



IFSTTAR



Thèse de doctorat

Modèle de contact dynamique pneumatique/chaussée par approche multi-aspérités : application au bruit de roulement

Guillaume DUBOIS

Directrice de thèse : **F. Anfosso-Lédée** (Ifsttar)

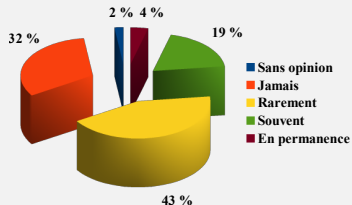
Co-directeur de thèse : **H. Yin** (ENPC)

Encadrant : **J. Cesbron** (Ifsttar)

Problématique : réduire le bruit des transports (1/2)

Le bruit de trafic routier

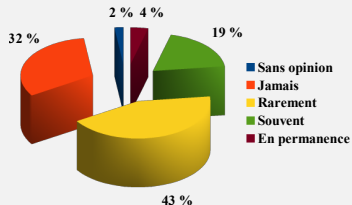
- **2 Français sur 3** déclarent être gênés par le bruit à leur domicile (TNS Sofres, 2010)



Problématique : réduire le bruit des transports (1/2)

Le bruit de trafic routier

- **2 Français sur 3** déclarent être gênés par le bruit à leur domicile (TNS Sofres, 2010)

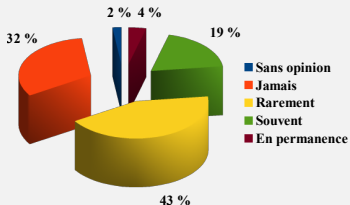


- **753 millions d'euros** en France en 2009 dépensés pour la lutte contre le bruit du trafic routier (Commission des comptes, 2011)

Problématique : réduire le bruit des transports (1/2)

Le bruit de trafic routier

- **2 Français sur 3** déclarent être gênés par le bruit à leur domicile (TNS Sofres, 2010)

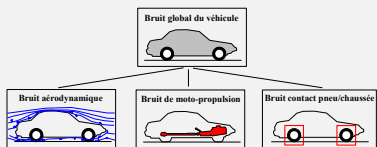


- **753 millions d'euros** en France en 2009 dépensés pour la lutte contre le bruit du trafic routier (Commission des comptes, 2011)
- **Aspects législatifs :**
 - Code de l'Environnement (articles L.571-9 et L571-10)
 - Directive Européenne 2002/49/CE

Problématique : réduire le bruit des transports (2/2)

Le bruit de contact pneumatique/chaussée

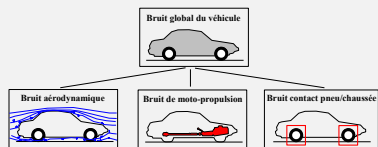
- **Prédominance du bruit de contact pneumatique/chaussée**
(3ème rapport de vitesse pour VL, VL hybride et électrique)



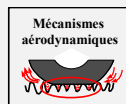
Problématique : réduire le bruit des transports (2/2)

Le bruit de contact pneumatique/chaussée

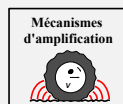
- **Prédominance du bruit de contact pneumatique/chaussée**
(3ème rapport de vitesse pour VL, VL hybride et électrique)



< 1 000 Hz



> 1 000 Hz



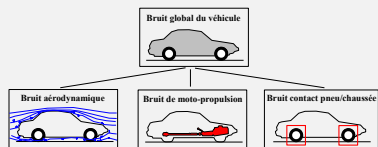
100 à 5 000 Hz

- **Les mécanismes générateurs :**

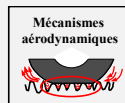
Problématique : réduire le bruit des transports (2/2)

Le bruit de contact pneumatique/chaussée

- **Prédominance du bruit de contact pneumatique/chaussée**
(3ème rapport de vitesse pour VL, VL hybride et électrique)



< 1 000 Hz



> 1 000 Hz



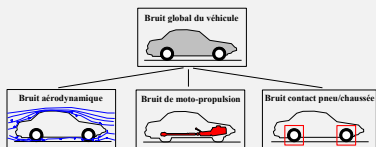
100 à 5 000 Hz

- **Les mécanismes générateurs :**
- **Pneumatique :** nombreuses études et avancées de la part des manufacturiers.

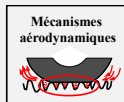
Problématique : réduire le bruit des transports (2/2)

Le bruit de contact pneumatique/chaussée

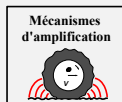
- **Prédominance du bruit de contact pneumatique/chaussée**
(3ème rapport de vitesse pour VL, VL hybride et électrique)



< 1 000 Hz



> 1 000 Hz

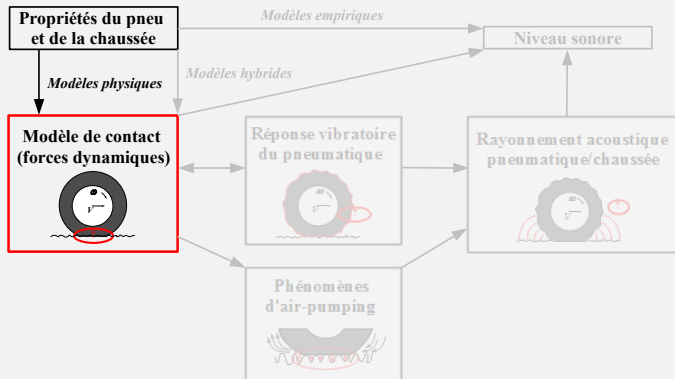


100 à 5 000 Hz

- **Les mécanismes générateurs :**
- **Pneumatique :** nombreuses études et avancées de la part des manufacturiers.
- **Chaussée :** optimisation nécessaire des paramètres de chaussée (texture, absorption, rigidité, etc.)

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

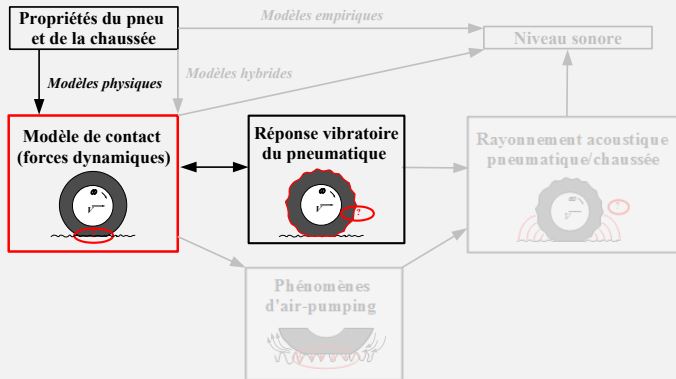
Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

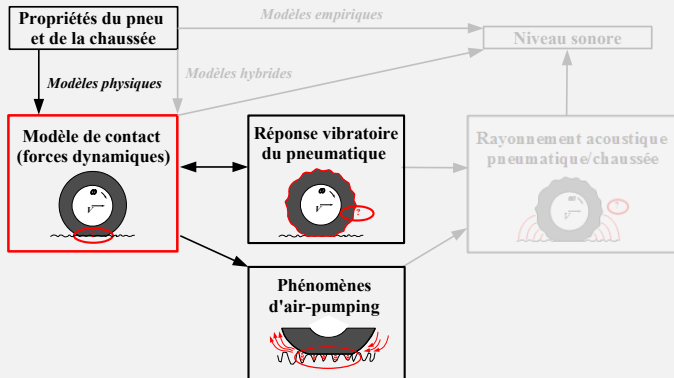
Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

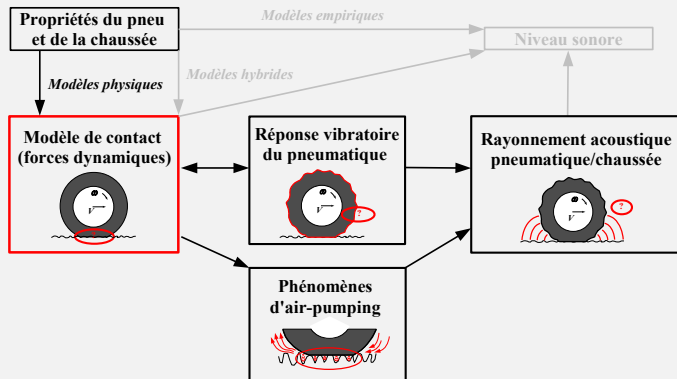
Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

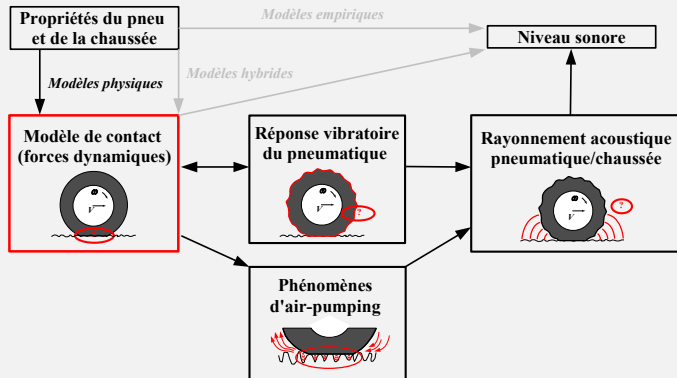
Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

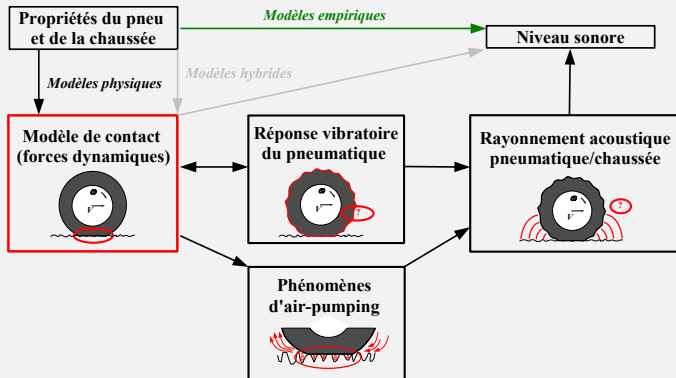
Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

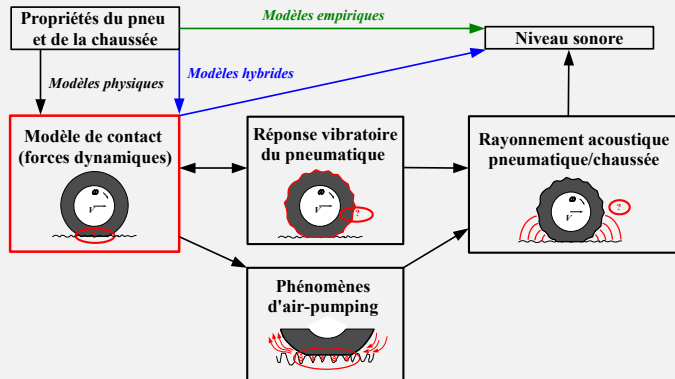
Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Modélisation du bruit de contact pneu/chaussée

Modélisation physique complète



Les **efforts de contact** conditionnent l'**excitation vibratoire** et l'**air-pumping** et, par conséquent, le **niveau de bruit** émis et son contenu fréquentiel.

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- **Grandes dimensions de l'aire de contact**

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact
- Nature aléatoire et multi-échelles de la surface de chaussée

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact
- Nature aléatoire et multi-échelles de la surface de chaussée
- Présence de forces de frottement et d'adhésion

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact
- Nature aléatoire et multi-échelles de la surface de chaussée
- Présence de forces de frottement et d'adhésion
- Dépendance en fréquence et en température des matériaux

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact
- Nature aléatoire et multi-échelles de la surface de chaussée
- Présence de forces de frottement et d'adhésion
- Dépendance en fréquence et en température des matériaux

Hypothèses simplificatrices

- Efforts de contact tangentiels négligeables

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact
- Nature aléatoire et multi-échelles de la surface de chaussée
- Présence de forces de frottement et d'adhésion
- Dépendance en fréquence et en température des matériaux

Hypothèses simplificatrices

- Efforts de contact tangentiels négligeables
- Surface de chaussée parfaitement rigide

Interaction pneumatique/chaussée (1/2)

Complexité du problème de contact (Andersson et Kropp, 2008)

- Grandes dimensions de l'aire de contact
- Variation temporelle de l'aire de contact
- Nature aléatoire et multi-échelles de la surface de chaussée
- Présence de forces de frottement et d'adhésion
- Dépendance en fréquence et en température des matériaux

Hypothèses simplificatrices

- Efforts de contact tangentiels négligeables
- Surface de chaussée parfaitement rigide
- Hypothèses de petites déformations

Interaction pneumatique/chaussée (2/2)

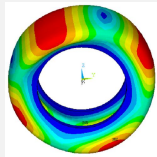
Approches numériques

Éléments finis classiques :

FEM : Laursen (2002) - 3D
Sellgren *et al.* (2003) - 3D

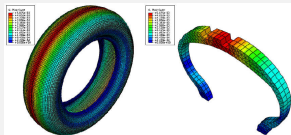
BEM : Wriggers (2002) - 3D

ALE : Nackenhorst (2004) - 3D



Éléments finis périodique :

FEM : Meftah (2011) - 3D



Interaction pneumatique/chaussée (2/2)

Approches numériques

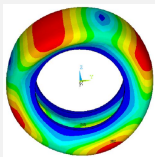
Éléments finis classiques :

FEM : Laursen (2002) - 3D

Sellgren *et al.* (2003) - 3D

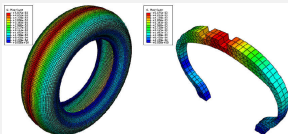
BEM : Wriggers (2002) - 3D

ALE : Nackenhorst (2004) - 3D



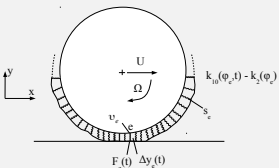
Éléments finis périodique :

FEM : Meftah (2011) - 3D



Fondation élastique de Winkler (1867)

Kropp (1992) - 2D



Hamet et Klein (2001) - 3D

Interaction pneumatique/chaussée (2/2)

Approches numériques

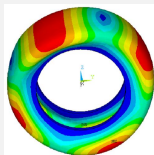
Éléments finis classiques :

FEM : Laursen (2002) - 3D

Sellgren *et al.* (2003) - 3D

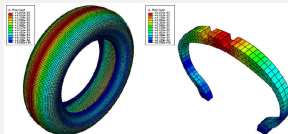
BEM : Wriggers (2002) - 3D

ALE : Nackenhorst (2004) - 3D



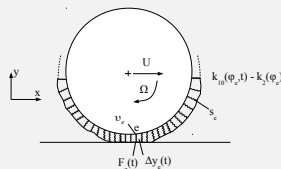
Éléments finis périodique :

FEM : Meftah (2011) - 3D



Fondation élastique de Winkler (1867)

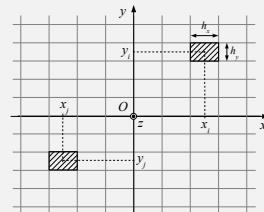
Kropp (1992) - 2D



Hamet et Klein (2001) - 3D

Approches analytiques (Boussinesq, 1885)

Méthode d'Inversion de Matrice (MIM) - 3D



Université de Chalmers :

Larsson (2002) - Quasi-3D

Wullens et Kropp (2004) - 3D

Multi-aspérités :

Fujikawa *et al.* (1999) - 2D

Sameur (2004) - 3D

Cesbron (2007) - 3D

Interaction pneumatique/chaussée (2/2)

Approches numériques

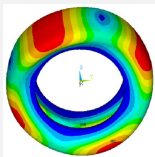
Éléments finis classiques :

FEM : Laursen (2002) - 3D

Sellgren *et al.* (2003) - 3D

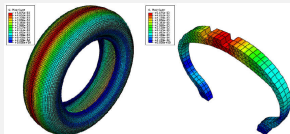
BEM : Wriggers (2002) - 3D

ALE : Nackenhorst (2004) - 3D



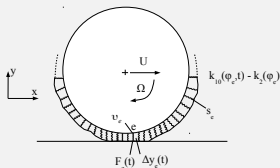
Éléments finis périodique :

FEM : Meftah (2011) - 3D



Fondation élastique de Winkler (1867)

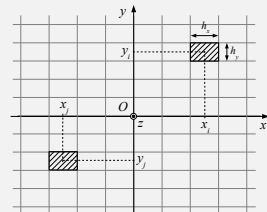
Kropp (1992) - 2D



Hamet et Klein (2001) - 3D

Approches analytiques (Boussinesq, 1885)

Méthode d'Inversion de Matrice (MIM) - 3D



Université de Chalmers :

Larsson (2002) - Quasi-3D

Wullens et Kropp (2004) - 3D

Multi-aspérités :

Fujikawa *et al.* (1999) - 2D

Sameur (2004) - 3D

Cesbron (2007) - 3D

Enjeu et objectifs de la thèse

Enjeu

Compléter les connaissances sur la modélisation du contact pneumatique/chaussée, afin de :

- mieux prévoir le bruit de roulement

Enjeu et objectifs de la thèse

Enjeu

Compléter les connaissances sur la modélisation du contact pneumatique/chaussée, afin de :

- mieux prévoir le bruit de roulement
- optimiser les principaux paramètres de la chaussée influant sur le bruit résultant

Enjeu et objectifs de la thèse

Enjeu

Compléter les connaissances sur la modélisation du contact pneumatique/chaussée, afin de :

- mieux prévoir le bruit de roulement
- optimiser les principaux paramètres de la chaussée influant sur le bruit résultant

Objectifs

- Développer un **modèle de contact dynamique pneumatique/chaussée**

Enjeu et objectifs de la thèse

Enjeu

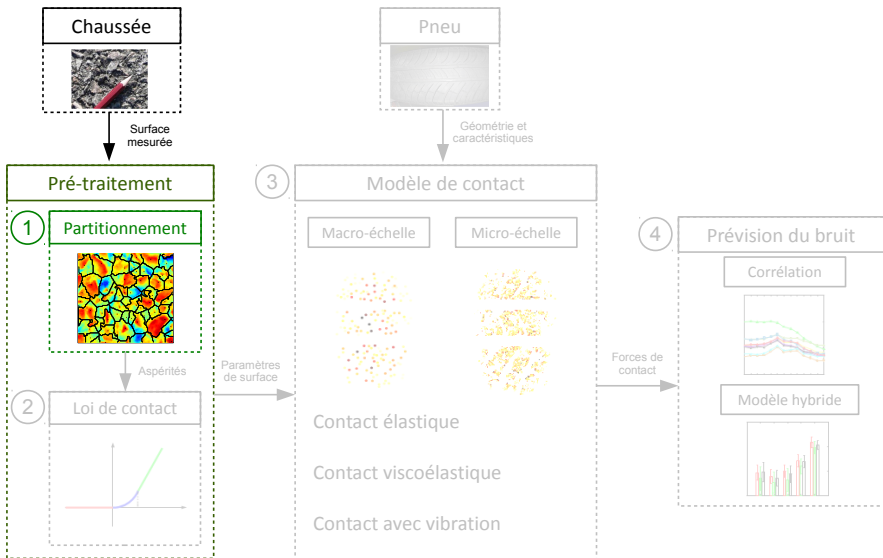
Compléter les connaissances sur la modélisation du contact pneumatique/chaussée, afin de :

- mieux prévoir le bruit de roulement
- optimiser les principaux paramètres de la chaussée influant sur le bruit résultant

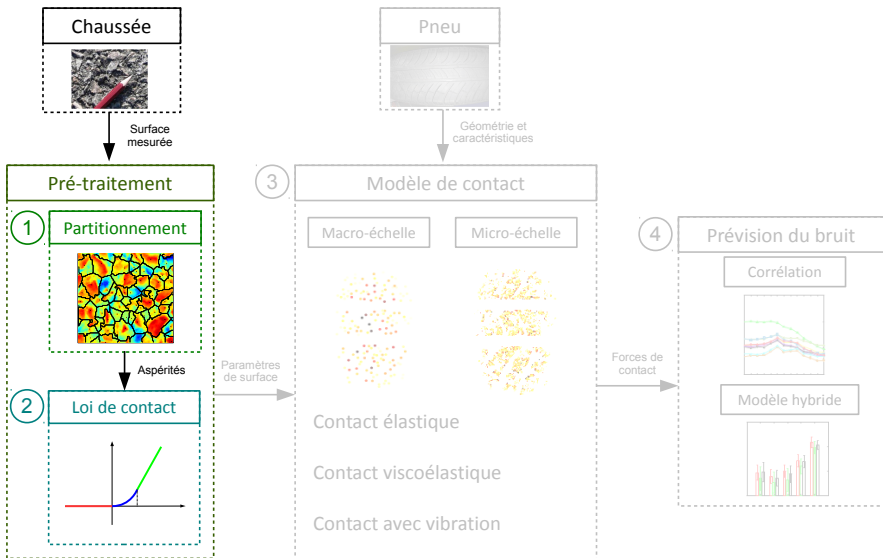
Objectifs

- Développer un **modèle de contact dynamique pneumatique/chaussée**
- Établir un **lien** entre la **texture**, les **forces** de contact dynamiques et le niveau de **bruit**

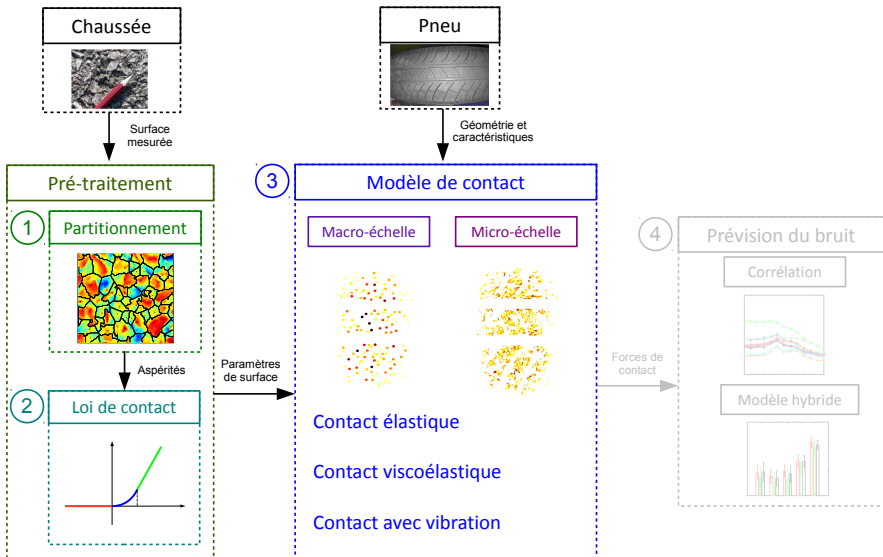
Sommaire



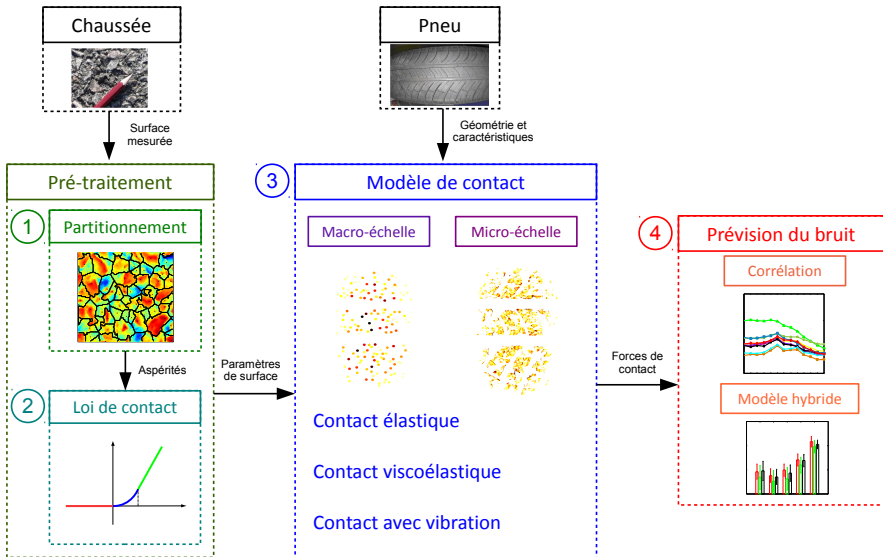
Sommaire



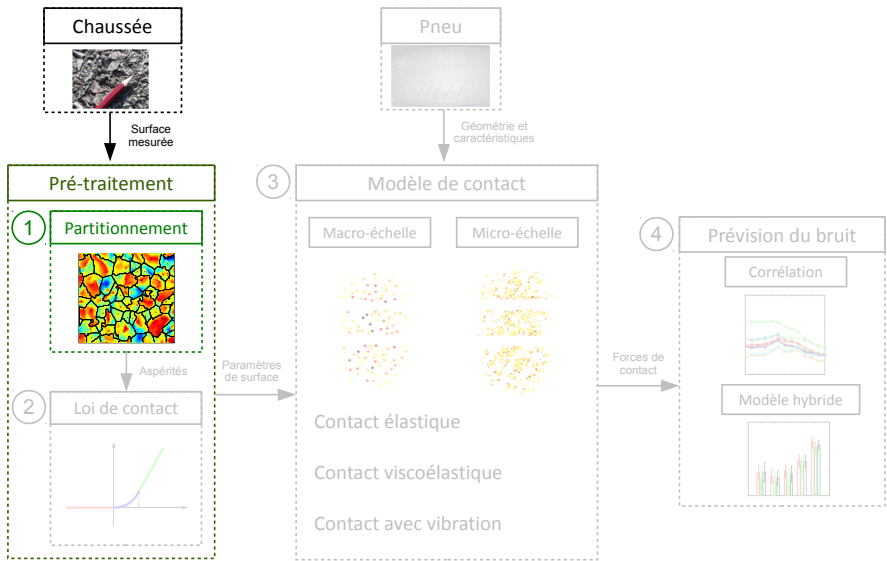
Sommaire



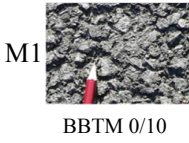
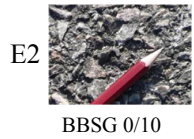
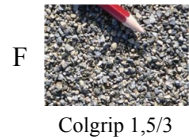
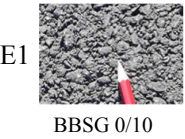
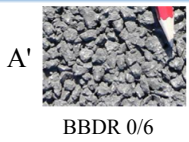
Sommaire



Sommaire



Surfaces utilisées (piste de Nantes)



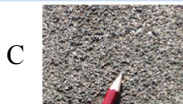
Surfaces utilisées (piste de Nantes)



ES 8/10



BBDR 0/6



ES 0,8/1,5



BBSG 0/10



Colgrip 1,5/3



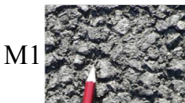
BBS 0/10



BBSG 0/10



SE 0/4



BBTM 0/10

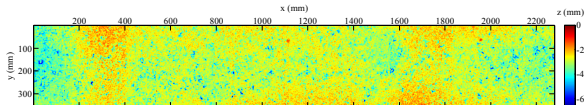


BBTM 0/6

Mesure Deufrako P2RN (2009)

- $h_x = h_y = 0,384 \text{ mm}$;
 $h_z = 0,038 \text{ mm}$

- $L_x \simeq 2,3 \text{ m}$; $L_y \simeq 0,36 \text{ m}$



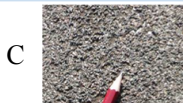
Surfaces utilisées (piste de Nantes)



ES 8/10



BBDR 0/6



ES 0,8/1,5



BBSG 0/10



Colgrip 1,5/3



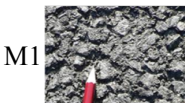
BBS 0/10



BBSG 0/10



SE 0/4



BBTM 0/10

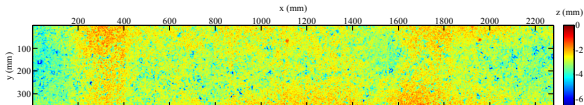


BBTM 0/6

Mesure Deufrako P2RN (2009)

- $h_x = h_y = 0,384 \text{ mm}$;
 $h_z = 0,038 \text{ mm}$

- $L_x \simeq 2,3 \text{ m}$; $L_y \simeq 0,36 \text{ m}$



Principe du partitionnement

Seuillage itératif (Cesbron, 2007)

Principe du partitionnement

Seuillage itératif (Cesbron, 2007)

Définition du partitionnement

$$S = \bigcup_{k=1}^N S_k$$

$$\forall (k, l) \in [1, N]^2 \setminus k \neq l, S_k \cap S_l = \emptyset$$

- N aspérités

Principe du partitionnement

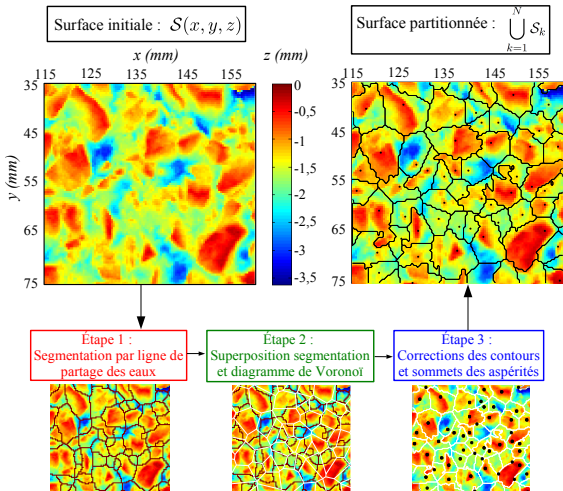
Seuillage itératif (Cesbron, 2007)

Définition du partitionnement

$$\mathcal{S} = \bigcup_{k=1}^N \mathcal{S}_k$$

$$\forall (k, l) \in [1, M]^2 \setminus k \neq l, \mathcal{S}_k \cap \mathcal{S}_l = \emptyset$$

● N aspérités



Principe du partitionnement

Seuillage itératif (Cesbron, 2007)

Définition du partitionnement

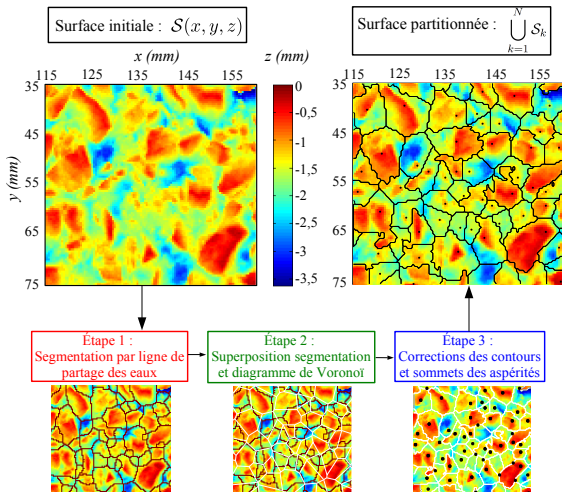
$$S = \bigcup_{k=1}^N S_k$$

$$\forall (k, l) \in [1, M]^2 \setminus k \neq l, S_k \cap S_l = \emptyset$$

● N aspérités

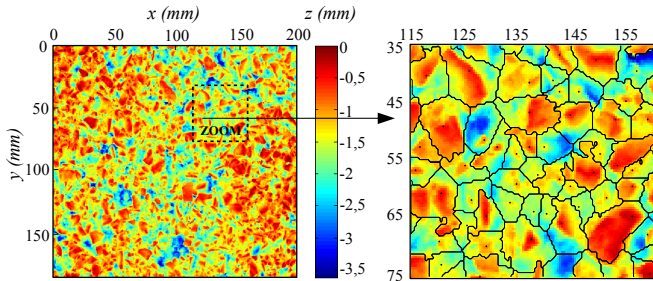
Définition d'une aspérité S_k

- Indice $k \in [1, M]$
- Frontière avec les autres aspérités
- Pixels qui composent sa surface (x_k, y_k, z_k)
- Sommet (x_k^s, y_k^s, z_k^s)



Résultats

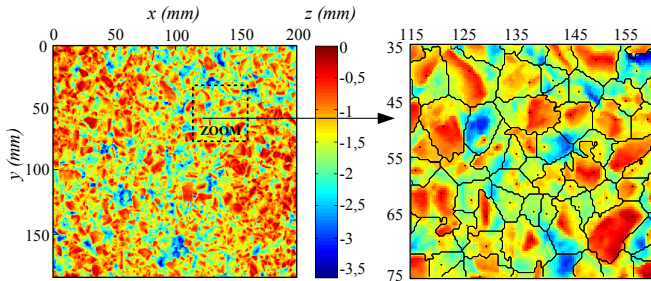
Exemple pour la surface E2 :



- $S = 20 \times 19 \text{ cm}^2$
- $n = 239\,000$ pixels
- $N = 1087$ aspérités
- Temps de calcul = 20 mn

Résultats

Exemple pour la surface E2 :



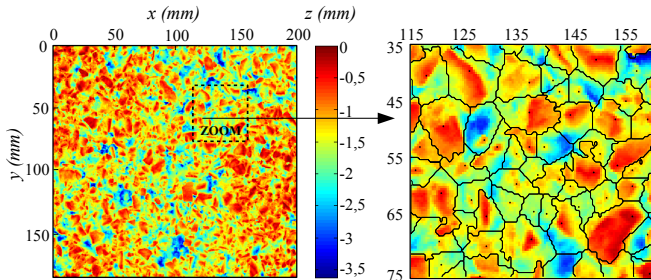
- $S = 20 \times 19 \text{ cm}^2$
- $n = 239\,000$ pixels
- $N = 1087$ aspérités
- Temps de calcul = 20 mn

Pour l'ensemble des surfaces sur 2 m

- Partitionnement total de la surface en tenant compte de la forme des aspérités

Résultats

Exemple pour la surface E2 :



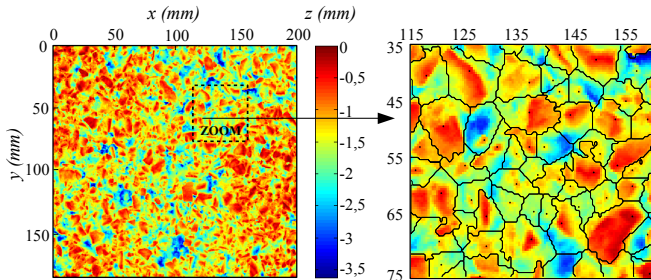
- $S = 20 \times 19 \text{ cm}^2$
- $n = 239\,000$ pixels
- $N = 1087$ aspérités
- Temps de calcul = 20 mn

Pour l'ensemble des surfaces sur 2 m

- Partitionnement total de la surface en tenant compte de la forme des aspérités
- Relation densité / granulométrie

Résultats

Exemple pour la surface E2 :

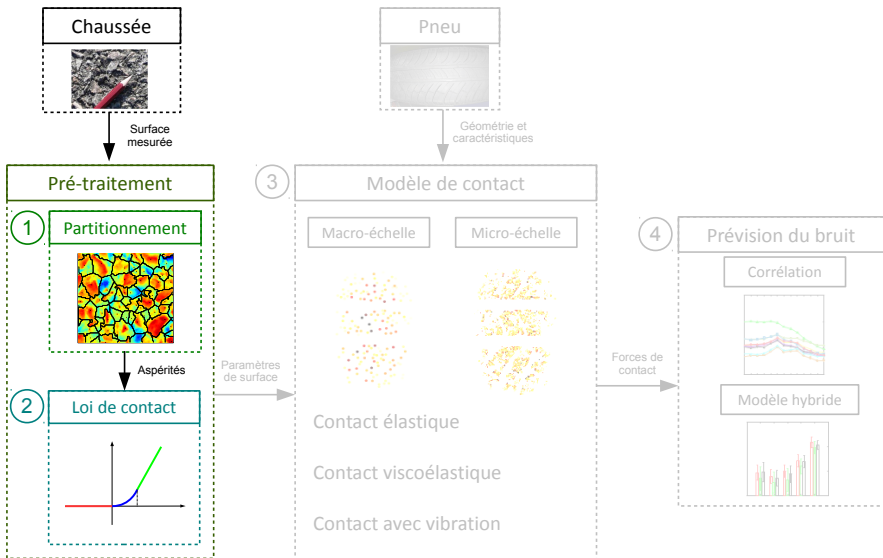


- $S = 20 \times 19 \text{ cm}^2$
- $n = 239\,000$ pixels
- $N = 1087$ aspérités
- Temps de calcul = 20 mn

Pour l'ensemble des surfaces sur 2 m

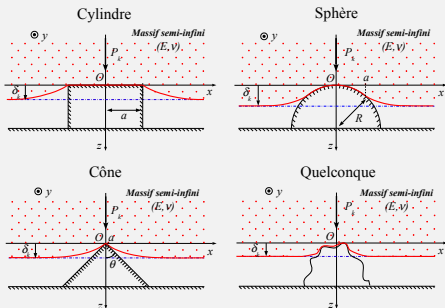
- Partitionnement total de la surface en tenant compte de la forme des aspérités
- Relation densité / granulométrie
- Temps de calcul important (~ 100 h)

Sommaire



Définition analytique pour faible chargement

Géométrie



Loi de contact à faible chargement

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

Cylindre

$$P_k = 2E^* a \delta_k$$

Sphère

$$P_k = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta_k^{\frac{3}{2}}$$

Cône

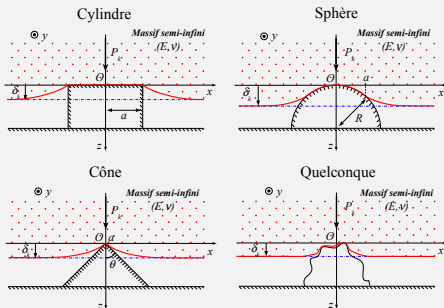
$$P_k = \frac{2}{\pi} E^* \tan \theta \delta_k^2$$

Quelconque

$$P_k = C_k E^* \delta_k^{\gamma_k}$$

Définition analytique pour faible chargement

Géométrie



Loi de contact à faible chargement

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

Cylindre

$$P_k = 2E^* a \delta_k$$

Sphère

$$P_k = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta_k^{\frac{3}{2}}$$

Cône

$$P_k = \frac{2}{\pi} E^* \tan \theta \delta_k^2$$

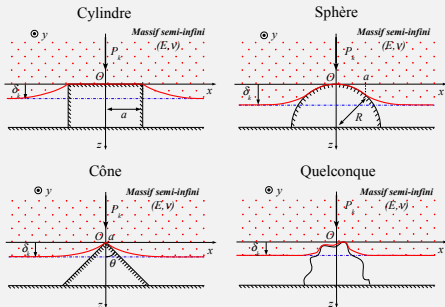
Quelconque

$$P_k = C_k E^* \delta_k^{\gamma_k}$$

- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de la pointe
- γ_k est caractéristique de la forme de la pointe

Définition analytique pour faible chargement

Géométrie



Loi de contact à faible chargement

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

Cylindre

$$P_k = 2E^* a \delta_k$$

Sphère

$$P_k = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta_k^{\frac{3}{2}}$$

Cône

$$P_k = \frac{2}{\pi} E^* \tan \theta \delta_k^2$$

Quelconque

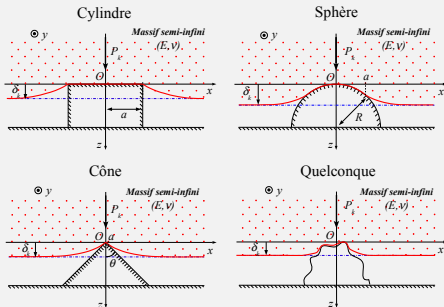
$$P_k = C_k E^* \delta_k^{\gamma_k}$$

- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de la pointe
- γ_k est caractéristique de la forme de la pointe

● Définition uniquement valable pour $\delta_k \lesssim 1 \text{ mm}$

Définition analytique pour faible chargement

Géométrie



Loi de contact à faible chargement

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

Cylindre

$$P_k = 2E^* a \delta_k$$

Sphère

$$P_k = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta_k^{\frac{3}{2}}$$

Cône

$$P_k = \frac{2}{\pi} E^* \tan \theta \delta_k^2$$

Quelconque

$$P_k = C_k E^* \delta_k^{\gamma_k}$$

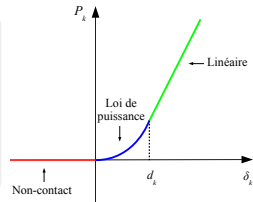
- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de la pointe
- γ_k est caractéristique de la forme de la pointe

- Définition uniquement valable pour $\delta_k \lesssim 1 \text{ mm}$
- Problème de convergence du modèle de contact

Définition analytique pour l'ensemble du chargement

Loi de contact analytique d'une aspérité quelconque (Dubois *et al.*, 2012)

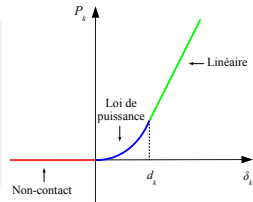
$$P_k = 2Gf_k(\delta_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 & \text{Non-contact} \\ C_k E^* \delta_k^{\gamma_k} & \text{si } 0 < \delta_k < d_k & \text{Loi de puissance} \\ K_k E^* (\delta_k - d_k) + C_k E^* d_k^{\gamma_k} & \text{si } d_k \leq \delta_k & \text{Linéaire} \end{cases}$$



Définition analytique pour l'ensemble du chargement

Loi de contact analytique d'une aspérité quelconque (Dubois *et al.*, 2012)

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 & \text{Non-contact} \\ C_k E^* \delta_k^{\gamma_k} & \text{si } 0 < \delta_k < d_k & \text{Loi de puissance} \\ K_k E^* (\delta_k - d_k) + C_k E^* d_k^{\gamma_k} & \text{si } d_k \leq \delta_k & \text{Linéaire} \end{cases}$$



4 paramètres

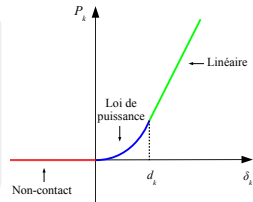
- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de l'aspérité



Définition analytique pour l'ensemble du chargement

Loi de contact analytique d'une aspérité quelconque (Dubois *et al.*, 2012)

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 & \text{Non-contact} \\ C_k E^* \delta_k^{\gamma_k} & \text{si } 0 < \delta_k < d_k & \text{Loi de puissance} \\ K_k E^* (\delta_k - d_k) + C_k E^* d_k^{\gamma_k} & \text{si } d_k \leq \delta_k & \text{Linéaire} \end{cases}$$



4 paramètres

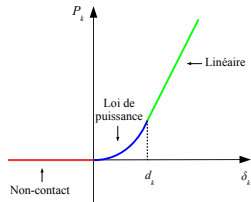
- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de l'aspérité
- γ_k est caractéristique de la forme de l'aspérité



Définition analytique pour l'ensemble du chargement

Loi de contact analytique d'une aspérité quelconque (Dubois *et al.*, 2012)

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 & \text{Non-contact} \\ C_k E^* \delta_k^{\gamma_k} & \text{si } 0 < \delta_k < d_k & \text{Loi de puissance} \\ K_k E^* (\delta_k - d_k) + C_k E^* d_k^{\gamma_k} & \text{si } d_k \leq \delta_k & \text{Linéaire} \end{cases}$$



4 paramètres

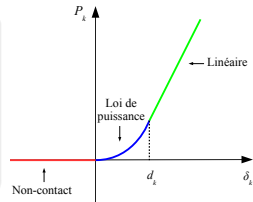
- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de l'aspérité
- γ_k est caractéristique de la forme de l'aspérité
- K_k est une raideur normalisée



Définition analytique pour l'ensemble du chargement

Loi de contact analytique d'une aspérité quelconque (Dubois *et al.*, 2012)

$$P_k = 2Gf_k(\delta_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 & \text{Non-contact} \\ C_k E^* \delta_k^{\gamma_k} & \text{si } 0 < \delta_k < d_k & \text{Loi de puissance} \\ K_k E^* (\delta_k - d_k) + C_k E^* d_k^{\gamma_k} & \text{si } d_k \leq \delta_k & \text{Linéaire} \end{cases}$$



4 paramètres

- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de l'aspérité
- γ_k est caractéristique de la forme de l'aspérité
- K_k est une raideur normalisée
- d_k est un enfoncement critique

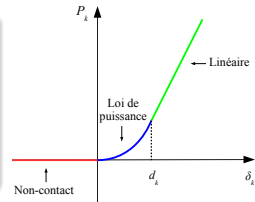


Définition analytique pour l'ensemble du chargement

Loi de contact analytique d'une aspérité quelconque (Dubois *et al.*, 2012)

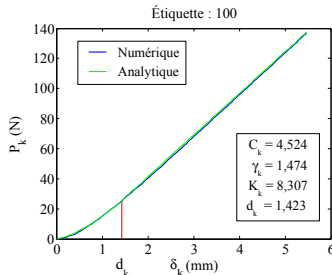
$$P_k = 2Gf_k(\delta_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta_k \leq 0 \\ C_k E^* \delta_k^{\gamma_k} & \text{si } 0 < \delta_k < d_k \\ K_k E^* (\delta_k - d_k) + C_k E^* d_k^{\gamma_k} & \text{si } d_k \leq \delta_k \end{cases}$$

Non-contact
 Loi de puissance
 Linéaire



4 paramètres

- C_k dépend de la géométrie et des dimensions de l'aspérité
- γ_k est caractéristique de la forme de l'aspérité
- K_k est une raideur normalisée
- d_k est un enfoncement critique



Distribution statistique des paramètres de contact (E2 : BBSG 0/10)

6 paramètres de contact

4 décrivant la loi de contact pour chaque aspérité

C_k, γ_k, d_k et $K_k (k \in [1, N])$

Distribution statistique des paramètres de contact (E2 : BBSG 0/10)

6 paramètres de contact

4 décrivant la loi de contact pour chaque aspérité

C_k, γ_k, d_k et $K_k (k \in [1, M])$

2 décrivant le positionnement relatif des aspérités

$$\forall k \in [1, M], \begin{cases} r_k = \overline{r_{kl}} \mid l \in \mathcal{V}_k \\ h_k = |z_k^s - z_l^s| \mid l \in \mathcal{V}_k \end{cases}$$

avec :

$$r_{kl} = \sqrt{(x_k^s - x_l^s)^2 + (y_k^s - y_l^s)^2}$$

Distribution statistique des paramètres de contact (E2 : BBSG 0/10)

6 paramètres de contact

4 décrivant la loi de contact pour chaque aspérité

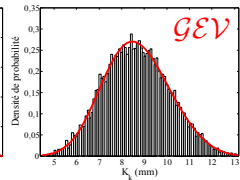
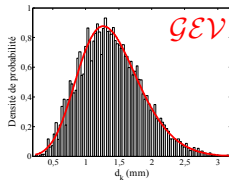
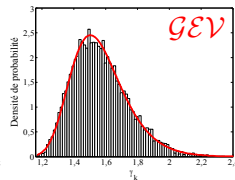
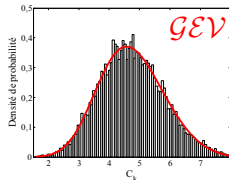
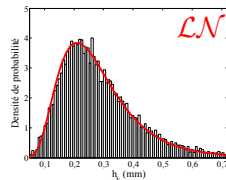
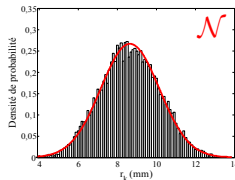
 C_k, γ_k, d_k et $K_k (k \in [1, N])$

2 décrivant le positionnement relatif des aspérités

$$\forall k \in [1, N], \begin{cases} r_k = \overline{r_{kl}} |_{l \in \mathcal{V}_k} \\ h_k = |z_k^S - z_l^S| |_{l \in \mathcal{V}_k} \end{cases}$$

avec :

$$r_{kl} = \sqrt{(x_k^S - x_l^S)^2 + (y_k^S - y_l^S)^2}$$



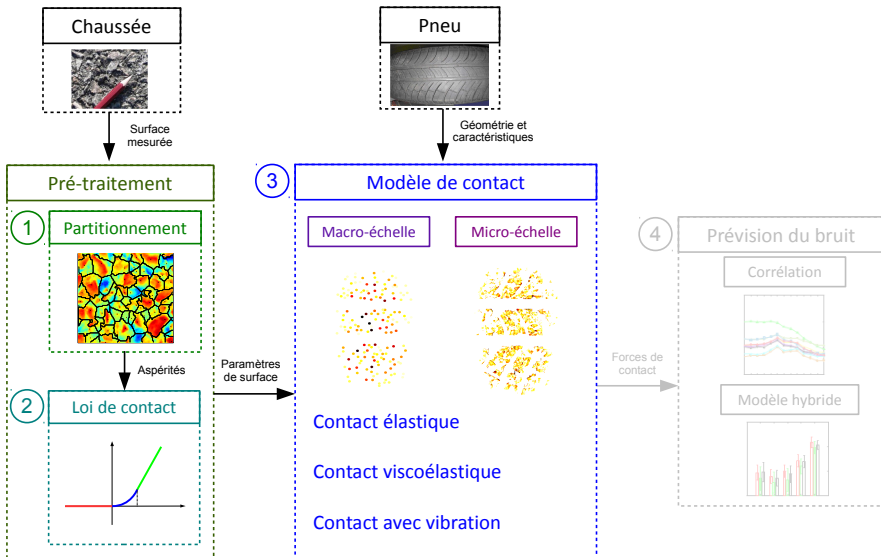
Paramètres moyens

Paramètres de contact moyens et densité d'aspérités

Surface	Granulométrie	\bar{r} (mm)	\bar{h} (mm)	\bar{K} (mm)	D (asp/m ²)
C	0,8/1,5	6,07	0,14	6,22	30 985
L2	0/4	6,25	0,19	6,43	29 209
F	1,5/3	6,75	0,59	6,47	24 742
A'	0/6	7,30	0,21	6,37	21 786
E1	0/10	7,96	0,18	7,92	17 512
M2	0/6	8,13	0,21	7,71	17 315
G	0/10	8,11	0,21	8,14	17 112
E2	0/10	8,65	0,28	8,66	15 214
M1	0/10	10,15	0,25	9,25	11 123
A	8/10	13,05	1,65	11,10	6 721

- Granulométrie maximale ↗ ⇔ D ↘
- Granulométrie maximale ↗ ⇔ \bar{r} et \bar{K} ↗
- Relation moins évidente avec \bar{h}

Sommaire



Modèle de contact multi-aspérités

Formalisme de Green et conditions de Signorini

$$\forall t \geq 0, \forall M \in \Sigma(t), u(M, t) = \int_0^t \int_{\Sigma(\tau)} G(M|S, t - \tau) p(S, \tau) d\Sigma(\tau) d\tau$$

$$\forall t \geq 0, \begin{cases} \forall M \in \bar{\Sigma}_c(t), u(M, t) - z_c(M, t) + \delta + z_p(M, t) > 0 & \text{et} & p(M, t) = 0 & \text{Séparation} \\ \forall M \in \Sigma_c(t), u(M, t) - z_c(M, t) + \delta + z_p(M, t) = 0 & \text{et} & p(M, t) > 0 & \text{Contact} \end{cases}$$

$$P(t) = - \int_{\Sigma_c(t)} p(S, t) d\Sigma_c(t)$$

Modèle de contact multi-aspérités

Formalisme de Green et conditions de Signorini

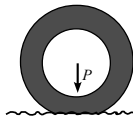
$$\forall t \geq 0, \forall M \in \Sigma(t), u(M, t) = \int_0^t \int_{\Sigma(\tau)} G(M|S, t - \tau) p(S, \tau) d\Sigma(\tau) d\tau$$

$$\forall t \geq 0, \begin{cases} \forall M \in \bar{\Sigma}_c(t), u(M, t) - z_c(M, t) + \delta + z_p(M, t) > 0 & \text{et } p(M, t) = 0 & \text{Séparation} \\ \forall M \in \Sigma_c(t), u(M, t) - z_c(M, t) + \delta + z_p(M, t) = 0 & \text{et } p(M, t) > 0 & \text{Contact} \end{cases}$$

$$P(t) = - \int_{\Sigma_c(t)} p(S, t) d\Sigma_c(t)$$

Hypothèses simplificatrices

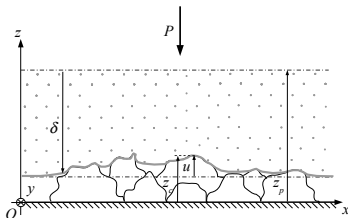
- Massif semi-infini (Boussinesq)
- Partitionnement de la surface de chaussée



PNEU



CHAUSSÉE



Modèle de contact multi-aspérités élastique

Modèle de contact

Macro-échelle

Micro-échelle



Contact élastique

Contact viscoélastique

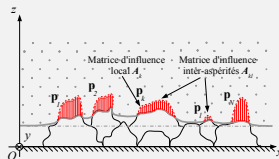
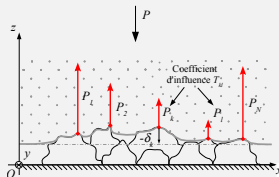
Contact avec vibration

Modèle de contact multi-aspérités élastique

- Massif semi-infini élastique
- Modèle de contact quasi-statique
- Pas de vibration

Macro-échelle

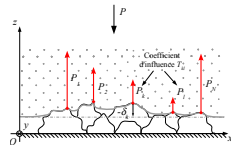
Micro-échelle



Macro-échelle élastique

● Loi de contact

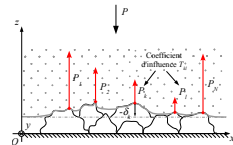
$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k) \quad \text{avec} \quad \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl}P_l$$



Macro-échelle élastique

● Loi de contact

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k) \quad \text{avec} \quad \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl}P_l$$



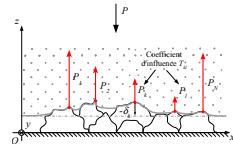
● Partitionnement multi-aspérité de la chaussée

$$\forall M \in \Sigma, u(M) = \sum_{k=1}^N \int_{\Sigma_k} G(M|S)p(S)d\Sigma_k$$

Macro-échelle élastique

● Loi de contact

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k) \quad \text{avec} \quad \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$



● Partitionnement multi-aspérité de la chaussée

$$\forall M \in \Sigma, u(M) = \sum_{k=1}^N \int_{\Sigma_k} G(M|S) p(S) d\Sigma_k$$

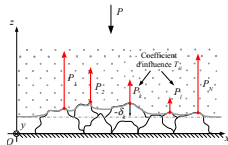
● Interaction décrite aux sommets des aspérités

$$\forall l \in [1, N], \forall (M, S) \in \Sigma_k \times \Sigma_l, G(M, S) = G(x_k^S, y_k^S; \xi_l^S, \eta_l^S) \equiv T_{kl}$$

Macro-échelle élastique

● Loi de contact

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k) \quad \text{avec} \quad \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$



● Partitionnement multi-aspérité de la chaussée

$$\forall M \in \Sigma, u(M) = \sum_{k=1}^N \int_{\Sigma_k} G(M|S) p(S) d\Sigma_k$$

● Interaction décrite aux sommets des aspérités

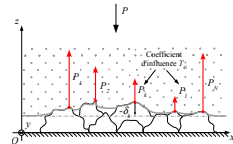
$$\forall l \in [1, N], \forall (M, S) \in \Sigma_k \times \Sigma_l, G(M, S) = G(x_k^S, y_k^S; \xi_l^S, \eta_l^S) \equiv T_{kl}$$

$$\Rightarrow \quad \forall k \in [1, N], \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

Macro-échelle élastique

● Loi de contact

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k) \quad \text{avec} \quad \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$



● Partitionnement multi-aspérité de la chaussée

$$\forall M \in \Sigma, u(M) = \sum_{k=1}^N \int_{\Sigma_k} G(M|S) p(S) d\Sigma_k$$

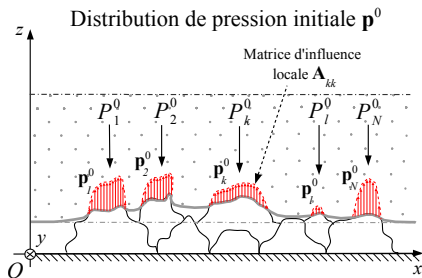
● Interaction décrite aux sommets des aspérités

$$\forall l \in [1, N], \forall (M, S) \in \Sigma_k \times \Sigma_l, G(M, S) = G(x_k^S, y_k^S; \xi_l^S, \eta_l^S) \equiv T_{kl}$$

$$\Rightarrow \quad \forall k \in [1, N], \delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

Résolution à l'aide
d'un algorithme de
Newton-Raphson

Micro-échelle élastique

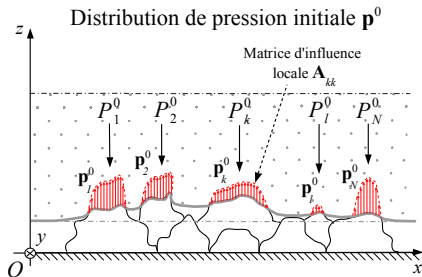


$$\mathbf{A}_{kk} \mathbf{p}_k^0 = \mathbf{b}_k^0$$

Résolution

MIM locale à force imposée
(P_k macro-échelle)

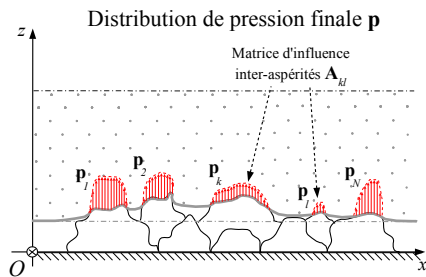
Micro-échelle élastique



$$\mathbf{A}_{kk} \mathbf{p}_k^0 = \mathbf{b}_k^0$$

Résolution

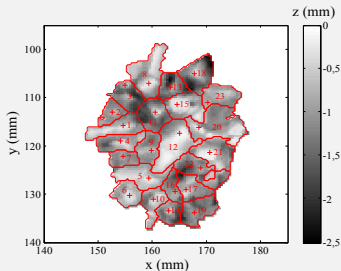
MIM locale à force imposée
(P_k macro-échelle)



$$\mathbf{A}_{kk} \mathbf{p}_k^{i+1} = \mathbf{b}_k^i - \sum_{l=1}^{k-1} \mathbf{A}_{kl} \mathbf{p}_l^{i+1} - \sum_{l=k+1}^N \mathbf{A}_{kl} \mathbf{p}_l^i$$

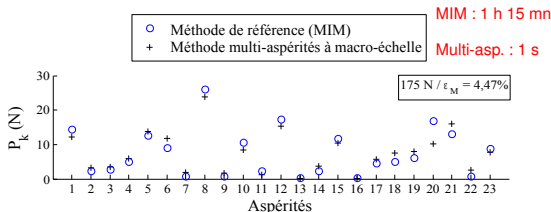
Résolution

Gauss-Seidel par blocs
non-linéaire

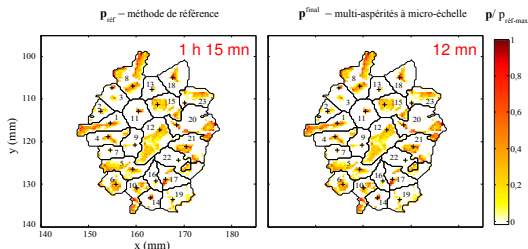
Validation (Dubois *et al.*, 2012)Surface : BBSG 0/10 (7 cm²)● $h_x = h_y = 0,384$ mm

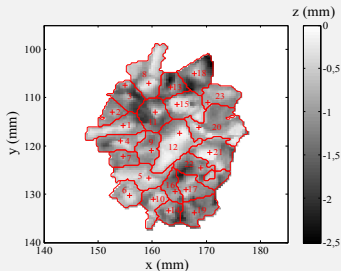
● MIM limité numériquement en taille de matrice

Macro-échelle :



Micro-échelle :



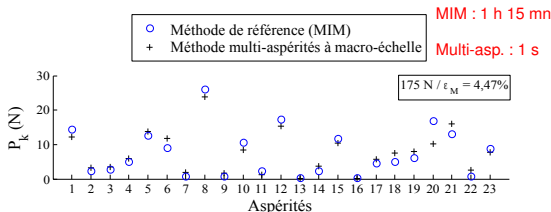
Validation (Dubois *et al.*, 2012)Surface : BBSG 0/10 (7 cm²)● $h_x = h_y = 0,384$ mm

● MIM limité numériquement en taille de matrice

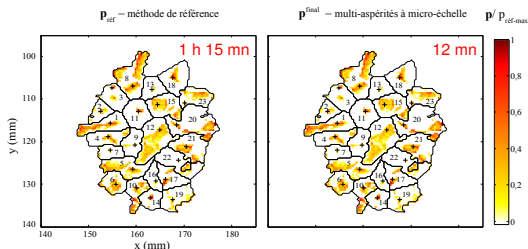
● Taille et résolution

● Gain important en temps de calcul

Macro-échelle :

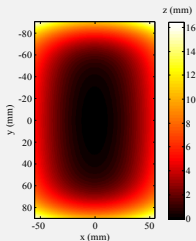


Micro-échelle :



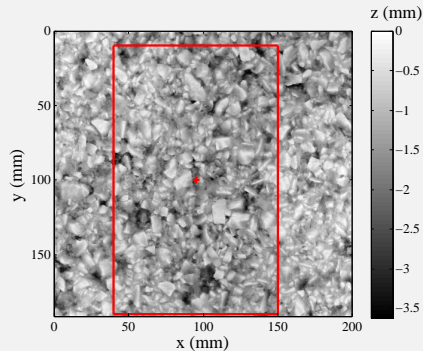
Évaluation d'empreintes statiques (1/2)

Configuration « pneu lisse » (Cesbron, 2007)



- Michelin Racer Slick 186/57 R15
- Massif semi-infini élastique : $E = 2,5 \text{ MPa}$, $\nu = 0,5$
- Pression de gonflage : 2,5 bars $\Rightarrow P = 3 \text{ 000 N}$

Surface parfaitement rigide (Cesbron, 2007)

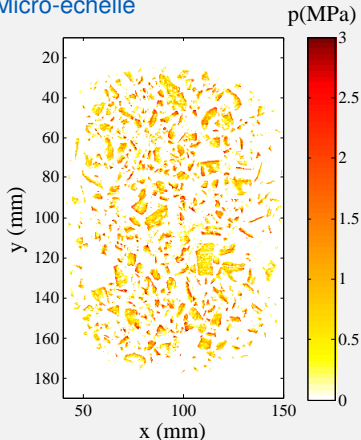


- BBSG 0/10 (E2)
- Éléments carrés en contact de 0,4 mm de côtés
- Zone potentiellement en contact de 11 cm \times 18 cm

Évaluation d'empreintes statiques (2/2)

Distribution de pression finale (Dubois *et al.*, 2012)

Micro-échelle

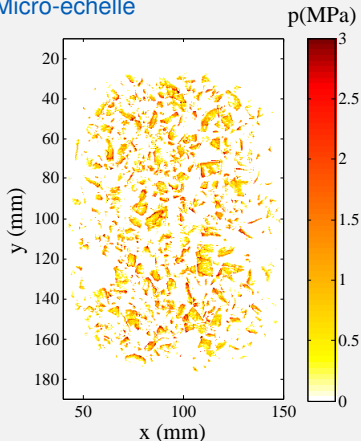


- Calcul impossible à réaliser avec des méthodes classiques (résolution, taille)
- 8 itérations
- 12 h de calcul
- Résultat de l'itération « zéro » ?

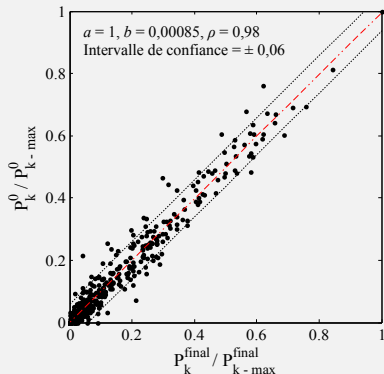
Évaluation d'empreintes statiques (2/2)

Distribution de pression initiale (Dubois *et al.*, 2012)

Micro-échelle



- 1 min de calcul
- Quelques problèmes aux bords des zones en contact
- Aire réelle différente de 3 %



Modèle de contact

Macro-échelle

Micro-échelle



Contact élastique

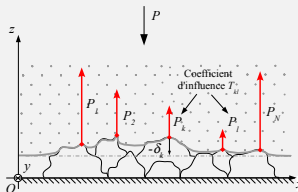
Contact viscoélastique

Contact avec vibration

Modèle de contact multi-aspérités viscoélastique

- Massif semi-infini viscoélastique
- Modèle de contact dynamique
- Pas de vibration

Macro-échelle

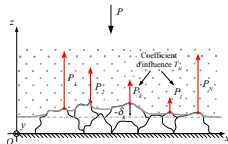


Macro-échelle viscoélastique (Dubois *et al.*, 2011)

● Macro-échelle élastique :

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

$$\delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

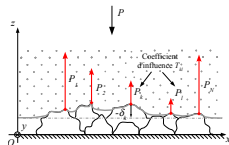


Macro-échelle viscoélastique (Dubois *et al.*, 2011)

● Macro-échelle élastique :

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

$$\delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$



Macro-échelle viscoélastique (Dubois *et al.*, 2011)

● Macro-échelle élastique :

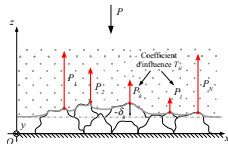
$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

$$\delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

$$\sigma = 2G\varepsilon$$

⇓ Radok (1957)

$$\sigma(t) = \int_0^t \psi(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{Convolution}$$



Macro-échelle viscoélastique (Dubois *et al.*, 2011)

● Macro-échelle élastique :

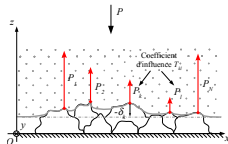
$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

$$\delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

$$\sigma = 2G\varepsilon$$

⇓ Radok (1957)

$$\sigma(t) = \int_0^t \psi(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{Convolution}$$



ψ : fonction de relaxation

ϕ : fonction de fluage

Utilisation de modèle

rhéologique classique



Macro-échelle viscoélastique (Dubois *et al.*, 2011)

● Macro-échelle élastique :

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

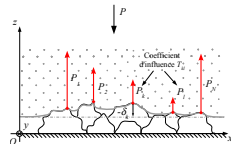
$$\delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

$$\sigma = 2G\varepsilon$$

⇓ Radok (1957)

$$\sigma(t) = \int_0^t \psi(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{Convolution}$$

$$P_k(t) = \int_0^t \psi(t-\tau) \frac{d}{d\tau} (f_k(\delta_k(\tau))) d\tau$$



ψ : fonction de relaxation

ϕ : fonction de fluage

Utilisation de modèle

rhéologique classique



Macro-échelle viscoélastique (Dubois *et al.*, 2011)

● Macro-échelle élastique :

$$\forall k \in [1, N], P_k = 2Gf_k(\delta_k)$$

$$\delta_k = z_{c,k}^S - \delta - z_{p,k}^S - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l$$

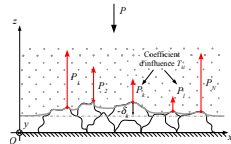
$$\sigma = 2G\varepsilon$$

↓ Radok (1957)

$$\sigma(t) = \int_0^t \psi(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{Convolution}$$

$$P_k(t) = \int_0^t \psi(t-\tau) \frac{d}{d\tau} (f_k(\delta_k(\tau))) d\tau$$

$$\forall t > 0, P_k(t) = \psi(0) f_k(\delta_k(t)) + P_k^{old}(t)$$



ψ : fonction de relaxation

ϕ : fonction de fluage

Utilisation de modèle
rhéologique classique

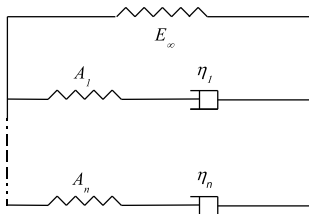
$$\delta_k(t) = z_{c,k}^S - \delta(t) - z_{p,k}^S - u_k^{old}(t) - \phi(0) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l(t)$$



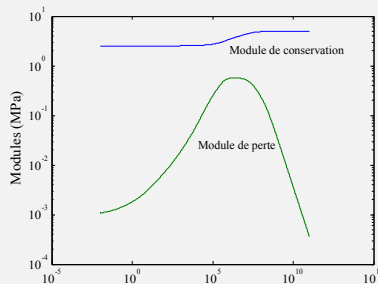
Empreinte macro-échelle viscoélastique (1/2)

Configuration des calculs (Dubois *et al.*, 2011)

- Massif semi-infini viscoélastique
- Configuration « pneu lisse »
- Surface BBSG 0/10 (E2)
- 4 chargements sinusoïdaux :
 - $t \in [0 ; 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ s}]$ (30 km/h)
 - $t \in [0 ; 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}]$ (50 km/h)
 - $t \in [0 ; 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}]$ (90 km/h)
 - $t \in [0 ; 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ s}]$ (130 km/h)



Modèle rhéologique de Maxwell généralisé

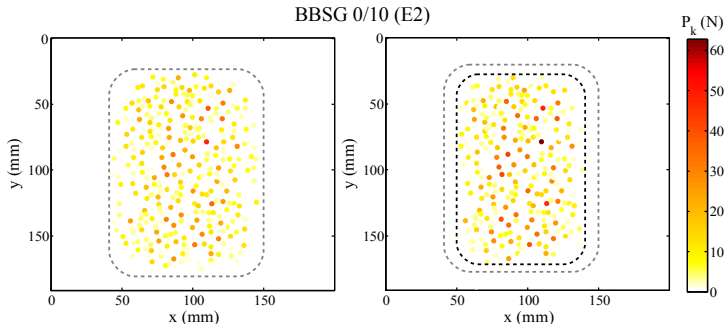


$$E' = E_{\infty} + G_0 \sum_{i=1}^m \frac{A_i \tau_i^2 \omega^2}{1 + \tau_i^2 \omega^2}$$

$$E'' = G_0 \sum_{i=1}^m \frac{A_i \tau_i \omega}{1 + \tau_i^2 \omega^2}$$

avec : $E^* = E' + iE''$

Empreinte macro-échelle viscoélastique (2/2)



Massif semi-infini élastique

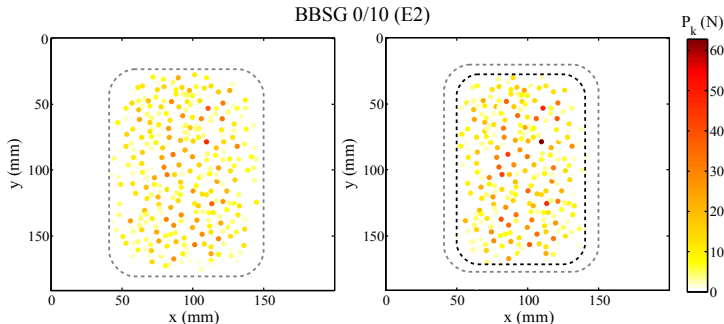
Condition statique

Massif semi-infini viscoélastique

30 km/h

Vitesse	A (cm ²)	P_{k-max} (N)
Statique	131,9	48,2
30 km/h	107,5	62,9
50 km/h	109,1	63,0
90 km/h	107,4	63,0
130 km/h	105,9	63,0

Empreinte macro-échelle viscoélastique (2/2)



Massif semi-infini élastique

Massif semi-infini viscoélastique

Condition statique

30 km/h

- Diminution de l'aire de contact (20 %)
- Simplification par module d'Young élastique équivalent

Vitesse	A (cm ²)	P_{k-max} (N)
Statique	131,9	48,2
30 km/h	107,5	62,9
50 km/h	109,1	63,0
90 km/h	107,4	63,0
130 km/h	105,9	63,0

Modèle de contact

Macro-échelle

Micro-échelle



Contact élastique

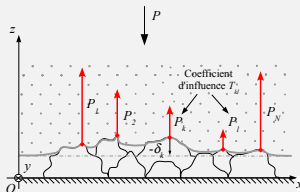
Contact viscoélastique

Contact avec vibration

Modèle de contact multi-aspérités complet

- Massif semi-infini viscoélastique
- Modèle de contact dynamique
- Vibration de la ceinture du pneumatique

Macro-échelle

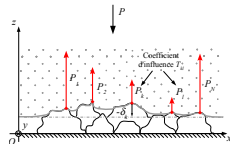


Macro-échelle viscoélastique avec vibration

● Sans vibration :

$$\forall t > 0, P_k(t) = \psi(0)f_k(\delta_k(t)) + P_k^{old}(t)$$

$$\delta_k(t) = z_{c,k}^s - \delta(t) - z_{p,k}^s - u_k^{old}(t) - \phi(0) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l(t)$$

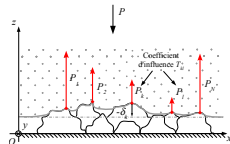


Macro-échelle viscoélastique avec vibration

● Sans vibration :

$$\forall t > 0, P_k(t) = \psi(0)f_k(\delta_k(t)) + P_k^{old}(t)$$

$$\delta_k(t) = z_{c,k}^s - \delta(t) - z_{p,k}^s(t) - u_k^{old}(t) - \phi(0) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l(t)$$



Macro-échelle viscoélastique avec vibration

● Sans vibration :

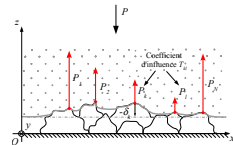
$$\forall t > 0, P_k(t) = \psi(0)f_k(\delta_k(t)) + P_k^{old}(t)$$

$$\delta_k(t) = z_{c,k}^s - \delta(t) - z_{p,k}^s(t) - u_k^{old}(t) - \phi(0) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N T_{kl} P_l(t)$$

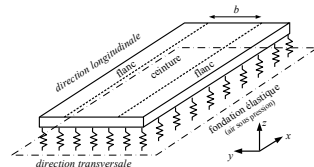


$$z_{p,k}^s(t) = z_{p,k}^{s,0} + \sum_{l=1}^{N_{cp}^{old}} \int_0^t G_{kl}^p(t-\tau) P_l(\tau) d\tau$$

$$G_{kl}^p(t-\tau) = C \sum_{i=1}^{\infty} A_{kl}^i \sum_{j=0}^{\infty} B_{kl}^{ij} \sin(\Omega_{ij}(t-\tau)) e^{-\eta_{ij}\Omega_{ij}(t-\tau)}$$



Modèle vibratoire de
plaque orthotrope
(Kropp, 1992)



Forces de contact sur plusieurs mètres à 90 km/h (1/4)

Étape 1

Étape 2

Étape 3

Chargement à macro-échelle
jusqu'à atteindre 3 000 N

Roulement à macro-échelle
à vitesse constante

Roulement à micro-échelle
(itération « zéro »)

Pas de dynamique locale

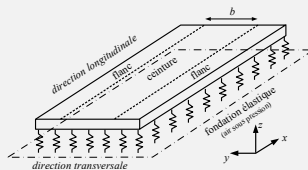
Forces de contact sur plusieurs mètres à 90 km/h (2/4)

Configuration « pneu standard » (P2RN, 2009)

Michelin Energy E3A, 195/60 R15



Modèle de plaque orthotrope (Kropp, 1992)



Paramètres de la plaque orthotrope (P2RN, 2009)

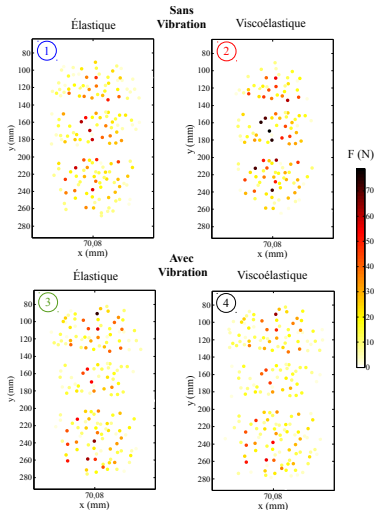


Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Tension	T_0	N/m	$4,4 \cdot 10^4 (1+0,05i)$
Rigidité (radiale)	B_x	Nm	$4(1+0,2i)$
Rigidité (latérale)	B_y	Nm	$4(1+0,2i)$
Masse	m''	kg/m ²	12,384
Rigidité (pression)	s_a	N/m ³	$5,73 \cdot 10^5 (1+0,1i)$
Largeur	l_x	m	0,32
Périmètre	l_y	m	1,8347
Largeur (bande)	b	m	0,14

Contact pneumatique/chaussée avec vibrations

Forces de contact sur plusieurs mètres à 90 km/h (3/4)

Résultats à macro-échelle

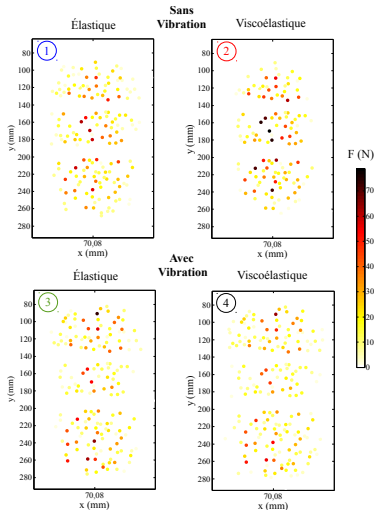


	①	②	③	④
\mathcal{A} (cm ²)	139	113	147	167
t_c (h)	0,55	0,76	4,93	5,63

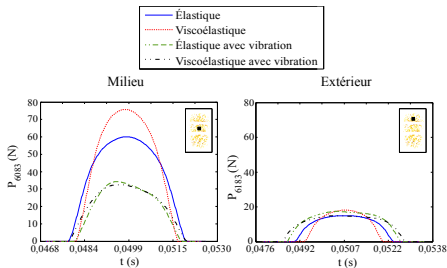
Contact pneumatique/chaussée avec vibrations

Forces de contact sur plusieurs mètres à 90 km/h (3/4)

Résultats à macro-échelle



	①	②	③	④
A (cm ²)	139	113	147	167
t_c (h)	0,55	0,76	4,93	5,63

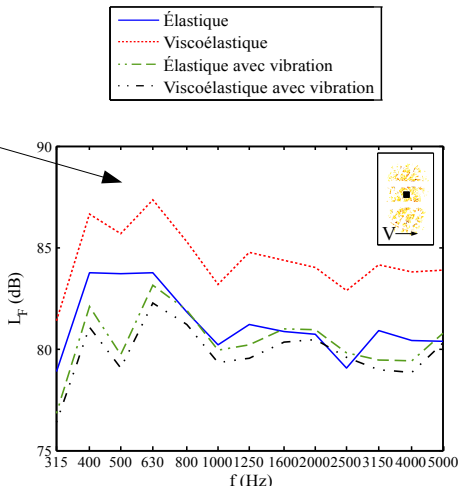
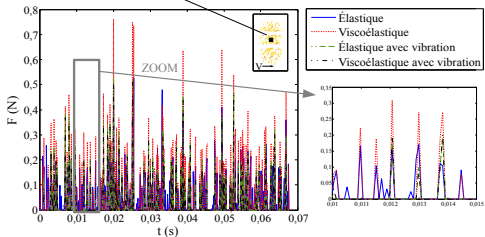


Forces de contact sur plusieurs mètres à 90 km/h (4/4)

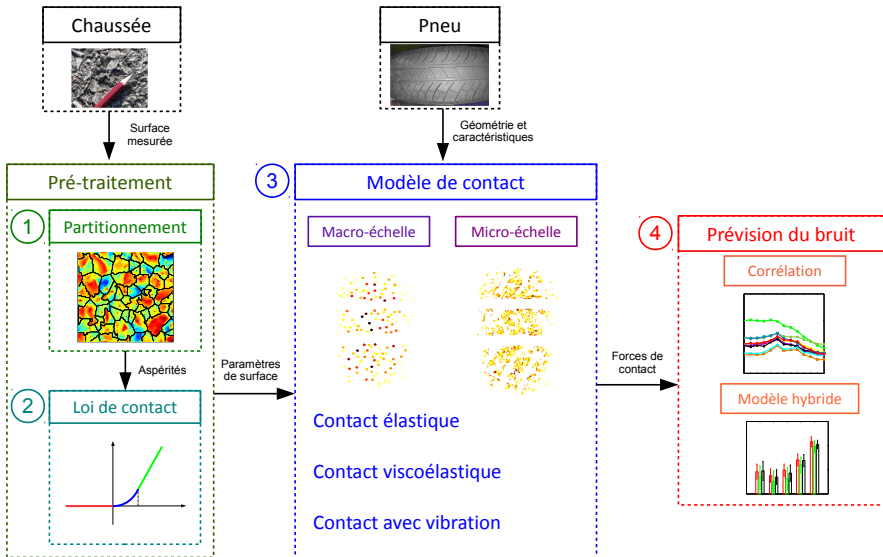
Résultats à micro-échelle

$$F^i(y, t) = \int_{y-\frac{h_y}{2}}^{y+\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} p^i(\xi, \eta, t) d\xi d\eta$$

$$L_F(f_{to}) = 20 \log \left(\frac{S_{F^i}(y, f(to))}{F_{ref}} \right)$$

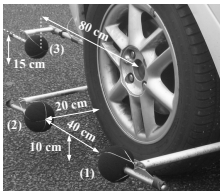


Sommaire



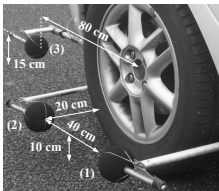
Description des essais et traitement des données

Mesure en continu

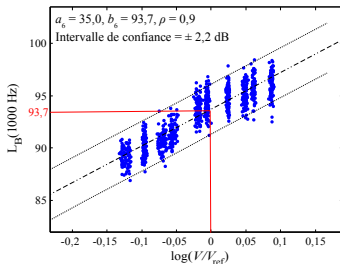
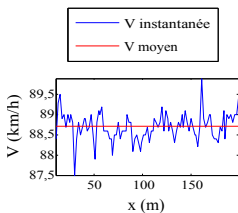


« pneu standard » : [Michelin Energy E3A, 195/60 R15](#)
10 revêtements (A, A', C, E1, E2, F, G, L2, M1, M2)
un passage de 65 km/h à 110 km/h par pas de 5 km/h

Description des essais et traitement des données

Mesure
en
continu

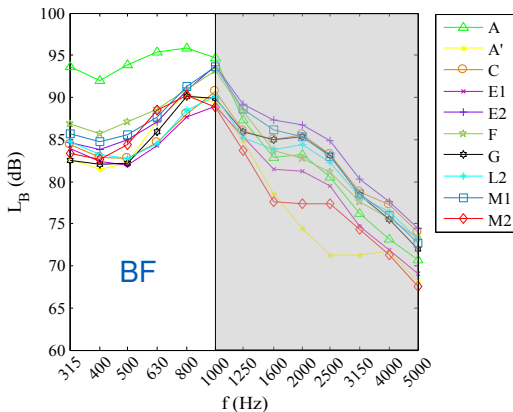
« pneu standard » : Michelin Energy E3A, 195/60 R15
10 revêtements (A, A', C, E1, E2, F, G, L2, M1, M2)
un passage de 65 km/h à 110 km/h par pas de 5 km/h



Niveau de bruit reconstitué
pour chaque surface et
chaque tiers d'octave

Résultats de la mesure du bruit de roulement

Configuration pneu standard : 90 km/h



	A	A'	C	E1	E2	F	G	L2	M1	M2
L_{r-BF} (dB) 90 km/h	102,2	94,7	94,4	93,4	96,9	97,3	94,6	94,3	97,2	95,0

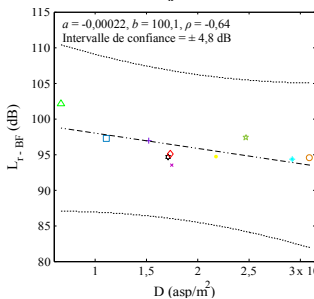
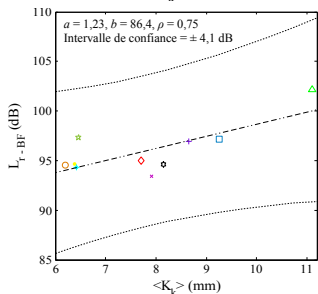
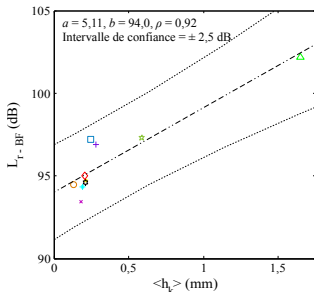
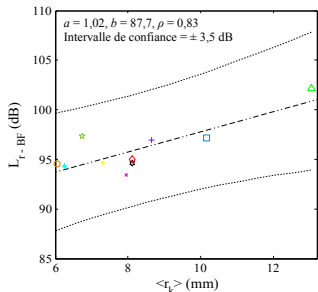
Corrélations des paramètres de lois de contact avec le bruit

Paramètres à corrélérer avec un niveau de bruit global recomposé

Paramètres de contact et de bruit à corrélérer

Surface	Granulométrie	\bar{r} (mm)	\bar{h} (mm)	\bar{K} (mm)	D (asp/m ²)	L_{r-BF} (dB) 90 km/h
C	0,8/1,5	6,07	0,14	6,22	30 985	94,4
L2	0/4	6,25	0,19	6,43	29 209	94,3
F	1,5/3	6,75	0,59	6,47	24 742	97,3
A'	0/6	7,30	0,21	6,37	21 786	94,7
E1	0/10	7,96	0,18	7,92	17 512	93,4
M2	0/6	8,13	0,21	7,71	17 315	95,0
G	0/10	8,11	0,21	8,14	17 112	94,6
E2	0/10	8,65	0,28	8,66	15 214	96,9
M1	0/10	10,15	0,25	9,25	11 123	97,2
A	8/10	13,05	1,65	11,10	6 721	102,2

Corrélations des paramètres de lois de contact avec le bruit



△ ● ○ × + ☆ ⊛ + □ ◇
 A A' C E1 E2 F G L2 M1 M2

Corrélation

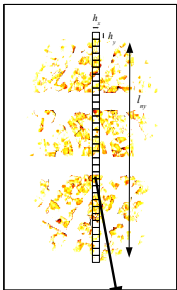
$$L_{r-BF} = a\alpha + b$$

Résultats

- \bar{r}, \bar{K} corrélés positivement avec le bruit
- D corrélée négativement
- \bar{h} : la corrélation n'a pas de sens
- Coefficients de corrélation élevés mais écarts-types élevés

Corrélations de la texture et des forces de contact avec le bruit

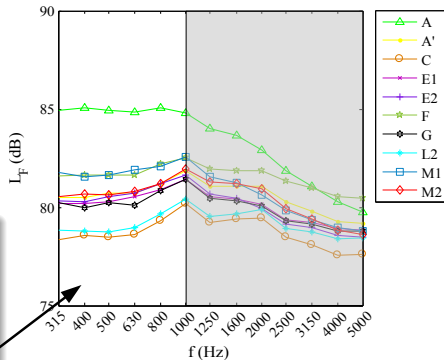
Calculs des spectres



$$F^i(y, t) = \int_{y-\frac{h_y}{2}}^{y+\frac{h_y}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} p^i(\xi, \eta, t) d\xi d\eta$$

$$S_{Fi}(f) = \frac{1}{l_{ny}} \int_{-\frac{l_{ny}}{2}}^{\frac{l_{ny}}{2}} S_{Fi}(y, f) dy$$

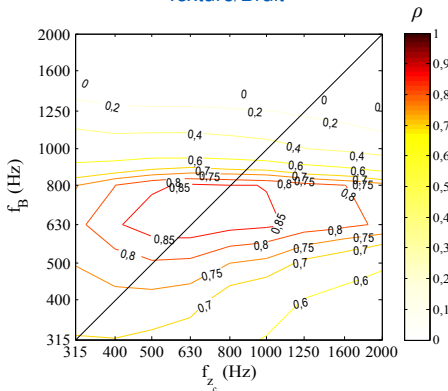
$$L_F(f_{t0}) = \left\langle 20 \log \left(\frac{S_{Fi}(f_{t0})}{F_{ref}} \right) \right\rangle$$

Spectres de forces de contact
(« pneu standard », 90 km/h)

Corrélations de la texture et des forces de contact avec le bruit

Courbes d'isocorrélation : « pneu standard » (90 km/h)

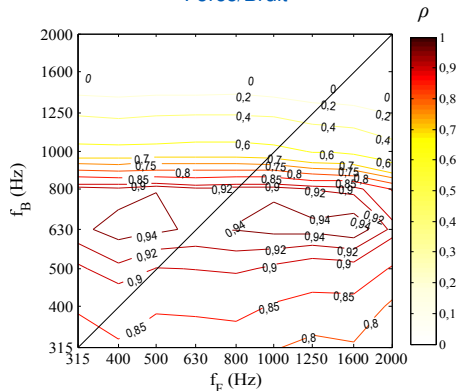
Texture/Bruit



Zone de forte corrélation :

 $f_B \in [315 - 800]$ Hz et $f_z \in [315 - 2\ 000]$ Hz

Force/Bruit



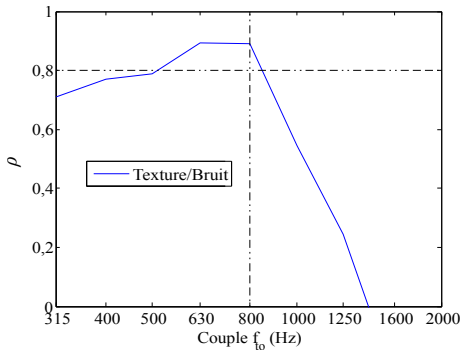
Zone de forte corrélation :

 $f_B \in [315 - 1\ 000]$ Hz et $f_F \in [315 - 2\ 000]$ Hz

Corrélations de la texture et des forces de contact avec le bruit

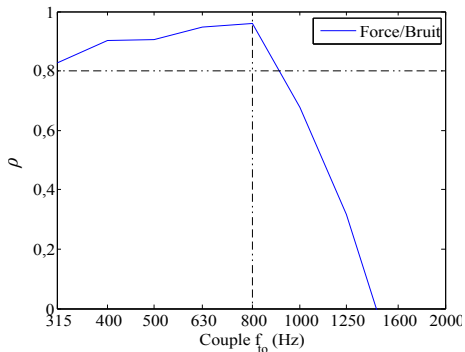
Coefficient de corrélation : « pneu standard » (90 km/h)

Texture/Bruit



Fréquence de coupure : 800 Hz

Force/Bruit

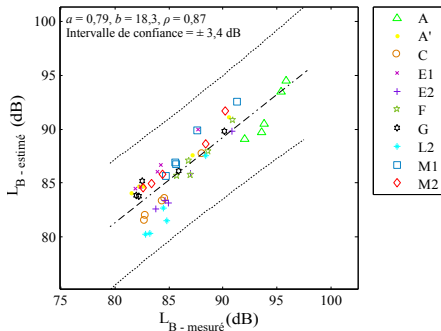


Fréquence de coupure : 800 Hz

Estimation du bruit (1/2)

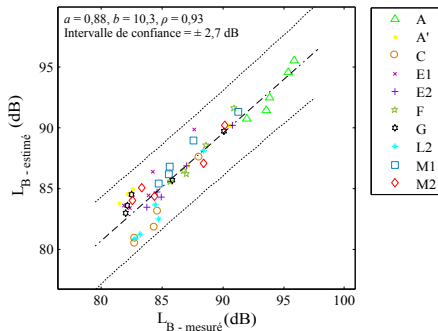
$$L_{B\text{-estimé}}(f_j) = a_j L_\alpha(f_j) + b_j$$

Texture (méthode empirique)



$a \neq 1, b \gg 0, \rho \neq 1, \sigma = 1,4$ dB

Force (méthode hybride)

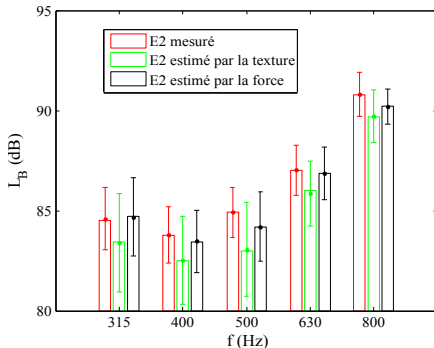


$a \simeq 1, b > 0, \rho \simeq 1, \sigma = 1,2$ dB

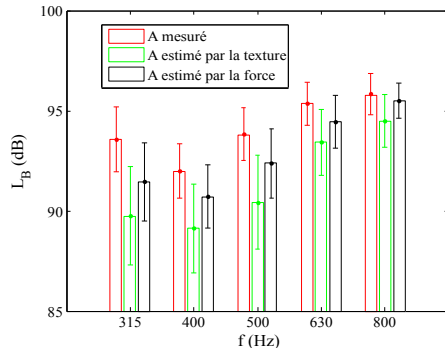
Estimation du bruit (2/2)

$$L_{B-\text{estimé}}(f_j) = a_j L_\alpha(f_j) + b_j$$

Surface E2



Surface A



$\varepsilon_T = 1,3 \text{ dB}$
 $\varepsilon_F = 0,4 \text{ dB}$

Prévision du bruit globalement meilleure
avec les forces de contact

$\varepsilon_T = 2,9 \text{ dB}$
 $\varepsilon_F = 1,4 \text{ dB}$

Conclusions sur le pré-traitement

- Partitionnement : décomposition multi-aspérités d'une surface de chaussée 3D

Conclusions sur le pré-traitement

- Partitionnement : décomposition multi-aspérités d'une surface de chaussée 3D
- Nouvelle loi de contact adaptée à la gamme de chargement pneumatique/chaussée

Conclusions sur le pré-traitement

- Partitionnement : décomposition multi-aspérités d'une surface de chaussée 3D
- Nouvelle loi de contact adaptée à la gamme de chargement pneumatique/chaussée

Conclusions sur le modèle de contact

- Validation du modèle élastique à micro-échelle : taille, résolution, rapidité

Conclusions sur le pré-traitement

- Partitionnement : décomposition multi-aspérités d'une surface de chaussée 3D
- Nouvelle loi de contact adaptée à la gamme de chargement pneumatique/chaussée

Conclusions sur le modèle de contact

- Validation du modèle élastique à micro-échelle : taille, résolution, rapidité
- Calculs sur plusieurs mètres de chaussée

Conclusions sur le pré-traitement

- Partitionnement : décomposition multi-aspérités d'une surface de chaussée 3D
- Nouvelle loi de contact adaptée à la gamme de chargement pneumatique/chaussée

Conclusions sur le modèle de contact

- Validation du modèle élastique à micro-échelle : taille, résolution, rapidité
- Calculs sur plusieurs mètres de chaussée
- Introduction de la viscoélasticité à macro-échelle : diminution de l'aire de contact

Conclusions sur le pré-traitement

- Partitionnement : décomposition multi-aspérités d'une surface de chaussée 3D
- Nouvelle loi de contact adaptée à la gamme de chargement pneumatique/chaussée

Conclusions sur le modèle de contact

- Validation du modèle élastique à micro-échelle : taille, résolution, rapidité
- Calculs sur plusieurs mètres de chaussée
- Introduction de la viscoélasticité à macro-échelle : diminution de l'aire de contact
- Introduction de la vibration à macro-échelle : nécessité de validation expérimentale

Conclusions sur la prévision du bruit

- Estimation rapide du niveau de bruit recomposé à basses fréquences à partir des paramètres de contact

Conclusions sur la prévision du bruit

- Estimation rapide du niveau de bruit recomposé à basses fréquences à partir des paramètres de contact
- Meilleure corrélation Force/Bruit que Texture/Bruit

Conclusions sur la prévision du bruit

- Estimation rapide du niveau de bruit recomposé à basses fréquences à partir des paramètres de contact
- Meilleure corrélation Force/Bruit que Texture/Bruit
- Bonne estimation du spectre de bruit à basses fréquences avec les forces de contact

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact
- Mettre en relation le modèle de contact multi-aspérités avec d'autres méthodes récentes (Meftah, 2011)

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact
- Mettre en relation le modèle de contact multi-aspérités avec d'autres méthodes récentes (Meftah, 2011)
- Améliorer le modèle de contact multi-aspérités en :

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact
- Mettre en relation le modèle de contact multi-aspérités avec d'autres méthodes récentes (Meftah, 2011)
- Améliorer le modèle de contact multi-aspérités en :
 - incorporant les effets dynamiques à micro-échelle

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact
- Mettre en relation le modèle de contact multi-aspérités avec d'autres méthodes récentes (Meftah, 2011)
- Améliorer le modèle de contact multi-aspérités en :
 - incorporant les effets dynamiques à micro-échelle
 - généralisant la méthode multi-échelles en fonction de l'application souhaitée

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact
- Mettre en relation le modèle de contact multi-aspérités avec d'autres méthodes récentes (Meftah, 2011)
- Améliorer le modèle de contact multi-aspérités en :
 - incorporant les effets dynamiques à micro-échelle
 - généralisant la méthode multi-échelles en fonction de l'application souhaitée
 - simplifiant la description de l'interaction en fonction de la distance aux autres aspérités

Perspectives pour le modèle de contact multi-aspérités

- Étudier expérimentalement l'influence des effets dynamiques sur le contact
- Mettre en relation le modèle de contact multi-aspérités avec d'autres méthodes récentes (Meftah, 2011)
- Améliorer le modèle de contact multi-aspérités en :
 - incorporant les effets dynamiques à micro-échelle
 - généralisant la méthode multi-échelles en fonction de l'application souhaitée
 - simplifiant la description de l'interaction en fonction de la distance aux autres aspérités
 - comparant différents modèles vibratoires (anneaux, FEM, etc...)

Perspectives pour la prévision du bruit

- **Modèle physique complet pour la prévision du bruit :**

Perspectives pour la prévision du bruit

- **Modèle physique complet pour la prévision du bruit :**
 - **Macro-échelle : vibration du pneumatique et rayonnement du bruit**

Perspectives pour la prévision du bruit

- **Modèle physique complet pour la prévision du bruit :**
 - Macro-échelle : vibration du pneumatique et rayonnement du bruit
 - Micro-échelle : frottement et air-pumping

Perspectives pour la prévision du bruit

- **Modèle physique complet pour la prévision du bruit :**
 - Macro-échelle : vibration du pneumatique et rayonnement du bruit
 - Micro-échelle : frottement et air-pumping
- **Générer de nouvelles surfaces 3D à partir des paramètres de contact optimisés**

Perspectives pour la prévision du bruit

- **Modèle physique complet pour la prévision du bruit :**
 - Macro-échelle : vibration du pneumatique et rayonnement du bruit
 - Micro-échelle : frottement et air-pumping
- **Générer de nouvelles surfaces 3D à partir des paramètres de contact optimisés**
- **Utiliser le modèle de contact dynamique multi-aspérités pour la modélisation de la résistance au roulement, de l'adhérence...**



MERCI DE VOTRE ATTENTION



Et merci à toute l'équipe Acoustique...

Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

- A1 : **G. Dubois**, J. Cesbron, H.P. Yin, F. Anfosso-Lédée : *Macro-scale approach for rough frictionless multi-indentation on a viscoelastic half-space* : Wear 272 (1) : 69-78 (2011)
- A2 : **G. Dubois**, J. Cesbron, H.P. Yin, F. Anfosso-Lédée : *Numerical evaluation of tyre/road contact pressures using a multi-asperity approach* : International Journal of Mechanical Sciences 54 : 84-94 (2012)

Communications avec actes dans un congrès international

- C1 : **G. Dubois**, J. Cesbron, H.P. Yin, F. Anfosso-Lédée : *A multi-asperity tyre/road contact model for rolling noise prediction* : Proc. Forum Acusticum, Aalborg – Danemark (26 Juin - 1 Juillet 2011)
- C2 : J. Cesbron, **G. Dubois**, H.P. Yin, F. Anfosso-Lédée : *Relations between contact model quantities and tyre/road noise* : Proc. Forum Acusticum, Aalborg – Danemark (26 Juin - 1 Juillet 2011)
- C3 : H.P. Yin, J. Cesbron, **G. Dubois**, D. Duhamel, F. Anfosso-Lédée : *A multi-asperity approach for modelling the contact between rough surfaces and applications to the tyre/road contact* : Proc. Colloquium Euromech 514 « New trends in contact mechanics », Cargèse – France (27 - 31 Mars 2012)
- C4 : **G. Dubois**, J. Cesbron, F. Anfosso-Lédée, H.P. Yin : *Low frequency statistical estimation of rolling noise from numerical tyre/road contact pressures* : Proc. Acoustics 2012, Nantes – France (23 - 27 Avril 2012)
- C5 : J. Cesbron, **G. Dubois**, F. Anfosso-Lédée, H.P. Yin : *Tyre/road noise : influence of multi-asperity road surface properties on tyre/road contact stresses* : Proc. Inter-noise 2012, New-York – USA (19 - 22 Août 2012)
- C6 : H.P. Yin, **G. Dubois**, J. Cesbron, F. Anfosso-Lédée, Q-H. Bui, D. Duhamel : *A numerical macro-scale approach for the tyre/road viscoelastic contact for the noise prediction* : Proc. Inter-noise 2012, New-York – USA (19 - 22 Août 2012)

Lois statistiques des paramètres de contact

Loi de densité de probabilité pour les 10 surfaces utilisées

Surface	r_k (mm)	h_k (mm)	C_k	γ_k	d_k (mm)	K_k (mm)
A	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$
A'	\mathcal{N}	$\mathcal{L}\mathcal{N}$	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	\mathcal{N}	\mathcal{N}
C	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$
E1	\mathcal{N}	$\mathcal{L}\mathcal{N}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$
E2	\mathcal{N}	$\mathcal{L}\mathcal{N}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$
F	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$
G	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$
L2	\mathcal{N}	$\mathcal{L}\mathcal{N}$	\mathcal{G}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	\mathcal{G}	\mathcal{G}
M1	\mathcal{N}	$\mathcal{L}\mathcal{N}$	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	\mathcal{N}	\mathcal{N}
M2	\mathcal{N}	$\mathcal{L}\mathcal{N}$	\mathcal{N}	$\mathcal{G}\mathcal{E}\mathcal{V}$	\mathcal{N}	\mathcal{N}

- r_k : loi normale
- γ_k : loi généralisée des valeurs extrêmes
- h_k : loi log-normale pour (A', E1, E2, L2, M1 et M2) ; loi généralisée des valeurs extrêmes pour (A, C, F et G)
- C_k , d_k et K_k : loi identique pour une même surface : normale pour poreux (A, M1, M2), généralisée des valeurs extrêmes pour les autres
- Taille représentative = 30 cm × 30 cm