IN}, Q_g, P_g^{IN}, T_g^{E,IN}, T_g^{E,OUT}) \end{aligned}$$

avec

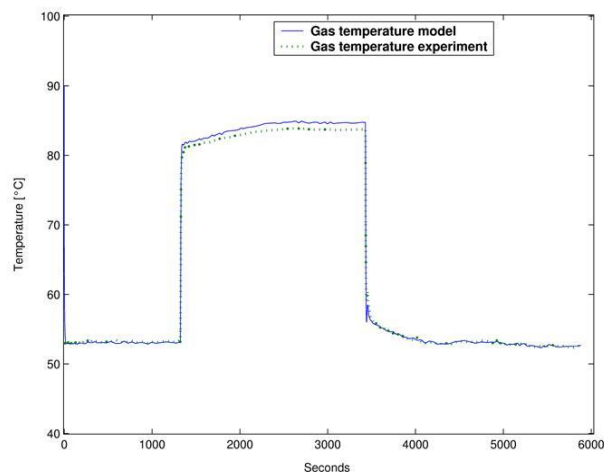
$$T^E = \begin{bmatrix} T_g^E \\ T_c^E \\ T_p^E \end{bmatrix} \quad T^{E,OUT} = \begin{bmatrix} T_g^{E,OUT} \\ T_c^{E,OUT} \end{bmatrix} \quad u = Q_c^E$$

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

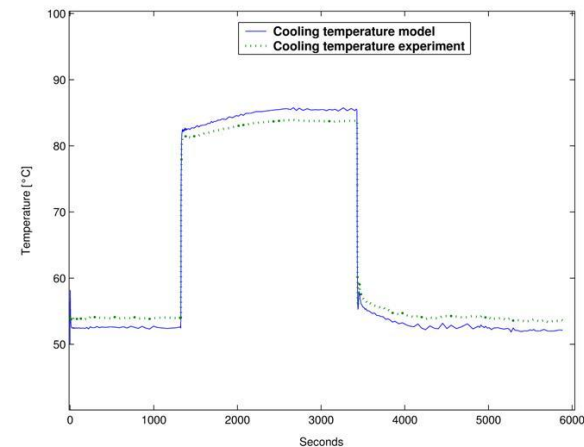
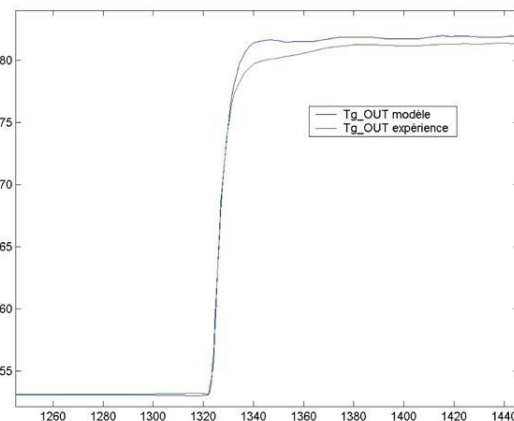
## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

### ❖ Validation du modèle échangeur

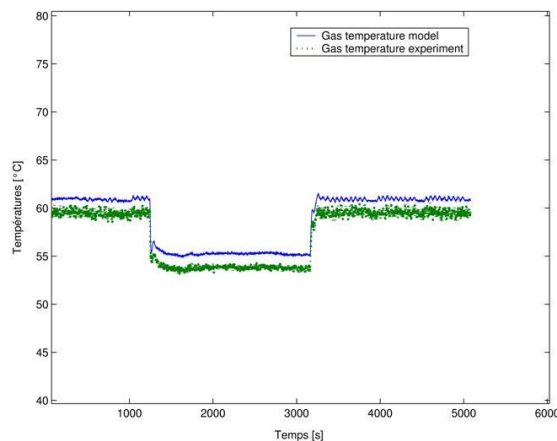
#### Variation température



#### Echangeur Alpha Laval essais Banc Liège



#### •Variation débit



#### ✓ Bilan

- Erreur température gaz < 4%
- Erreur température eau < 8%
- 4 paramètres de calibration
- Dynamiques respectées
- Modèle suffisamment représentatif de la physique, suffisamment réduit pour faire du contrôle

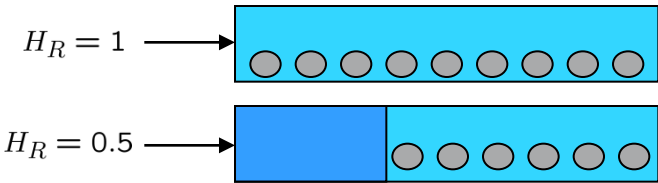


# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

### ❖ Modélisation 0D du phénomène de condensation

• **Point dur:** Modélisation de la condensation diphasique



**Équation 1D**

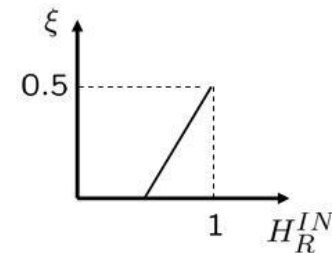
$$\begin{cases} \rho A \frac{\partial Q_v(z, t)}{\partial t} = -Q_v \frac{\partial Q_v(z, t)}{\partial z} - \frac{\rho_v A g}{\tau} \left| Q_v(z, t) \left( 1 - \frac{P_{sat}}{P_v} \right) \right|_+ \\ Q_v(0, t) = Q_v^{in} \end{cases}$$

$$\int dz \quad Q_v = \frac{Q_v^{IN} + Q_v^{OUT}}{2}$$

**Équation 0D**

$$\rho_v A g L \frac{dQ_v}{dt} = \frac{1}{2} (Q_v^{IN2} - Q_v^{OUT2}) - \frac{\rho_v A g L}{\tau} (Q_v (1 - \frac{P_s^{pond}}{P_v^{pond}}))$$

$$\begin{aligned} P_s^{Pond} &= \xi P_s^{IN} + (1 - \xi) P_s^{OUT} \\ P_v^{Pond} &= \xi P_v^{IN} + (1 - \xi) P_v^{OUT} \end{aligned} \quad \xi = f(H_R^{IN})$$



**Modèle statique**

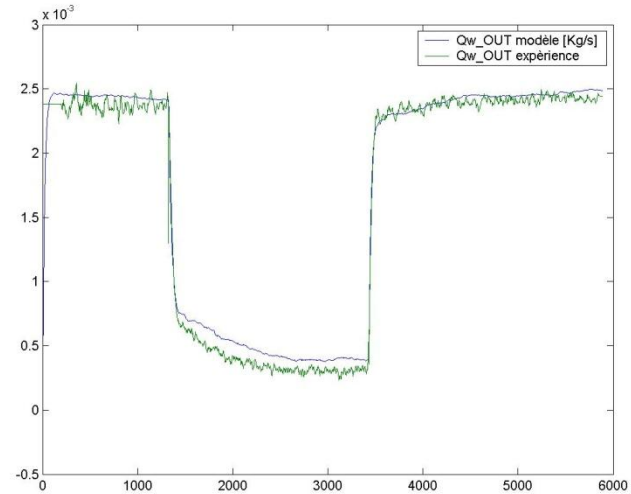
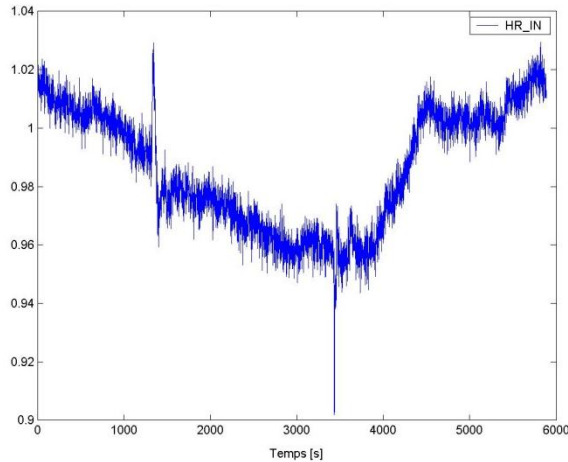
Par séparation des échelles du temps :

$$Q_v^{OUT} = f_v(Q_v^{IN}, Q_g, P_g^{IN}, T_g^{E,IN}, T_g^{E,OUT})$$

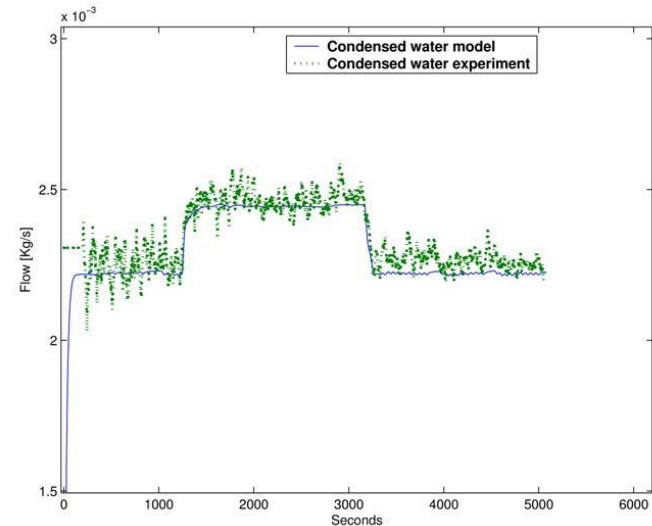
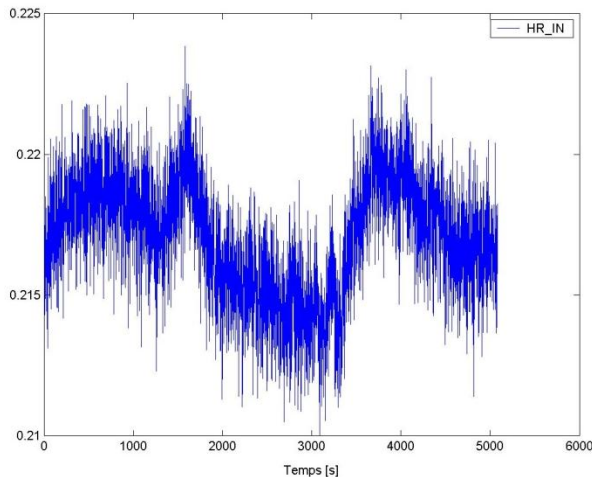
# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

- Expérience 1 ❖ Validation du modèle condensation échangeur



- Expérience 2

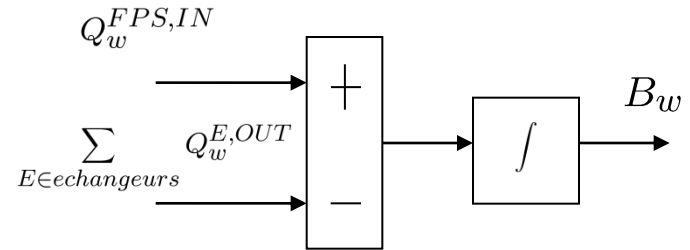


# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

### ❖ Bilan d'eau

- L'eau est consommée par le reformeur
- La pile produit de l'eau
- Condensation au niveau des échangeurs



$$\begin{aligned} \frac{dSO_e}{dt} &= Q_e^{FC,out} + \sum_{E \in \{E_{cond}\}} Q_e^{E,out} - Q_e^{FPS,in} \\ &= g_e(Q_v^{CPA,in}, \dots, Q_v^{CC,in}, T_g^{CPA,in}, \dots, T_g^{CC,in}, \\ &\quad T_g^{CPA}, \dots, T_g^{CC}, P_g^{CPA}, \dots, P_g^{CC}, I) \end{aligned}$$

Or

$$I = \frac{(PCI)_{carb} 2F}{(PCI)_{H_2} N_{cell} R^{AN} M_{H_2} \eta_{REF}} Q_{carb}^{MDP,in}$$

Notons

$$T_g^C = (T_g^{CPA}, T_g^{EPC}, T_g^{CA}, T_g^{CC})^T$$

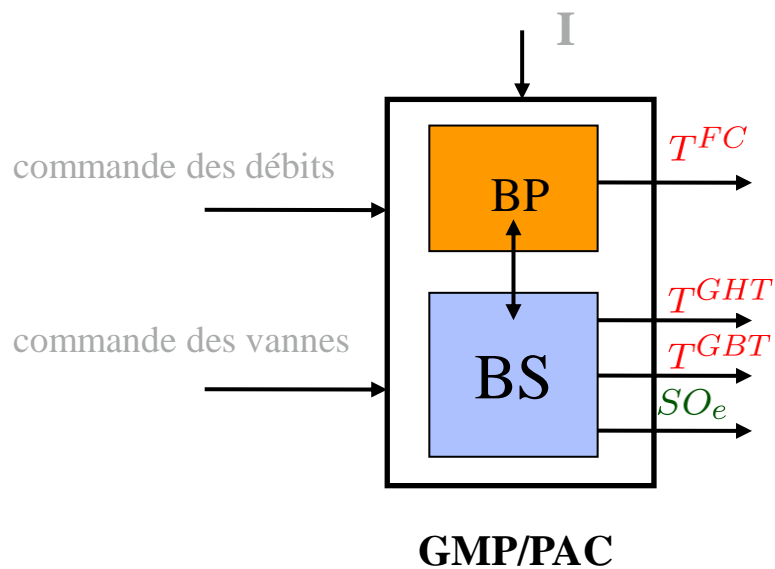
$$\frac{dSO_e}{dt} = f_e(Q_{carb}^{MDP,in}, T_s^{FC}, T_g^C)$$

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

### ❖ Synthèse d'un modèle système

Modèle système: Intégration des différents sous modèles



$$T^{FC} = [T_s^{FC} \ T_c^{FC,OUT}]T$$

$$T^{GHT} = [T^{EPC} \ T^{CPA}]T$$

$$T^{GBT} = [T^{CC} \ T^{CA} \ T^{ES}]T$$

Equations d'état :

$$\dot{T}^E = A^E T^E + Q_c^E B^E T^E + Q_c^E b^E + v^E \quad E \in E_{echg}$$

$$\dot{T}_c^{R,out} = \frac{1}{\rho_c V_c^R} (Q_c^R (T_c^{R,in} - T_c^{R,out}) - \epsilon^R Q_a^R (T_c^{R,in} - T_a^{R,out}))$$

$$\dot{T}_a^{R,out} = \frac{1}{\rho_a V_a^R} (Q_a (T_a^{R,in} - T_a^{R,out}) + \epsilon^R Q_c^R (T_c^{R,in} - T_a^{R,out}))$$

$$\dot{T}^{VBP} = \frac{2Q}{\rho V C_p} (T^{VBP,in} - T^{VBP})$$

$$\dot{T}_s^{FC} = \frac{1}{m_s C_{ps}} (W_{g,s}^{CAT} + W_{g,s}^{AN} + W_{e,s} + W_{c,s})$$

$$\dot{T}_c^{FC,out} = -v_c \frac{(T_c^{FC,in} - T_c^{FC,out})}{L_c} + \frac{N_{cell} N_{can} K_c A_c}{\rho_c C_{pc} V_c} (T_s^{FC} - T_c^{FC,out})$$

$$\dot{SO}_e = f_e(Q_{carb}^{MDP,in}, T_s^{FC}, T_g^C)$$

Equations de sortie :

$$y = \begin{pmatrix} T_s^{FC} \\ T_g^{GHT,out} \\ C \\ U \\ SO_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_s^{FC} \\ \frac{1}{2}(T_g^{CPA} + T_g^{EPC}) \\ f_N(I, R^{AN}, R^{CAT}, D_{il}) \\ f_U(T_s, I, P, C, \Theta) \\ SO_e \end{pmatrix}$$

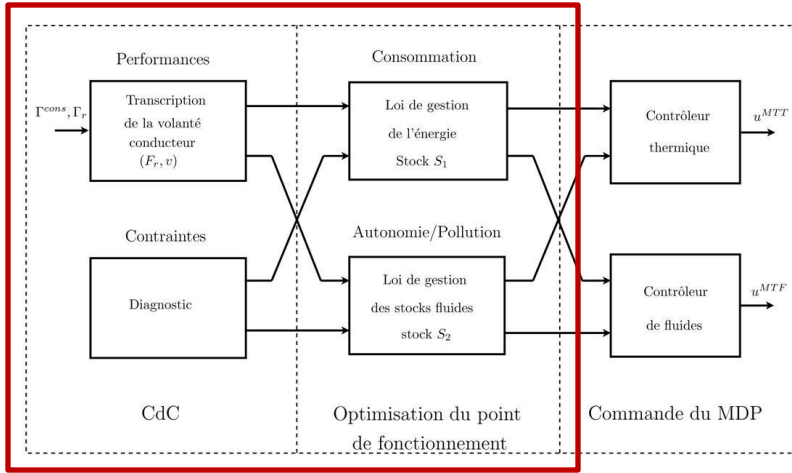
avec :

$$T^E = \begin{bmatrix} T_g^E \\ T_c^E \\ T_p^E \end{bmatrix}, \quad T^{E,out} = \begin{bmatrix} T_g^{E,out} \\ T_c^{E,out} \end{bmatrix} \quad E \in E_{echg}$$

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Optimisation du GMP/PAC sous contraintes



$$u_1^{bf} = \phi_u(T_s^{FC}, W_r)$$

$$J_0 = \max_{v'} \int_{t_0}^{t_f} f_0(T_s^{FC}, u_1) dt$$

$$\dot{S}O_e = \Upsilon_e(SO_e, \alpha_2^S)$$

$$f_e(u_1, T_s^{FC}, T_g^C) - \Upsilon_e(SO_e, \alpha_2^S) = 0$$

$$f_0(T_s^{FC}, u_1, \alpha^C) u_1 = \frac{\eta^{CP} W_r}{(PCI)_{carb}}$$

$$Q_e^{FC}(u_1, T_s^{FC}) \geq S_e^{FC}$$

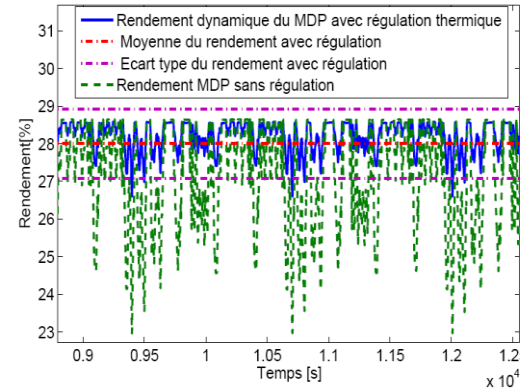
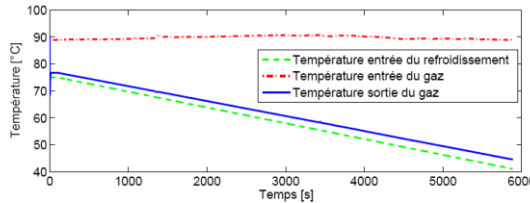
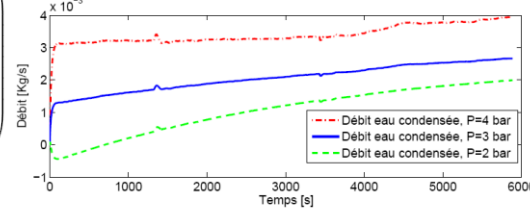
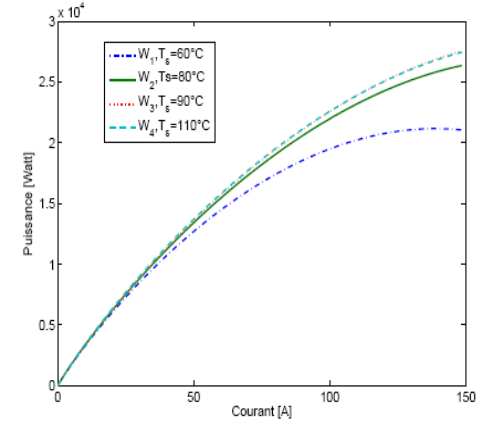
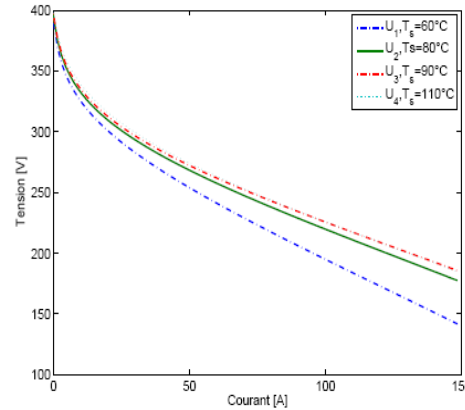
$$333 \leq T_s^{FC} \leq 373$$

$$T_g^{C, min}(T_s^{FC}, SO_e) \leq T_g^C \leq T_g^{C, max}(T_s^{FC}, SO_e)$$

$$T_g^{C, bf} = \begin{pmatrix} T_g^{CPA, bf} \\ T_g^{EPC, bf} \\ T_g^{CAM} \\ T_g^{CC, bf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_T^{CPA}(SO_e, \alpha_2^S, u_1^{bf}, T_s^{FC}) \\ \phi_T^{EPC}(SO_e, \alpha_2^S, u_1^{bf}, T_s^{FC}) \\ \phi_T^{CA}(SO_e, \alpha_2^S, u_1^{bf}, T_s^{FC}) \\ \phi_T^{CC}(SO_e, \alpha_2^S, u_1^{bf}, T_s^{FC}) \end{pmatrix}$$

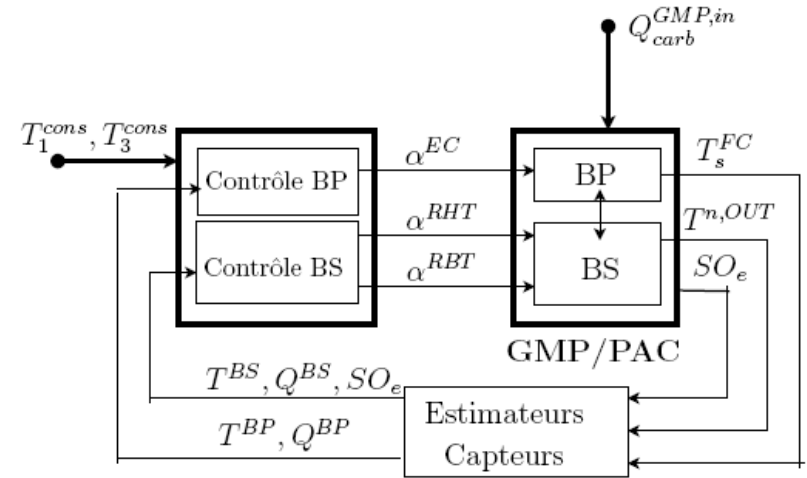
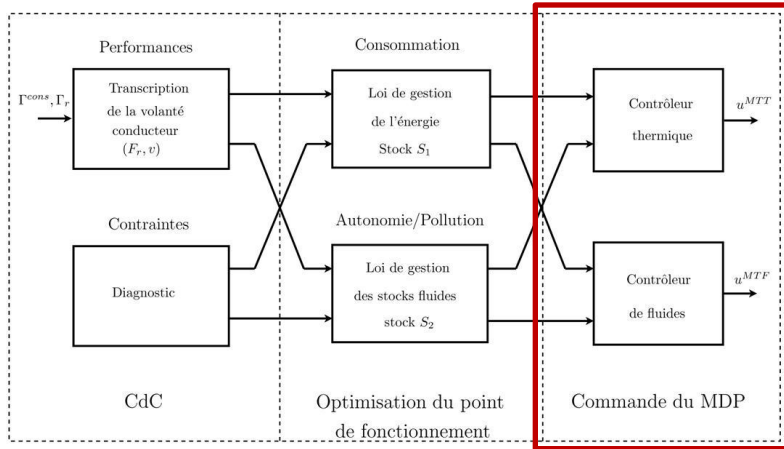


$$T_s^{FC}$$



# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)



- Protection de la pile

- $T_s^{FC} < 100^\circ C$

- $|T_g^{FC,IN} - T_s^{FC}| < 10^\circ C$

- Assurer et optimiser le bon fonctionnement de la pile

- $T_s^{FC} \rightarrow T_1^c$

- $T_g^{FC,IN} \rightarrow T_1^c$

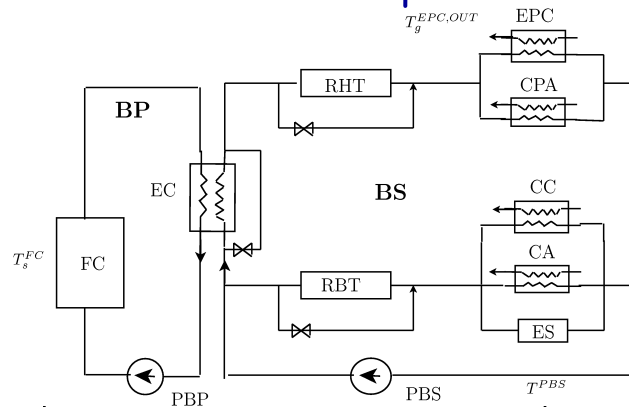
- Assurer le bilan d'eau

- $S_e^{FC} \geq 0$
  - $Q_e^{FC} > S_e^{FC}$

- Réduction du nombre de capteurs

- Commande modulaire

- Contrôle du pourcentage d'ouverture des vannes



- ✓ Régulation température pile ←
- ✓ Asservissement température des gaz ←
- ✓ Développement d'estimateurs ←

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

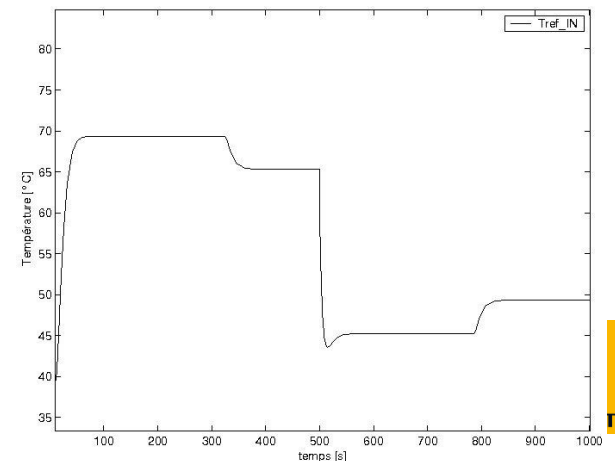
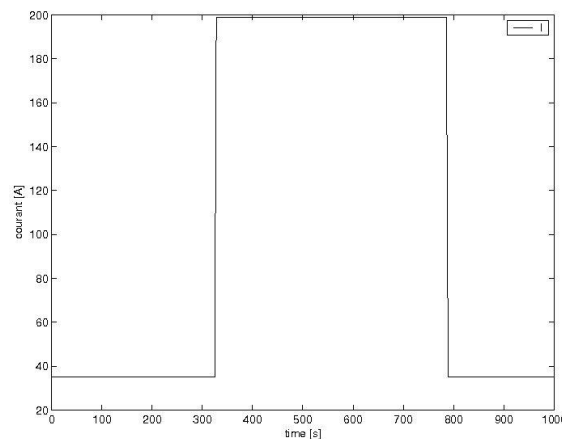
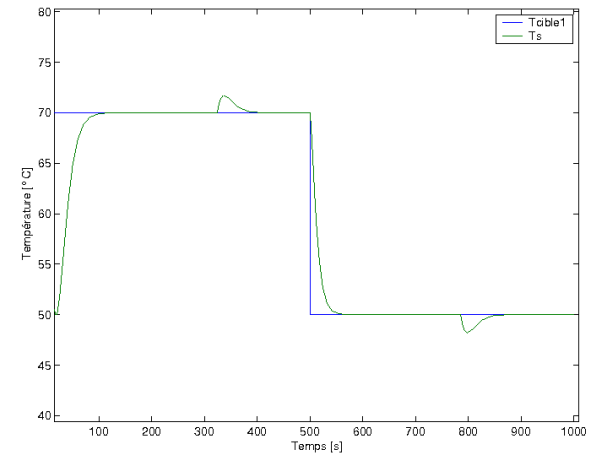
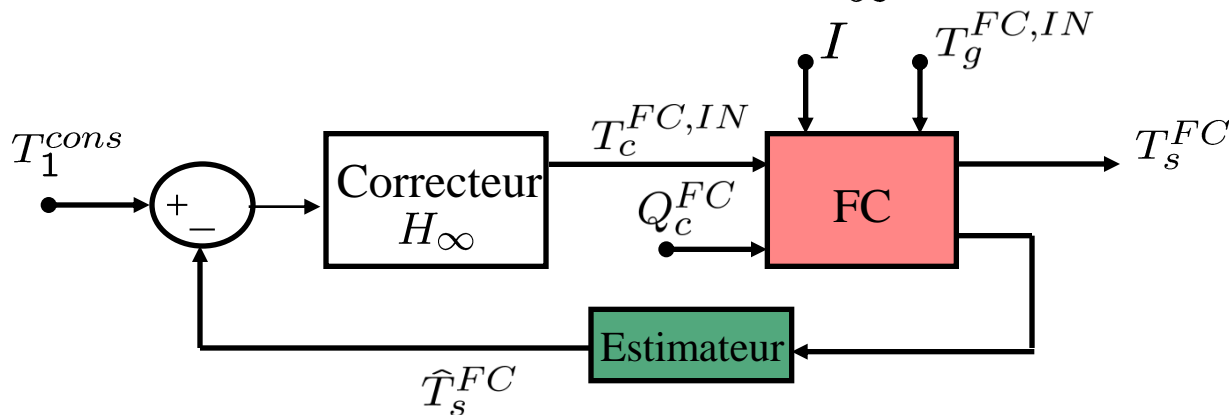
## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Contrôle BP

#### • Contraintes de la régulation

- Incertitudes de modélisation et manque d'informations sur la géométrie de la pile.
- Contrainte de modération de la commande.
- Présence des retards purs.

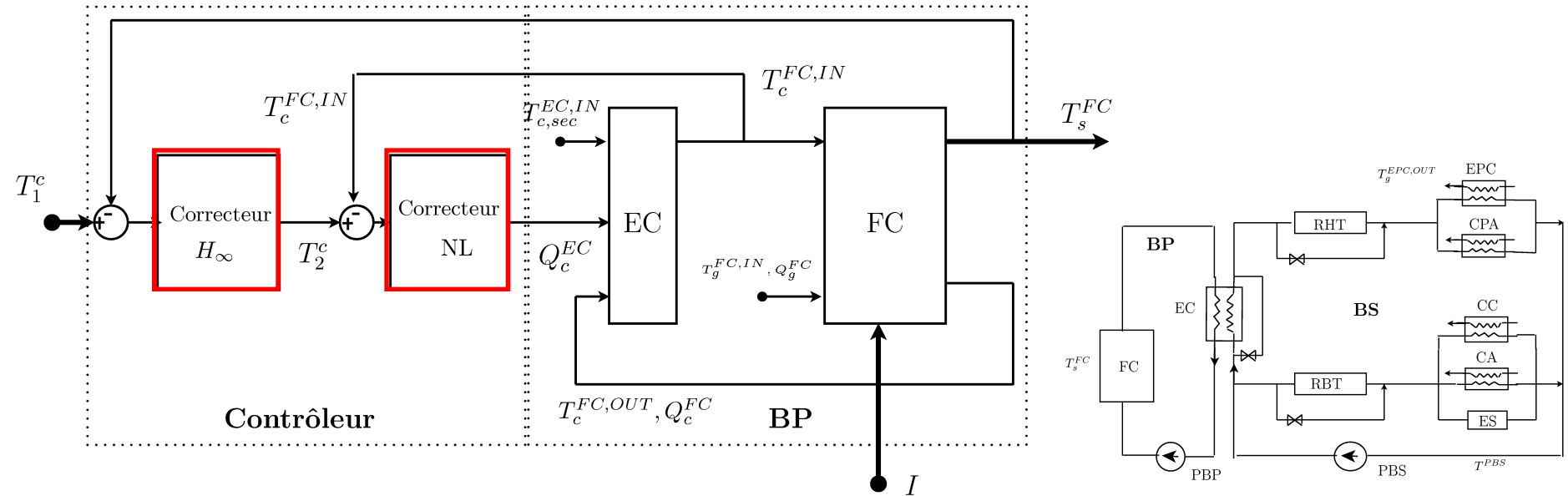
#### • Correcteur Robuste (Correcteur $H_\infty$ )



# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Objectif 1 : Régulation température pile



- Correcteurs paramétrés (Model based design)
- Robustesse par rapport aux incertitudes de modèle
- Correcteurs performants

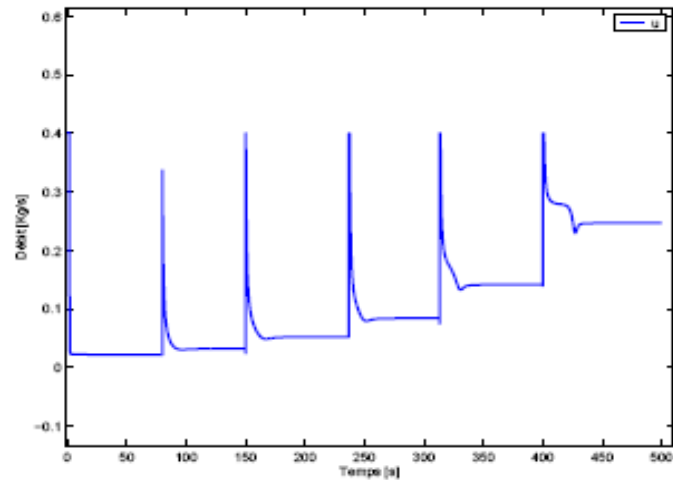
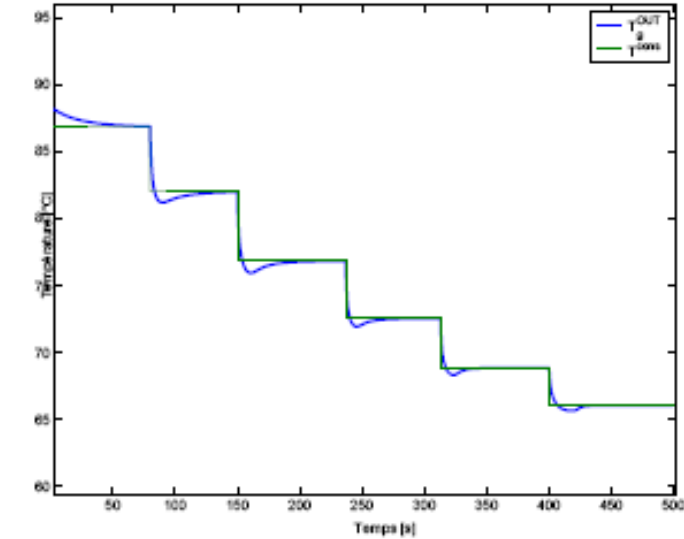


# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Résultats régulation température entrée pile (simulation)

- Commande Non linéaire. Gain 18%



- Commande linéaire (PI)

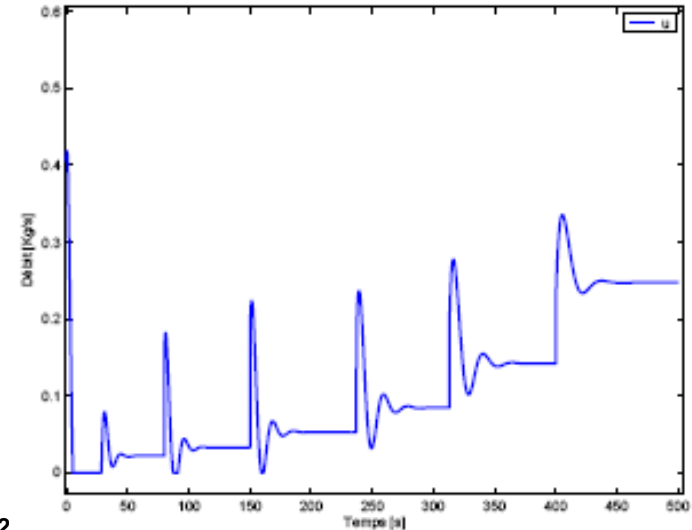
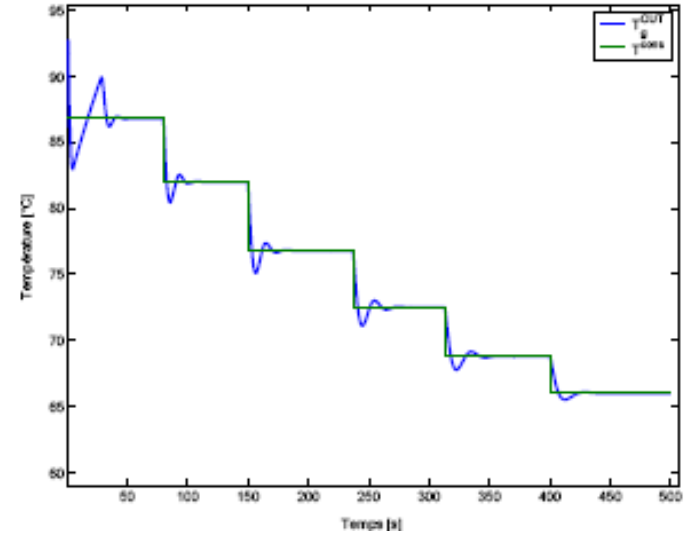


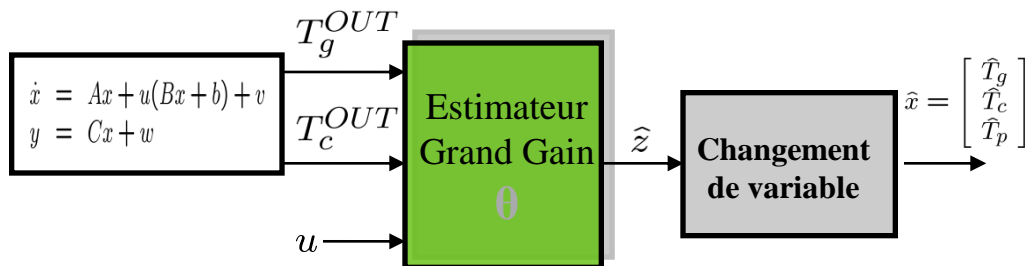
FIG. 7.22 – Débit de l'eau glycolée



# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Estimation de la température des gaz



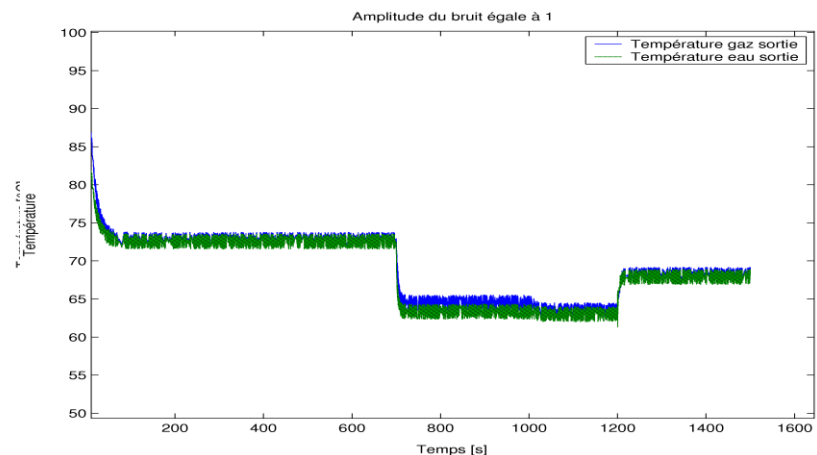
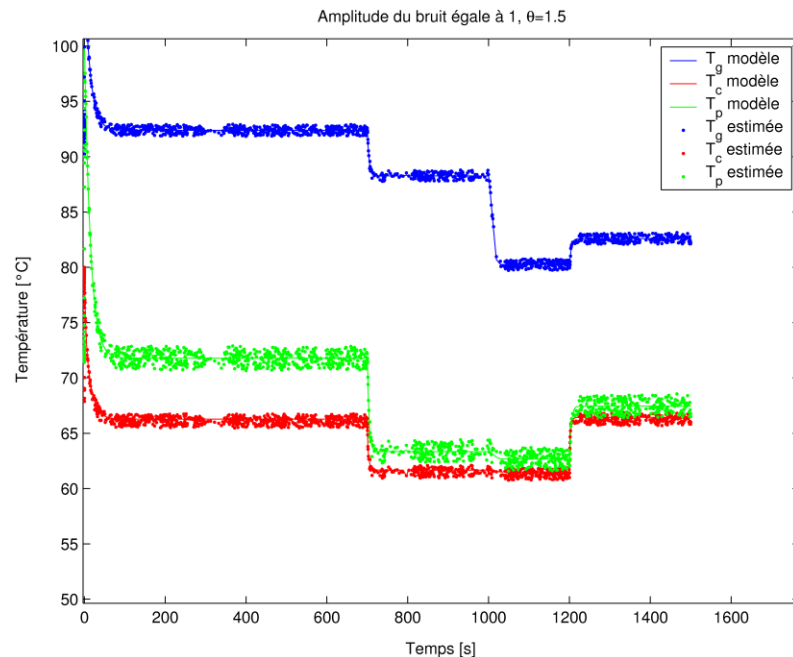
- Soit le changement de variable :

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 \\ z_2 &= a_{11}x_1 + a_{13}x_3 + v_1 \\ z_3 &= x_2 \end{aligned}$$

- Considérons l'estimateur :

$$\dot{\hat{z}} = F(\hat{z}) + uG(\hat{z}) - S_\infty^{-1}C^T(C\hat{z} + w - y)$$

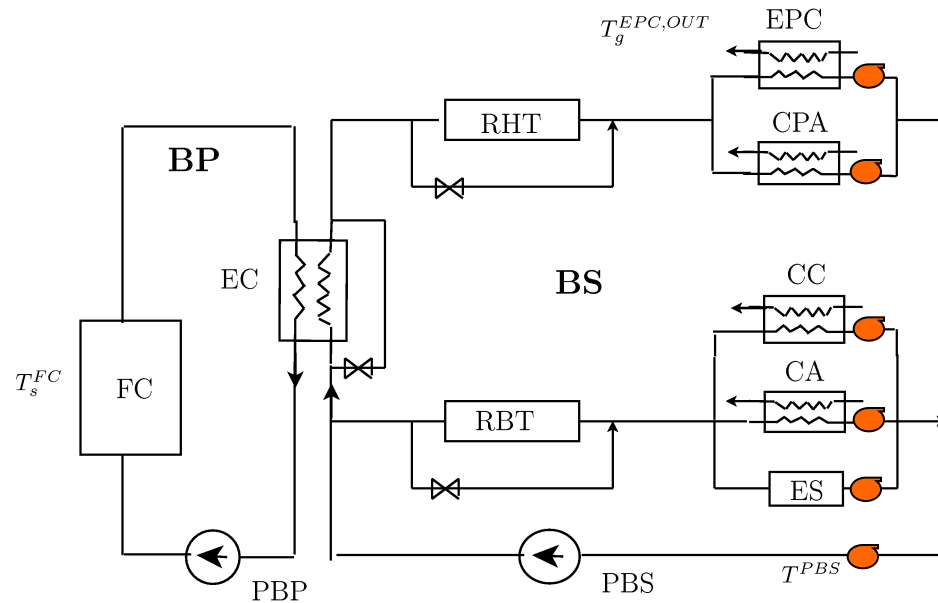
$$S_\infty^{-1} = \begin{pmatrix} 2\theta & \theta^2 & 0 \\ \theta^2 & \theta^3 & 0 \\ 0 & 0 & \theta^5 \end{pmatrix}$$



# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Application pour le gain en nombre de capteurs (coût)

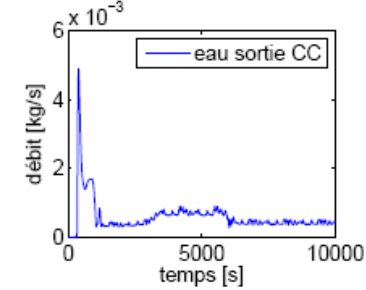
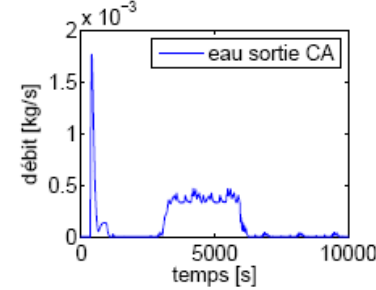
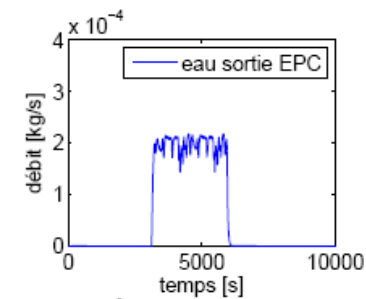
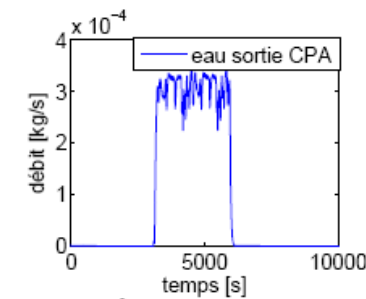
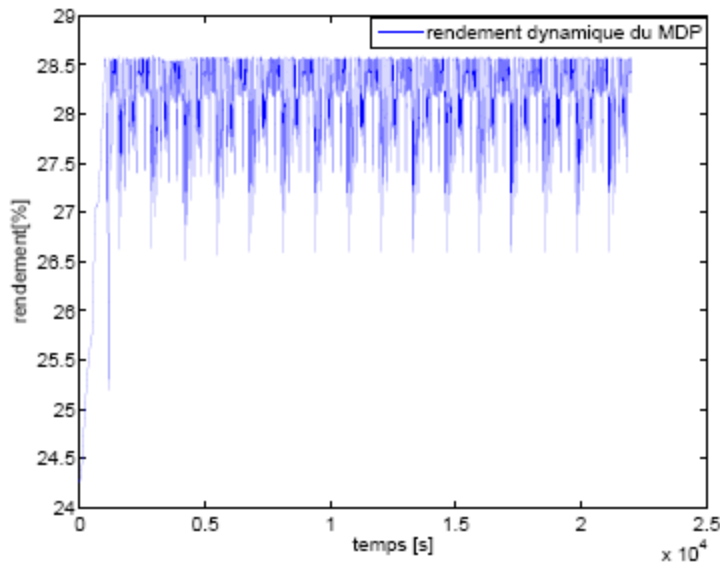
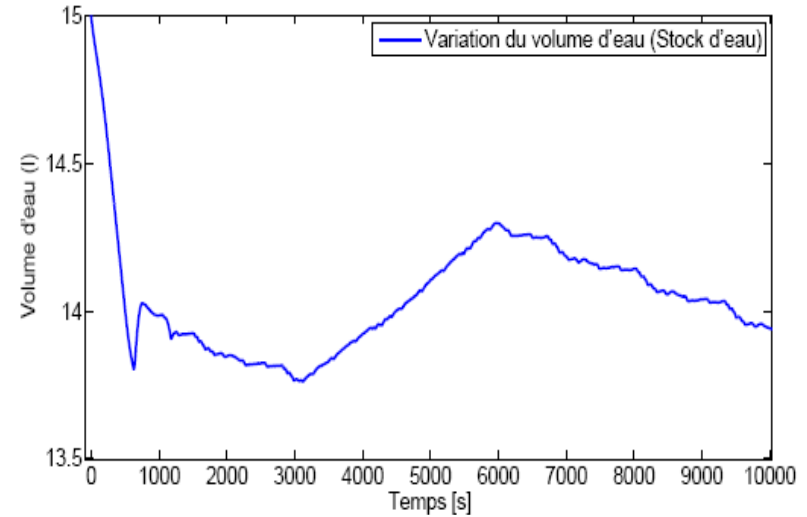
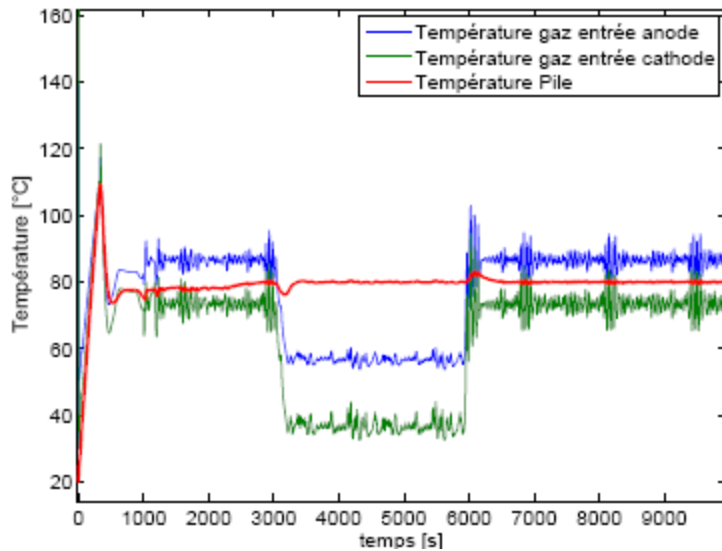


- Architecture initiale de capteurs
- Gain de capteur en utilisant les observateurs (hors problématique SDF)

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Simulation globale du système contrôlé

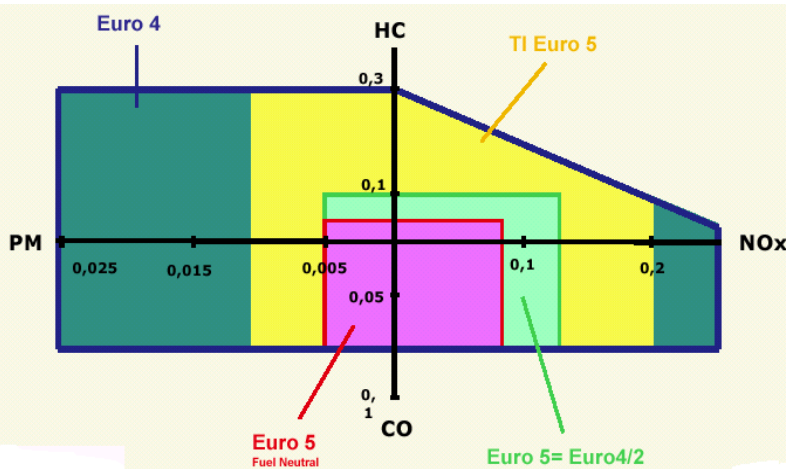


# Plan de l'exposé

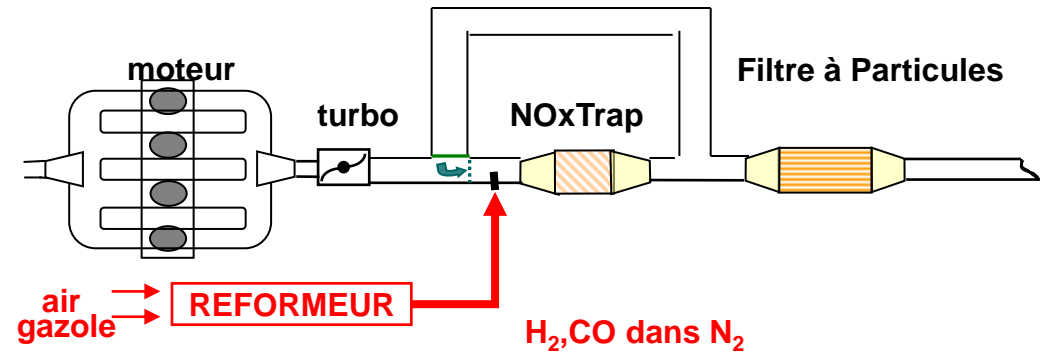
- I. Contexte de l'étude et objectifs de la thèse
- II. Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué
- III. Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible
- IV. Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique**
  - 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques aux GMP étudiés
  - 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules
  - 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)
- V. Comparaison entre les deux systèmes étudiés**
- VI. Conclusions et perspectives**

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

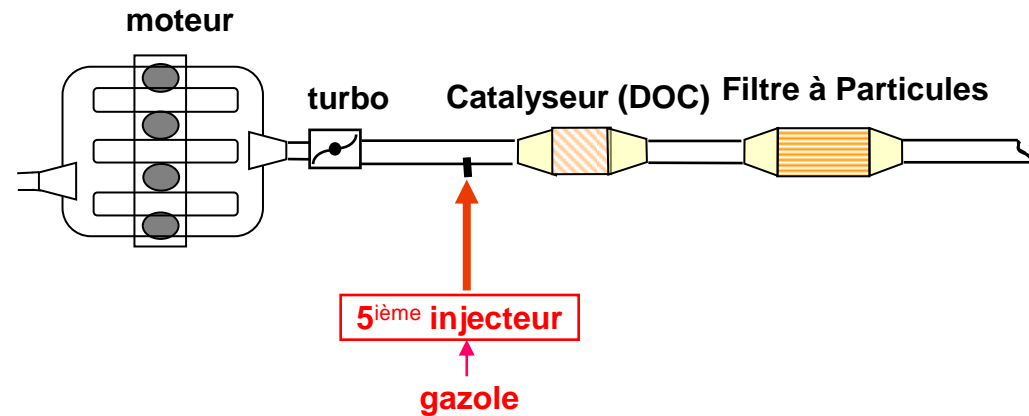
## 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques aux GMP étudiés (1)



### Projet IDEAS



### Projet EPM



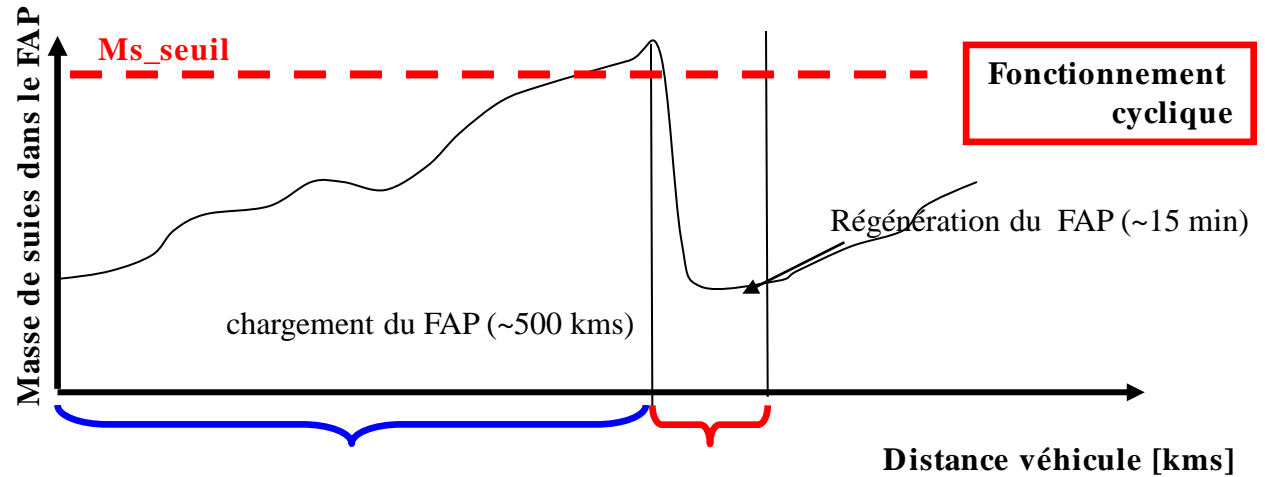
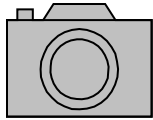
↳ Contrainte sur la quantité de particules en sortie du moteur (Euro5-Euro6) → Filtre à particule

↳ Contrainte de dilution de l'huile en utilisant le moteur thermique pour la régénération du FAP (EURO4)

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

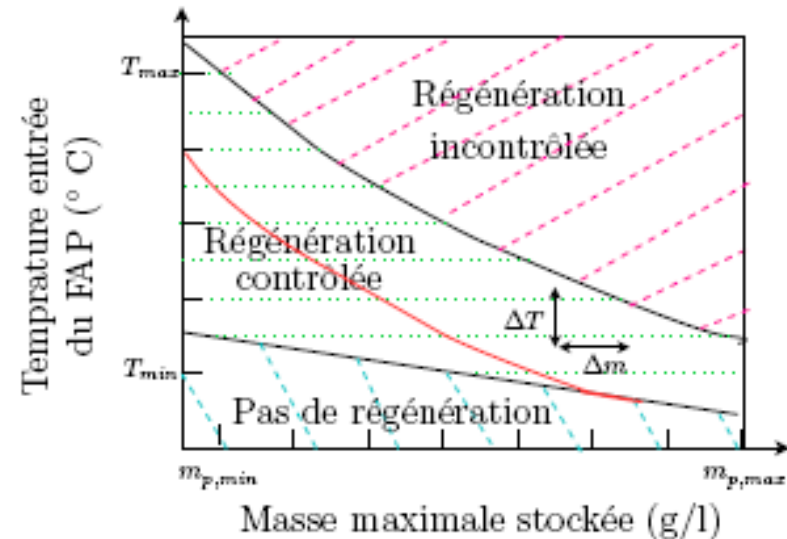
## 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques aux GMP étudiés (2)

Stratégie de chargement  
/ déchargement du FAP



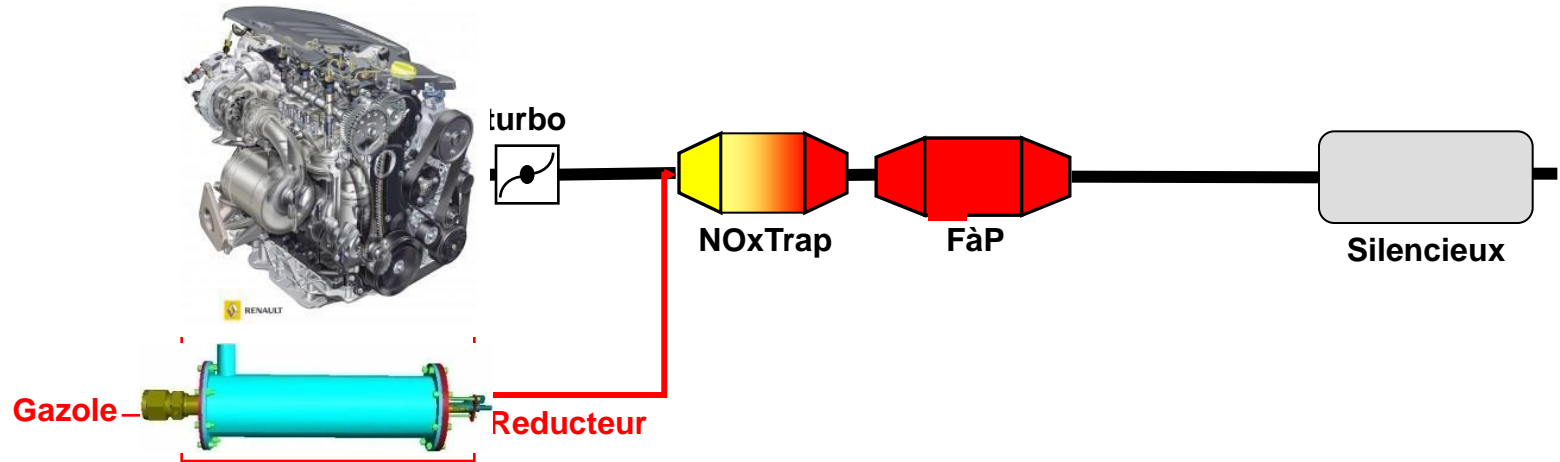
**Enjeux de la maîtrise du couple  
(température régénération/estimation  
de la masse)**

- **CO<sub>2</sub>** : Consommation carburant lors des régénération
- **Matériaux**: Passage de la technologie Sic vers technologie poreux et/ou gain en volume de FàP
- **Valeur Client** : Disponibilité du véhicule (intervalle de vidange, qualité de l'huile)



# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules



Elaboration de modèles réduits

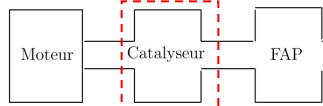
**Moteur** : Miof (Modèle polluant sortie moteur). (Adaptation travaux M.Sorine)

**Reformeur** : Modèle d'équilibre chimique basé sur la minimisation de l'énergie de Gibbs. (Adaptation travaux K.Bencherif)

**NoxTrap ou DoC** : Développement d'un modèle 1D transport-Réaction basé sur les équations de conservation et de comportement.

**FAP** : Développement d'un modèle 0D à partir des publications scientifiques.



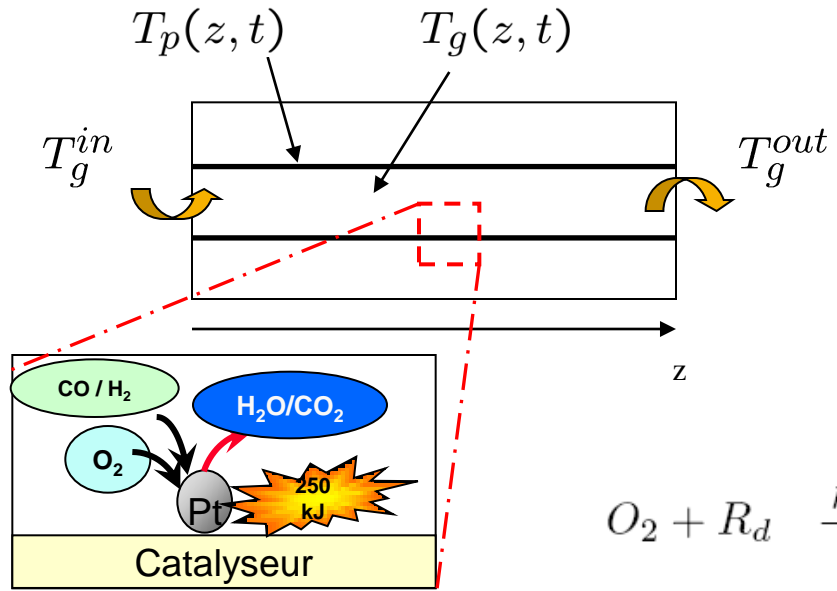


# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

### ❖ Modélisation 1D du catalyseur d'oxydation

#### ❖ Modèle physique 1D (simulation)



#### ❖ Hypothèses

- Pression totale des gaz est constante donc pertes de charge dans le catalyseur négligeables
- Description 1D.
- Pertes thermiques par rayonnement négligeables.
- La vitesse des gaz est supposé uniforme
- Le catalyseur est amorcé **chimiquement** et thermiquement.

#### Modèle dynamique 1D

$$K_1 \frac{\partial T_g(z, t)}{\partial t} = D_g \frac{\partial^2 T_g(z, t)}{\partial z^2} - Q_g C_{p_g} \frac{\partial T_g(z, t)}{\partial z} - K_g P_m (T_g(z, t) - T_p(z, t))$$

$$K_2 \frac{\partial T_p(z, t)}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + K_g P_m (T_g(z, t) - T_p(z, t)) + \rho_g W_g$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_g \frac{\partial C}{\partial z} + \Lambda r(C, T_p)$$

avec

$$C = (C_{O_2}, C_{R_d})^T$$

$$\Lambda r(C, T_p) = k_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT_p}\right) C_{R_d} C_{O_2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

#### Conditions aux limites

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_p}{\partial z}(L, t) &= 0 & T_g(0, t) &= T_g^{in} & \frac{\partial T_g}{\partial z}(0, t) &= v_g(T_g(0, t) - T_g^{in}) \\ T_g(z, 0) &= T_g^0(x) & \frac{\partial T_p}{\partial z}(0, t) &= 0 & \frac{\partial T_g}{\partial z}(L, t) &= v_g(T_g^{out} - T_g(L, t)) \\ T_p(z, 0) &= T_p^0(x) & C(t, z = 0) &= C^{in} & & \end{aligned}$$

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

### ❖ Modélisation 0D du catalyseur d'oxydation

#### Analyse du modèle 1D

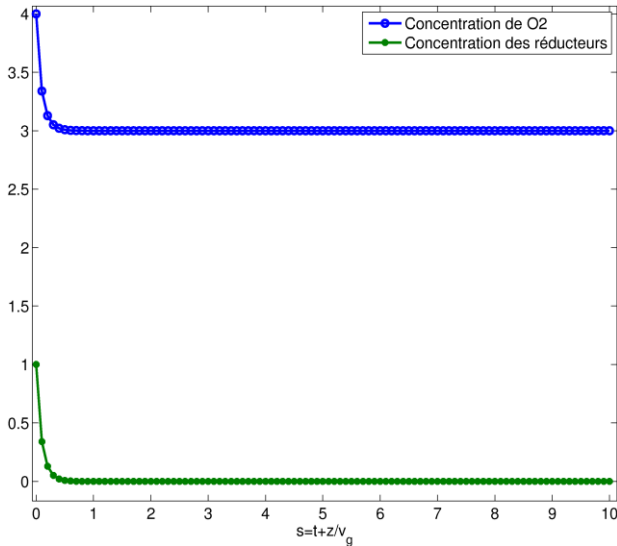
en posant  $x = C_{R_d}$  et  $w = C_{O_2}$   
 $s = t + \frac{z}{v_g}$

#### Méthode des caractéristiques

$$\begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= -kxw \\ \frac{dw}{ds} &= -kxw \\ x(s_0) &= x_0 \\ w(s_0) &= w_0 \end{aligned}$$

$$C_{R_d}(s) = \frac{x_0(w_0 - x_0)e^{(-k(w_0 - x_0)(s - s_0))}}{w_0 - x_0e^{(-k(w_0 - x_0)(s - s_0))}}$$

$$C_{O_2}(s) = \frac{w_0(w_0 - x_0)}{w_0 - x_0e^{(-k(w_0 - x_0)(s - s_0))}}$$



#### Méthode d'Euler

#### Passage 1D → 0D

$$K_1 \frac{dT_{g,i}}{dt} = -Q_g C_{p_g} \frac{T_{g,i} - T_{g,i-1}}{\Delta z} - K_g P_m (T_{g,i} - T_{p,i})$$

$$K_2 \frac{dT_{p,i}}{dt} = \frac{D_p}{\Delta z^2} (T_{p,i+1} - 2T_{p,i} + T_{p,i-1}) - K_g P_m (T_{p,i} - T_{g,i}) + \rho_g r_{R_d,i} \Delta H_{R_d}$$

pour  $i = 1..N_d$

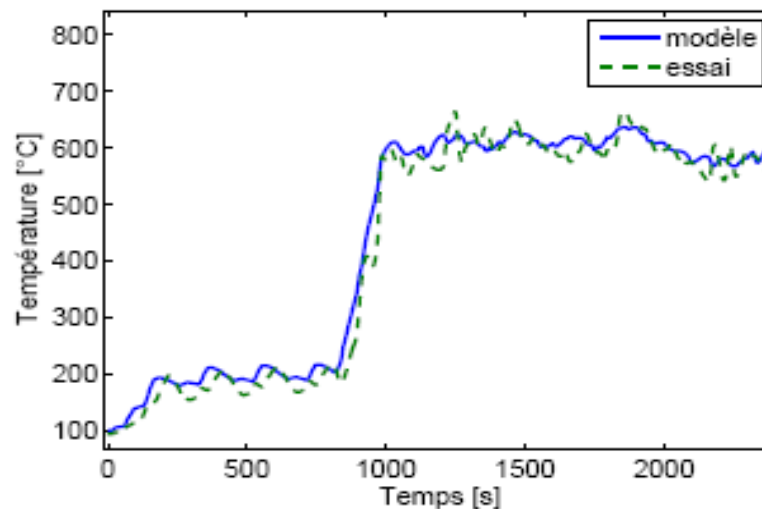
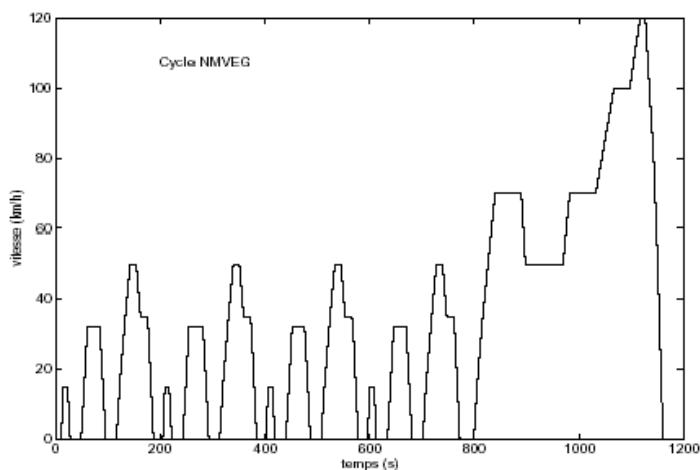
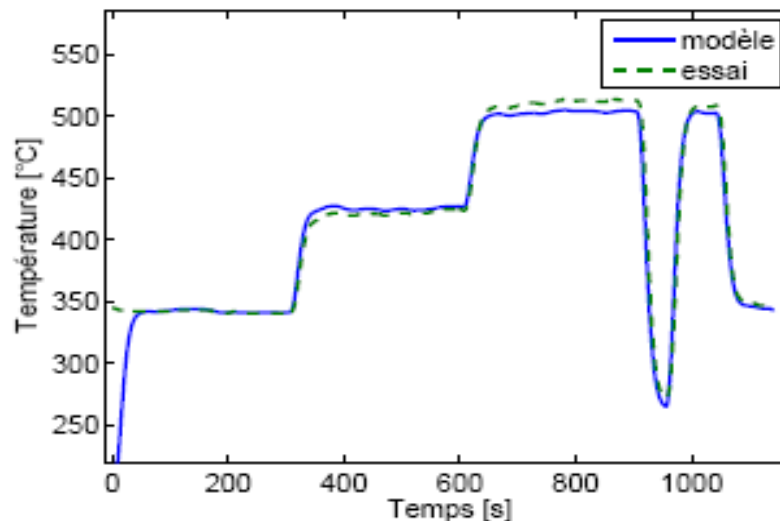
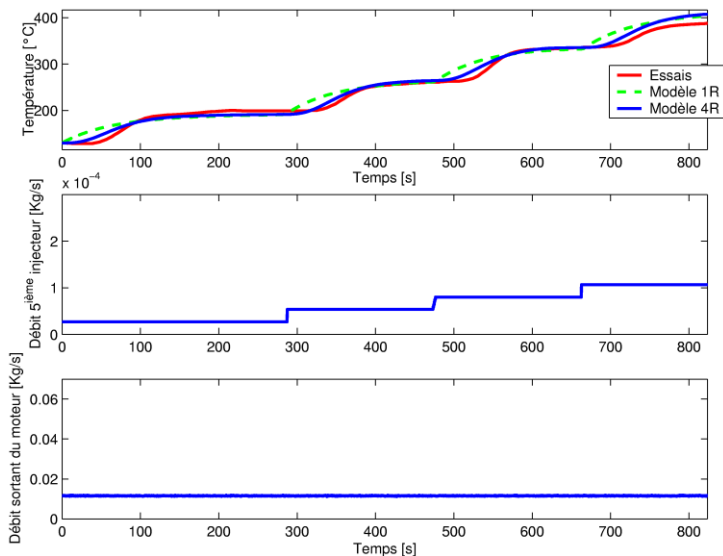
$$\begin{aligned} \Sigma : \dot{X} &= (A_0 + Q_g A_1)X + uB + VT_g^{in} \\ Y &= CX \end{aligned}$$

avec  $u = Q_{fuel}^{INJ}$ ,  $X = (T_{g,1} \ T_{p,1} \ \dots \ T_{g,N_d} \ T_{p,N_d})^T$ ,  
 $B = (b_1 \ 0 \ \dots \ 0)^T$ ,  $V = (v_1 \ 0 \ \dots \ 0)^T$  et  $C = (0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0)$

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

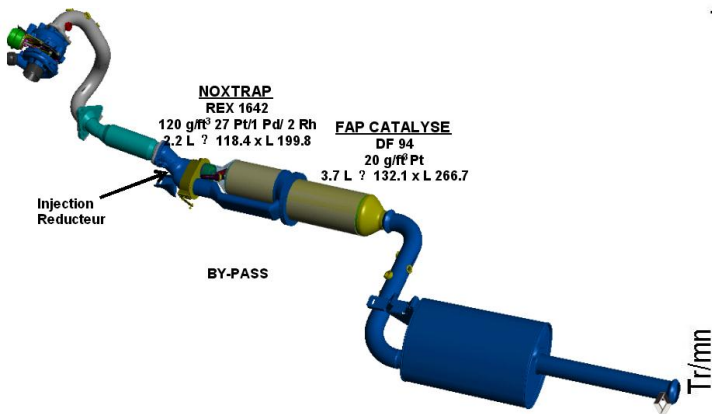
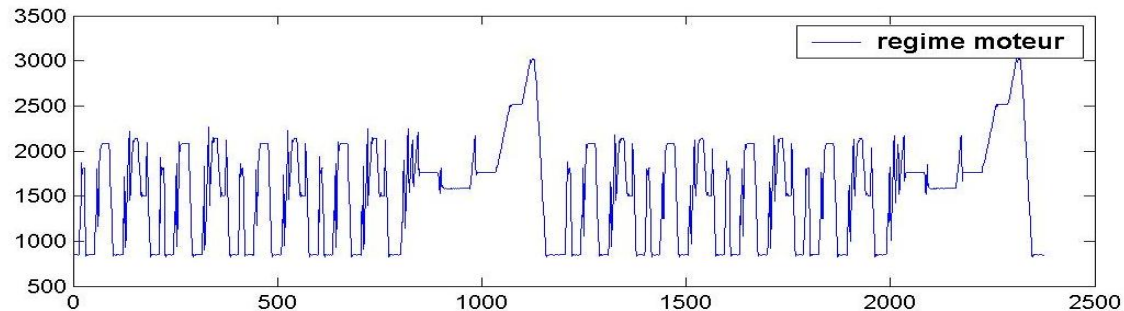
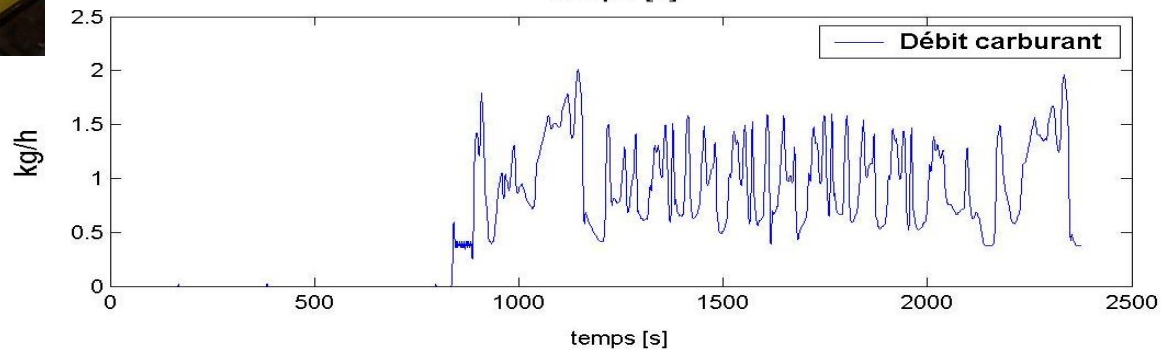
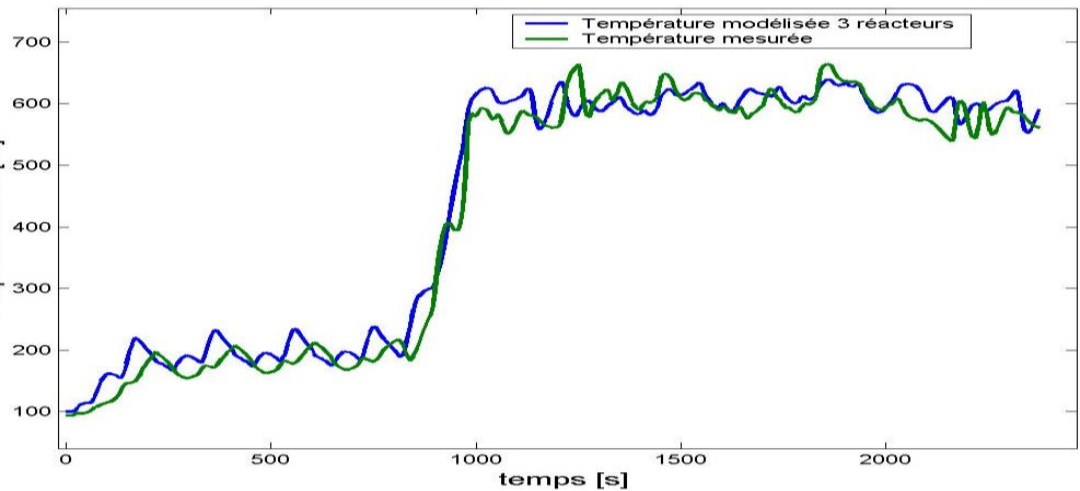
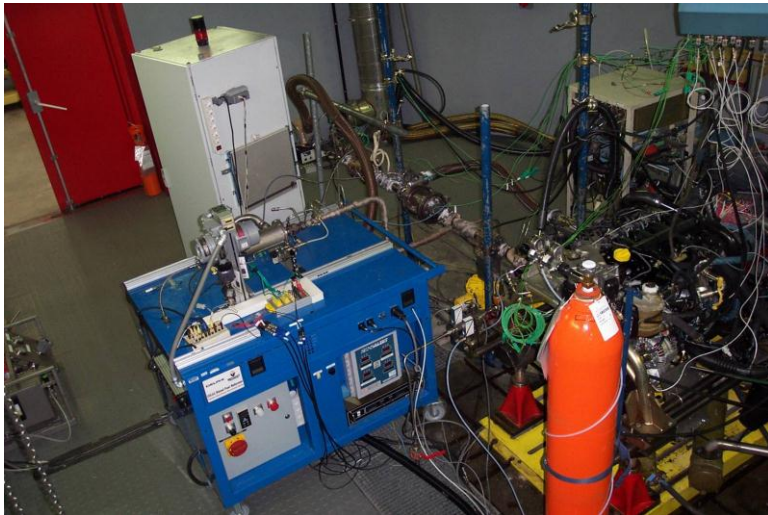
### ❖ Validation du modèle du catalyseur d'oxydation (1)

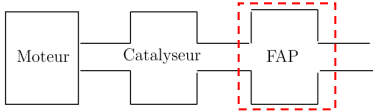


# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

### ❖ Validation du modèle du catalyseur d'oxydation (2)

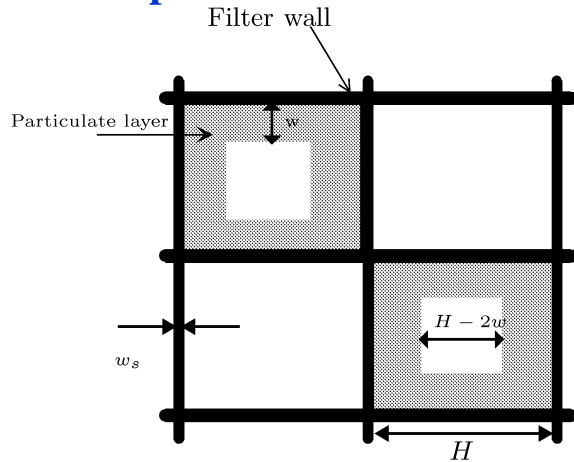




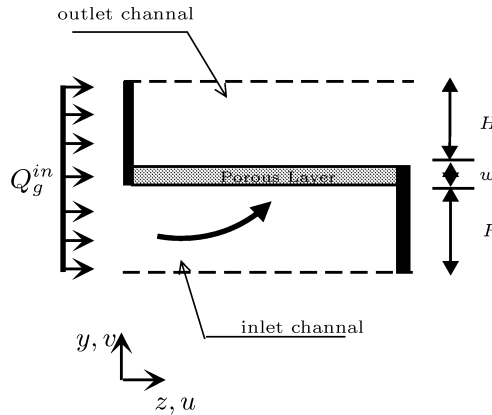
# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

### Principe de la filtration



### ❖ Modélisation 0D du FAP



### Bibliographies et références

- ❖ Travaux Pierre Darcy (68240)
- ❖ Athanasios G. Konstandopoulos
- ❖ Travaux d'Olivier Perrin (Renault/Inria)

### Modèle du FAP

$$\begin{aligned} \frac{dm_p}{dt} &= g_M(\phi, N, \Gamma_r, T_g^{MOT, in}, T_e^{MOT, in}) - a_0(T)m_p^{\alpha_1}[NO]^{\alpha_2} \\ &\quad - a_3(T)m_p^{\alpha_4}[NO_2]^{\alpha_5} + \frac{\phi_w}{\alpha_m \rho_p} \frac{M_c}{M_{O_2}} \\ &\quad \left( (Y_1^{1-\alpha} + \frac{(1-\alpha)B}{\alpha+2}(P_{int}^{\alpha+2} - P_1^{\alpha+2}))^{\frac{1}{1-\alpha}} - Y_1 \right) \\ \Delta P^{FAP} &= \frac{\mu Q_{vol}}{2V_{trap}} (H + w_s)^2 \left( \frac{4C_3 L^2}{3(H - 2w)^4} \right) \\ &\quad + \frac{\mu Q_{vol}}{2V_{trap}} (H + w_s)^2 \left( \frac{w_s}{k_s H} \right) + \frac{\mu Q_{vol}}{2V_{trap}} (H + w_s)^2 \frac{1}{2k_w} \ln \left( \frac{H}{H - 2w} \right) \\ &\quad + \frac{\mu Q_{vol}}{2V_{trap}} (H + w_s)^2 \left( \frac{4C_3 L^2}{3H^2} \right) \end{aligned}$$

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

### ❖ Validation du modèle du FAP

➤ Corrélation des modèles sur des essais statiques

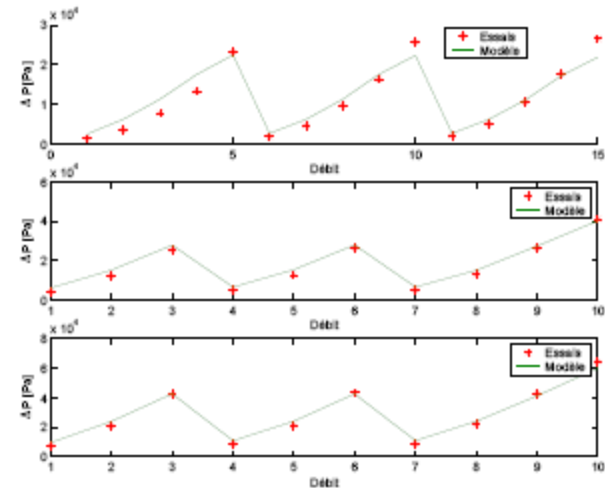


FIG. 10.7 – Sic 1L9

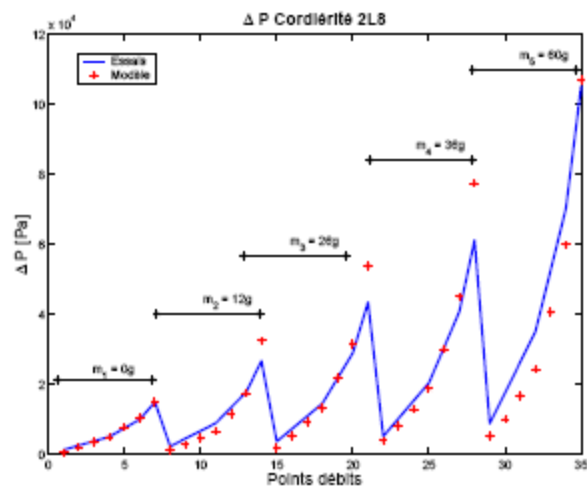
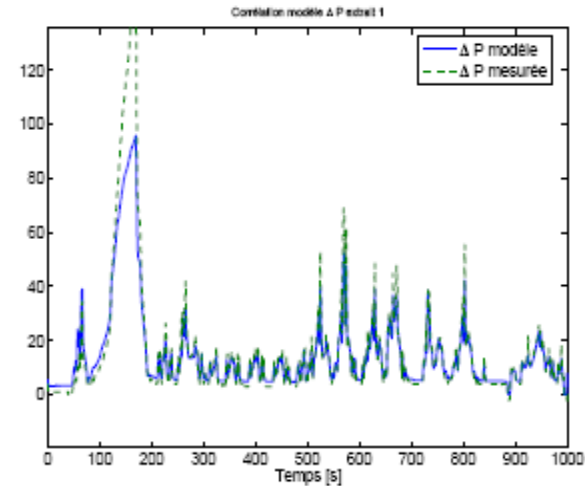
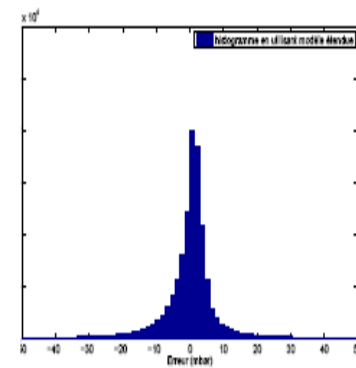
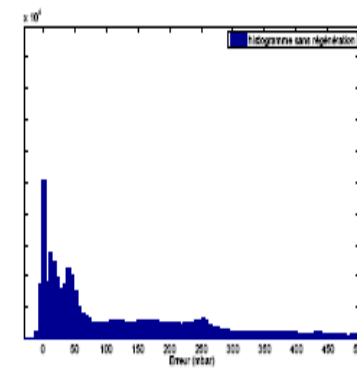
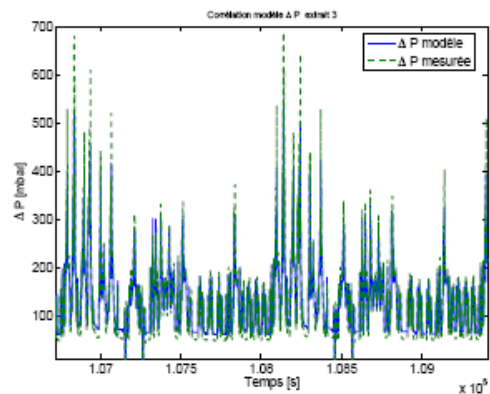
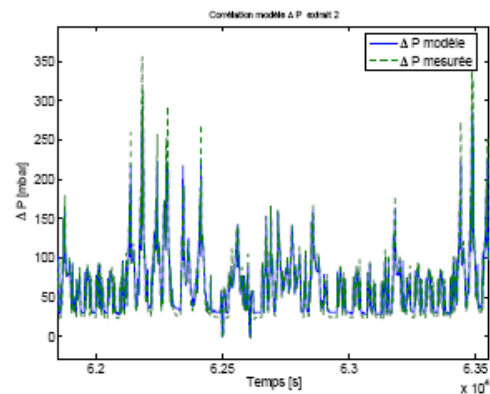


FIG. 10.8 – Cordierite 2L8



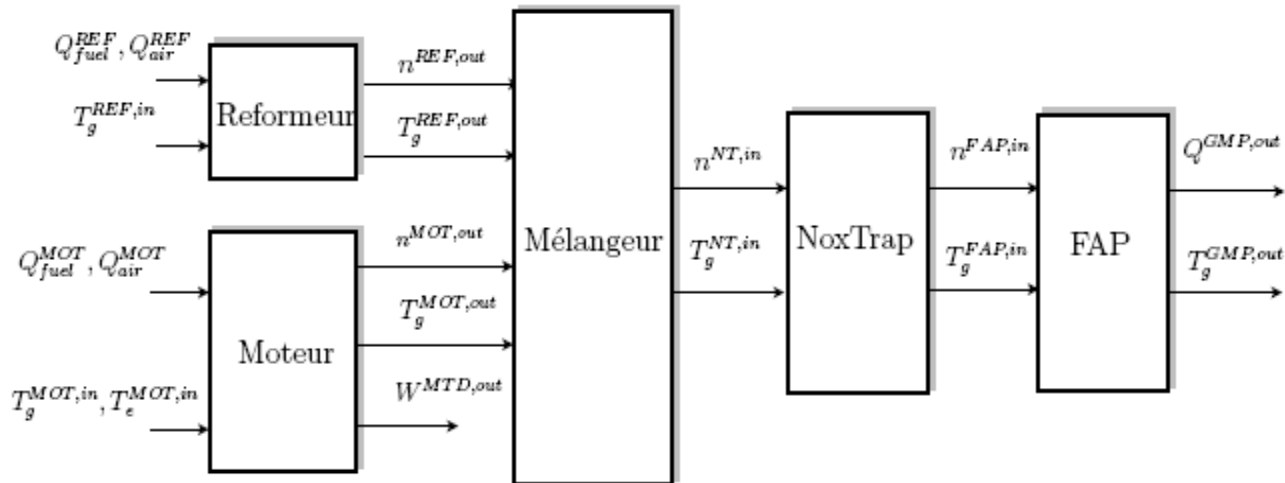
➤ Corrélation des modèles sur des essais dynamiques (erreur moyenne = 1mbar  $\sigma^{\text{physique}} = 12 \text{ mbar} < \sigma^{\text{paraboles}} = 14 \text{ mbar}$ )



# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules

### ❖ Modèle système du GMP/MTD



Equations d'état

$$\begin{aligned} \dot{T}_g^{CT} &= (A_0 + Q_g A_1) T_g^{CT} + uB + VT_g^{in} \\ \dot{m}_p &= g_M(\phi, N, \Gamma_r, T_g^{MOT,in}, T_e^{MOT,in}) \\ \dot{SO}_h &= f_h \end{aligned}$$

Equations de sortie

$$y = \begin{pmatrix} T_g^{CT,out} \\ m_p \\ \Delta P^{FAP} \\ Q^{GMP,out} \\ W^{GMP,out} \\ SO_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CT_g^{CT} \\ m_p \\ f_P(m_p, Q_g^{MOT}, T_g^{FAP}) \\ Q^{FAP,out} \\ \eta_{org} W_{cyl} \\ SO_h \end{pmatrix}$$

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

Faible impact de la dépollution sur le rendement du moteur thermique

→ contrôle de la dépollution découplé du contrôle moteur

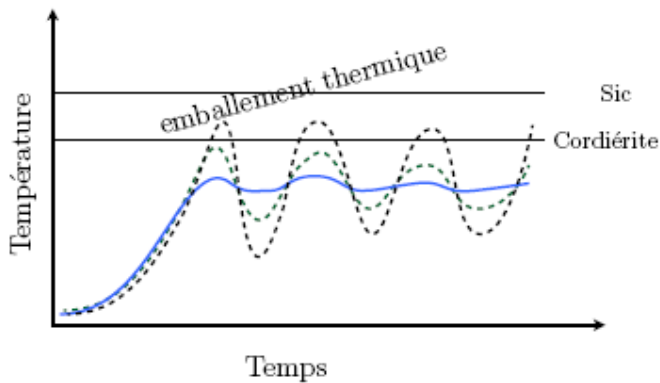
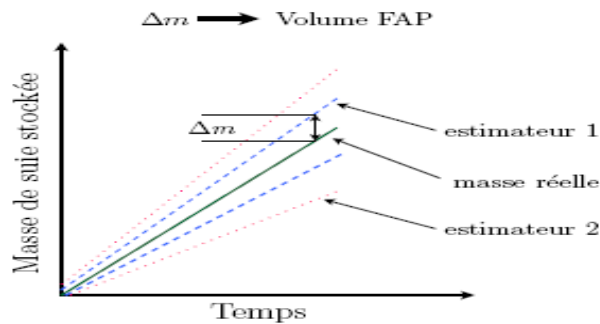
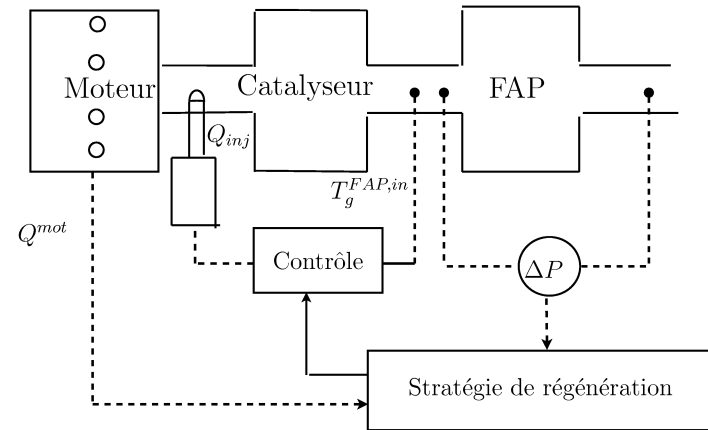


Schéma de contrôle de la régénération du FAP



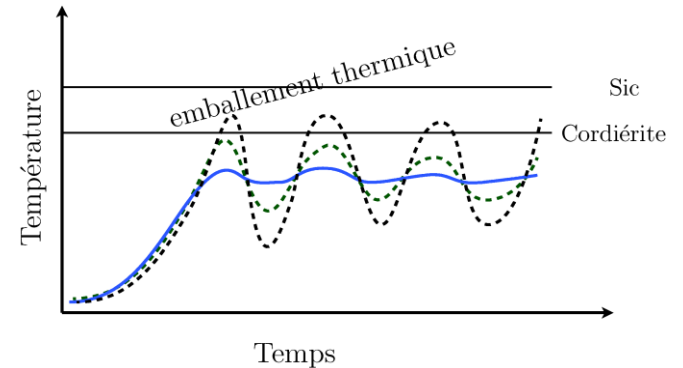
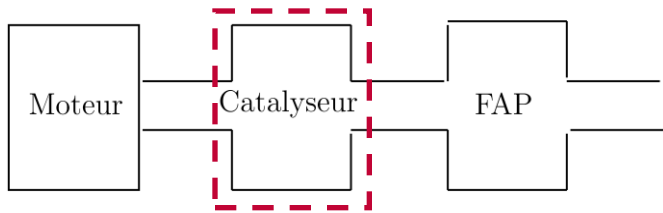
- ▶ Développement d'une loi de commande de la température entrée du FAP → robustesse vis-à-vis du rejet de perturbation et de la dispersion des paramètres
- ▶ Développement d'observateur pour le diagnostic (OBD)
- ▶ Développement d'un estimateur de masse de suie



# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

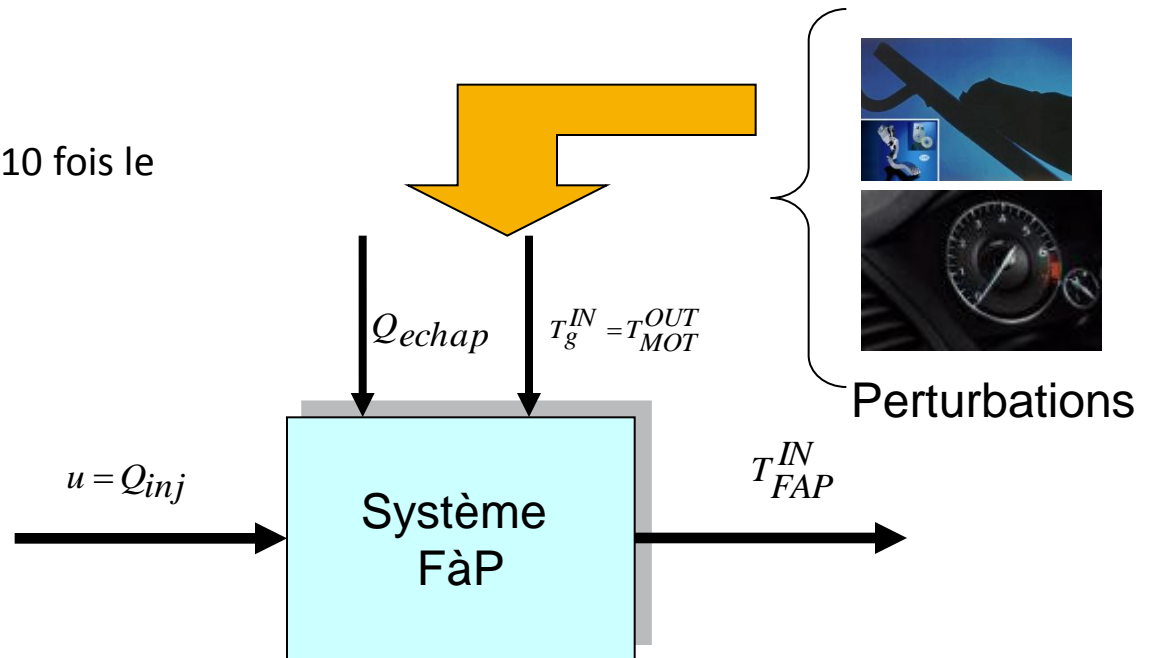
### ❖ Contrôle thermique de la régénération du FAP



## Analyse des caractéristiques du système

- Système à paramètres variant
- Système à retard
- Plage de variation de 5 à 60 s (>10 fois le temps de réponse du système)

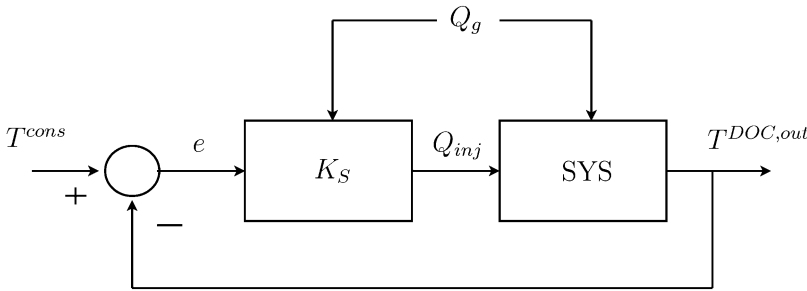
## Problème de commande



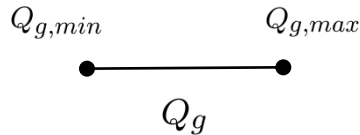
# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Contrôle thermique de la régénération du FAP



Paramètre variant :



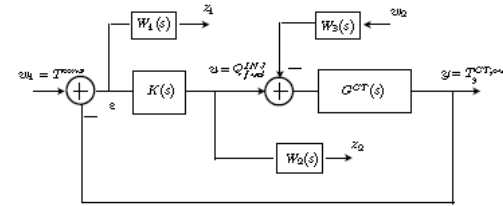
Modèle du système :

$$\text{SYS} = \left[ \begin{array}{c|c} Q_g \bar{\mathbf{A}} & \mathbf{B} \\ \hline \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{array} \right]$$

Correcteur LPV Robuste :

$$K_S = \alpha(Q_g) \underbrace{\left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{A}_{K1} & \mathbf{B}_{K1} \\ \hline \mathbf{C}_{K1} & \mathbf{D}_{K1} \end{array} \right]}_{K_1} + (1-\alpha(Q_g)) \underbrace{\left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{A}_{K2} & \mathbf{B}_{K2} \\ \hline \mathbf{C}_{K2} & \mathbf{D}_{K2} \end{array} \right]}_{K_2}$$

Pour développer la loi de commande LPV nous allons considérer le schéma à quatre blocks,



nous définissons ensuite un problème H standard:

$$T_{wz} = F_l(P, K) = \begin{pmatrix} W_1 S_s & W_1 S_s G^{CT} W_3 \\ W_2 K S_s & W_2 K S_s G^{CT} W_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \|W_1 S_s\|_{\infty} &< \underline{\gamma} & ; & \|W_1 S_s G^{CT} W_3\|_{\infty} < \underline{\gamma} \\ \|W_2 K S_s\|_{\infty} &< \underline{\gamma} & ; & \|W_2 K S_s G^{CT} W_3\|_{\infty} < \underline{\gamma} \end{aligned}$$

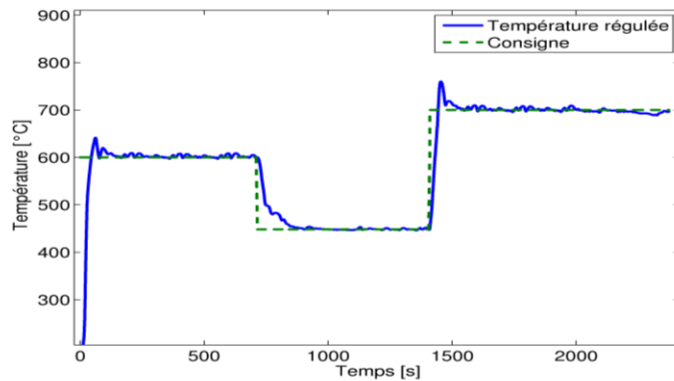
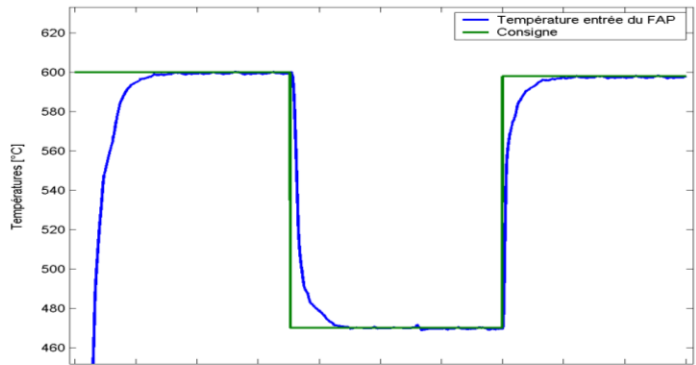
La représentation fractionnaire inférieure  $T_{wz}$  admet pour représentation d'état (A,T,B,T,C,T,D,T)

Il s'agit de trouver le correcteur K (AK,BK,CK,DK) et la matrice Q qui vérifient les inégalités matricielles suivantes:

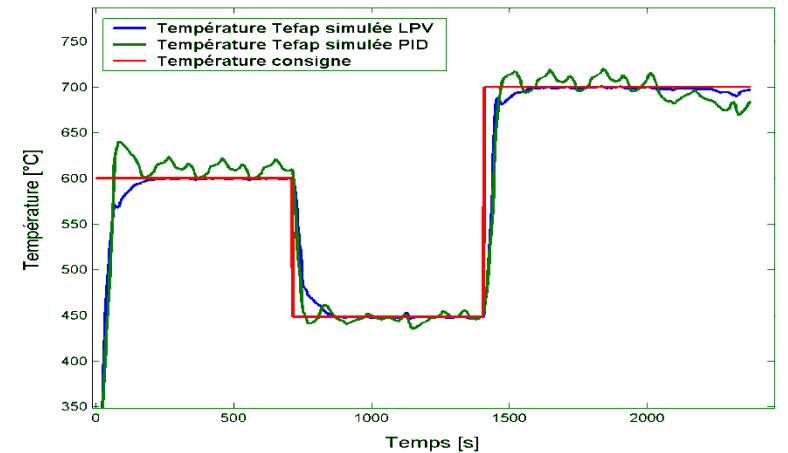
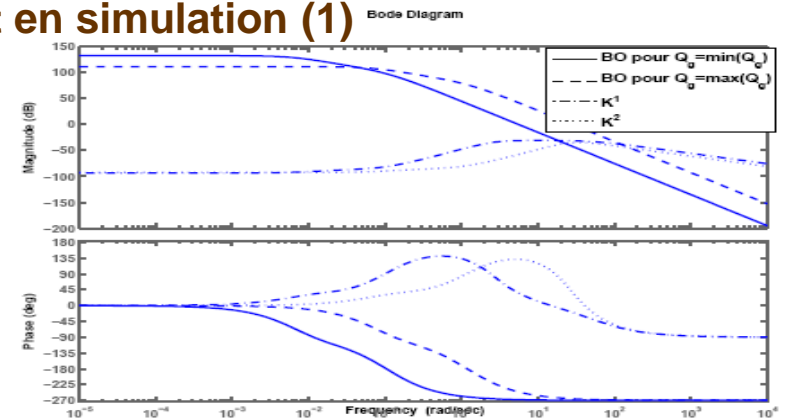
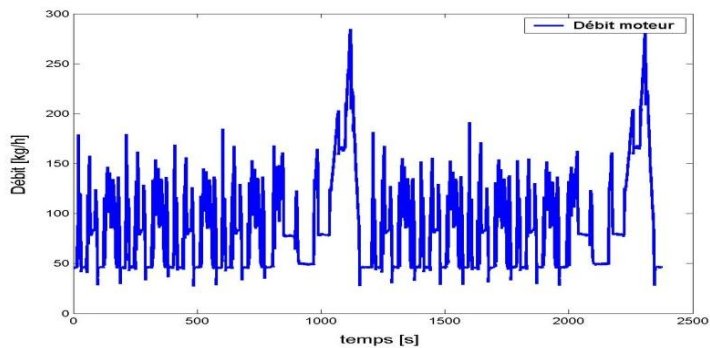
$$\begin{pmatrix} A_T^T Q + Q A_T & Q B_T & C_T^T \\ B_T^T Q & -\gamma I & D_T^T \\ C_T & D_T & -\gamma I \end{pmatrix} < 0, Q > 0$$



Carsten Scherer



Qg

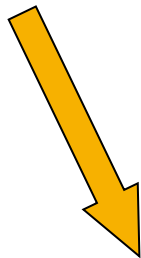
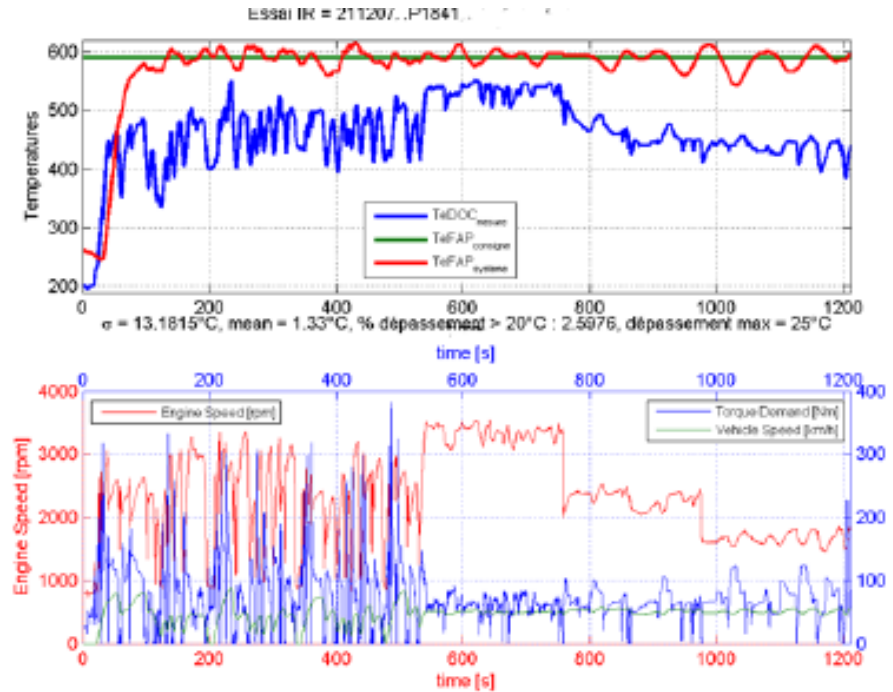
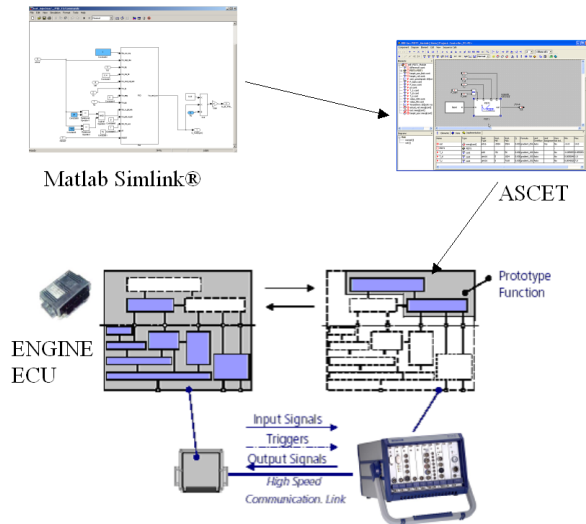


LPV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amélioration des performances</li> <li>- Amélioration de la robustesse vis-à-vis des perturbations</li> <li>- Loi de commande qui est plus dur à développer</li> </ul>
PID	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Loi de commande plus facile à calibrer</li> </ul>

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Validation expérimentale et en simulation (2)



**Validation en cours**

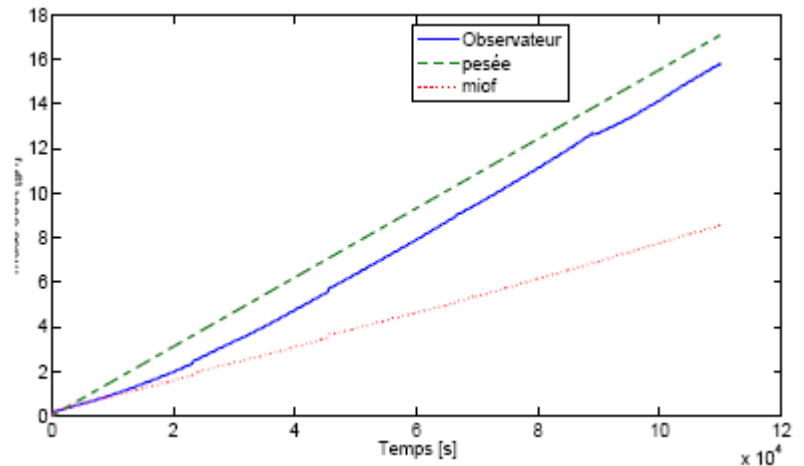
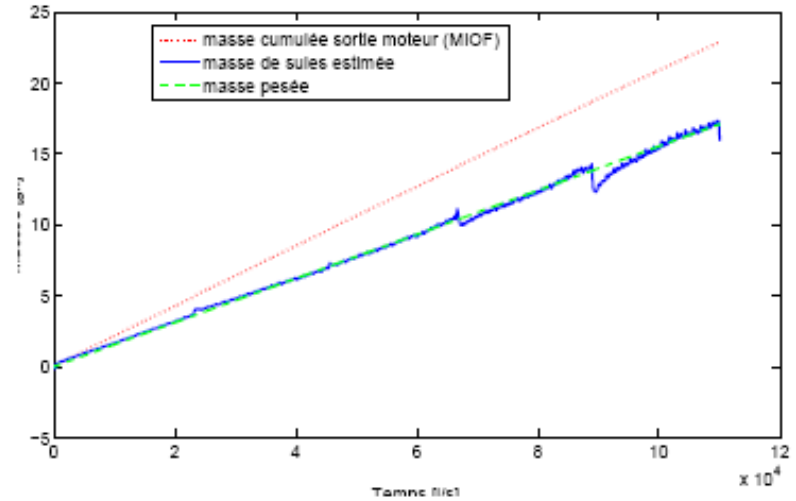
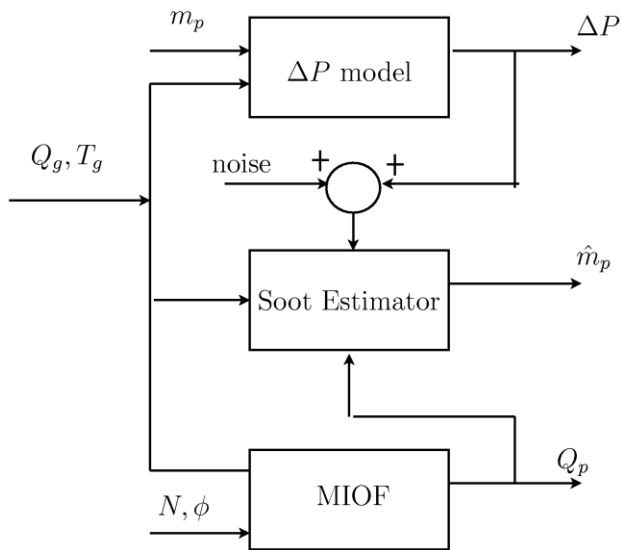
Pour le moment prototypage uniquement du PID à gain variable.

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

$$\frac{d\hat{m}_p}{dt} = g_M(\phi, N, \Gamma_r, T_g^{MOT,in}, T_e^{MOT,in}) - K_{ob}(f(\hat{m}_p, Q_g^{mot}, T_g^{in}) - y_{mes}) - k(T)[NO_x]^{\alpha_1} m_p^{\alpha_2}$$

$$y_{est} = \hat{m}_p$$

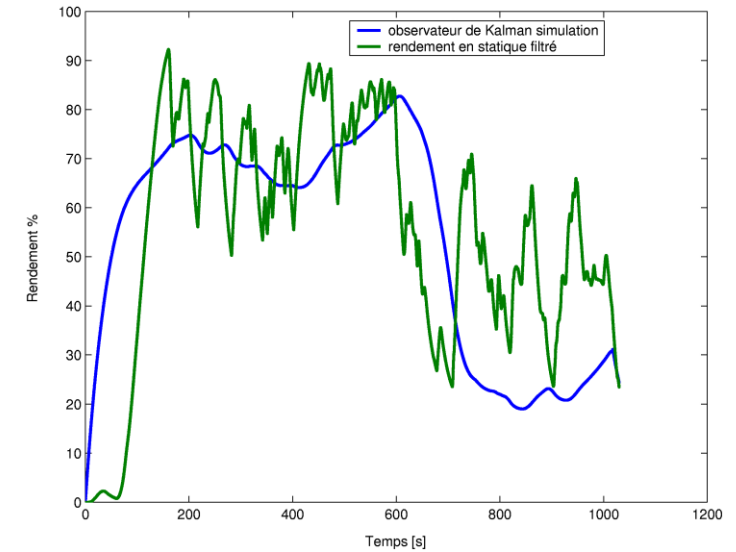
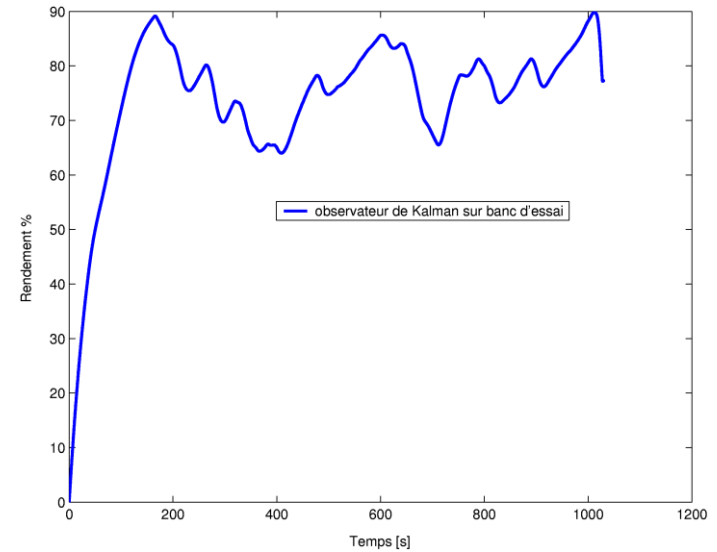
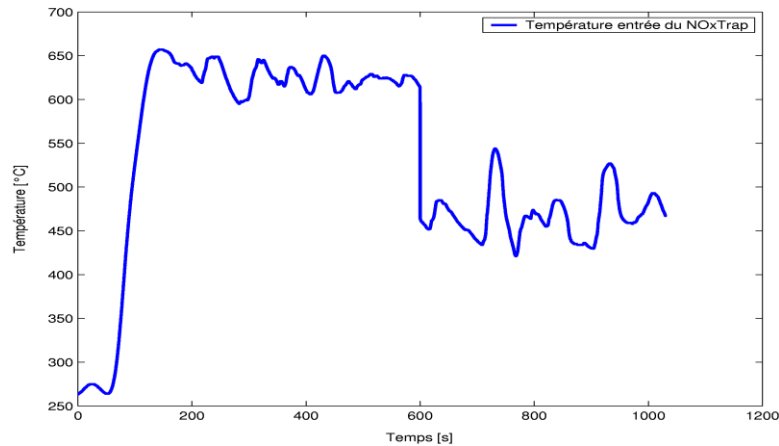
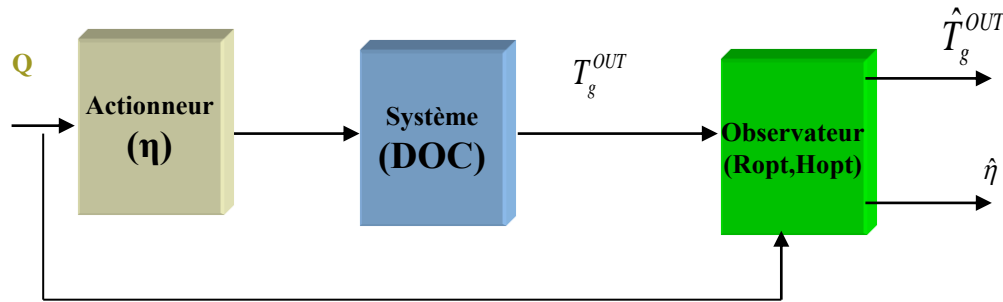


# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### Objectifs

- Surveiller le rendement des différents actionneurs
- Tenir compte de la baisse du rendement pour améliorer la loi de commande
- Détecter des éventuelles pannes et prendre les actions nécessaires



# IV) Comparaison entre les deux systèmes étudiés

## 1) Synthèse des cinq axes de comparaisons entre les GMP étudiés

### Axe n° 1 : consommation

$$\eta^{GMP} = \frac{W_m^{GMP,out}}{W_{carb}^{GMP,in}}$$

$$= \eta^{CP} \eta^{GP} \eta^{MDC} \eta^{MTF} \eta^{MTT}$$

$$GMP \in \{GMP/PAC, GMP/MTD\}$$

### Axe n° 2 : pollution

$Q_P \approx 0$  Pour le système GMP/PAC

$$Q_P = (Q_{NO_x}, Q_{suies}, Q_{CO}, Q_{HC})^T$$

Pour le système GMP/MTD

### Axe n° 3 : autonomie

Stock d'eau pour le GMP/PAC

Stock d'huile non dégradé pour le GMP/MTD

### Axe n° 4 : coût

### Axe n° 5 : densité d'énergie

$$\mathcal{R} = \frac{W^{GMP,max}}{V^{GMP}}$$

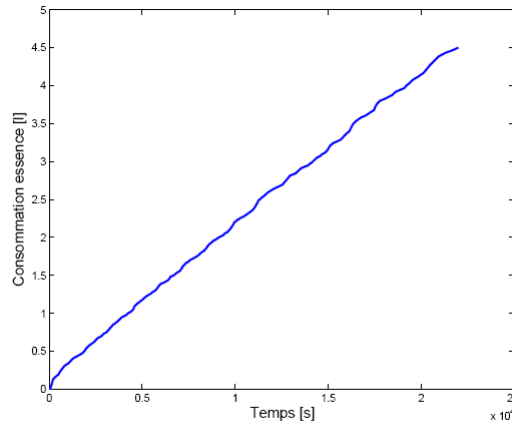


FIG. 12.6 – Consommation du MDP (essence)

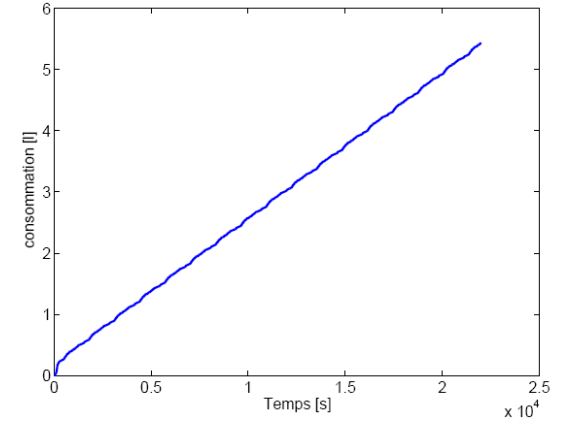
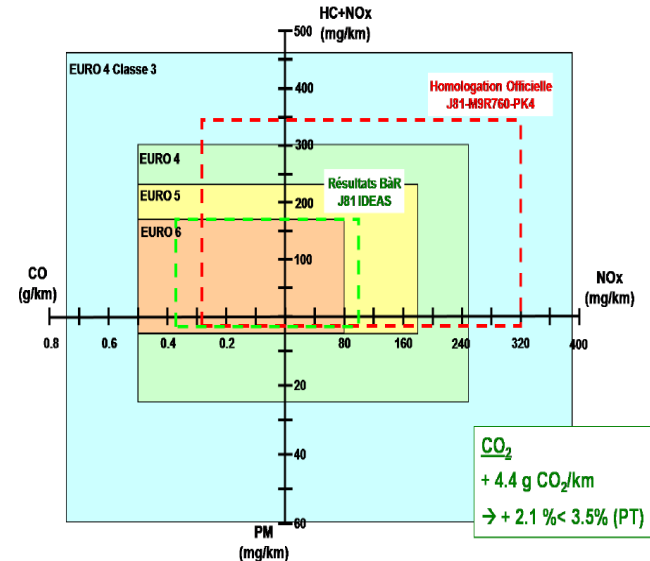
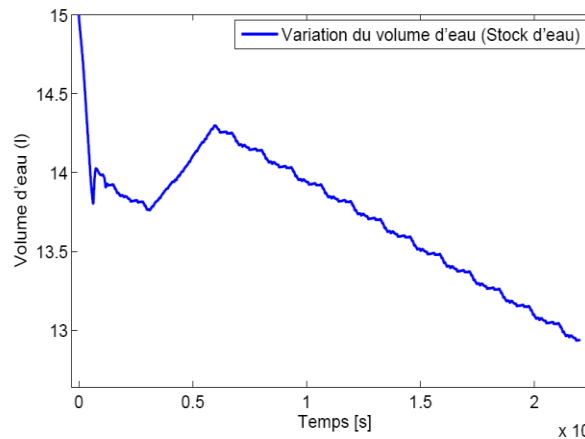
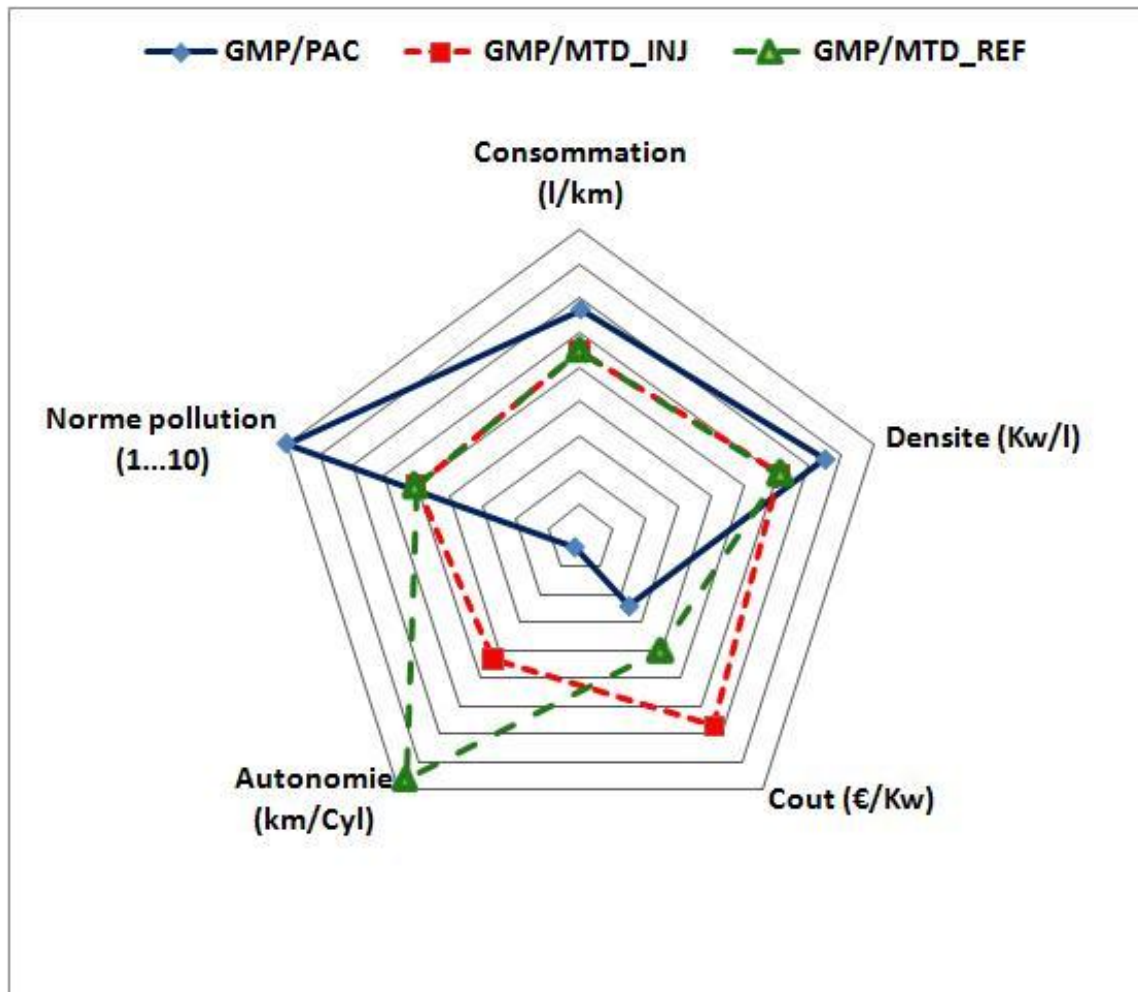


FIG. 12.8 – Consommation du MTD (Diesel)



# IV) Comparaison entre les deux systèmes étudiés

## 2) Analyse et comparaisons des résultats obtenus





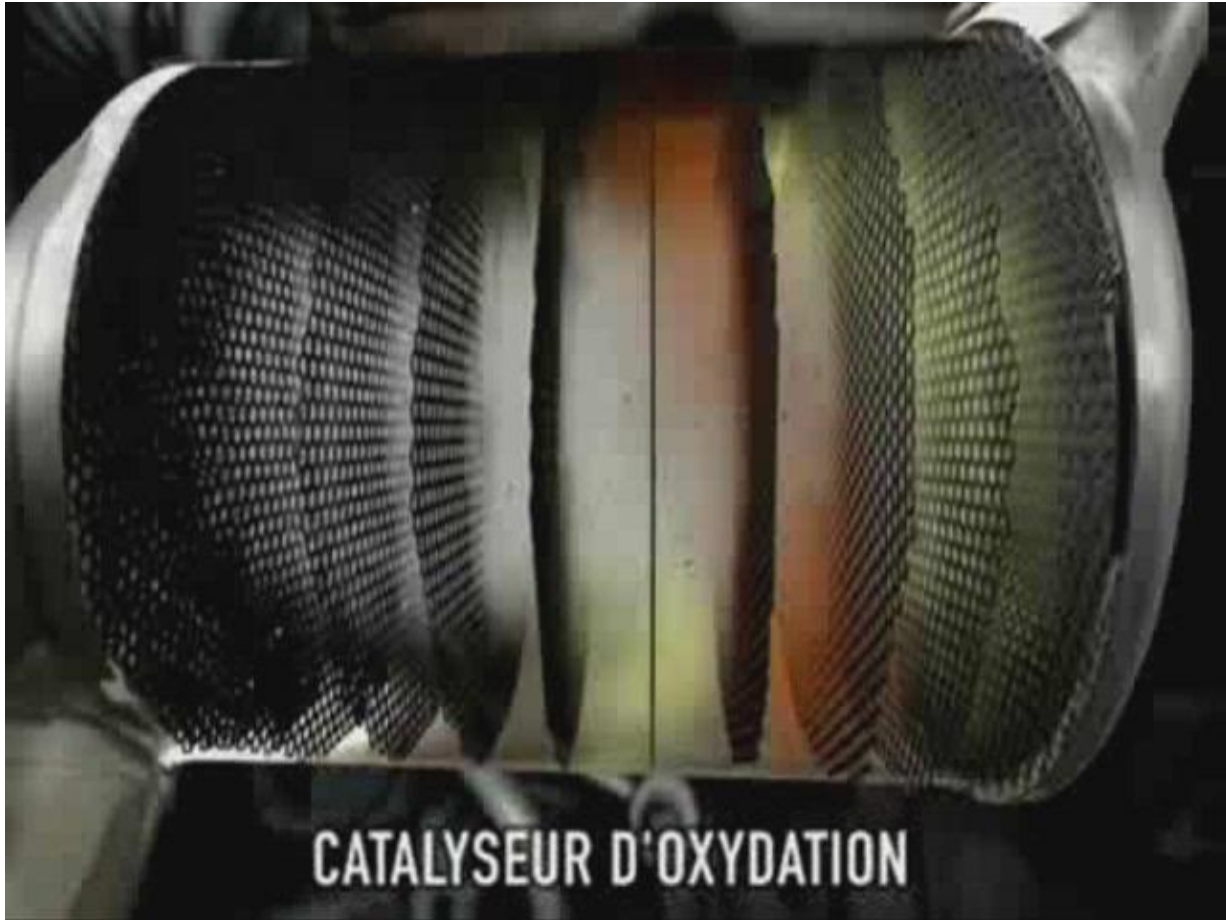
# V) Conclusions et perspectives

## ○ Bilan

- Développement de modèles physique pour des systèmes multidisciplinaires
- Application de différents techniques de réduction de modèles
- Développement et portage de loi de commande en vue d'optimiser le rendement énergétique sous contraintes de consommation et de coût
- Comparaison multi-critères entre deux types de groupe motopropulseurs.
- Proposition d'une structure commune de deux GMP étudiés et formalisation d'un problème de commande commun.
- 3 articles et 6 brevets

## ○ Perspectives

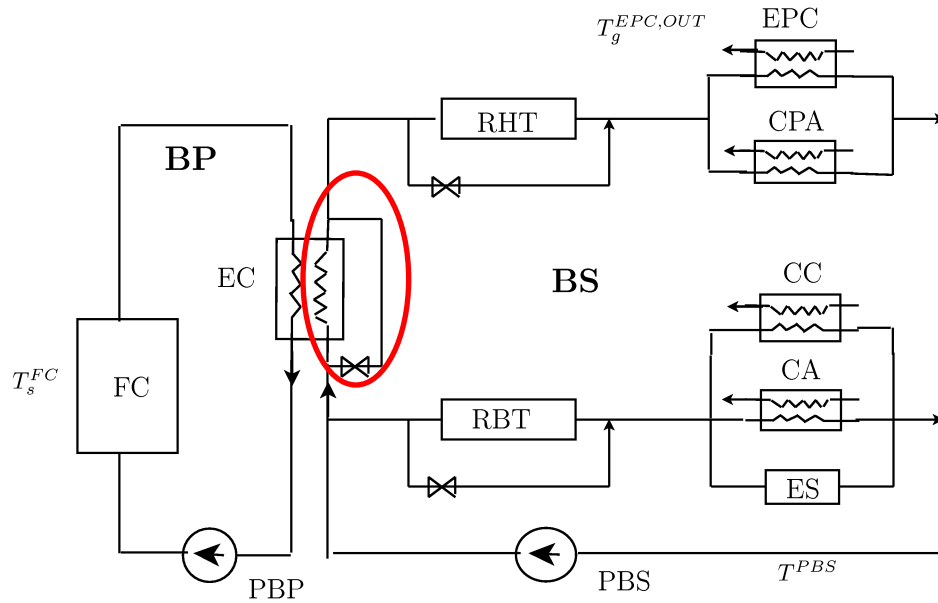
- Prototypage de la loi de commande LPV sur banc d'essai
- Utiliser le simulateur (système de dépollution + contrôle) afin de chiffrer d'une façon dynamique le gain en volume du FAP
- Rédaction d'articles scientifiques



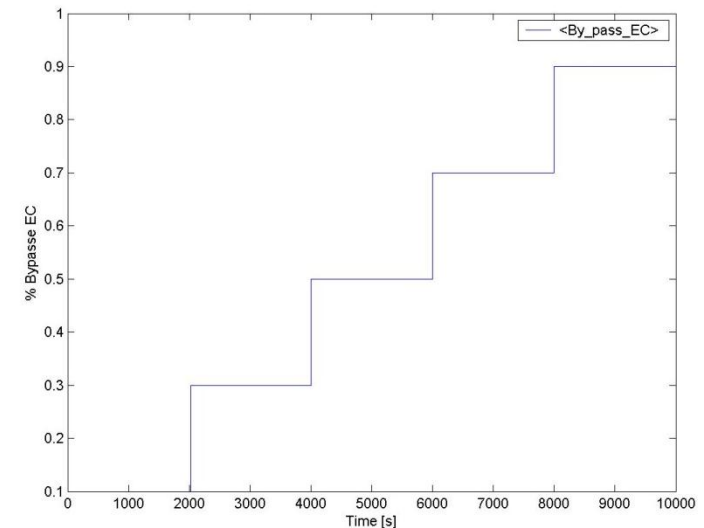
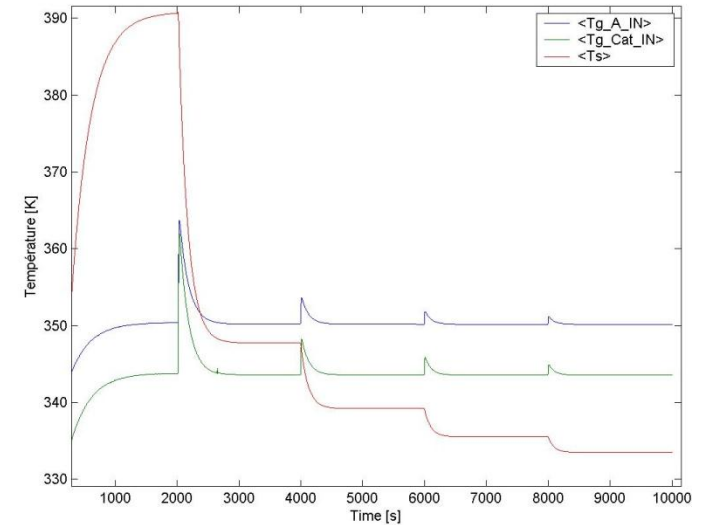
# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Découplage des boucles (Contrôle modulaire)



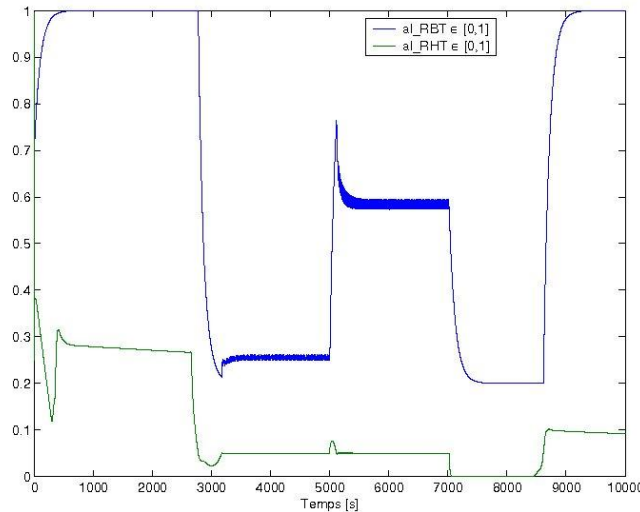
- Commandabilité insuffisante par l'architecture initiale
- Commande découplée de BP et BS



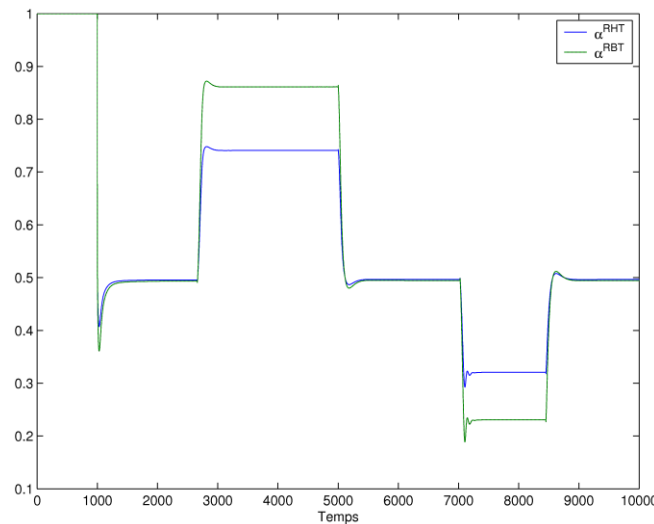
# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Comparaison des lois de commande



- Commande PI  
(1 semaine de calibration)



- Commande LQ Multivariable  
(1 matinée de calibration)

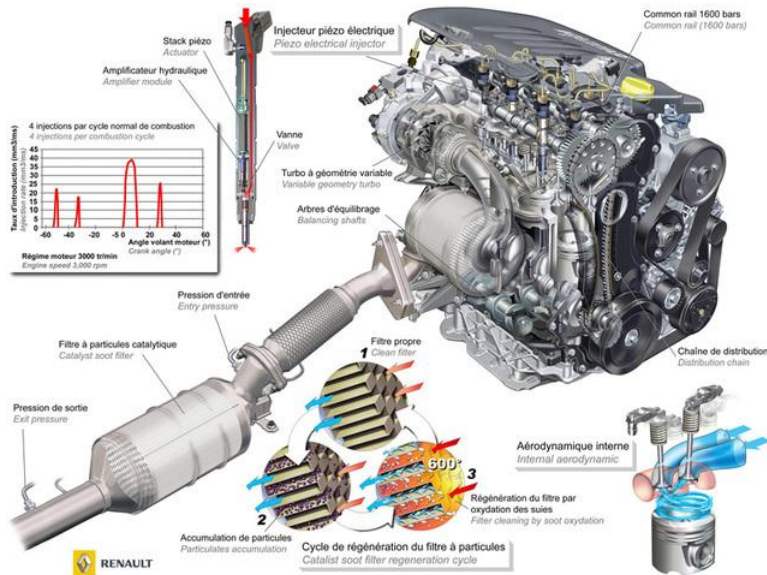
# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques aux GMP étudiés

### Les projets Innovation

#### IDEAS/EPM

- Deux actionneurs différents (Reformeur pour IDEAS) et le (5eme injecteur ou un VAPO pour EPM)
- Réduire le temps de MAP
- Réduire les coûts du système (Dimensionnement actionneur, volume FàP... etc).
- Réduire la consommation → CO<sub>2</sub>
- Valeur client (Disponibilité du véhicule, intervalle du vidange..)



### Actuellement,

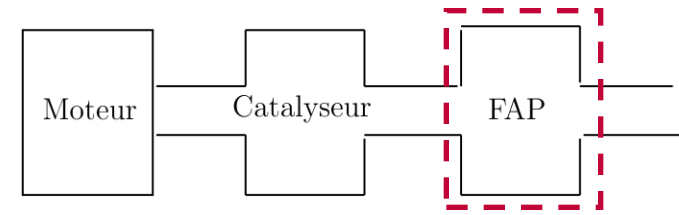
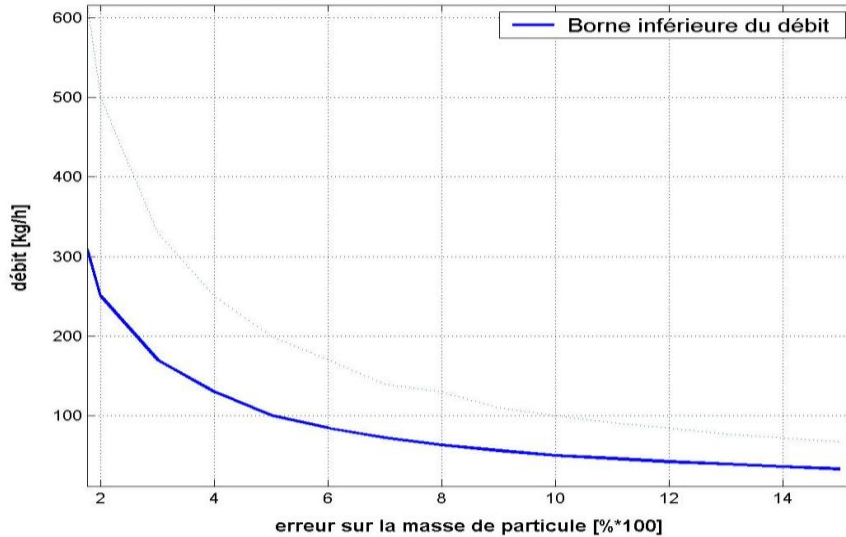
↳ Contrainte sur la quantité de particules en sortie du moteur (Euro5-Euro6) → Filtre à particule

↳ Contrainte de dilution de l'huile en utilisant le moteur thermique pour la régénération du FAP (EURO4)

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### Analyse de sensibilité



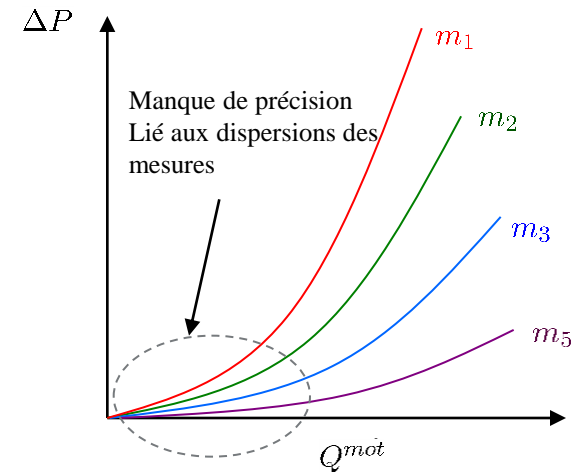
$$\Delta P_{FAP} = f(G_o, Q_v, k_s, k_w)$$



$$\frac{d\Delta P}{\Delta P} = Q_g d_m^0(m, Q_g, T) \frac{dm}{m} + \frac{dQ_g}{Q_g} + \frac{dT}{T}$$

### 3 objectifs :

- 1) Pour une définition de capteurs fixée, donner la précision maximale atteignable par l'estimateur de masse de suie ( DCMAP cliente)
- 2) A précision de masse de suie fixée par CDC, dimensionner le capteur de température ou de perte de charge
- 3) Calibration de l'estimateur de suie



# III) Modélisation et commande des actionneurs

## 3) Représentation matricielle

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(Q_g)X + B(T_g^{in}) + V \\ Y &= CX \end{aligned}$$

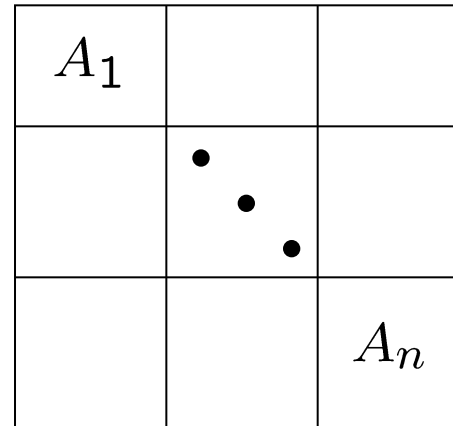
Les états du modèles sont les températures en différents emplacements du catalyseur

$$\begin{aligned} X &= T_l^i & i \in [1,4] \\ Y &= T_g^{out} & l \in \{g, p\} \end{aligned}$$

À refaire

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(Q_g)X + B'u + V \\ Y &= CX \end{aligned}$$

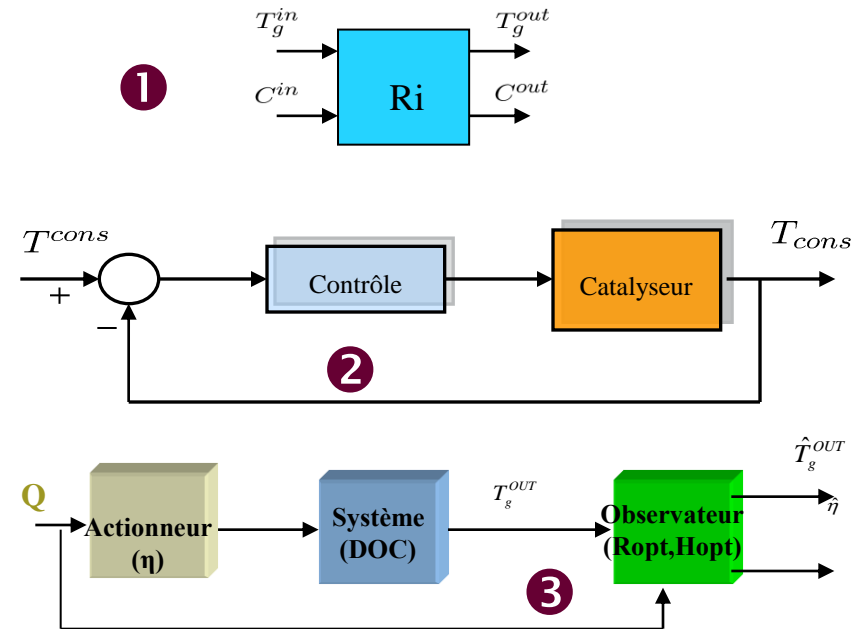
$$u = \frac{1}{A_g L} \frac{P}{r T_g^{IN}} \eta Q_{inj} PCI_{fuel}$$



Le modèle est indépendant du type d'actionneur utilisé

- IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique
  - 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

Nombre d'états	Précision	Complexité	Utilisation
6 états	Précis	Complexe	Simulation sur PC ①
4 états	Moins Précis	Moins complexe	Synthèse loi de commande ②
2 états	Pas précis en transitoire	Moins complexe	Diagnostic ③





# Plan de l'exposé

## **I. Contexte de l'étude et objectifs de la thèse**

## **II. Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué**

- 1) Structure commune aux deux groupes motopropulseurs (GMP) étudiés
- 2) Problème de commande commun aux deux groupes motopropulseur

## **III. Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible**

- 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques au GMP étudié
- 2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué
- 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

## **IV. Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique**

- 1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques aux GMP étudiés
- 2) Modélisation du GMP avec moteur thermique Diesel et filtre à particules
- 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

## **V. Comparaison entre les deux systèmes étudiés**

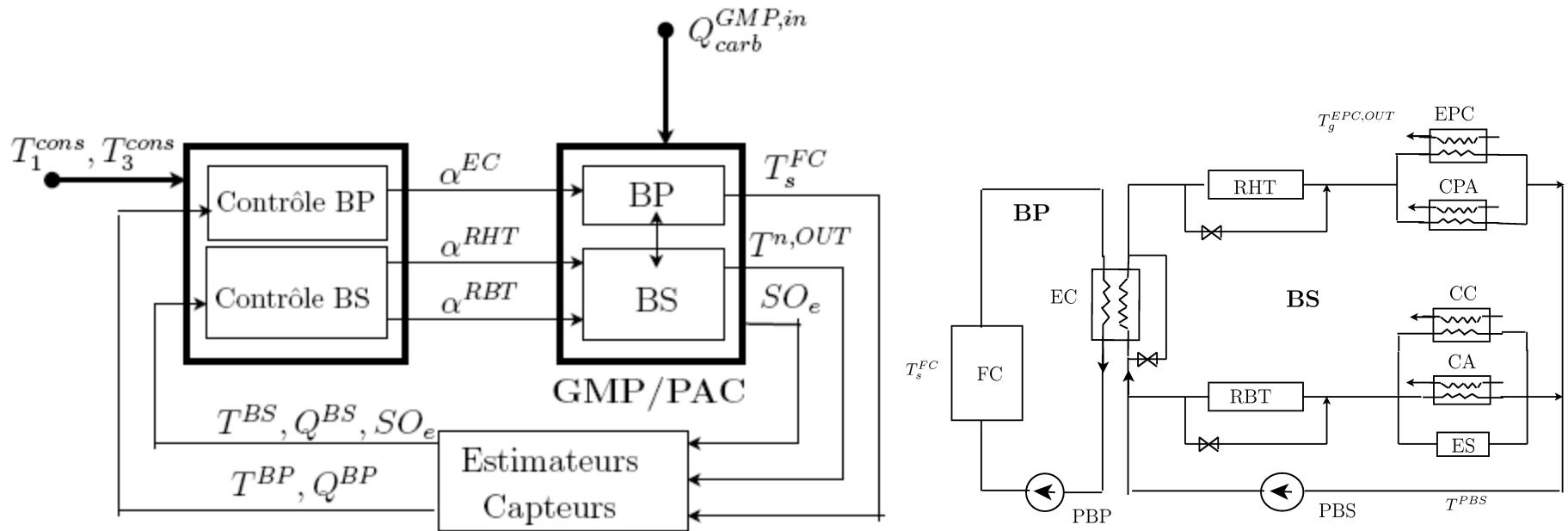
- 1) Synthèse des cinq axes de comparaisons entre les GMP étudiés
- 2) Analyse et comparaisons des résultats obtenus

## **VI. Conclusions et perspectives**

# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Structure de la commande

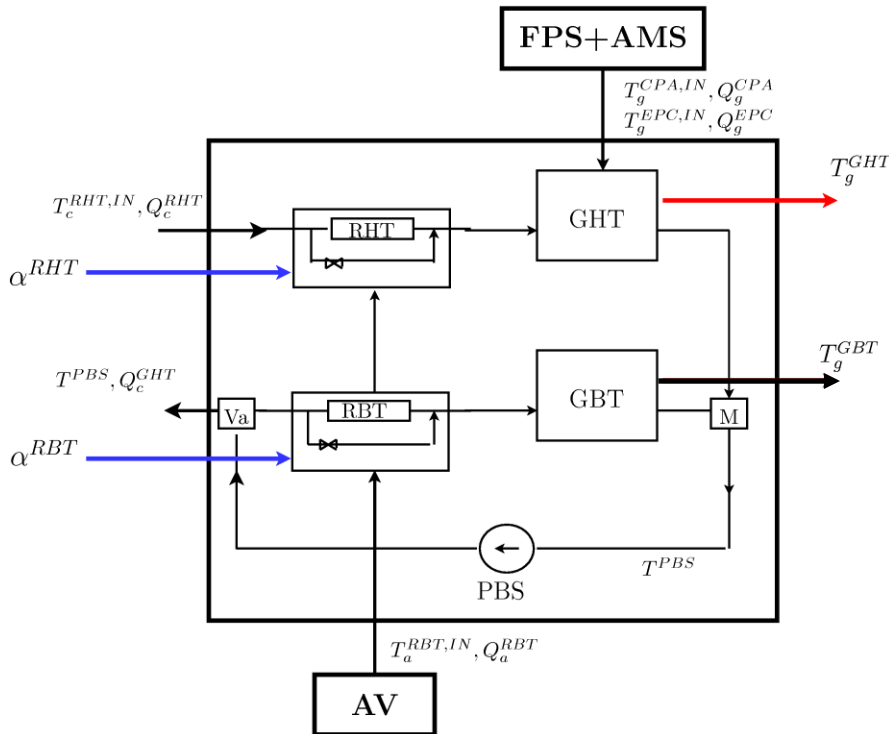


- Réduction du nombre de capteurs
- Commande modulaire
- Contrôle du pourcentage d'ouverture des vannes

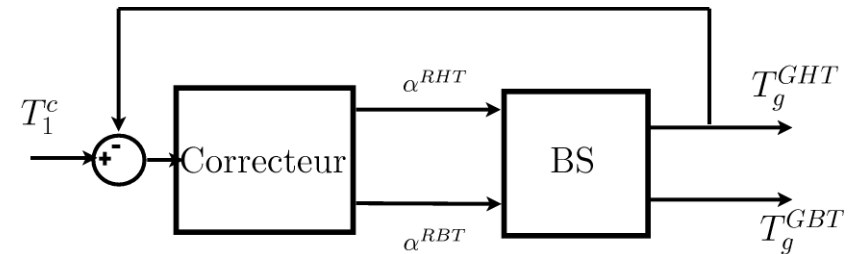
# III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

### ❖ Objectifs 2,3 : Régulation température gaz et bilan d'eau



$$T_g^{GHT} = \frac{T_g^{EPC,OUT} + T_g^{CPA,OUT}}{2}$$



- Commande 1: PI, actionneur par actionneur
- Commande 2: LQ multivariable

# IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

## 3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

