



Soutenance de thèse de doctorat
École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

Recherche d'une description optimum des sources et systèmes vibro-acoustiques pour la simulation du bruit de passage des véhicules automobiles

Hichem HAMDAD

Rapporteurs : Jérôme ANTONI, Professeur des universités (INSA) – Lyon
Scott COGAN, Chargé de recherche HDR (CNRS, FEMTO-ST) – Besançon

Examineurs : Dominique HABAULT, Directeur de recherche (CNRS, LMA) – Marseille

Invités : Christophe LOCQUETEAU, Docteur (Renault s.a.s) – Aubevoye
Yannick DENOUAL, Ingénieur (Renault s.a.s) – Aubevoye

Encadrement : Charles PÉZERAT, Professeur des universités (LAUM) – Le Mans université
Benoit GAUVREAU, Chargé de recherche HDR (IFSTTAR, UMRAE) – Nantes

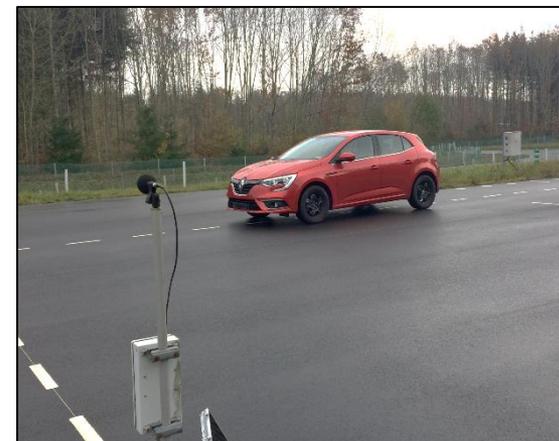
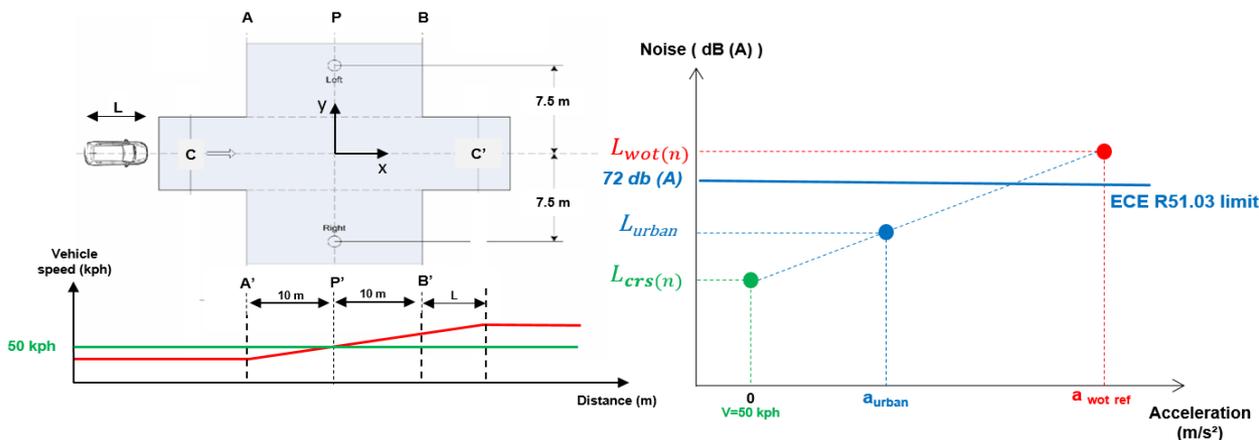
Contexte Le nouveau règlement ECE R51-03

Mise en place de législations

- L'ancien règlement ECE R51-02
- Le nouveau règlement ECE R51-03, appliqué depuis le 1^{er} juillet 2016 (Changement de méthode d'essai et sévèrisation des niveaux admissibles)

Procédure de mesure ECE R51-03

- Estimation du niveau de bruit en charge partielle...
- ... basée sur des mesures en **pleine charge** et à **vitesse constante (50 km/h)**



⇒ L'accélération pleine charge ($a_{wot\ ref}$) et l'accélération charge partielle cible (a_{urban}) sont données par le rapport poids/puissance du véhicule

Contexte Problématique

- ⇒ Le but est de respecter le règlement : 72 dB (A) actuellement et 68 dB (A) en 2024
- ⇒ Les constructeurs et les fournisseurs automobiles seront confrontés à un grand défi pour atteindre cet objectif

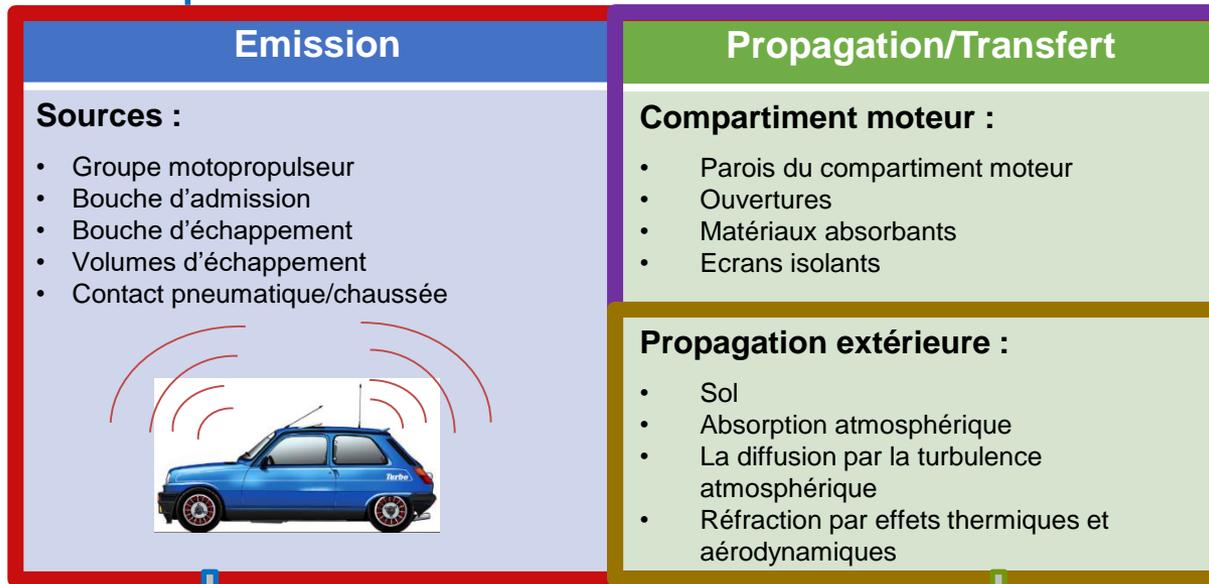
Problématique

- La précision des modèles disponibles chez Renault est insuffisante en regard des contraintes de développement des projets, qui nécessiteraient de pouvoir remplacer complètement les essais par la simulation.

Objectif

- Quantifier avec précision le niveau de bruit L_{urban} plus tôt dans le cycle de développement du véhicule, *i.e.* avant l'étape d'industrialisation.

Contexte Propositions



Plan

Partie I Modèles de synthèse

- 01 Présentation des modèles de synthèse
- 02 Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes
- 03 Sélection de modèle de sources

Emission	Propagation/Transfert
Sources : <ul style="list-style-type: none">• Groupe motopropulseur• Bouche d'admission• Bouche d'échappement• Volumes d'échappement• Contact pneumatique/chaussée	Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Partie II Modèle de calcul du transfert acoustique du GMP

- 04 Présentation du modèle de fonction de transfert
- 05 Etude 1 : validation sur un cas académique
- 06 Etude 2 : validation sur un véhicule

Propagation/Transfert
Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Partie III Influence du sol et des conditions météorologiques sur le transfert acoustique

- 07 Présentation du modèle de propagation
- 08 Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

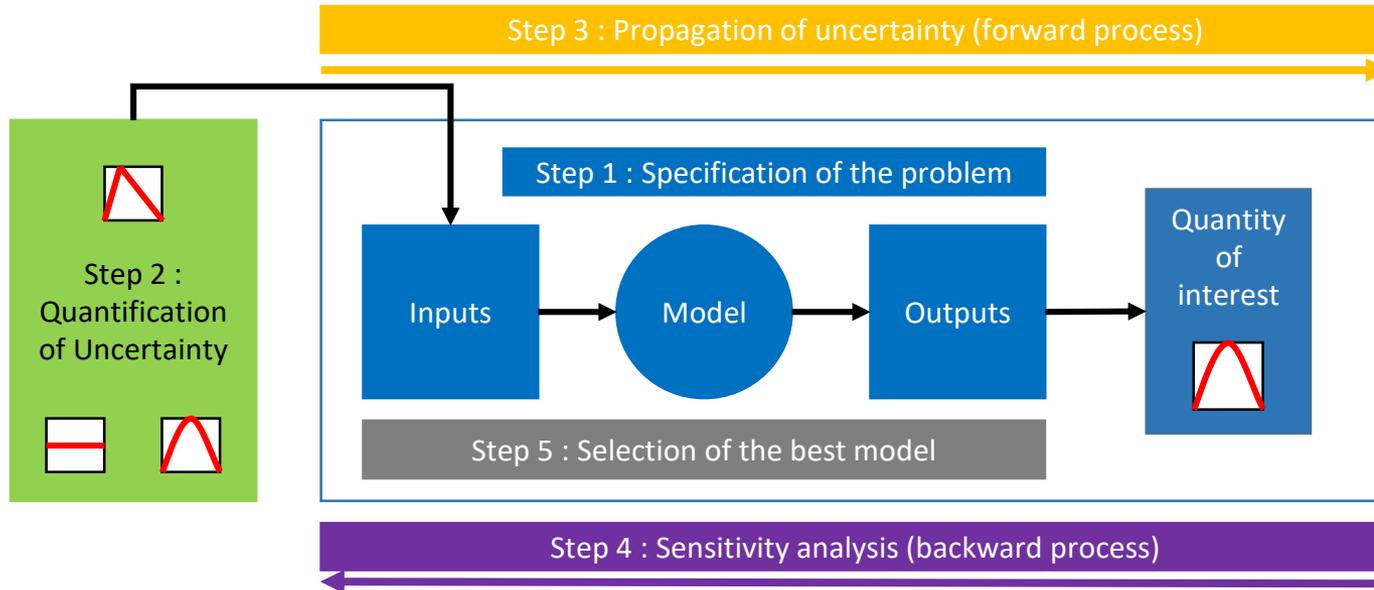
Propagation extérieure :
<ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Conclusion et perspectives

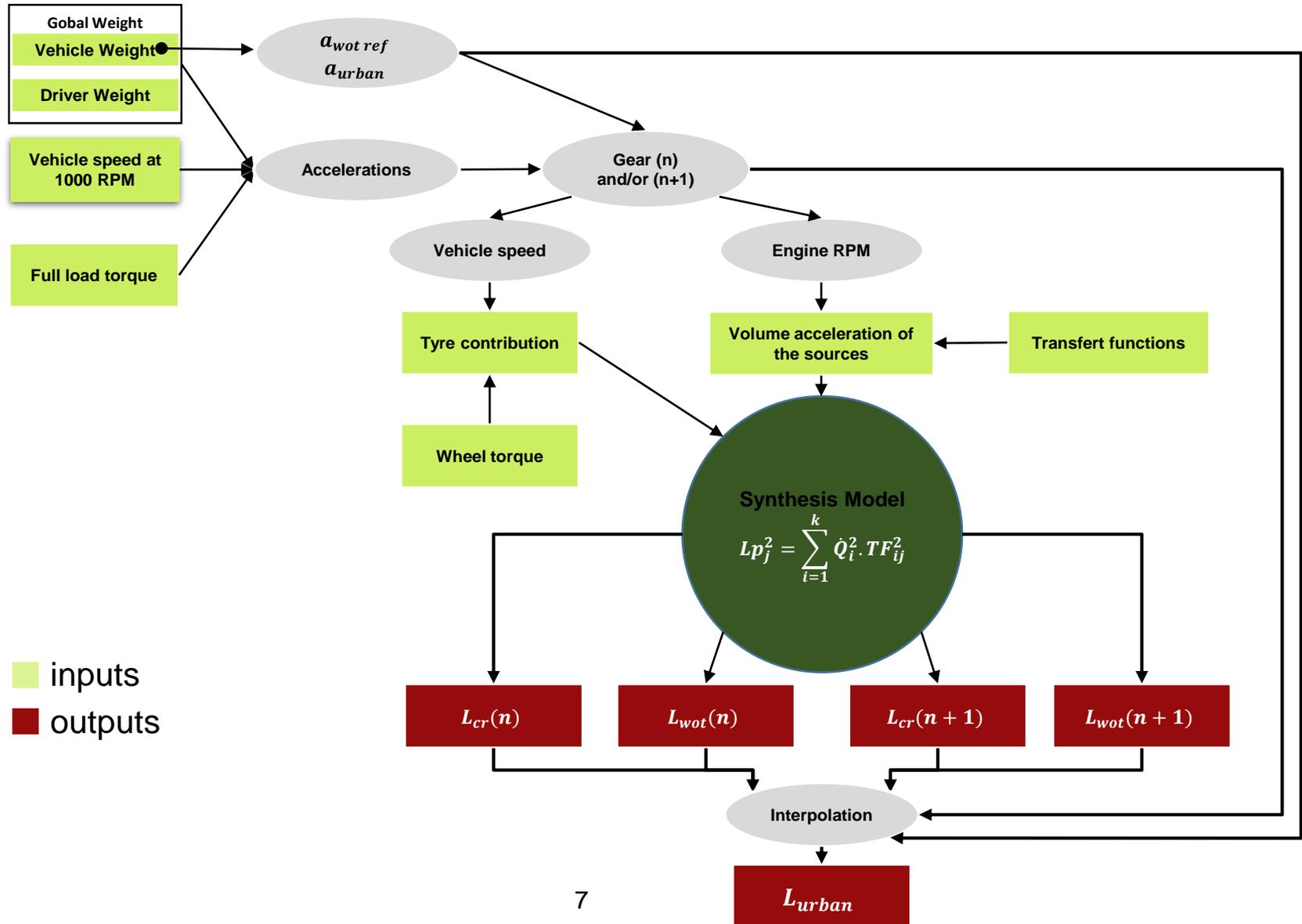
Présentation des modèles de synthèse

Les étapes principales de l'étude

1. Spécification du problème
2. Caractérisation d'incertitudes
3. Propagation d'incertitudes
4. Analyse de sensibilité
5. Sélection de modèle

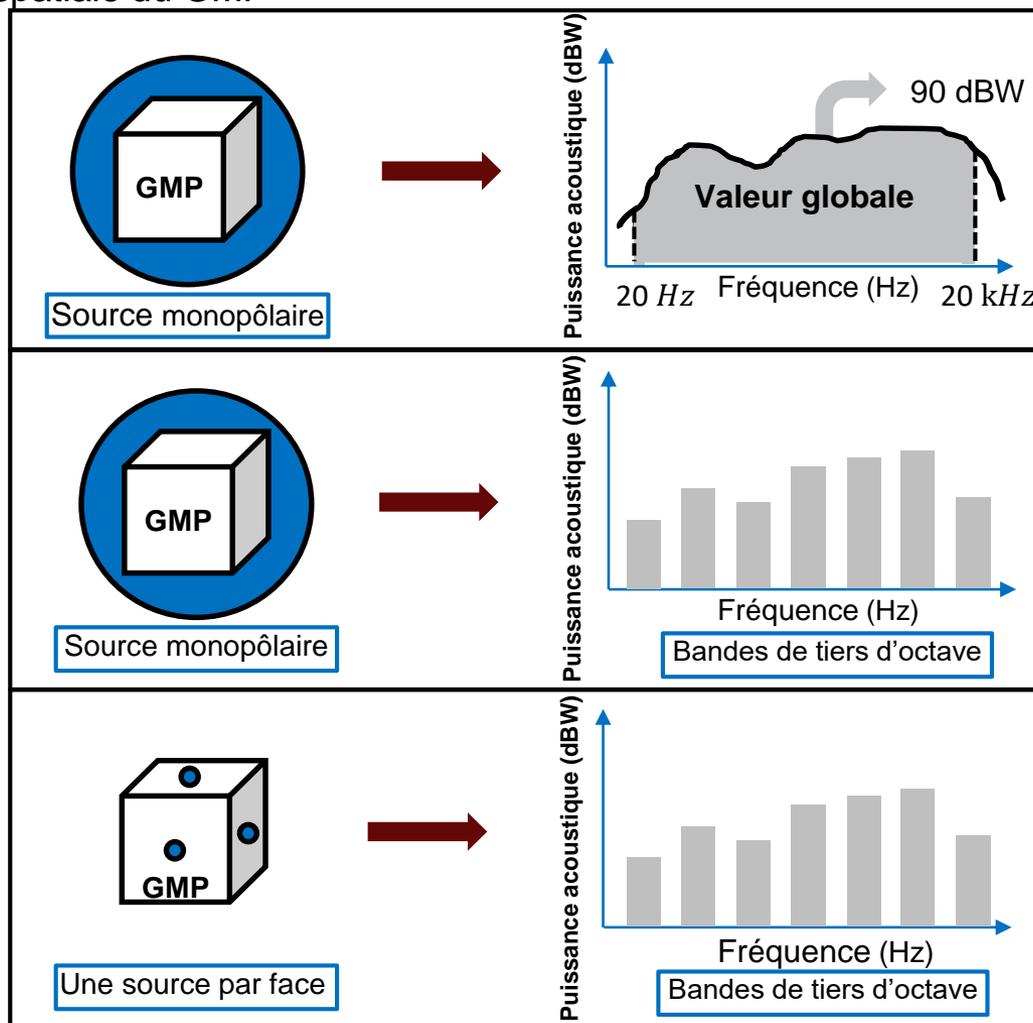


Présentation des modèles de synthèse



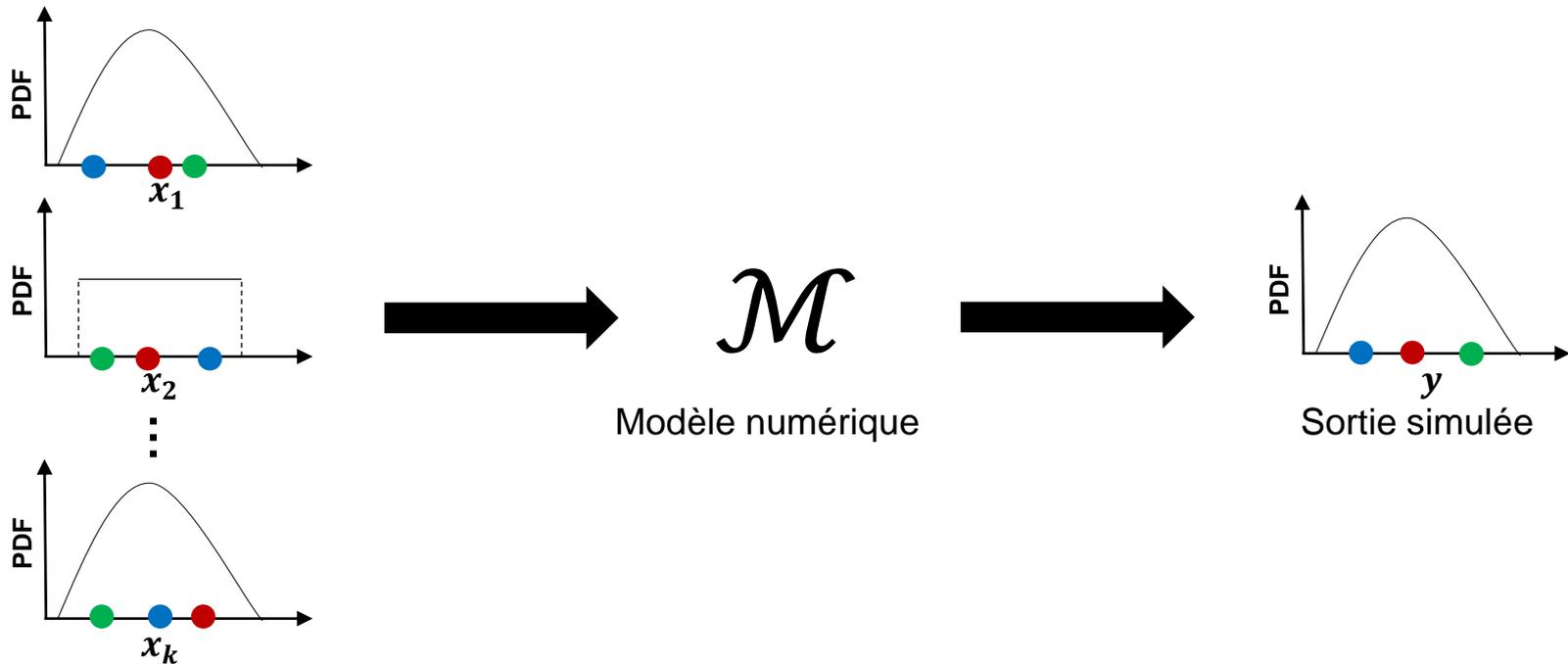
Présentation des modèles de synthèse

⇒ **Trois modèles de sources** : la différence principale réside dans la représentation fréquentielle des sources et spatiale du GMP



Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

Propagation d'incertitudes



- 1 ● $x_1^{(1)} x_2^{(1)} \dots x_k^{(1)}$
- 2 ● $x_1^{(2)} x_2^{(2)} \dots x_k^{(2)}$
- 3 ● $x_1^{(3)} x_2^{(3)} \dots x_k^{(3)}$
- ...
- N ● $x_1^{(N)} x_2^{(N)} \dots x_k^{(N)}$

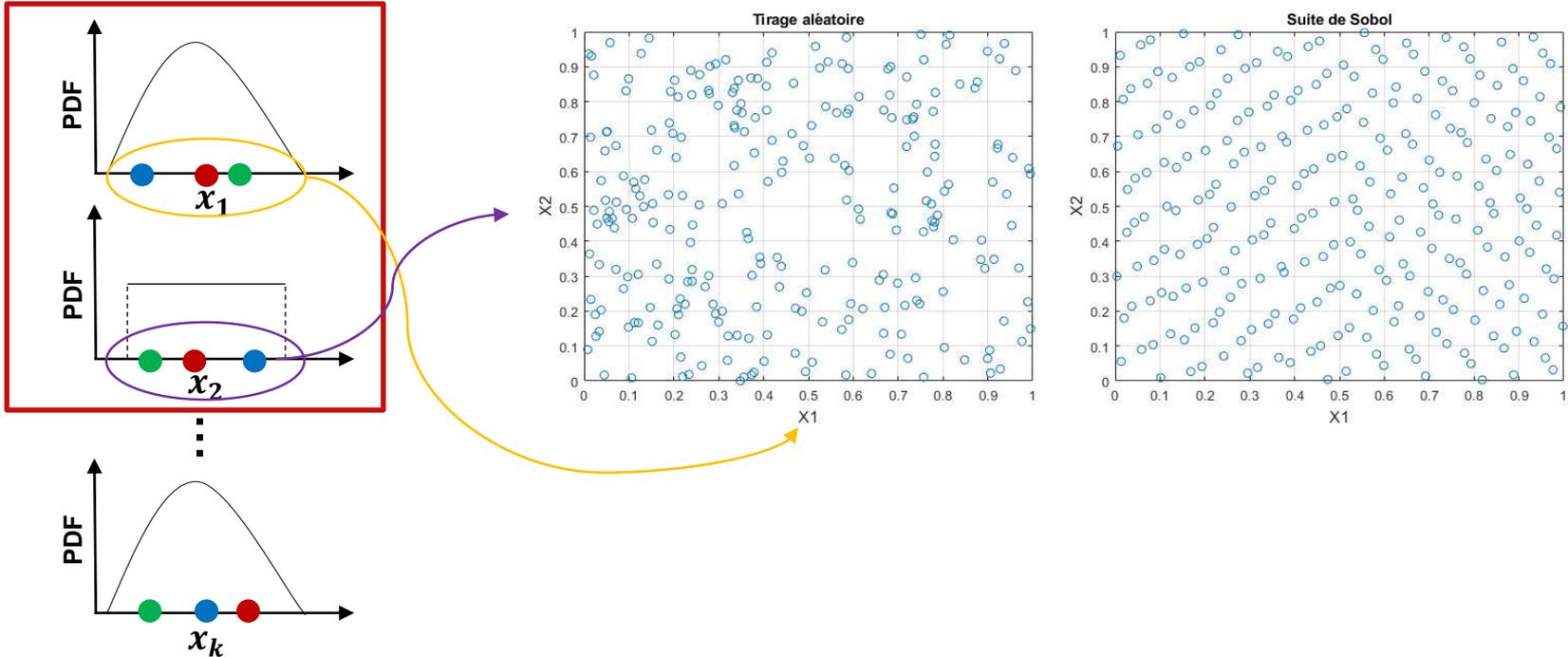
Simulation Monte Carlo
Coûteuse en temps de calcul



- $y^{(1)}$
- $y^{(2)}$
- $y^{(3)}$
- ...
- $y^{(N)}$

Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

Propagation d'incertitudes



⇒ Accélération de la convergence par les méthodes quasi-MC

Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

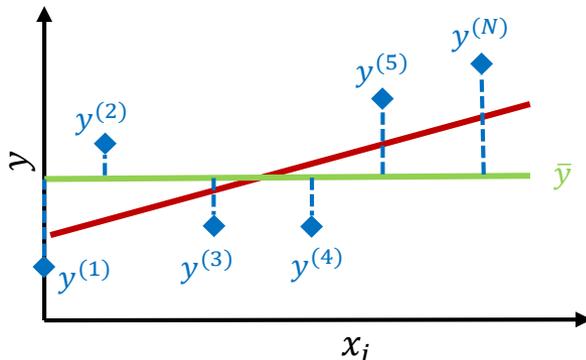
Analyse de sensibilité

- Variables indépendantes $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$
- N réalisations de (X, Y)
- Le modèle de régression est basé sur la relation linéaire entre les paramètres d'entrée et la réponse du modèle

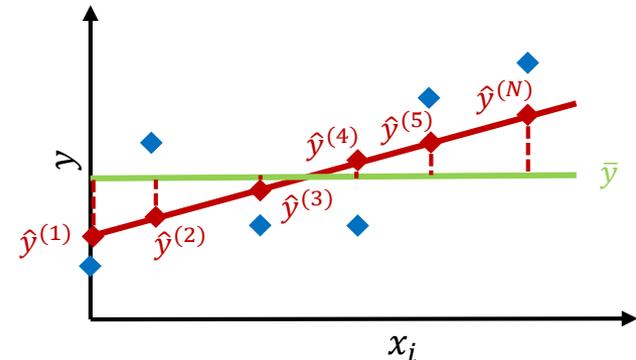
$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i$$

- Indices *SRC* : $SRC_i = \beta_i \sqrt{\frac{V(X_i)}{V(\hat{Y})}}$
- Coefficient de détermination R^2 : représente la part de la variance de Y expliquée par la régression linéaire

$$R^2 = \frac{V(\hat{Y})}{V(Y)}$$



$$V(Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (y^{(j)} - \bar{y})^2$$

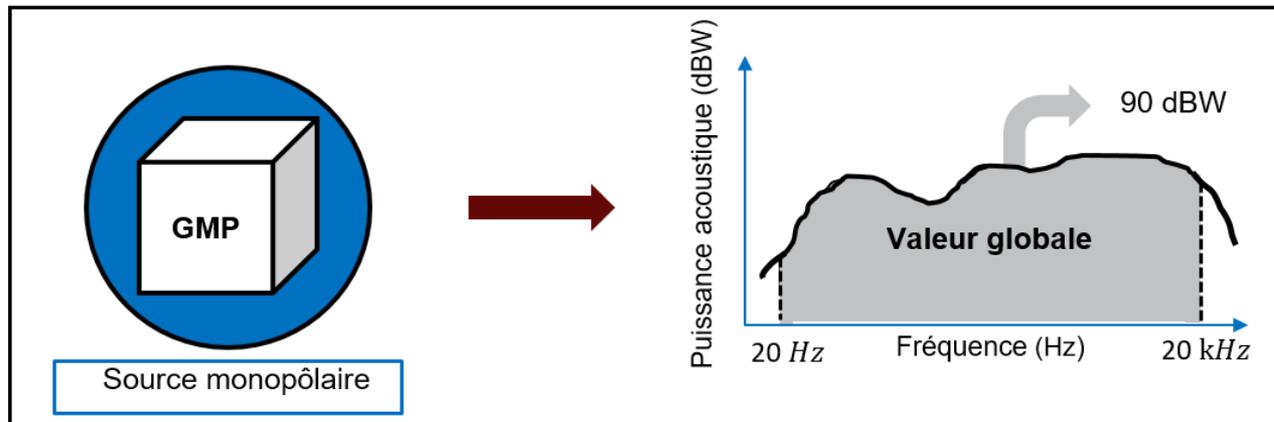


$$V(\hat{Y}) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\hat{y}^{(j)} - \bar{y})^2$$

Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

Etude d'incertitude

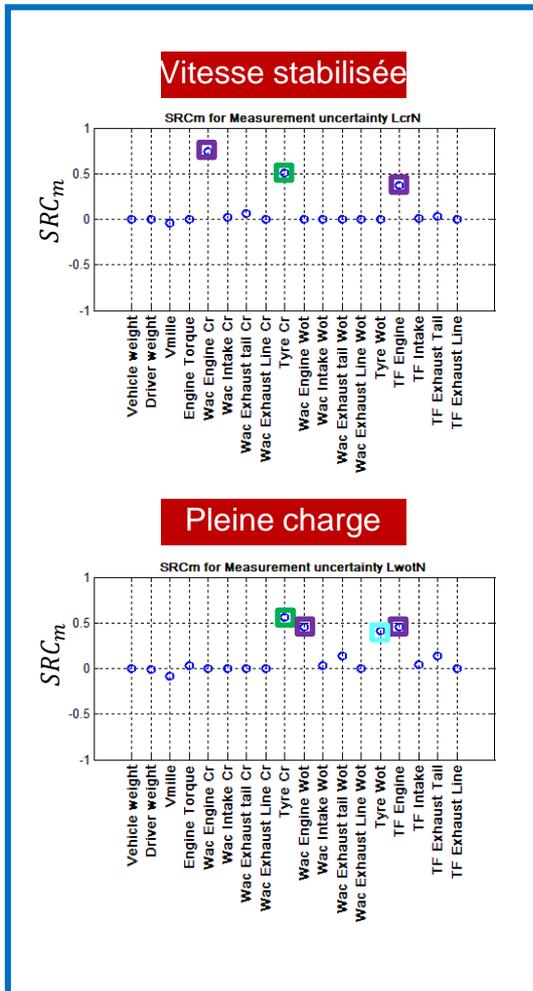
- Le modèle le plus simple : GMP en un seul monopôle / valeur globale
- Quantification d'incertitudes
 - Incertitude de mesure
 - Variabilité de production
- Propagation d'incertitude : quasi-MC, $N_{MU} = 1024$, $N_{PU} = 1024$
- Analyse de sensibilité sur les 5 sorties du modèle de synthèse : indice $SRC_i = \beta_i \sqrt{\frac{V(X_i)}{V(Y)}}$
- Trois véhicules avec un rapport poids/puissance différent :
 - Segment B essence (entrée de gamme)
 - Segment B diesel (moyenne gamme)
 - Segment D diesel (haut de gamme)



Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

Incertitude de mesure – segment B diesel (moyenne gamme)

Rapport n

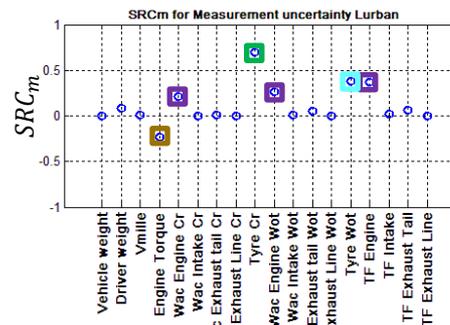


Contact pneu/chaussée

GMP
Source et FRF

Couple moteur

Lurban

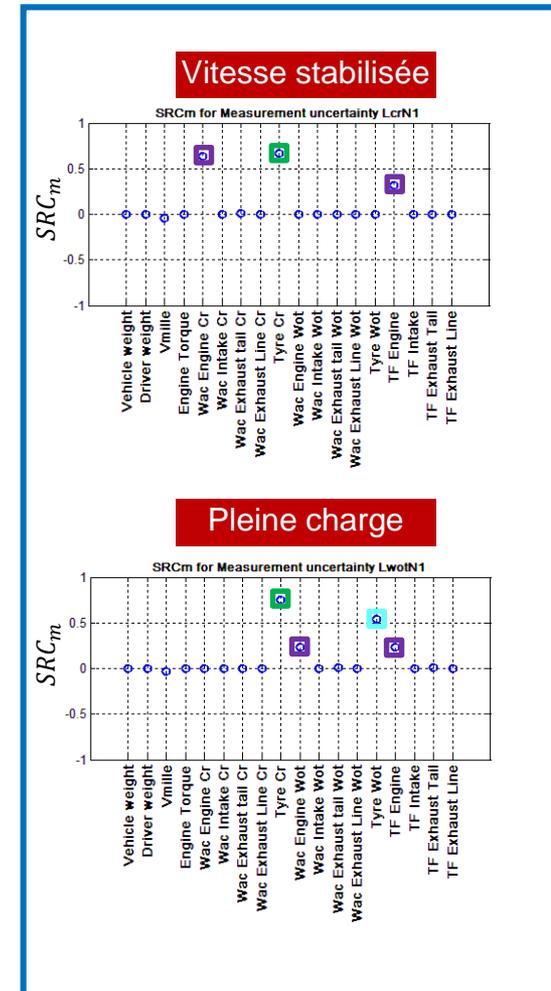


Contact Pneu/chaussée

Couple à la roue

GMP
Source et FRF

Rapport n+1



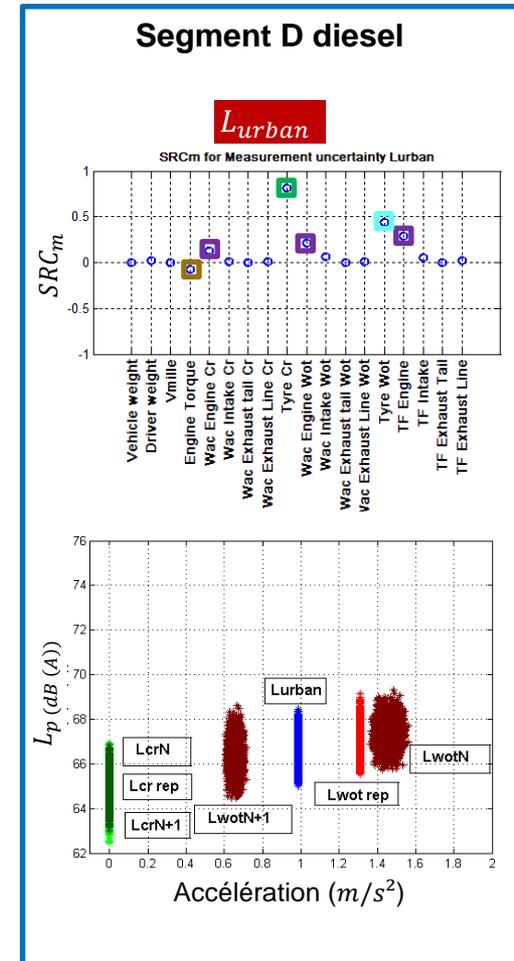
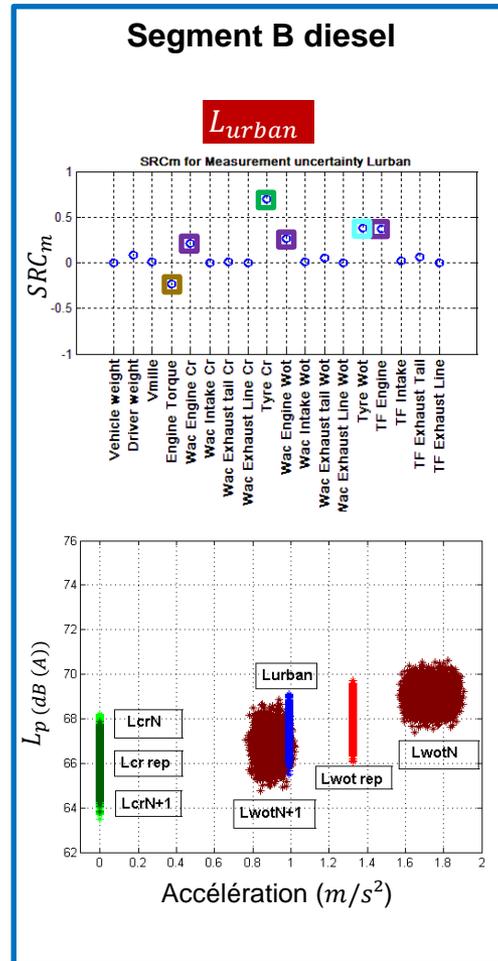
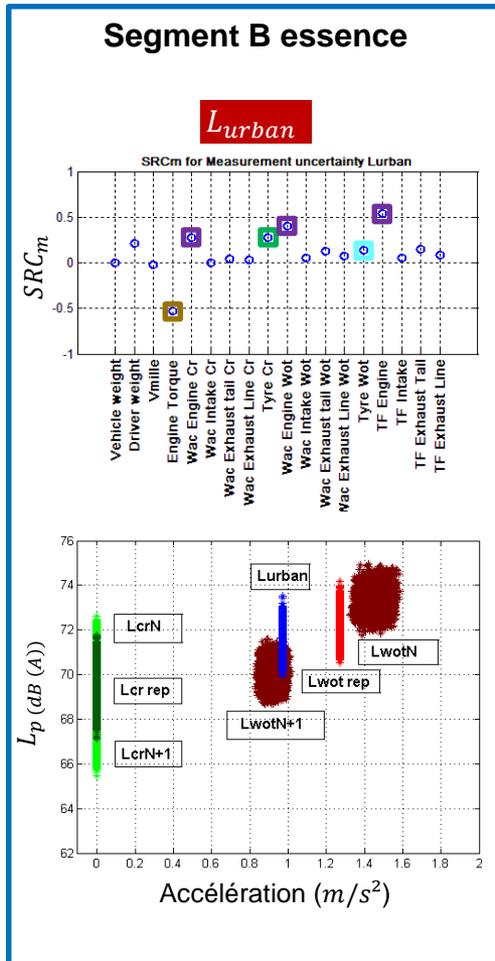
Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

Incertitude de mesure – comparaison entre les trois véhicules

GMP

Couple à la roue

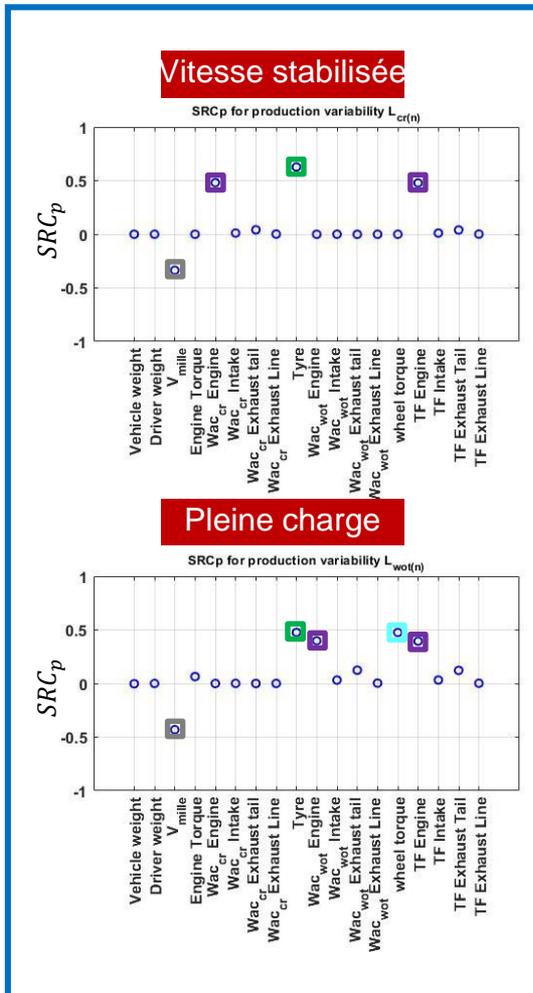
Contact pneu/chaussée



Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes

Variabilité de production – segment B diesel (moyenne gamme)

Rapport n



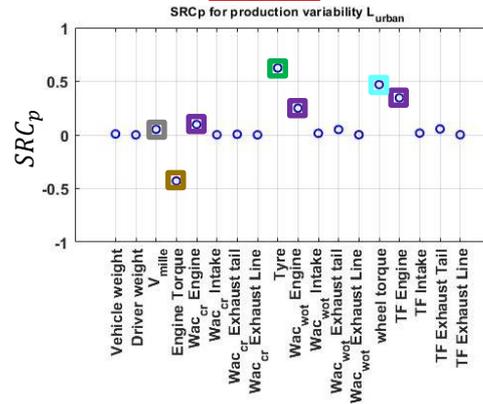
Contact pneu/chaussée

Couple à la roue

GMP
Source et FRF

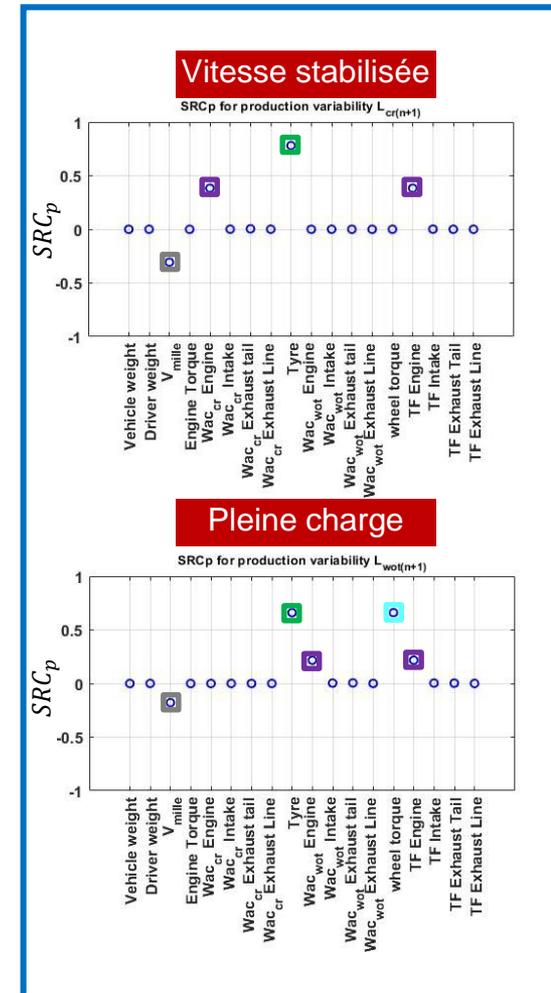
Couple moteur

Lurban



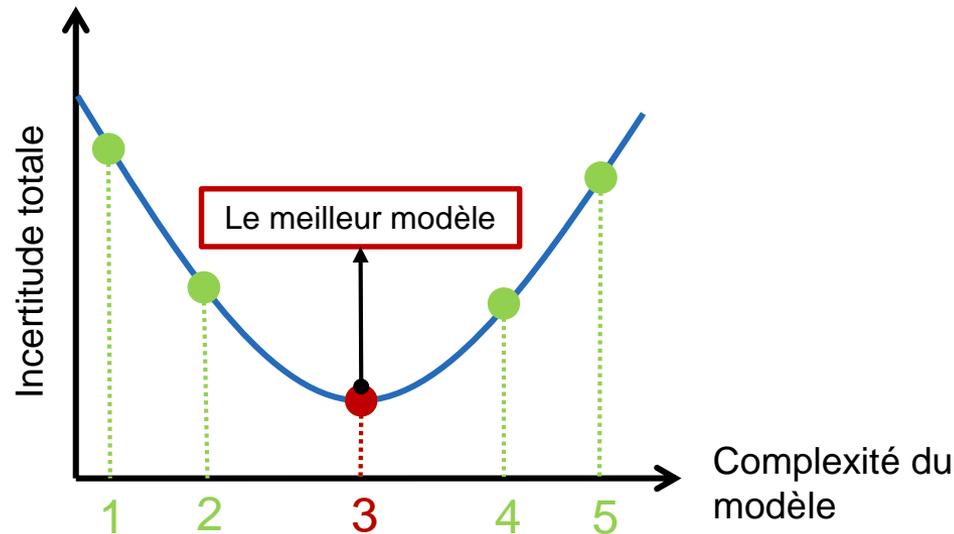
Vitesse à 1000 tr/mn

Rapport n+1



Sélection de modèle de sources

“ Quel est le meilleur modèle ? ”



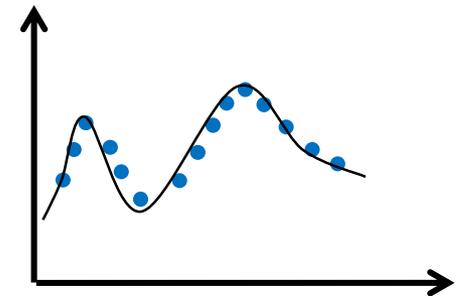
Parcimonie (simplicité)

Compromis

Ajustement aux données



Rasoir d'Ockham :
 « pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ? »
 « it is vain to do with more what can be done with fewer »



Sélection de modèle de sources

Deux étapes

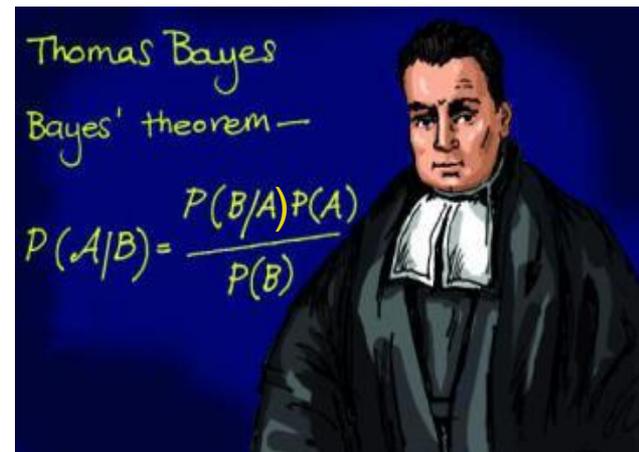
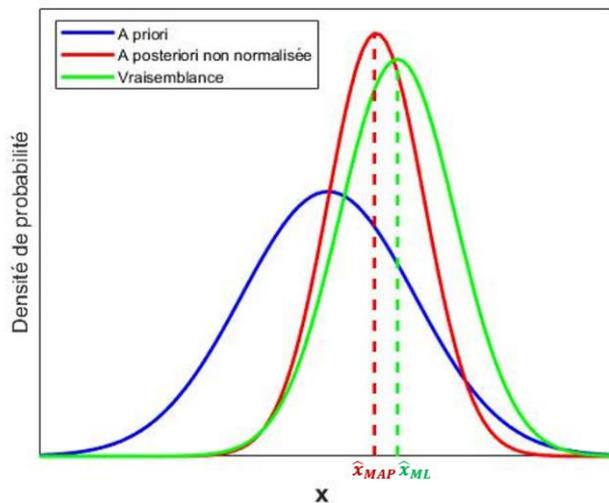
1. Premier niveau d'inférence

Consiste à estimer la loi de distribution *a posteriori* pour chaque modèle $f(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l)$ en utilisant la formule de Bayes :

$$\underbrace{f(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l)}_{\text{A posteriori de } x} = \frac{\underbrace{\mathcal{L}(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l)}_{\text{Vraisemblance}} \underbrace{f(x|\mathcal{M}_l)}_{\text{A priori de } x}}{\underbrace{f(\tilde{y}|\mathcal{M}_l)}_{\text{Evidence du modèle}}} \propto \mathcal{L}(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l) f(x|\mathcal{M}_l)$$

Résoudre par MCMC

⇒ L'évidence du modèle ou la vraisemblance marginale $f(\tilde{y}|\mathcal{M}_l) = \int_x \mathcal{L}(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l) f(x|\mathcal{M}_l) dx$



Sélection de modèle de sources

Deux étapes

2. Deuxième niveau d'inférence

Consiste à définir la plausibilité $p(\mathcal{M}_l|\tilde{y})$ pour chaque modèle en utilisant la formule de Bayes :

$$\begin{array}{c}
 \text{A posteriori de } \mathcal{M}_l \\
 \boxed{p(\mathcal{M}_l|\tilde{y})} = \frac{\overbrace{f(\tilde{y}|\mathcal{M}_l)}^{\text{Evidence du modèle}} \overbrace{p(\mathcal{M}_l)}^{\text{A priori de } \mathcal{M}_l}}{\underbrace{\sum_l^{N_m} f(\tilde{y}|\mathcal{M}_l) p(\mathcal{M}_l)}_{\text{Probabilité totale}}}
 \end{array}$$

⇒ Dans le cas où l'on ne dispose d'aucune information sur la probabilité *a priori* des modèles $p(\mathcal{M}_l)$:

$$\begin{array}{c}
 \text{A posteriori de } \mathcal{M}_l \\
 \boxed{p(\mathcal{M}_l|\tilde{y})} = \frac{\overbrace{f(\tilde{y}|\mathcal{M}_l)}^{\text{Evidence du modèle}}}{\sum_l^{N_m} \overbrace{f(\tilde{y}|\mathcal{M}_l)}^{\text{Evidence du modèle}}}
 \end{array}$$

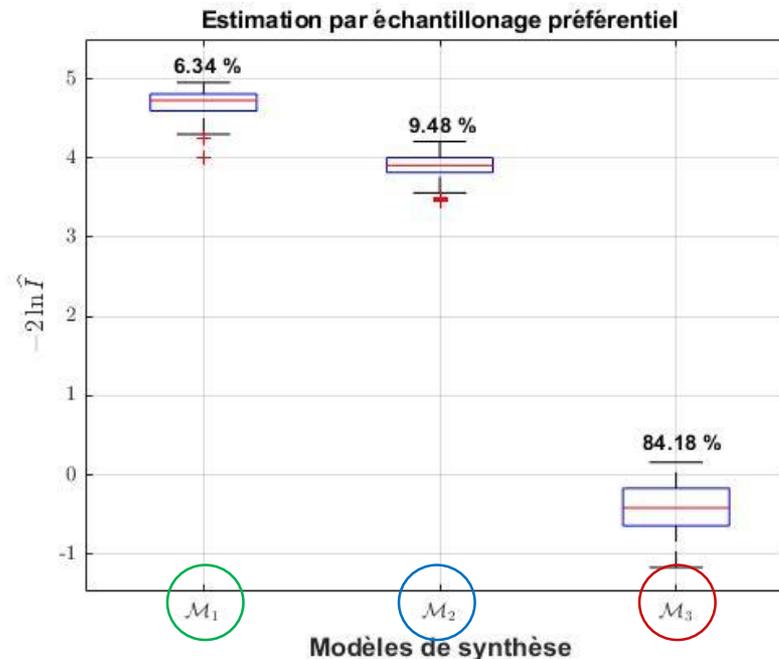
Sélection de modèle de sources

■ *A priori* $f(x|\mathcal{M}_l)$: incertitude de mesure

■ Vraisemblance $\mathcal{L}(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l)$:

- Les erreurs résiduelles sont normalement distribuées $e_t(x) \sim \mathcal{N}(0, \hat{\sigma}_t^2)$
- $y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$ correspondent aux sorties des modèles de synthèse $L_{cr}(n)$, $L_{wot}(n)$, $L_{cr}(n+1)$, $L_{wot}(n+1)$.

$$\mathcal{L}(x|\tilde{y}, \mathcal{M}_l) = \prod_{t=1}^{N_{obs}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \hat{\sigma}_t} \exp\left(-\frac{(\tilde{y}_t - y_t)^2}{2\hat{\sigma}_t^2}\right)$$



\mathcal{M}_1 : Monopole en valeur globale

\mathcal{M}_2 : Monopole en tiers d'octave

\mathcal{M}_3 : Six faces en tiers d'octave

Plan

Partie I Modèles de synthèse

- 01 Présentation des modèles de synthèse
- 02 Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes
- 03 Sélection de modèle de sources

Partie II Modèle de calcul du transfert acoustique du GMP

- 04 Présentation du modèle de fonction de transfert
- 05 Etude 1 : validation sur un cas académique
- 06 Etude 2 : validation sur un véhicule

Partie III Influence du sol et des conditions météorologiques sur le transfert acoustique

- 07 Présentation du modèle de propagation
- 08 Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

Conclusion et perspectives

Emission	Propagation/Transfert
Sources : <ul style="list-style-type: none">• Groupe motopropulseur• Bouche d'admission• Bouche d'échappement• Volumes d'échappement• Contact pneumatique/chaussée	Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

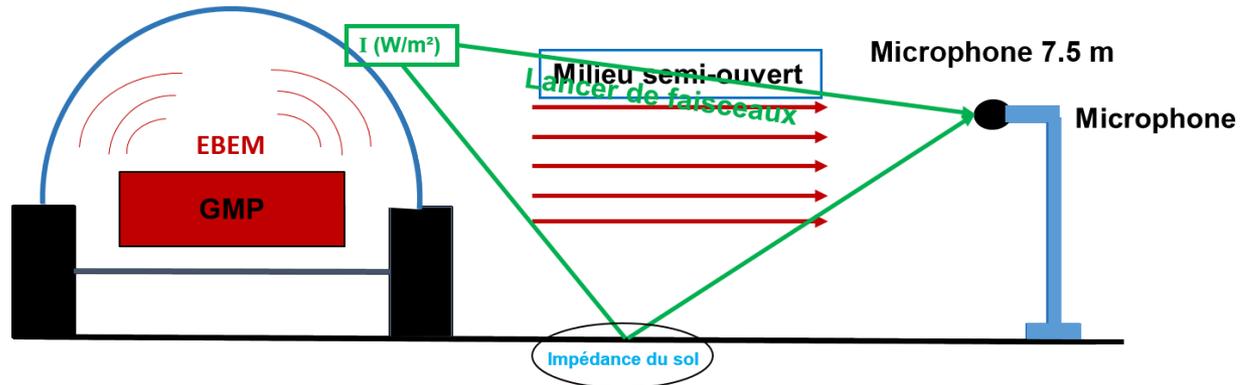
Propagation/Transfert
Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques
--

Présentation du modèle de fonction de transfert

Comment calculer le transfert acoustique ?

- Des méthodes type éléments de frontière **Coûteuse en temps de calcul**
- La méthode des radiosités (EBEM) **Ne prend pas en compte les interférences**
- Chaînage de la méthode EBEM et du lancer de faisceaux



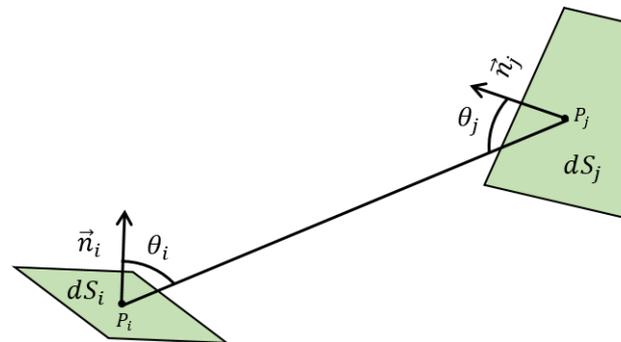
Présentation du modèle de fonction de transfert

La méthode des radiosité (EBEM)

⇒ Basée sur les échanges de puissance entre surfaces ayant un comportement diffus.

1. Calcul des facteurs de forme

$$FF_{ji} = \frac{1}{S_j} \int_{S_j} \int_{S_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi \|P_j P_i\|^2} V(P_j, P_i) dS_j dS_i$$



2. Le bilan de puissance acoustique

$$W(i) = (1 - \alpha_i - \tau_{ki}) \sum_{j \neq i} FF_{ji} W(j) + \tau_{ki} \sum_{j \neq k} FF_{jk} W(j) + W_{source}(i)$$

Puissance émise

Puissance réfléchie

Puissance transmise

Puissance initiale

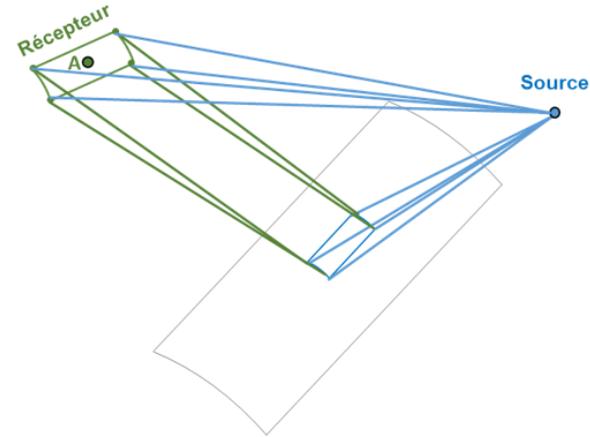
3. Résolution par inversion de matrice ou de manière itérative

Présentation du modèle de fonction de transfert

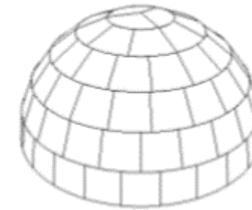
Lancer de faisceaux

- Propagation d'une surface représentant le front d'onde initial

$$P(A) = \sqrt{\frac{\rho c W}{4\pi}} \sqrt{\frac{d\omega}{dS(A)}} e^{jkr} \Pi R D$$



- Trois différentes directivités : $W_i(\vec{\omega}) = D_i(\vec{\omega}) W_i$
 - Une directivité omnidirectionnelle $D_i(\theta, \phi) = 1$
 - Une directivité Lambertienne $D_i(\theta, \phi) = 2 \cos \theta$
 - Une directivité échantillonnée en "igloo"

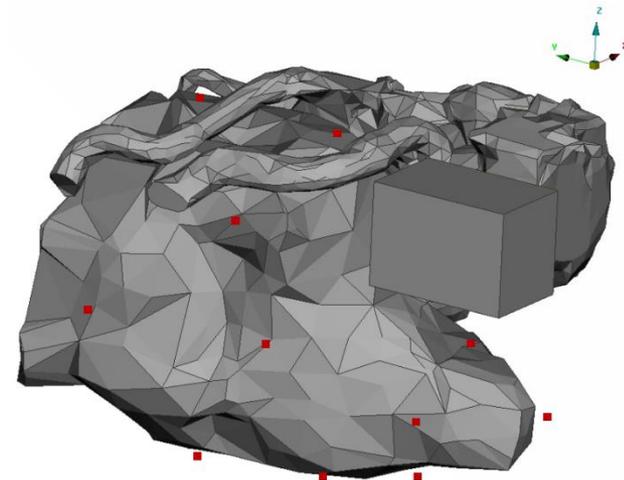
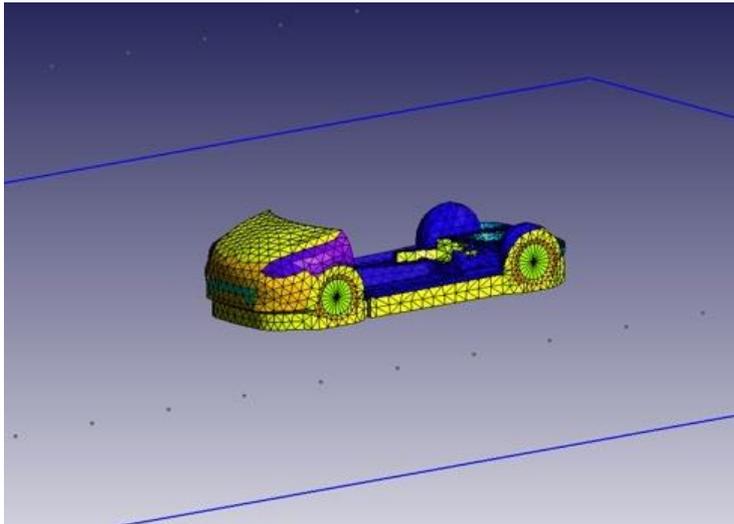


Décomposition d'une demi-sphère en "igloo"

Etude 2 : Validation sur un véhicule

Présentation du modèle de véhicule

- Une surface virtuelle simule la communication vers l'extérieur
- Plusieurs matériaux absorbants
 - Absorbant capot
 - Absorbant tablier
 - Absorbant écran sous GMP
 - Absorbant boîte à eau
 - ...
- GMP entouré de 21 sources monopôlaires



Etude 2 : Validation sur un véhicule

■ Analyse de sensibilité avec la méthode de Morris ¹

- Méthode de criblage
- Méthode déterministe : discrétisation des entrées en plusieurs niveaux
- Mesure de sensibilité

$$\hat{\mu}_i = \frac{1}{r} \sum_{m=1}^r EE_i^{(m)}$$

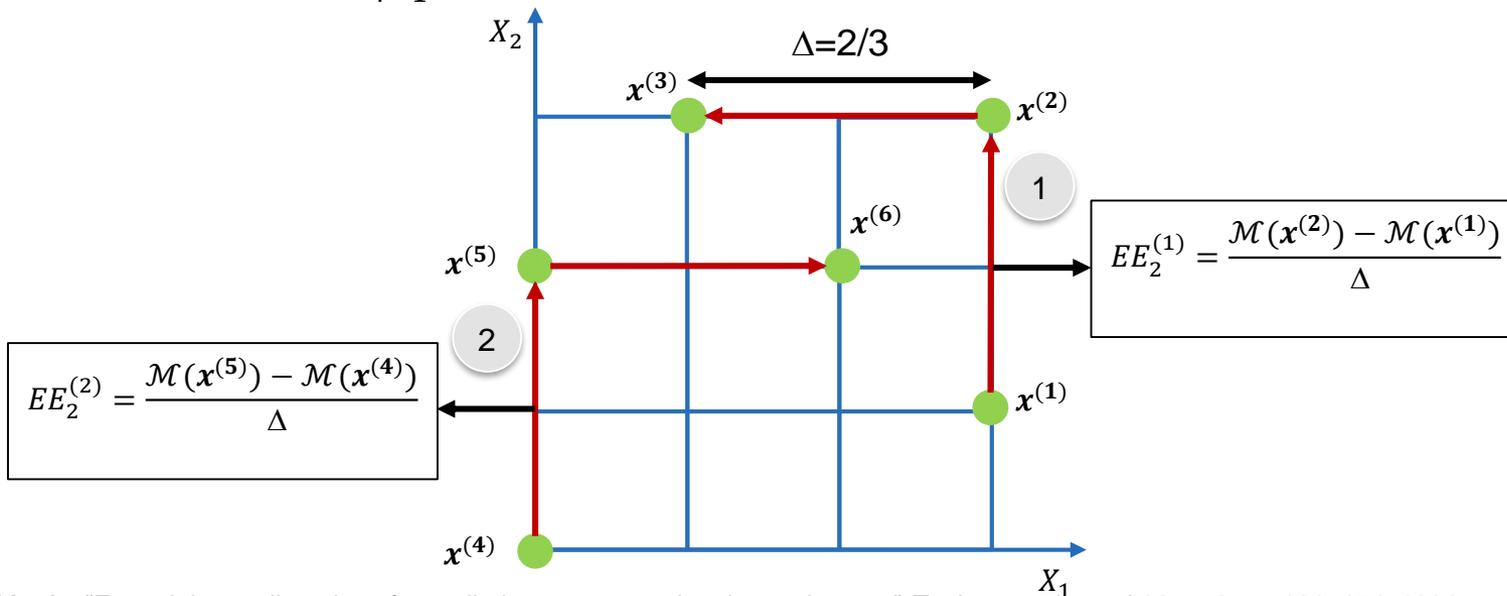
Mesure de sensibilité

$$\hat{\mu}_i^* = \frac{1}{r} \sum_{m=1}^r |EE_i^{(m)}|$$

Mesure de sensibilité en présence de non-monotonie

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{m=1}^r (EE_i^{(m)} - \hat{\mu}_i)^2$$

Mesure de la non-linéarité d'un modèle et/ou les interactions



1. M. D. Morris, "Factorial sampling plans for preliminary computational experiments," *Technometrics*, vol.33,no.2, pp.161–174, 1991.

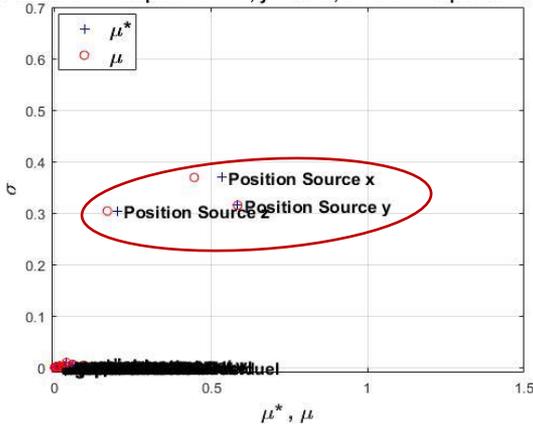
Etude 2 : Validation sur un véhicule

Application sur le transfert acoustique du véhicule

- Analyse de sensibilité sur les matériaux absorbants (5% de variabilité)
- Analyse de sensibilité sur la position des sources (cube de 10 cm) : **coté boîte de vitesse**

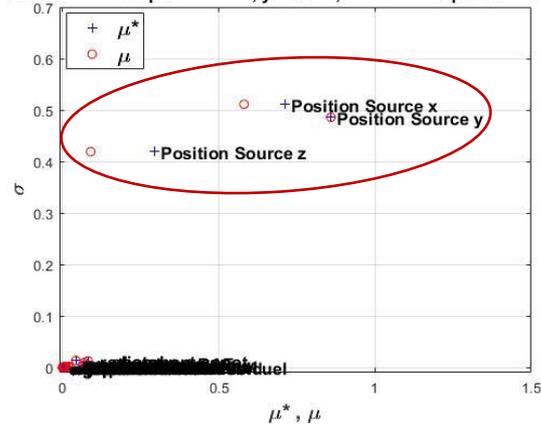
500 Hz

Source: BV. Récepteur: x=4 m, y=7.50 m, z=1.2 m. Fréquence= 500 Hz



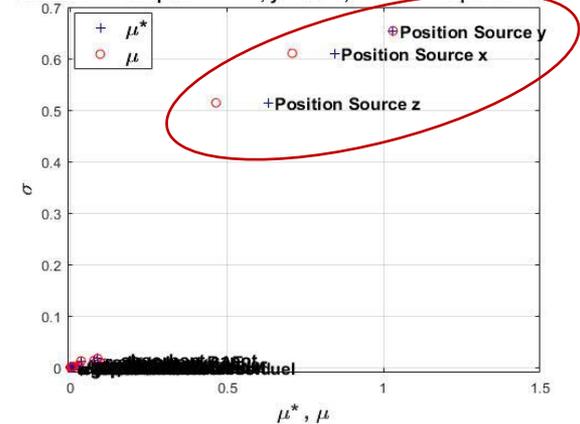
1000 Hz

Source: BV. Récepteur: x=4 m, y=7.50 m, z=1.2 m. Fréquence= 1000 Hz



5000 Hz

Source: BV. Récepteur: x=4 m, y=7.50 m, z=1.2 m. Fréquence= 5000 Hz



- ⇒ Sensibilité de la fonction de transfert à la position de la source de bruit
- ⇒ Effet non linéaire et/ou avec interactions
- ⇒ Présence de non-monotonie

Plan

Partie I Modèles de synthèse

- 01 Présentation des modèles de synthèse
- 02 Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes
- 03 Sélection de modèle de sources

Partie II Modèle de calcul du transfert acoustique du GMP

- 04 Présentation du modèle de fonction de transfert
- 05 Etude 1 : validation sur un cas académique
- 06 Etude 2 : validation sur un véhicule

Partie III Influence du sol et des conditions météorologiques sur le transfert acoustique

- 07 Présentation du modèle de propagation
- 08 Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

Conclusion et perspectives

Emission	Propagation/Transfert
Sources : <ul style="list-style-type: none">• Groupe motopropulseur• Bouche d'admission• Bouche d'échappement• Volumes d'échappement• Contact pneumatique/chaussée	Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Propagation/Transfert
Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

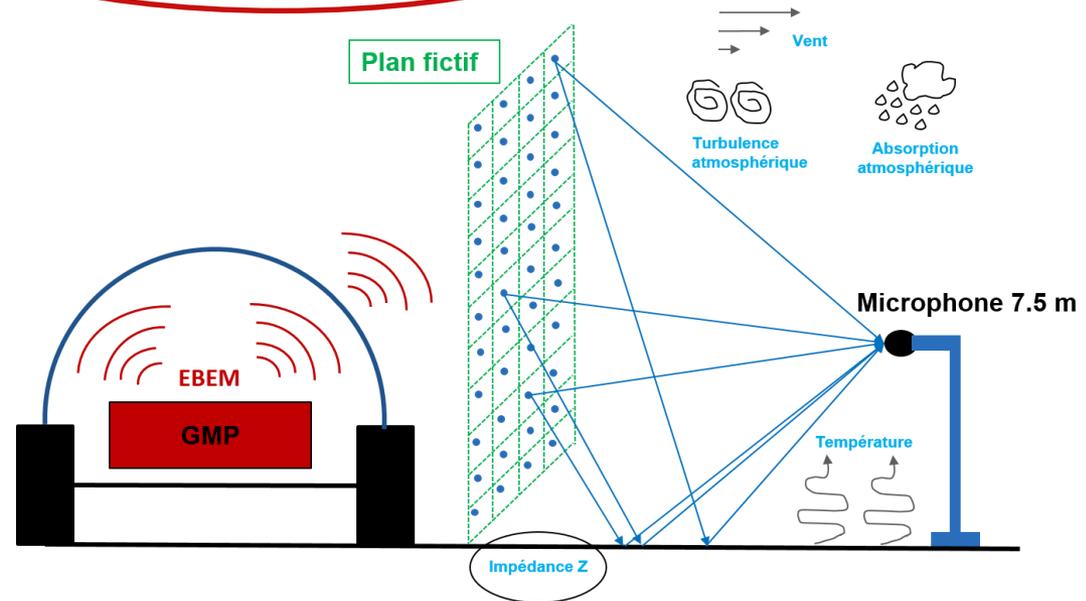
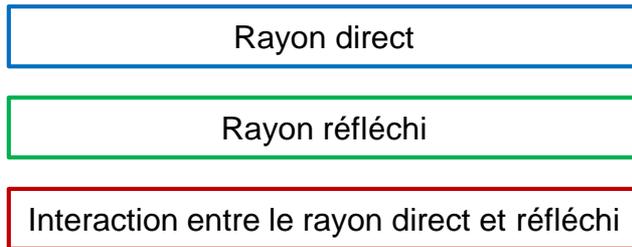
Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques
--

Présentation du modèle de propagation

Chaînage de deux méthodes

- EBEM dans le compartiment moteur
- Modèle analytique basé sur la théorie des rayons pour la propagation extérieure ¹

$$\langle p^2 \rangle = \left(\frac{A_b(R_1)^2}{R_1^2} + \frac{A_b(R_2)^2 \cdot |Q|^2}{R_2^2} \right) (1 + \langle a^2 \rangle) + \left(\frac{2 \cdot A_b(R_1) \cdot A_b(R_2) \cdot |Q|}{R_1 R_2} \right) \cos[2\pi f(\tau_2 - \tau_1) + \text{Arg}(Q)] (1 + \langle a^2 \rangle \rho_a) \exp[-\sigma_1^2 (1 - \rho_\delta)]$$



1. A. L'Espérance, J. Nicolas, P. Herzog, and G. Daigle, "Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile," *Applied Acoustics*, vol. 37, no. 2, pp. 111–139, 1992.

Présentation du modèle de propagation

Chaînage de deux méthodes

- EBEM dans le compartiment moteur
- Modèle analytique basé sur la théorie des rayons pour la propagation extérieure ¹

$$\langle p^2 \rangle = \left(\frac{A_b(R_1)^2}{R_1^2} + \frac{A_b(R_2)^2}{R_2^2} |Q|^2 \right) (1 + \langle a^2 \rangle) + \left(\frac{2 \cdot A_b(R_1) \cdot A_b(R_2) \cdot |Q|}{R_1 R_2} \right) \cos[2\pi f (\tau_2 - \tau_1) + \text{Arg}(Q)] (1 + \langle a^2 \rangle \rho_a) \exp[-\sigma_1^2 (1 - \rho_\delta)]$$

Paramètres d'entrée

- Absorption atmosphérique
 - Température de l'air T [5, 40] °C
 - Humidité relative de l'air H [25, 100] %
- Effet du sol
 - Résistance spécifique au passage de l'air σ [100000, 500000] $kN \cdot s \cdot m^{-4}$
 - Epaisseur effective du sol e [0.01, 1] m
- Diffusion par la turbulence atmosphérique
 - Longueur de corrélation L [0.9, 1.3] m
 - Variance de l'indice de réfraction $\langle \mu^2 \rangle$ [$1 \cdot 10^{-6}$, $10 \cdot 10^{-6}$]
- Réfraction par effet thermique et aérodynamique
 - Gradient vertical de célérité $\frac{d\langle c(z) \rangle}{dz}$ [0, 0,25] s^{-1}

1. A. L'Espérance, J. Nicolas, P. Herzog, and G. Daigle, "Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile," *Applied Acoustics*, vol.37, no.2, pp.111–139, 1992.

Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

■ Méthode EFAST (Extended Fourier Amplitude Sensitivity test) ¹

- Lier la variable X_i à une pulsation ω_i et à un paramètre s

$$X_i(s) = G_i(\sin(\omega_i s))$$

- Trouver un couple de pulsation qui n'interfère pas jusqu'à un ordre élevé M (4 ou 6)
 - Une grande pulsation ω_i attribuée au paramètre X_i
 - Une petite pulsation $\omega_{\sim i}$ attribuée aux autres paramètres

- La variance partielle du paramètre X_i

$$\hat{V}_i(Y) \approx 2 \sum_{p=1}^M (A_{p\omega_i}^2 - B_{p\omega_i}^2)$$

Indice de sensibilité de premier ordre S_i

- La variance partielle de l'ensemble complémentaire

$$\hat{V}_{ci}(Y) \approx 2 \sum_{p=1}^M (A_{p\omega_{\sim i}}^2 - B_{p\omega_{\sim i}}^2)$$

Indice de sensibilité total S_{Ti}

- La taille minimale de l'échantillon N dépend du théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon

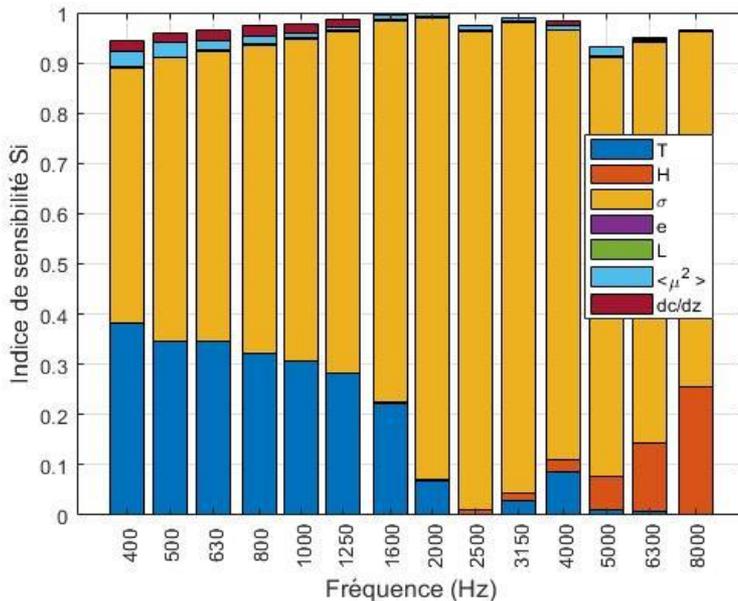
$$N = 2M\omega_{max} + 1$$

1. A. Saltelli, S.Tarantola, and K.P.-S.Chan, "A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output," *Technometrics*, vol.41,pp.39–56,Feb. 1999.

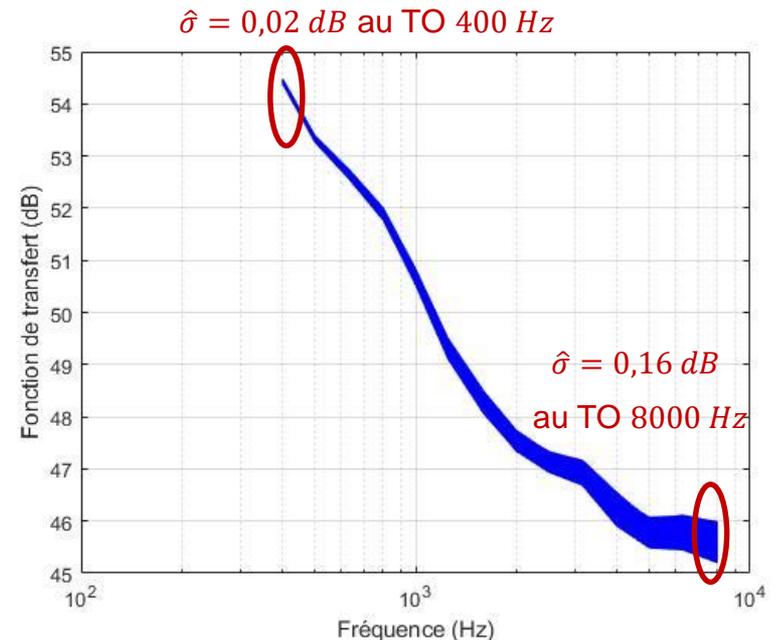
Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

Résultats sur la fonction de transfert d'un véhicule

- Absence de fortes interactions
- Paramètres influents en tiers d'octave
 - σ : pour tous les tiers d'octave
 - T : jusqu'au tiers d'octave 1600 Hz
 - H : à partir du tiers l'octave 5000 Hz



Indice de sensibilité S_i

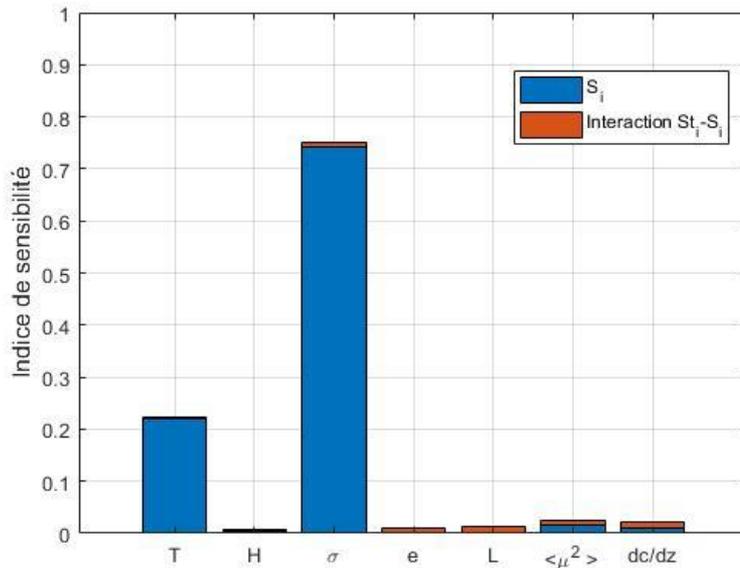


Fonctions de transfert

Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

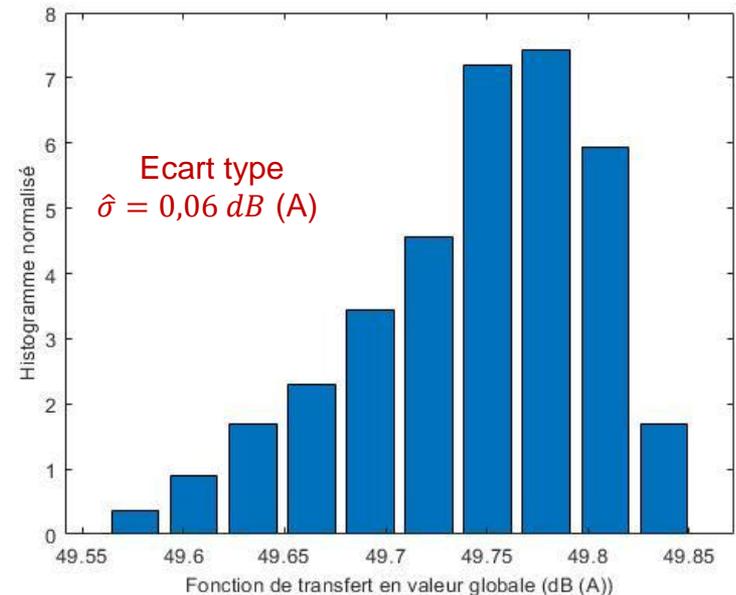
Résultats sur la fonction de transfert d'un véhicule

- Absence de fortes interactions
- Paramètres influents en valeur globale
 - σ : environ 75 % de la variabilité totale
 - T : environ 22 % de la variabilité totale



Indice de sensibilité S_i

Mesure d'interactions $S_{T_i - S_i}$



Histogramme des fonctions de transfert
en valeur globale

Plan

Partie I Modèles de synthèse

- 01 Présentation des modèles de synthèse
- 02 Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes
- 03 Sélection de modèle de sources

Partie II Modèle de calcul du transfert acoustique du GMP

- 04 Présentation du modèle de fonction de transfert
- 05 Etude 1 : validation sur un cas académique
- 06 Etude 2 : validation sur un véhicule

Partie III Influence du sol et des conditions météorologiques sur le transfert acoustique

- 07 Présentation du modèle de propagation
- 08 Analyse de sensibilité par la méthode EFAST

Conclusion et perspectives

Emission	Propagation/Transfert
Sources : <ul style="list-style-type: none">• Groupe motopropulseur• Bouche d'admission• Bouche d'échappement• Volumes d'échappement• Contact pneumatique/chaussée	Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Propagation/Transfert
Compartment moteur : <ul style="list-style-type: none">• Parois du compartiment moteur• Ouvertures• Matériaux absorbants• Ecrans isolants Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques

Propagation extérieure : <ul style="list-style-type: none">• Sol• Absorption atmosphérique• La diffusion par la turbulence atmosphérique• Réfraction par effets thermiques et aérodynamiques
--

Conclusion

■ Modèles de synthèse

- Quantification d'incertitudes des paramètres d'entrée : **incertitude de mesure et variabilité de production**
- Propagation d'incertitude avec **une méthode type quasi-Monte Carlo**
- Analyse de sensibilité en calculant les **indices SRC**. Les paramètres influents sont identifiés et classés par famille de véhicule : **GMP (sources et transferts), contact pneumatique/chaussée, couple moteur, couple à la roue, vitesse à 1000 tr/mn**
- Sélection du meilleur modèle par la méthode bayésienne : **le meilleur modèle correspond au modèle le plus complexe « six faces en tiers d'octave »**

■ Modèle de calcul du transfert acoustique du GMP

- Chaînage de la méthode EBEM et de la méthode de lancer de faisceaux : **prise en compte des effets d'interférences entre le rayon direct et réfléchi sur le sol**
- Réalisation d'une étude d'analyse de sensibilité sur la position des sources de bruit et des paramètres caractérisant les matériaux absorbants : **grande sensibilité de la fonction de transfert à la position de la source**

■ Influence du sol et des conditions météorologiques sur le transfert acoustique

- Chaînage de la méthode EBEM et d'une méthode basée sur la théorie des rayons
- Analyse de sensibilité par la méthode EFAST : **un petit écart-type $\hat{\sigma} = 0,06 \text{ dB (A)}$ en valeur globale. σ et T représente les deux paramètres les plus influents**

Perspectives

■ Modèles de synthèse

- Faire un travail sur l'incertitude des paramètres les plus influents afin d'améliorer la prévision des modèles
- Développer des modèles précis pour caractériser la contribution du bruit de contact pneumatique/chaussée, qui peut dépendre de la vitesse du véhicule et de son accélération
- Complexifier les modèles : température des sources, GMP en plusieurs zones, fréquence des sources en bandes fines, corrélation entre le bruit d'admission et d'échappement

■ Modèle de calcul du transfert acoustique du GMP

- Validation de la méthode sur d'autres véhicules
- Etudier la zone de chaînage entre les deux méthodes (EBEM et lancer de faisceaux)
- Introduire dans la directivité des sources un coefficient de diffraction qui dépend de la taille de l'ouverture et de la longueur d'onde
- Définir la limite fréquentielle de cette méthode

■ Influence du sol et des conditions météorologiques sur le transfert acoustique

- Quantifier les effets de la couche limite sur les parois du véhicule lors de son déplacement (par exemple à partir de mesures en soufflerie)

Merci de votre attention

- Publications

- Revue à comité de lecture

- HAMDAD, H., PÉZERAT, C., GAUVREAU, B., LOCQUETEAU, C., DENOUAL, Y. Sensitivity analysis and propagation of uncertainty for the simulation of vehicle pass-by noise. Applied Acoustics, 2018 (**en révision**).

- Congrès international et national

- HAMDAD, H., PÉZERAT, C., GAUVREAU, B., LOCQUETEAU, C. Sensitivity analysis of model output for the prediction of vehicle pass-by noise. Automotive NVH Comfort, Le Mans, 2016
 - HAMDAD, H., PÉZERAT, C., GAUVREAU, B., LOCQUETEAU, C. Analyse de sensibilité globale pour la prédiction du bruit de passage des véhicules automobiles. JICAB (présentation et poster), Marseille, 2016.
 - HAMDAD, H., PÉZERAT, C., GAUVREAU, B., LOCQUETEAU, C. Analyse de sensibilité et propagation d'incertitude pour la prédiction du bruit de passage des véhicules automobiles. JICAB (présentation et poster), Paris, 2017.
 - HAMDAD, H., PÉZERAT, C., GAUVREAU, B., LOCQUETEAU, C. Analyse de sensibilité et sélection de modèle pour prédire le bruit de passage des véhicules automobiles. Congrès Français d'Acoustique, Le Havre, 2018.