

Journées LMCS

Modélisation et simulation 0D/1D

Le 17 avril 2008

Modélisation de l'arrêt d'un moteur thermique

Plan

- I. Objectifs de la présentation
- II. Exemple :
 - **Modélisation de l'arrêt d'un moteur thermique**
- III. Traitement du problème
- IV. Conclusion

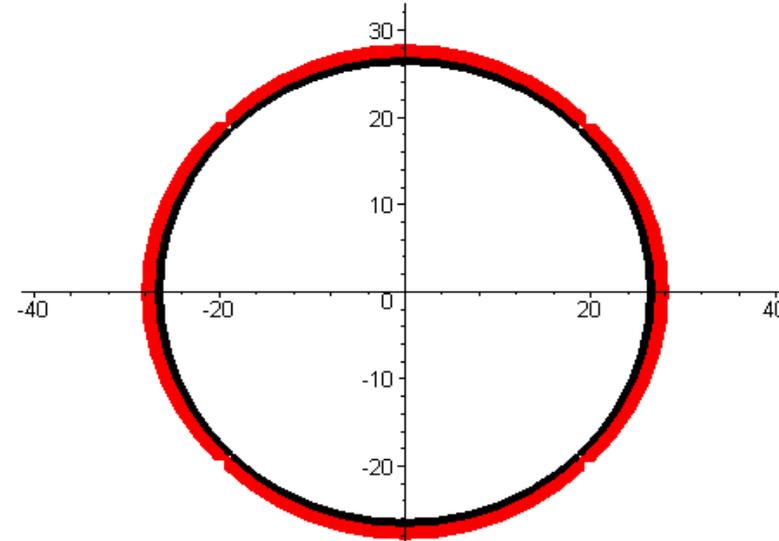
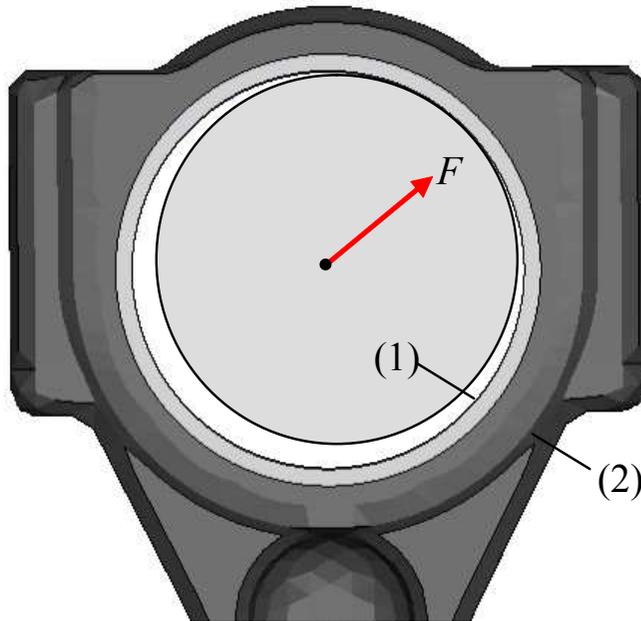
I. Objectifs de la présentation ou pourquoi une telle présentation

I.1 Echanger sur notre vision du calcul

- Le Calcul ne se réduit pas à l'utilisation et à la maîtrise de codes 3D (Fluent, Star CD, Nastran, Abaqus ..)
- Dans leurs fonctions d'assembleur de sous systèmes, les grands constructeurs automobiles peuvent tirer beaucoup de profit des approches 0D/1D
- Toutefois, le métier d'ingénieur en simulation numérique est en « danger »
 - Insuffisamment valorisée
 - De moins en moins présente chez les constructeurs.
 - Croissance de l'activité de calcul dans les sociétés de sous-traitance, (points délicats : Turnover et Off-shoring)

1.2 Mettre en évidence l'intérêt d'approche physique 0D/1D dans le domaine industriel

- **Tous les problèmes industriels ne se traitent pas avec des calculs 3D**
 - Exemple : Pression instantanée dans un circuit de lubrification. Problèmes de résistance des matériaux , thermique, lubrification,
 - Exemple : Déformée de tête de bielle



I.2 Mettre en évidence l'intérêt d'approche physique 0D/1D dans le domaine industriel

- Les calculs 3D nécessitent aussi des approches 0D/1D pour être contrôlés ou fournir des données d'entrée .
 - Exemple : Effort sur l'embellage, Alimentation en huile d'un pied de bielle
- Outils clefs dans le processus de développement d'un nouveau moteur ou composant « Faire bon dès les premiers traits »
- Analyses de sensibilité et optimisation en phase de prédimensionnement
- Outils particulièrement bien adaptés à la capitalisation du Know-How

I.3 A moyen terme : revaloriser l'activité de simulation numérique

- Activités fortement transformées en presse-bouton dans de multiples industries
 - => Valorisation faible de l'activité de simulation
 - => Exploitation insuffisante du calcul (perte pour la société)
 - => Peu de parcours de carrière en simulation dans les grands groupes (notion d'expert floue)
 - => Sous-traitance élevée et en croissance dans les pays « low cost » : **Perte de compétences chez les industriels.**

II. Exemple : Modélisation de l'arrêt d'un moteur thermique

- **Opération d'arrêt du moteur** : coupure de l'alimentation ou de l'injection,
- Le moteur possède alors une certaine vitesse de rotation : **Condition initiale**,
- **L'arrêt est provoqué** par la perte d'énergie dans la compression/détente, pompage des gaz et par les frottements internes du moteur,
- Lors de sa décélération en vitesse, le moteur excite différents modes :
 - Le G.M.P. sur ses tampons
 - Le Double volant amortisseur
 - Le rotor d'alternateur et sa courroie
- Selon l'intensité des vibrations **génération de bruit**

Moteur considéré

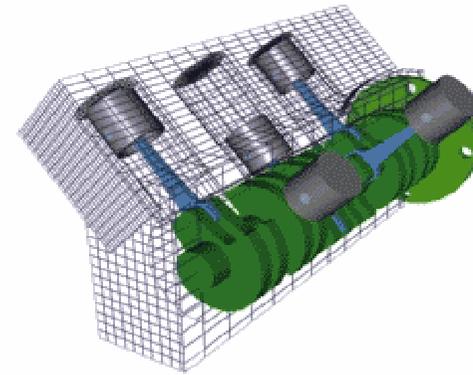
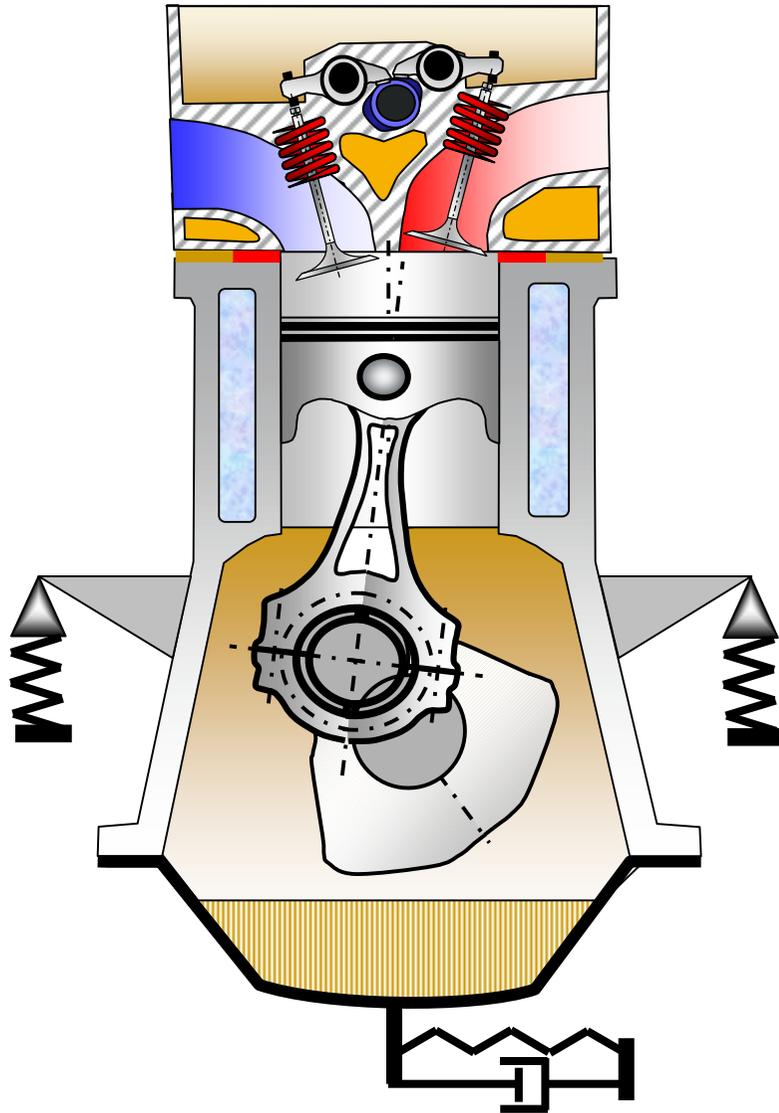
Aspect pratique

- Turbodiesel, 2 litres
- Taux de compression 16
- Alésage 78mm, course 80 mm
- 4 cylindres en lignes

Simplifications

- Le vilebrequin est supposé rigide de même que le rotor d'alternateur

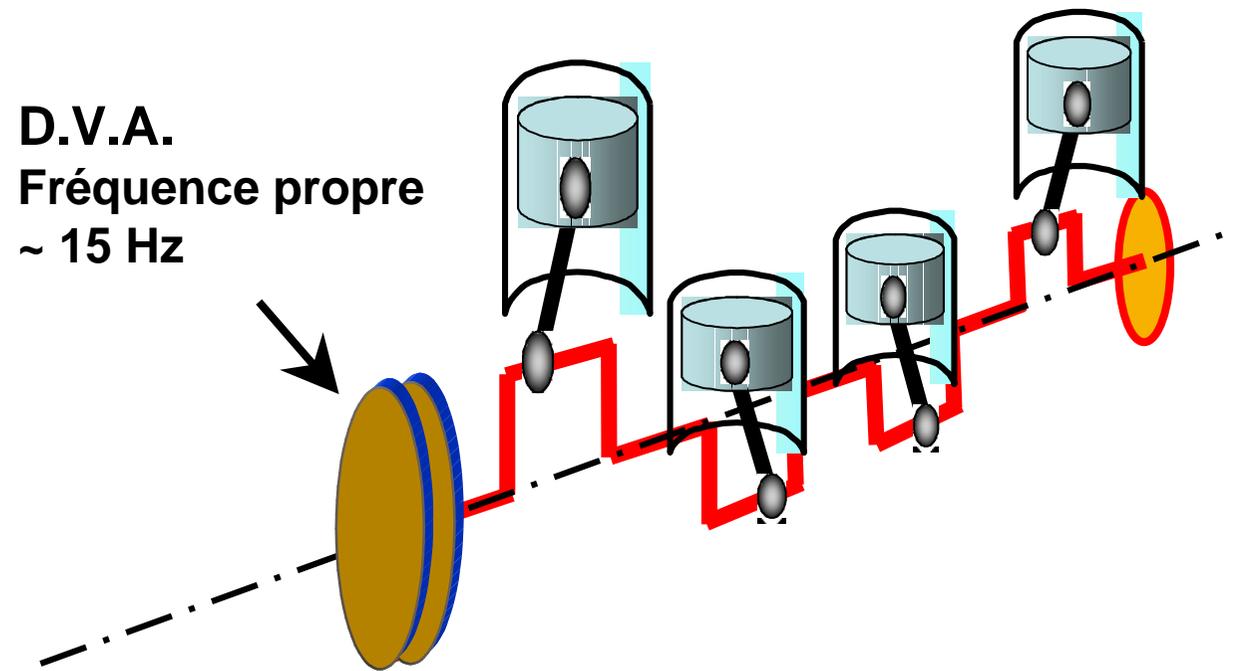
Le moteur



Moteur sur ses appuis et la bielle de reprise de couple

Le squelette ou attelage mobile

- Le vilebrequin repéré en rotation par θ_{vil}
- Le double volant amortisseur, inertie secondaire repérée par θ_{sec}
- Les 4 masses mobiles (bielles, pistons)

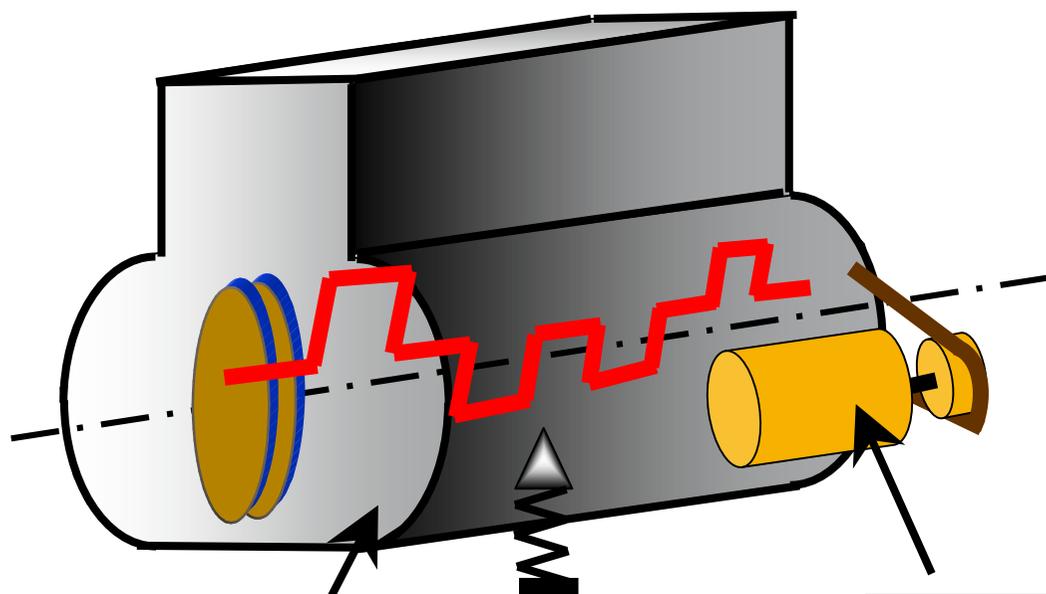


D.V.A. Double volant amortisseur

L'enveloppe ou Carter moteur

Le carter GMP repéré par θ_{gmp}

Le rotor d'alternateur repéré par θ_{alt}



Inertie carter et raideur support
fréquence propre
 ≈ 15 Hz

Alternateur
inertie du rotor et raideur poulie filtrante
fréquence propre
 ≈ 15 Hz

Mise en forme du problème

- **Données du problèmes**

- 4 inconnues (θ_{gmp} , θ_{vil} , θ_{sec} , θ_{alt})
- 4 inerties (carter GMP, attelage mobile (**variable**), inertie secondaire de DVA, inertie rotor)
- 3 raideurs (bielle de reprise de couple, DVA (**variable**), courroie et poulie filtrante (**variable**))

- **Sollicitations**

- Frottement (**variable**)
- Excitation : inertie et compression des gaz (**variable**)

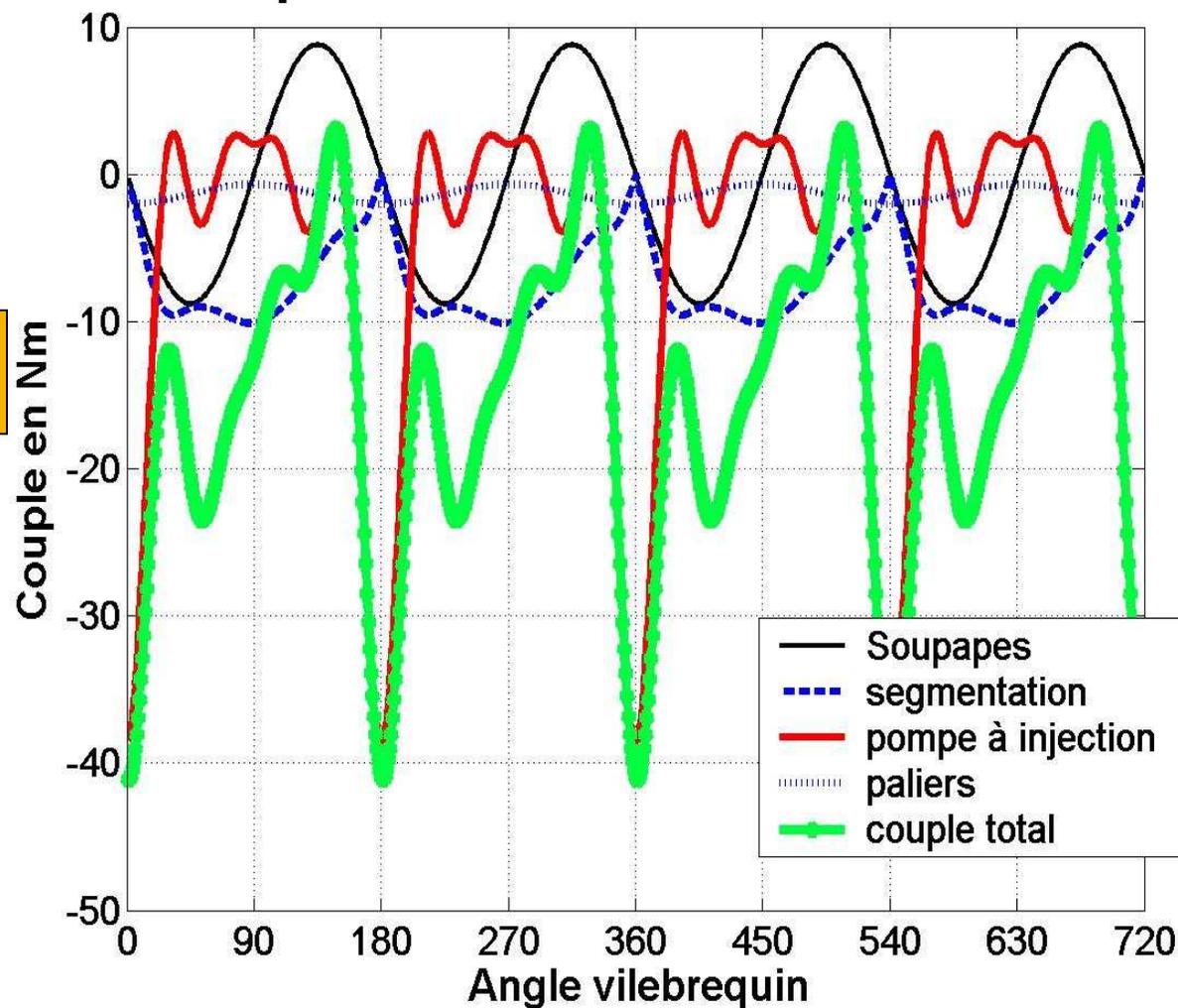
Phénomènes physiques à prendre en compte et à modéliser

- Le frottement instantané de l'ensemble des composants => Approche 1D
- Le comportement non linéaire et hystérétique du DVA => Approche 1D
- La perte d'énergie par les fuites de gaz à la segmentation => Approche 1D
- Le couple instantané produit par la pression des gaz et l'inertie de l'attelage mobile (acyclisme) => Approche 1D
- Le couplage du comportement dynamique des quatre corps => Approche 1D

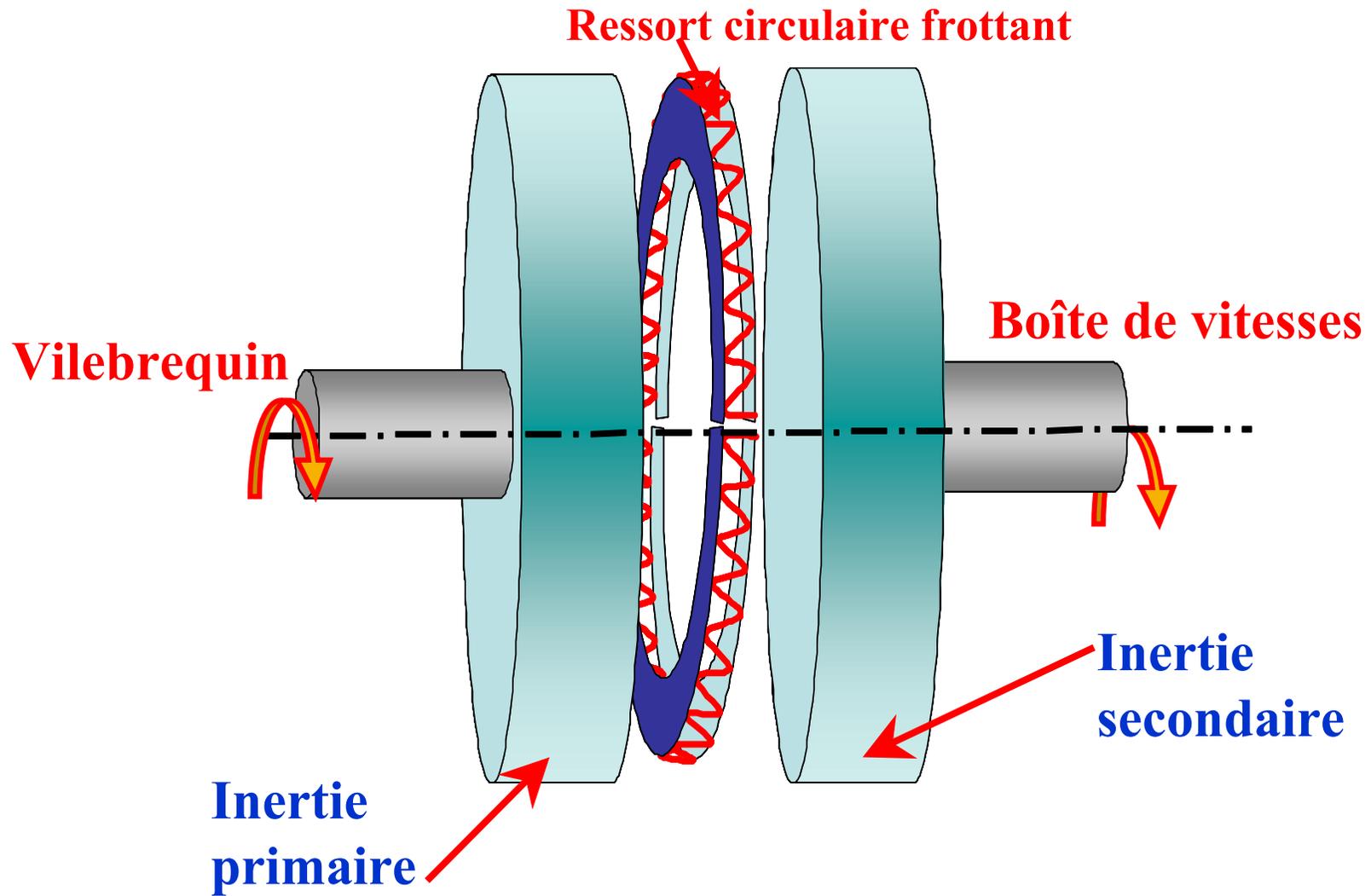
Frottement instantané

Couples de frottement instantanés

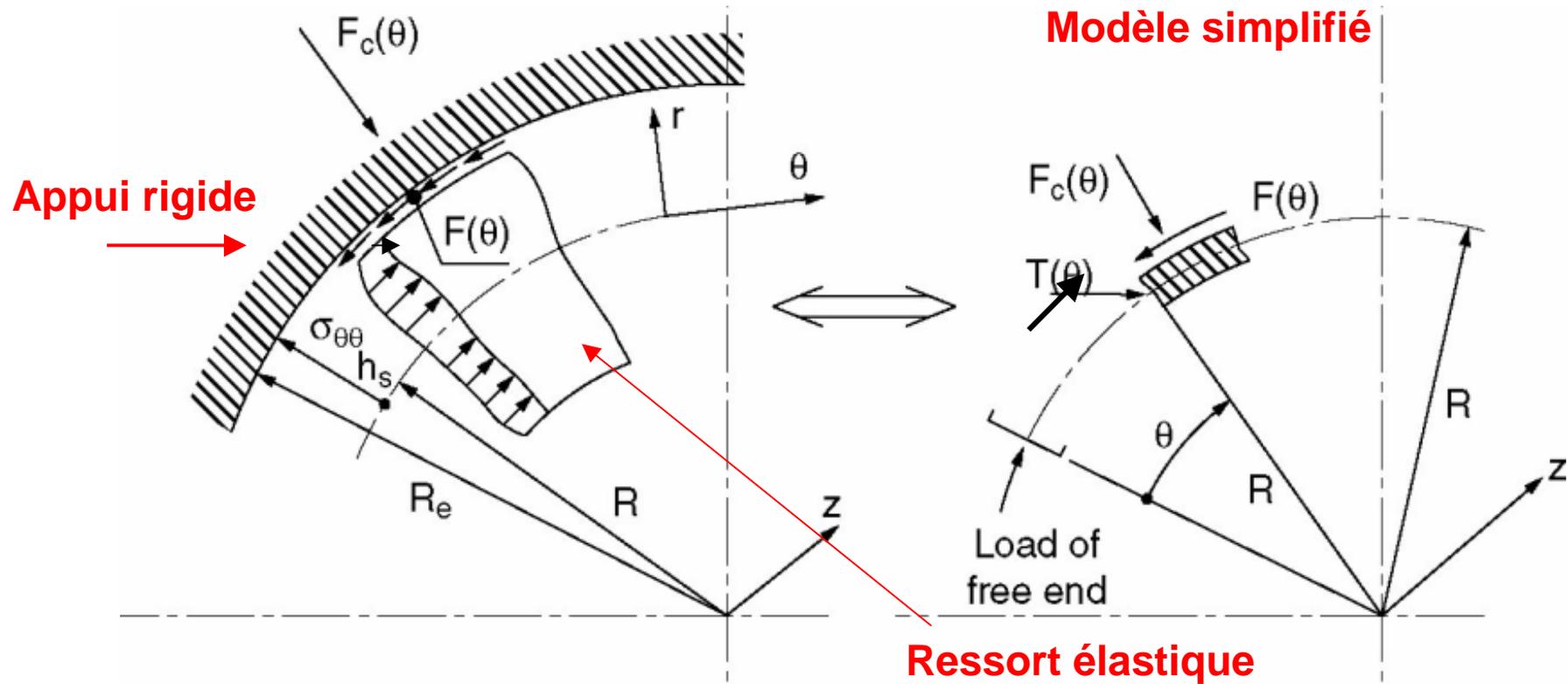
Frottement évalué à partir d'approches 1D



Spécificités du DVA : Raideur non linéaire et hystérésis



Frottement dans le DVA



$$\begin{cases} T(\theta - d\theta/2)\cos(d\theta/2) - T(\theta + d\theta/2)\cos(d\theta/2) \\ - F(\theta)Rd\theta = 0 \\ \varpi d\theta - F_c(\theta)Rd\theta + T(\theta + d\theta/2)\sin(d\theta/2) \\ + T(\theta - d\theta/2)\sin(d\theta/2) = 0 \end{cases}$$

Frottement de Coulomb

$$F(\theta) = -\varphi \cdot \text{sign}(u) \cdot F_c(\theta)$$



Modélisation

Raideur équivalente

$$\varpi = \lambda \omega^2 R^2$$

$$K_{eq} = \frac{T\theta_1 K}{\int_0^{\theta_1} T(\theta) d\theta}$$

$$K_{eq} = \frac{K\theta_1 T_0}{\left(-\varpi\theta_1 + (T_0 + \varpi) \frac{(1 - e^{-\varphi\theta_1})}{\varphi} \right)}$$

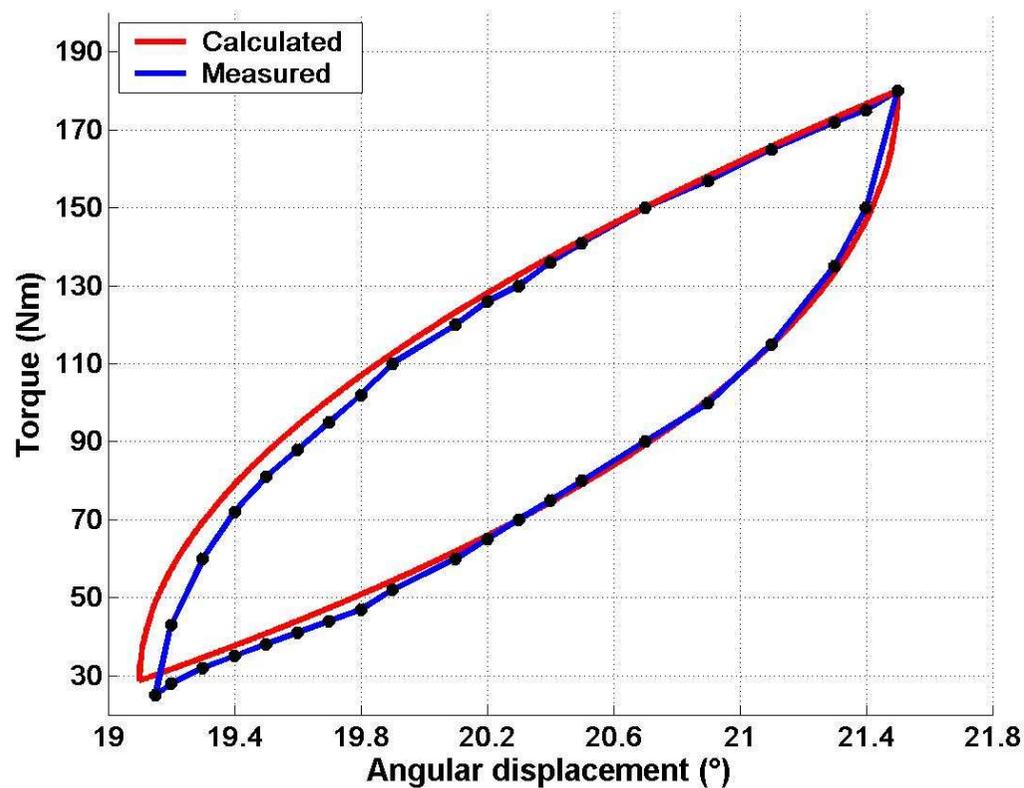
Hystérésis

$$H_y = \int_{T_{Max}}^0 \Delta u_0 dT_0 + \int_0^{T_{inv}} \Delta u_1 dT_1 + \int_{T_{inv}}^{T_{Max}} \Delta u_{01} dT_{01}$$

$$H_y = \frac{1}{\varphi\theta_1 K} \left[T_{Max}^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{e^{-\varphi\theta_1}}{2} \right) + \frac{2}{3} \varpi T_{Max} + T_{Max} T_{inv} e^{-\varphi\theta_1} + T_{inv}^2 \frac{e^{\varphi\theta_1}}{2} + 2\varpi T_{inv} \cosh(\varphi\theta_1) - \frac{4}{3} \sqrt{\varpi + T_{Max}} (\varpi R + T_{inv})^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{3} \varpi^2 \right]$$

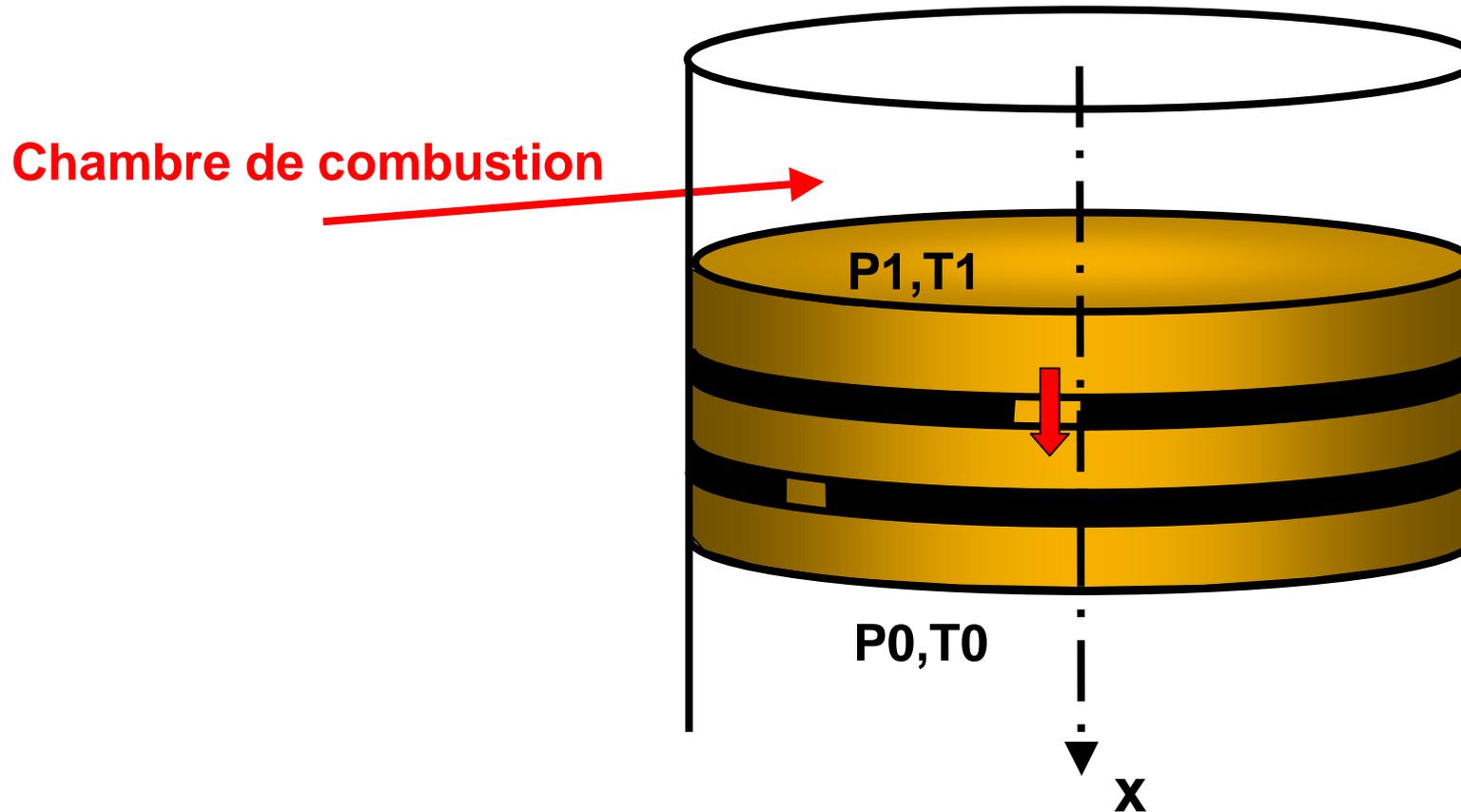
Comportement dynamique du DVA

- Raideur dynamique beaucoup plus élevée que la raideur nominale statique.



Corrélation calcul-mesure

Perte de pression au niveau de la segmentation



- Détente isentropique \Rightarrow écoulement fluide compressible avec col sonique
- Perte de pression à chaque cycle \Rightarrow diminution de l'énergie emmagasinée

Modélisation de la variation de pression

$P(x)$ = pression dans le cylindre en fonction de la position du piston,

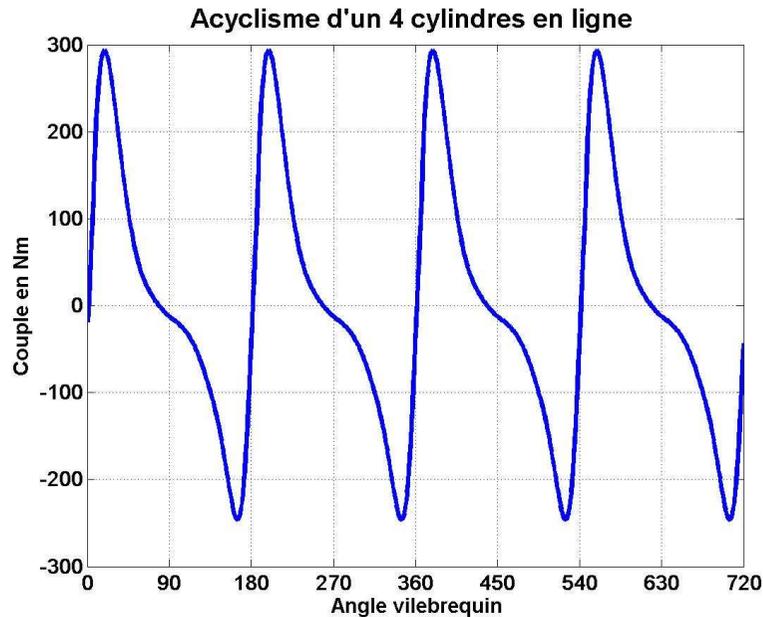
P_0 = pression de référence; T_{comp} = Taux de compression,

x = position du piston; δ = constante air ; Sec = Section de fuite,

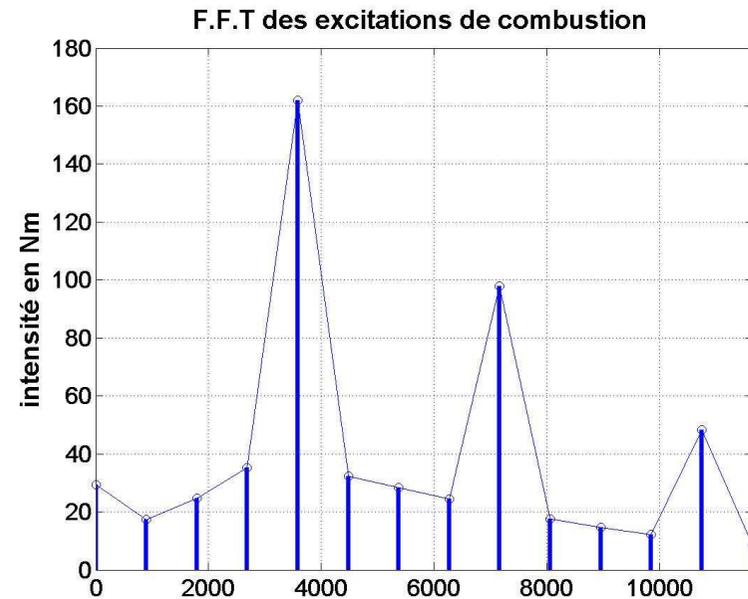
C_s = célérité dans l'air ; V_{cyl} = Cylindrée ; ω = vitesse de rotation moyenne.

$$\frac{d}{dx} p(x) = - \frac{1. \delta p_0 \left(-\frac{1}{\delta} \right) (T_{comp} - 1) \left(-\frac{1}{2} \sin(x) p(x) \right) \left(1 + \frac{1}{\delta} \right) + \frac{Sec C_s \sqrt{2} \left(\frac{p(x)^{\left(3 + \frac{1}{\delta} \right)} - p(x)^{\left(2 + \frac{2}{\delta} \right)}}{\left(1 - \frac{1}{\delta} \right)} - p_0 \right)}{T_{comp} V_{cyl} \omega (\delta - 1)}$$

Acyclisme généré par la pression des gaz



Contribution forte en H2, H4, H6



$$C_{exc} = C_{moy} + \frac{Max(P(x))}{68,4} V_{cyl} (0.46 \sin(2\alpha) + 0.24 \sin(4\alpha) + 0.03 \sin(6\alpha))$$

III. Traitement du problème

- Résolution d'un système de 5 équations différentielles (4 inertielles, 1 pression gaz)
- Conditions initiales : décalages angulaires = couples résistants entre composants
- Temps de mise en équation : 1 semaine (avec connaissance de tous les comportements: Modélisation DVA 3 semaines)
- Traitement numérique et exploitation sous Maple : 1 jour

Mise en équation : formulation lagrangienne

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial E_c}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) - \frac{\partial (E_c - E_p)}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}_i} = F_{\alpha i} \quad \text{avec } i = 1, 4$$

Energie cinétique

$$E_c = I_{GMP} \frac{\dot{\theta}_{gmp}^2}{2} + I_{attelage}(\theta_{vil}) \frac{\dot{\theta}_{vil}^2}{2} + I_{alt} \frac{\dot{\theta}_{alt}^2}{2} + I_{sec} \frac{\dot{\theta}_{sec}^2}{2} + (m_{vil} + m_{sec} + m_{alt}) R_{vil}^2 \frac{\dot{\theta}_{gmp}^2}{2}$$

Energie potentielle

$$E_p = K_{biel} R_{biel}^2 \frac{\theta_{gmp}^2}{2} + K_{DVA}(\theta_{vil}, \theta_{sec}) \frac{\theta_{sec}^2}{2} + K_{alt}(\theta_{vil}, \theta_{alt}) \frac{\theta_{alt}^2}{2}$$

Dissipation

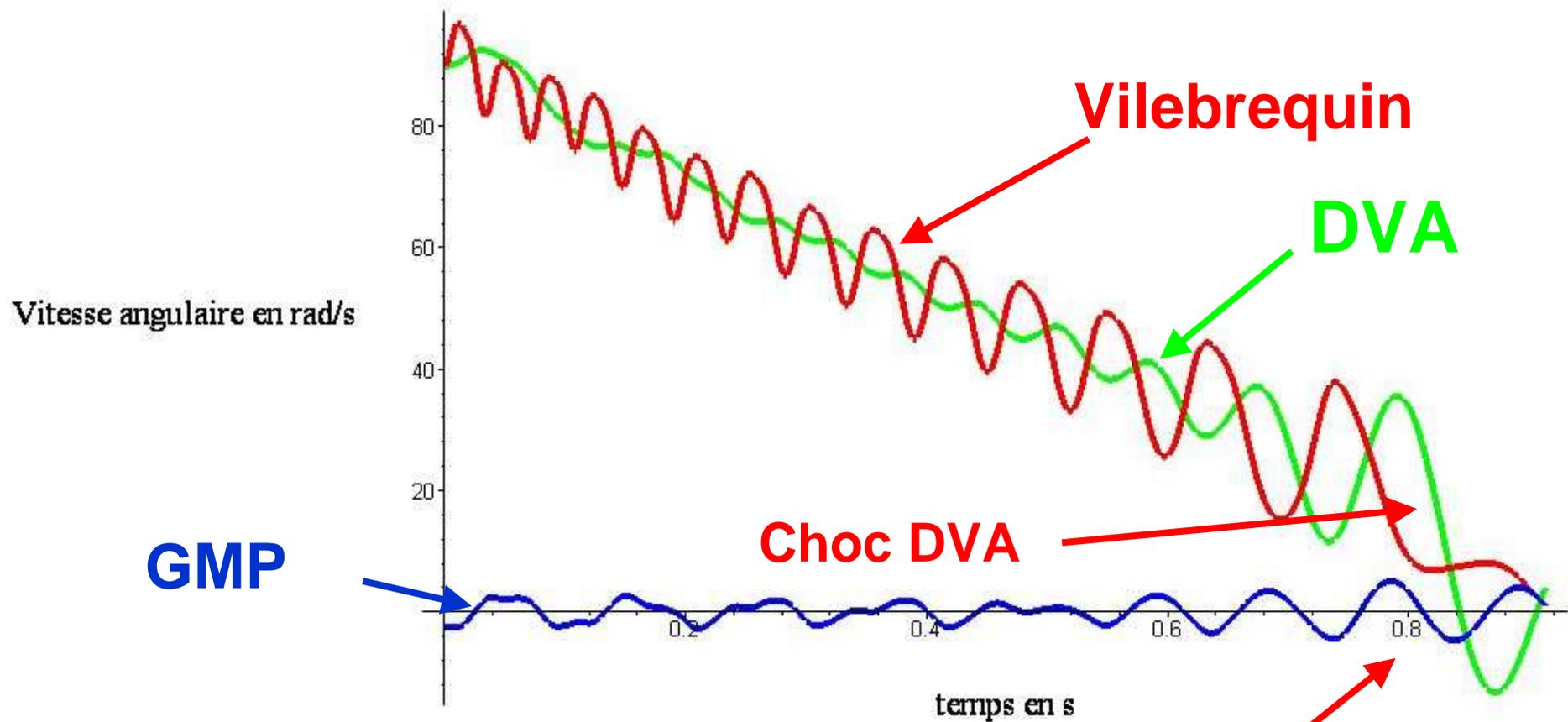
$$D = C_{biel} R_{biel}^2 \frac{\dot{\theta}_{gmp}^2}{2} + C_{frot}(\theta_{vil}, \theta_{gmp}) \left(\frac{\dot{\theta}_{vil}}{2} - \frac{\dot{\theta}_{gmp}}{2} \right)^2 + C_{DVA}(\theta_{sec}, \theta_{vil}) f \left(\frac{\dot{\theta}_{vil}}{2} - \frac{\dot{\theta}_{sec}}{2} \right)^2 + D_{frot}$$

Excitation

$$F_{\alpha 1} = -C_{exc} ; F_{\alpha 2} = C_{exc} ; F_{\alpha 3} = F_{\alpha 4} = 0$$

Résolution numérique

Temps < 1 sec (Maple 9 et Maple 11)



GMP

Vilebrequin

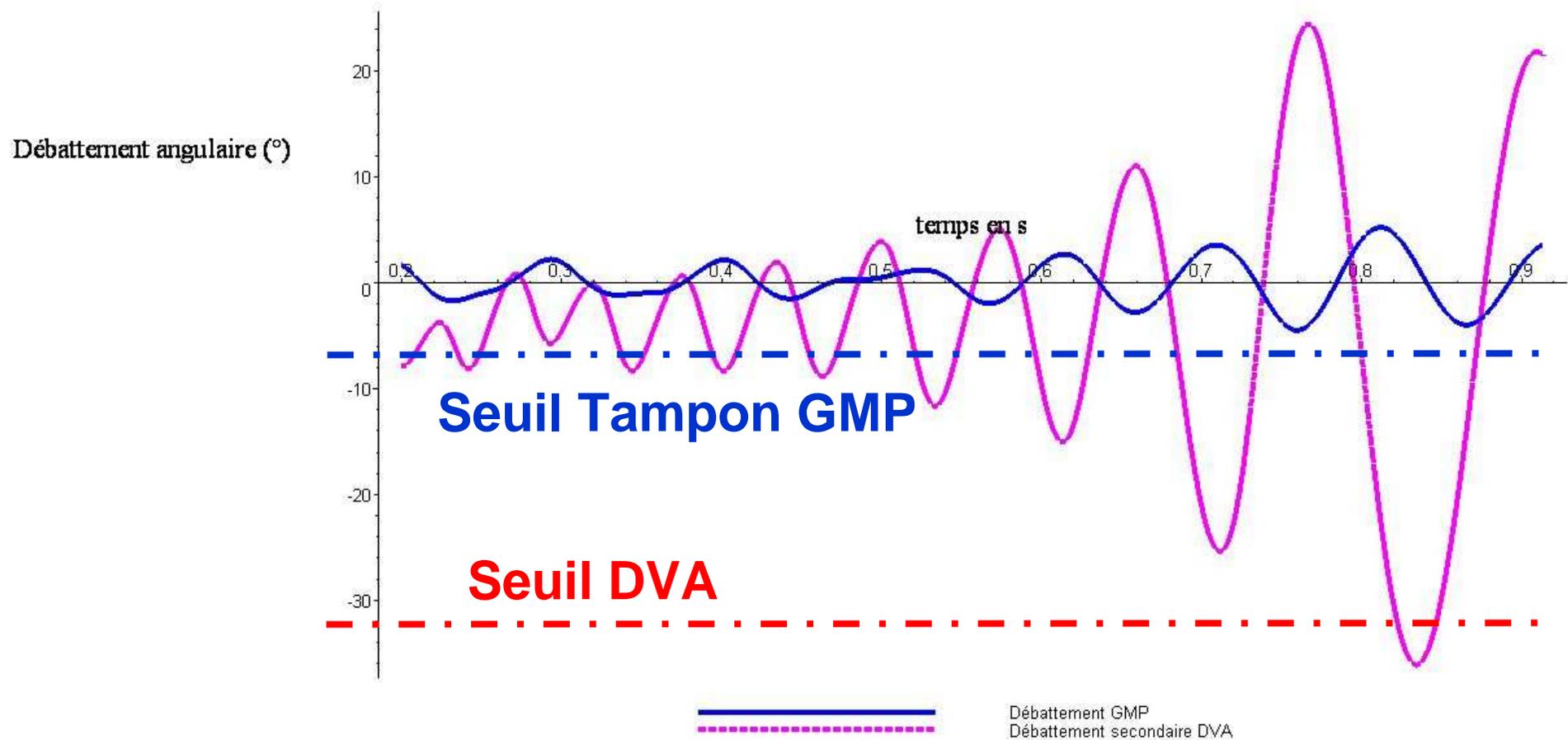
DVA

Choc DVA

Choc

GMP

Résolution numérique



Apport d'une telle modélisation

- Faible durée de traitement du problème
- Réponse quasi instantanée
- Identification des zones critiques en terme de débattement
- Possibilités de fonctionner en boucles courtes pour étudier la sensibilité à différents paramètres
- Recherche de solutions optimales soit par simulation soit par bouclage

IV. Conclusion

- **Multiples modélisations 0D/1D à développer** dans le domaine des moteurs thermiques
- Les modélisations 0D/1D offre une **excellente traduction de notre know-how et compétitivité** par rapport à la montée en capacités de simulations numériques des pays « Low Cost »
- **Performances et grande souplesse** de la simulation 1D dans le comportement dynamique du GMP
- **Complémentarité importante** entre la modélisation des lois physiques à considérer (approche analytique du problème et élaboration des **équations physiques** à résoudre) et le **traitement numérique**.
- Outil par excellence de l'ingénieur.