



# Asservissement avec estimation temps réel du modèle du système : Application à des vannes EGR Diesel

Présenté dans le cadre du LMCS'08 le 17/04/08

**Pierre Olivier CALENDINI, Olivier HAYAT\*, François AIOUN (PSA)  
Cédric JOIN, Michel FLIESS (INRIA Alien)  
John MASSE\* (Appedge)**

PSA Peugeot Citroën : [olivier.hayat@mpsa.com](mailto:olivier.hayat@mpsa.com) - Tel : 01 56 47 36 34 - 18, rue des Fauvelles 92256 La Garennes Colombes Cedex

INRIA - ALIEN : [michel.fliess@polytechnique.fr](mailto:michel.fliess@polytechnique.fr) - Tel. 06 61 19 12 06 ; [cedric.join@cran.uhp-nancy.fr](mailto:cedric.join@cran.uhp-nancy.fr) - Tel. 03 83 68 44 75,

APPEDGE : [john.masse@appedge.com](mailto:john.masse@appedge.com) - Tel : 01 47 82 95 05 - 18-22 rue d'Arras 92000 Nanterre

## Résumé

- Depuis les années 90, la gestion électronique des moteurs thermique s'est généralisée dans un premier temps pour les moteurs à allumage commandé avec, par exemple, la généralisation du catalyseur 3 voies, puis en pour les moteurs diesel avec les développements sur l'injection à rampe commune puis le filtre à particule.
- En parallèle au développement de nouvelles fonctions, la recherche d'algorithmes plus performants d'asservissement reste une préoccupation centrale des concepteurs.
- Les fonctions embarquées dans les calculateurs modernes doivent permettre de régler de nombreux compromis.
- Ces compromis sont très souvent contraints par les actionneurs, c'est tout particulièrement le cas pour les asservissements des actionneurs tel que le boîtier papillon ou la vanne EGR.
- La diversité des actionneurs et les exigences attendues en terme de performance et de robustesse nécessitent souvent d'utiliser des lois de commandes dédiées (structure PID dédiées) et/ou d'identifier des modèles comportementaux (structure avec feedforward) complexes. Le cycle de conception est complexe : il passe par la conception de la loi de commande, sa mise au point, la validation de sa robustesse... Il n'est de plus pas rare que la définition mécanique de l'organe évolue durant la vie d'un projet. Les phases de calibration et de validation deviennent itératives et sont alors à refaire. Au final, ces travaux peuvent demander plusieurs mois de travail par projet moteur pour le constructeur.
- De plus, pendant le cycle de vie, la dérive et le vieillissement des actionneurs nécessitent de prendre des marges importantes qui pénalisent soit la dynamique de la vanne (diminution de celle -ci pour garantir une iso régulation) soit l'augmentation du coût de production de la vanne pour garantir mécaniquement l'isofonctionnalité en surclassant le dimensionnement de l'actionneur (ou en effectuant un tri des pièces).
- L'approche étudiée par PSA, au travers du groupe ALIEN et de la société Appedge est une technique particulière de calcul en temps réel des paramètres du régulateur, sans connaissance à priori du modèle mathématique de l'actionneur, pour que la loi de commande soit indépendante de la structure de la vanne.
- Cette nouvelle technologie de loi de commande nous libère de l'approche classique d'identification des paramètres et permet de décorrélérer la solution de contrôle des performances de l'actionneur. Les premiers résultats avec essais moteur de cette nouvelle technique sont prometteurs. Elle permet entre autre un gain de temps de mise en œuvre considérable.
- Cette nouvelle technologie de contrôle/commande rentre dans le cadre de la rationalisation et de l'unification des méthodologies de développement de PSA dans le but d'améliorer les performances des systèmes et de diminuer les coûts de production tout en favorisant l'innovation.

## Plan de l'exposé

- **Contexte Problématique**
  - Boucle d'air moteur Diesel suralimenté
  - Compromis et exigences
  - Contrôle rapproché des actionneurs
- **Méthodologie pour réaliser l'asservissement de la vanne EGR**
  - Dérivateur numérique
  - Commande sans modèle
  - Génération de code temps réel multi-cible
- **Application industriel : Asservissement d'une vanne EGR**

# Le moteur Diesel au cœur de ses prestations

Moteur 1.6 HDi 16V



## Prestations Moteur

Dépollution

Consommation

Performance

Bruit / acoustique

Agrément de conduite

## Qualité

Fiabilité

Robustesse

## Coût

## Délais

Processus de conception

Temps de Mise au point

## Sous Systèmes

### Injection / Combustion

Chambre de combustion  
Injecteurs  
Common rail ...

### Post-traitement

Catalyseur d'oxydation  
Filtre à particules  
...

### Suralimentation

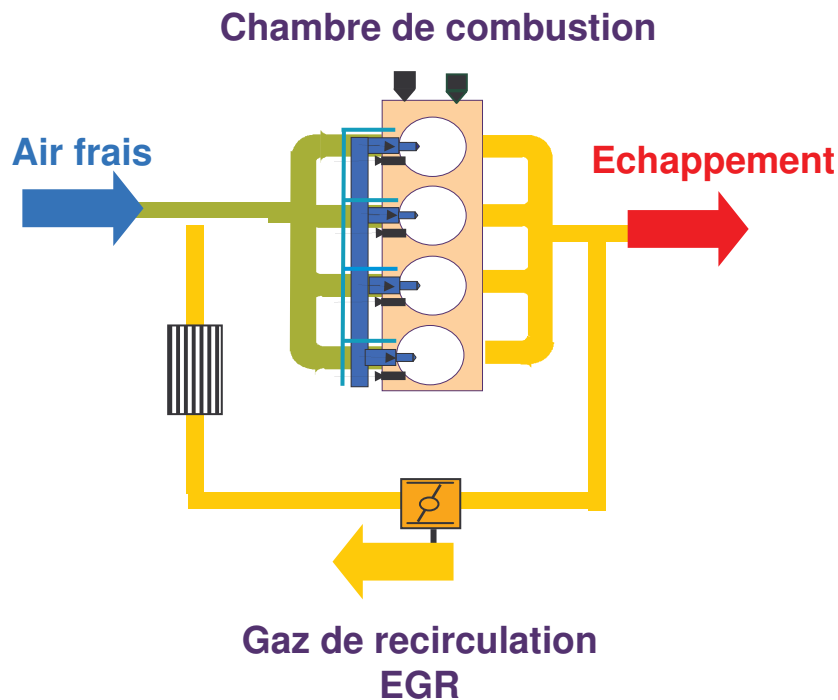
Turbocompresseur

### Système EGR

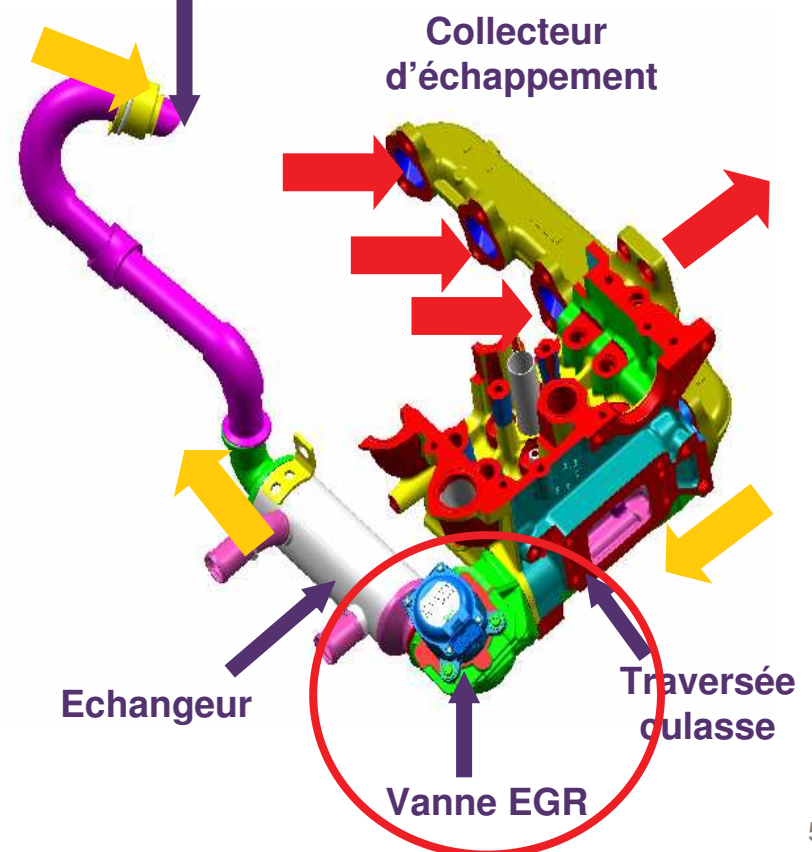
# Le système de recirculation des gaz d'échappement : EGR

**Principe**

Dilution des gaz admis dans le cylindre pour diminuer la concentration en O<sub>2</sub> dans la chambre de combustion

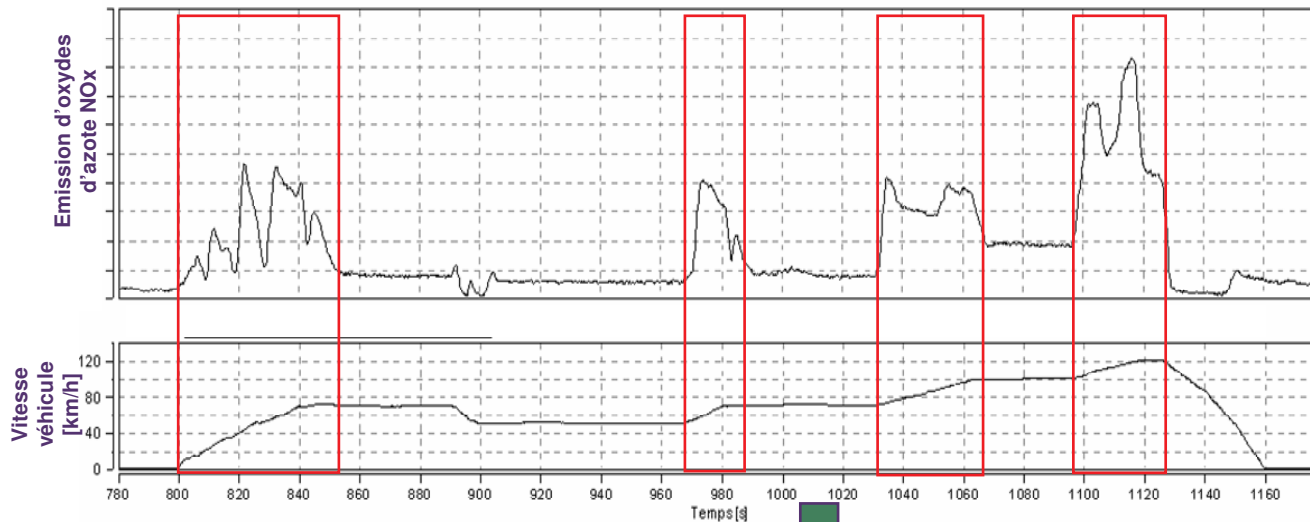


Vers le collecteur d'admission

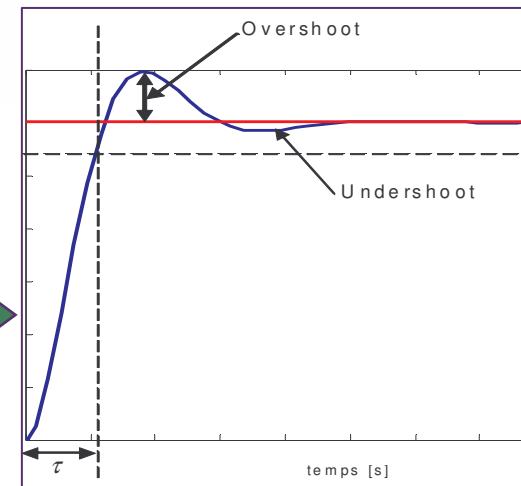


# Problématique de contrôle de la vanne EGR

- La maîtrise de l'EGR en transitoire est fondamentale pour l'atteinte des objectifs de dépollution des moteurs Diesel

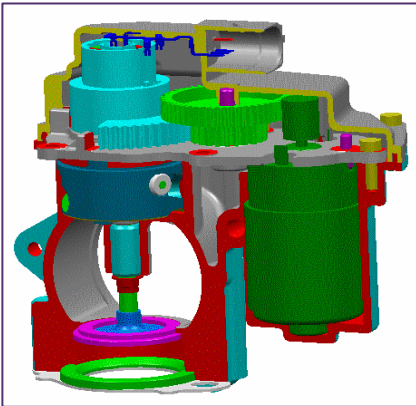


**Fortes contraintes sur le contrôle en position**  
**→ Temps de réponse / Dépassements**

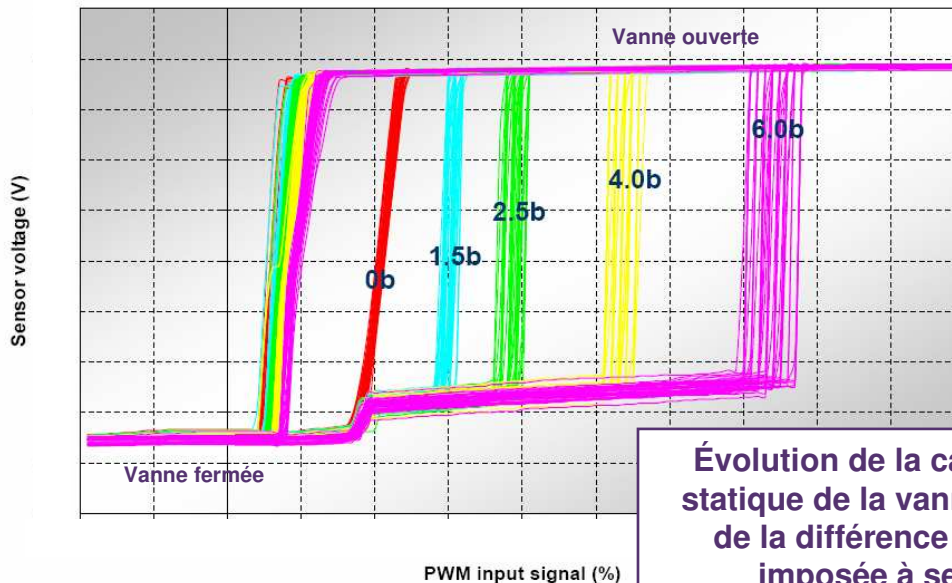


# Problématique de contrôle de la vanne EGR

- Vanne EGR = Système électromécanique complexe



- Système non linéaire
- Soumis à un environnement changeant :
  - Variations thermiques
  - Fortes différences de pressions
  - Phénomènes pulsatoires
- Dispersions / Dérives

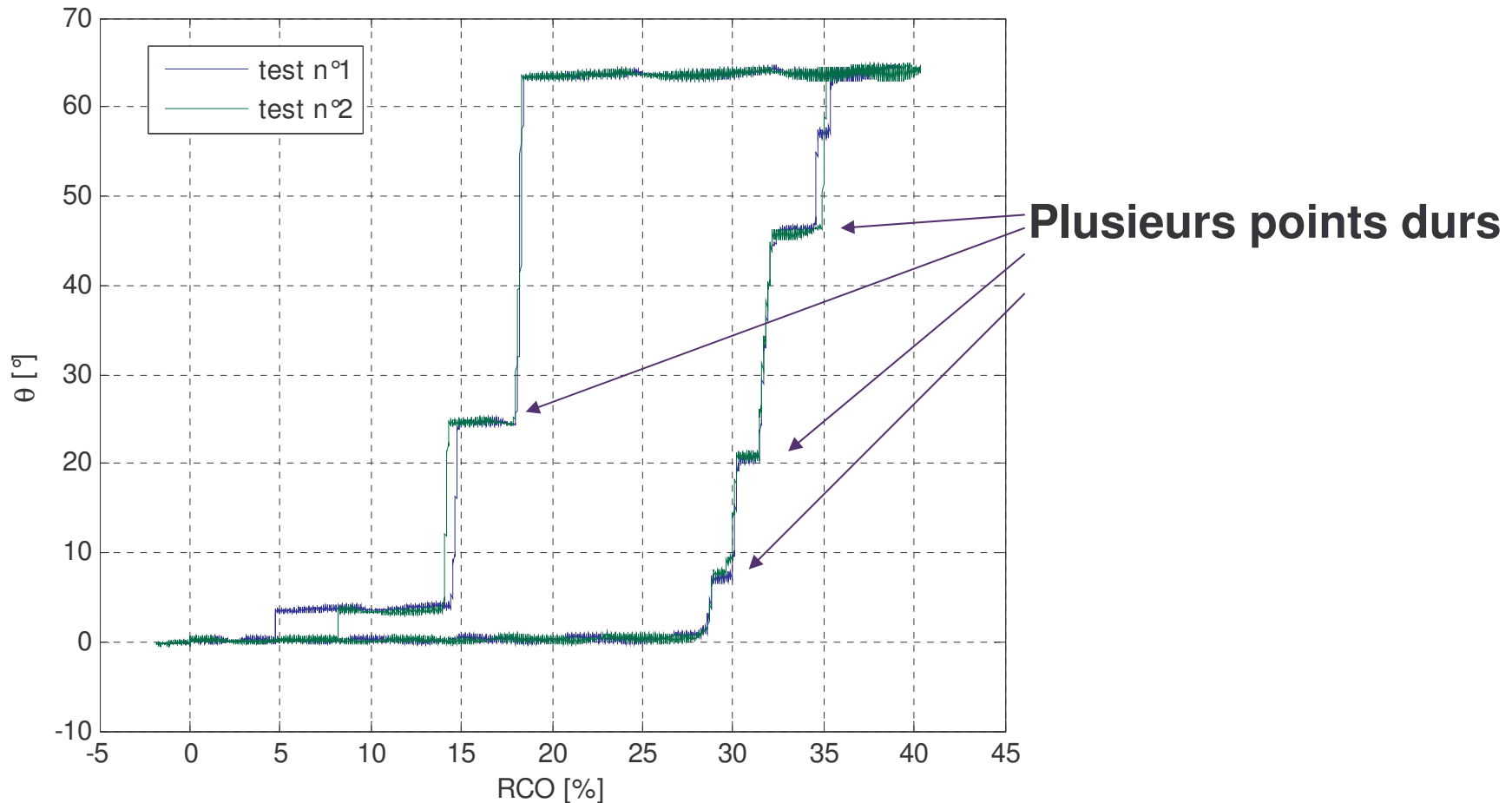


Évolution de la caractéristique statique de la vanne en fonction de la différence de pression imposée à ses bornes



# Problématique de contrôle de la vanne EGR

- **Phénomènes de frottement complexes**



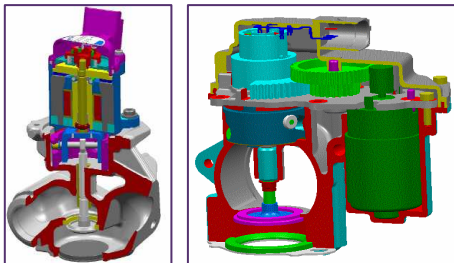


# Problématique de contrôle de la vanne EGR

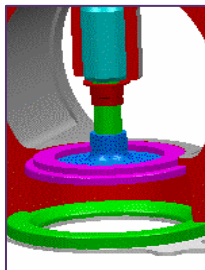
- **Contraintes industrielles fortes**

## Forte diversité des systèmes et des fournisseurs

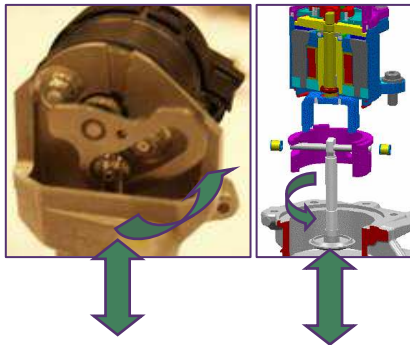
Moteur couple / courant continu



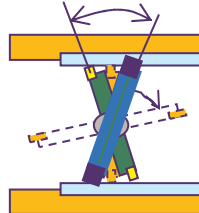
soupape



Transmission de mouvement



papillon



Figer la loi de commande avant que l'actionneur ne soit définitivement choisi

Evolution du design de la pièce en cours de projet

→ Calibration itérative du contrôle de l'actionneur

→ **Plusieurs mois de travail par projet moteur**

Plusieurs projets en parallèle

# Un Compromis difficile !

## Prestations Moteur

Dépollution

Consommation

Bruit / acoustique

Agrément de conduite

## Système électromécanique complexe

Système non linéaire

Dispersions

## Qualité

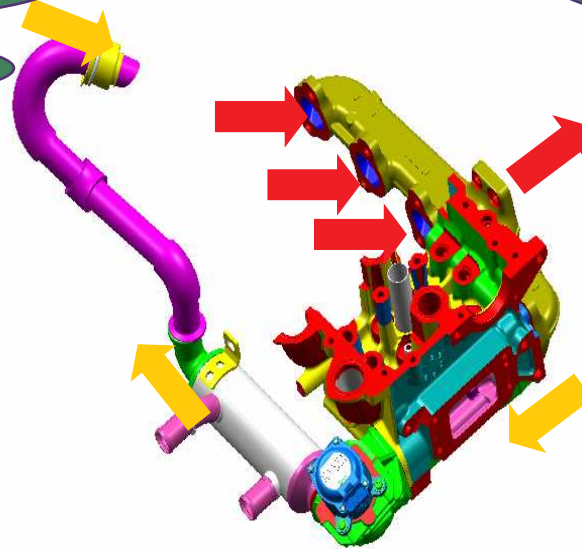
Fiabilité

Robustesse

## Délais

Processus de conception

Temps de Mise au point



**Comment améliorer ce processus par l'introduction d'algorithmes plus performants ?**



# Méthodologie pour réaliser l'asservissement de la vanne EGR

- Dérivateur numérique
- Commande sans modèle
- Génération de code temps réel multi-cible

## Quelques références bibliographiques

- M. Fliess, C. Join, H. Sira-Ramirez, *Complex Continuous Nonlinear Systems: Their Black Box Identification And Their Control*, 14th IFAC Symposium on System Identification, SYSID, Newcastle – Australia, 2006, <http://hal.inria.fr/inria-00000824>
- M. Fliess, C. Join, M. Mboup, H. Sira-ramirez, *Vers une commande multivariable sans modèle*, Dans Conférence internationale francophone d'automatique, CIFA, Bordeaux – France, 2006, <http://hal.inria.fr/inria-00001139>
- R. Bourdais, M. Fliess, C. Join, W. Perruquetti, *Towards a model-free output tracking of switched nonlinear systems*, 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, NOLCOS 2007, Pretoria – South Africa, 2007, <http://hal.inria.fr/inria-00147702>
- P.-A. Gédouin, C. Join, E. Delaleau, J.-M. Bourgeot, S. Arbab Chirani, S. Calloch, *Model-free control of shape memory alloys antagonistic actuators*, 16th IFAC World Congress on Automatic Control, Seoul – Korea, 2008, <http://hal.inria.fr/inria-00261891>
- C. Join, J. Masse, M. Fliess, *Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur - Model-free control of an engine throttle: a preliminary study*, Journal européen des systèmes automatisés (JESA), v. 42, pp. 337-354, 2008, <http://hal.inria.fr/inria-00187327>

# Dérivateurs numériques

- Méthodes d'estimation rapides
  - Avantages
    - **"Intégrer pour dériver"** : l'estimée s'exprime à l'aide d'intégrales itérées (filtres passe-bas)
    - **Caractérisations statistiques des bruits pas nécessaires** : souvent difficiles à obtenir avec des processus réels
    - **Pas de retard** comme pour les filtres classiques : temps de réponse, bande passante, pente du filtre
    - **Justifications mathématiques** : analyse non standard
  - Classes d'utilisation
    - Estimation d'état, estimation de paramètres, diagnostic, commande et accomodation de défauts, débruitage, ...
  - Méthode mathématique
    - Calcul opérationnel utilisé (transformée de Laplace)

Exemple : Estimation du coefficient  $a_1$  de :

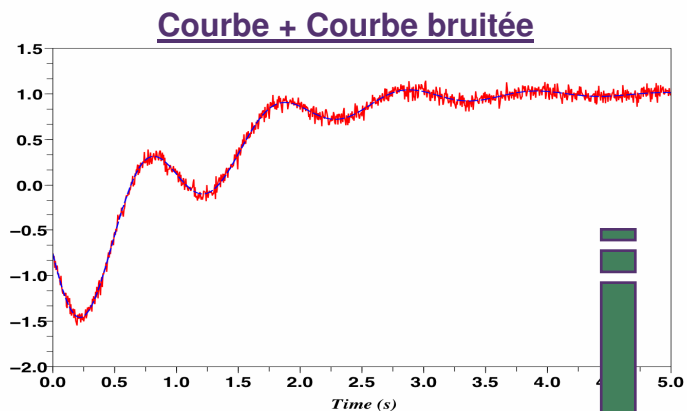
$$x(t) = a_0 + a_1 t, \quad t \geq 0$$



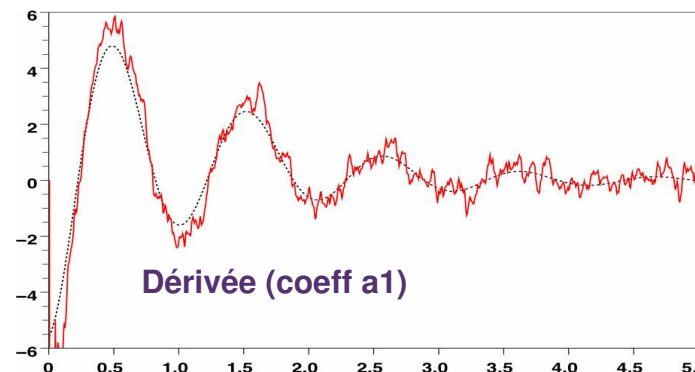
$$a_1 \frac{t^3}{6} = \int_0^t (t - \tau)(1 + \tau)x(\tau) d\tau - \int_0^t \frac{(t - \tau)^2}{2} x(\tau) d\tau$$

# Estimation de la dérivée

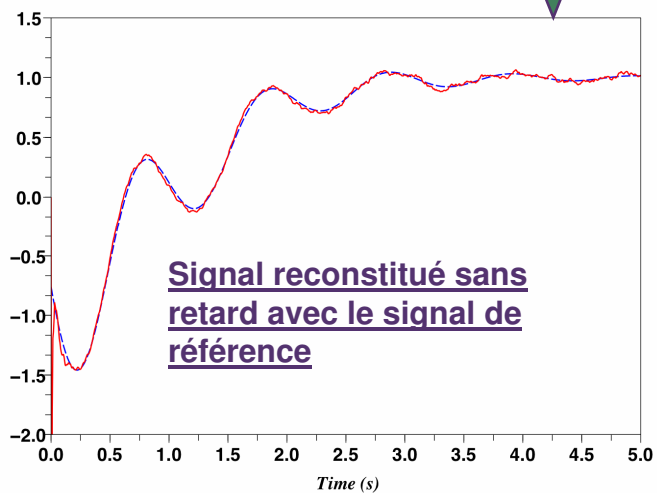
- Illustration des performances



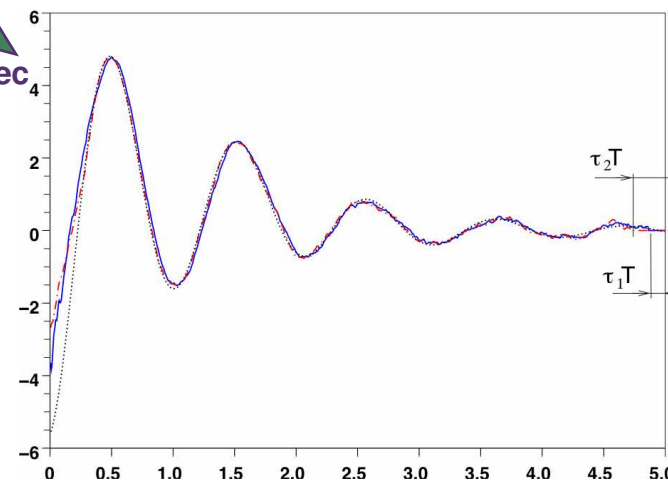
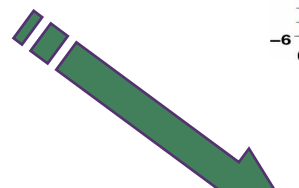
Dérivation Alien



Reconstitution du signal  
Élimination du bruit



Dérivation Alien avec un retard autorisé



# La commande sans modèle

- **Principe**

- Modèle « ultra » local

$$\dot{y} = F + \alpha.u + \beta$$

- Estimation de la dérivée et de F

$$F = [\dot{y}]_e - \alpha.u - \beta$$

- Synthèse de commande

$$u = -\frac{1}{\alpha} (-F - \beta) + \dot{y}^* + \text{PID}(y - y^*)$$

- La trajectoire  $y^*$  et sa dérivée  $\dot{y}^*$  sont calculées à partir de polynômes
- Le paramètre alpha est un paramètre proportionnalité
- Les coefficients du PID sont choisis de manière classique

# La commande sans modèle

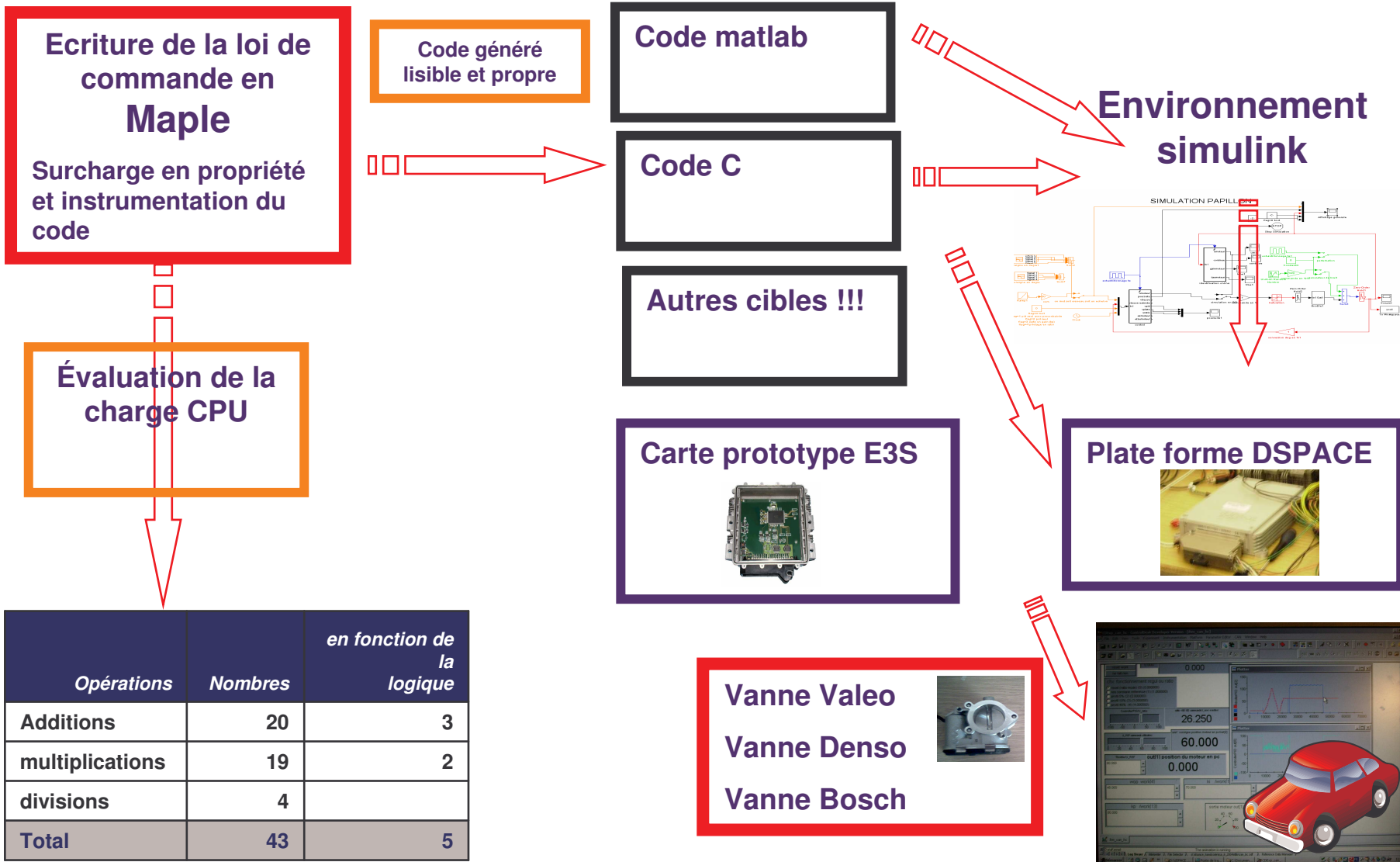
- **Intérêt Fonctionnel : découplage entre la régulation et la poursuite**
  - **Poursuite** = création d'une trajectoire de référence entre 2 changements de consigne
  - La poursuite est choisie par l'ingénieur (overshoot / undershoot, temps d'établissement) afin de satisfaire les spécifications en boucle fermée
- **Utilisation et performance**
  - **Simplicité du réglage** (PI + alpha)
    - 3 paramètres pour toute la plage de fonctionnement : réglables sans compétence particulière
  - **Charge CPU minime**
    - voir Maple
- **Loi multi-système**
  - SISO et MIMO
  - Linéaires ou non linéaires
- **Robustesse**
  - **Vieillessement, usure, variation du modèle, défauts** sont pris en compte de manière automatique (sans réglage, sans modèle)
  - Avec des **hypothèses comparables aux études classiques**, les marges de phase et de gain peuvent être établies

# La commande sans modèle

- **Intérêts industrielle**
  - Pas de modèle du système nécessaire pour la loi de commande.
  - Temps de mise au point réduit
    - Une à deux heures de réglage
  - Une structure de commande et un code temps réel unique
- **Limitation pour certain cas**
  - systèmes à phase non minimale
- **Validation**
  - Comportement comparable en simulation / essais
  - **Essais sur banc moteurs concluants → Performances remarquables**



# Génération de code multi-cibles



Évaluation de la charge CPU

Opérations	Nombres	en fonction de la logique
Additions	20	3
multiplications	19	2
divisions	4	
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>5</b>

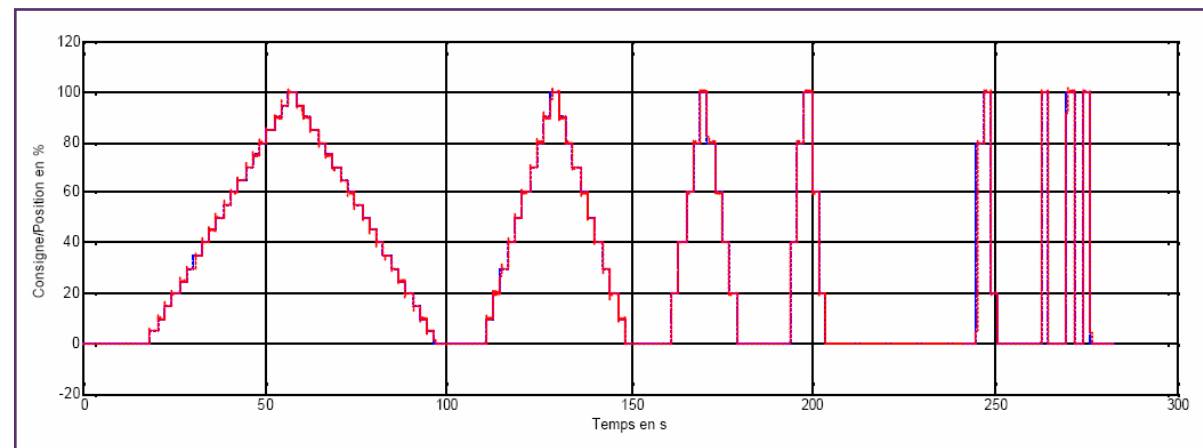
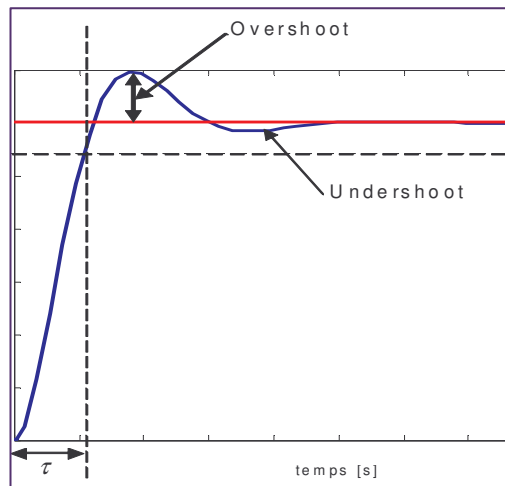
# Asservissement vanne EGR / Essais sur banc moteur

- **Essais**

- succession de créneaux de consigne de position d'amplitude variable
- Différents points de fonctionnement moteur

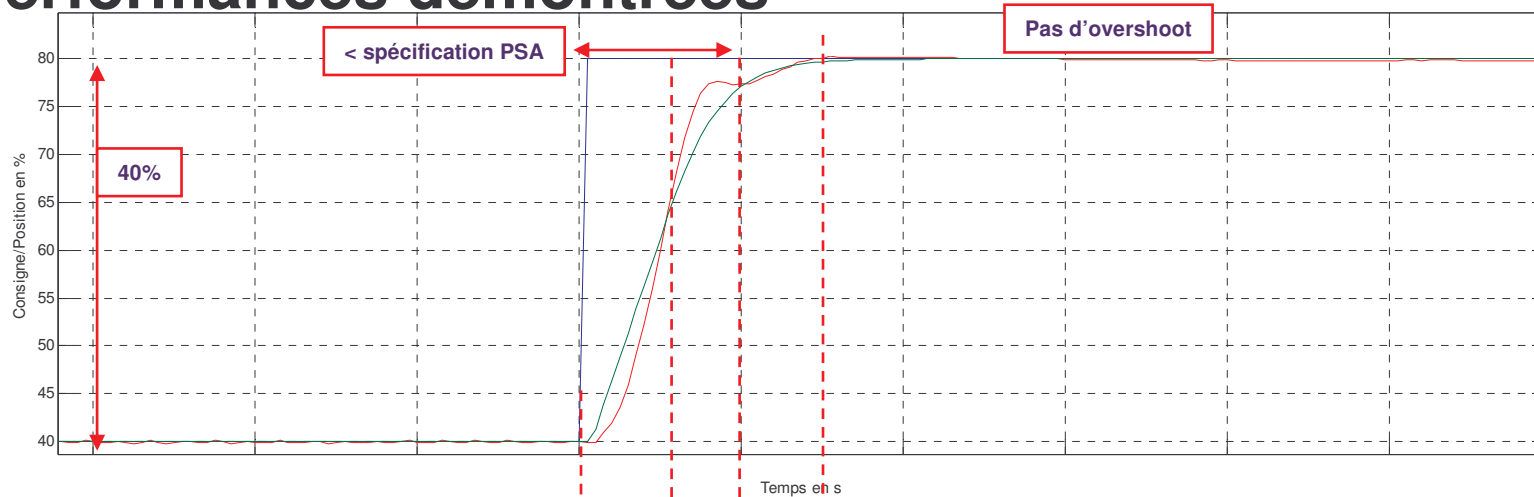
- **Critères de performance**

- Temps de réponse
- Overshoot / undershoot

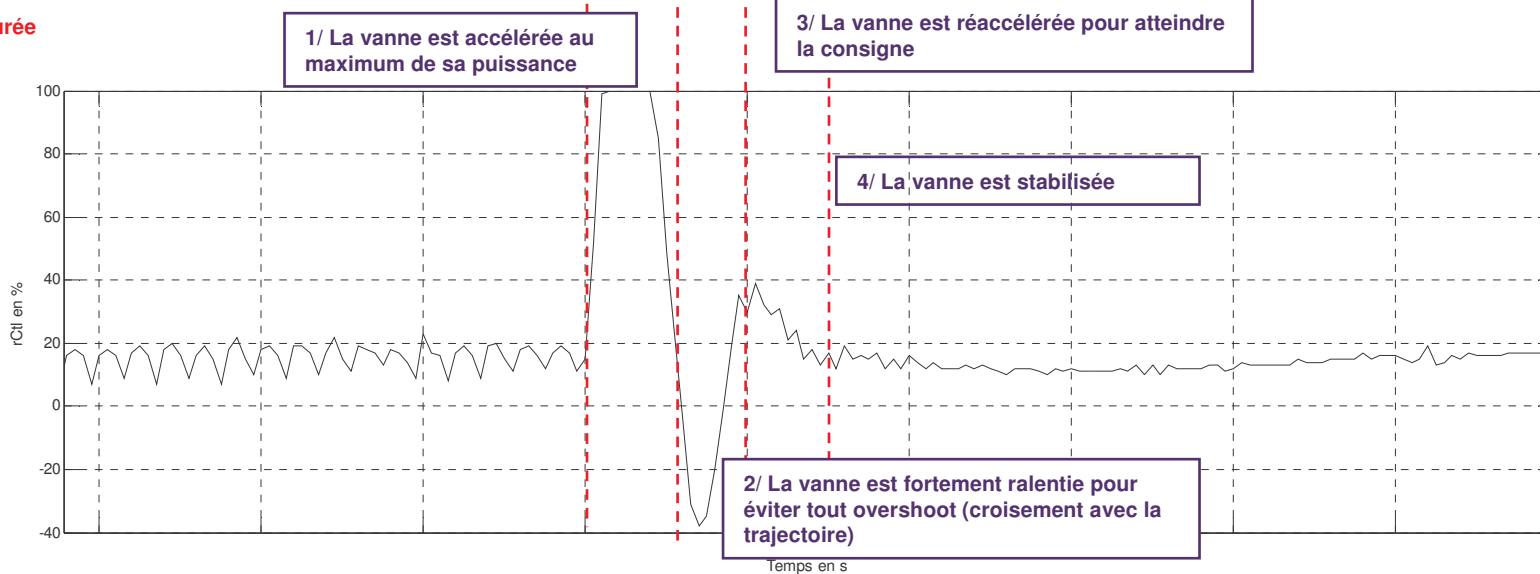


# Asservissement vanne EGR / Essais sur banc moteur

## ● Performances démontrées

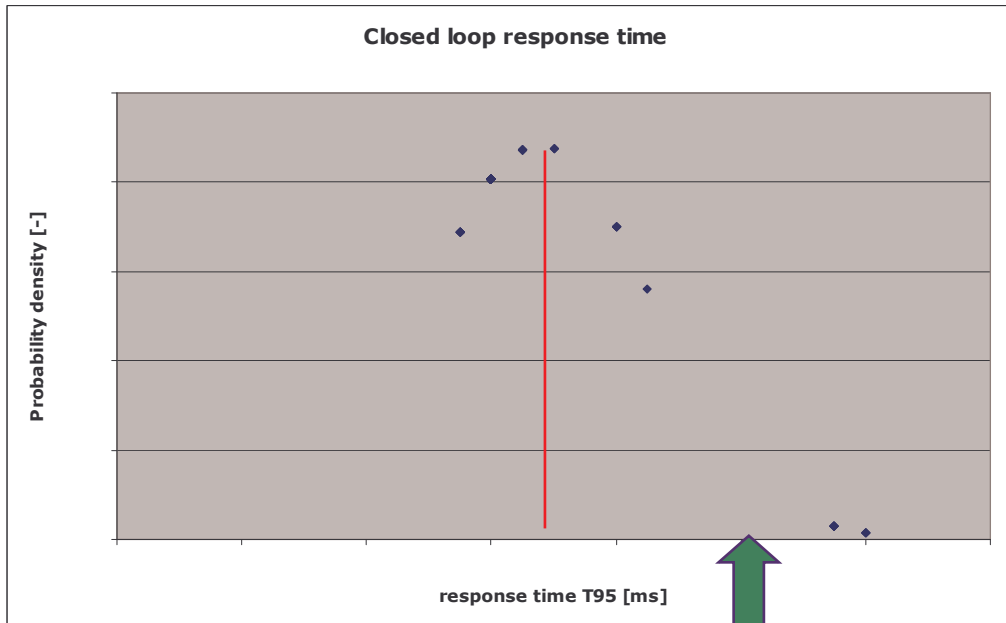
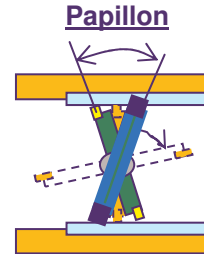


Consigne  
Poursuite  
Position mesurée  
PWM

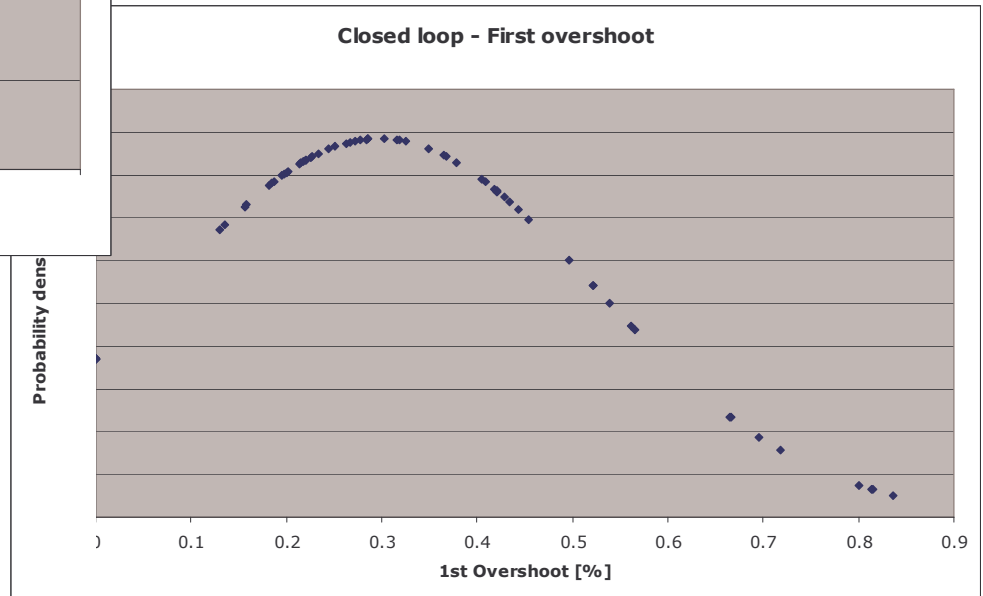


# Asservissement vanne EGR / Essais sur banc moteur

- Performance démontrée – Vanne EGR Papillon
  - 1<sup>ère</sup> calibration : pas d'overshoot toléré

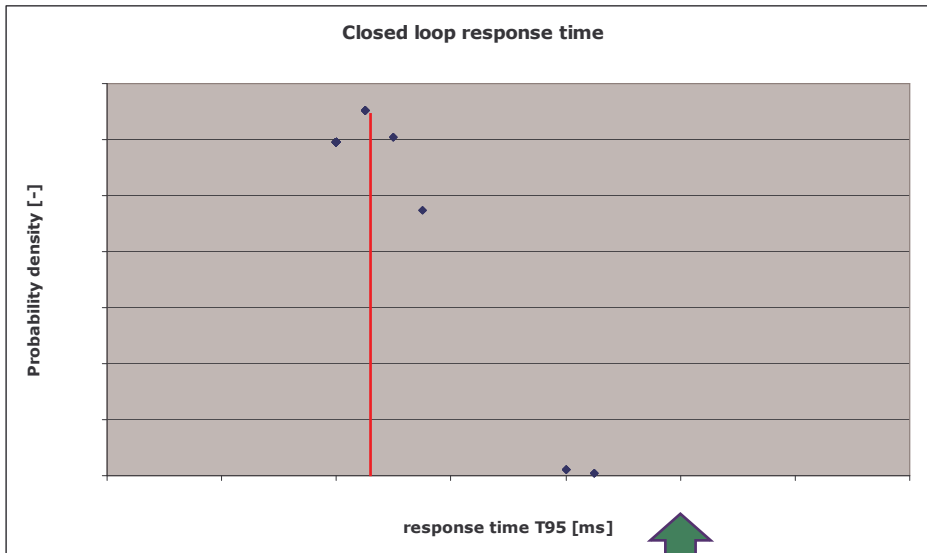
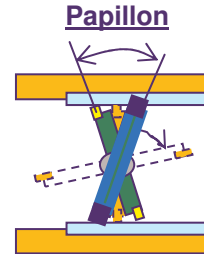


Spécification PSA



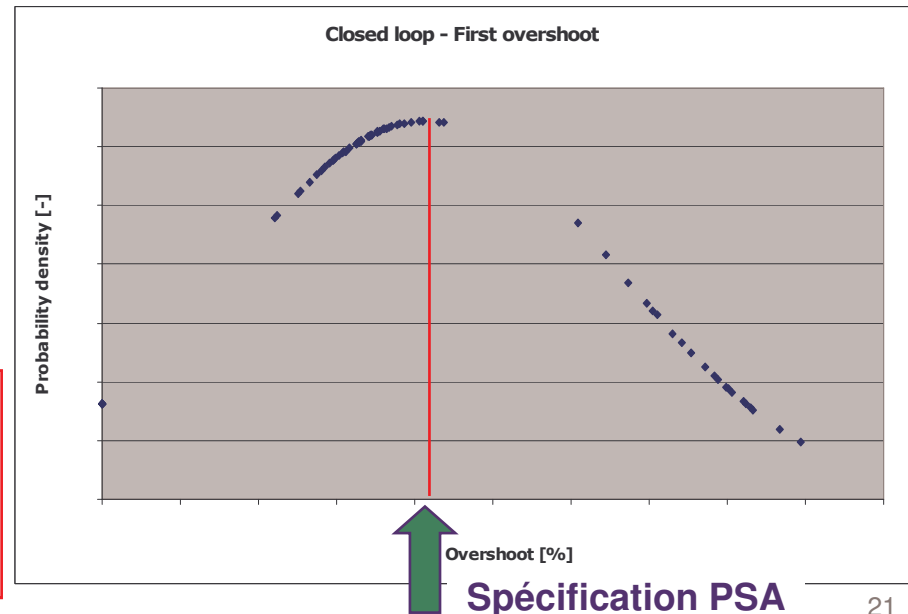
# Asservissement vanne EGR / Essais sur banc moteur

- Performance démontrée – Vanne EGR Papillon
  - 2<sup>ème</sup> calibration : meilleur temps de réponse sous contrainte d'overshoot



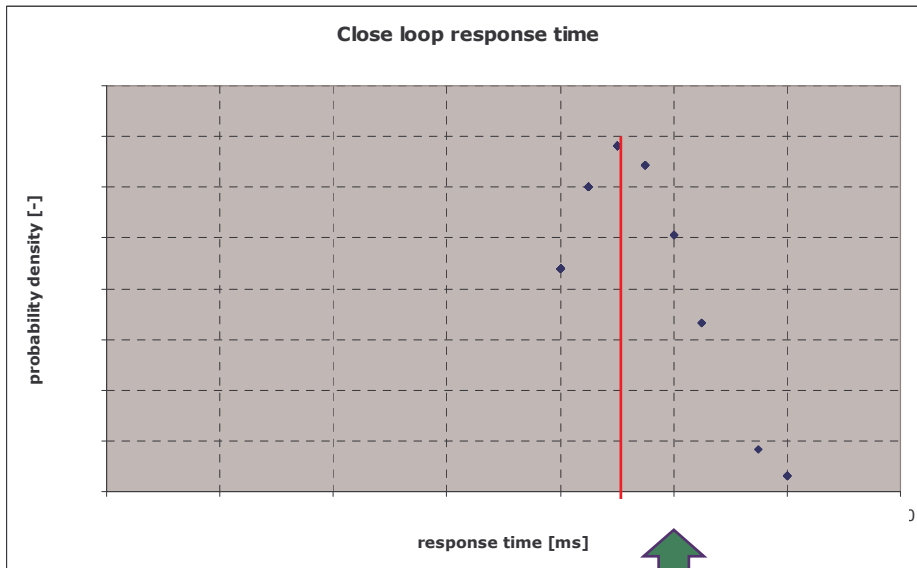
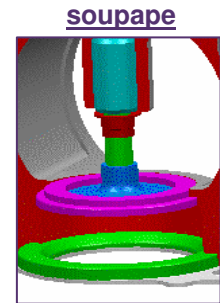
↑  
Spécification PSA

**La commande sans modèle est au meilleur état de l'art en terme de performance dynamique pour l'asservissement des vannes EGR**



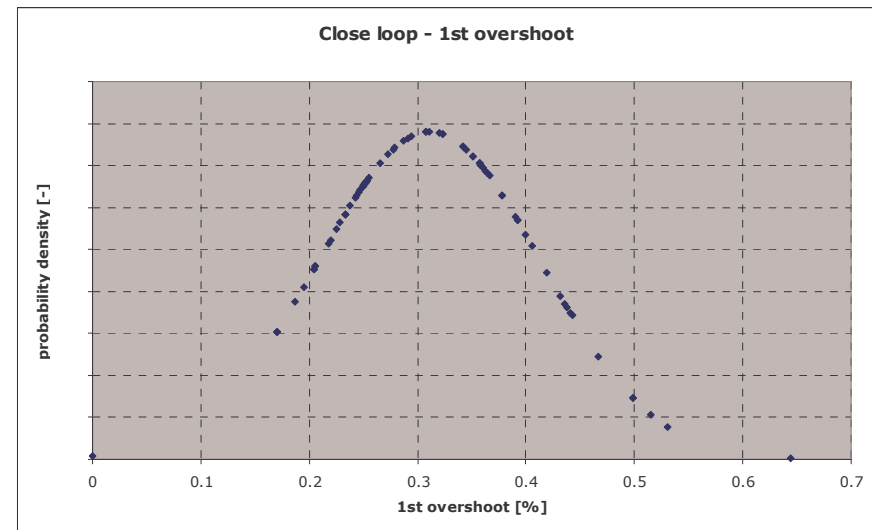
# Asservissement vanne EGR / Essais sur banc moteur

- Performance démontrée – Vanne EGR Soupape



↑  
Spécification PSA

**Les performances sont démontrées sur deux technologies d'actionneurs**



# Conclusions

- **La commande sans modèle**
  - Technique particulière de calcul en temps réel des paramètres du régulateur
    - **sans connaissance à priori du modèle mathématique de l'actionneur**
    - Par l'utilisation de **méthodes de dérivées numériques**
  - Permet de se libérer de l'identification des paramètres
  - Permet de décorrélérer la solution de contrôle des performances de l'actionneur
- **Les premiers résultats avec essais moteur sont prometteurs. Elle permet un gain de performance et de temps de mise en œuvre considérable.**