



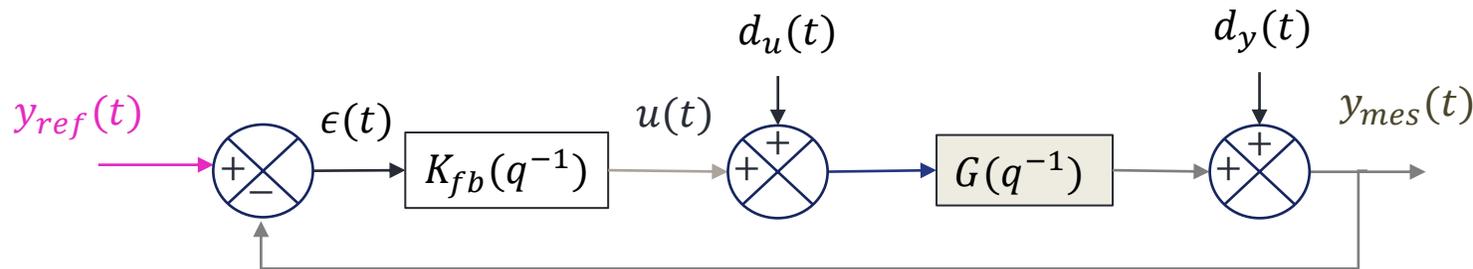
JOURNÉES DU CT-CPNL DE LA SAGIP, CNAM PARIS, 3 JUIN 2022

DÉFINITION D'UNE APPROCHE DE CONTRÔLE OPTIMAL ET ROBUSTE ADAPTÉ À DES SYSTÈMES NON LINÉAIRES APPLICATION AUX SYSTÈMES D'AIR DE CHÂÎNES DE TRACTION

IMS : PATRICK LANUSSE, TUDOR-BOGDAN AIRIMITOAI
STELLANTIS : EVGENY SHULGA, STÉPHANE MAUREL



1. Première partie
 - A. Présentation de la commande CRONE et sa variante avec feedforward linéaire optimal
 - B. Présentation de la commande MPC non linéaire
 - C. Proposition de la solution FFMPC + CRONE
2. Deuxième partie
 - A. Contexte industriel et présentation de la pile à combustible (PAC) et de la chaîne d'air de sa cathode
 - B. Synthèse de la commande CRONE MIMO
 - C. Synthèse de la commande FFMPC multivariable
 - D. Application de la solution développée aux modèles 0D et 1D de la PAC
3. Conclusion



$G(q^{-1})$ – modèle linéaire incertain qui fait partie de l'ensemble de modèles décrivant le système non linéaire
 $K_{fb}(q^{-1})$ – feedback linéaire robuste (CRONE)

- Mise en forme de la boucle ouverte nominale d'ordre fractionnaire

$$\beta_n(w) = G_n(s)K(w) = K_0\beta_l(w)\beta_m(w)\beta_h(w)G_{RHP}(w)N(w)$$

avec $\beta_l(w) = \left(\frac{v-N^-}{w} + 1\right)^{n_l}$, $\beta_h(w) = \frac{1}{\left(\frac{w}{v_N^+} + 1\right)^{n_h}}$

$$\text{et } \beta_m(w) = \prod_{k=-N^-}^{N^+} \left(\frac{1+w/v_{k+1}}{1+w/v_k}\right)^{a_k} \left(\mathfrak{R}/i \left\{ \left(G_k \frac{1+\frac{w}{v_{k+1}}}{1+\frac{w}{v_k}} \right)^{ib_k} \right\} \right)^{-q_k \text{sign}(b_k)}$$

- Optimisation des paramètres de β_n par minimisation de

$$J_K = \sup_{v,G} |T(jv)| - M_{rd}$$

sous les contraintes

$$\inf_{G,v} |T(jv)| \geq T_l(v), \sup_{G,v} |T(jv)| \leq T_u(v),$$

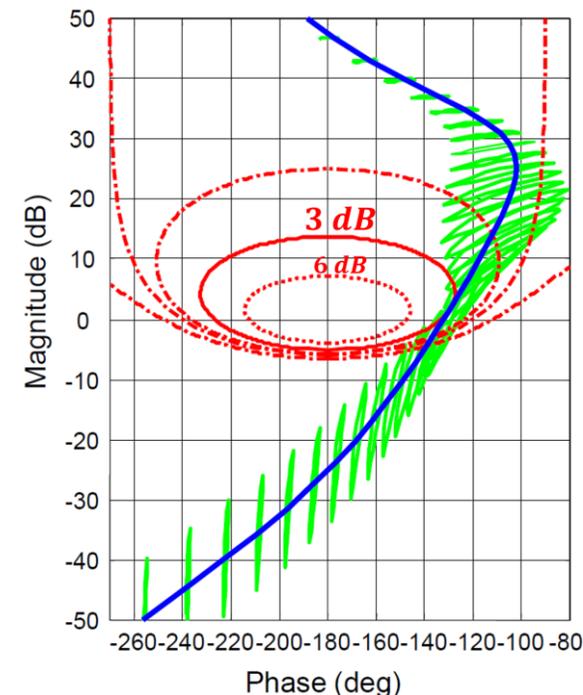
$$\sup_{G,v} |S(jv)| \leq S_u(v)$$

$$\sup_{G,v} |KS(jv)| \leq KS_u(v),$$

$$\sup_{G,v} |GS(jv)| \leq GS_u(v).$$

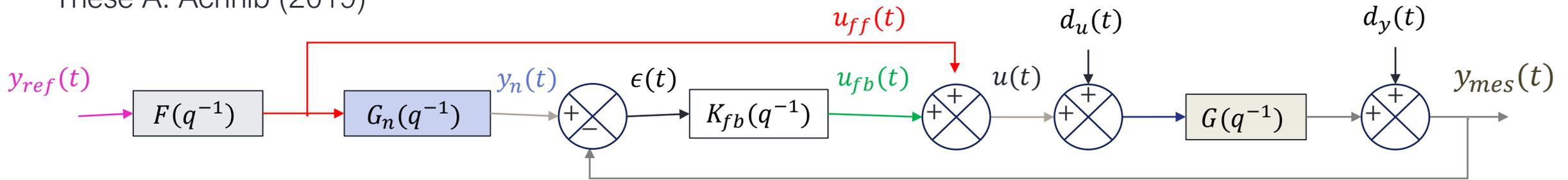
- Synthèse du régulateur rationnel à partir de

$$K(jv) = G_n^{-1}(jv)\beta_n(jv)$$



Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> Commande linéaire facile à implémenter Robustesse de la boucle fermée des performances et du degré de stabilité Retour de sortie 	<ul style="list-style-type: none"> Contraintes de performances fixes (pas d'adaptation aux signaux exogènes) Contraintes dures difficiles à prendre en compte Génération de la consigne non optimale et pas d'action anticipatives et/ou de pré-compensation

Thèse A. Achnib (2019)



$G(q^{-1})$ – modèle linéaire incertain qui fait partie de l'ensemble de modèles décrivant le système non linéaire
 $G_n(q^{-1})$ – modèle linéaire nominal
 $K_{fb}(q^{-1})$ – feedback linéaire robuste (CRONE)
 $F(q^{-1})$ – feedforward anticipatif linéaire composé de la partie inversible de G_n et d'un filtre FIR à coefficients optimisés hors ligne

$$\hat{\theta}_F = \operatorname{argmin}_{\theta_F} \|1 - H_{y_m y_r}(\theta_F, e^{-j2\pi f / f_e})\|_2,$$

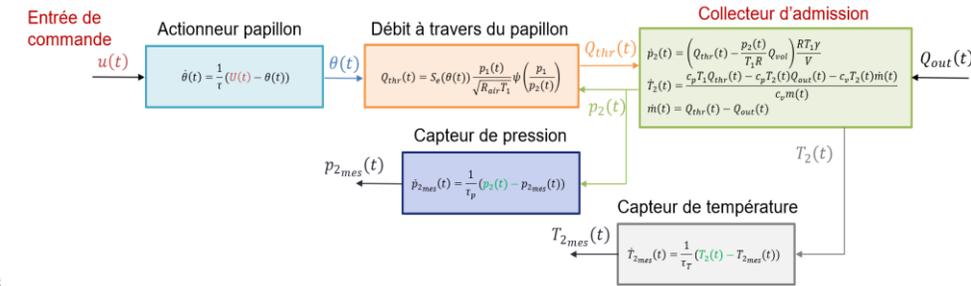
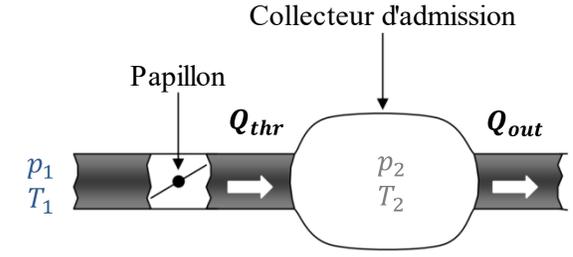
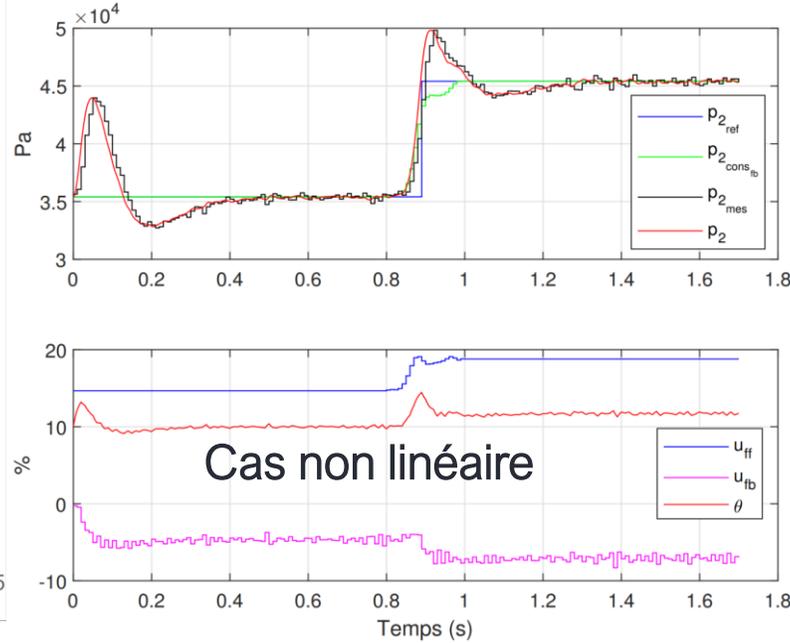
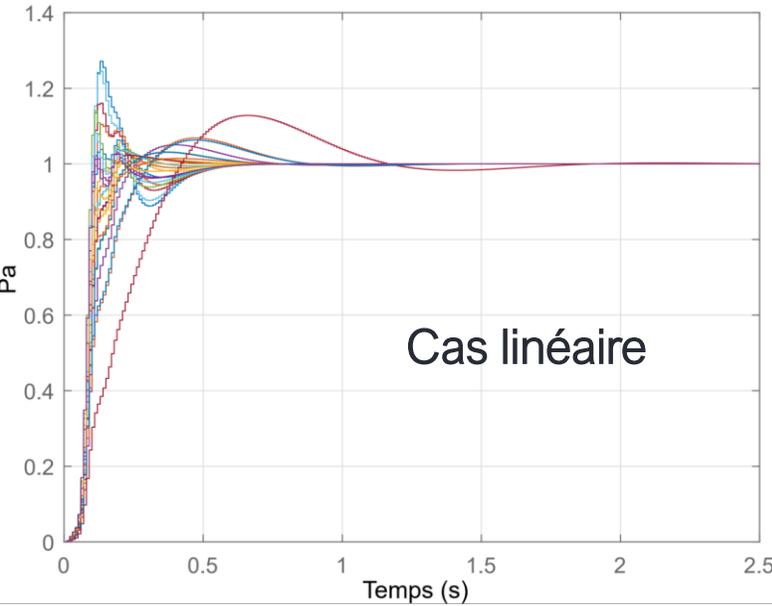
$$\text{s.t. } \lim_{q \rightarrow 1} T_F(\hat{\theta}_F, q^{-1}) = \lim_{q \rightarrow 1} G_h^{-1}(q^{-1})$$

$$\text{et } \|W_{u y_r}(e^{-j2\pi f / f_s}) H_{u y_r}(\hat{\theta}_F, e^{-j2\pi f / f_e})\|_\infty \leq 1$$

$$\forall f \in \left[0, \frac{f_e}{2}\right]$$

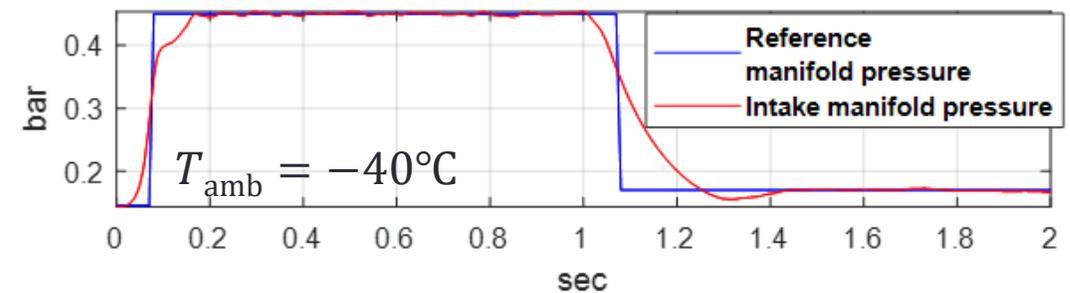
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Commandes linéaires • Robustesse de la boucle fermée grâce à la commande feedback • Anticipation possible grâce au filtre FIR • Séparation des actions feedback et feedforward+ 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'adaptation à la variation de la nature du signal de référence • Les non linéarités du système sont peu prises en compte par le feedforward • Toutes les contraintes ne peuvent pas être prises en compte

Réponse indicielle en boucle fermée Hyyd



- Bruit de mesure de pression $d_y(t) = \pm 5 \text{ mbar}$
- $T_e = 10 \text{ ms}$
- $N_a = 9, N_m = 8$
- Temps de réponse : 0.34 s
- Dépassement : 44 % (contre 25 % dans le cas linéaire)

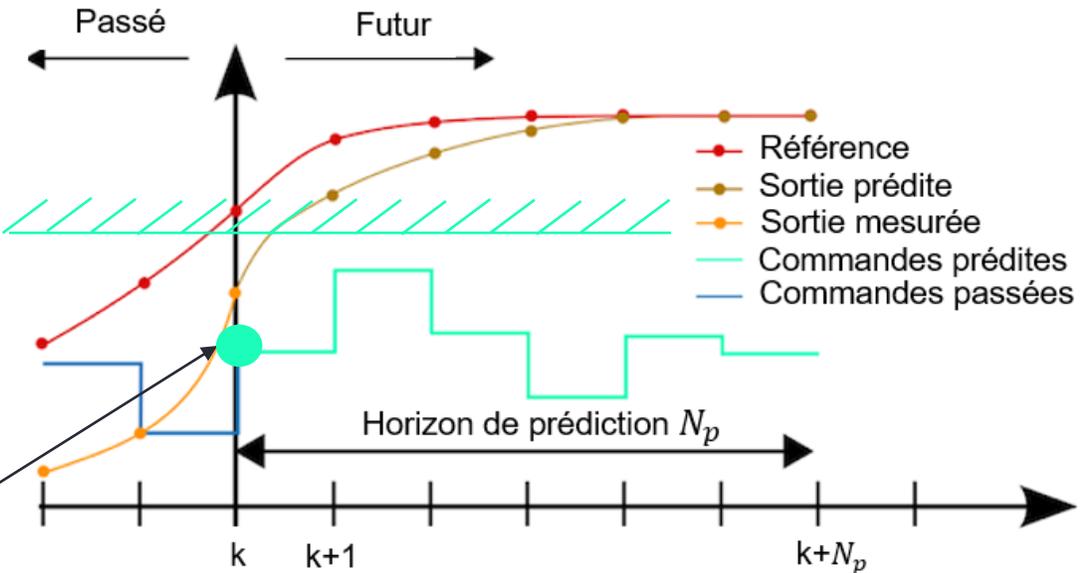
→ Phénomène transitoire imparfaitement géré incitant le feedback à corriger la commande feedforward
 → La commande feedforward mériterait de prendre en compte le comportement non linéaire du système



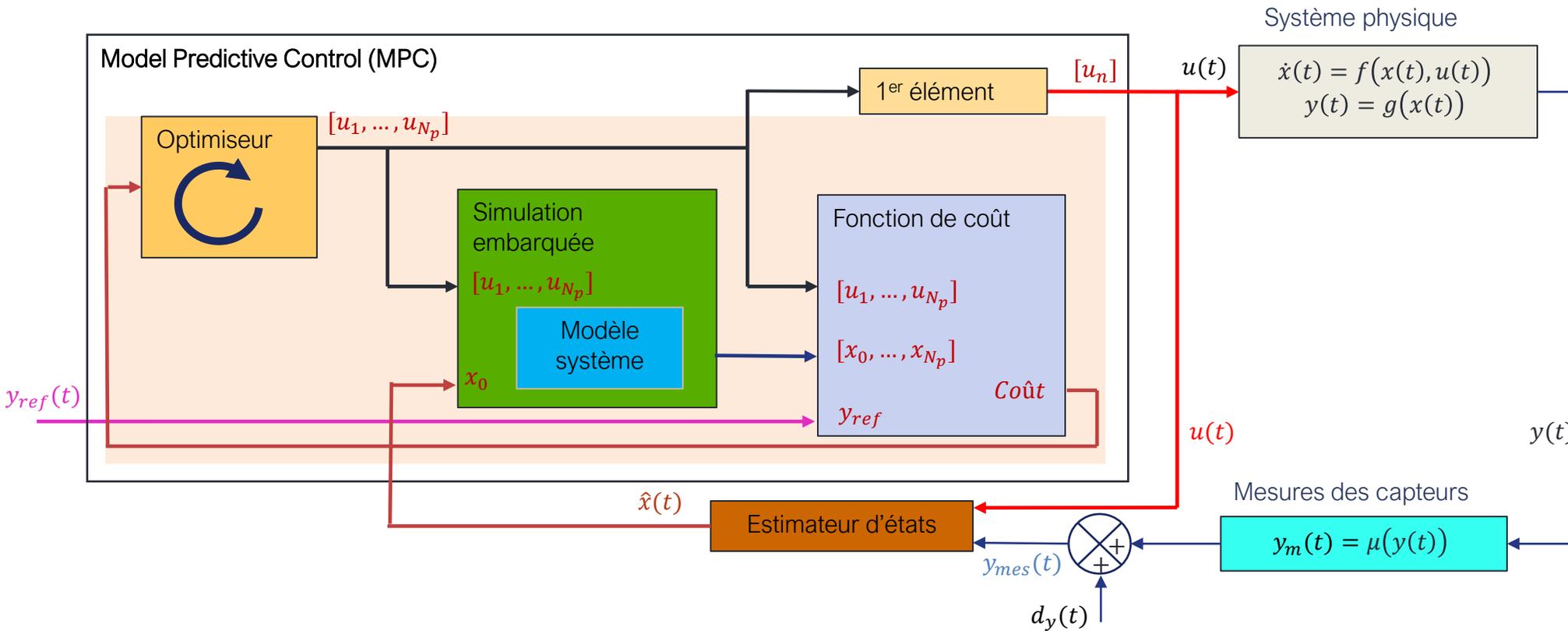
Le Model Predictive Control est une **commande optimale sur un horizon de temps fini**

- Utilisation d'un modèle embarqué pour prédire l'évolution du système → **modèles non linéaires utilisables**
- A chaque pas de temps, **un algorithme d'optimisation** détermine la commande minimisant une **fonction de coût** → adaptation possible à la variation de la nature du signal de référence
- Tout en satisfaisant des **contraintes** de différents types → **contraintes possibles sur l'ensemble des états et des commandes**
- Seul **le premier élément** de la commande prédite est appliqué au système

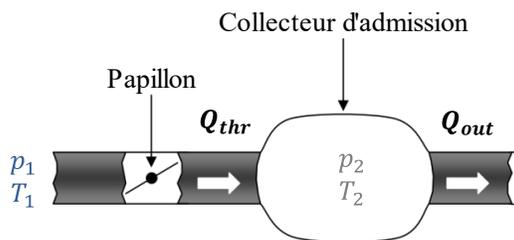
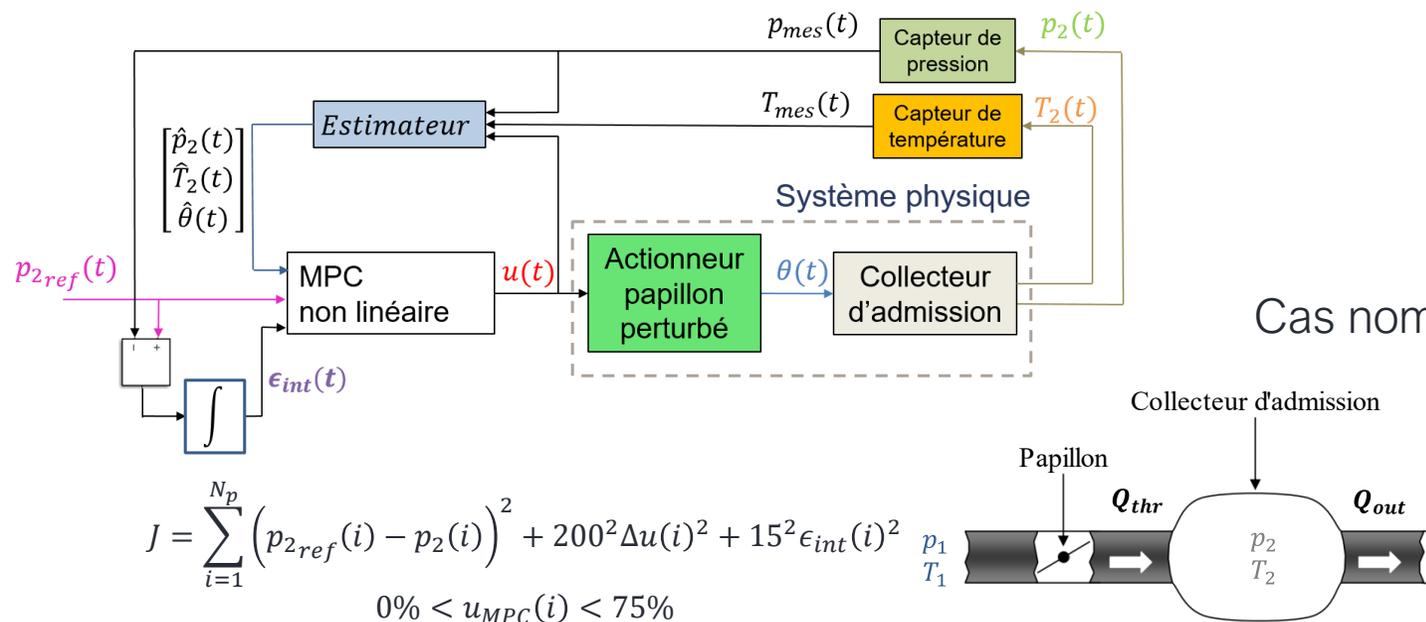
Principe de Fonctionnement :



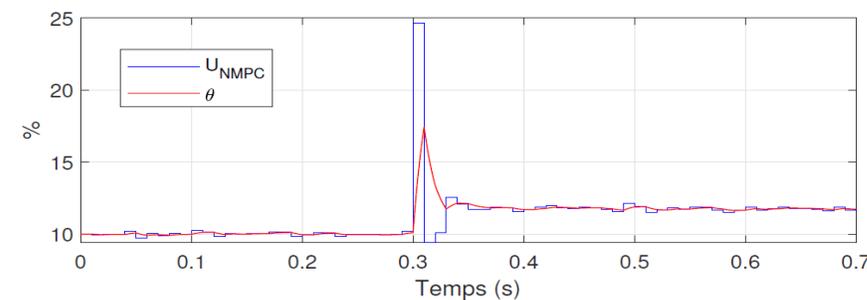
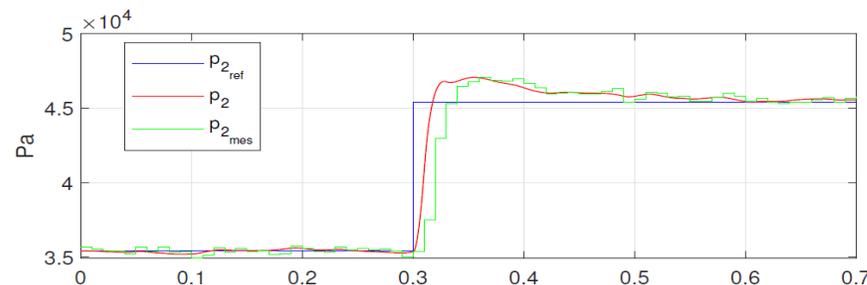
Commande appliquée au pas k



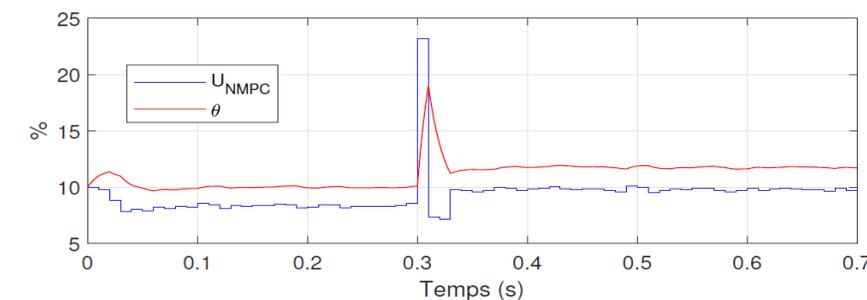
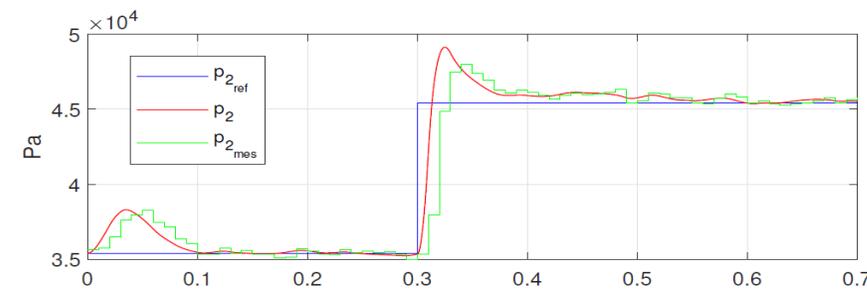
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Actions feedback et feedforward • Adaptation aux signaux de référence • Modèle non linéaire considéré • Approche optimale multi-objectif • Contraintes de différents types 	<ul style="list-style-type: none"> • Robustesse non garantie • Nécessite un estimateur d'états • Temps de calcul élevé voire aléatoire



Cas nominal

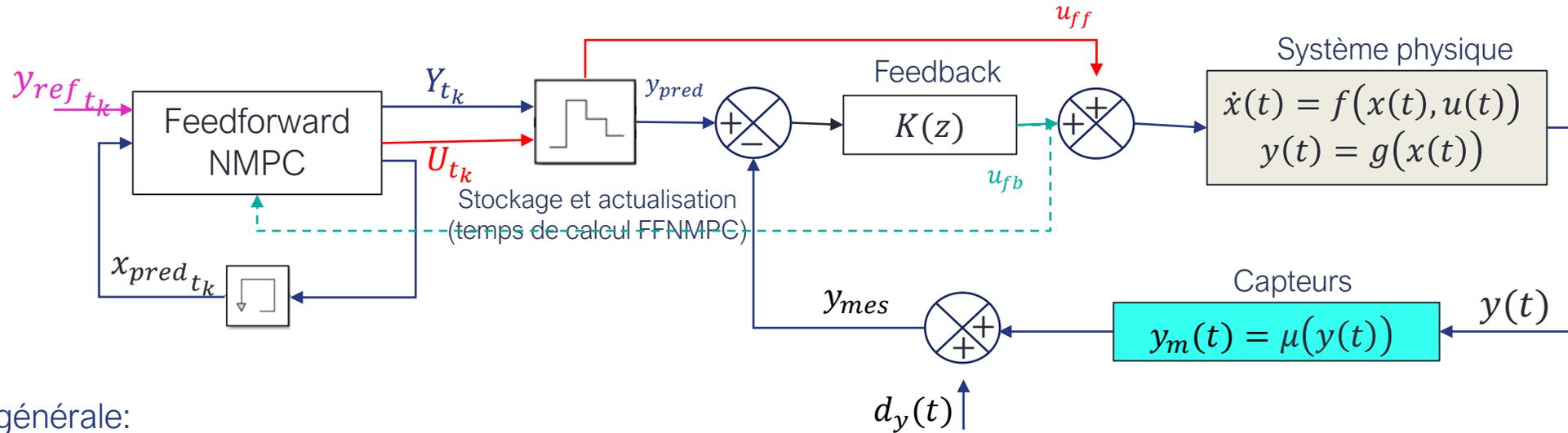


Cas perturbé



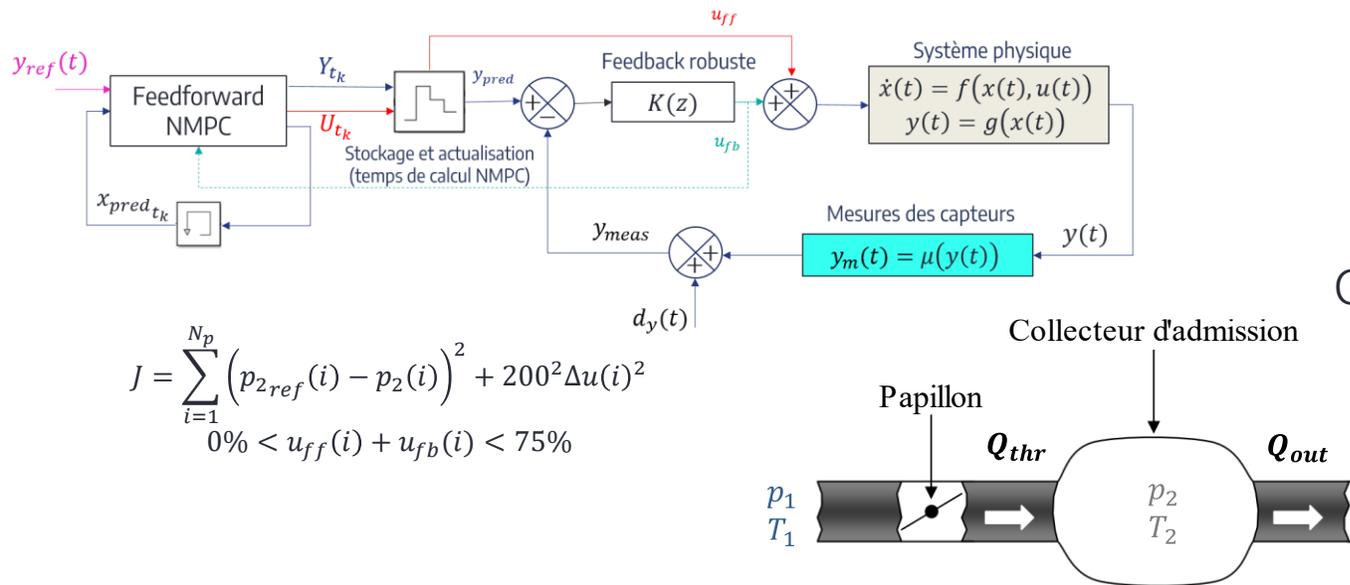
- Modèle MPC embarqué : état paramétrique nominal (RK4)
- Augmentation du gain du système de 20 %
- Bruits de mesure : ± 5 mbar et ± 3 K
- Discrétisation T_e : 10 ms
- Horizon de prédiction N_p : 100 ms (10 points)
- Action intégrale additionnelle pour erreur statique nulle

- Temps de réponse : 0.218 s
- Dépassement: 37.3 % (16 % dans le cas nominal)



Idée générale:

- **Feedforward**
 - Le régulateur NMPC feedforward calcule les signaux de commande et de référence optimaux d'un modèle nominal non linéaire du système physique (modèle de référence)
 - Pas d'estimateur d'états nécessaire car le NMPC utilise les états du modèle nominal embarqué
- **Feedback robuste**
 - Le régulateur maintient le système autour du comportement de référence optimisé en rejetant l'effet des dispersions paramétriques et des perturbations
 - Le régulateur linéaire ne travaille qu'aux petits signaux pour lesquels il a été synthétisé
- **Implémentation temps-réel**
 - Performance de la commande peu impactée par le temps de calcul
 - Feedforward permettant l'**anticipation** des futurs signaux de référence



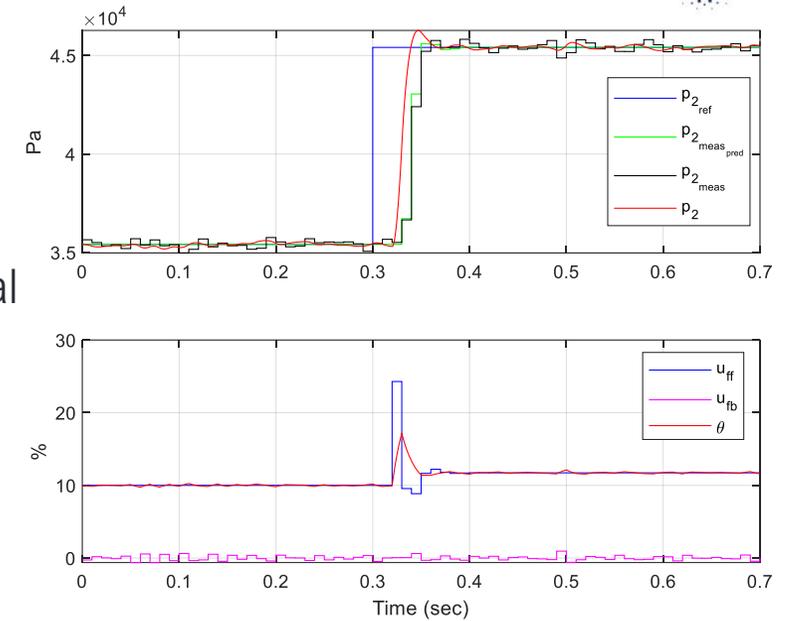
$$J = \sum_{i=1}^{N_p} (p_{2_{ref}}(i) - p_2(i))^2 + 200^2 \Delta u(i)^2$$

$$0\% < u_{ff}(i) + u_{fb}(i) < 75\%$$

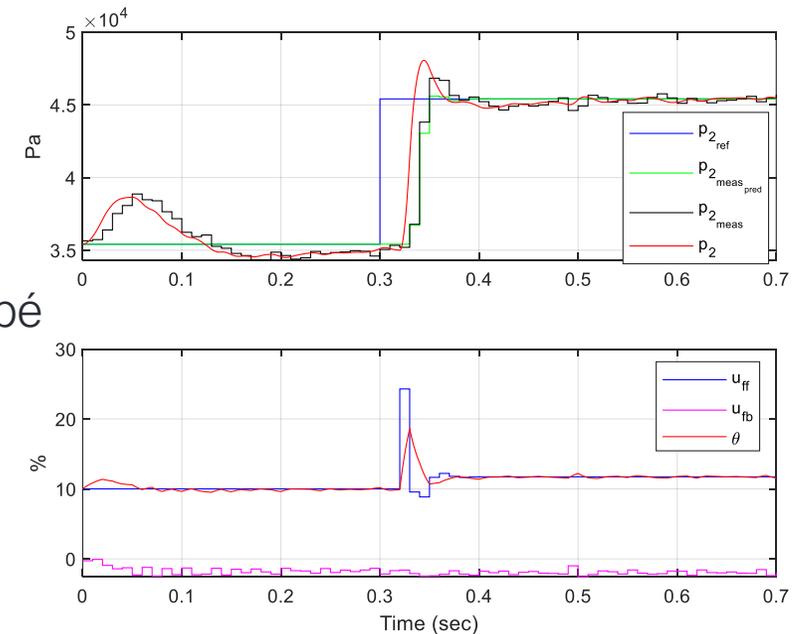
- Modèle MPC embarqué : état paramétrique nominal (RK4)
- Augmentation du gain du système de 20 %
- Temps de calcul T_c : 20 ms
- Discrétisation T_e : 10 ms
- Horizon de prédiction N_p : 70 ms (7 points)
- Bruit de mesure : ± 5 mbar

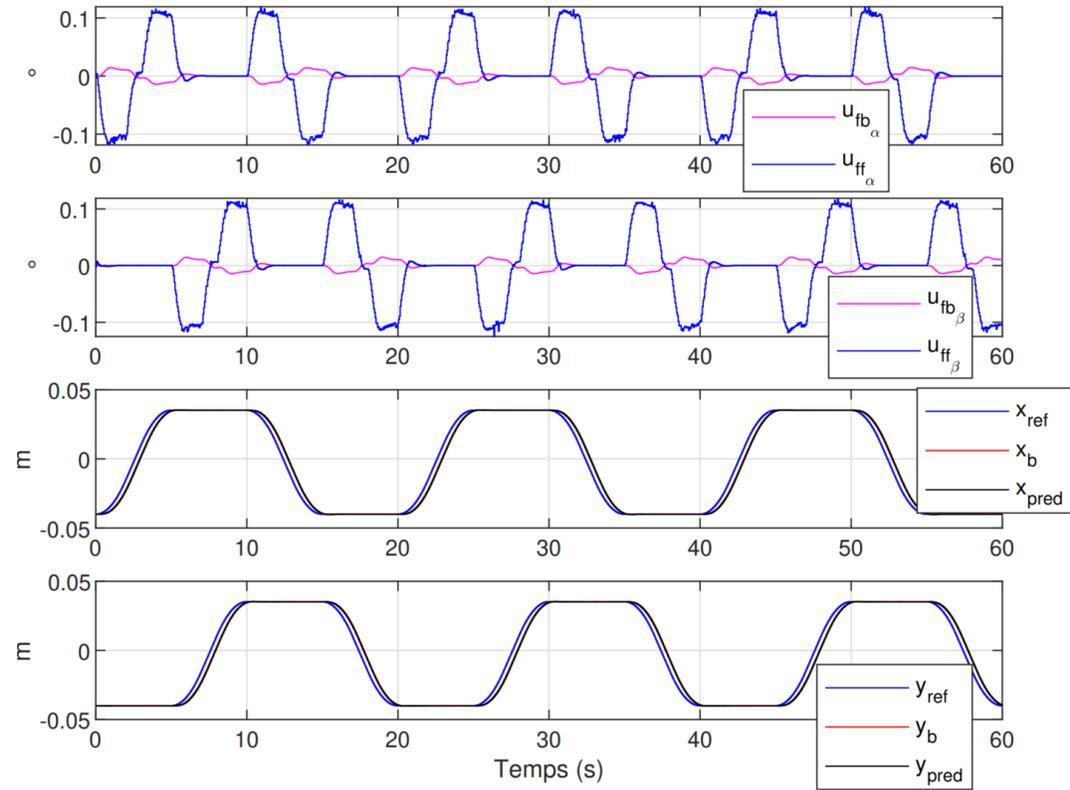
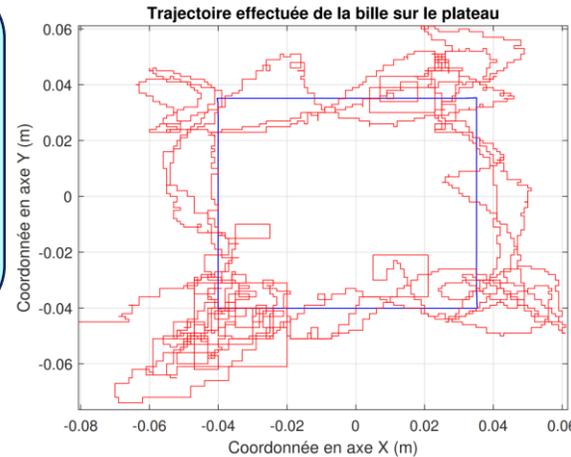
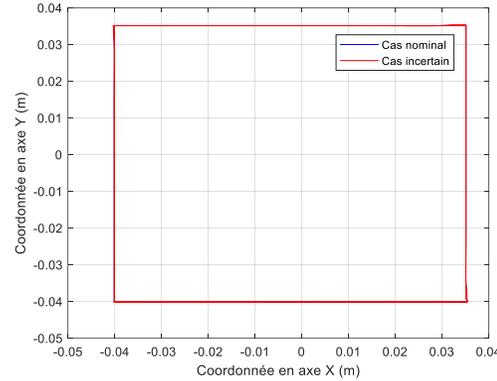
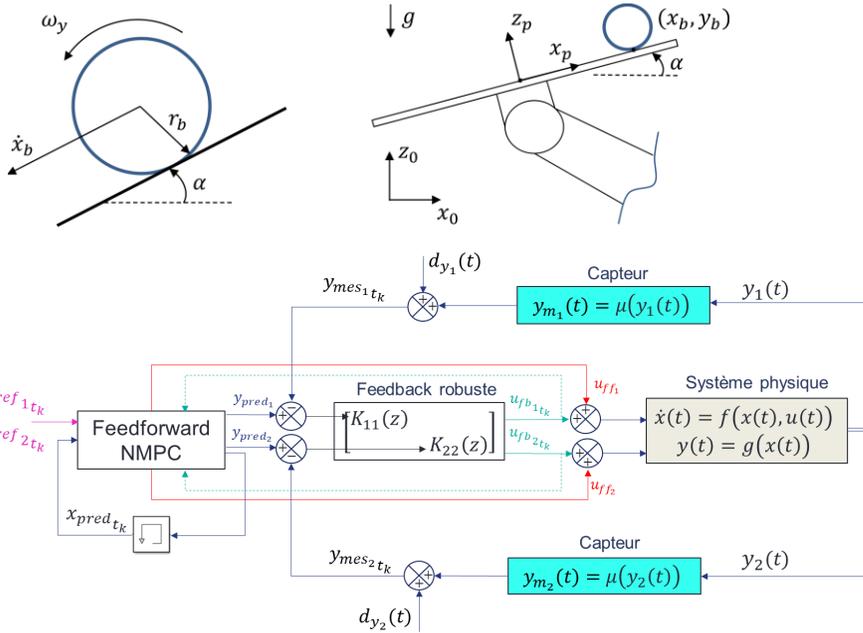
- Temps de réponse : 0.161 s (0.055 s pour le cas nominal)
- Dépassement: 26.7 % (7.34 % pour le cas nominal)

Cas nominal



Cas perturbé





- Modèle MPC embarqué : état paramétrique nominal (RK4)
- Augmentation de la masse de la bille de 50 %
- Discrétisation T_e : 50 ms
- Horizon de prédiction N_p : 500 ms (10 points)
- La synthèse du feedback CRONE MIMO prend en compte les vitesses non nulles

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} (\epsilon_x(i))_{norm}^2 + (\epsilon_y(i))_{norm}^2 + (\Delta u_{ff\alpha}(i))_{norm}^2 + (\Delta u_{ff\beta}(i))_{norm}^2$$

$$\epsilon_x(i) = x_{ref}(i) - x_b(i); \quad \epsilon_y(i) = y_{ref}(i) - y_b(i);$$

$$-20^\circ < u_{ff\alpha}(i) < 20^\circ; \quad -20^\circ < u_{ff\beta}(i) < 20^\circ$$

- Transition énergétique et développement durable
- Normes écologiques de plus en plus strictes
- Amélioration de systèmes de contrôle des chaînes de traction automobiles modernes
- Adaptation pour une gestion optimale du compromis performance/robustesse



Anode control:

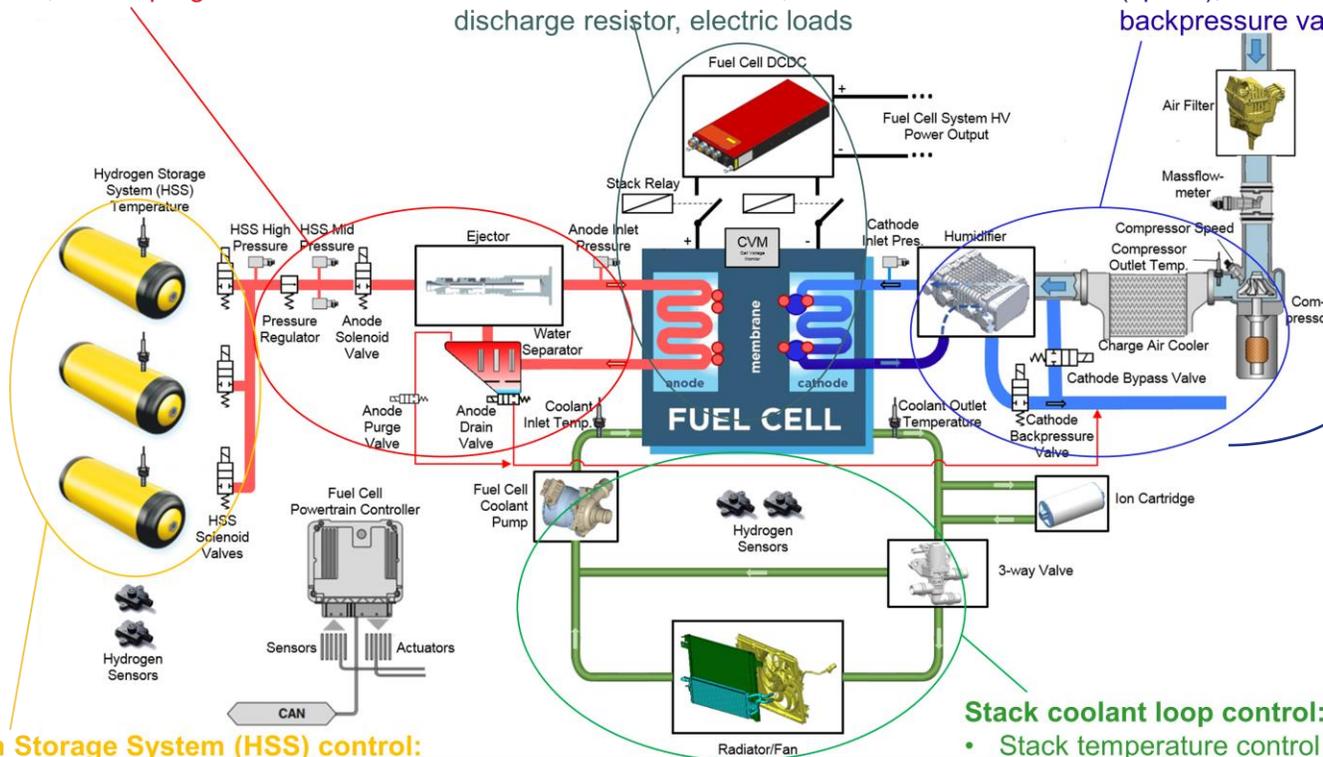
- Inlet pressure control
- Water drain control
- Hydrogen concentration control
- Actuators: Anode ejector, separator drain valve, anode purge valve

Stack control:

- Thermal power limitation
- Contactor and discharge control
- Stack voltage suppression
- Minimum stack voltage control
- Actuators: Fuel cell DCDC, stack contactors and discharge resistor, electric loads

Cathode control:

- Cathode air flow control
- Cathode pressure control
- Cathode flow split control
- Actuators: Compressor (speed), cathode bypass & backpressure valve



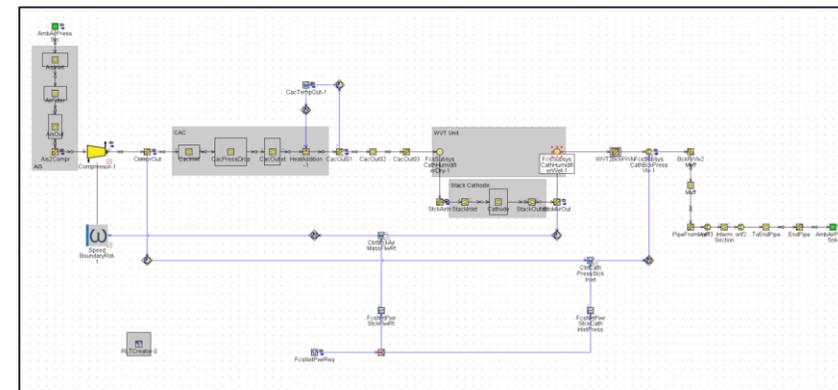
Hydrogen Storage System (HSS) control:

- Solenoid valve control
- HSS minimum temperature control
- Actuators: HSS and anode solenoid valves

Stack coolant loop control:

- Stack temperature control
- Stack coolant flow control
- Actuators: 3-way valve, radiator fan, fuel cell coolant pump (speed)

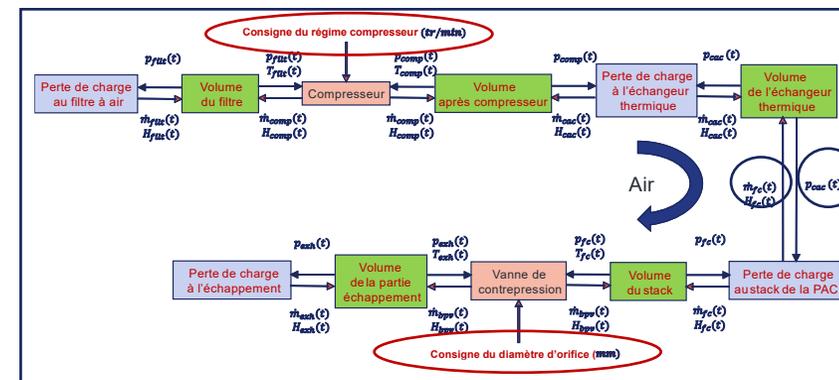
Chaîne d'air 1D de la cathode



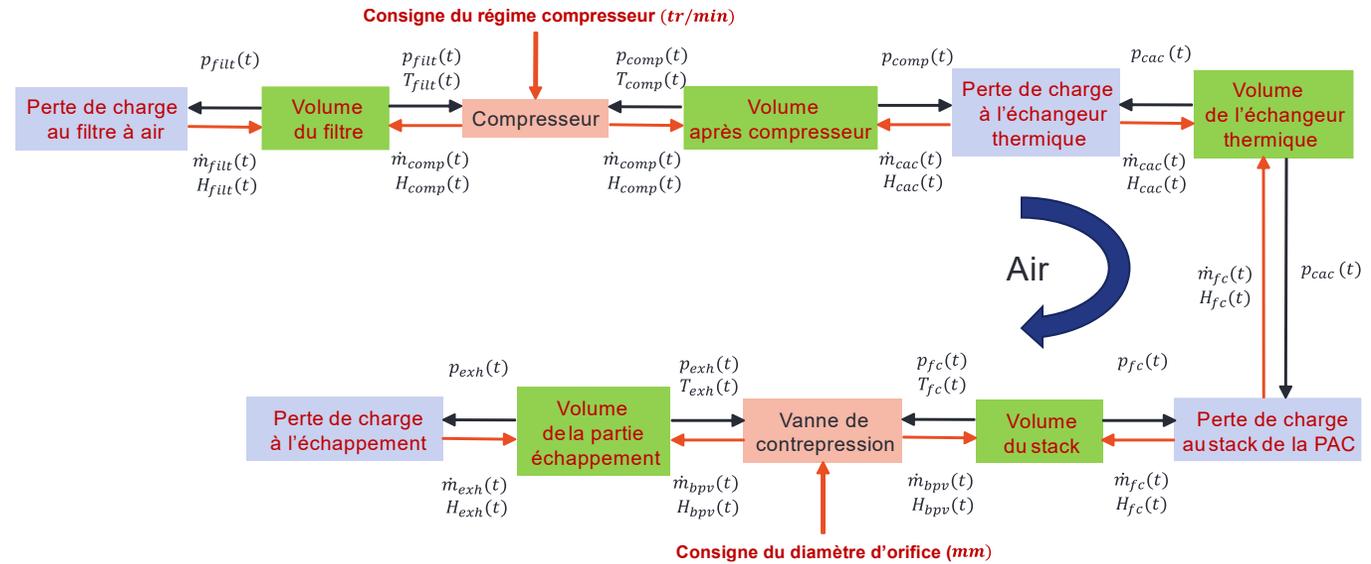
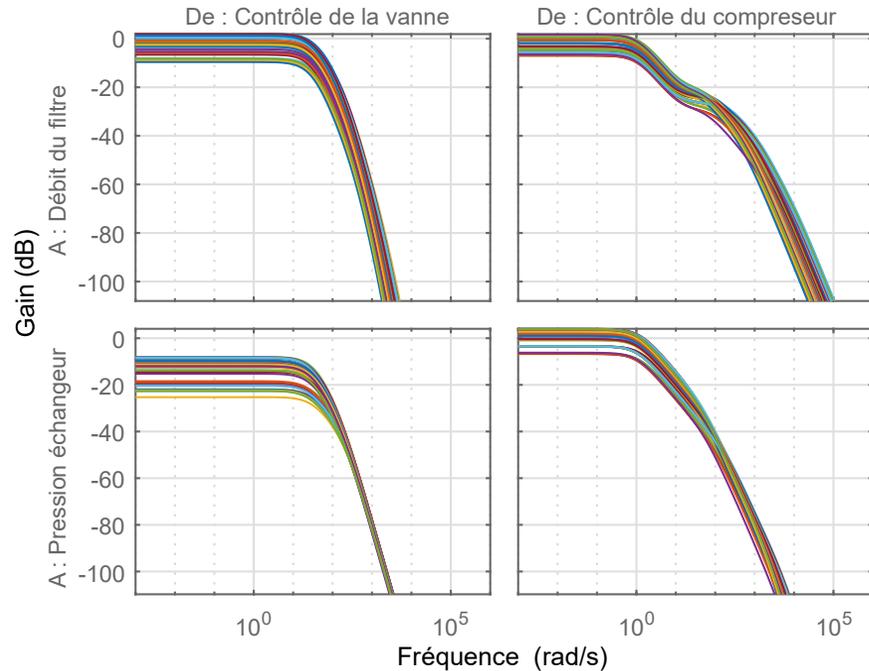
Système MIMO

- 2 entrées de commande : régime compresseur, ouverture vanne de contrepression
- 2 sorties : pression et débit d'air au stack

Chaîne d'air 0D de la cathode



Modèles linéaires normalisés

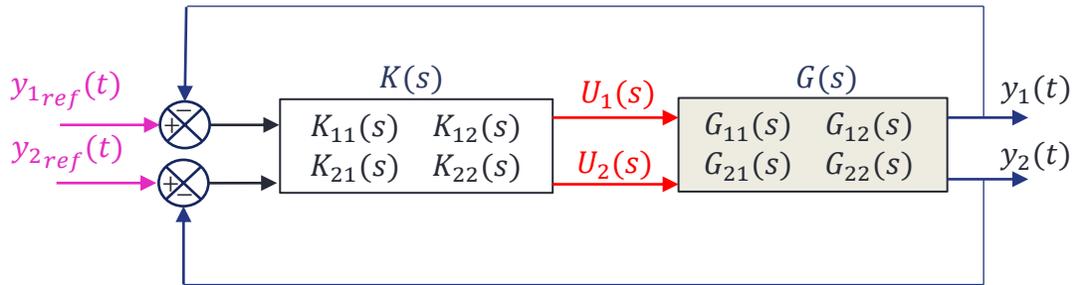


Normalisations des entrées et sorties entre 0 et 1

- La pression de sortie de l'échangeur thermique p_{cac} : entre 105 kPa et 205 kPa
- Le débit d'air mesuré à la sortie du filtre à air \dot{m}_{faa} : entre 0.01 kg/s et 0.06 kg/s
- L'entrée de commande compresseur $u_{fb_{comp}}$: entre 40000 tr/min et 160000 tr/min
- L'entrée de commande vanne de contrepression $u_{fb_{bppv}}$: entre 0 mm et 38 mm

Points de fonctionnement et variations

- Puissance de la PAC : 7, 10, 14, 20, 25, 29, 33, 36, 37.373 kW
- Constante de temps τ_{comp} de l'actionneur compresseur : 0.8, $0.8 \cdot 1.2$ s
- Constante de temps τ_{bppv} de l'actionneur papillon : 0.033, $0.033 \cdot 1.2$ s
- Gain sur le débit massique \dot{m}_{comp} calculé avec le champ compresseur : 0.9, 1, 1.15



Analyse RGA

Savoir le niveau de couplage d'un système et si un régulateur décentralisé peut être efficace
 $\rightarrow K_{12}(s) = K_{21}(s) = 0$

Analyse CD^3

Savoir si chacun des éléments du régulateur doit être synthétisé séparément (synthèse Multi-SISO) ou doivent être tous synthétisés ensemble (synthèse MIMO)

Commande(s) CRONE MIMO

RGA et CD^3

Synthèse Multi-SISO

Augmentation de l'incertitude portant sur les termes diagonaux du procédé en tenant compte des termes de couplage

RGA ou (RGA et CD^3)

Synthèse Full-MIMO

Découplage parfait pour un état nominal et minimisation de l'effet des termes de couplage

Analyse du caractère multivariable de la PAC

- Analyse RGA positive \rightarrow régulateur décentralisé
- Analyse CD^3 négative \rightarrow synthèse MIMO robuste en considérant des boucles ouvertes équivalentes et procédé nominal diagonal

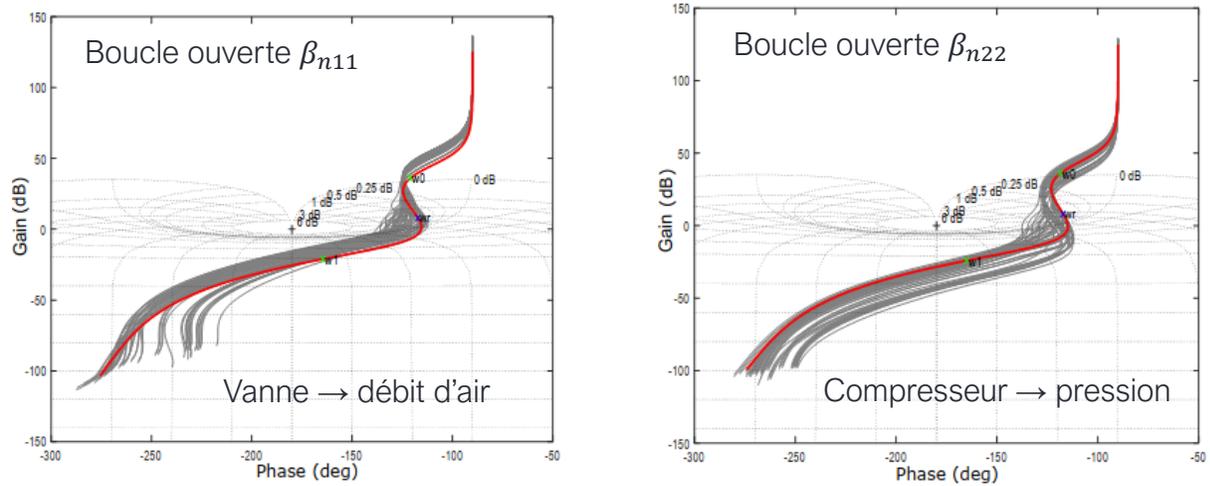
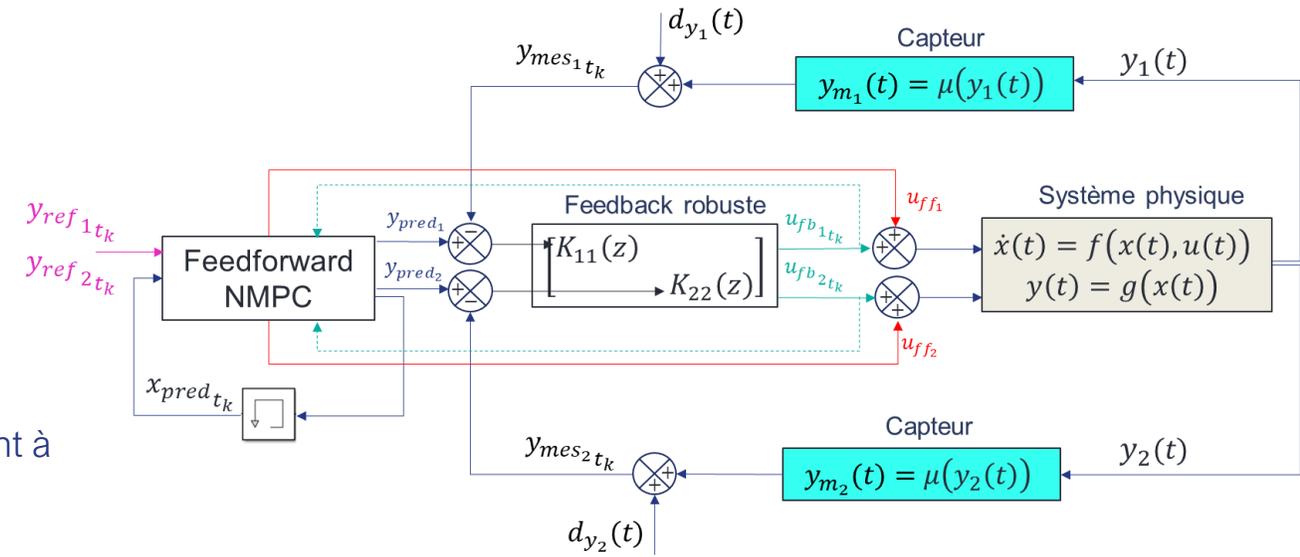


Schéma de commande FFMPC + CRONE multivariable



- Définition d'une fonction de transfert en boucle ouverte correspondant à un découplage parfait pour l'état nominal

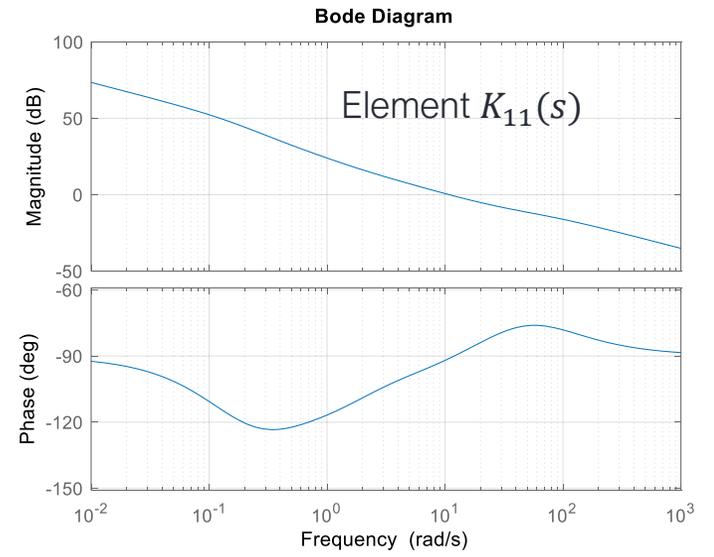
$$\beta_n(s) = G_n(s)K(s) = \begin{bmatrix} \beta_{n11}(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \beta_{nmm}(s) \end{bmatrix}$$

- Minimisation du critère de stabilité sous contraintes de performances

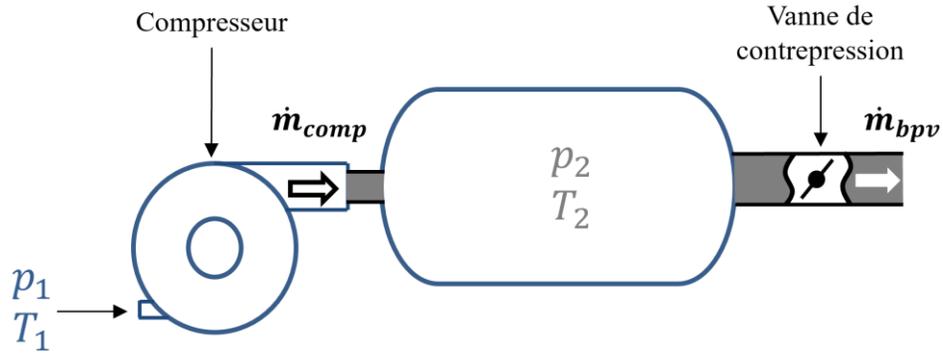
$$J = \sum_{i=1}^m (\sup_{\omega, G} |T_{ii}(j\omega)| - M_{rdi})$$

- Obtention du régulateur rationnel

$$K(s) = G_n^{-1}(s)\beta_n(s) = \begin{bmatrix} K_{11}(s) & \dots & K_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}(s) & \dots & K_{nm}(s) \end{bmatrix} = [K_{ij}(s)]$$



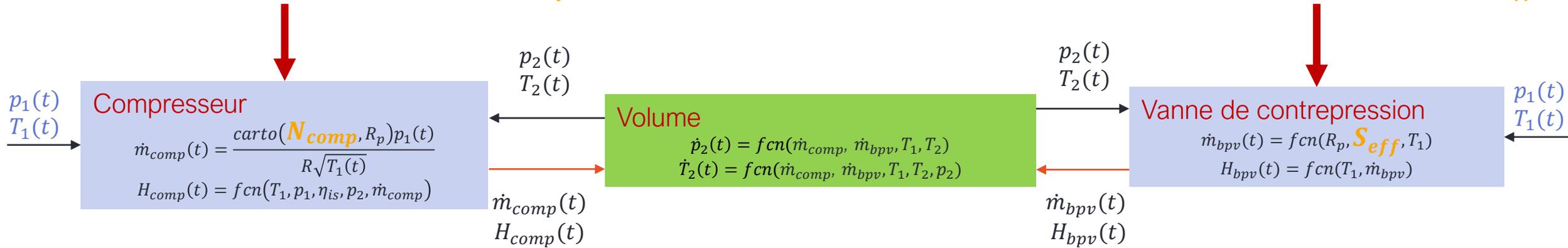
Modèle compresseur + volume + vanne de contrepression



$$\left\{ \begin{aligned} \dot{p}_2(t) &= (\dot{m}_{comp}(t)T_1(t) - T_2(t)\dot{m}_{bpv}) \frac{R\gamma}{V} \\ \dot{T}_2(t) &= \left(c_p T_1(t)\dot{m}_{comp} - c_p T_2(t)\dot{m}_{bpv} - c_v T_2(t)(\dot{m}_{comp} - \dot{m}_{bpv}) \right) \frac{RT_2(t)}{c_v V p_2(t)} \\ \dot{N}_{comp}(t) &= \frac{1}{\tau_{comp}} (u_{comp}(t) - N_{comp}(t)) \\ \dot{d}_{bpv}(t) &= \frac{1}{\tau_{bpv}} (u_{bpv}(t) - d_{bpv}(t)) \end{aligned} \right.$$

Entrée de commande du régime compresseur (N_{comp})

Entrée de commande de la section efficace (S_{eff})



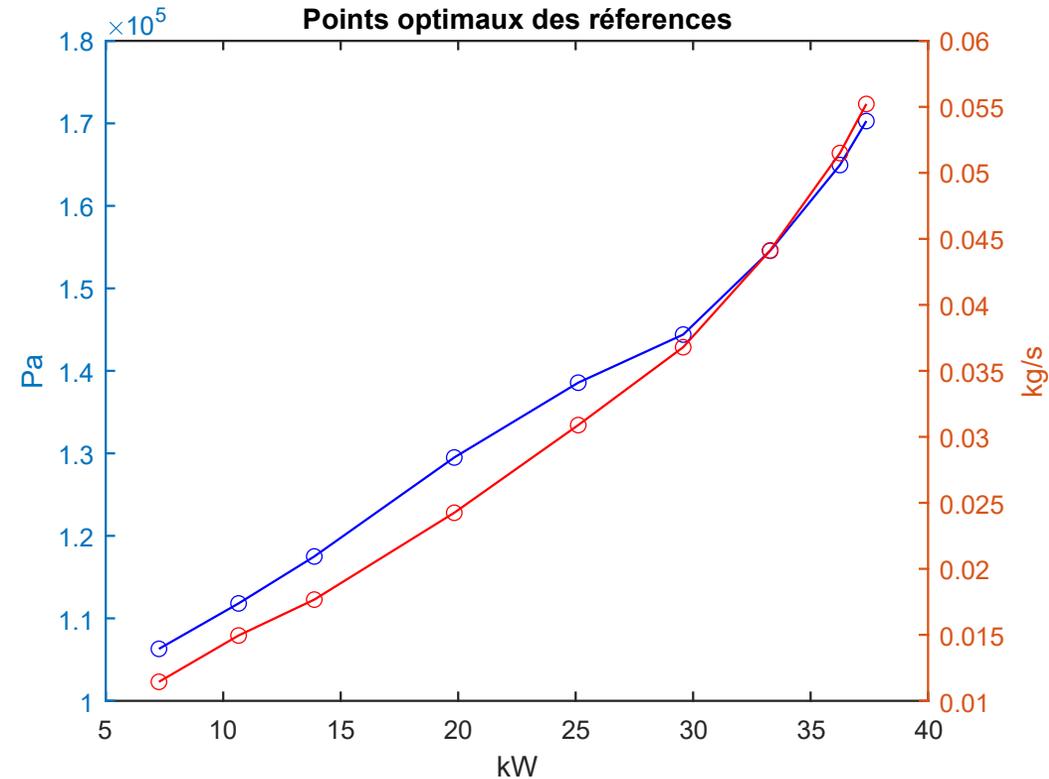
$p_1, T_1, c_p, c_v, \gamma, \tau_{comp}, \tau_{bpv}$ sont des constantes

Normalisation des commandes entre -1 et 1

- Variation de la commande de la vanne
 $\Delta u_{bpv} : [-2.5 \ 2.5] \text{ mm}/\Delta t$
- Variation de la commande compresseur
 $\Delta u_{comp} : [-120000 \ 120000] \text{ rpm}/\Delta t$

Normalisation des sorties pilotées entre -1 et 1

- Erreur de suivi de pression $\epsilon_{p_{mpc}} : [-5000 \ 5000] \text{ Pa}$
- Erreur de suivi du débit d'air $\epsilon_{q_{mpc}} : [-0.0025 \ 0.0025] \text{ kg/s}$

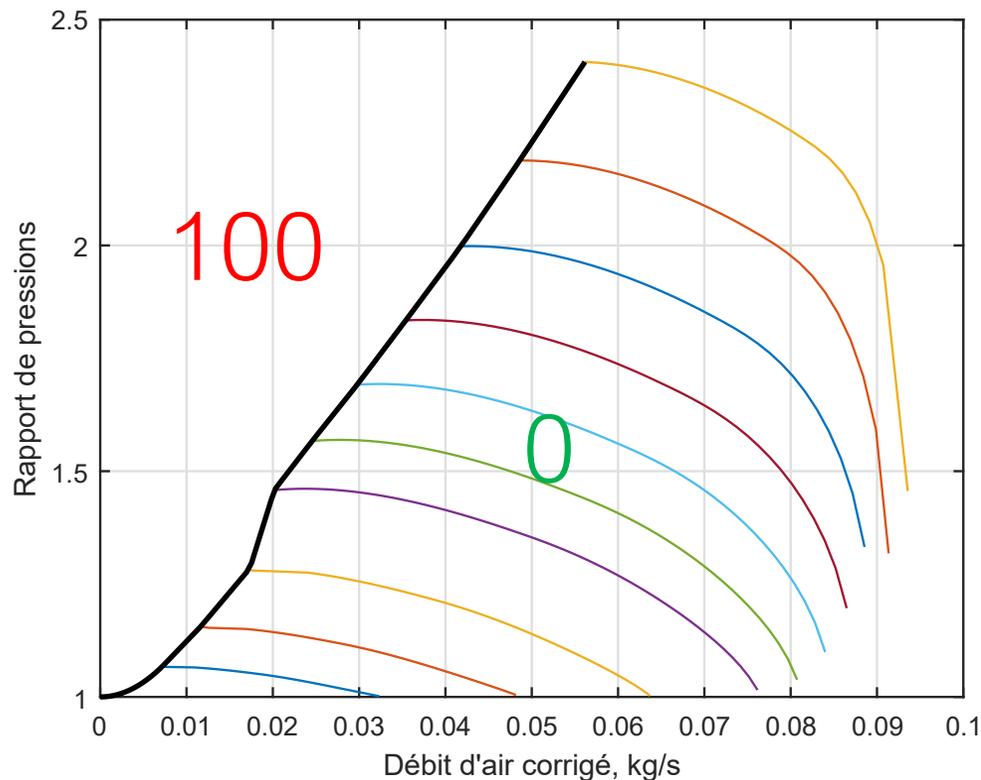


$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\epsilon_{p_{mpc}}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\epsilon_{q_{mpc}}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{comp}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{bpv}(i) \right)_{norm}^2 + \lambda_d d_{opt}^2 + d_{surge}^2$$

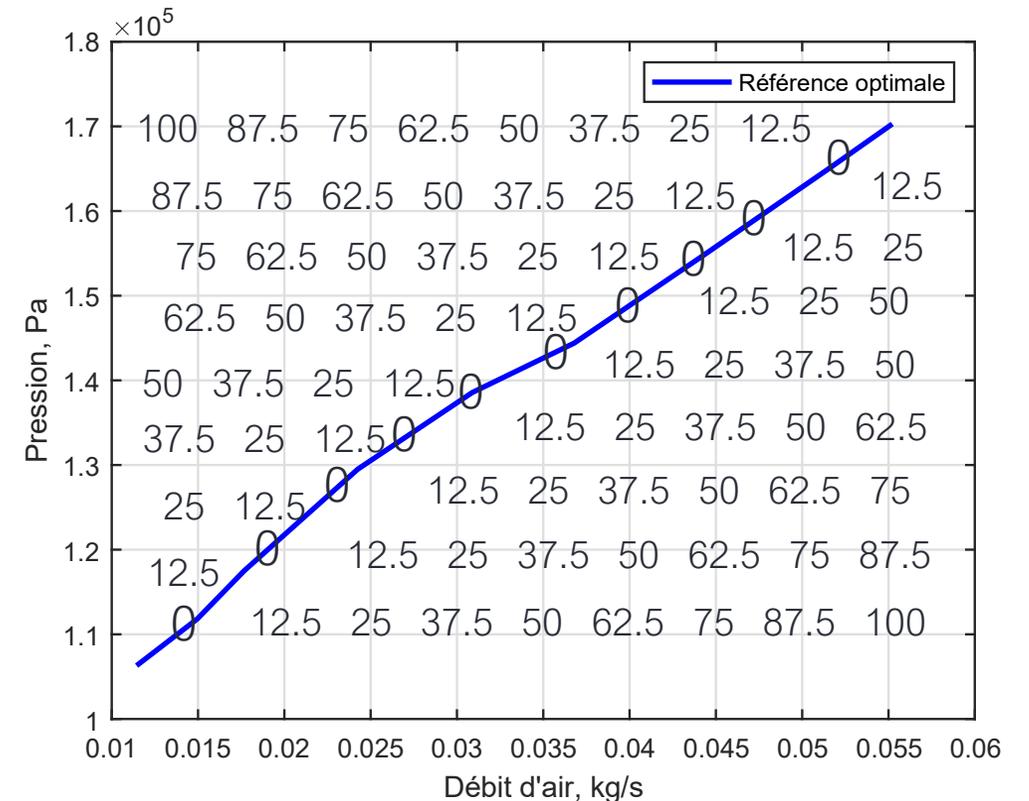
où $\epsilon_{p_{mpc}}(i) = p_{ref}(i) - p_{comp}(i); \quad \epsilon_{q_{mpc}}(i) = q_{ref}(i) - q_{comp}(i)$

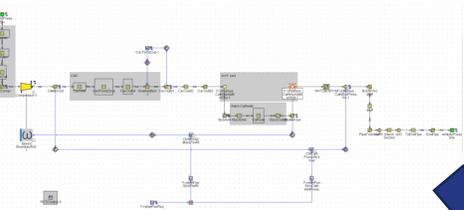
$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\epsilon_{pmpc}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\epsilon_{qmpc}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{comp}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{bppv}(i) \right)_{norm}^2 + \lambda_d d_{opt}^2 + d_{surge}^2$$

Valeurs de d_{surge} suivant la position du couple pressions amont-aval / débit d'air du modèle embarqué du compresseur par rapport à la ligne de pompage



Valeurs de d_{opt} suivant la distance entre le couple pression / débit du modèle embarqué et la référence optimale



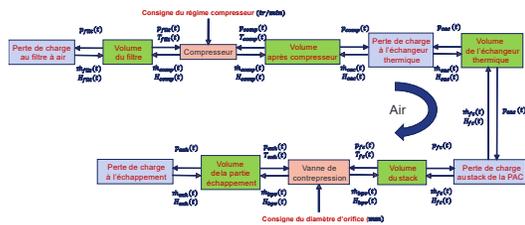


Modèle 1D GT-POWER

Co-simulation Simulink / GT-POWER



Validation 1D
FFNMPC + CRONE

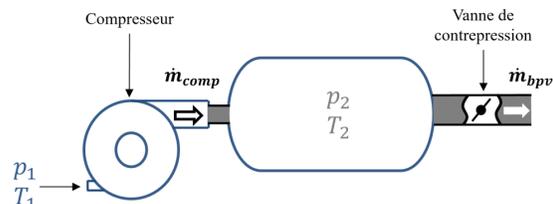


Modèle 0D Matlab-Simulink

Synthèse feedback
CRONE MIMO



Validation 0D FFNMPC +
CRONE

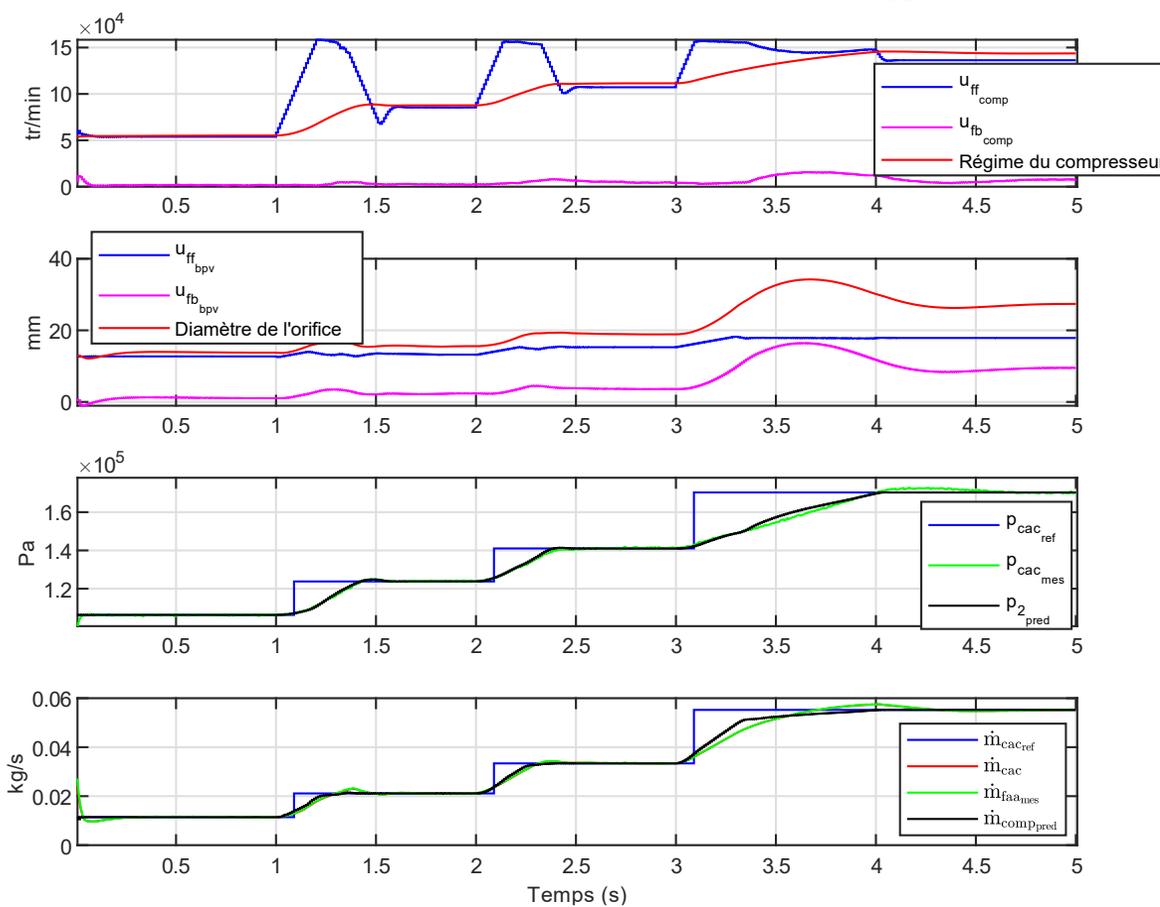
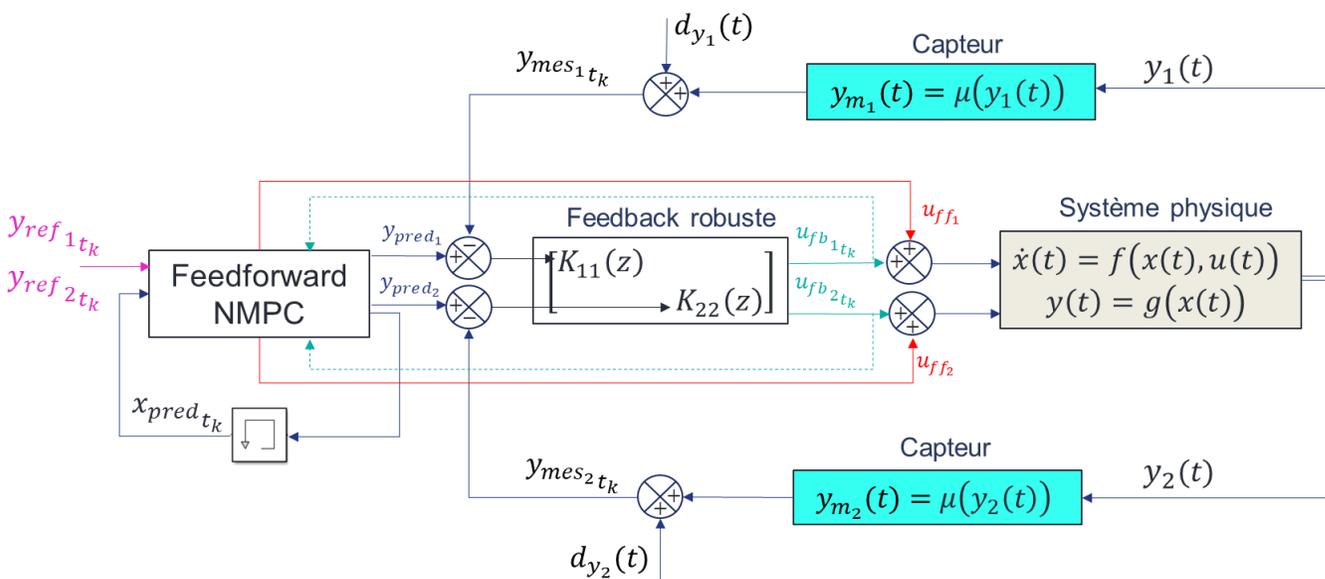


Modèle 0D Matlab simplifié

Toolbox CasADi



Optimisation FFNMPC



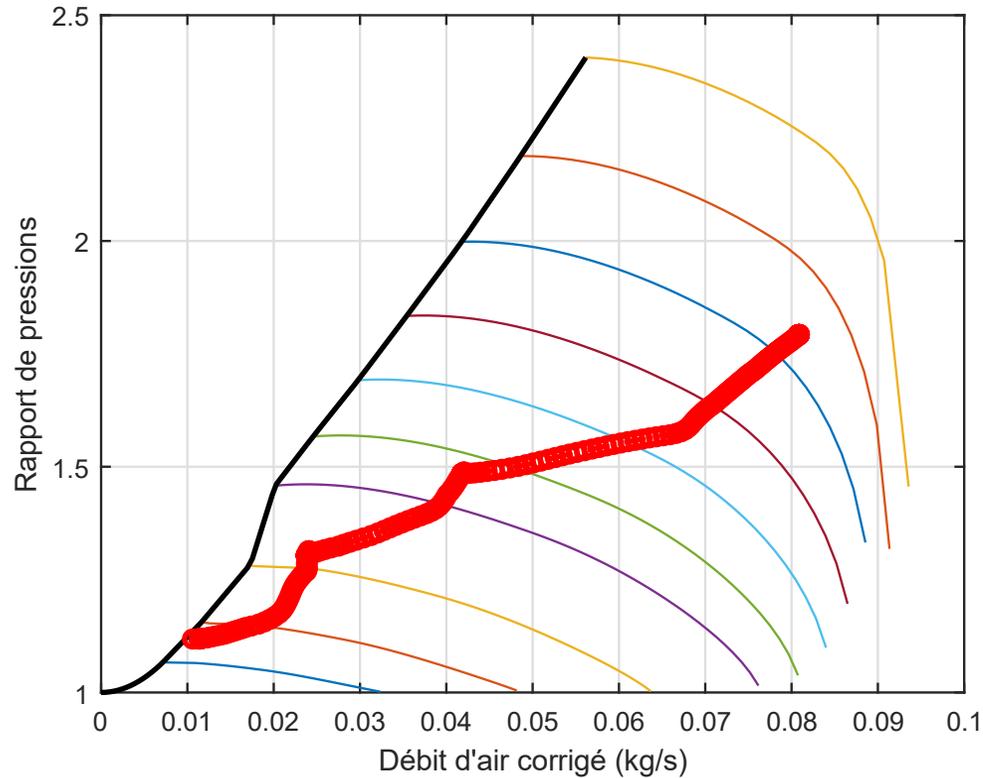
- Echantillonnage de la commande : 10 ms
- Horizon de prédiction N_p : 100 ms (10 points)
- Horizon de commande N_c : 100 ms (10 points)
- Bruits de mesure
 - $\pm 500 Pa$ ($\sigma = 200 Pa$)
 - $\pm 1.25 g/s$ ($\sigma = 6.10^{-5} kg/s$)
- Temps de réponse maximal
 - Pression : 1.09 s ; débit d'air : 1.37 s
- Dépassement maximal
 - Pression : 7.71 % ; débit d'air : 10.9 %

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\epsilon_{p_{mpc}}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\epsilon_{q_{mpc}}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{comp}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{bvp}(i) \right)_{norm}^2 + 10d_{opt}^2 + d_{surge}^2$$

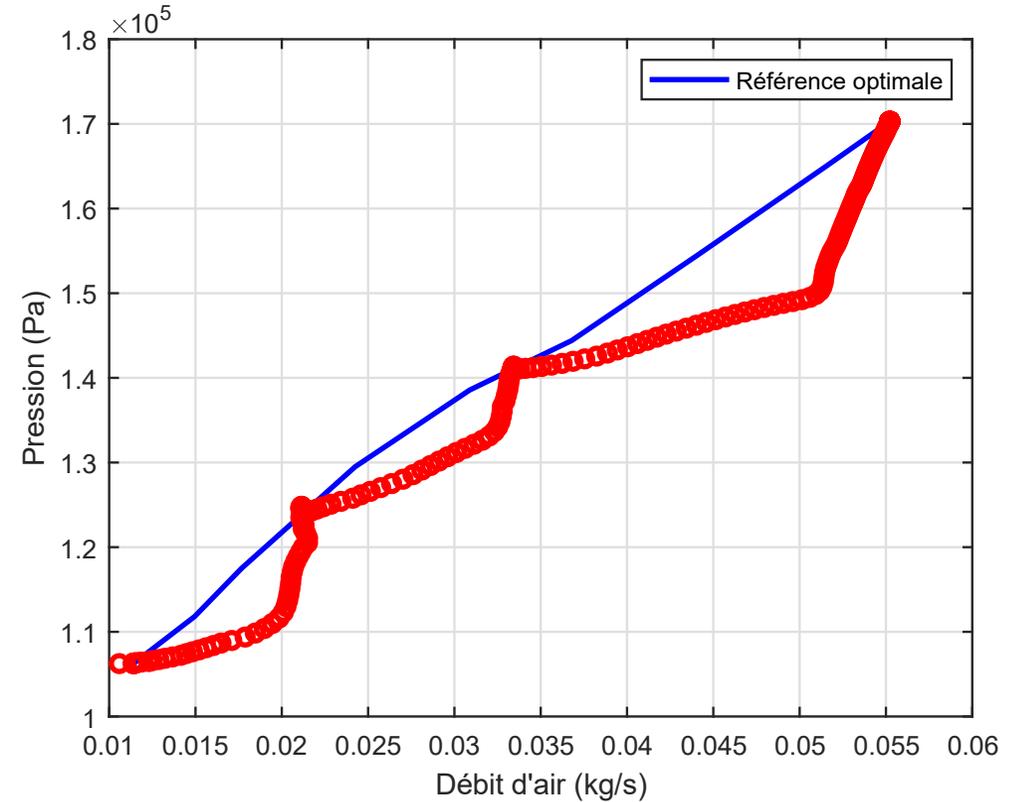
$$\epsilon_{p_{mpc}}(i) = p_{ref}(i) - p_{comp}(i); \quad \epsilon_{q_{mpc}}(i) = q_{ref}(i) - q_{comp}(i);$$

$$40000 \frac{tr}{min} < u_{comp}(i) < 160000 \frac{tr}{min}; \quad 2 \text{ mm} < u_{bvp}(i) < 38 \text{ mm}$$

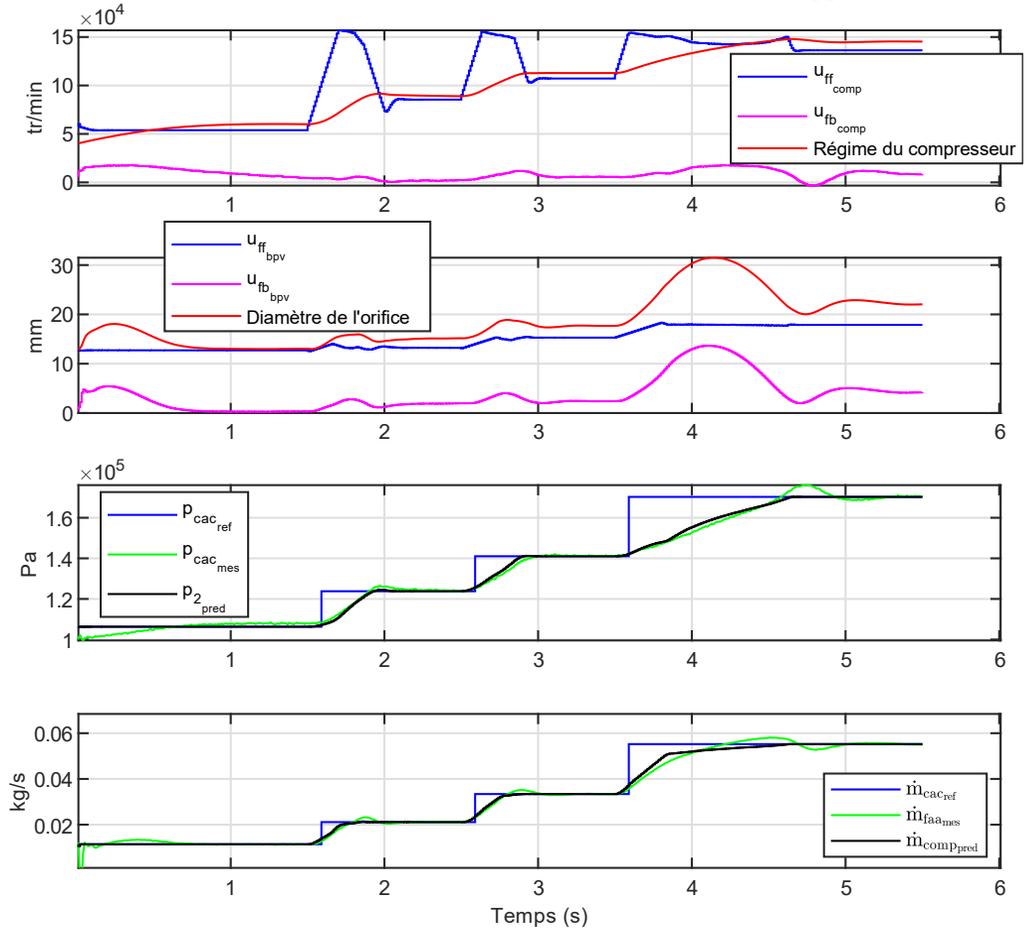
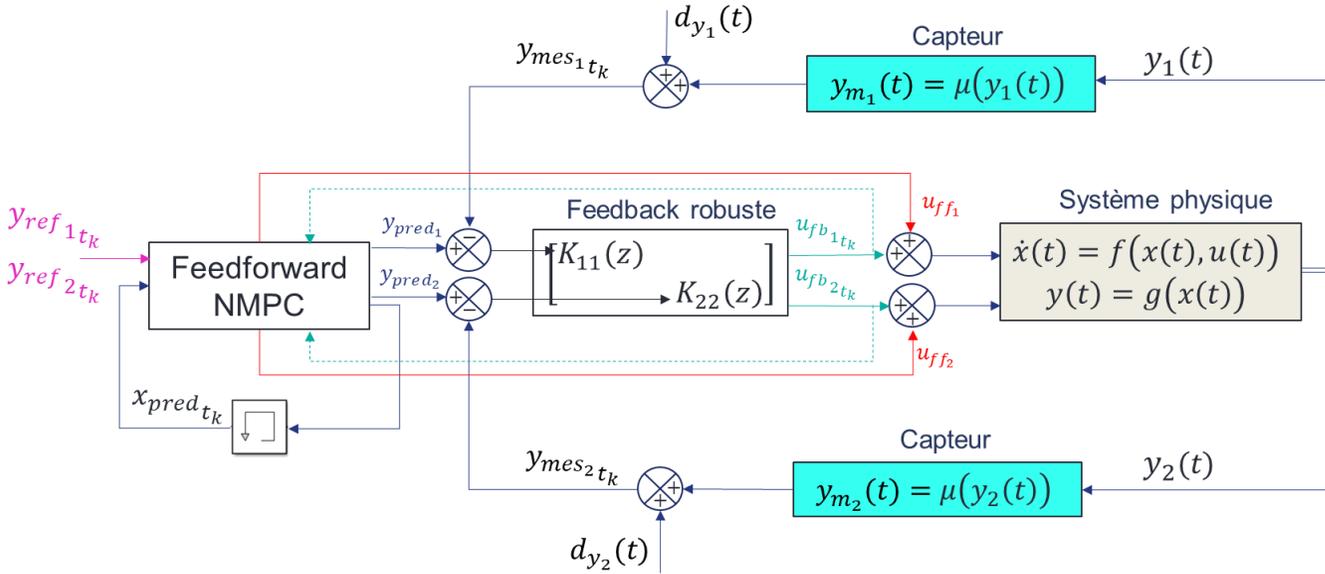
$$-5000 \frac{tr}{min} < \Delta u_{comp}(i) \cdot \Delta t < 5000 \frac{tr}{min}; \quad -0.1 \text{ mm} < \Delta u_{bvp}(i) \cdot \Delta t < 0.1 \text{ mm}$$



Les prédictions FFNMPC ne traversent pas la ligne de pompage



Les prédictions FFNMPC convergent vers la ligne de référence optimale après des transitoires brutaux



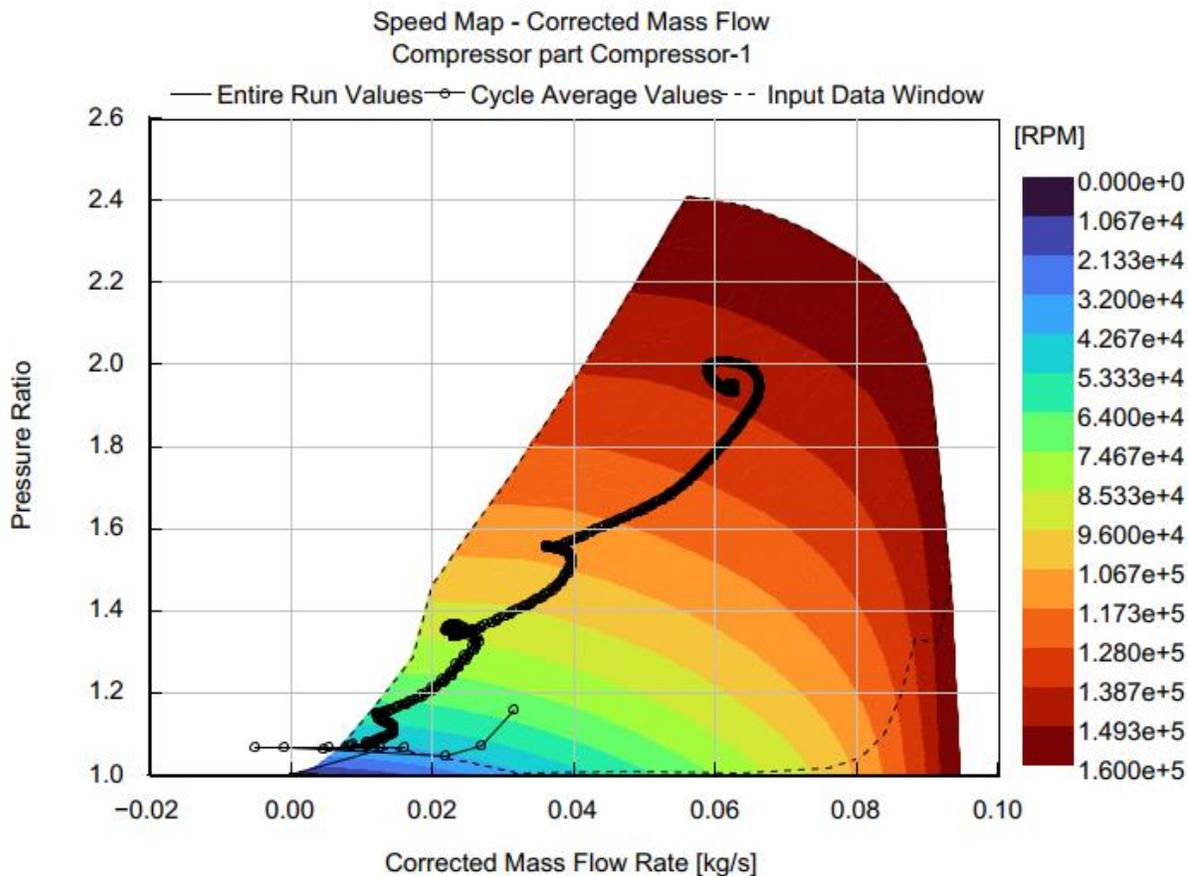
- Echantillonnage de la commande : 10 ms
- Horizon de prédiction N_p : 100 ms (10 points)
- Horizon de commande N_c : 100 ms (10 points)
- Bruits de mesure
 - $\pm 500 Pa$ ($\sigma = 200 Pa$)
 - $\pm 1.25 g/s$ ($\sigma = 6.10^{-5} kg/s$)
- Temps de réponse maximal
 - Pression : 1.56 s ; débit d'air : 1.31 s
- Dépassement maximal
 - Pression : 19.8 % ; débit d'air : 13.6 %

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\epsilon_{pmpc}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\epsilon_{qmpc}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{comp}(i) \right)_{norm}^2 + \left(\Delta u_{bpv}(i) \right)_{norm}^2 + 100d_{opt}^2 + d_{surge}^2$$

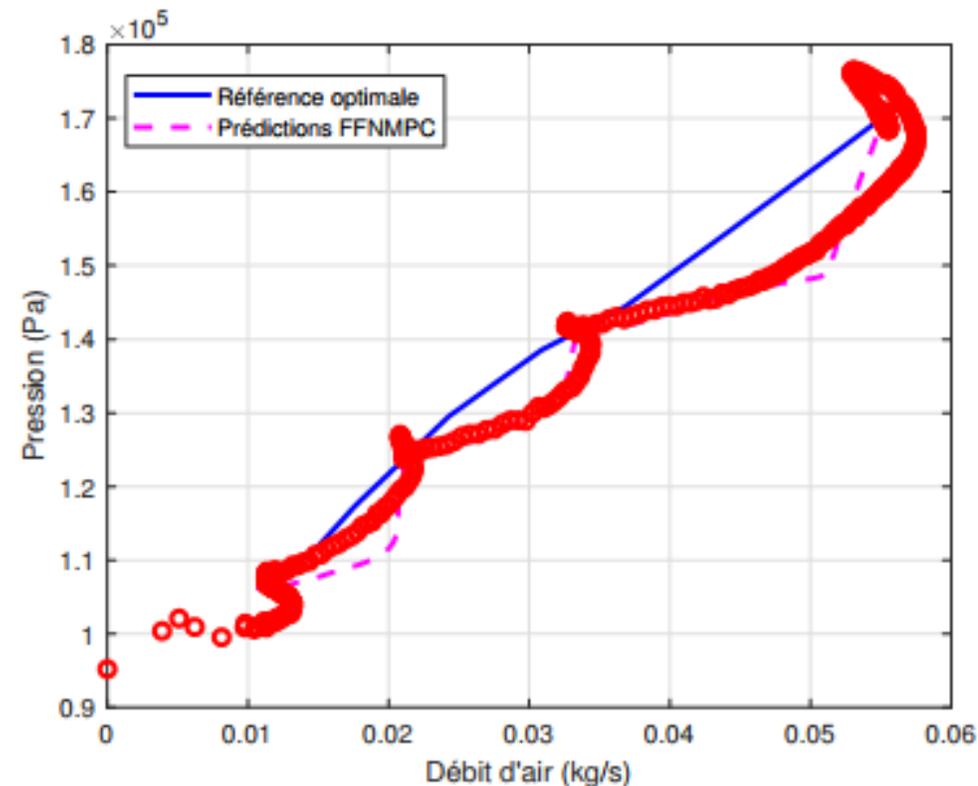
$$\epsilon_{pmpc}(i) = p_{ref}(i) - p_{comp}(i); \quad \epsilon_{qmpc}(i) = q_{ref}(i) - q_{comp}(i);$$

$$40000 \frac{tr}{min} < u_{comp}(i) < 160000 \frac{tr}{min}; \quad 2 mm < u_{bpv}(i) < 38 mm$$

$$-5000 \frac{tr}{min} < \Delta u_{comp}(i) \cdot \Delta t < 5000 \frac{tr}{min}; \quad -0.1 mm < \Delta u_{bpv}(i) \cdot \Delta t < 0.1 mm$$



Comme pour le système 0D, les prédictions FFMPC ne traversent pas la ligne de pompage



Comme pour le système 0D, les prédictions FFMPC s'adaptent aux niveaux de la commande feedback et restent proche de la ligne optimale de référence et de la prédiction FFMPC

- Etude de plusieurs solutions de robustification de la commande optimale MPC (objectif initial de Stellantis)
- Définition d'une architecture de commande combinant des approches NMPC et CRONE à la fois optimale (éventuellement anticipative) et robuste pour des systèmes non linéaires
- 2 brevets déposés sur la solution FFMPC et feedback robuste
- Démonstration temps-réel de la solution proposée au contrôle multivariable d'un système « bille sur plateau »
- Perspectives : étude des moyens permettant une implémentabilité temps-réel

MERCI DE VOTRE ATTENTION