



CTTM

CENTRE DE TRANSFERT
DE TECHNOLOGIE DU MANS

LAUM

Laboratoire d'Acoustique
Le Mans Université • CNRS - UMR 6613

M. Sanalatii, M. Melon, J.-C. Le Roux

EFFET DES NON-LINÉARITÉS DE HAUT-PARLEURS SUR LA SYNTHÈSE DE CHAMP



Projet ANR VIRTECH

VIRTualisation de moyens Expérimentaux en
vibro-aCoustique par synthÈse de champ de pression

VIRTECH

CONTEXTE

🕒 BESOIN (PROJET VIRTECH)

Développement de **techniques** permettant de **compenser les limites des mesures acoustiques normalisées** en proposant une **alternative aux chambres réverbérantes** ou encore en permettant la réalisation de **mesure *in situ***.

→ **Antennes de haut-parleurs**
commandes calculées par des méthodes
d'optimisation sous contraintes
[T. Bravo C., Maury, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120 (5)]



🕒 OBJECTIF (LAUM + CTTM)

- *Mesures d'affaiblissement acoustique*
- *Mesures du coefficient d'absorption*



La génération d'un champ incident de **fort niveau** peut contraindre les haut-parleurs à fonctionner au-delà de leur **régime linéaire**.

→ Étudier l'effet de non-linéarités des sources sur le champ synthétisé

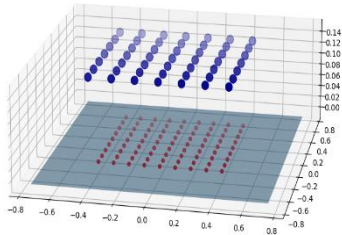
PLAN

1. MÉTHODE DE GÉNÉRATION D'UN CHAMP SPÉCIFIQUE (DIFFUS, ONDE PLANE, ETC.)
2. MÉTHODE DE PRISE EN COMPTE DES NON-LINÉARITÉS DES SOURCES
3. EFFETS DES DISTORSIONS DES SOURCES SUR LE CHAMP RÉSULTANT

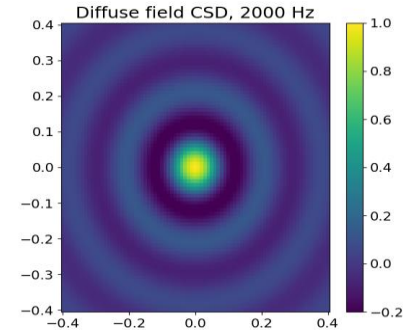
GÉNÉRATION D'UN CHAMP DIFFUS : THÉORIE

MÉTHODOLOGIE

[T. Bravo C., Maury, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120 (5)]



● sources
● microphones



1. Densité spectrale croisée du champ diffus (CSD) :

$$S_{dd}(\omega, r) = S_0 \frac{\sin kr}{kr}$$

CSD théorique

Vecteurs propres

$$Q\Lambda Q^H = Q\Lambda^{\frac{1}{2}} \left(Q\Lambda^{\frac{1}{2}} \right)^H = DD^H = DS_{xx}D^H = E[dd]$$

« Filtre de forme » Champ désiré d
 $d = Dx$

2. Commande de pilotage des sources :

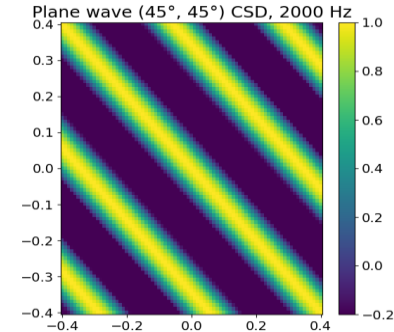
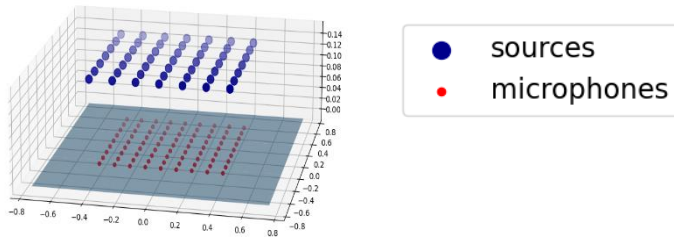
$$u_{opt}(\omega) = [G^H G]^{-1} G^H d$$

S_0 : densité spectrale de puissance sur un seul microphone
 r : distance entre deux microphones
 x : bruit blanc
 G : fonction de transfert entre sources et microphones

GÉNÉRATION D'UNE ONDE PLANE: THÉORIE

MÉTHODOLOGIE

[T. Bravo C., Maury, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120 (5)] :



1. Densité spectrale croisée d'onde plane (CSD) :

$$S_{dd}(\omega, r) = S_0 e^{jk(|r_x| \sin \vartheta \sin \varphi)} e^{jk(|r_y| \sin \vartheta \sin \varphi)} \rightarrow Q \Lambda Q^H = Q \Lambda^{\frac{1}{2}} \left(Q \Lambda^{\frac{1}{2}} \right)^H = D D^H = E[dd]$$

CSD théorique

Vecteurs propres

« Shaping filters » *Champ désiré d*
 $d = D x$

2. Commande de pilotage des sources :

$$u_{opt}(\omega) = [G^H G]^{-1} G^H d$$

S_0 : densité spectrale de puissance sur un seul microphone

ϑ : angle d'élévation

φ : angle d'azimut

r_x : espacement microphonique selon l'axe x

r_y : espacement microphonique selon l'axe y

x : bruit blanc

G : fonction de transfert entre sources et microphones

SCHÉMA ÉCLECTIQUE ÉQUIVALENT D'UN HP

MODÈLE LINÉAIRE

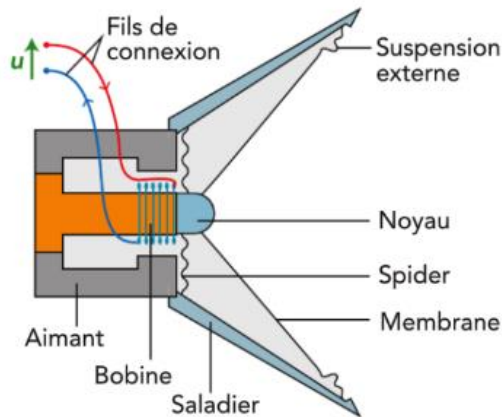
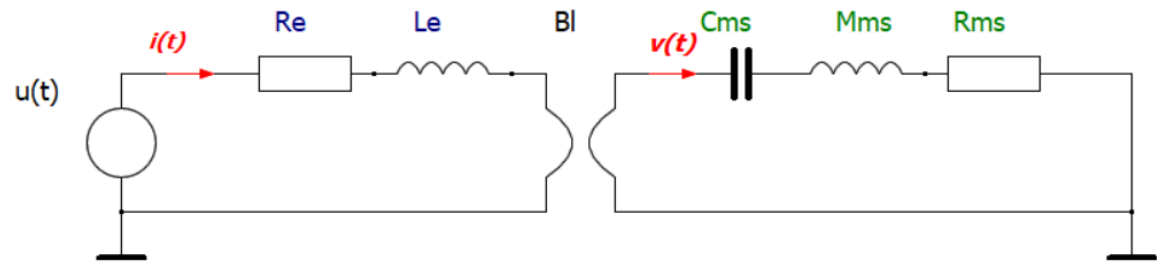


Schéma d'un haut-parleur électrodynamique

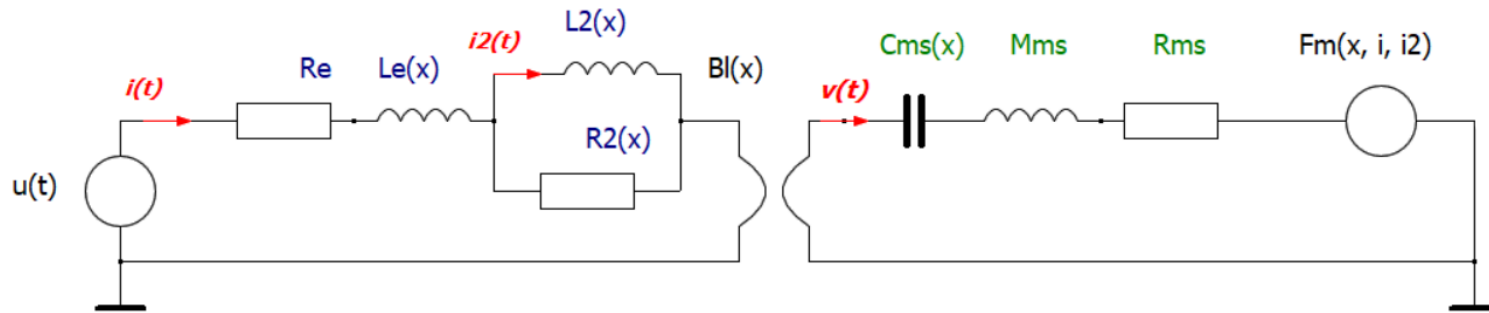


$$\begin{cases} u(t) = i(t)R_e + L_e \frac{di(t)}{dt} + Bl \frac{dx}{dt} \\ Bl i(t) = M \frac{d^2x}{dt^2} + R_{ms} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_{ms}} x \end{cases}$$

En réalité : impact de la **température**, du **courant** et du **déplacement** de membrane

SCHÉMA ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT D'UN HP

MODÈLE NON LINÉAIRE DE KLIPPEL



Paramètres non-linéaires :
(impact de x)

- Facteur BL
- Raideur de la suspension $1/C_{ms}$
- Inductance de la bobine Le
- Inductance L_2 , Resistance R_2
(courants de Foucault)

$$\left\{ \begin{aligned} u(t) &= i(t)Re + \frac{d(L_e(x)i(t))}{dt} + \frac{d(L_2(x)i_2(x))}{dt} + Bl(x) \frac{dx}{dt} \\ \frac{d(L_2(x)i_2(x))}{dt} &= (i(t) - i_2(t))R_2(x) \\ Bl(x)i(t) - F_m(x, i, i_2) &= M \frac{d^2x}{dt^2} + R_{ms} \frac{dx}{dt} + \frac{x}{C_{ms}} \\ F_m(x, i, i_2) &\approx -\frac{i^2(t)}{2} \frac{dL_e(x)}{dx} - \frac{i_2^2(t)}{2} \frac{dL_2(x)}{dx} \end{aligned} \right.$$

REPRÉSENTATION D'ÉTAT

FORMULATION EN REPRÉSENTATION D'ÉTAT (STATE SPACE MODEL) :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u$$

≡

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}(t) \\ i(t) \\ \dot{i}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{M_{ms}C_{ms}(x)} & -\frac{R_{ms}}{M_{ms}} & \frac{Bl(x) + \frac{1}{2}\frac{dL_e(x)}{dx}i(t)}{M_{ms}} & \frac{1}{2}\frac{dL_2(x)}{dx}i_2(t) \\ 0 & \frac{-Bl(x) - \frac{dL_e(x)}{dx}i(t)}{L_e(x)} & \frac{-R_e - R_2(x)}{L_e(x)} & \frac{R_2(x)}{L_e(x)} \\ 0 & 0 & \frac{R_2(x)}{L_2(x)} & \frac{-R_2(x) - \frac{dL_2(x)}{dx}\dot{x}(t)}{L_2(x)} \end{bmatrix}}_{\text{Matrice d'état}} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ i(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Matrice de commande}} u(t)$$

Variables d'état
Vecteur d'entrée (commandes)

FORMULATION DISCRÉTISÉE :

$$\mathbf{x}[n] = \mathbf{A}[n-1]\mathbf{x}[n-1] + \mathbf{b}[n-1]u[n-1]$$

Connaissant l'état initial \mathbf{x} et la commande \mathbf{u} sur un intervalle fini, on peut exprimer les variables d'état \mathbf{x} à tout moment (Formulation Bilinéaire)

REPRÉSENTATION D'ÉTAT

CALCUL DU CHAMP RAYONNÉ

Champ réellement
génééré par une
antenne des
sources ?



Variables d'état
Commande

$u(t), \begin{bmatrix} x(t_0) \\ v(t_0) \\ i(t_0) \\ i_2(t_0) \end{bmatrix}, TS \text{ param. +} \\ \text{dépendance} \\ \text{en } x$

Matrice d'état,
Matrice de commande

$$\dot{x} = Ax + bu$$



$$\begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \\ i(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix}$$

+

Propagation
des ondes
linéaire

→ $P(t)$

PARAMÈTRES THIELE ET SMALL DU HP DES HP DU RÉSEAU

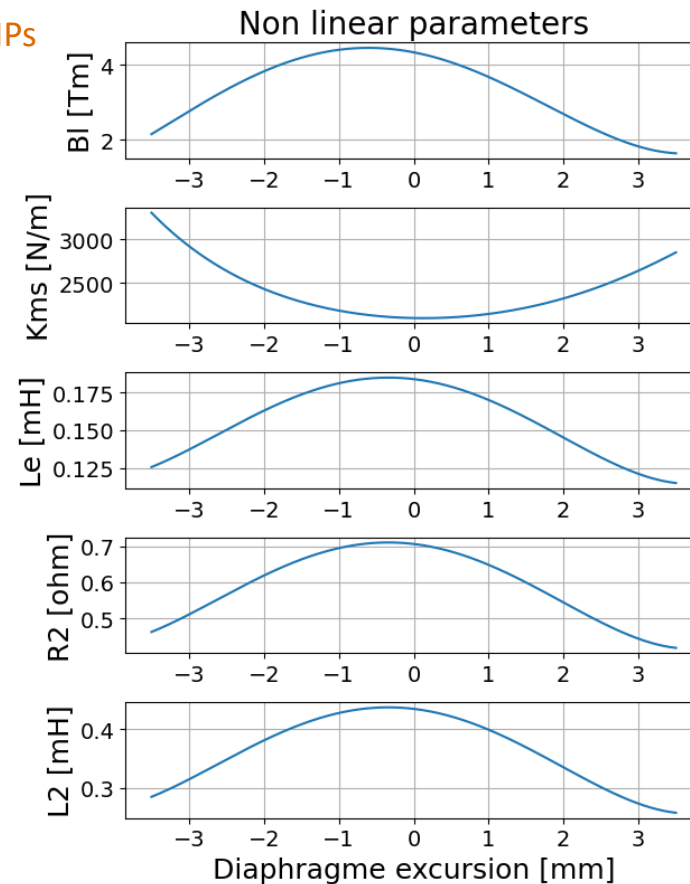
HAUT-PARLEUR FAITAL_3FE22 MONTÉ SUR UNE ENCEINTE CLOSE 1L

1 HP mesuré

10% erreur aléatoire pour les autres HPs



Banc de Klippel



Linear parameters

Re, ohm 6.74

Mms, g 2.17

Rms, kg/s 0.478

Fc, Hz 139

PARAMÈTRES DE THIELE ET SMALL DES HP DU RÉSEAU

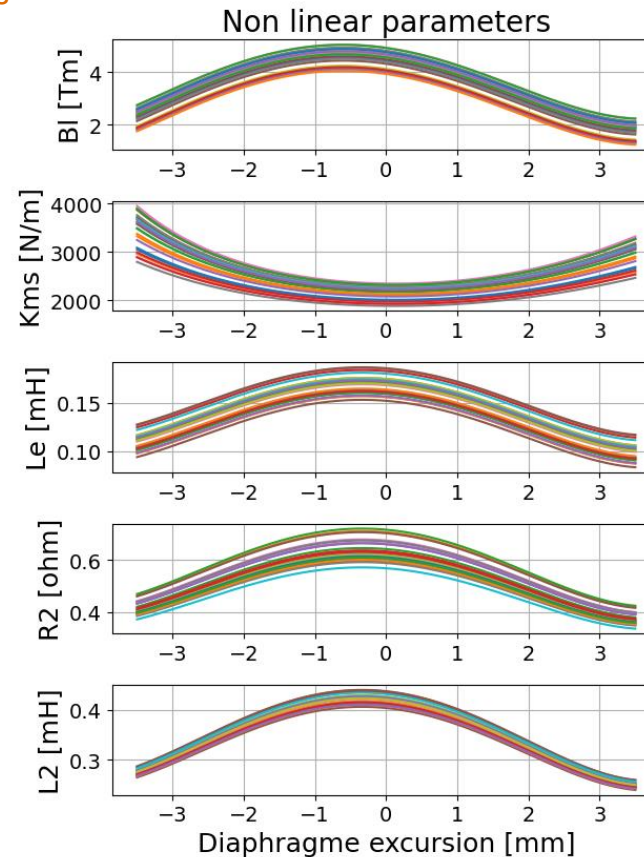
HAUT-PARLEUR FAITAL_3FE22 MONTÉ SUR UNE ENCEINTE CLOSE 1L

1 HP mesuré

10% erreur aléatoire pour les autres HPs



Banc de Klippel



Linear parameters

Re, ohm 6.74

Mms, g 2.17

Rms, kg/s 0.478

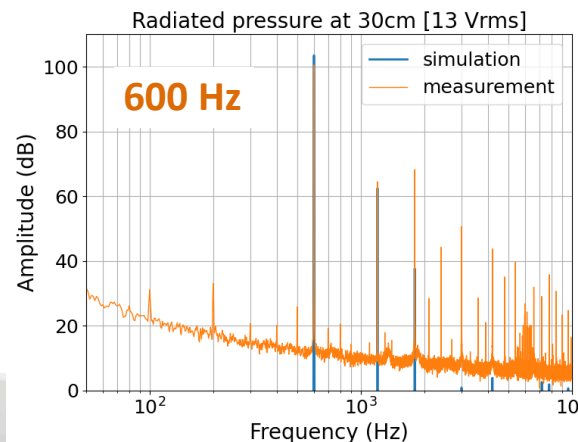
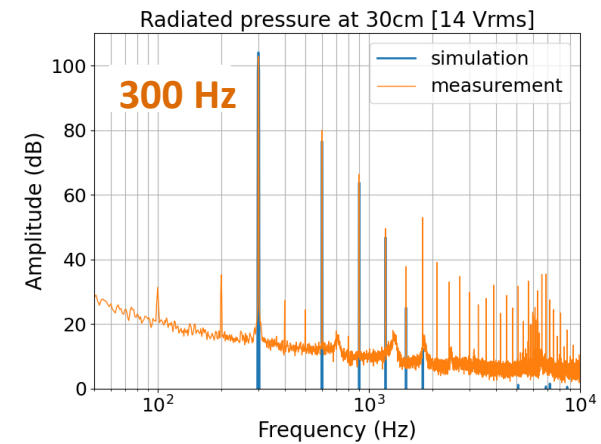
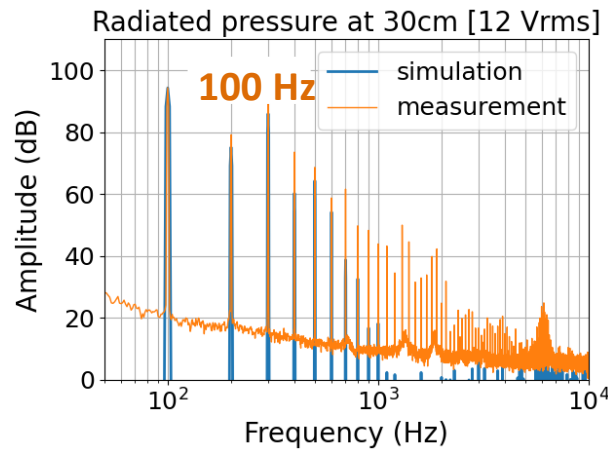
Fc, Hz 139

VALIDATION DU MODÈLE DE REPRÉSENTATION D'ÉTAT

➤ RÉPONSE DU HP À UNE EXCITATION SINUSOÏDALE



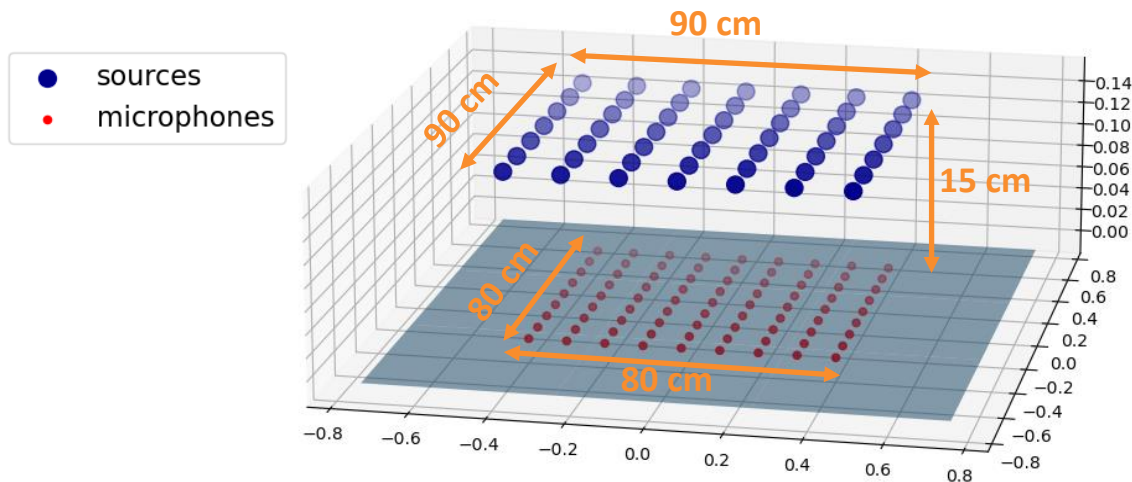
Salle semi-anechoïque au CTTM



Écart entre la simulation et la mesure des premières harmoniques ~4dB

→ Acceptable pour le but de l'étude

GÉOMÉTRIE DU PROBLÈME




- $7 \times 7 = 49$ sources
 $\Delta z = 15$ cm
- $9 \times 9 = 81$ microphones
 $\Delta x = \Delta y = 10$ cm

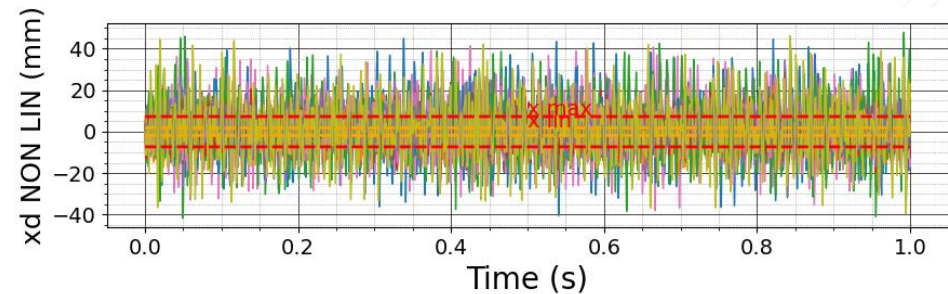
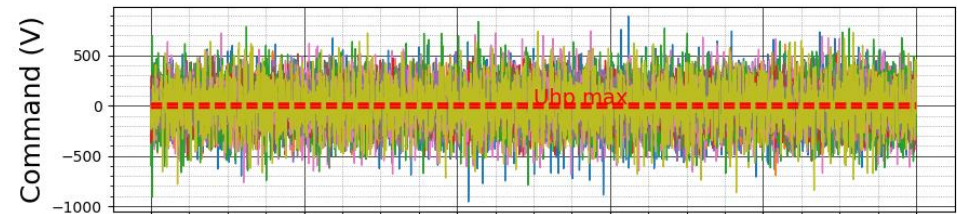
OBJECTIF :

Génération d'un champ diffus et d'une onde plane à fort niveau (~117 dB)

GÉNÉRATION D'UN CHAMP DIFFUS

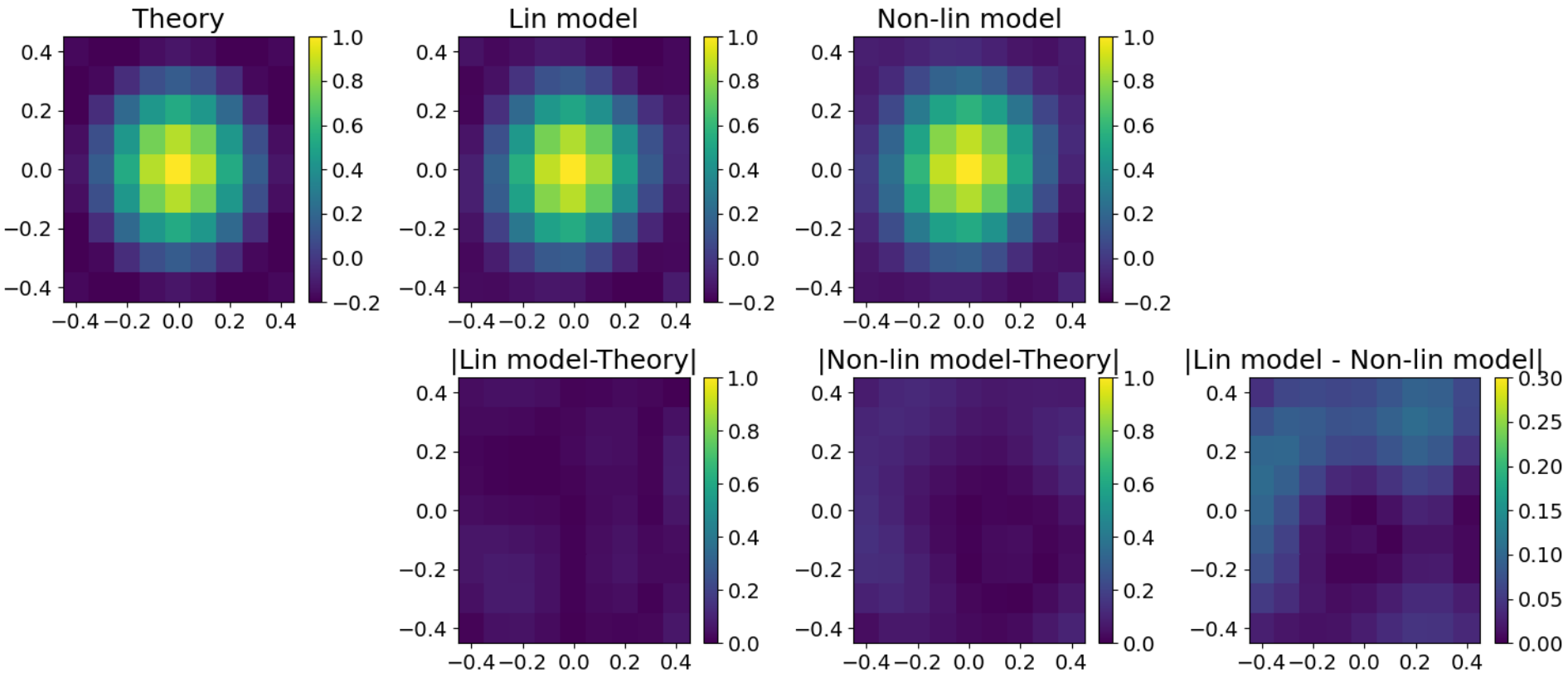
ETAPES DU CALCUL

1. Calcul des commandes de pilotage large bande $u(t)$ en régime linéaire (100Hz – 1kHz)
2. Calcul du déplacement et de la vitesse de la membrane, affecté par les non-linéarités du HP
3. Calcul du champ résultant (affecté par les non-linéarités du HP) 



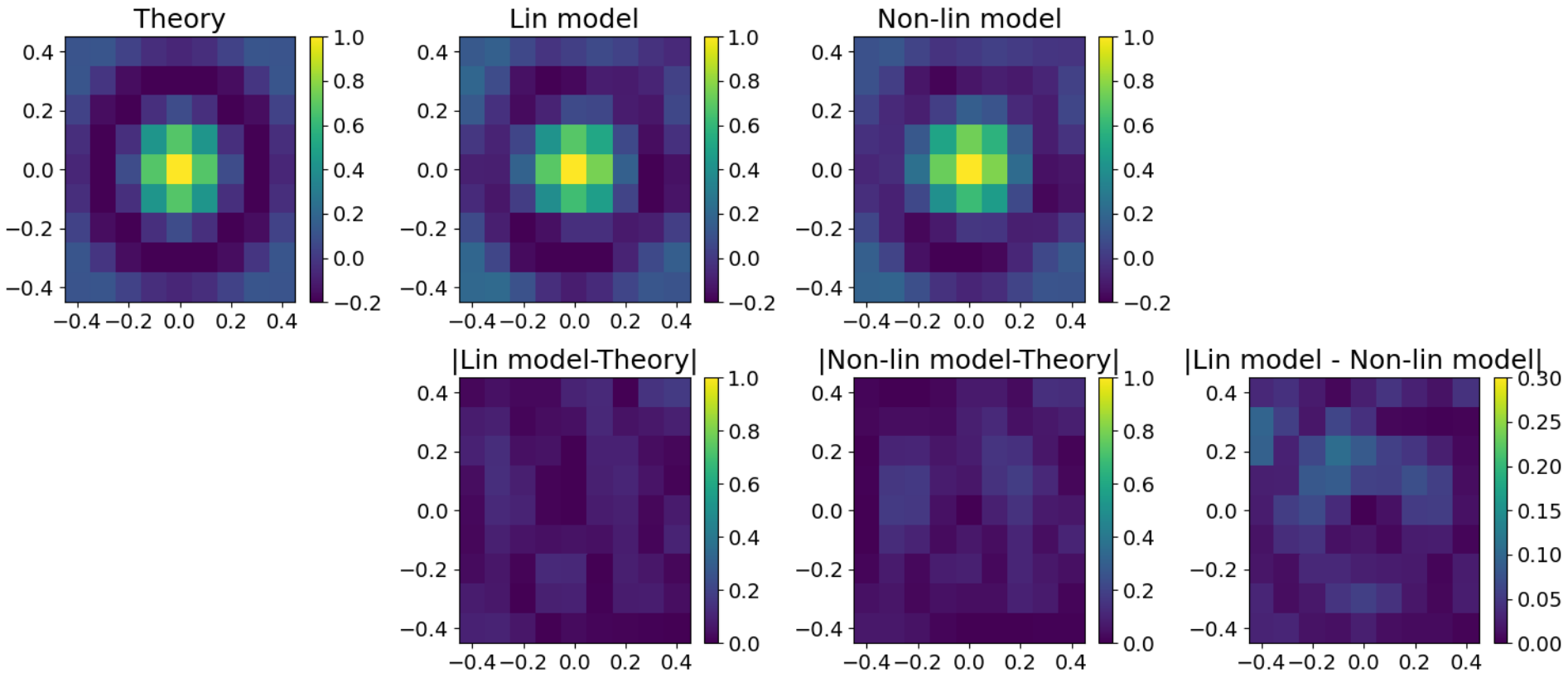
CHAMP DIFFUS : CSD SIMULÉE ET NORMALISÉE

CSD at 500 Hz



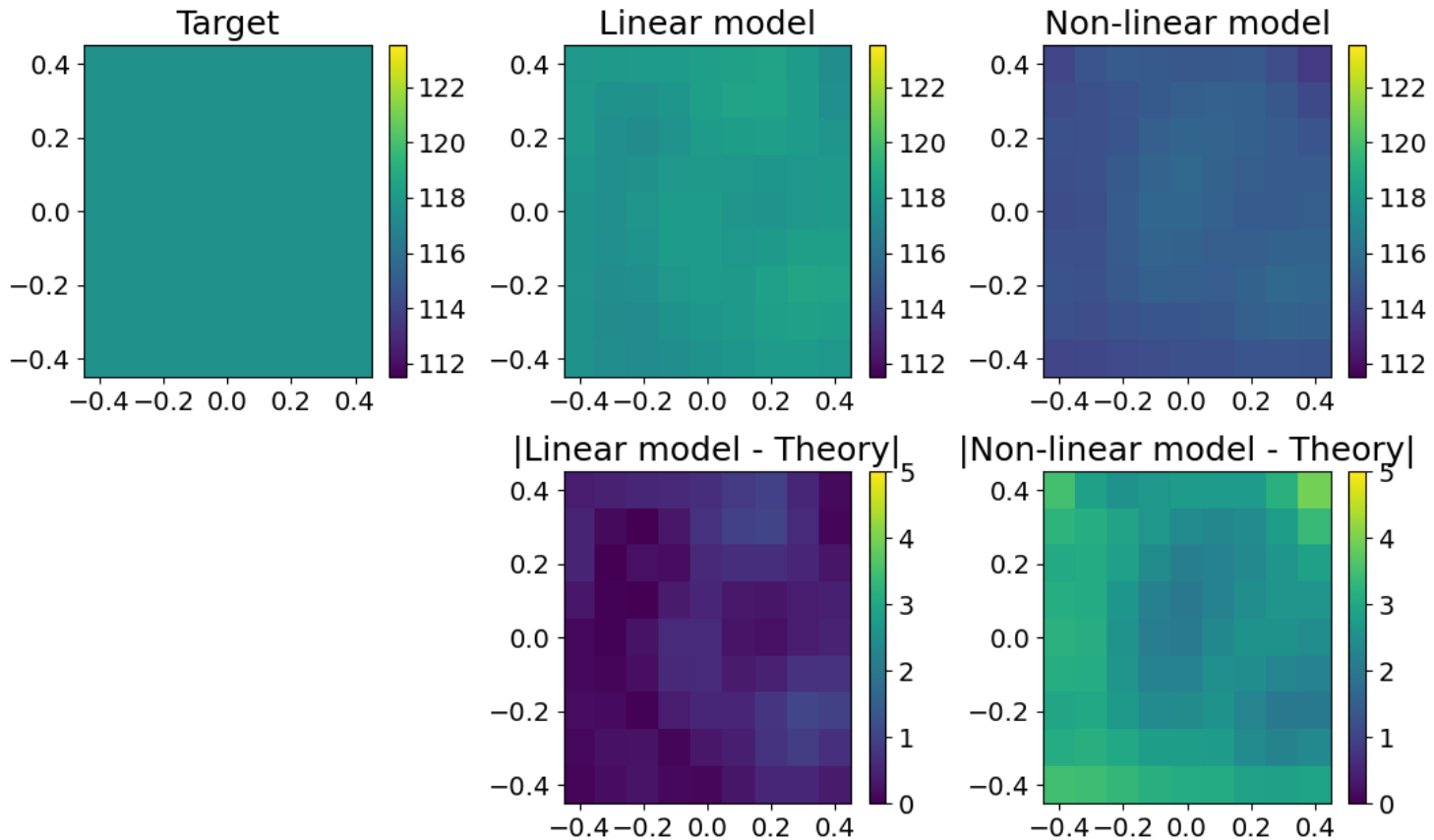
CHAMP DIFFUS : CSD SIMULÉE ET NORMALISÉE

CSD at 800 Hz



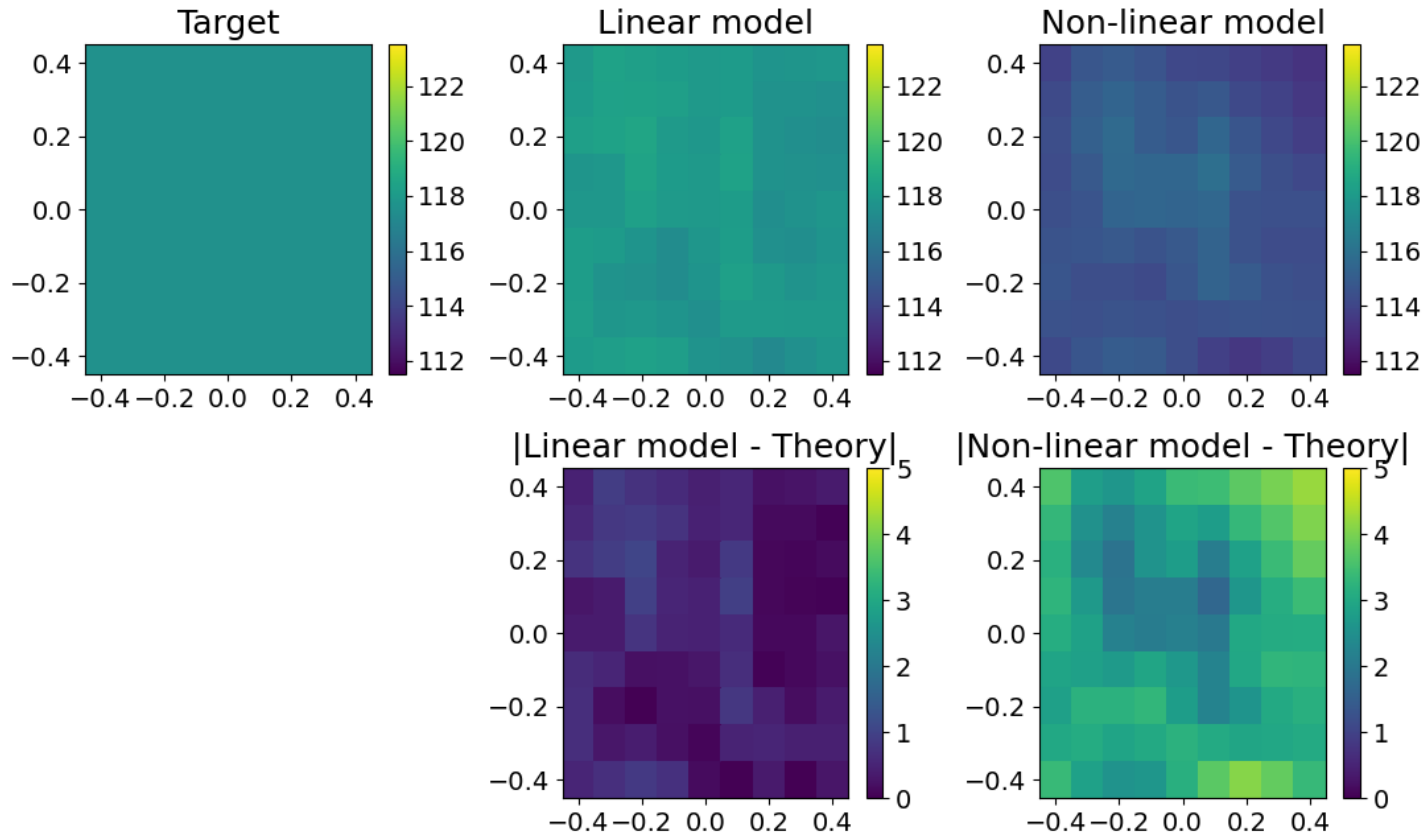
CHAMP DIFFUS : NIVEAU DE PRESSION

Pressure level (dB) at 500 Hz



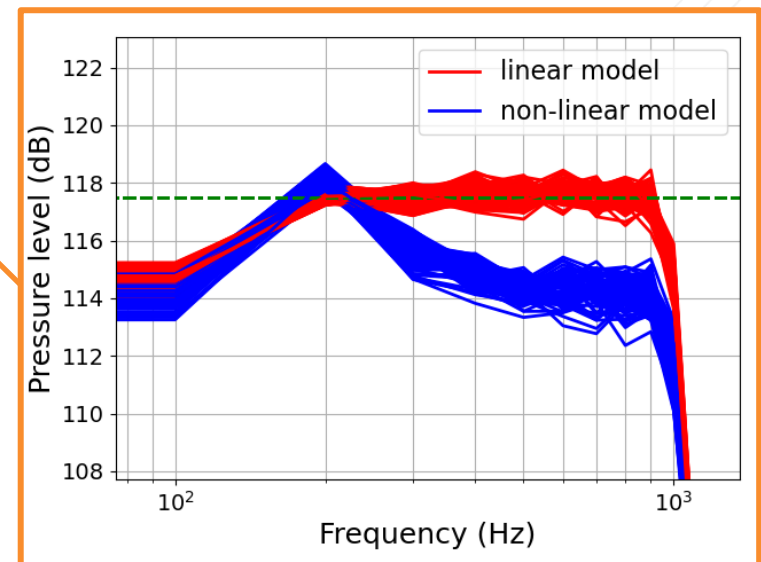
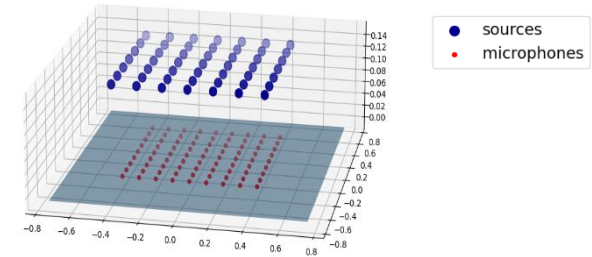
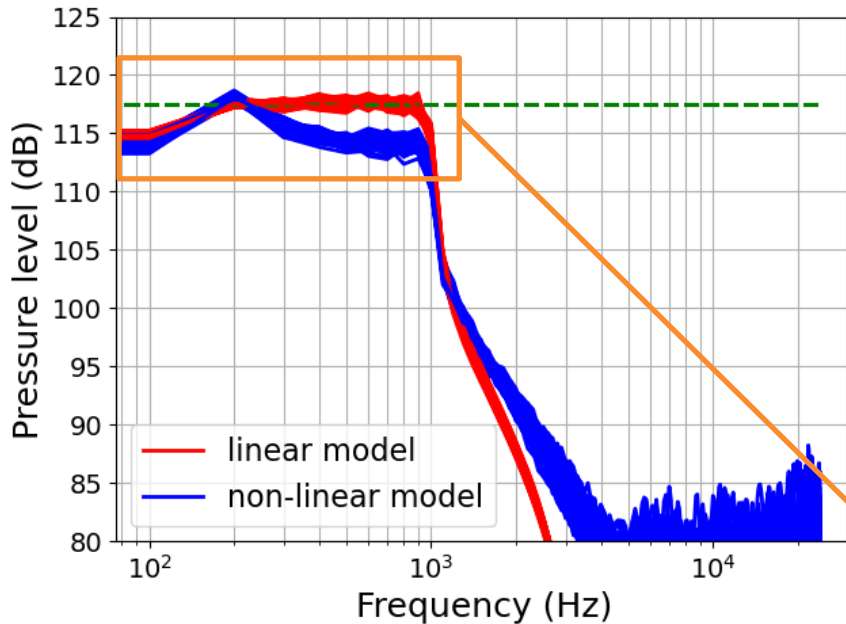
CHAMP DIFFUS : NIVEAU DE PRESSION

Pressure level (dB) at 800 Hz



CHAMP DIFFUS : NIVEAU DE PRESSION

NIVEAU DE PRESSION SUR LA BANDE LARGE EN CHAQUE POINT D'OBSERVATION



BF :

$BL \searrow$

$1/Cms \nearrow$

$j\omega Le \approx 0$

$j\omega L2 \approx 0$

HF :

$BL \searrow$

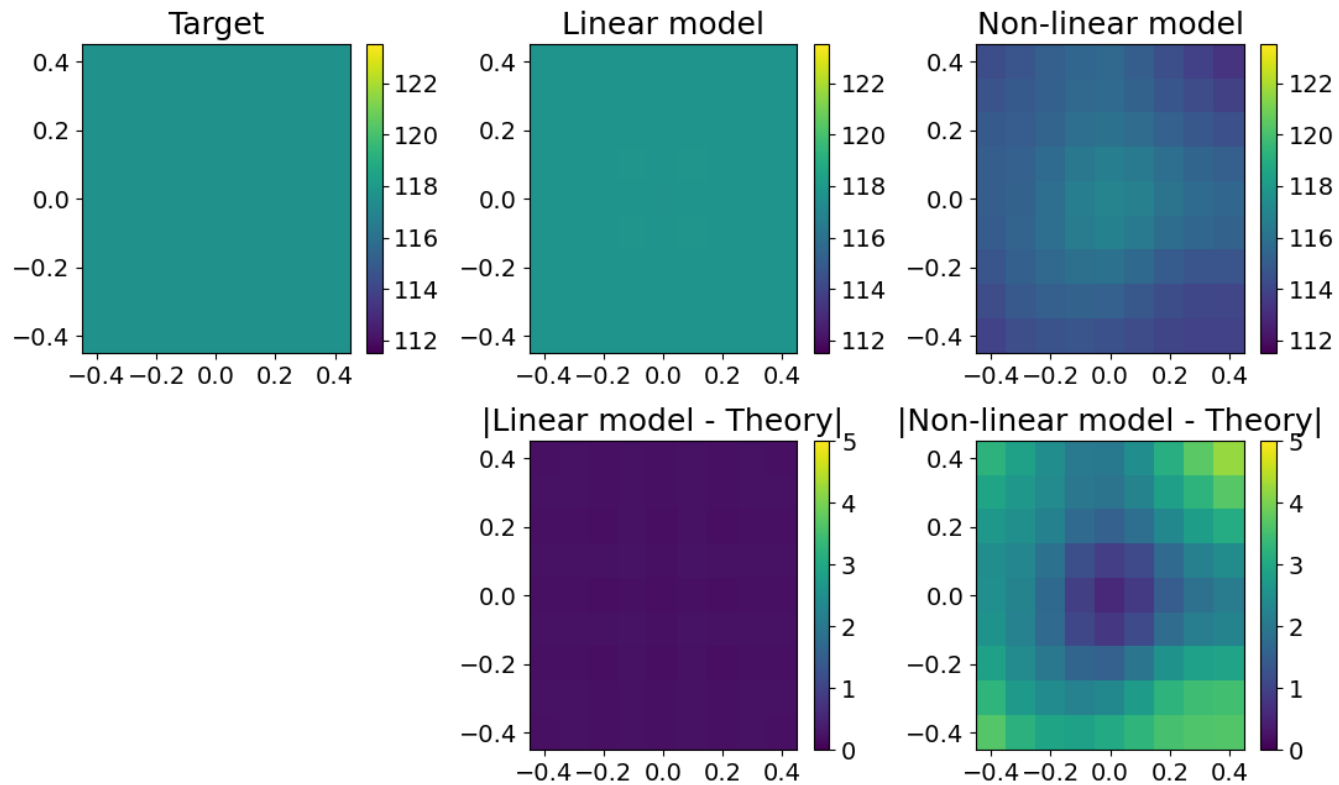
$1/Cms \nearrow$

$j\omega Le \approx \searrow$

$j\omega L2 \approx \searrow$

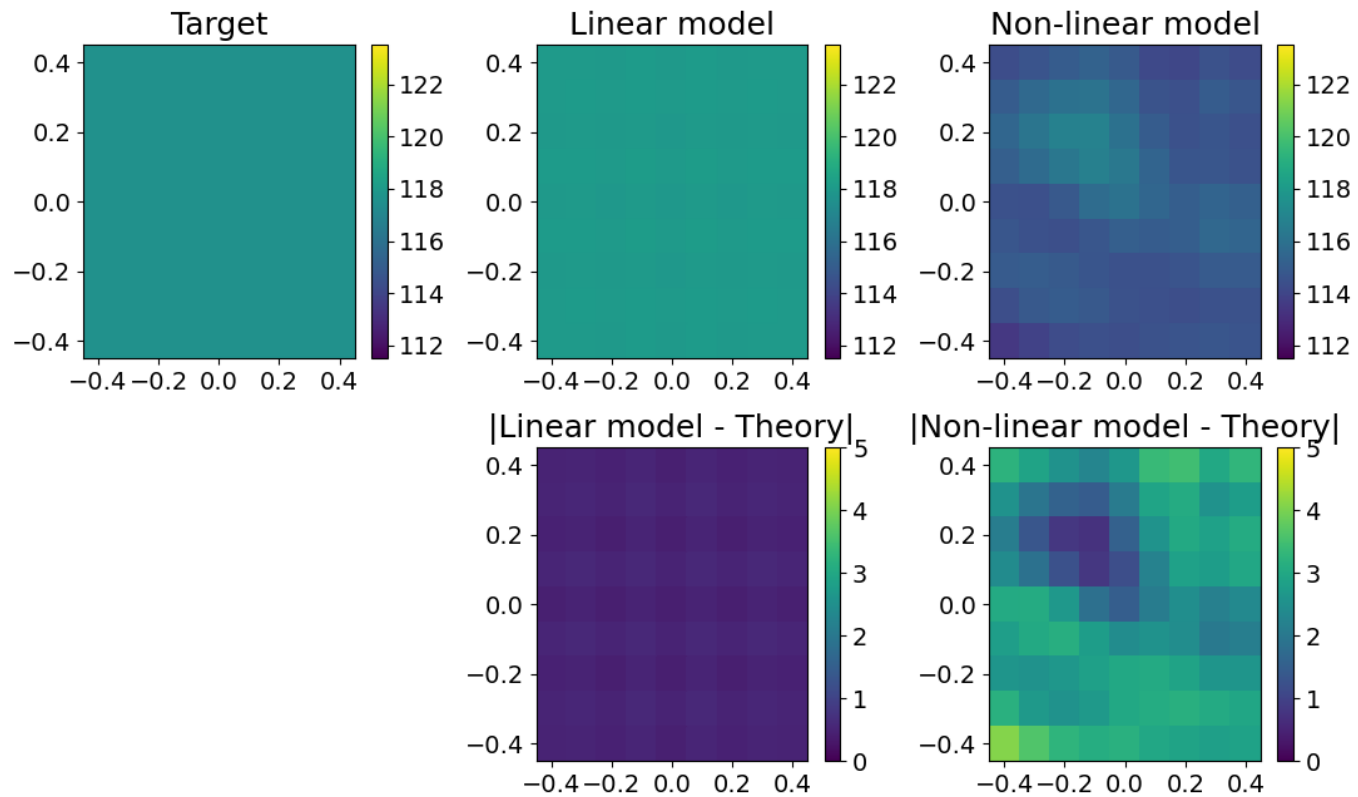
ONDE PLANE INCIDENCE NORMALE : NIVEAU DE PRESSION

Pressure level (dB) at 500 Hz



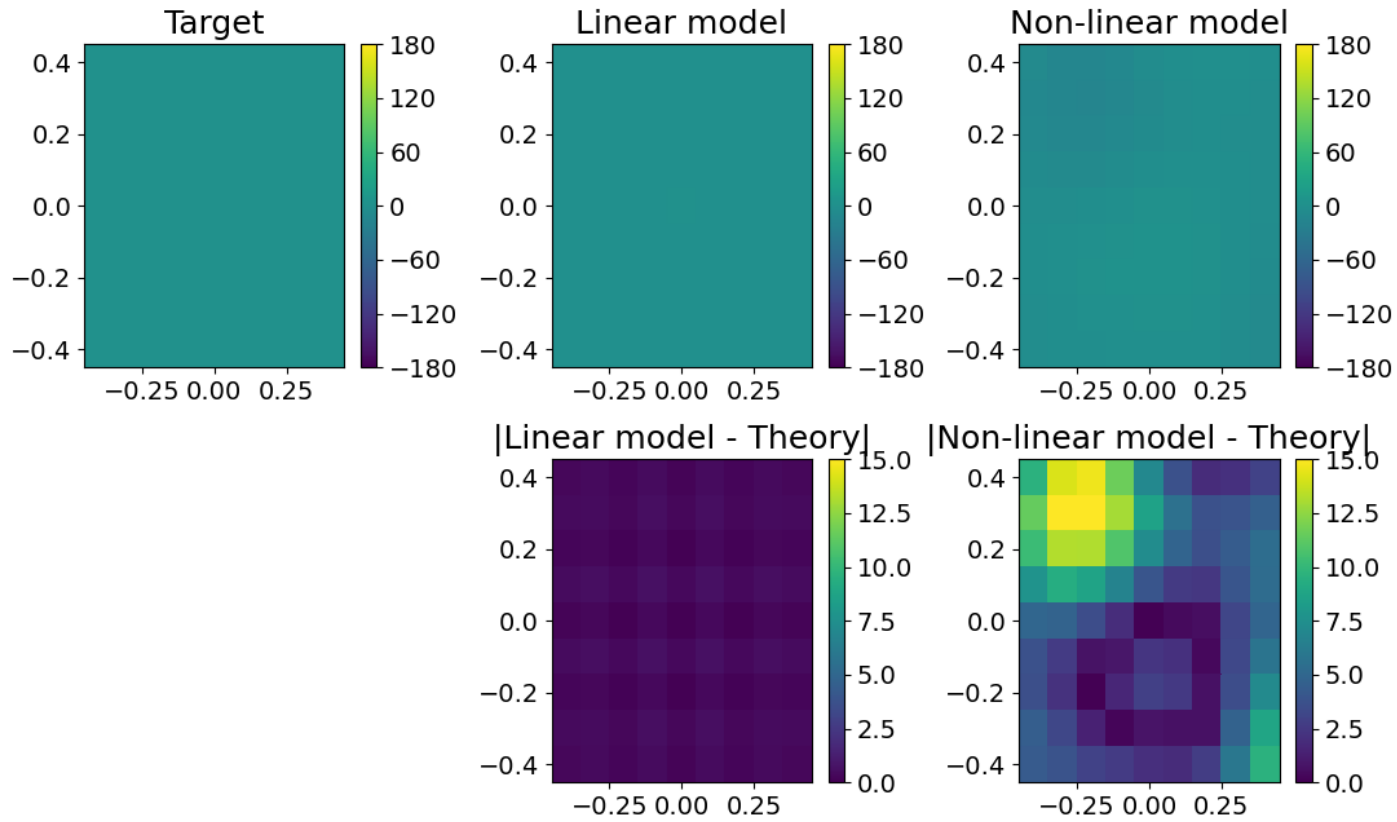
ONDE PLANE INCIDENCE NORMALE : NIVEAU DE PRESSION

Pressure level (dB) at 800 Hz



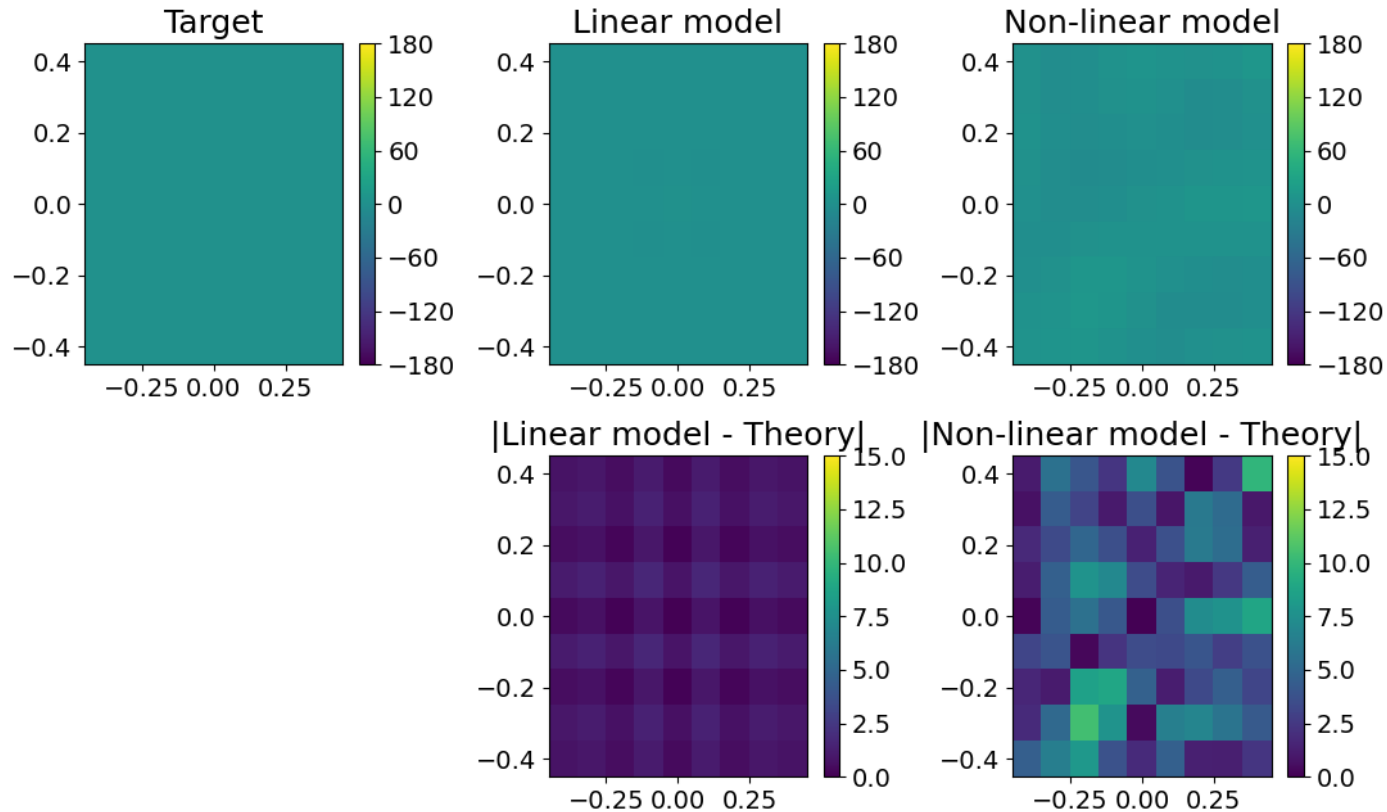
ONDE PLANE INCIDENCE NORMALE : PHASE DE PRESSION

Pressure phase (deg) at 500 Hz



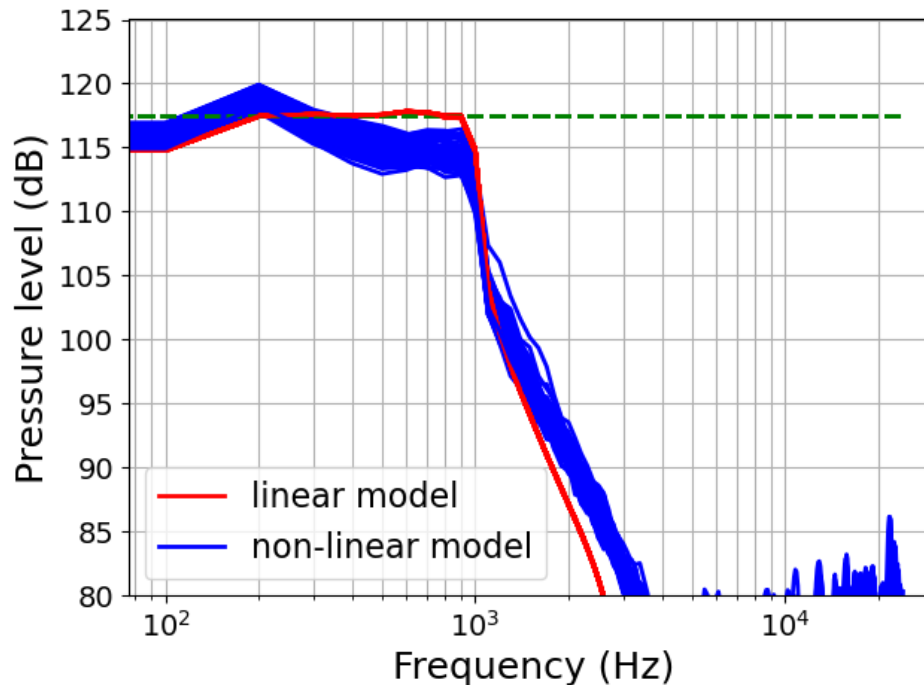
ONDE PLANE INCIDENCE NORMALE : PHASE DE PRESSION

Pressure phase (deg) at 800 Hz



ONDE PLANE INCIDENCE NORMALE : PHASE DE PRESSION

🕒 NIVEAU DE PRESSION SUR LA BANDE LARGE EN CHAQUE POINT D'OBSERVATION



BF :

$BL \searrow$

$1/Cms \nearrow$

$j\omega L_e \approx 0$

$j\omega L_2 \approx 0$

HF :

$BL \searrow$

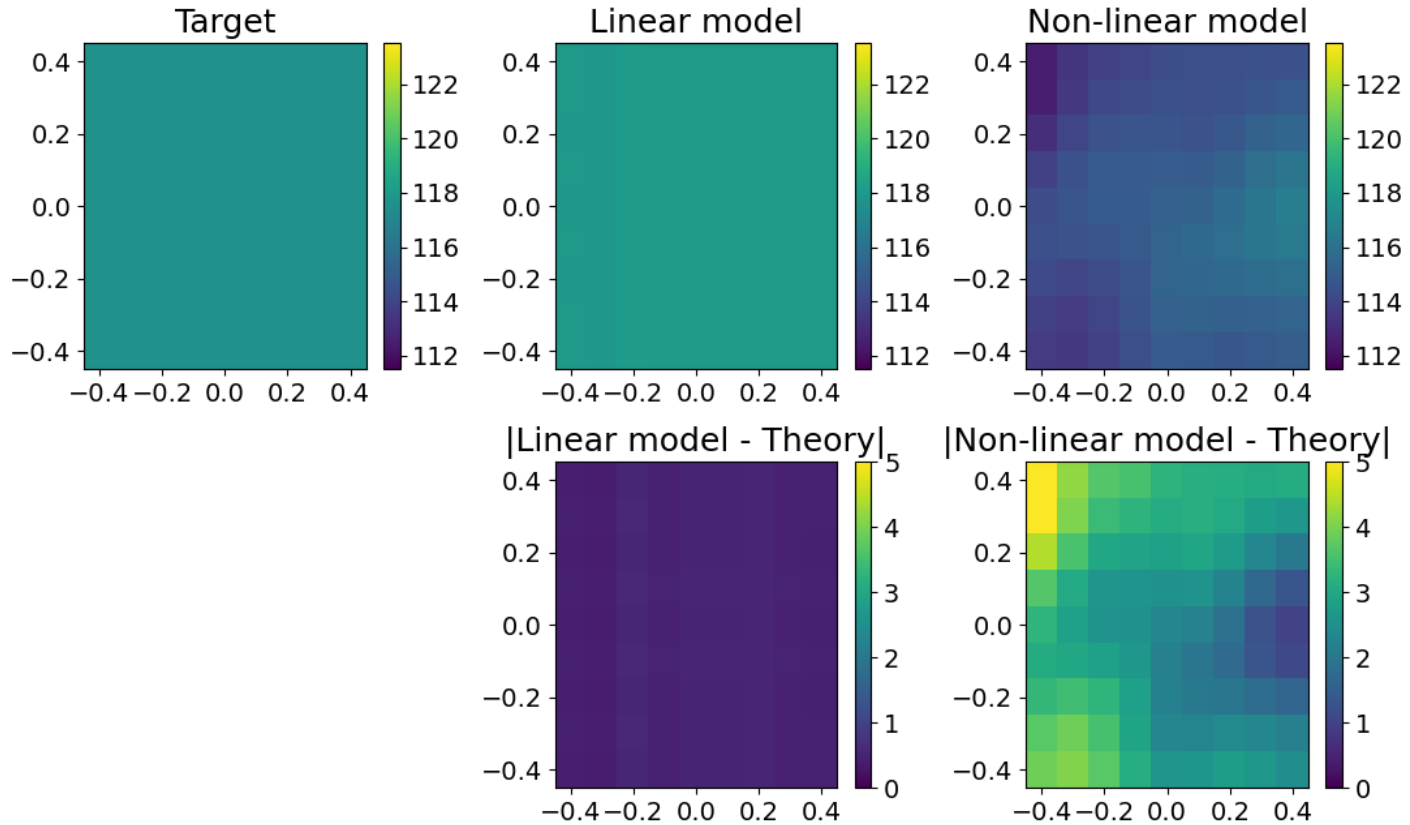
$1/Cms \nearrow$

$j\omega L_e \approx \searrow$

$j\omega L_2 \approx \searrow$

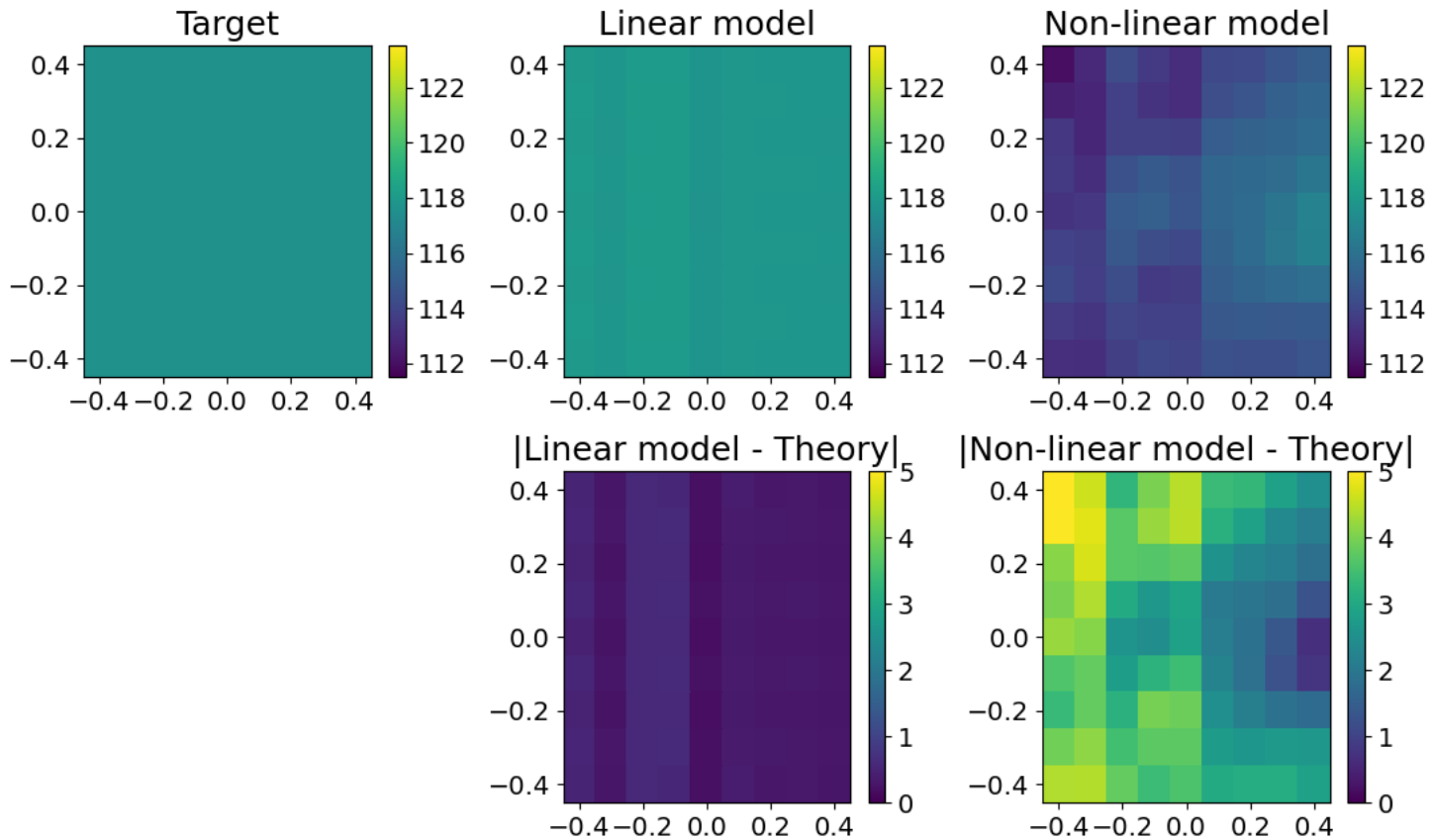
ONDE PLANE À 45° : NIVEAU DE PRESSION

Pressure level (dB) at 500 Hz



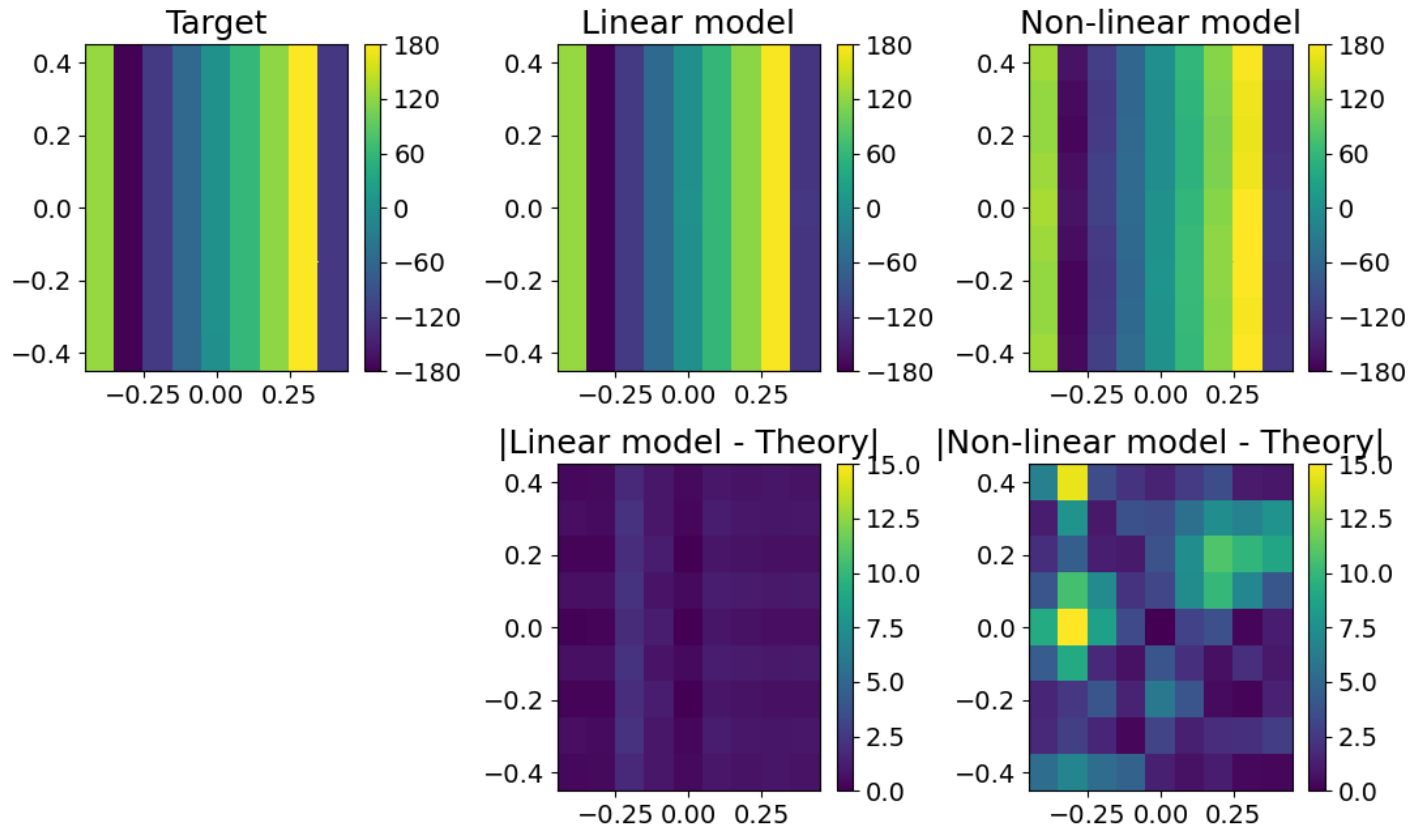
ONDE PLANE À 45° : NIVEAU DE PRESSION

Pressure level (dB) at 800 Hz



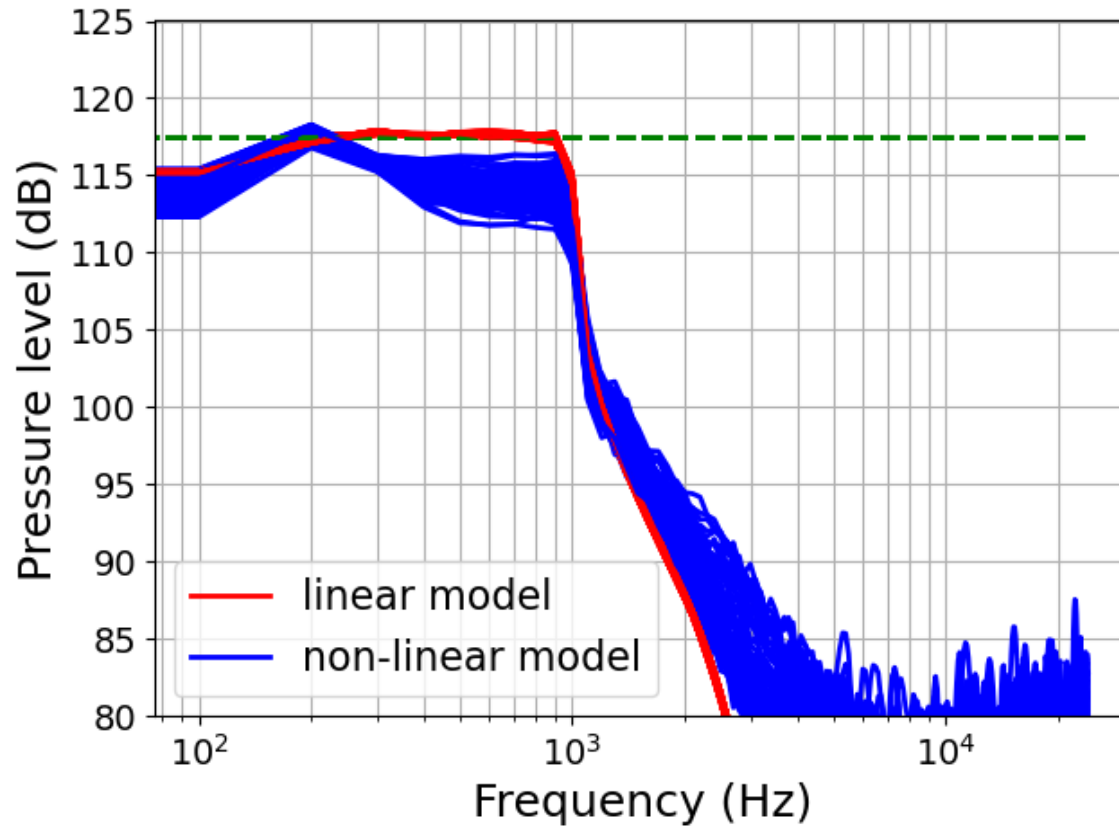
ONDE PLANE À 45° : PHASE DE PRESSION

Pressure phase (deg) at 800 Hz



ONDE PLANE À 45° : NIVEAU DE PRESSION

NIVEAU DE PRESSION SUR LA BANDE LARGE EN CHAQUE POINT D'OBSERVATION



BF :

BL ↘

1/Cms ↗

jωLe ≈ 0

jωL2 ≈ 0

HF :

BL ↘

1/Cms ↗

jωLe ≈ ↘

jωL2 ≈ ↘

CONCLUSION

CHAMP DIFFUS

- Peu d'effet sur la forme de la matrice CSD
- Niveau de pression ne peut pas être garanti

ONDE PLANE

- Erreur de niveau
- Erreur de phase
- Erreur augmente avec l'angle d'incidence et avec la fréquence

SUGGESTIONS / PERSPECTIVES :

- Faire attention à la perte de niveau généré (champ diffus)
- Adapter le système pour ne pas passer dans le régime non-linéaire des haut-parleurs (plus de sources, sources appropriées pour la plage de fréquences d'intérêt, ...)
- Régulariser les commandes du pilotage (biaisant le champ reproduit)
- Travailler par bandes d'octave (mesure plus longue)

RÉFÉRENCES

- “The experimental synthesis of random pressure fields: methodology” Teresa Bravo and Cédric Maury, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120, no. 5, November 2006
- “The experimental synthesis of random pressure fields: practical feasibility” Teresa Bravo and Cédric Maury, J. Acoust. Soc. Am. 120 no. 5, November 2006
- “The synthesis of a diffuse sound field with a near-field array of loudspeakers” T. Bravo, C. Maury, ICSV13 Vienna, Austria, July 2-6, 2006
- “Enhancing low frequency sound transmission measurements using a synthesis method” Teresa Bravo and Cédric Maury, J. Acoust. Soc. Am. 122 (2), August 2007
- « Measurement of the absorption coefficient of sound absorbing materials under a synthesized diffuse acoustic field » Olivier Robin, Alain Berry, Olivier Doutres and Nouredine Atalla, J. Acoust. Soc. Am. 136 (1), July 2014
- “Experimental simulation of turbulent boundary layer induced vibrations by using a synthetic array” M. Aucejo , L. Maxit , J.-L. Guyader, Journal of Sound and Vibration, Elsevier, 2012, 331 (16), pp.3824-3843.
- “NONLINEAR SYSTEM MODELING AND IDENTIFICATION OF LOUDSPEAKERS” Pascal Brunet , phd thesis Northeastern University Boston, Massachusetts, 2014
- “Active reduction of nonlinear loudspeaker distortion” Wolfgang j. Klippel, Germany
- “Loudspeaker nonlinearities – causes, parameters, symptoms” Wolfgang J. Klippel, Germany



CTTM

CENTRE DE TRANSFERT
DE TECHNOLOGIE DU MANS

LAUM

Laboratoire d'Acoustique
Le Mans Université • CNRS - UMR 6613

MERCI DE VOTRE
ATTENTION !



Projet ANR VIRTECH

VIRTualisation de moyens Expérimentaux en
vibro-aCoustique par synthÈse de champ de pression

VIRTECH