



# LES DIAPOSITIVES DE LA PRESENTATION

## ADV – MARSEILLE – JUIN 2005

**Réseau de neurones pour la  
Commande optimale des émissions  
d'un moteur Diesel**

Présenté par:  
**Rafic Younès**



08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

### Plan

- Problématique
- Pollution et effets sur la santé
- Le cycle Diesel
- Techniques de dépollution
- Stratégie de commande
- Conclusions et perspectives

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

### Problématique

Perspectives actuelles des constructeurs d'automobiles :

- Réduction des émissions polluantes.
- Amélioration de la consommation spécifique.
- Diminution des vibrations sonores.
- Allègement du poids.
- Amélioration du confort.

Notre objectif se situe au niveau de la contrainte :  
**réduction des émissions gazeuses de pollution.**

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

### Plan

- Problématique
- Pollution et effets sur la santé
- Le cycle Diesel
- Techniques de dépollution
- Stratégie de commande
- Conclusions et perspectives

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

### Pollutions et effets sur la santé

- Dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>
  - ◊ Effet de serre
- Monoxyde de carbone CO
  - ◊ Altère le transport d'oxygène vers les organes et les tissus
- Oxydes d'azote NO<sub>x</sub>
  - ◊ Irritent les poumons
  - ◊ Diminue la résistance aux infections respiratoires

08/10/2006

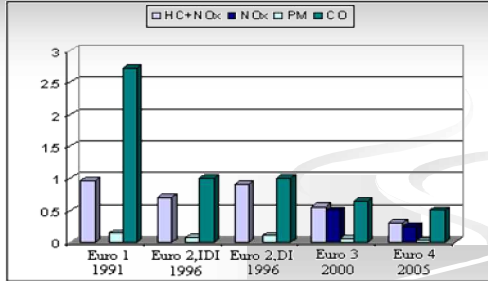
ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

### Pollutions et effets sur la santé

- Hydrocarbures HC
  - ◊ Irritent les muqueuses, les yeux et le nez
  - ◊ Attaque le système nerveux
- Particules de masse
  - ◊ Symptômes respiratoires
  - ◊ Aggravation de maladies respiratoires et cardio-vasculaires
  - ◊ Atteintes au tissu pulmonaires

08/10/2006

## Pollution et contraintes



Normes européennes de émissions pour les véhicules Diesel en g / km

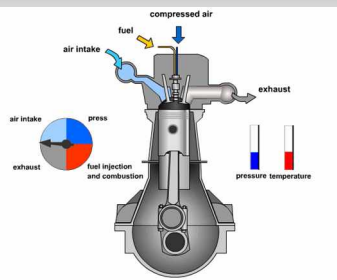
08/10/2006

## Plan

- Problématique
- Pollution et effets sur la santé
- Le cycle Diesel
- Technique de dépollution
- Stratégie de commande
- Conclusions et perspectives

08/10/2006

## Le cycle Diesel



08/10/2006

## Plan

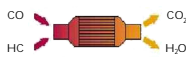
- Problématique
- Pollution et effets sur la santé
- Le cycle Diesel
- Techniques de dépollution
- Stratégie de commande
- Conclusions et perspectives

08/10/2006

## Techniques de dépollution

### • Catalyseur d'oxydation :

- Réduction des émissions CO et HC



### • Filtre à particules :

- Réduction des particules

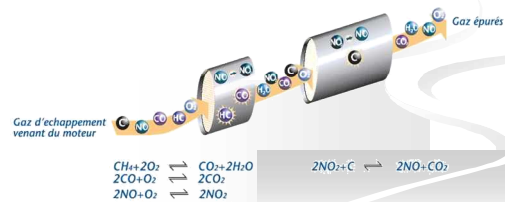


08/10/2006

## Techniques de dépollution

### 1 Système CRT :

- Combinaison d'un catalyseur d'oxydation et d'un filtre à particules.
- Réduction des HC, CO et des particules.



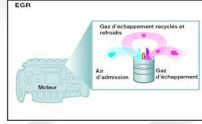
08/10/2006

## Techniques de dépollution

- **EGR:**

Dilution du mélange frais par recyclage d'une quantité des gaz d'échappement.

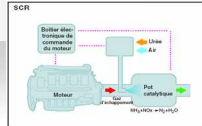
- Réduction de la température
- Réduction de la quantité d'O<sub>2</sub>
- Réduction des NOx



- **SCR:**

Introduction d'ammoniac aux gaz d'échappement.

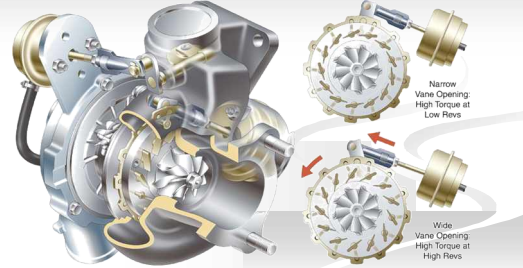
- Amorçage d'une réaction chimique
- Réduction des NOx



08/10/2006

## Le Turbo à géométrie variable

VNT (Variable Nozzle Turbine) Turbo

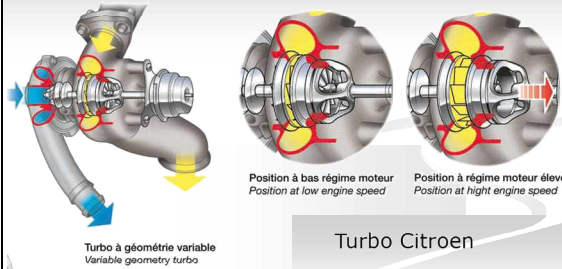


Volvo 5-cylinder Common Rail Diesel

08/10/2006

**VOLVO**  
Volvo Car Corporation

## Le Turbo à géométrie variable



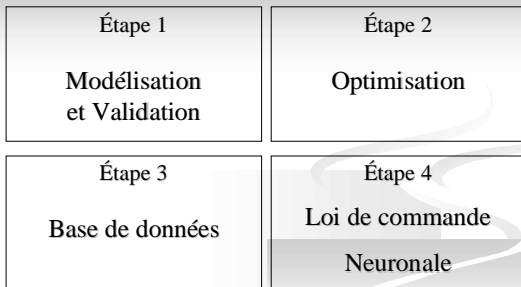
08/10/2006

## Plan

- Problématique
- Pollution et effets sur la santé
- Le cycle Diesel
- Techniques de dépollution
- Stratégie de commande
- Conclusions et perspectives

08/10/2006

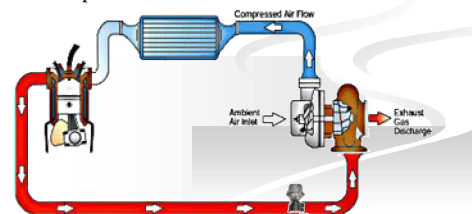
## Stratégie de commande



08/10/2006

## Modélisation

- Le moteur Diesel est formé des systèmes suivants:
  - Le collecteur d'admission
  - Le moteur et les solides en mouvement
  - Le collecteur d'échappement
  - Le turbocompresseur



08/10/2006

## Modélisation

Collecteur d'admission:

$$V_a \frac{dp_a}{dt} = r \cdot T_a \cdot (m_c - m_{ao})$$

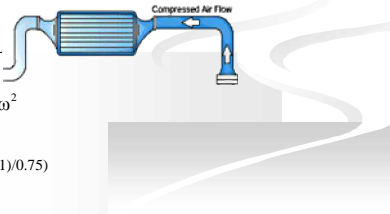
$$\dot{m}_{ao} = \eta_v \cdot \dot{m}_{ao,th}$$

$$\dot{m}_{ao,th} = \frac{N_{cyl} \cdot V_{cyl} \cdot \omega \cdot p_a}{4\pi}$$

$$\eta_v = \alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2$$

$$T_a = T_0 \left( 1 + \left( \frac{p_a}{p_0} - 1 \right) \cdot 0.75 \right)^{0.2857}$$

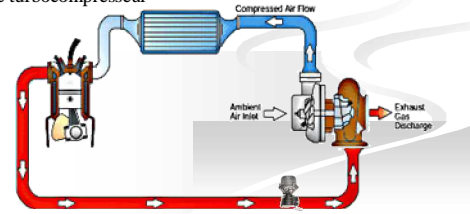
08/10/2006



## Modélisation

- Le moteur Diesel est formé des systèmes suivants:
  - Le collecteur d'admission
  - Le moteur et les solides en mouvement
  - Le collecteur d'échappement
  - Le turbocompresseur

08/10/2006



## Modélisation

Le moteur et les solides en mouvement:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J(\theta) \omega^2 \right) = P_i - P_b$$

$$P_i = \eta_i \cdot m_r \cdot P_{ci}$$

$$\eta_i = a_\lambda + b_\lambda \lambda + c_\lambda \lambda^2$$

$$\lambda = \frac{m_{ao}}{m_r}$$

$$P_b = C_r \omega + (A + B \cdot p_a + C \cdot \bar{\omega}) \cdot C_y \cdot \bar{\omega}$$

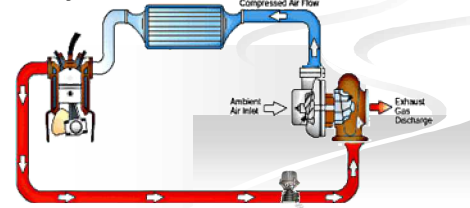
08/10/2006



## Modélisation

- Le moteur Diesel est formé des systèmes suivants:
  - Le collecteur d'admission
  - Le moteur et les solides en mouvement
  - Le collecteur d'échappement
  - Le turbocompresseur

08/10/2006



## Modélisation

Le collecteur d'échappement :

$$V_e \frac{dp_e}{dt} = r \cdot T_e \cdot (m_a - m_e)$$

$$m_a = m_t + m_{ao}$$

$$\dot{m}_{ao} = \eta_v \cdot \dot{m}_{ao,th}$$

$$\dot{m}_{ao,th} = \frac{N_{cyl} \cdot V_{cyl} \cdot \omega \cdot p_a}{4\pi}$$

$$\eta_v = \alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2$$

$$T_e = T_0 + \frac{1200}{1 + \lambda/15}$$

08/10/2006



## Modélisation

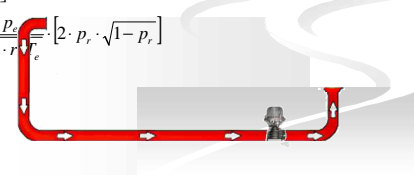
Le WASTE GATE :

$$A_{WG} = a_0 + a_1 \cdot p_a + a_2 \cdot p_a^2$$

$$p_r = \text{Max} \left[ \frac{p_a}{p_e}, 0.53 \right]$$

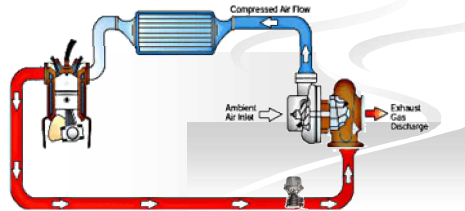
$$\dot{m}_{WG} = A_{WG} \cdot \frac{p_a}{\sqrt{\gamma} \cdot p_r} \cdot \left[ 2 \cdot p_r \cdot \sqrt{1 - p_r} \right]$$

08/10/2006



## Modélisation

- Le moteur Diesel est formé des systèmes suivants:
  - Le collecteur d'admission
  - Le moteur et les solides en mouvement
  - Le collecteur d'échappement
  - Le turbocompresseur



08/10/2006

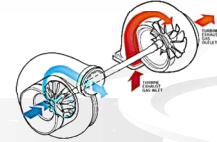
## Modélisation

Le turbocompresseur :

Il est composé de trois sous-système :

- Compresseur
- Turbine
- Couplage mécanique :

$$I_{tc} N_{tc} \frac{dN_{tc}}{dt} = (\eta_m P_t - P_c)$$



08/10/2006

## Modélisation

Le compresseur :  $P_c = \dot{m}_c C_p T_0 \left( (\pi_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c}$

Débit d'air

$$\dot{m}_c = \phi \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \frac{\pi}{4} D_c^2 U_c$$

$$U_c = \frac{\pi}{60} D_c N_c$$

$$\phi = \frac{k_1 \Psi - k_2}{k_2 + \Psi}$$

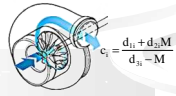
$$k_1 = k_{11} + k_{12} M$$

$$M = \frac{U_c}{\sqrt{\gamma R T_0}}$$

$$\Psi = \frac{C_p T_0 \left( (\pi_c)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{0.5 U_c^2} \quad \pi_c = \frac{P_c}{P_0}$$

Rendement

$$\eta_c = c_0 + c_1 \phi + c_2 \phi^2$$



08/10/2006

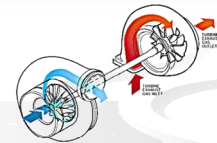
## Modélisation

Le turbocompresseur :

Il est composé de trois sous-système :

- Compresseur
- Turbine
- Couplage mécanique :

$$I_{tc} N_{tc} \frac{dN_{tc}}{dt} = (\eta_m P_t - P_c)$$



08/10/2006

## Modélisation

La turbine :  $P_t = \dot{m}_t C_p T_1 \left( 1 - (\pi_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \eta_t$

Débit d'air

$$\dot{m}_t = \begin{cases} A_t \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \frac{2\gamma_c}{\sqrt{\gamma_c-1}} \left( (\pi_t - g)^{\frac{1}{\gamma_c}} - (\pi_t - g)^{\frac{\gamma_c-1}{\gamma_c}} \right) & \text{pour } \pi_t < p_{c,m} \\ A_t \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \frac{2\gamma_c}{\sqrt{\gamma_c-1}} \left( (p_{c,m} - g)^{\frac{1}{\gamma_c}} - (p_{c,m} - g)^{\frac{\gamma_c-1}{\gamma_c}} \right) & \text{pour } \pi_t > p_{c,m} \end{cases}$$

$$A_t = \frac{k_{t1}}{\pi_t} + k_{t2}$$

$$k_{t1} = k_{t11} \frac{N_t}{60 \sqrt{T_1}} + k_{t12}$$

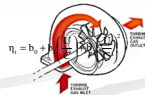
$$\pi_t = \frac{P_t}{P_1}$$

Rendement

$$\eta_t = b_1 + \frac{b_2}{k_{t2} - N_t}$$

$$b_1 = \frac{k_{t1} + k_{t2} N_t}{k_{t2} - N_t}$$

$$\frac{U_t}{C} = \frac{\pi N D}{60 \sqrt{2 C_p T_1 \left( 1 - (\pi_t)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}}$$



08/10/2006

## Modélisation

L'opacité :



$$Opacity = 10 \cdot \omega \cdot \left( \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_t} \right)^{-1.258}$$

08/10/2006

## Modélisation

Le moteur Diesel sera modélisé par cinq équations différentielles:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J(\theta) \cdot \omega^2 \right) = P_i(\dot{m}_f, \bar{\omega}, p_a) - P_r(Cr, \bar{\omega}) \quad \frac{d\theta}{dt} = \bar{\omega}$$

$$V_s \frac{dp_a}{dt} = r \cdot T_s \left[ \dot{m}_c(N_{tc}, \pi_s) - \dot{m}_{so}(\bar{\omega}, p_s) \right]$$

$$V_c \frac{dp_c}{dt} = r \cdot T_c(T_s, \bar{\omega}, p_a) \left[ \dot{m}_{al}(\bar{\omega}, p_a) - \dot{m}_t(N_{tc}, p_c) \right]$$

$$I_{tc} N_{tc} \frac{dN_{tc}}{dt} = [\eta_m P_i(N_{tc}, p_c) - P_c(N_{tc}, p_a)]$$

$$Opacity = 10 \cdot \bar{\omega} \cdot \left( \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_f} \right)^{-1.258}$$

Les entrées sont le débit de carburant et le couple résistant, les sorties sont le régime moteur ( $\omega$ ), le régime du turbocompresseur ( $N_{tc}$ ), la pression à l'admission ( $p_a$ ) et la pression à l'échappement.

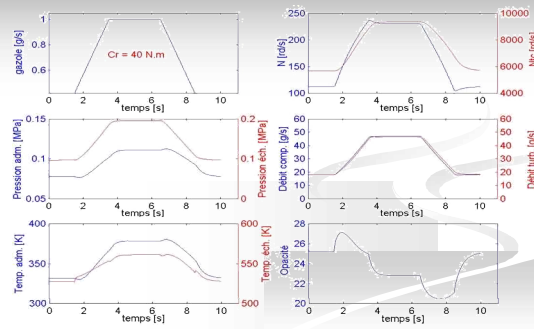
08/10/2006

## Validation

- RVI Turbo Diesel 620-45
- Renault Safran TD 2.2
- BMW Turbo Diesel 324 M21

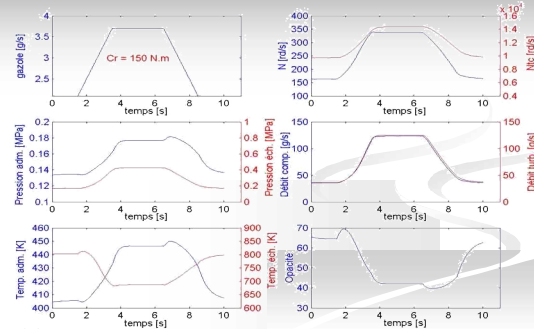
08/10/2006

## Résultats de simulation



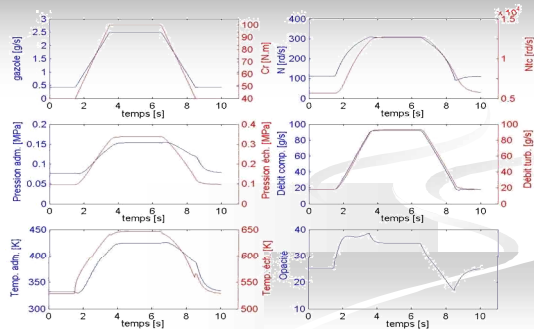
08/10/2006

## Résultats de simulation



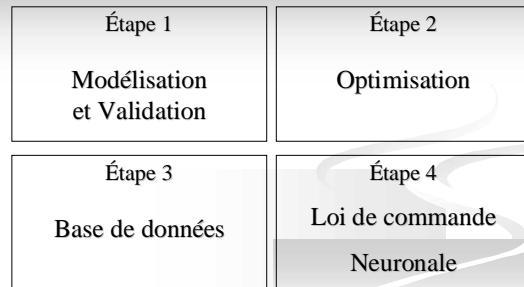
08/10/2006

## Résultats de simulation



08/10/2006

## Stratégie de commande




08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

## Optimisation

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \right) = P_i(\bar{\omega}, \bar{m}_f, p_a) - P_b(C_r, \bar{\omega})$$

$$V_a \frac{dp_a}{dt} = r \cdot T_a \cdot \left[ \bar{m}_c - \bar{m}_{ao}(\bar{\omega}, p_a) \right]$$

$$V_c \frac{dp_c}{dt} = r \cdot T_c \cdot \left[ \bar{m}_c - \bar{m}_{ao}(\bar{\omega}, p_a) \right]$$


Entrées :  $\bar{m}_f$   $C_r$     Commandes :  $\bar{m}_c$   
 Objectif : Optimiser la pollution du Diesel

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

## Optimisation

Optimisation de la puissance indiquée :

$$P_i = \int_0^{T_{max}} \eta_i \cdot m_r \cdot P_{ci} \cdot dt$$

Avec les contraintes égalités :

$$J \omega \frac{d\omega}{dt} = \left( a_3 + b_1 \frac{(a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2) N_{cyl} V_{cyl} \omega \cdot p_a}{m_r \cdot 4\pi} + c_1 \left( \frac{(a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2) N_{cyl} V_{cyl} \omega \cdot p_a}{m_r \cdot 4\pi} \right)^2 \right) m_r \cdot P_{ci} - C_r \cdot \omega$$

$$V_a \frac{dp_a}{dt} = r \cdot T_a \cdot \left( \bar{m}_c - \frac{(a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2) N_{cyl} V_{cyl} \omega \cdot p_a}{4\pi} \right)$$

Et les contraintes inégalité: sont issues du domaine de fonction du moteur et les limites sont issues du domaine de fonction du moteur et de l'opacité.

$$0 \leq \omega \leq 472 \text{ [rd/s]} \quad 0.09 \leq P_a \leq 0.3 \text{ [MPa]} \quad 15 \leq \frac{(a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2) N_{cyl} V_{cyl} \omega \cdot p_a}{m_r \cdot 4\pi} \leq 80$$

Et Et :  $\int_0^{T_{max}} 10 \cdot \bar{\omega} \cdot \left( \frac{\bar{m}_{a1}}{\bar{m}_{f1}} \right)^{-1.258} dt \leq Limit$

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

## Optimisation

Sous forme discrétisée : N = 250 é  
3\*250 inconnues  
496 égalités  
1501 inégalités

Minimiser :  $-P = -P_{ci} \cdot \sum_{i=1}^N \eta_i(\bar{\omega}_i) \cdot m_{ri}$

Contraintes égalités :

$$J \omega \cdot [\bar{\omega}_{i+1} - \bar{\omega}_i] = \Delta t \cdot \left( a_3 + b_1 \frac{\eta_i \cdot N_{cyl} V_{cyl} \omega_i \cdot p_{ai}}{m_{ri} \cdot 4\pi} + c_1 \left( \frac{\eta_i \cdot N_{cyl} V_{cyl} \omega_i \cdot p_{ai}}{m_{ri} \cdot 4\pi} \right)^2 \right) m_r \cdot P_{ci} - \Delta t \cdot C_{ri} \cdot \omega_i$$

$$\eta_i = (a_0 + a_1 \omega_i + a_2 \omega_i^2)$$

$$4\pi \cdot V_a \cdot [p_a(i+1) - p_a(i)] = 4\pi \cdot r \cdot T_a \cdot \left[ \bar{m}_c - (a_0 + a_1 \omega_i + a_2 \omega_i^2) N_{cyl} V_{cyl} \omega_i \cdot p_{ai} \right] \cdot \Delta t \quad i = 1, \dots, N$$

Contraintes inégalités :

$$0.09 \leq p_{ai} \leq 0.3 \quad \frac{4 \cdot \pi \cdot 15}{N_{cyl} V_{cyl}} \leq \frac{(a_0 + a_1 \omega_i + a_2 \omega_i^2) \omega_i \cdot p_{ai}}{m_{ri}} \leq \frac{4 \cdot \pi \cdot 80}{N_{cyl} V_{cyl}} \quad 0 \leq \omega_i \leq 472$$

$$\sum_{i=1}^N 10 \cdot \bar{\omega}_i \cdot \left( \frac{\bar{m}_{a1}}{\bar{m}_{f1}} \right)^{-1.258} \leq Limit$$

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

## Optimisation

Optimisation avec contraintes  $\longrightarrow$  Optimisation sans contraintes

Lagrangien Pénalisé

$$L(X, \lambda) = f(X) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot h_i(X) + r \cdot \sum_{i=1}^n [g_i^+(X)]^p$$

Diagram showing the components of the Lagrangian function:

- Function Objective:  $f(X)$
- Multiplicateurs de Lagrange:  $\lambda_i$
- Contraintes égalités:  $h_i(X)$
- Facteur de pénalité:  $r$
- Contraintes inégalités:  $g_i^+(X)$

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

## Optimisation

- OPTIMISATION SANS CONTRAINTES : **Min L(X)**
- $X_{k+1} = X_k - \alpha_k D_k \nabla f(X_k)$
- Quasi-Newton (B.G.F.)** :  $D_k = H_k$
- $H_0$  arbitraire, symétrique définie positive
- $H_k = H_{k-1} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T d_k} - \frac{H_{k-1} d_k d_k^T H_{k-1}}{d_k^T H_{k-1} d_k}$
- $y_k = X_{k+1} - X_k$      $d_k = \nabla f(X_{k+1}) - \nabla f(X_k)$

08/10/2006

ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule

## Stratégie de commande

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Étape 1<br>Modélisation et Validation | Étape 2<br>Optimisation              |
| Étape 3<br>Base de données            | Étape 4<br>Loi de commande Neuronale |

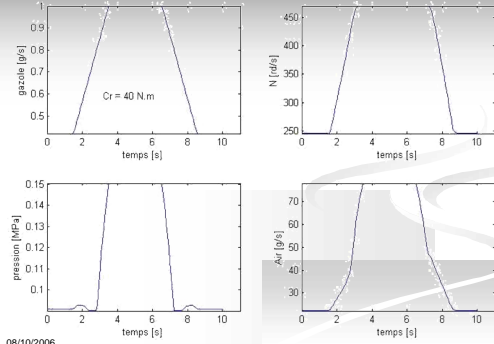
08/10/2006

## Base de données

La résolution de plusieurs situations représentatives correspondant à différents profils de fonctionnement, conduit à la construction d'une base de données regroupant les entrées et les sorties optimales du système.

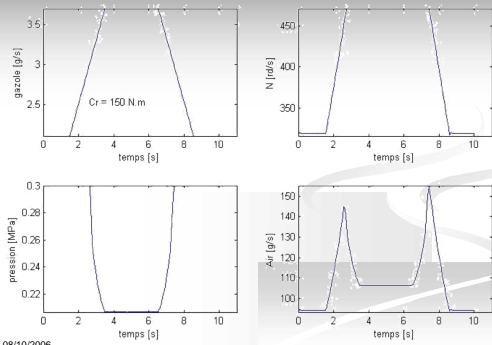
08/10/2006

## Résultats de l'optimisation



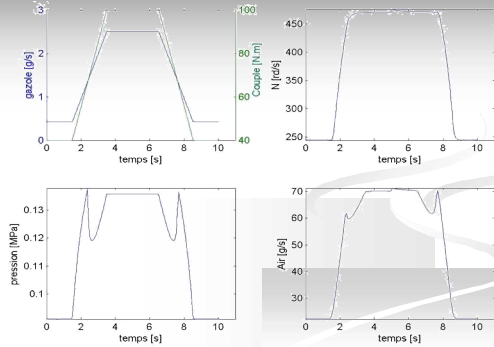
08/10/2006

## Résultats de l'optimisation



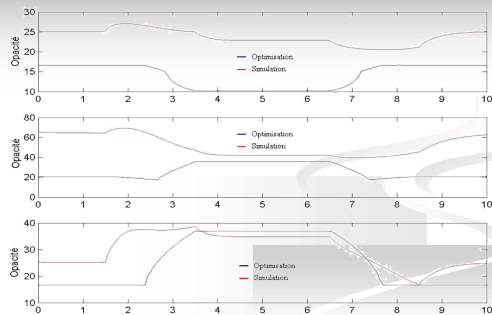
08/10/2006

## Résultats de l'optimisation



08/10/2006

## Optimisation



08/10/2006

## Stratégie de commande

Étape 1

Modélisation  
et Validation

Étape 2

Optimisation

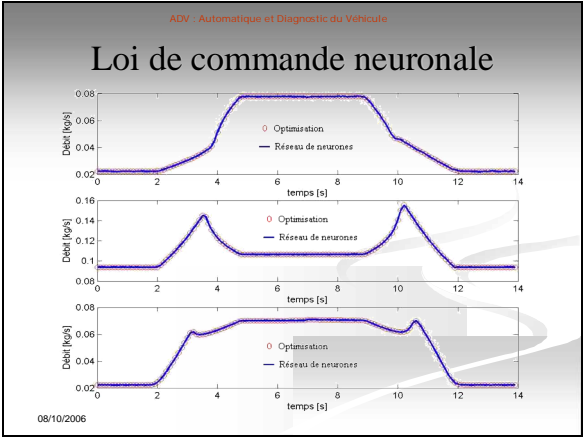
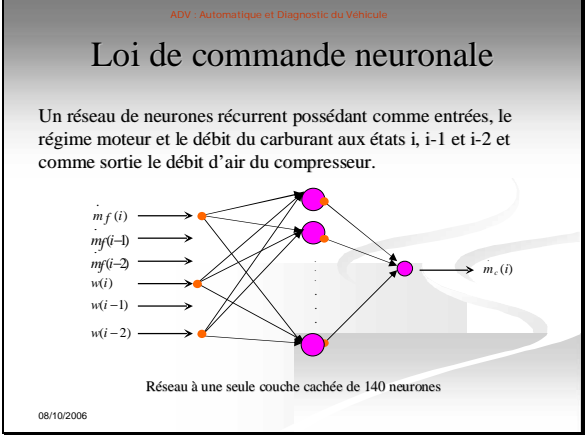
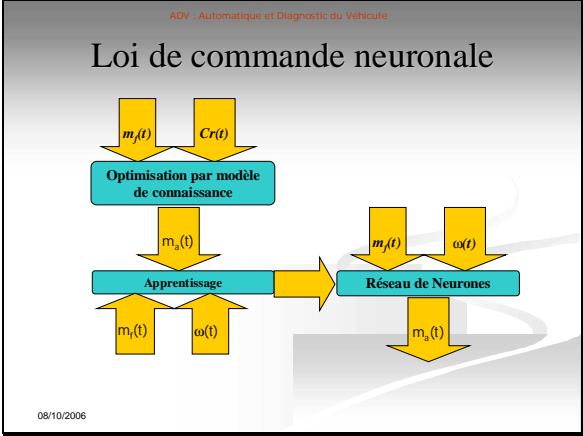
Étape 3

Base de données

Étape 4

Loi de commande  
Neuronale

08/10/2006



- ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule
- ### Plan
- Problématique
  - Pollution et effets sur la santé
  - Le cycle Diesel
  - Technique de dépollution
  - Stratégie de commande
  - Conclusions et perspectives
- 08/10/2006

- ADV - Automatique et Diagnostic du Véhicule
- ### Conclusions et perspectives
- 1 Conclusions:
- Modèle validé,
  - Loi de commande non linéaire,
  - Réseau de neurones pour le temps réel,
  - Le débit d'air est considéré comme variable de commande.
- 08/10/2006

