

# LES PLÉNIÈRES 2010 DU LCPC

Sciences et techniques  
du **Génie Civil**

## JOURNÉES ACOUSTIQUE

Wissembourg – 2 et 3 JUIN 2010

# Modèle multipoints viscoélastique pour la prévision du contact dynamique pneumatique/chaussée

**Guillaume DUBOIS, LCPC Nantes**

# Sommaire

- 1. Contexte de la recherche**
- 2. Démarche envisagée et état d'avancement**
  - **Bibliographie**
  - **Objectifs**
  - **Etat d'avancement**
- 3. Conclusions et perspectives**

## 1- Contexte : Généralités

### Opération de recherche :

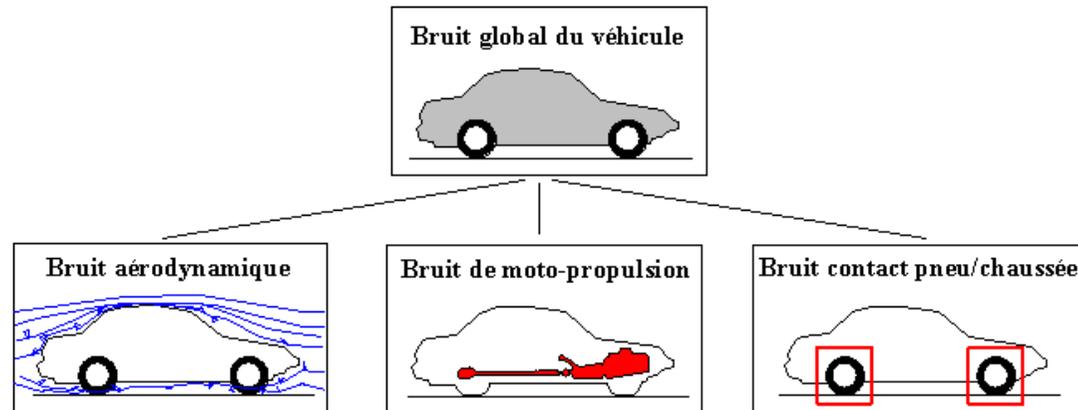
- 11L102 – **ECOSURF** (*Etude du Contact pneumatique/chaussée pour des propriétés d'usage Optimales et durables des SURFaces routières*)
- 2010-2013

### Quelques chiffres :

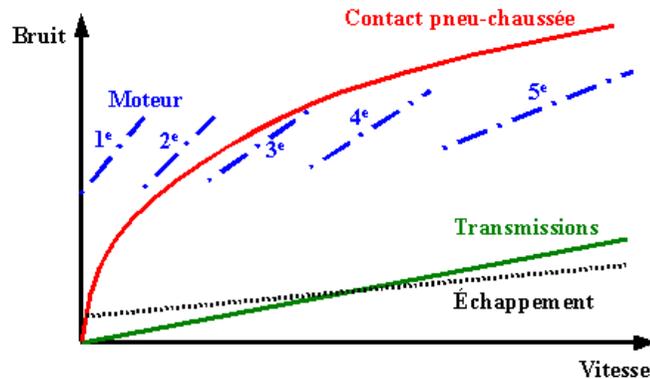
- En 2008, **54%** des français se déclarent **gênés** par le bruit à leur domicile : **14,6%** le sont en « **permanence** » ou « **souvent** »
- Sur les personnes gênées par le bruit, **49%** citent le **bruit routier** comme étant le plus nuisible
- En 1998, le **coût social** du bruit des transports était estimé en France à **0.5%** du **PIB**

# 1- Contexte : Bruit de contact pneu/chaussée

Les principales sources de bruit routier (Sandberg et Ejsmont, 2002)



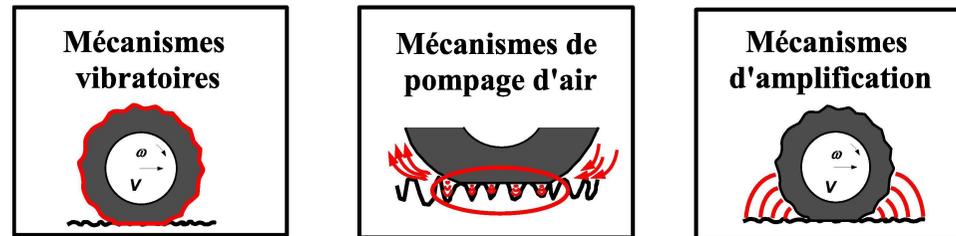
Importance de chaque source de bruit pour un véhicule léger (CFTR, 2001)



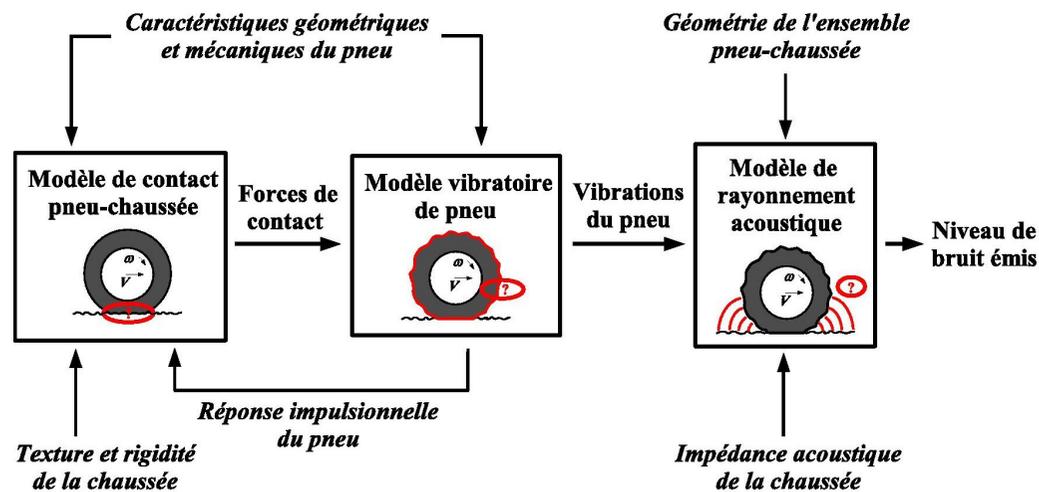
Prédominance du bruit de contact pneumatique/chaussée

# 1- Contexte : Contexte de la modélisation

Les principaux mécanismes du bruit de roulement (Sandberg et Ejsmont, 2002)



## Organisation d'un modèle physique complet



## 2- Bibliographie : Modèles de contact ponctuel

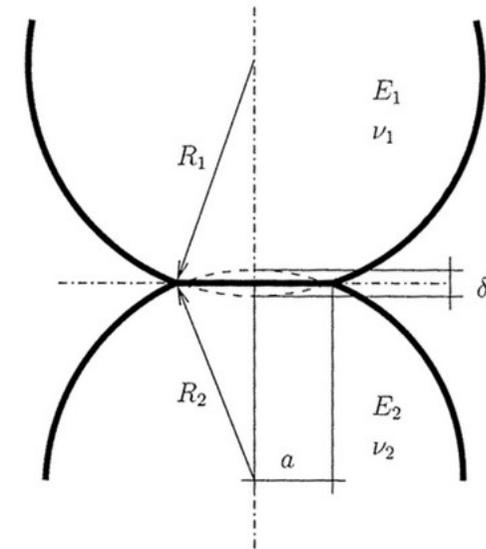
### Loi de contact de Hertz (1882)

#### Hypothèses :

- Aire de contact elliptique
- Surface continue et non conforme :  $a \ll R$
- Chaque solide = demi-espace élastique
- Pas de frottement

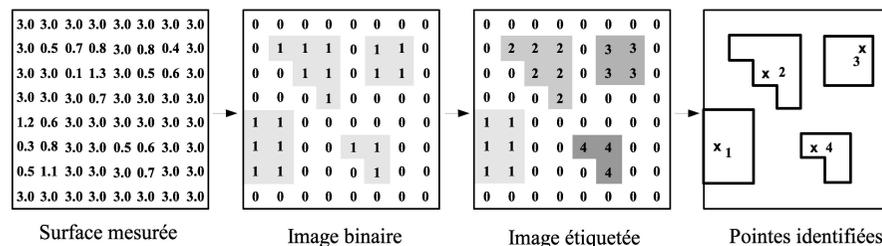
#### Formulation :

$$P = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta^{3/2} = C E^* \delta^\gamma$$



### Généralisation de la loi de contact de Hertz : Cesbron (2007)

- Identification des aspérités d'une chaussée réelle :



- Loi de contact appliquée à des granulats de chaussée :

$$\forall k \in [1, N], P_k = C_k E^* \delta_k^{\gamma_k}$$

## 2- Bibliographie : Approche en deux dimensions

Méthodes d'enveloppement : Clapp (1983), INRETS (2004)

### Hypothèses :

- Contact statique
- Pneu = Plan semi-infini élastique
- Surface de chaussée = Profil linéique parfaitement rigide
- Pas de frottement

### Formulation :

$$\forall x \in \Gamma, u(x) - u(x_0) = \int_{\Gamma_c} [G(x, \xi) - G(x_0, \xi)] p(\xi) d\xi$$

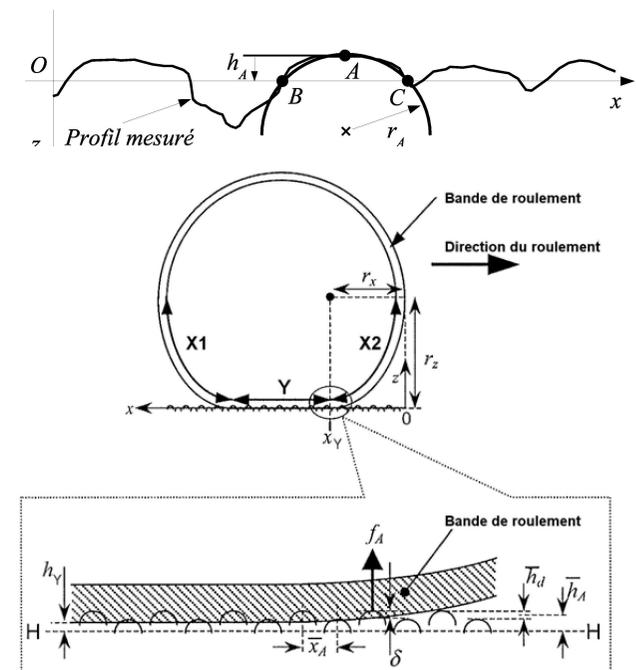
Modèle dynamique de Fujikawa

### Hypothèses :

- Aspérité = élément circulaire passant par A, B et C
- Bande de roulement uniforme dans la direction latérale (2D)
- Force de contact = théorie de Hertz
- Contact dynamique = succession d'états statiques

### Formulation :

$$\sum_{i=1}^N f_{A_i} = P = \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \sqrt{r_{A_i}} E^* (z_{A_i} - h_Y - \frac{r_z (x_Y - Vt)^2}{2r_x^2})^{\frac{3}{2}}$$



## 2- Bibliographie : Modèles de l'université de Chalmers

### Modèle de Kropp (1992)

#### Hypothèses :

- Distribution de pression uniforme sur la largeur transversale de la bande de roulement (2D)
- Fondation élastique de Winkler = points de contact linéaires
- indépendants
- Vibrations du pneumatique = formulation de Green

#### Formulation :

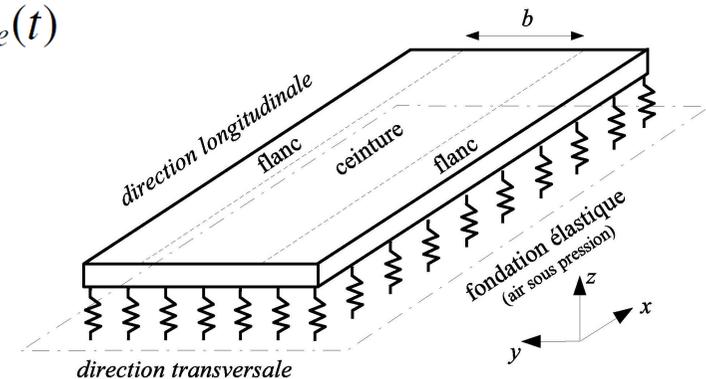
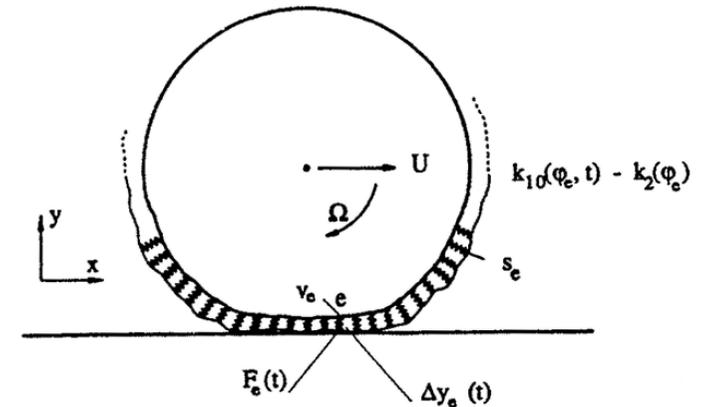
$$F_e(t) = s_e \Delta y_e(t) H(-\Delta y_e(t))$$

$$\Delta y_e(t) = y_0(t) + k_{10}(\varphi_e, t) - k_2(\varphi_e) + v_e(t)$$

$$v_e(t) = \sum_{m=1}^N \int_0^t F_m(\tau) g_{m,e}(t - \tau) d\tau$$

### Amélioration par Larsson (2002) et Wullens (2004)

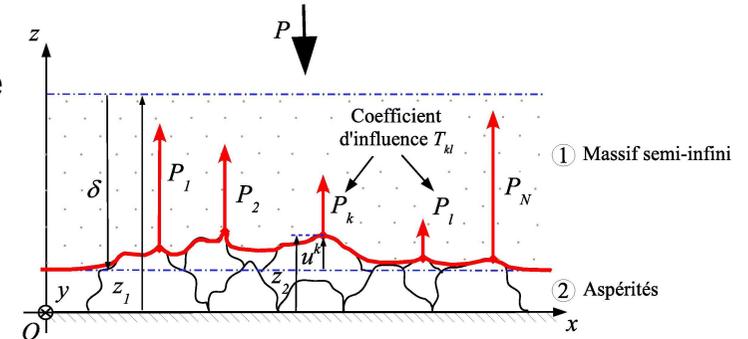
- Prise en compte de l'interaction entre les aspérités
- Passage d'un modèle 2D à quasi-3D



## 2- Bibliographie : Modèle multi-aspérités de l'ENPC/LCPC

### Hypothèses :

- Bande de roulement du pneu : massif semi-infini 3D élastique
- Surface de la chaussée : aspérités parfaitement rigides
- Petites déformations
- Pas de frottement
- Pas de dynamique du massif



À chaque instant, il faut résoudre le problème de Boussinesq :

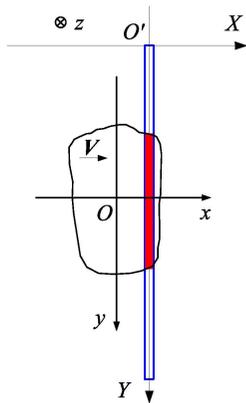
$$\forall (x, y) \in \Sigma, \quad u(x, y) = \iint_{\Sigma_c} p(\xi, \eta) T(x, y; \xi, \eta) d\xi d\eta$$

$$\forall (x, y) \in \Sigma_c, \quad z(x, y) - u(x, y) - \delta = 0 \quad \text{et} \quad p(x, y) > 0$$

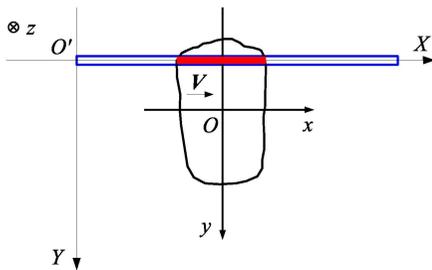
Formulation multipoints :

$$\forall k \in [1, N], \quad P_k = \begin{cases} C_k E^* \left[ z_k^s - \delta - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l \right] & \text{si } \delta_k > 0 \\ 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 \end{cases} \quad P = - \sum_{k=1}^N P_k$$

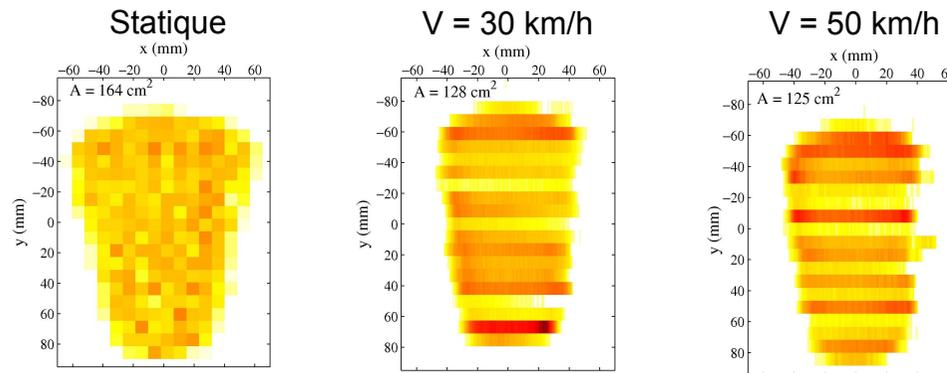
## 2- Effet de la dynamique sur le contact : Cesbron (2007)



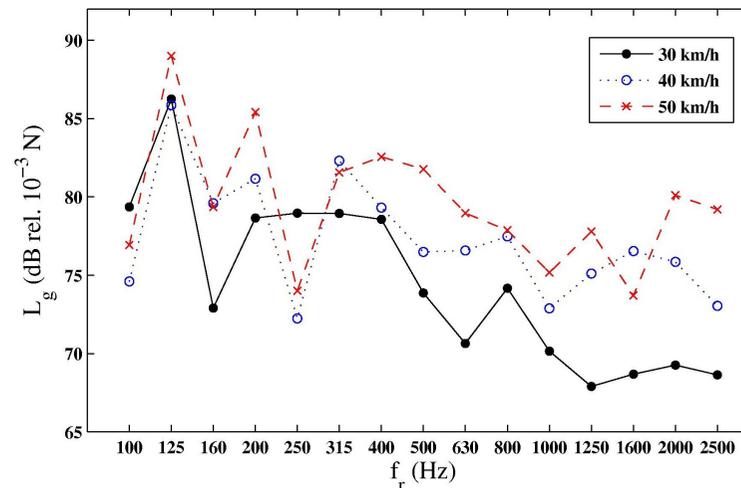
Mesure transversale



Mesure longitudinale



Diminution de l'aire de contact attribuée à la viscoélasticité de la gomme



Résultats assez différents attribués à la vibration du pneu

## 2- Objectifs de la thèse

1. **Obtenir un modèle dynamique de contact pneu/chaussée incluant :**
  - la macrotecture 3D sur plusieurs mètres de chaussée
  - les vibrations et la viscoélasticité du pneu
  - les conditions de roulement (vitesse, trajectoire)
  
2. **Étudier expérimentalement le contact dynamique :**
  - comparaison aux modèles physiques en analysant séparément les différents phénomènes de contact (viscoélasticité, vibrations)
  
3. **Prévoir le bruit de roulement :**
  - réaliser un calcul de prévision du bruit avec le modèle physique disponible (approche physique)
  - ou, corréler le bruit mesuré au modèle de contact développé (approche hybride)

## 2- Démarche envisagée

### Modélisation du contact pneumatique/chaussée :

- Introduction de la viscoélasticité dans l'approche multipoints avec une validation pas à pas du modèle
- Introduction de la vibration du pneumatique dans l'approche multipoints
- Prévion du bruit de roulement par méthode d'éléments de frontières à partir de l'excitation vibratoire du pneu résultant des forces de contact issues du modèle multipoints

### Etude expérimentale du contact pneumatique/chaussée :

- Comparaison avec le modèle physique de contact par banc d'essais
- Comparaison du modèle complet avec le bruit mesuré (mesure en continu du bruit de roulement)

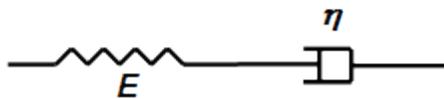
## 2- Viscoélasticité : Modèles analogiques

Fonction de fluage :  $\phi$  Fonction de relaxation :  $\psi$

Modèle de Maxwell

$$\psi(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}}$$

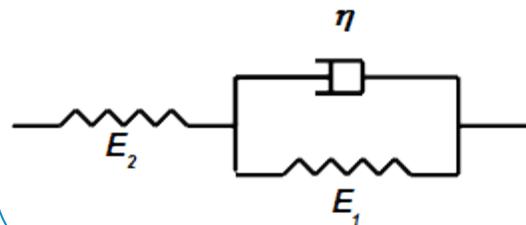
$$\phi(t) = \frac{1}{E} + \frac{1}{\eta} t$$



Modèle de Zener

$$\psi(t) = \frac{E_2}{E_1 + E_2} (E_1 + E_2 e^{-\frac{t}{T_r}})$$

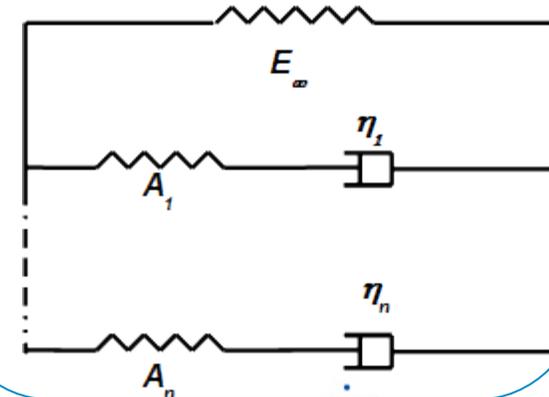
$$\phi(t) = \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{t}{T_f}})$$



Prony

$$\psi(t) = A_n e^{-t/\tau_n} + \dots + A_1 e^{-t/\tau_1} + E_\infty$$

$$\phi(t) = \frac{\prod_{i=0}^n \phi_i(t)}{\sum_{k=0}^n \frac{\prod_{i=0}^n \phi_i(t)}{\phi_k(t)}}$$



## 2- Viscoélasticité : Hypothèse de Radok

Méthode de Radok :

$$s = (\sigma - \bar{\sigma}) \quad e = (\varepsilon - \bar{\varepsilon}) \quad s = 2Ge$$

$$s(t) = \int_0^t \psi(t - \tau) \frac{\partial e(\tau)}{\partial \tau} d\tau$$

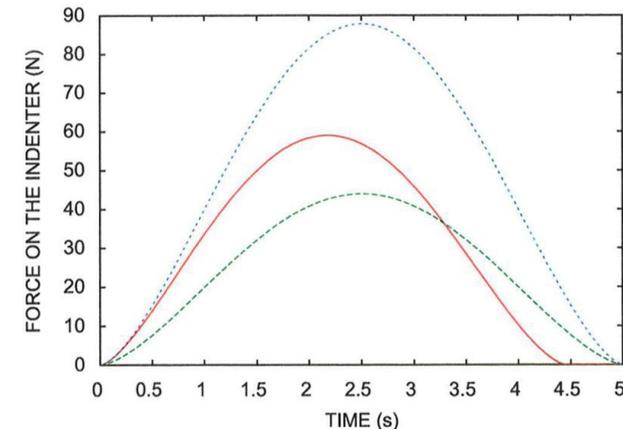
$$e(t) = \int_0^t \phi(t - \tau) \frac{\partial s(\tau)}{\partial \tau} d\tau$$

Application de la méthode par Sameur (2004) :

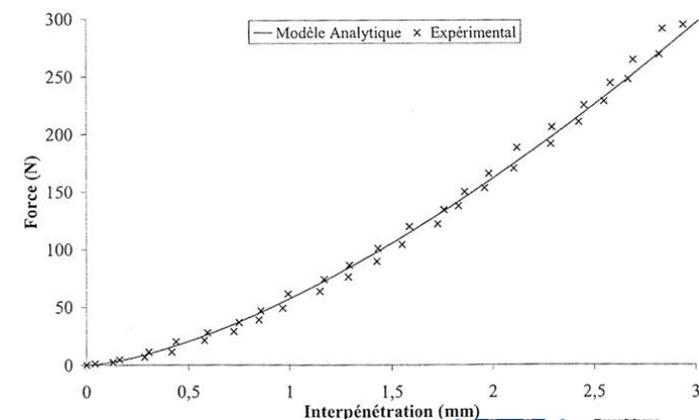
$$P = CE^* \delta^\gamma = 2GQ\delta^\gamma$$

$$P(t) = Q \int_0^t \psi(t - \tau) \frac{d\delta^\gamma}{d\tau} d\tau$$

Kozhevnikov (2008)



Sameur (2004)



## 2- Viscoélasticité : Approche multipoints

### Hypothèses :

- Même démarche que pour l'approche élastique
- La fonction d'influence G est indépendante du temps
- Pour un petit intervalle de temps, la fonction de relaxation peut-être considérée constante
- Utilisation de la méthode de Radok (pour le déplacement et pour la loi de contact) : en chargement et déchargement

### Formulation :

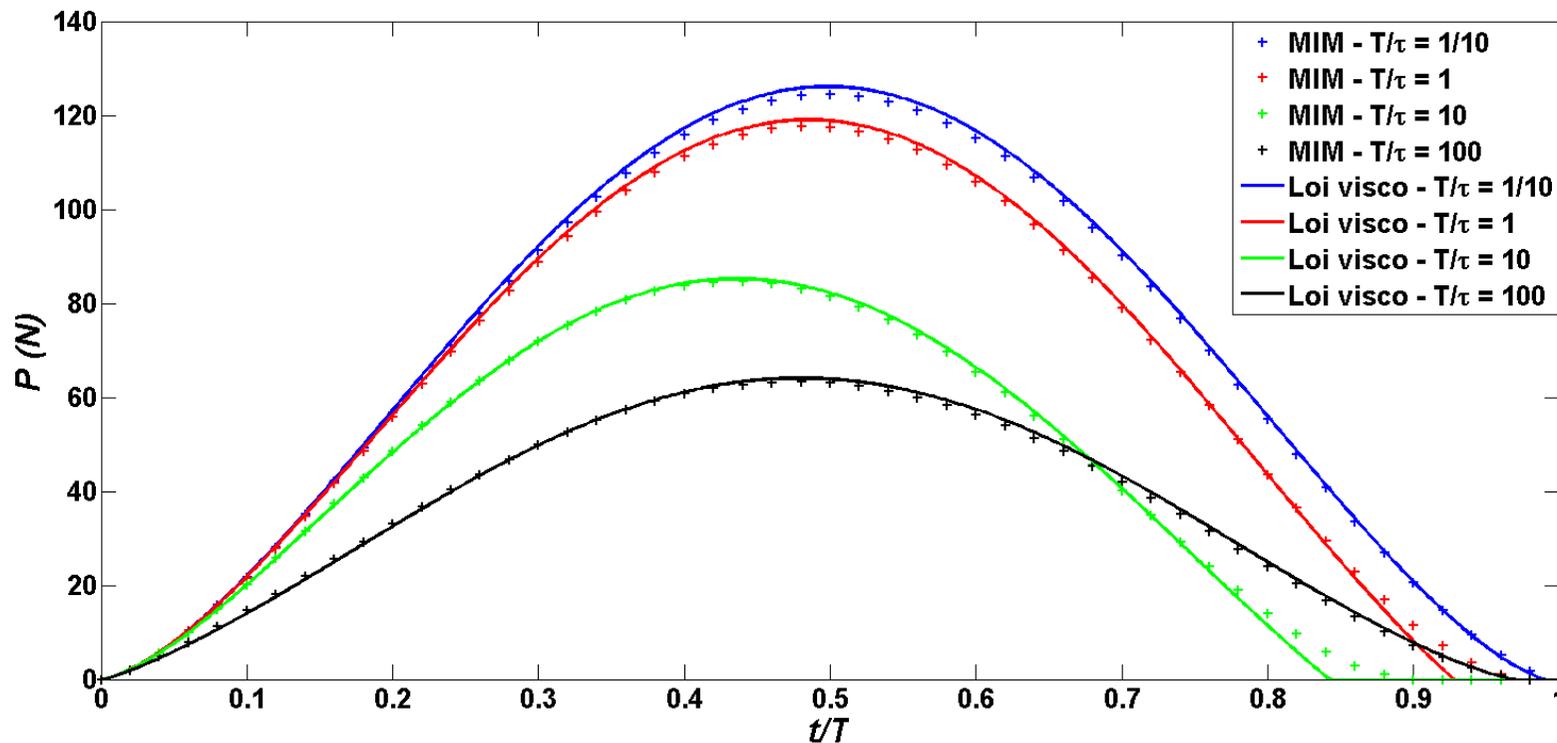
$$\delta_k(t) = z_k^s - \delta(t) - \phi(0) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N G_{kl} P_l(t) - \bar{u}_{old}^k(t)$$

$$\forall k \in [1, N], P_k(t) = \begin{cases} \gamma_k Q_k \psi(0) (\delta_k(t) - \delta_k(t - \delta t)) \delta_k(t)^{\gamma_k - 1} + \bar{P}_{old}^k(t) & \text{si } \delta_k(t) > 0 \\ 0 & \text{si } \delta_k(t) \leq 0 \end{cases}$$

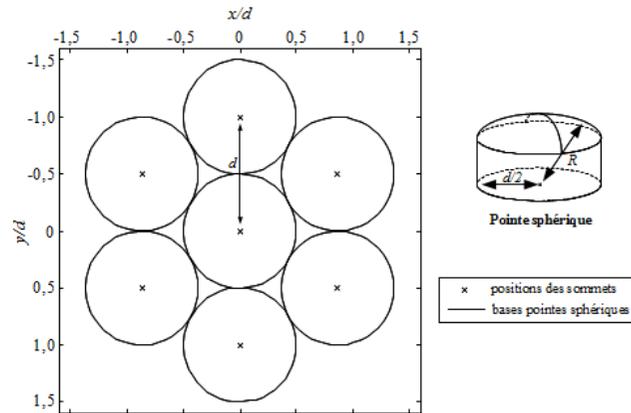
## 2- Viscoélasticité : Résultat pour 1 sphère

### Hypothèses :

- Massif : modèle de Zener :  $E_1 = 15$  MPa,  $E_2 = 7,5$  MPa,  $\tau = 1$  s.
- Sphère :  $R = 10$  mm,  $C = 4/3 \sqrt{R}$ ,  $\gamma = 1,5$ .
- Chargement :  $\delta = \sin(\pi t / T)$ , pas de temps = 50 (MIM), 500 (Loi visco - MULTI)

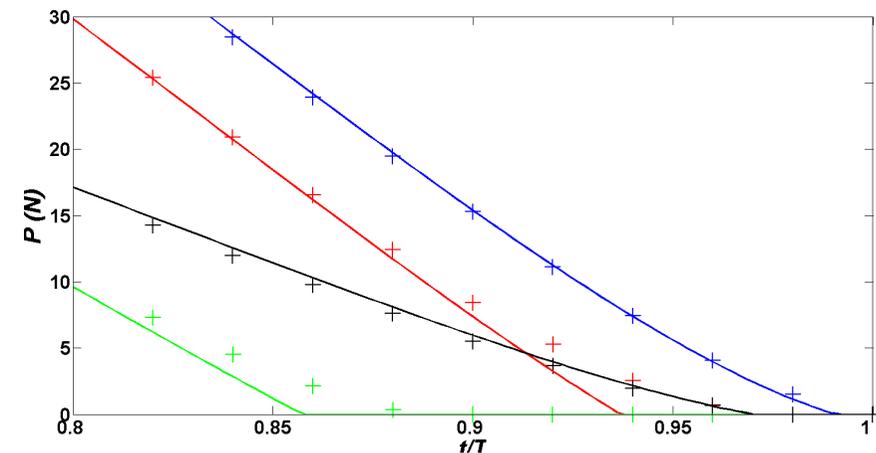
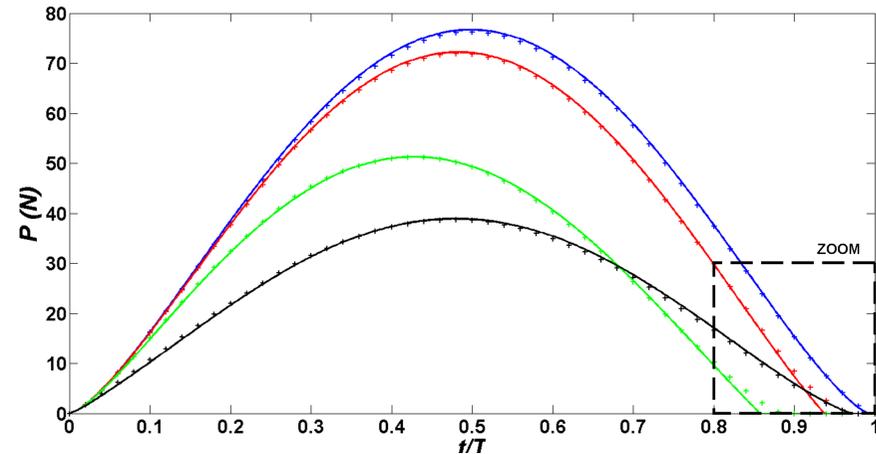


## 2- Viscoélasticité : Résultat 7 sphères



- + MIM -  $T/\tau = 1/10$
- + MIM -  $T/\tau = 1$
- + MIM -  $T/\tau = 10$
- + MIM -  $T/\tau = 100$
- MULTI -  $T/\tau = 1/10$
- MULTI -  $T/\tau = 1$
- MULTI -  $T/\tau = 10$
- MULTI -  $T/\tau = 100$

Pour la pointe centrale



## 3- Conclusions et perspectives

### Conclusions :

- Étude bibliographique → objectifs et démarche envisagée
- Introduction de la viscoélasticité dans l'approche multipoints sur des géométries simples
- Étude de faisabilité d'un banc d'essais

### Perspectives :

- Passage à une chaussée réelle pour l'approche multipoints (optimisation de l'algorithme d'identification)
- Introduction du roulement et de la vibration du pneumatique dans l'approche multipoints
- Expériences préliminaires sur un cas simple

## Modèle multipoints viscoélastique Contact pneumatique/chaussée

# Merci de votre attention