

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

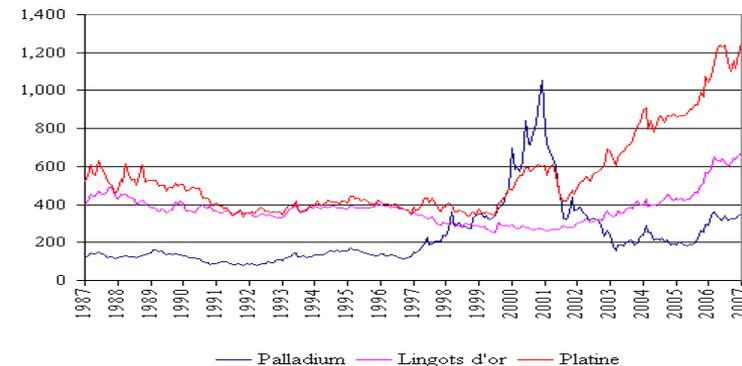
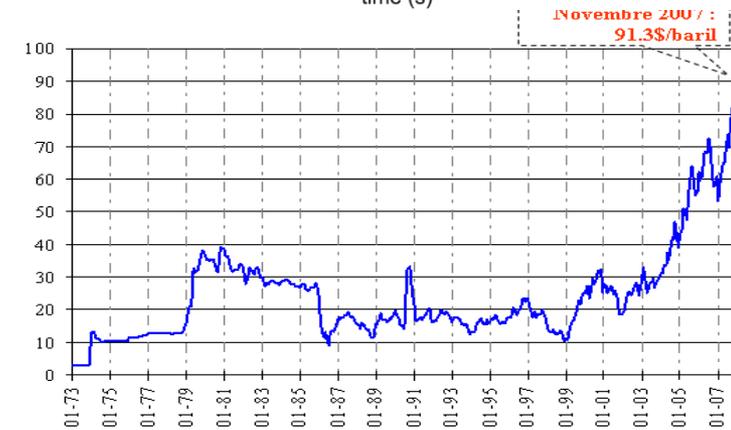
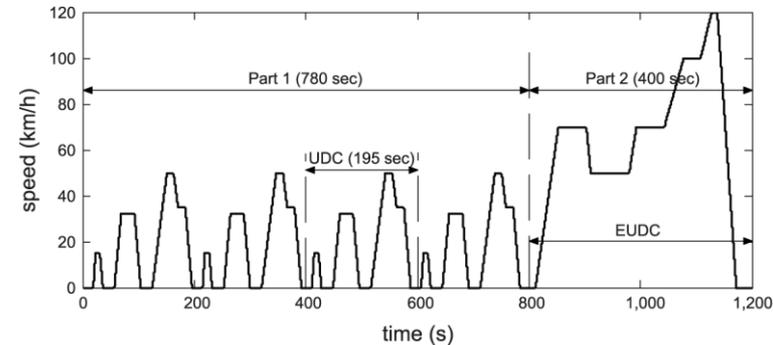
• Principaux challenges à emporter :

- 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 :

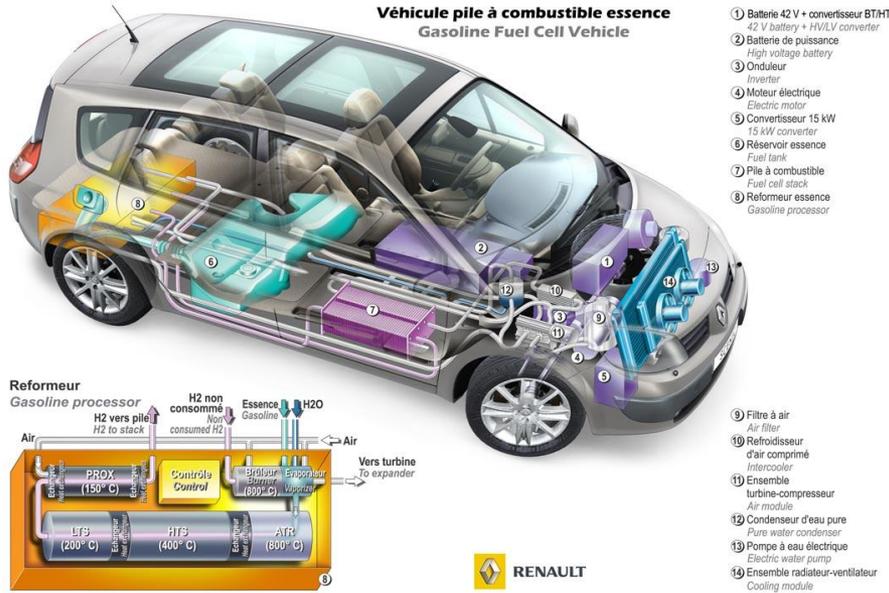
- Développement de modèles réduits
- Développement d'algorithmes de commande et de diagnostic
- Proposition d'une structure commune aux différents solutions étudiées et formalisation d'un problème de commande commun
- Comparaison entre les différentes solutions



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

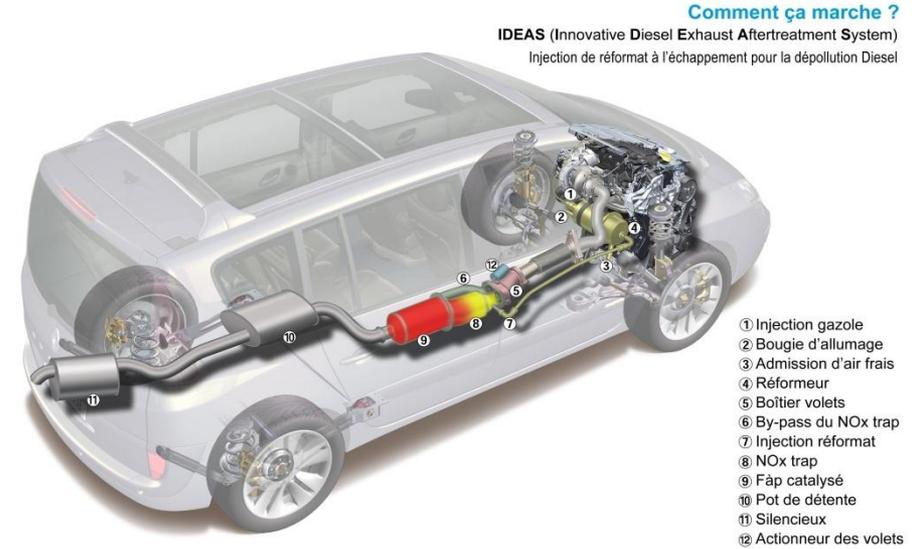
II) Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué



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

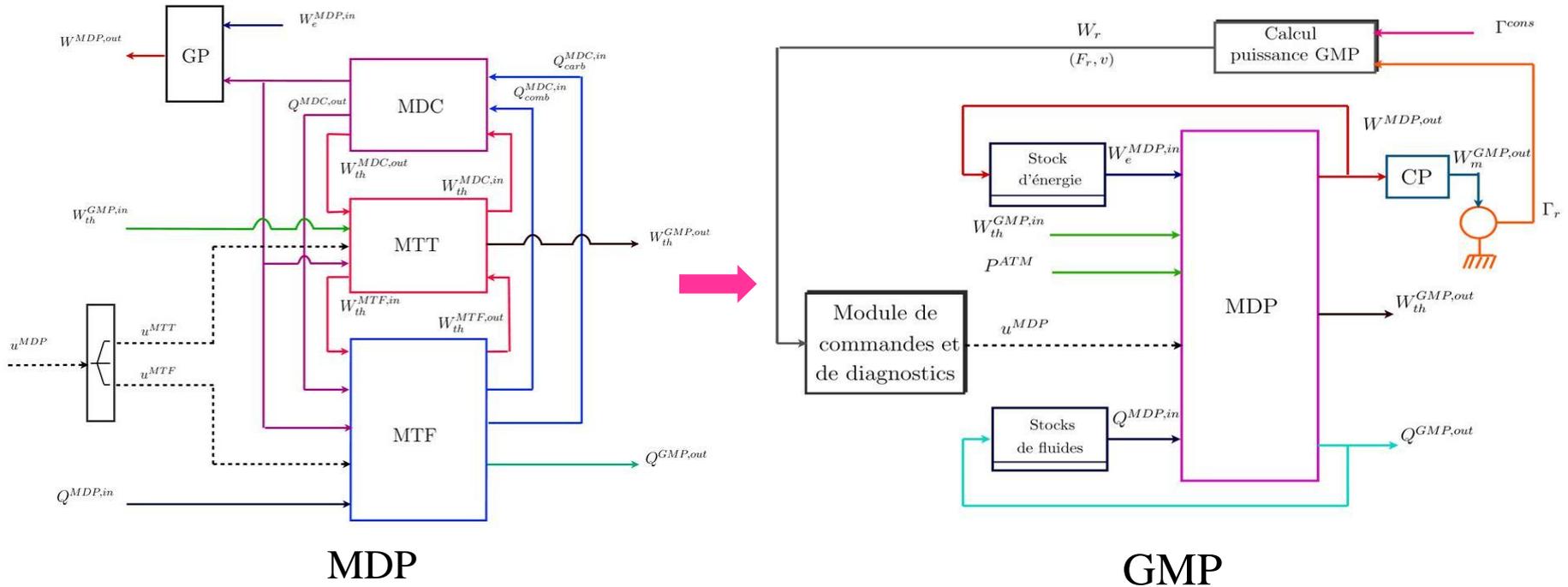
IDEAS

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
- α^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

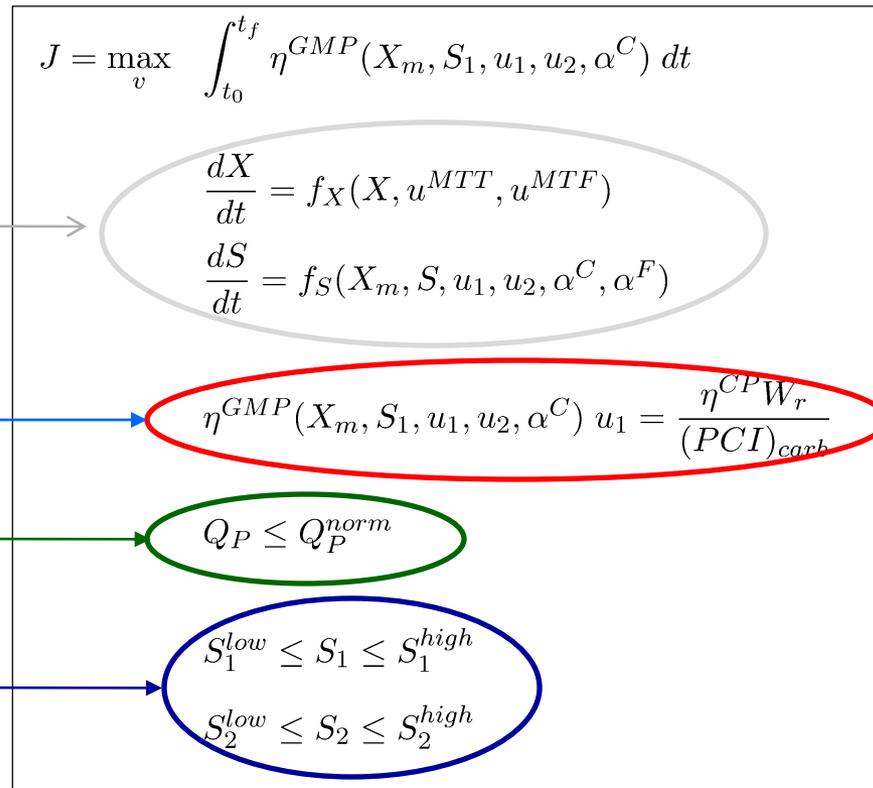
$$\frac{dSO_C}{dt} = |\alpha^C|_+ \frac{I^{MDC}}{Q^{max}} - |\alpha^C|_- \frac{I_0^{BAT}(SO_C)}{Q^{max}}$$

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 η^{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

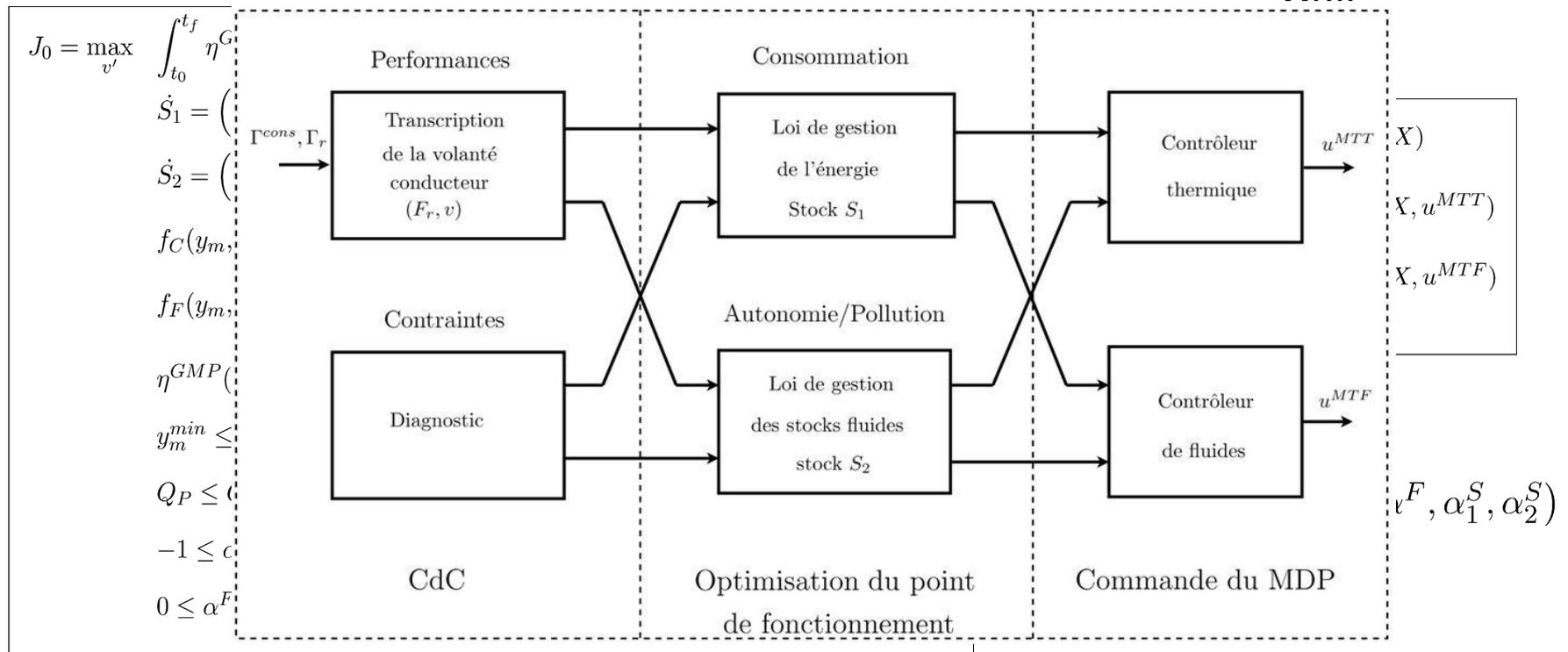
❖ Réduction du problème de commande

➔ 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

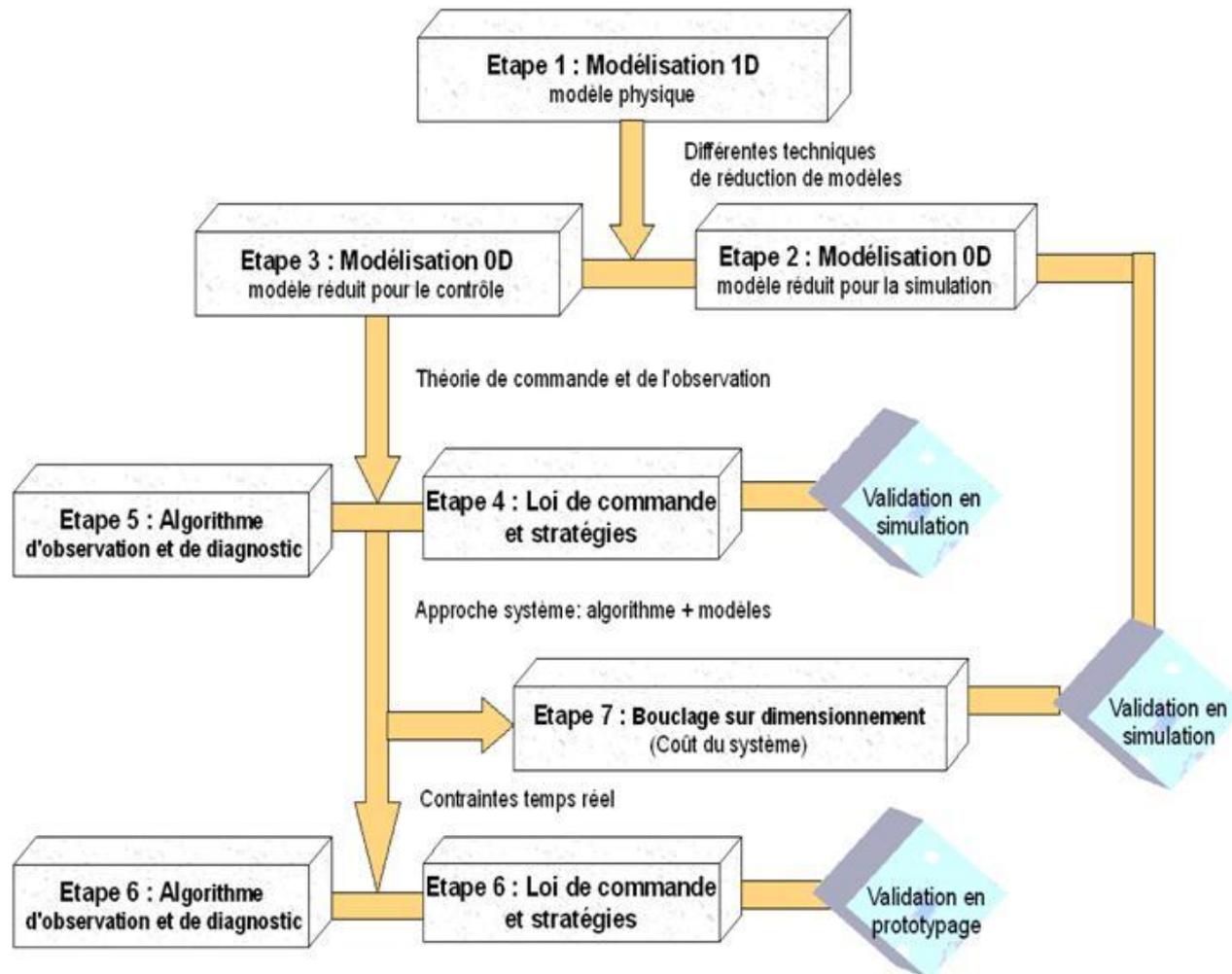
Commande du module de puissance



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



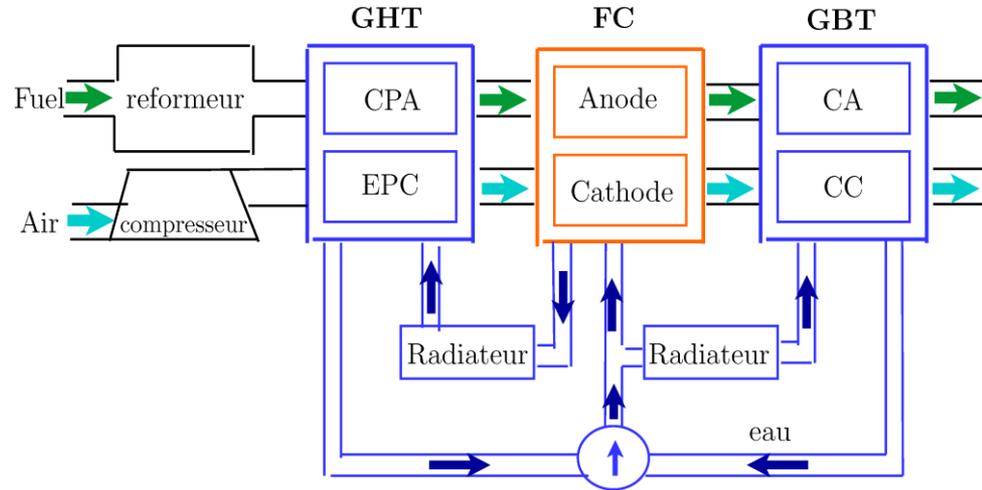
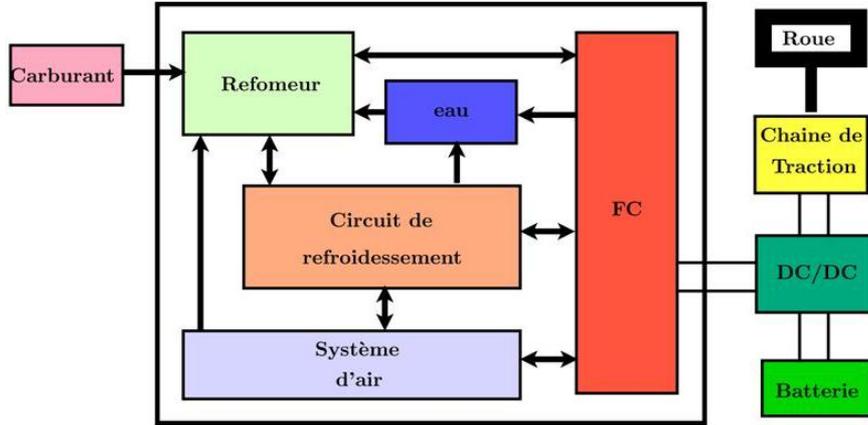
Plan de l'exposé

- 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**

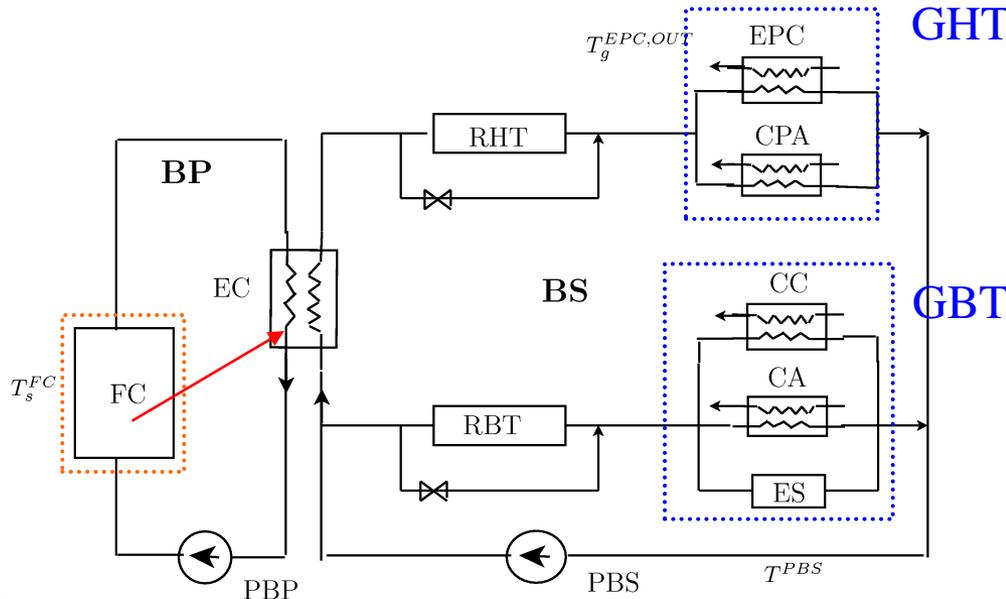
III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

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

Vue fonctionnelle



Vue structurelle



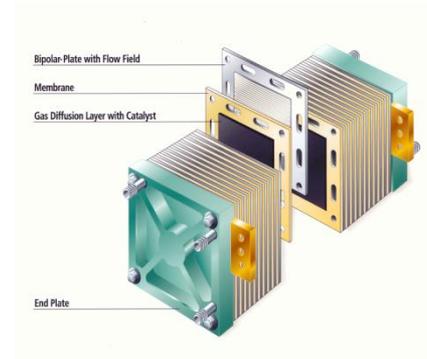
Thermique MDP (TMP)

- 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

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

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

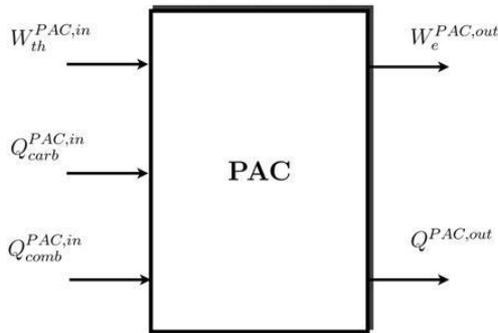
(REF: Ana Stefanopoulou)

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

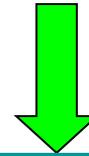


Phase 1 : Modélisation 1D

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

$$\int dz$$

- 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

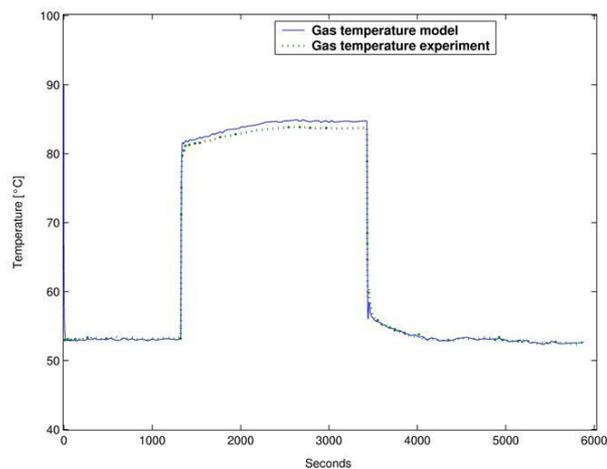
$$T^E = \begin{bmatrix} T_g^E \\ T_c^E \\ T_p^E \end{bmatrix} \quad T^{E,OUT} = \begin{bmatrix} T_g^{E,OUT} \\ T_c^{E,OUT} \end{bmatrix} \quad u = Q_c^E$$

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

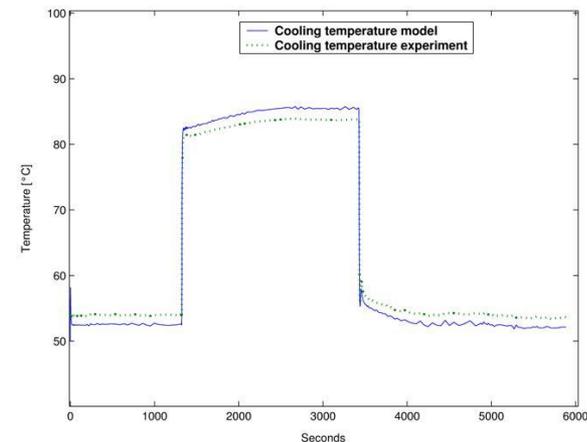
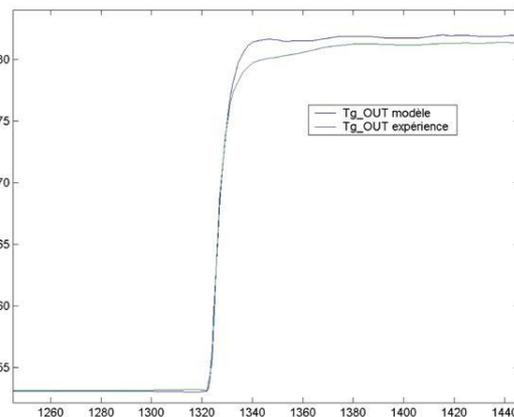
2) Modélisation du GMP avec pile à combustible et reformeur embarqué

❖ Validation du modèle échangeur

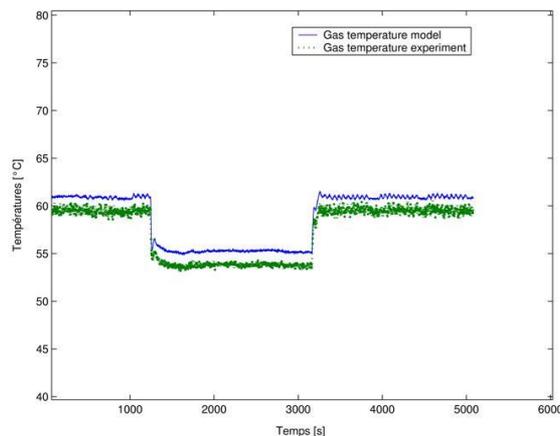
Variation température



Echangeur Alpha Laval essais Banc Liège



•Variation débit



✓ Bilan

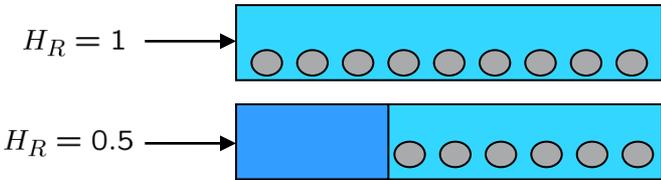
- Erreur température gaz < 4%
- Erreur température eau < 8%
- 4 paramètres de calibration
- Dynamiques respectées
- Modèle suffisamment représentatif de la physique, suffisamment réduit pour faire du contrôle

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



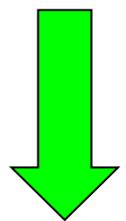
Équation 1D

↓ $\int dz$

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

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

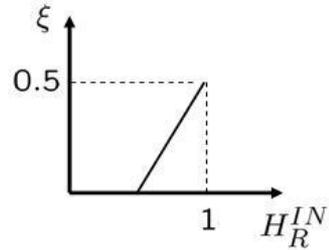
Équation 0D



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

Modèle statique

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



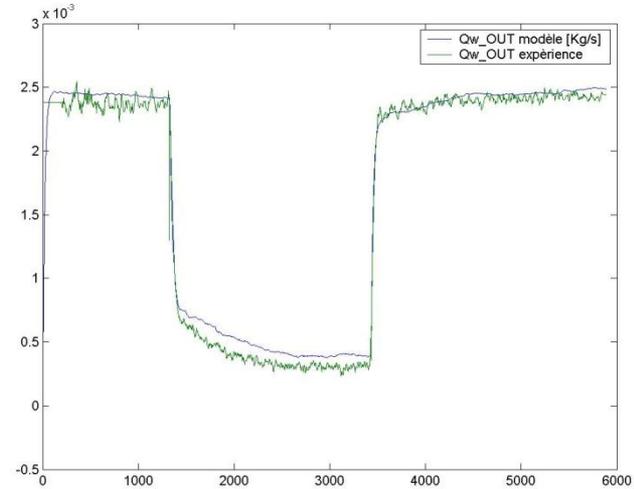
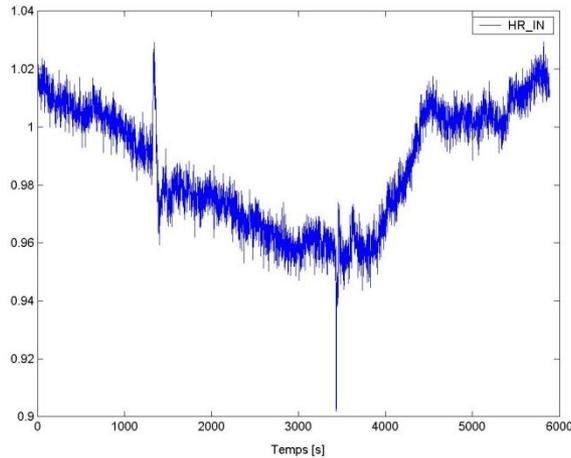
Par séparation des échelles du temps :

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

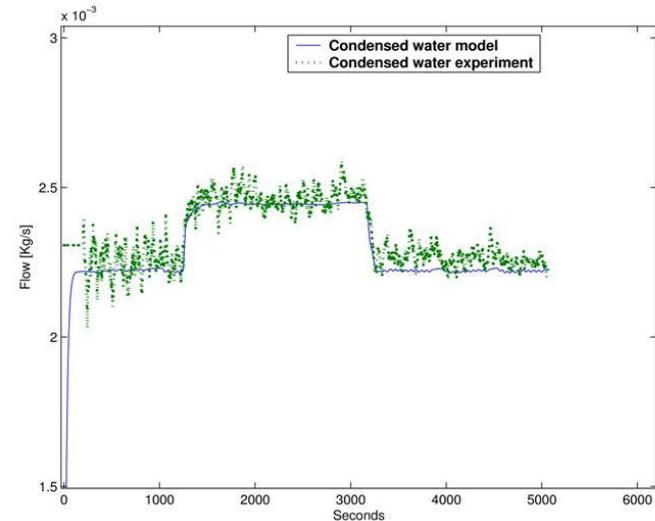
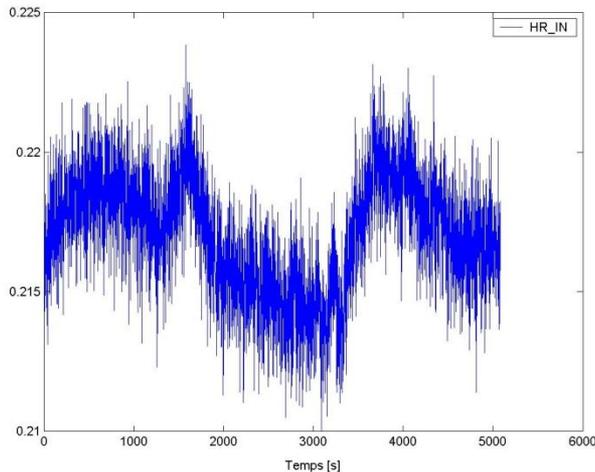
III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

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

- Expérience 1 ❖ Validation du modèle condensation échangeur



- Expérience 2

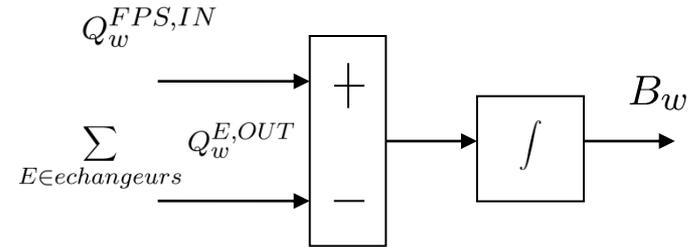


III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

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

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

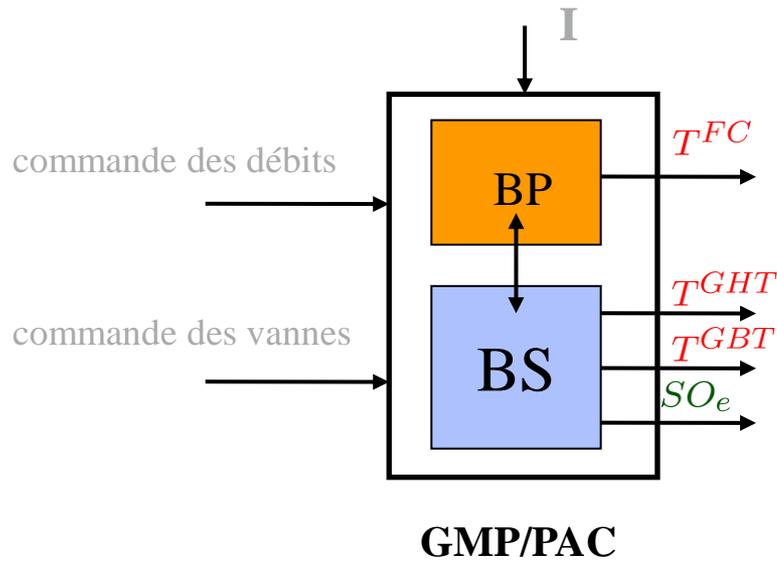
$$\frac{dSO_e}{dt} = f_e(Q_{carb}^{MDP,in}, T_s^{FC}, T_g^C)$$

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 :

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

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

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

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

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

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

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

Equations de sortie :

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

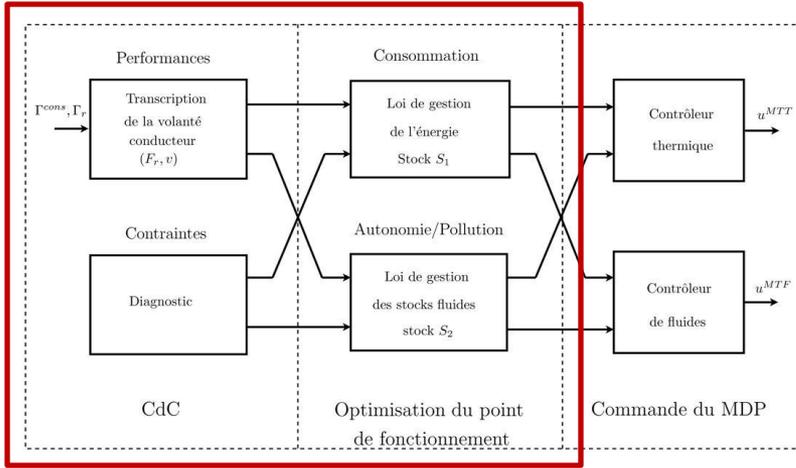
avec :

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

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

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Optimisation du GMP/PAC sous contraintes



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

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

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

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

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

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

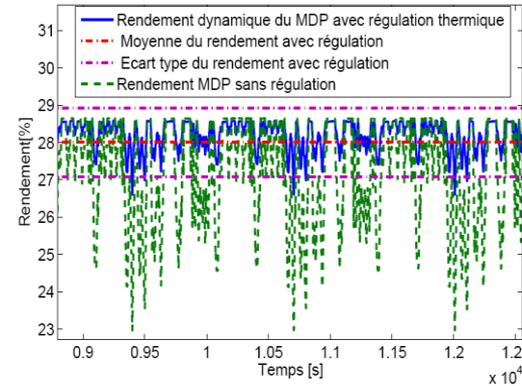
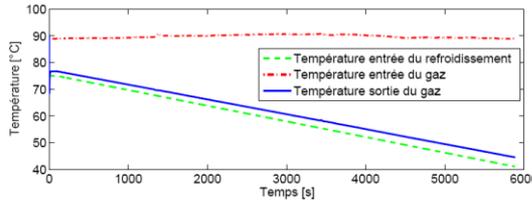
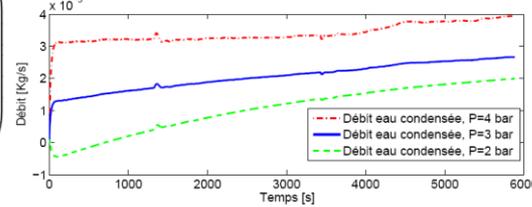
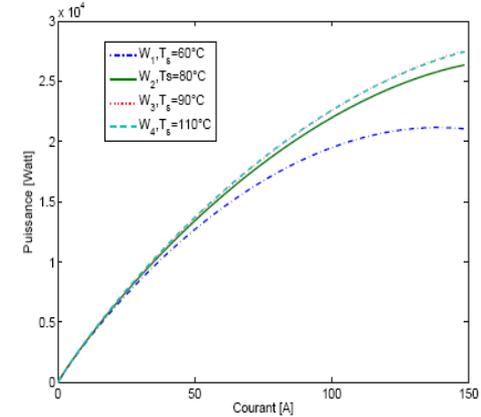
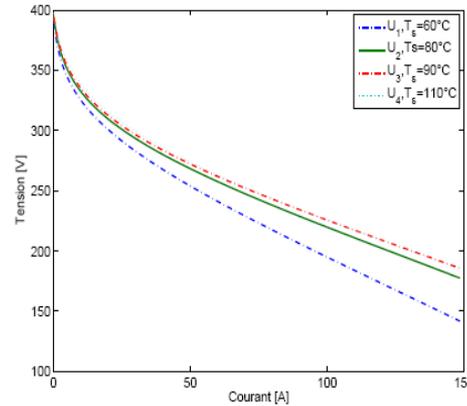
$$333 \leq T_s^{FC} \leq 373$$

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

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

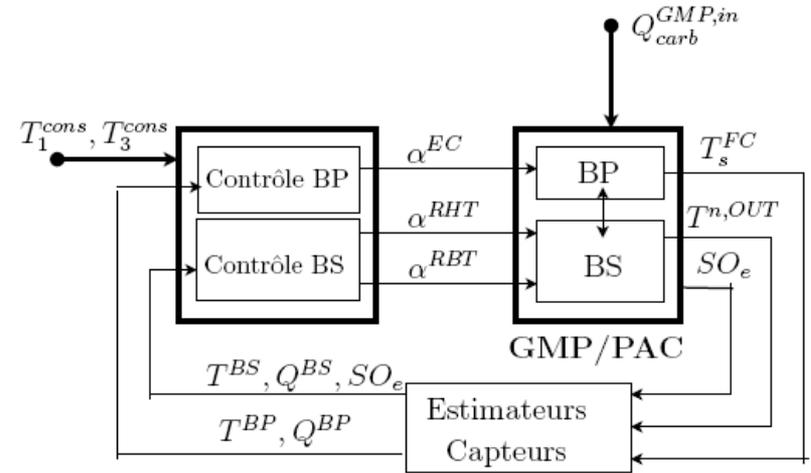
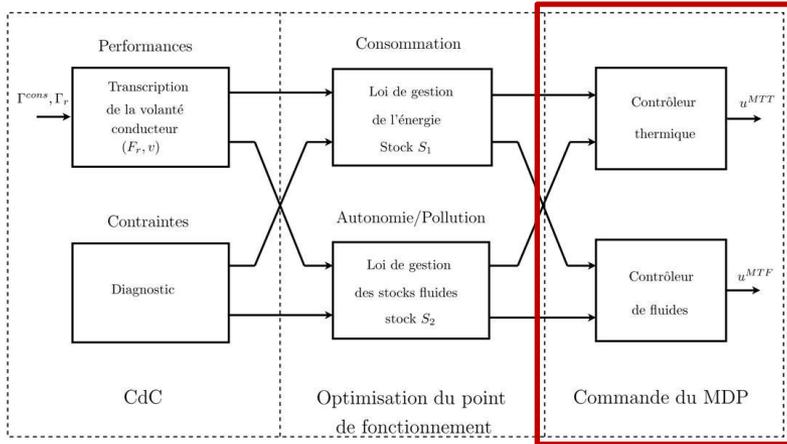


$$T_s^{FC}$$



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

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

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

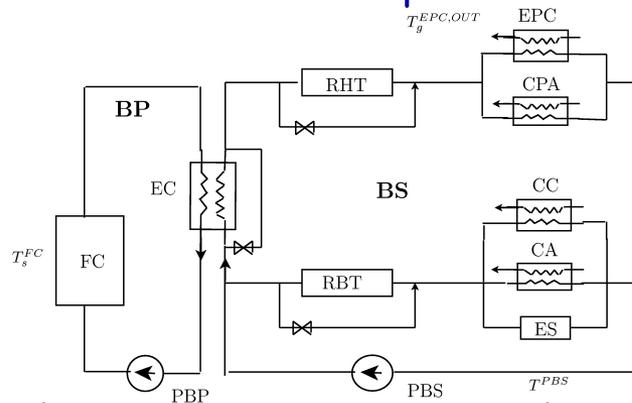
- Assurer le bilan d'eau

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

- 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

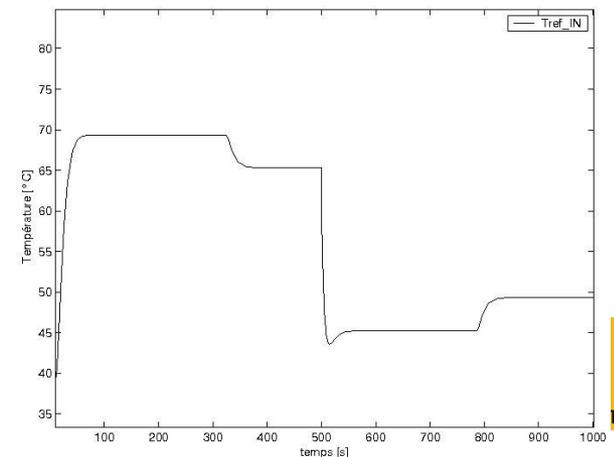
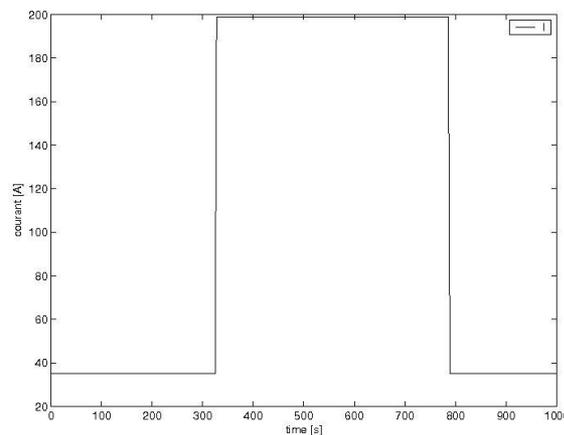
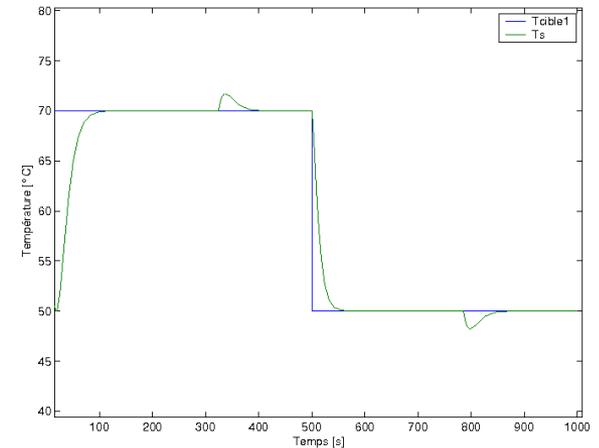
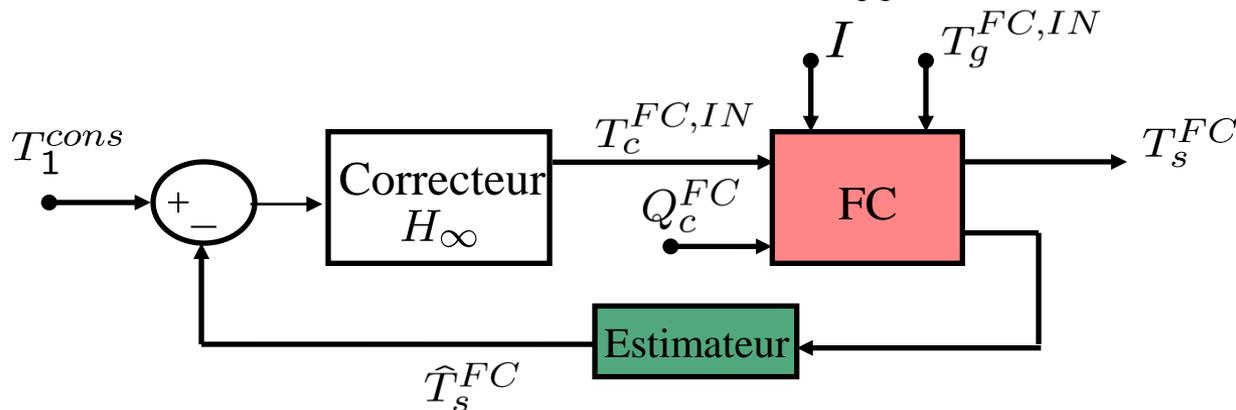
3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ 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.

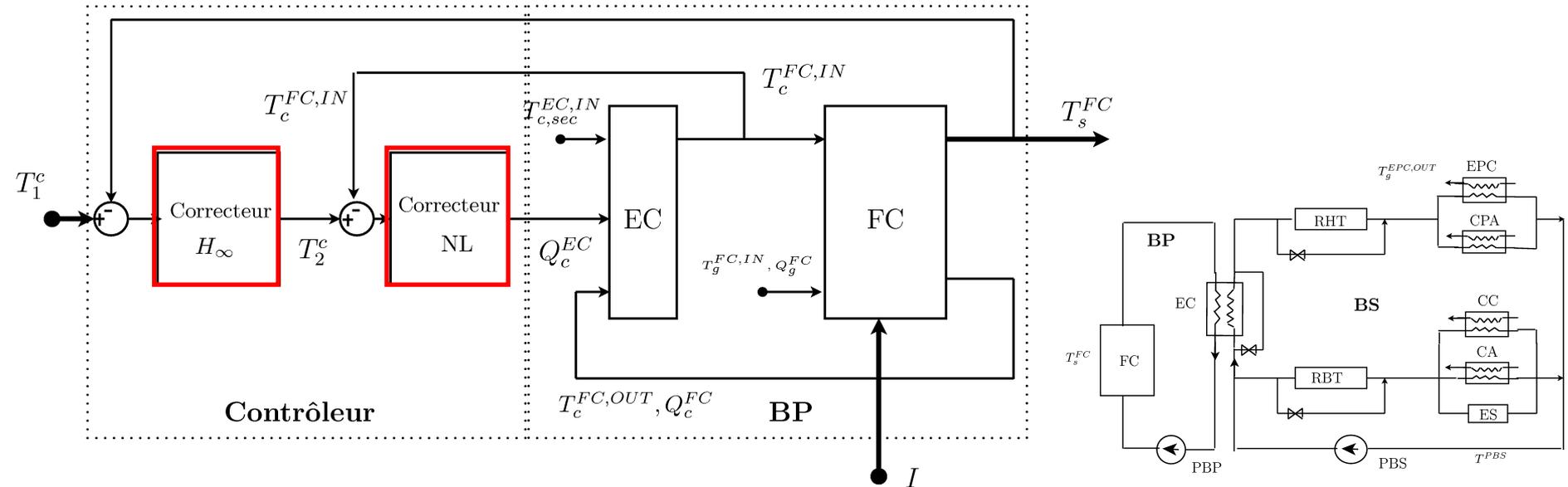
• Correcteur Robuste (Correcteur H_∞)



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

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Objectif 1 : Régulation température pile



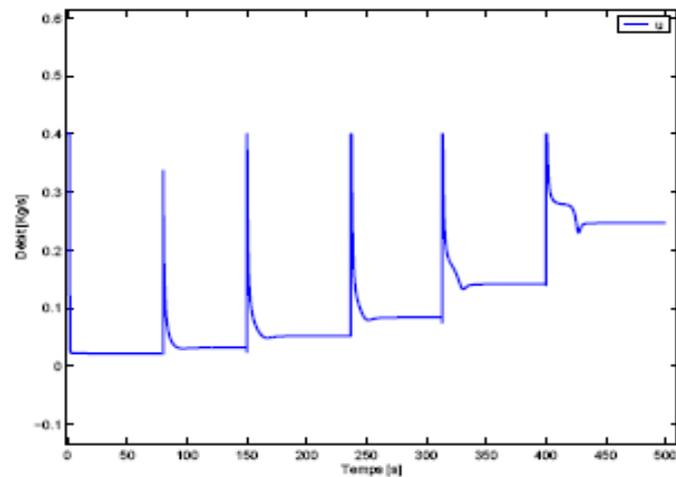
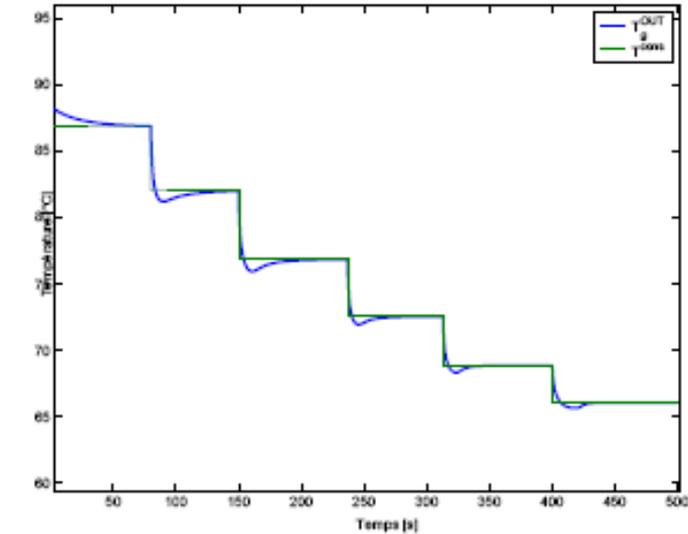
- Correcteurs paramétrés (Model based design)
- Robustesse par rapport aux incertitudes de modèle
- Correcteurs performants

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)

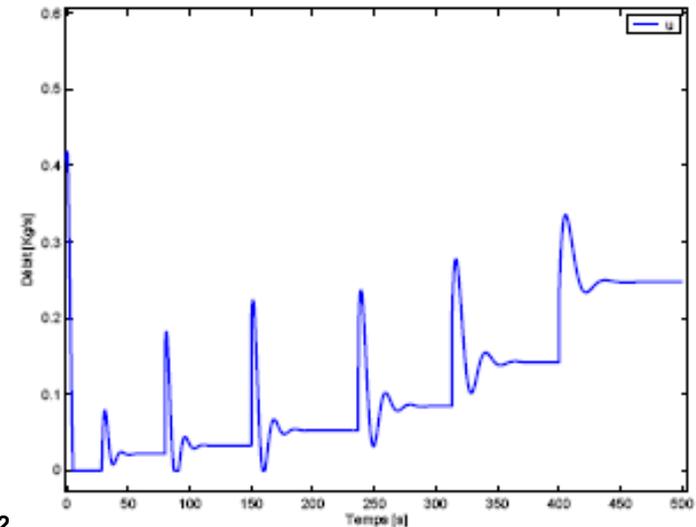
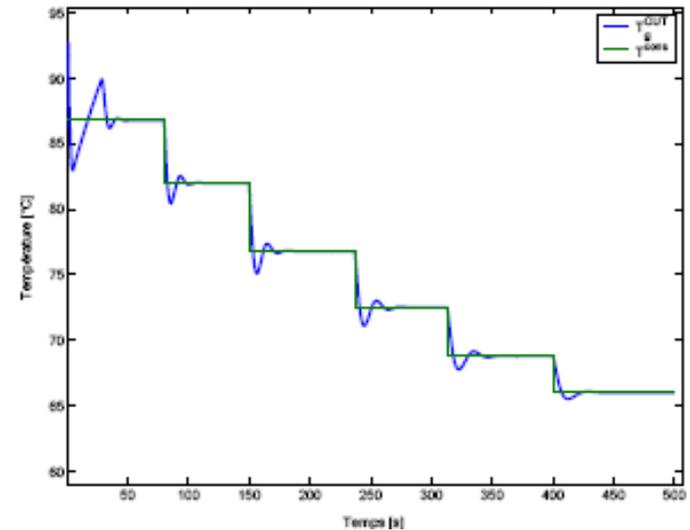
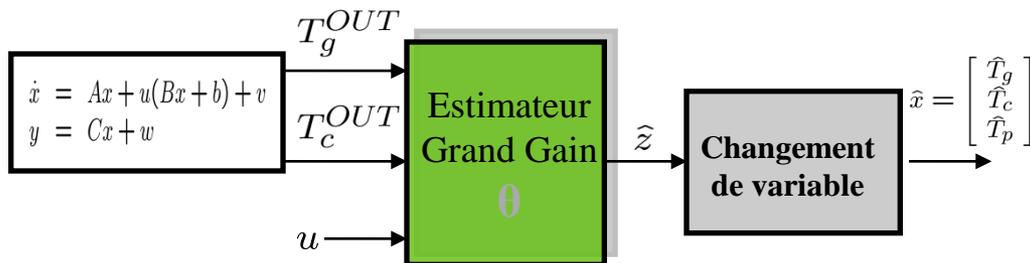


FIG. 7.22 – Débit de l'eau glycolée

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

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Estimation de la température des gaz



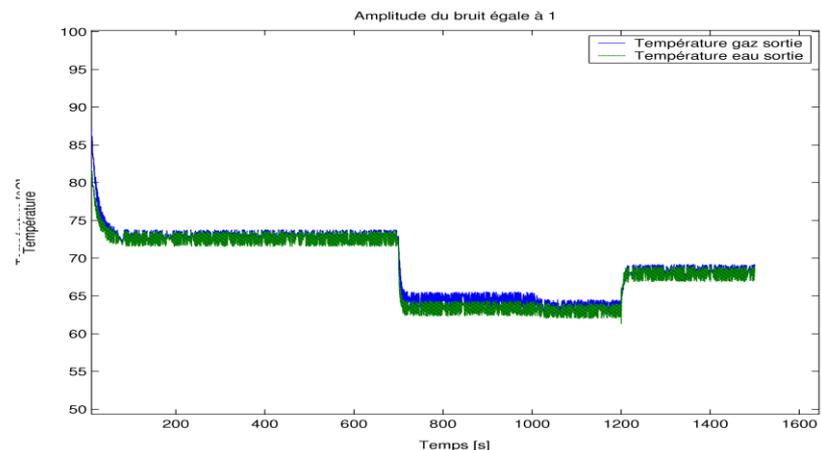
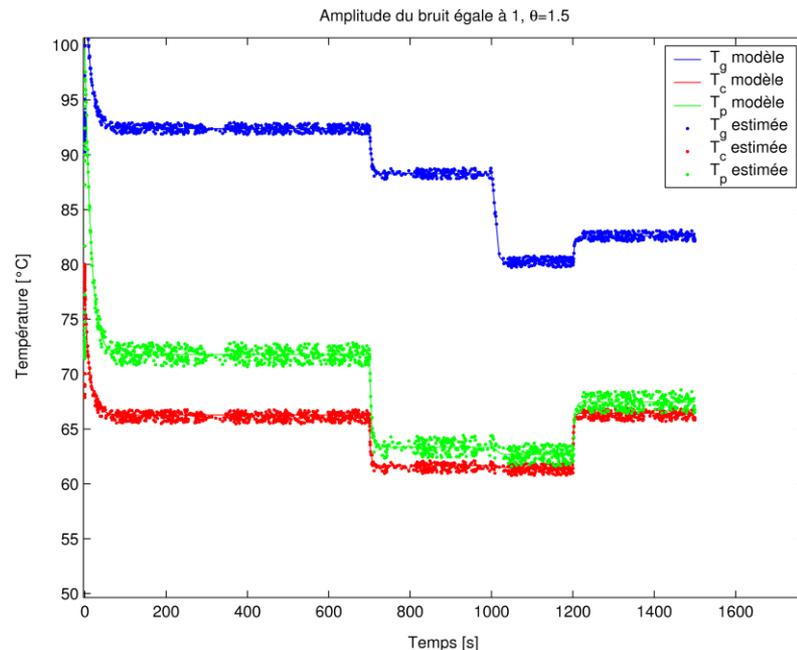
- Soit le changement de variable :

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

- Considérons l'estimateur :

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

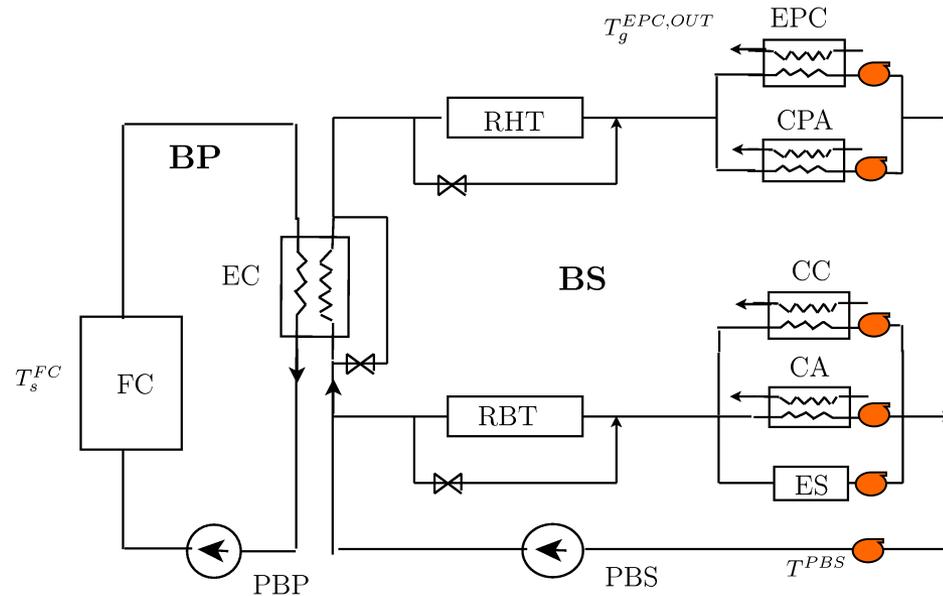
$$S_\infty^{-1} = \begin{pmatrix} 2\theta & \theta^2 & 0 \\ \theta^2 & \theta^3 & 0 \\ 0 & 0 & \theta^5 \end{pmatrix}$$



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)

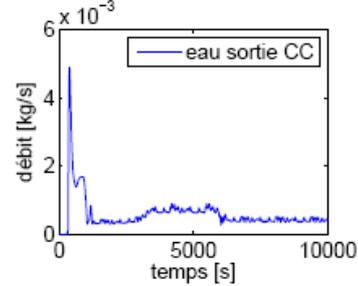
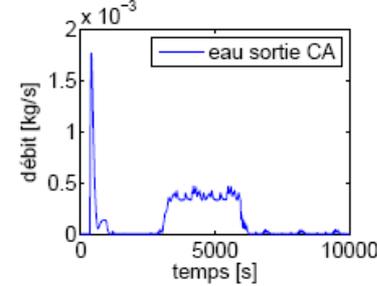
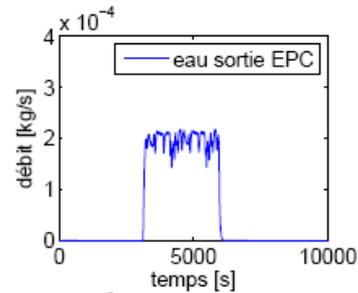
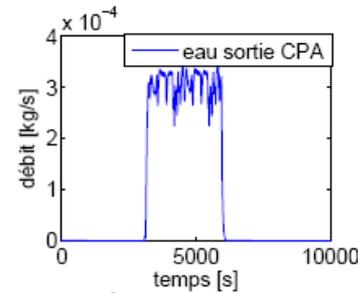
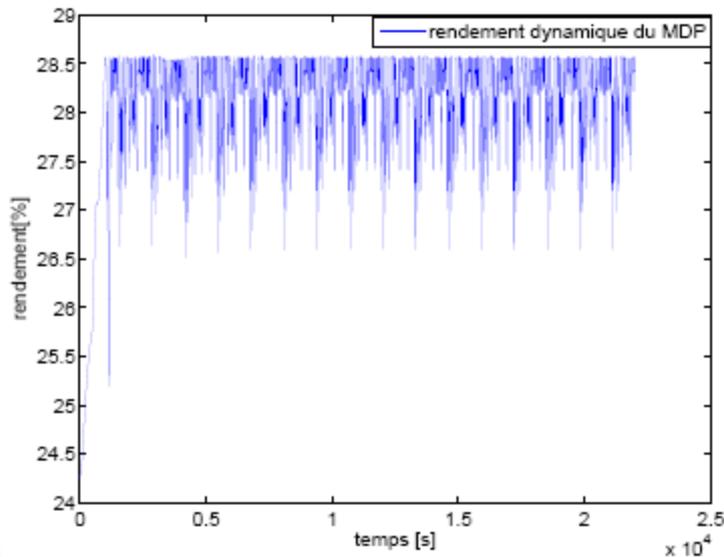
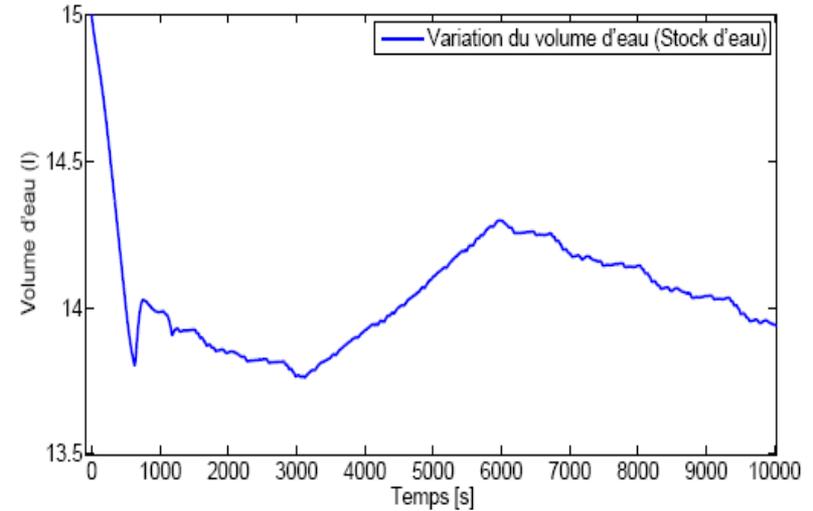
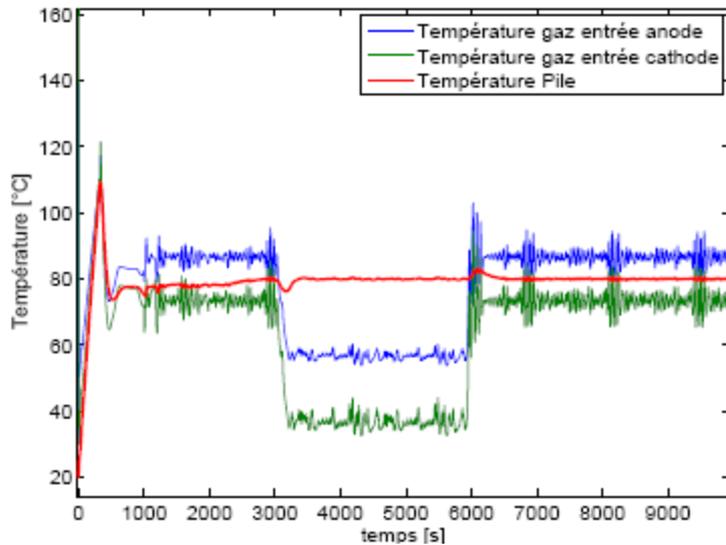


- Architecture initiale de capteurs
- Gain de capteur en utilisant les observateurs (hors problématique SDF)

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

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Simulation globale du système contrôlé

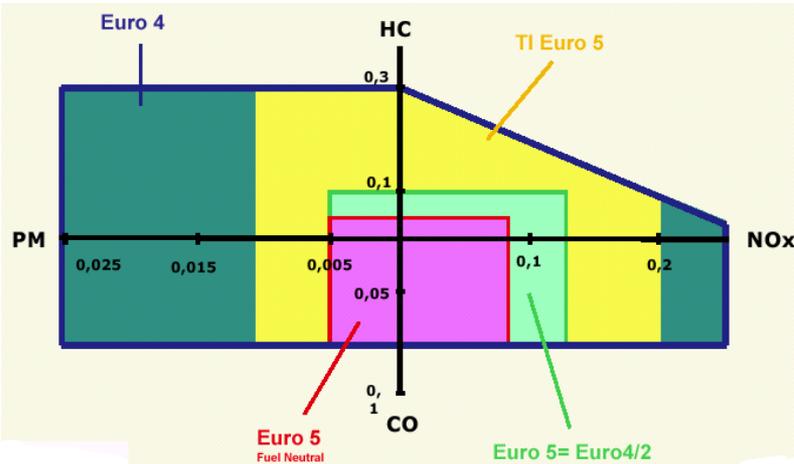


Plan de l'exposé

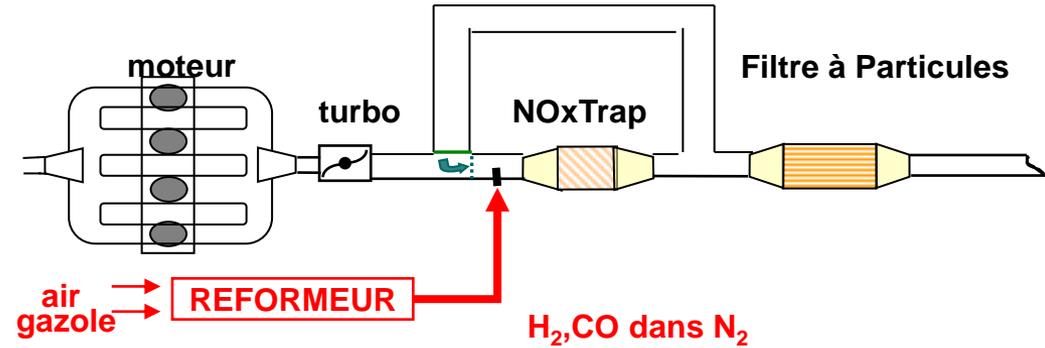
- I. Contexte de l'étude et objectifs de la thèse
- II. Etude du système pile à combustible et du système moteur thermique dépollué
- III. Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible
- IV. Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique**
 - 1) Contexte de l'étude et position des 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

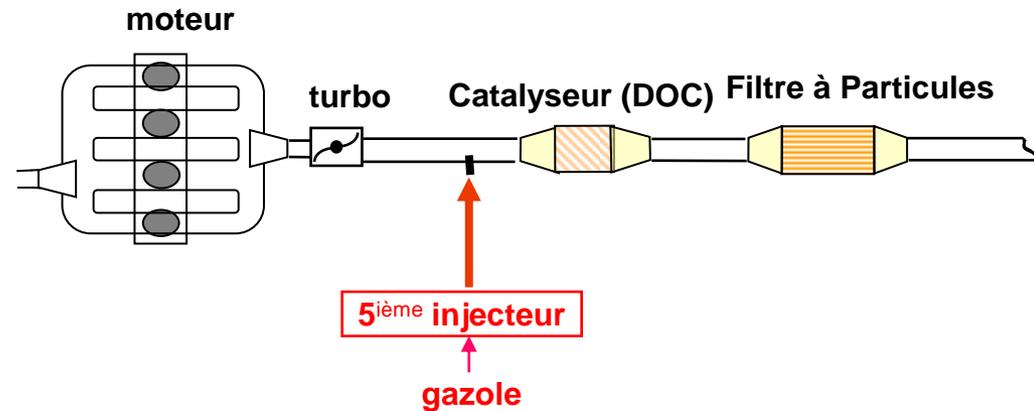
1) Contexte de l'étude et position des problèmes spécifiques aux GMP étudiés (1)



Projet IDEAS



Projet EPM



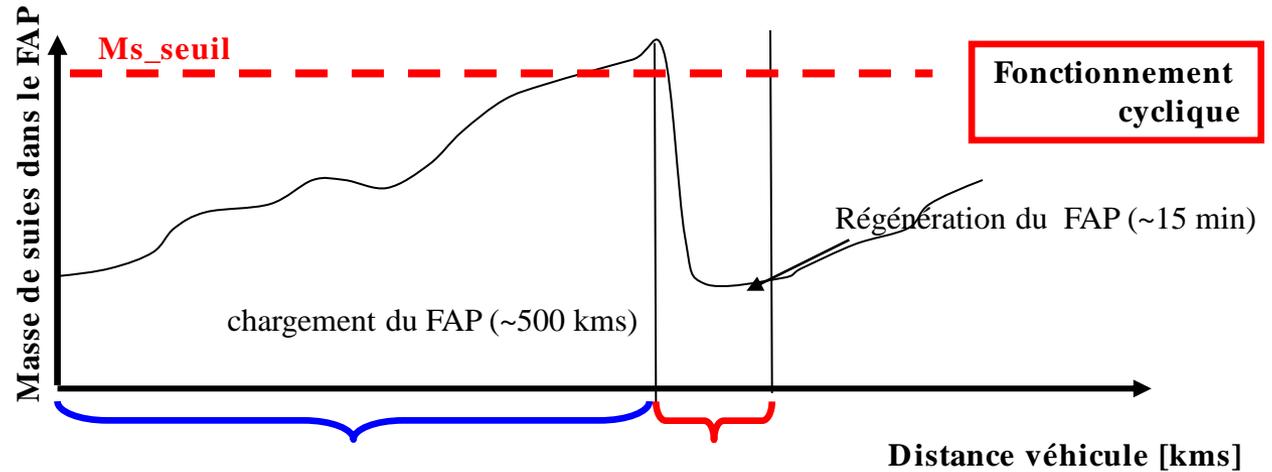
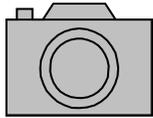
↳ Contrainte sur la quantité de particules en sortie du moteur (Euro5-Euro6) → Filtre à particule

↳ 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

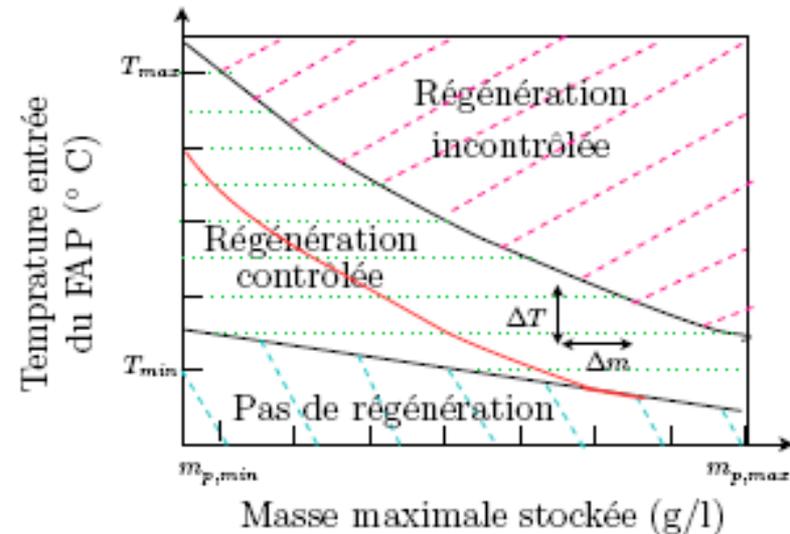


Enjeux de la maîtrise du couple (température régénération/estimation de la masse)

- **CO₂** : Consommation carburant lors des régénération

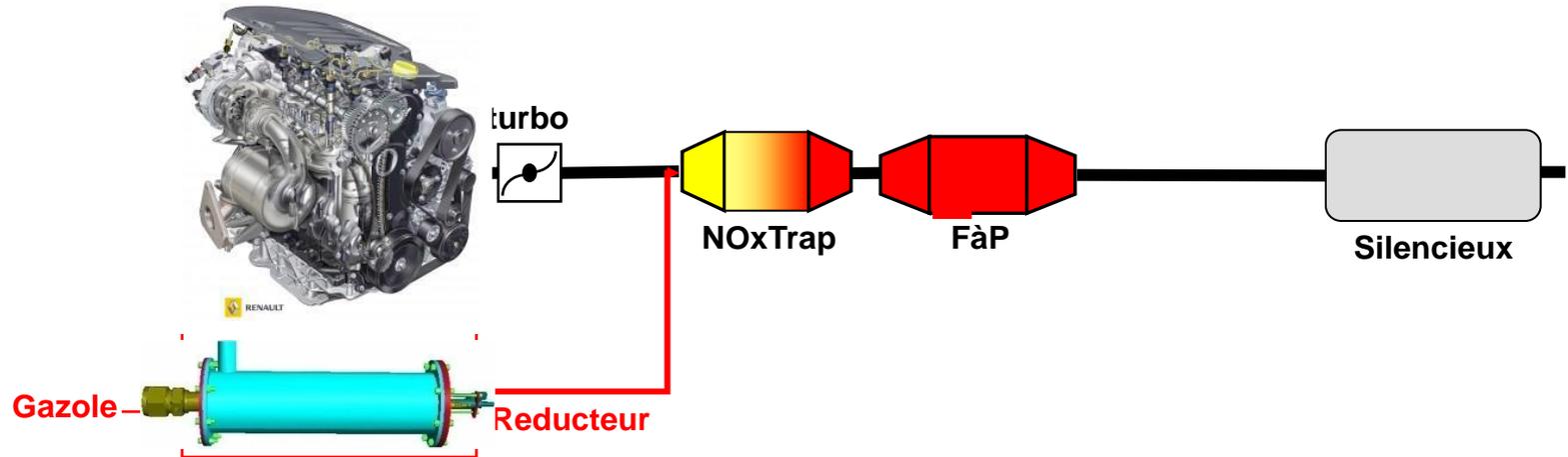
- **Matériaux**: Passage de la technologie Sic vers technologie poreux et/ou gain en volume de FàP

- **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



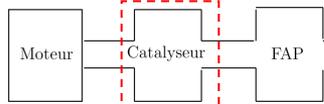
Elaboration de modèles réduits

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.

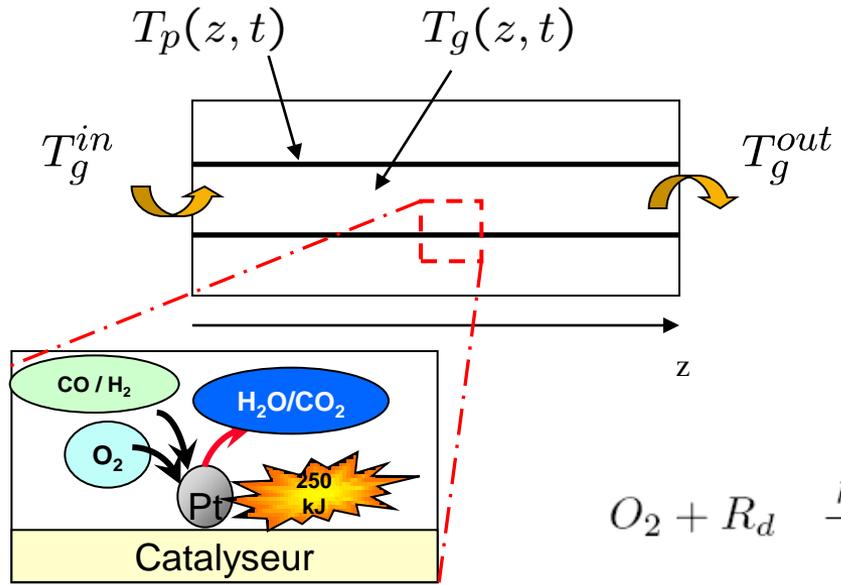


IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

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

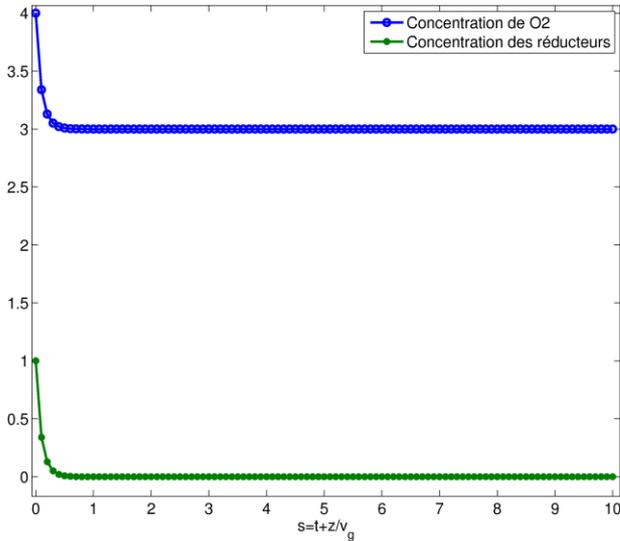
en posant $x = C_{R_d}$ et $w = C_{O_2}$
 $s = t + \frac{z}{v_g}$

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 $i = 1..N_d$

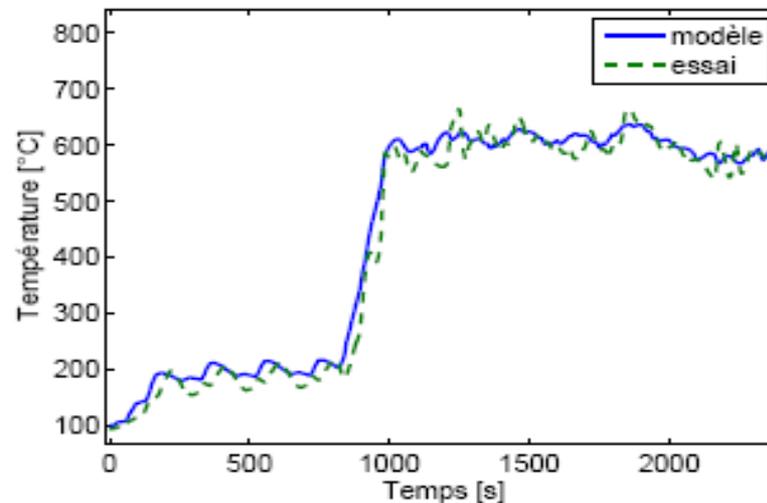
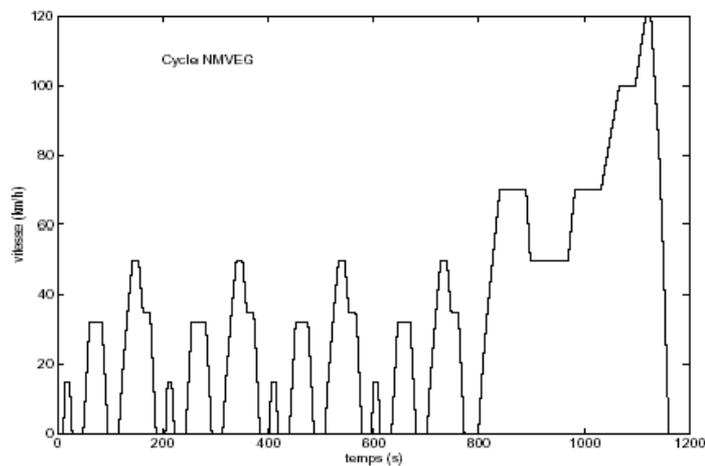
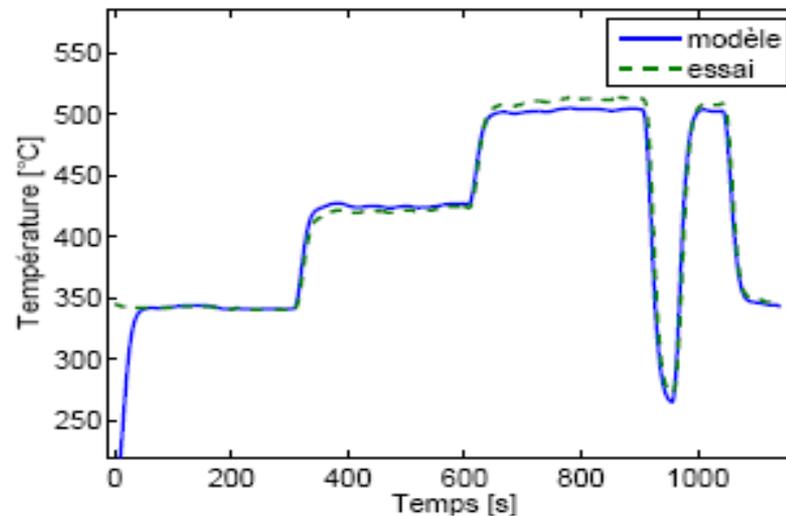
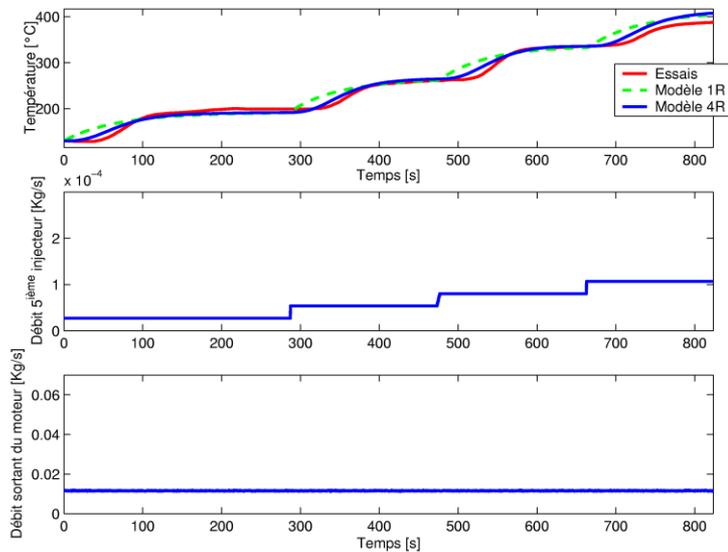
$$\begin{aligned} \Sigma : \dot{X} &= (A_0 + Q_g A_1)X + uB + VT_g^{in} \\ Y &= CX \end{aligned}$$

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

IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

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

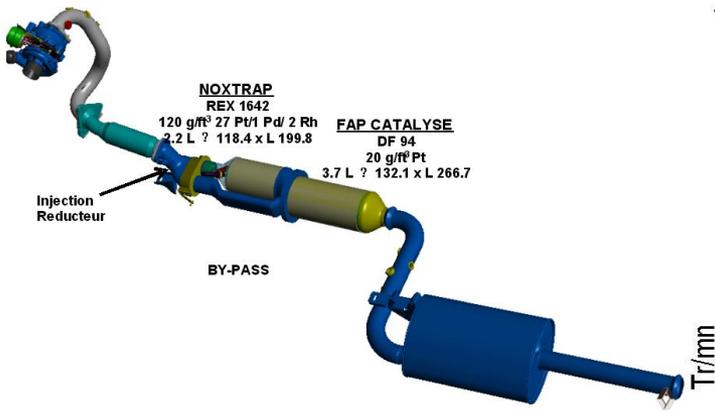
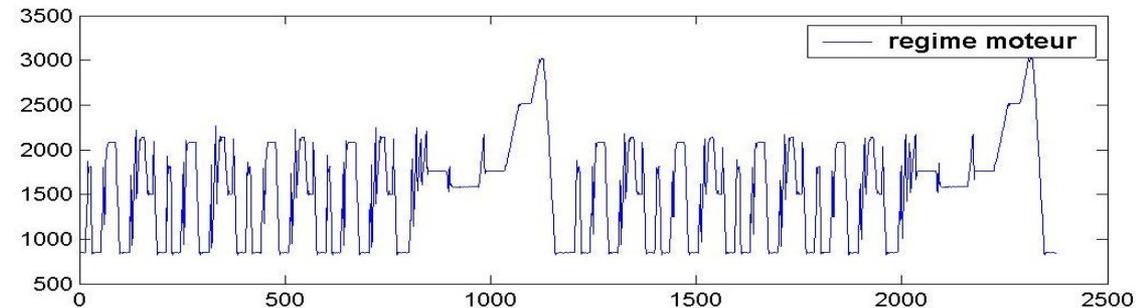
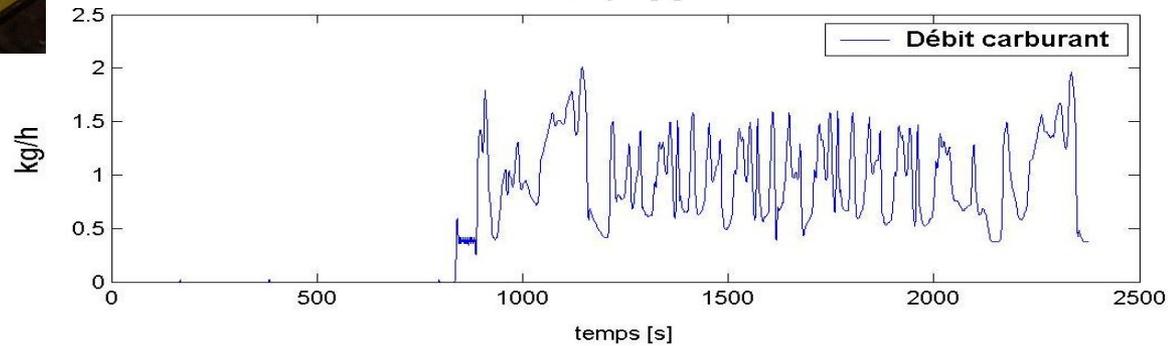
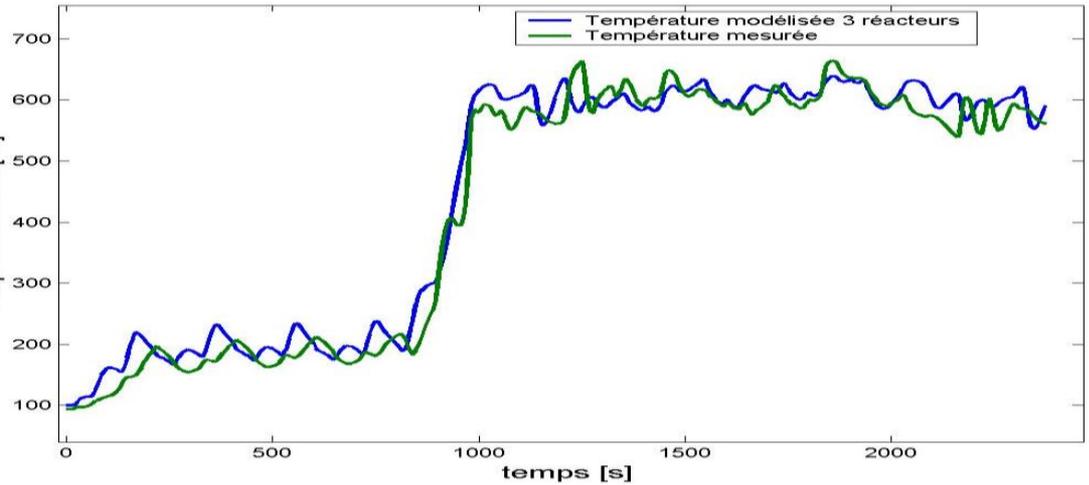
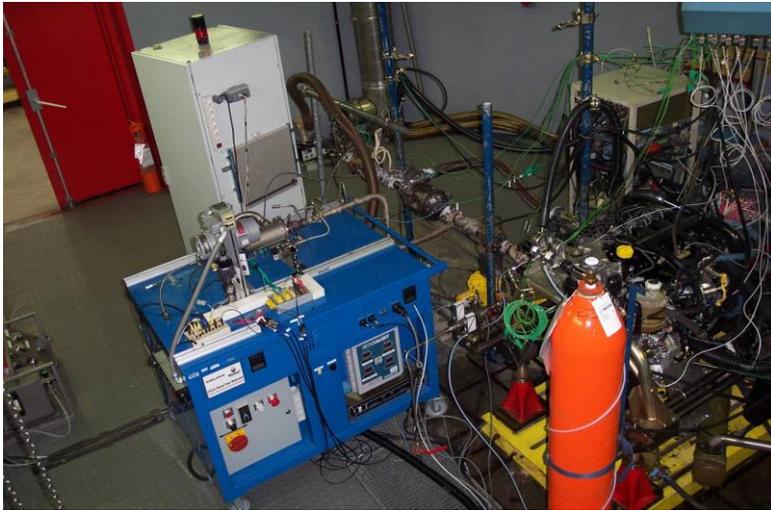
❖ Validation du modèle du catalyseur d'oxydation (1)

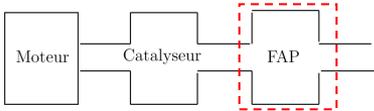


IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

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

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

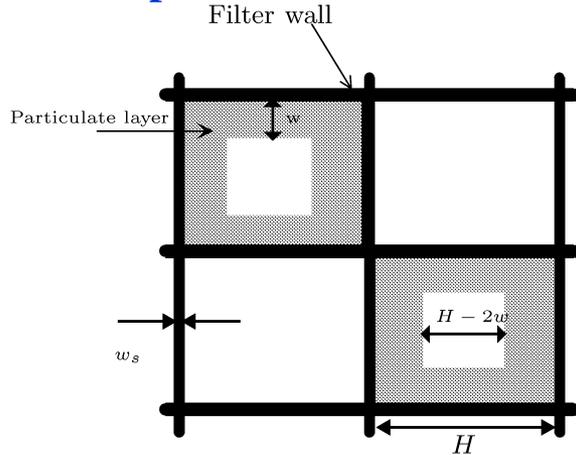




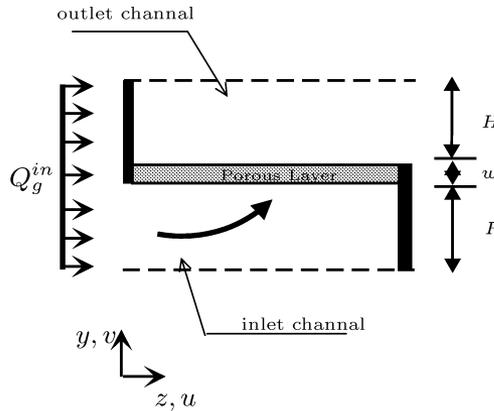
IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

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

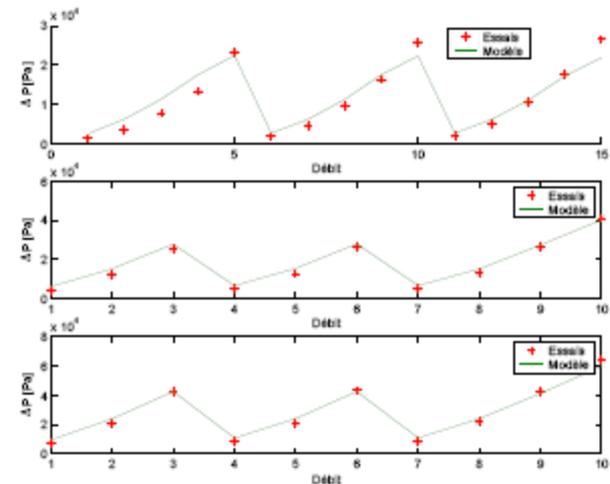


FIG. 10.7 – Sic 1L9

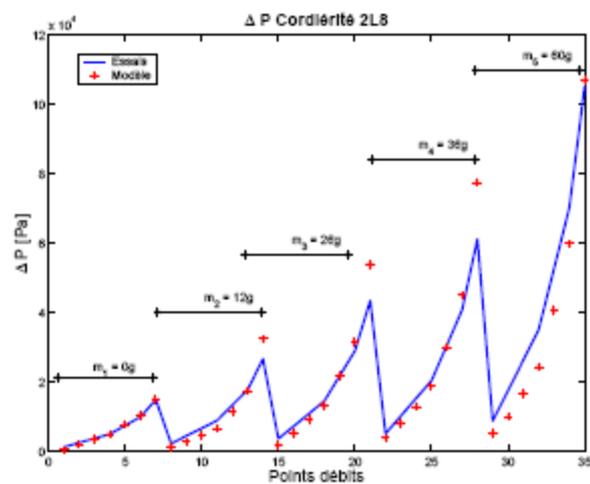
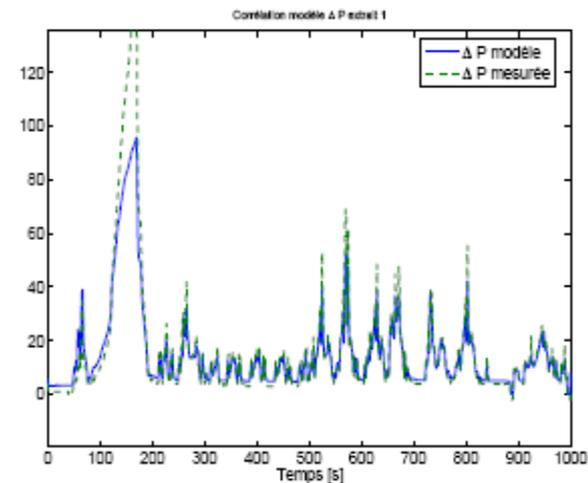
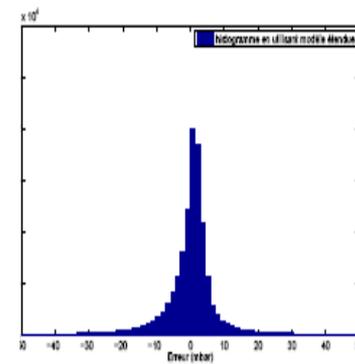
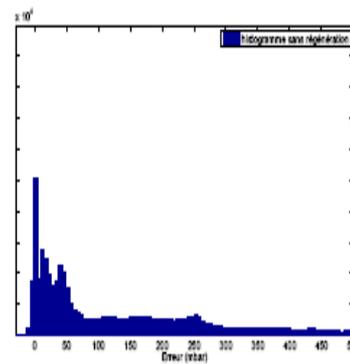
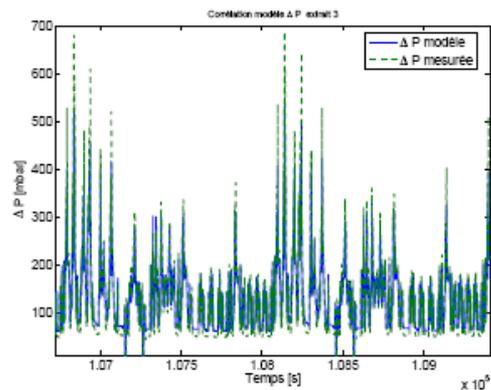
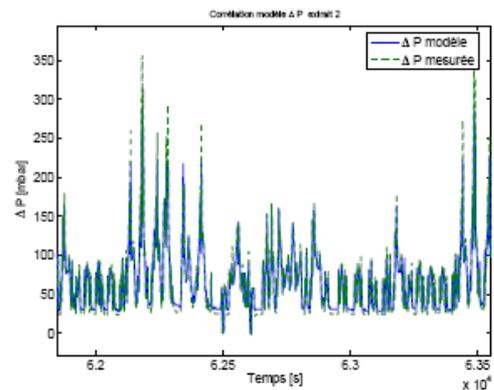


FIG. 10.8 – Cordière 2L8



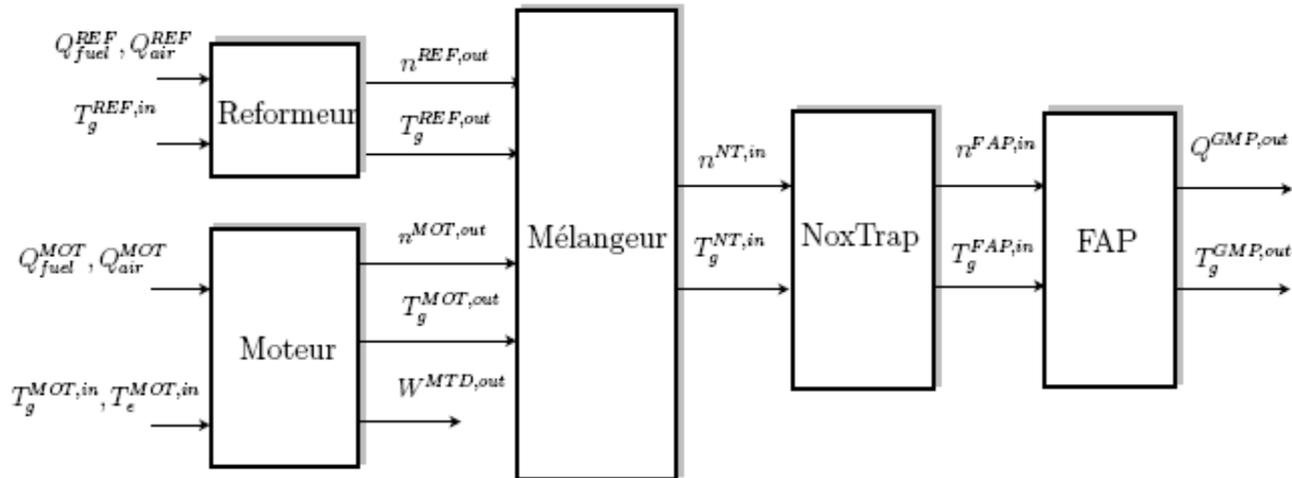
➤ Corrélation des modèles sur des essais dynamiques (erreur moyenne = 1mbar $\sigma^{\text{physique}} = 12 \text{ mbar} < \sigma^{\text{paraboles}} = 14 \text{ mbar}$)



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

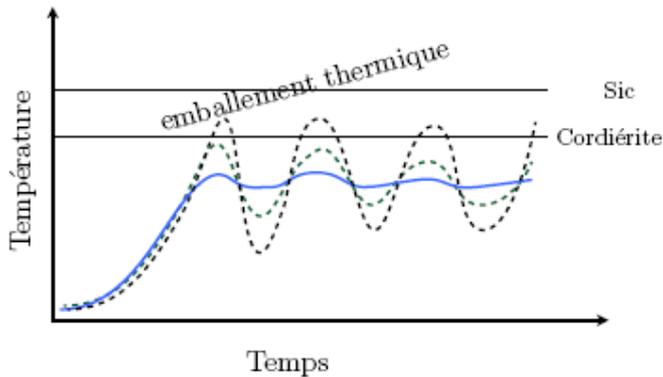
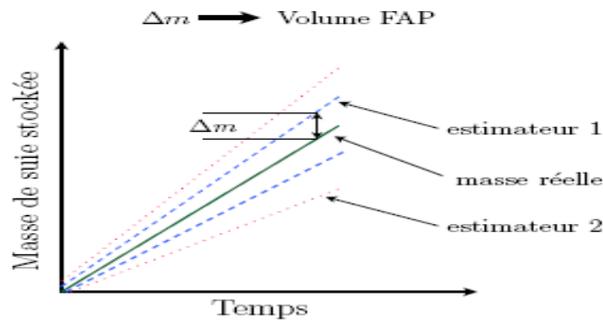
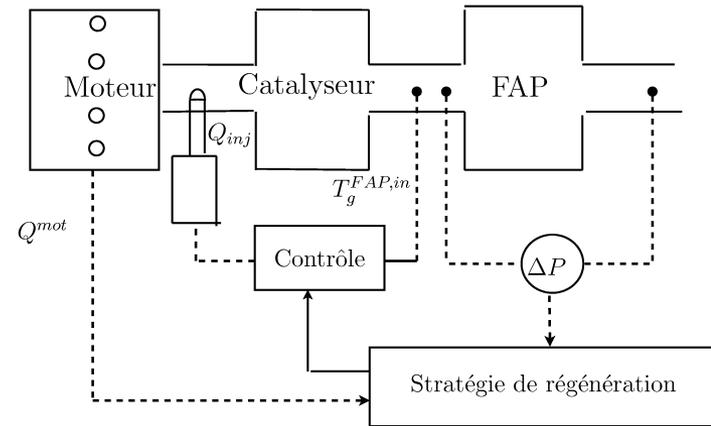


Schéma de contrôle de la régénération du FAP

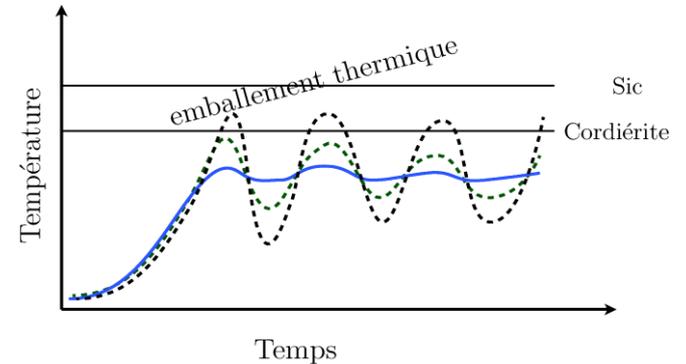
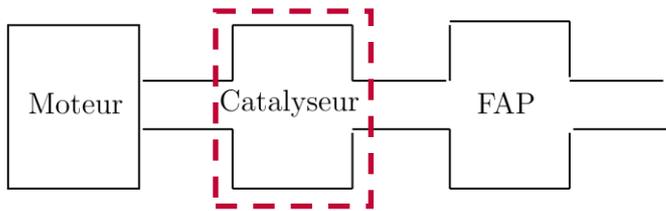


- ▶ Développement d'une loi de commande de la température entrée du FAP → robustesse vis-à-vis du rejet de perturbation et de la dispersion des paramètres
- ▶ Développement d'observateur pour le diagnostic (OBD)
- ▶ Développement d'un estimateur de masse de suie

IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

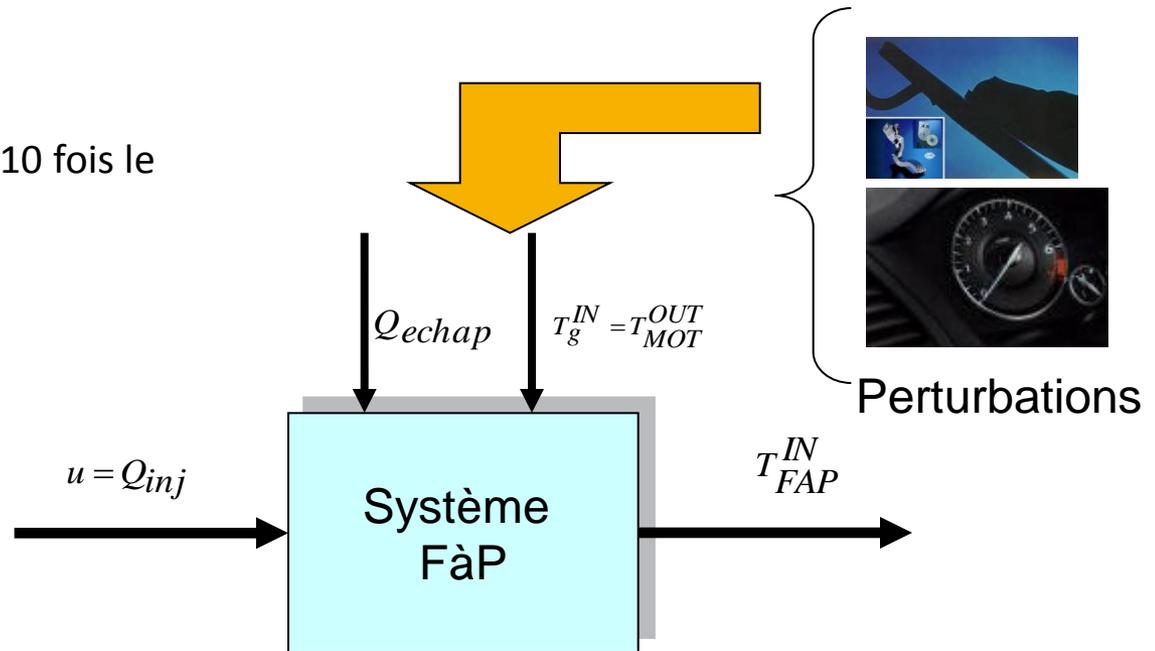
❖ Contrôle thermique de la régénération du FAP



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)

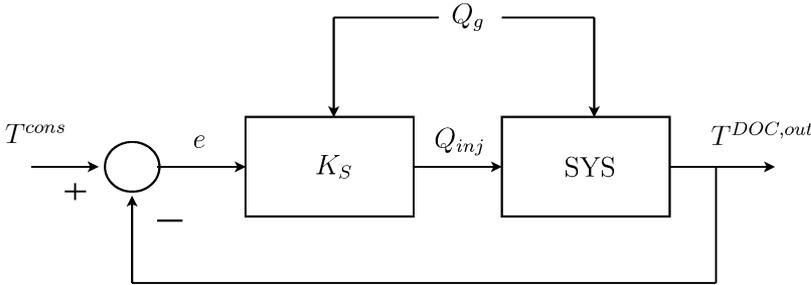
Problème de commande



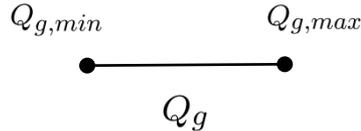
IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Contrôle thermique de la régénération du FAP



Paramètre variant :



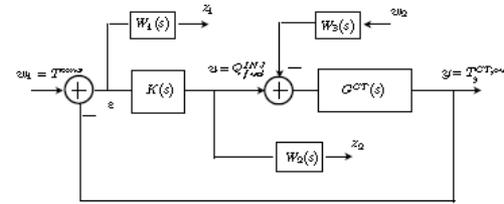
Modèle du système :

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

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:

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

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

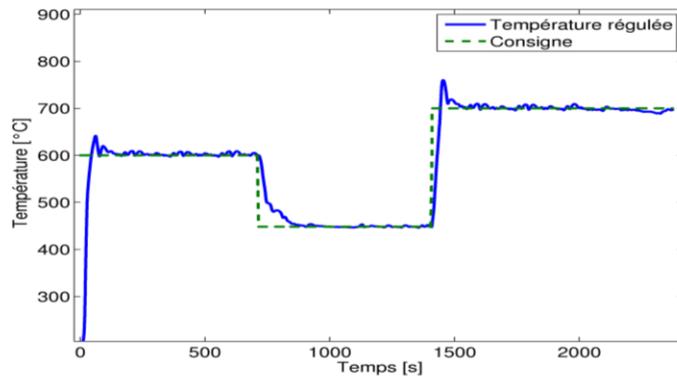
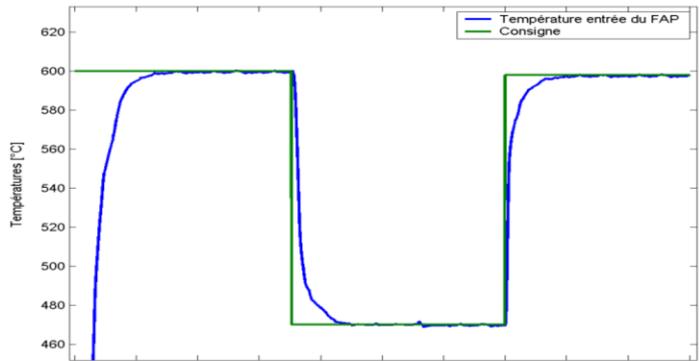
La représentation fractionnaire inférieure T_{wz} admet pour représentation d'état (A,T,B,T,C,T,D,T)

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

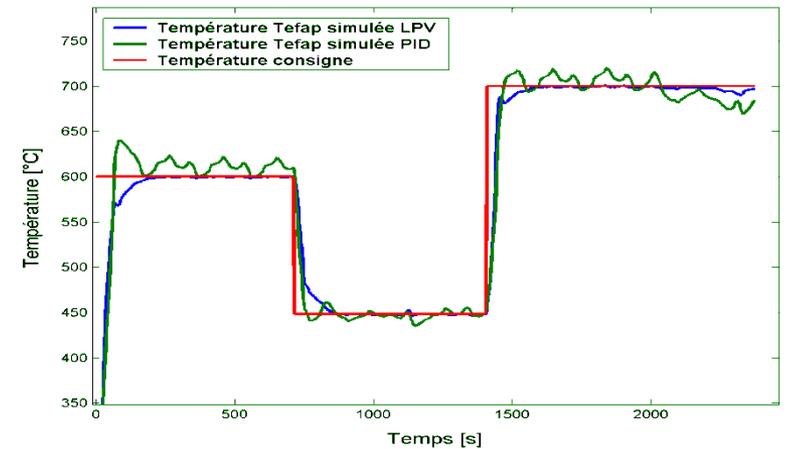
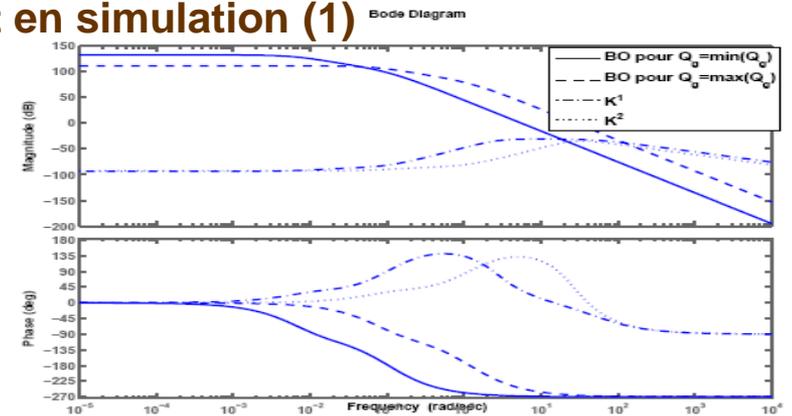
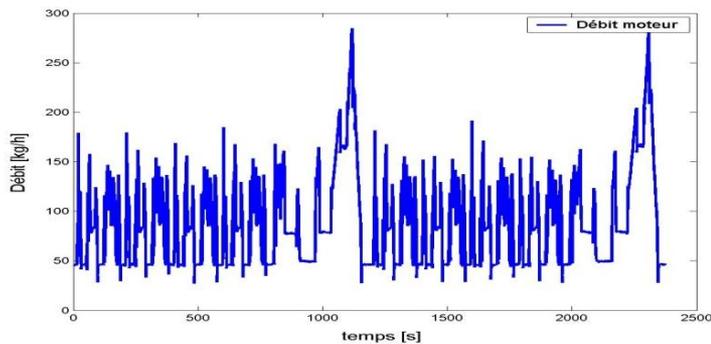
$$\begin{pmatrix} A_T^T Q + Q A_T & Q B_T & C_T^T \\ B_T^T Q & -\gamma I & D_T^T \\ C_T & D_T & -\gamma I \end{pmatrix} < 0, Q > 0$$



Carsten Scherer



Qg

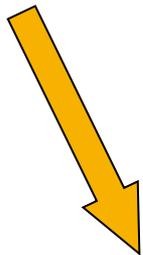
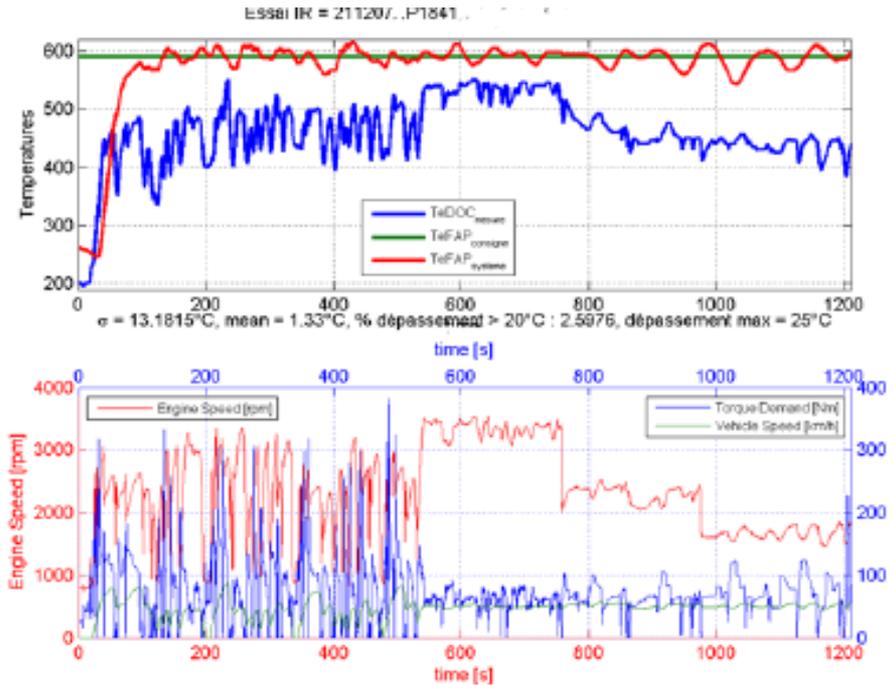
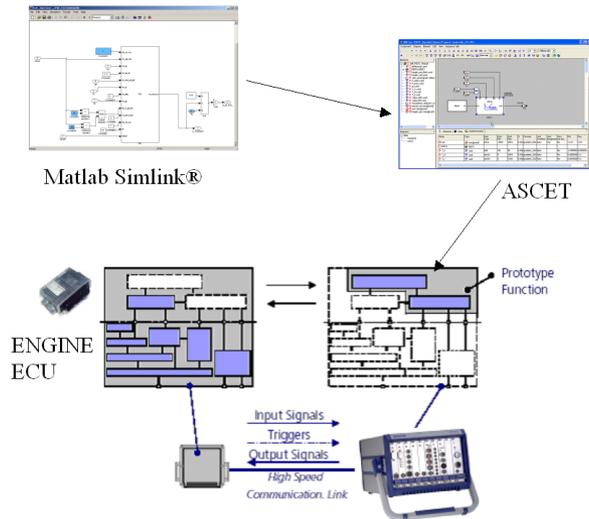


LPV	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des performances - Amélioration de la robustesse vis-à-vis des perturbations - Loi de commande qui est plus dur à développer
PID	<ul style="list-style-type: none"> - Loi de commande plus facile à calibrer

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

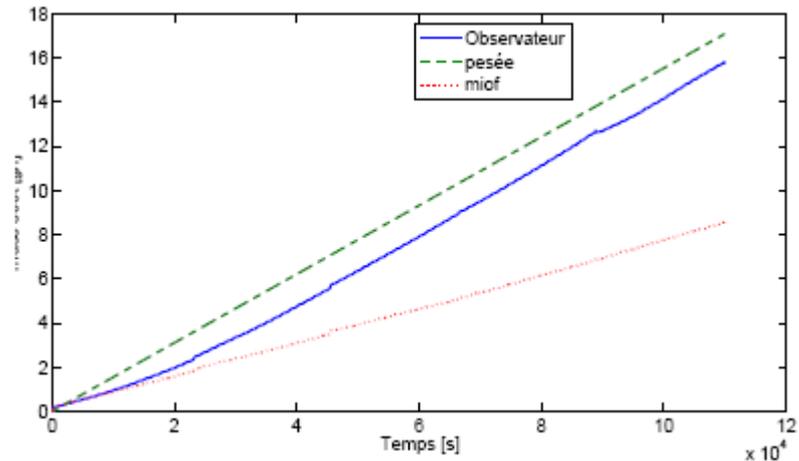
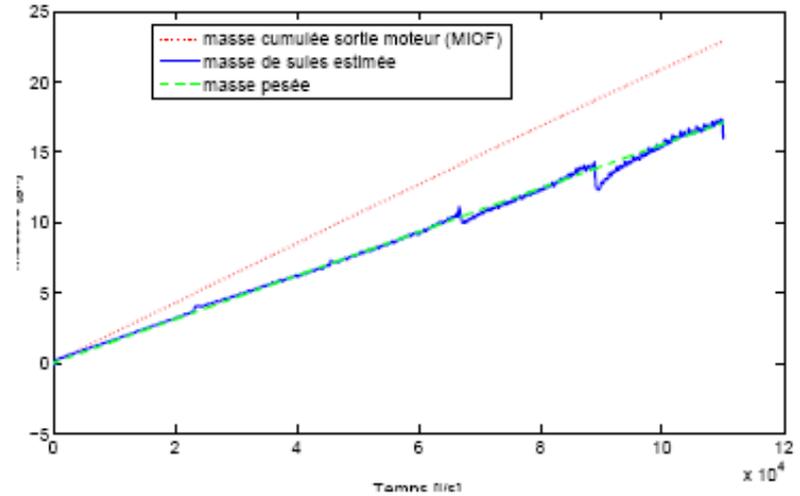
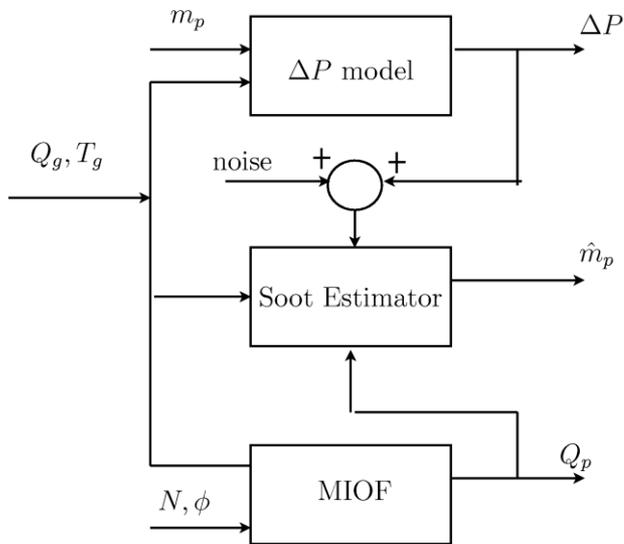
Pour le moment prototypage uniquement du PID à gain variable.

IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

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

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

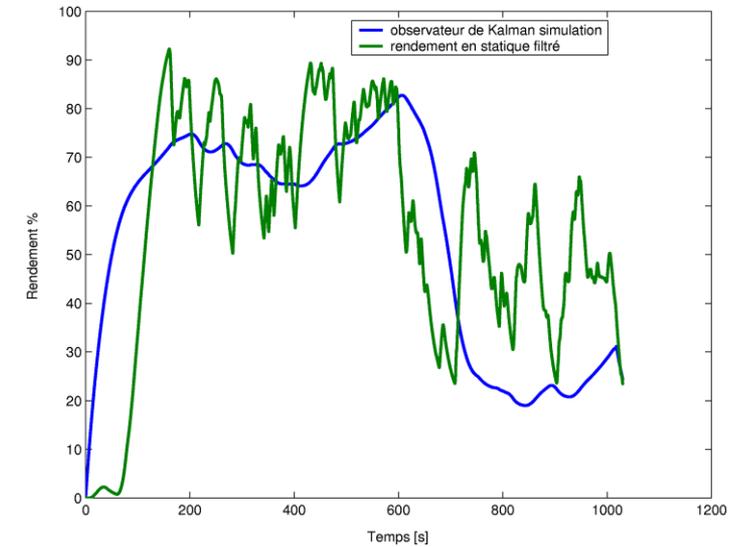
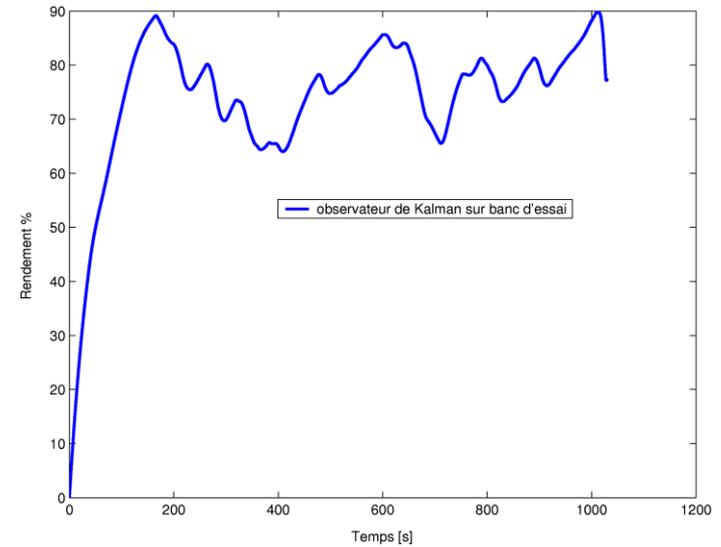
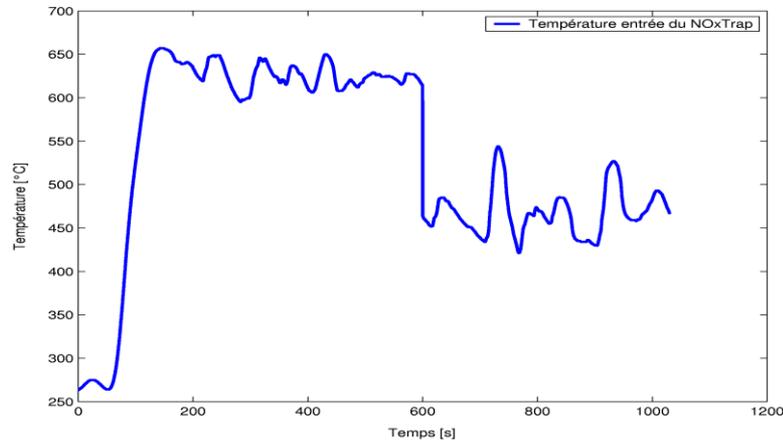
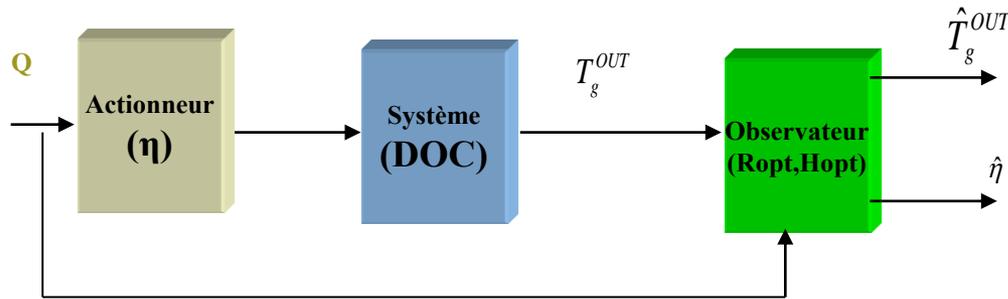


IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

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

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

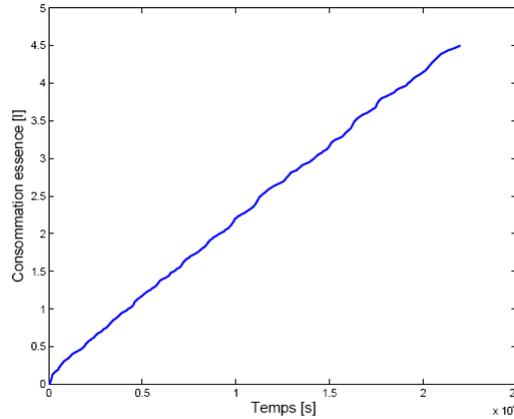


FIG. 12.6 – Consommation du MDP (essence)

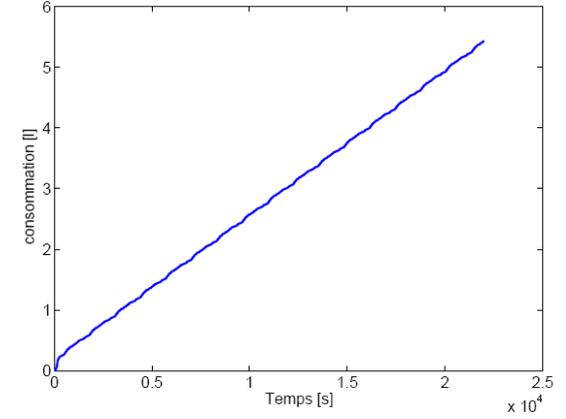
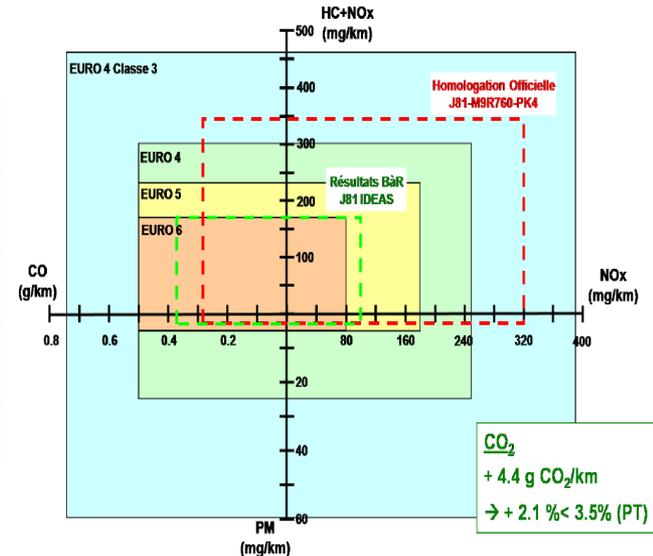
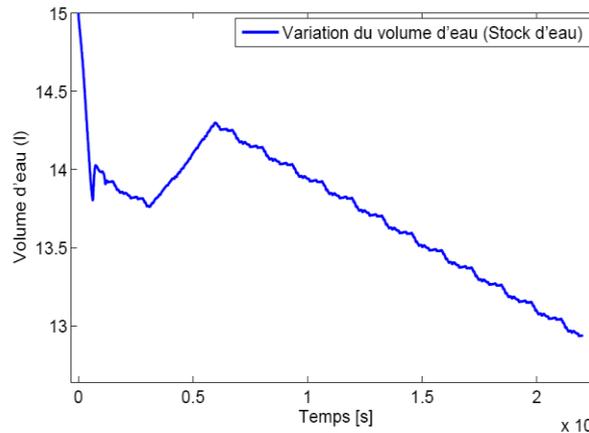
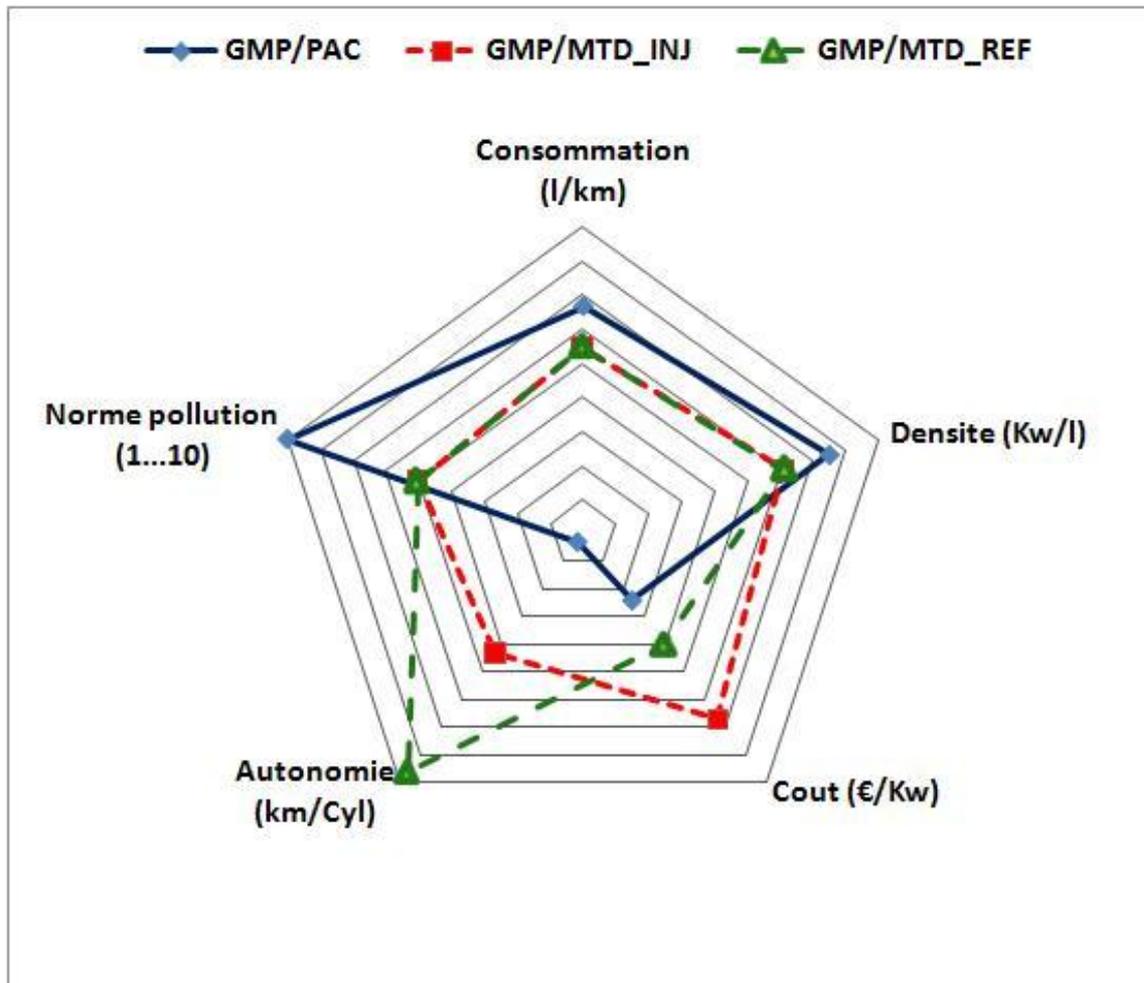


FIG. 12.8 – Consommation du MTD (Diesel)



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

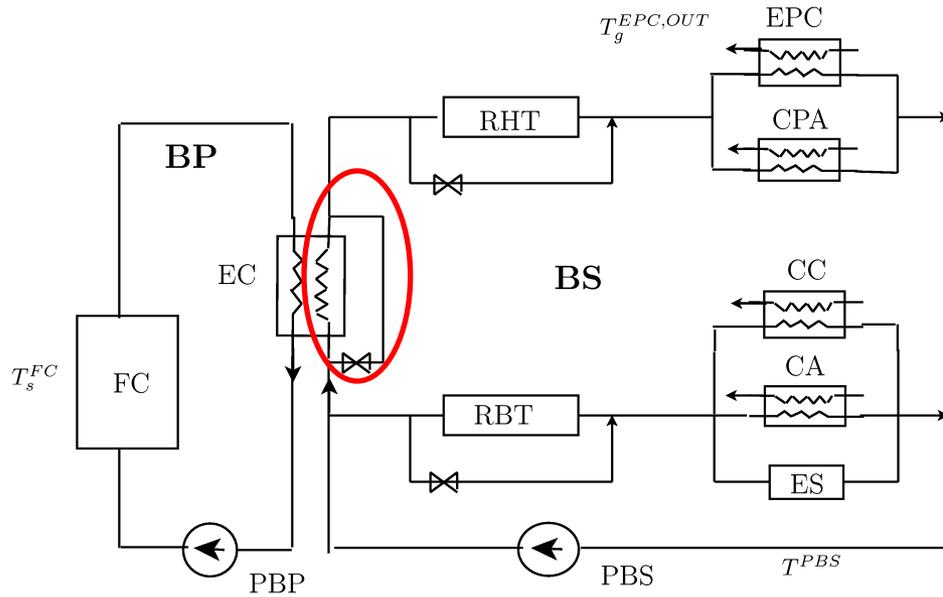
- Prototypage de la loi de commande LPV sur banc d'essai
- Utiliser le simulateur (système de dépollution + contrôle) afin de chiffrer d'une façon dynamique le gain en volume du FAP
- Rédaction d'articles scientifiques



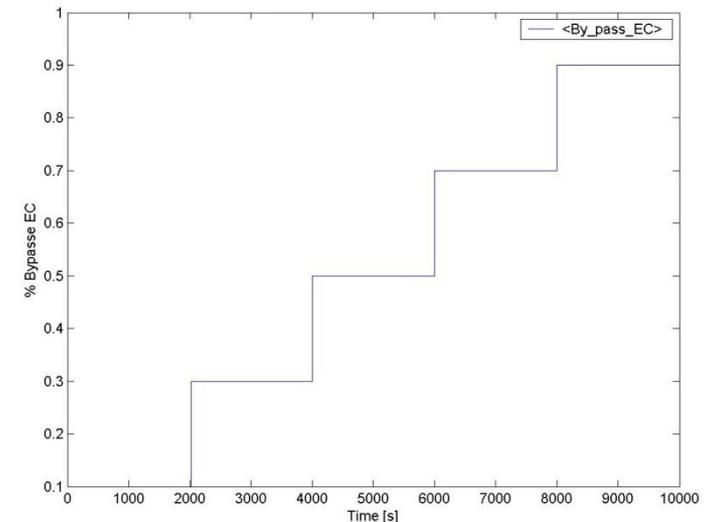
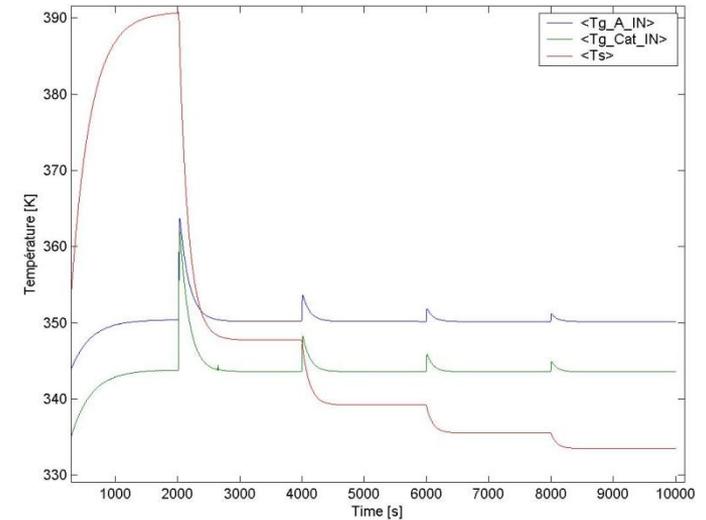
III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

3) Module de commande et de diagnostic (MCD)

❖ Découplage des boucles (Contrôle modulaire)



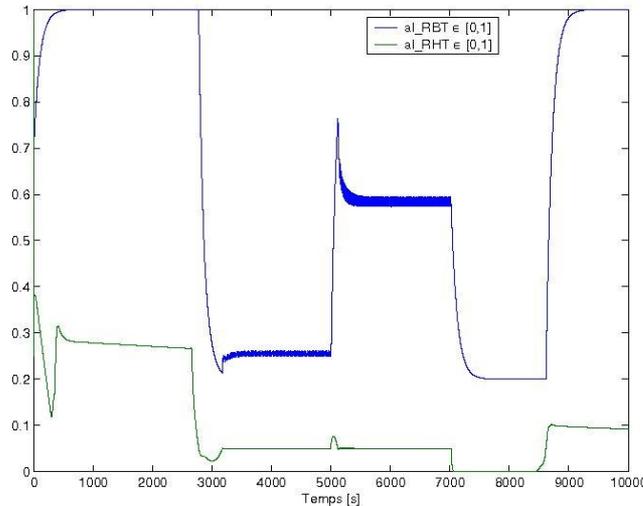
- Commandabilité insuffisante par l'architecture initiale
- Commande découplée de BP et BS



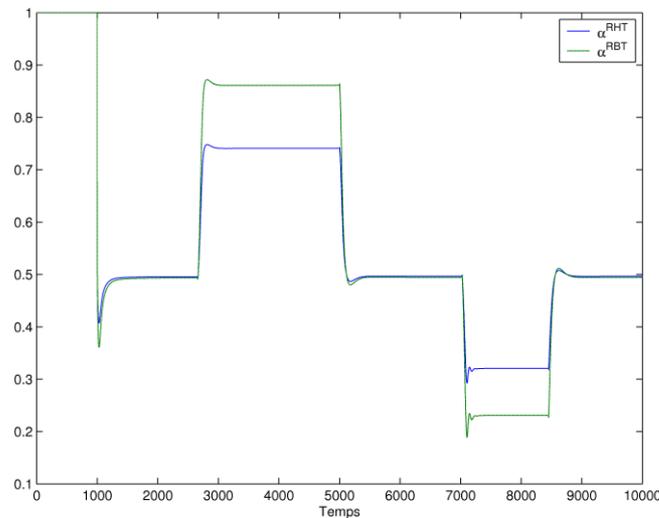
III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

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)

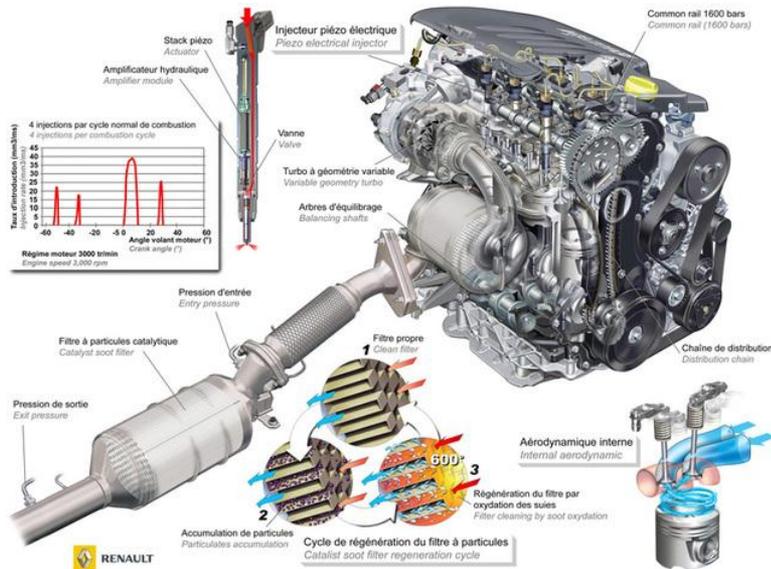
IV) Etude d'un groupe motopropulseur avec moteur thermique

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 → CO₂
- Valeur client (Disponibilité du véhicule, intervalle du vidange..)



Actuellement,

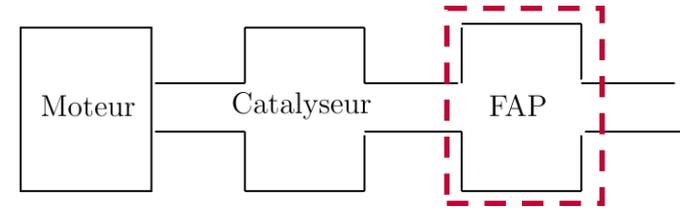
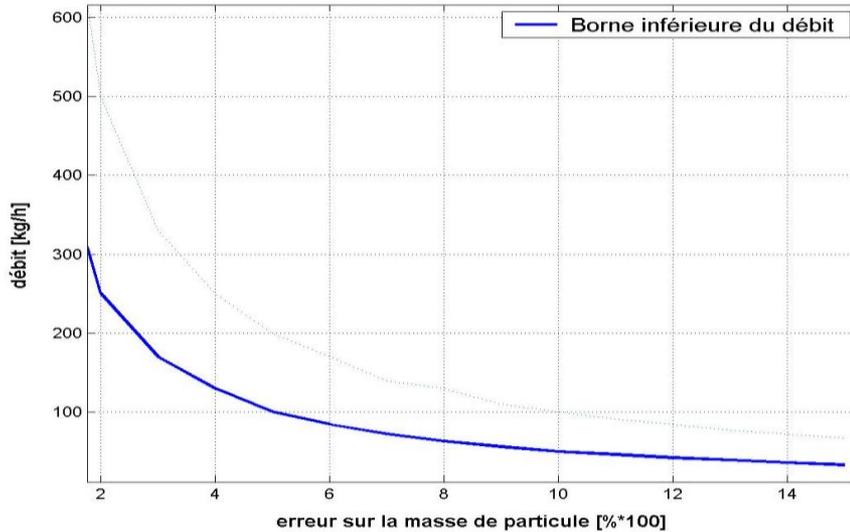
↳ Contrainte sur la quantité de particules en sortie du moteur (Euro5-Euro6) → Filtre à particule

↳ 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



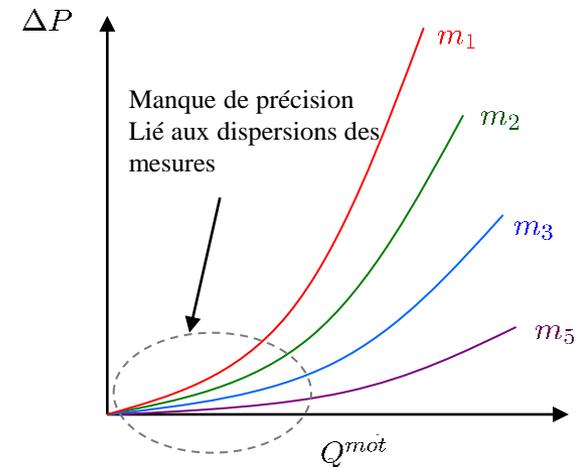
$$\Delta P_{FAP} = f(G_o, Q_v, k_s, k_w)$$



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

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

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

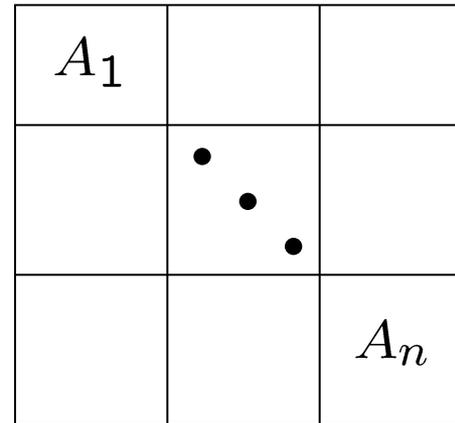
Les états du modèles sont les températures en différents emplacements du catalyseur

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

À refaire

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

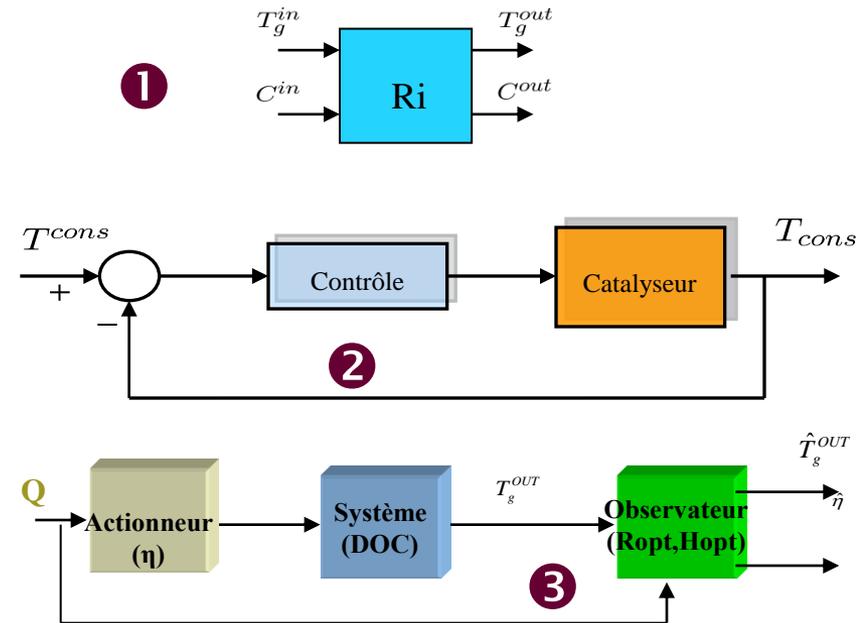
$$u = \frac{1}{A_g L} \frac{P}{r T_g^{IN}} \eta Q_{inj} PCI_{fuel}$$



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

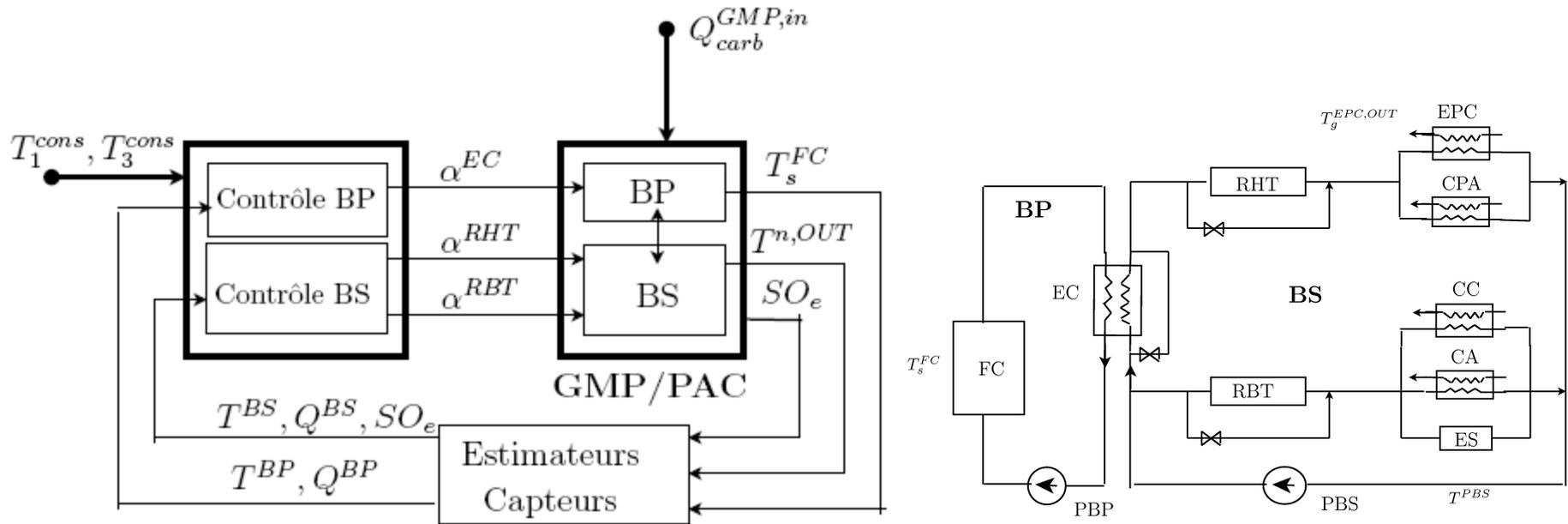
- 1) Synthèse des cinq axes de comparaisons entre les GMP étudiés
- 2) Analyse et comparaisons des résultats obtenus

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

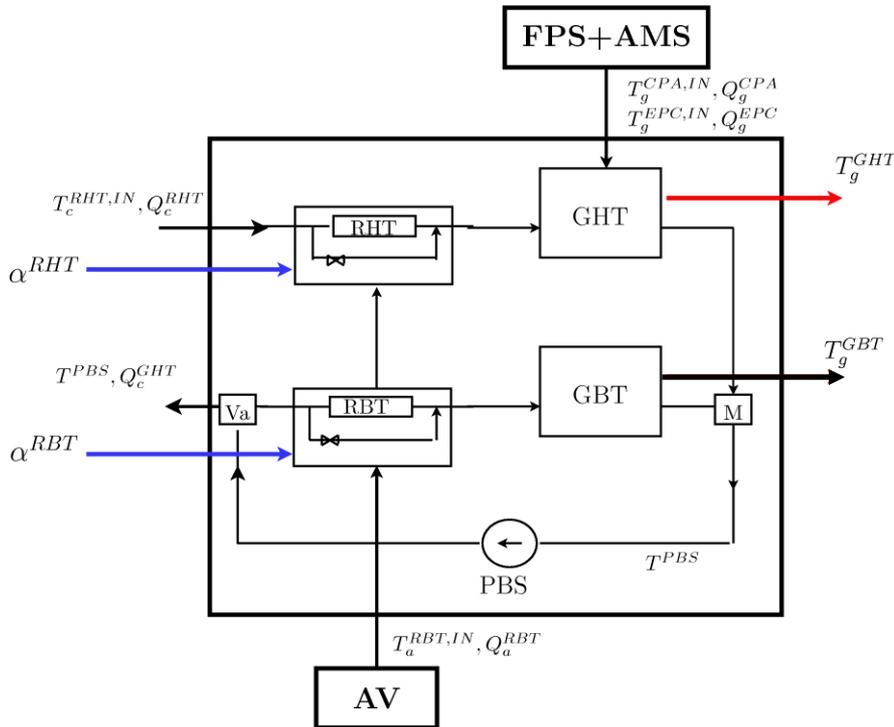


- Réduction du nombre de capteurs
- Commande modulaire
- Contrôle du pourcentage d'ouverture des vannes

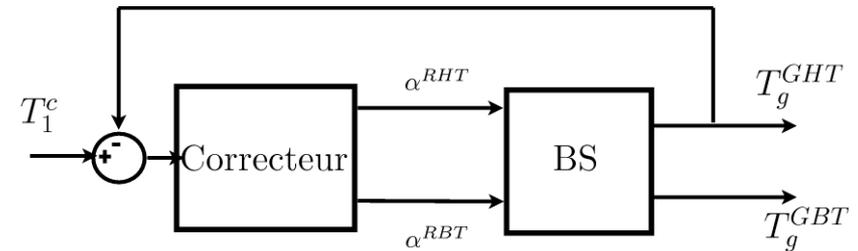
III) Etude d'un groupe motopropulseur avec pile à combustible

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)

