

# Analyse des propriétés numériques du modèle TLM pour la propagation du son en milieu extérieur

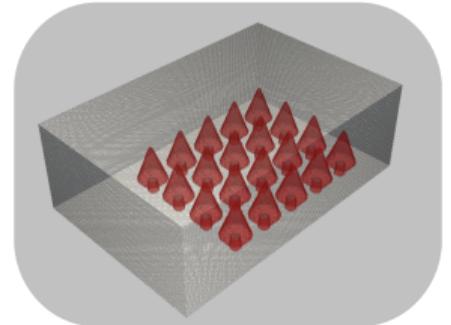
Quentin Goestchel, Gwenaël Guillaume, David Écotière, Benoit Gauvreau

Journées Techniques Acoustique et Vibrations - Lyon - 13 Mai 2022

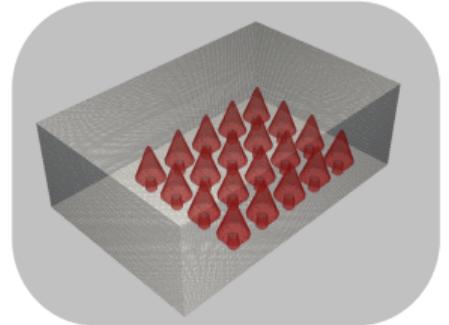
- Propagation acoustique en milieu boisé



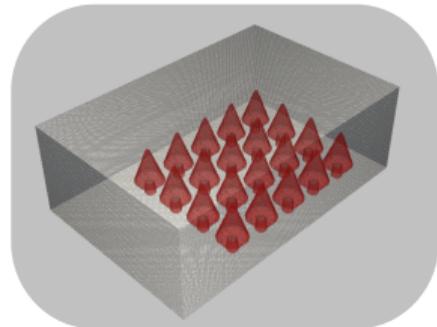
- Propagation acoustique en milieu boisé
  - Multi-échelles
  - Réflecteurs multiples
  - Conditions d'impédance



- Propagation acoustique en milieu boisé
  - Multi-échelles
  - Réflecteurs multiples
  - Conditions d'impédance
- Sources variées



- Propagation acoustique en milieu boisé
  - Multi-échelles
  - Réflecteurs multiples
  - Conditions d'impédance
- Sources variées



- Directive 2002/49/CE : protection des zones calmes

- Introduction
- Modèle *Transmission Line Matrix* (TLM) - milieu homogène
- Modèle TLM - milieu inhomogène
- Expérience numérique
- Perspectives

Modélisation 3D du champ acoustique autour d'un véhicule par méthode TLM : préliminaires

Guillaume Dutilleux  
LRPC de Strasbourg

Republique Française  
Centre d'Etats Techniques de l'Équipement de l'Éclair

Unités Technologiques et Avancées  
Château Ferrière  
Juin 2011

Coupling  
time domain acoustical and  
mesoscale meteorological models

GDR Visible - Bron

P. Aumond, B. Gauvreau, C. Lac, V. Masson, M. Berengier  
17<sup>th</sup> may 2011

LES INFORMATIQUES 2010 IUT LCP  
Laboratoire de Recherche en Acoustique  
UMR 5076 UMR 5076 - 10 av 11, juin 2010

LCPC  
Laboratoire Central  
de Ponts et Chaussées

Développement d'un modèle TLM pour la modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain

Gwenaël GUILLAUME  
Division ESAR, Section ARU

Directeur de thèse : Jérôme PICAUT (LCP)  
Co-directeur de thèse : Christophe AVRILLET (LAUM)  
Comité de suivi : Guillaume DUTILLEUX (LRPC Strasbourg)  
Isabelle SCHMICH (CSTB)

Guillaume Guillaume Page 1/25

PML Implementation for the  
TLM Propagation Model in acoustics

Pierre Chobeau<sup>1,2</sup>, D. Ecotière<sup>2</sup>, G. Dutilleux<sup>2</sup>, J. Picaut<sup>1</sup>

JTAV 2013 - Blois

23rd May 2013

<sup>1</sup>Metab: french institute of science and technology for transport, development and networks  
<sup>2</sup>LRS: regional labs for transport and networks

IFSTTAR

LES INFORMATIQUES 2010 IUT LCP  
Laboratoire de Recherche en Acoustique  
UMR 5076 UMR 5076 - 10 av 11, juin 2010

LCPC  
Laboratoire Central  
de Ponts et Chaussées

Projet QUIESS<sup>7</sup> :  
évaluation par TLM de la méthode  
d'essai des performances in situ  
d'écrans acoustiques (Adrienne)

David ECOTIERE  
Guillaume DUTILLEUX  
ERA 32, LRPC Strasbourg

David ECOTIERE Page 2/6

Simulations of multiple scattering by tree trunks using the  
TLM method

Pierre Chobeau<sup>a,b</sup>, J. Picaut<sup>a</sup>, D. Ecotière<sup>b</sup>, G. Dutilleux<sup>b</sup>.

<sup>a</sup>Metab/LAE (Laboratoire d'Acoustique Environnementale) - <sup>b</sup>Genma/ERA 32 Acoustique

CFA Poitiers - April 24, 2014

IFSTTAR

### *Transmission Line Matrix model (TLM)*

Introduite pour modéliser des champs magnétiques haute fréquence  
[Johns & Beurle, IEEE 1971].

- Méthode temporelle

### *Transmission Line Matrix model (TLM)*

Introduite pour modéliser des champs magnétiques haute fréquence  
[Johns & Beurle, IEEE 1971].

- Méthode temporelle
- Validée et/ou étudiée pour

## *Transmission Line Matrix model (TLM)*

Introduite pour modéliser des champs magnétiques haute fréquence [Johns & Beurle, IEEE 1971].

- Méthode temporelle
- Validée et/ou étudiée pour
  - l'acoustique des salles [G. Guillaume, PhD thesis 2009]
  - la propagation en milieu urbain [Guillaume *et al.*, JASA 2008]
  - la propagation dans des forêts de cylindres (BF) [ChobEAU *et al.*, JSV 2017]

## *Transmission Line Matrix model (TLM)*

Introduite pour modéliser des champs magnétiques haute fréquence  
[Johns & Beurle, IEEE 1971].

- Méthode temporelle
- Validée et/ou étudiée pour
  - l'acoustique des salles [G. Guillaume, PhD thesis 2009]
  - la propagation en milieu urbain [Guillaume *et al.*, JASA 2008]
  - la propagation dans des forêts de cylindres (BF) [ChobEAU *et al.*, JSV 2017]
- Python/OpenCL parallélise sur GPUs [Guillaume & Fortin, JBPS 2014]

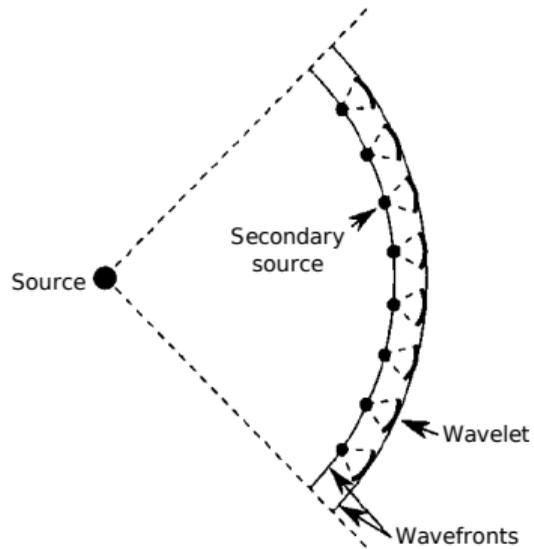
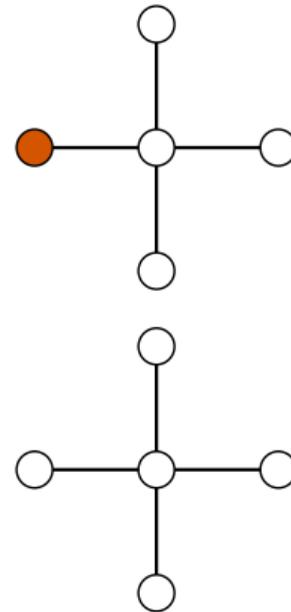


Illustration du principe de Huygens, [G. Guillaume, PhD thesis 2009].

+ détaillé : [Goestchel *et al.*, JSV 2022]



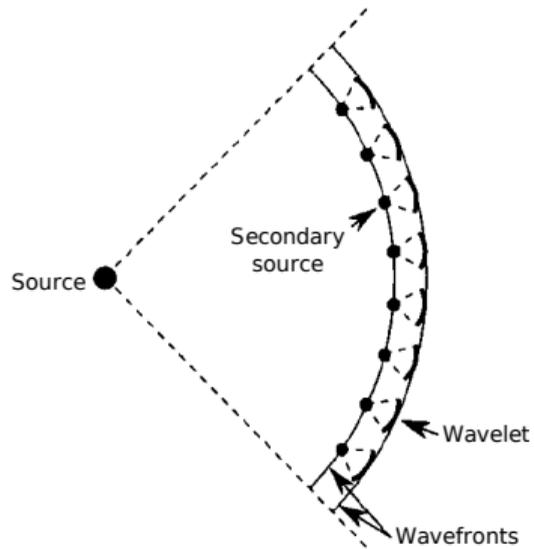
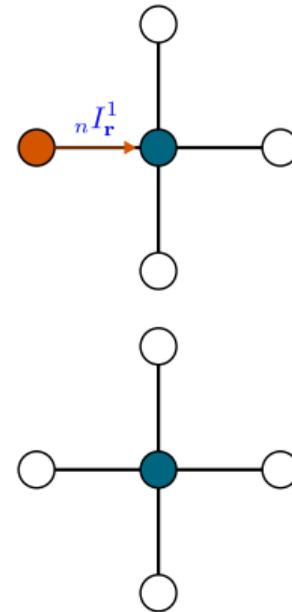


Illustration du principe de Huygens, [G. Guillaume, PhD thesis 2009].

+ détaillé : [Goestchel *et al.*, JSV 2022]



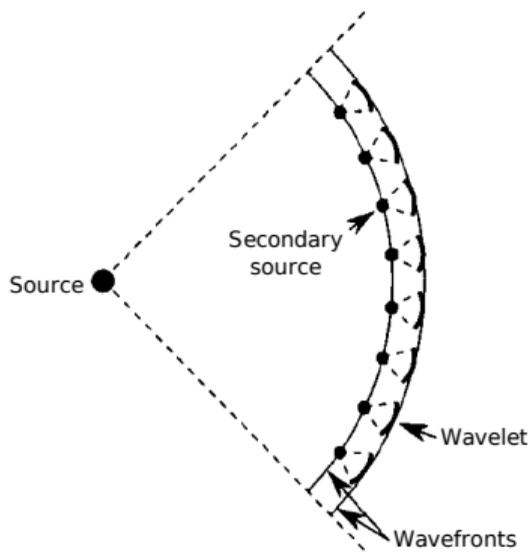
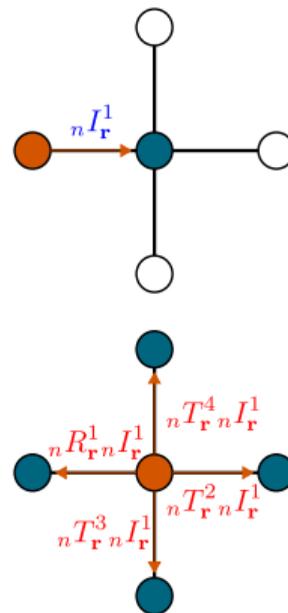


Illustration du principe de Huygens, [G. Guillaume, PhD thesis 2009].

+ détaillé : [Goestchel *et al.*, JSV 2022]



## Cas homogène

$${}_{n+1}P_r + {}_{n-1}P_r = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d \left[ {}_n P_{(j_1+\delta_{m1}, \dots, j_d+\delta_{md})} + {}_n P_{(j_1-\delta_{m1}, \dots, j_d-\delta_{md})} \right], \quad (1)$$

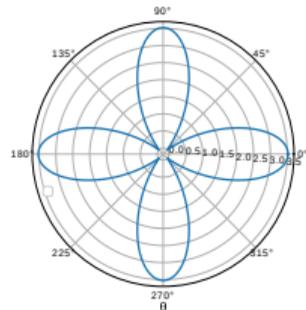
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_{\text{TLM}}^2 \nabla^2 p = \mathcal{O}(\Delta t^2) + \mathcal{O}\left(\frac{\Delta \ell^4}{\Delta t^2}\right), \quad \text{with } c_{\text{TLM}} = \frac{\Delta \ell}{\sqrt{d} \Delta t}. \quad (2)$$

## Dispersion axiale

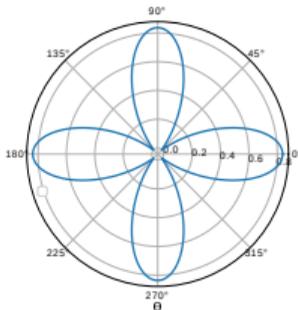
$$\cos(\omega \Delta t) = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d \cos(k_{x_m} \Delta \ell) \quad \forall \Delta t, \quad \forall \Delta \ell. \quad (3)$$

## Équation de dispersion 2D

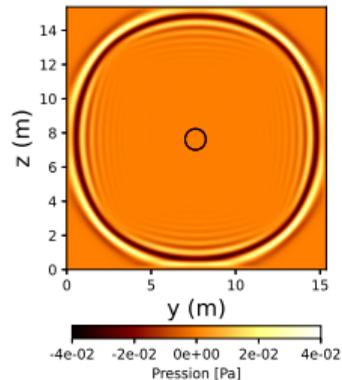
$$c_{ph} = \frac{1}{k\Delta t} \arccos \left[ \frac{1}{2} (\cos(k \cos(\theta)\Delta\ell) + \cos(k \sin(\theta)\Delta\ell)) \right]. \quad (4)$$

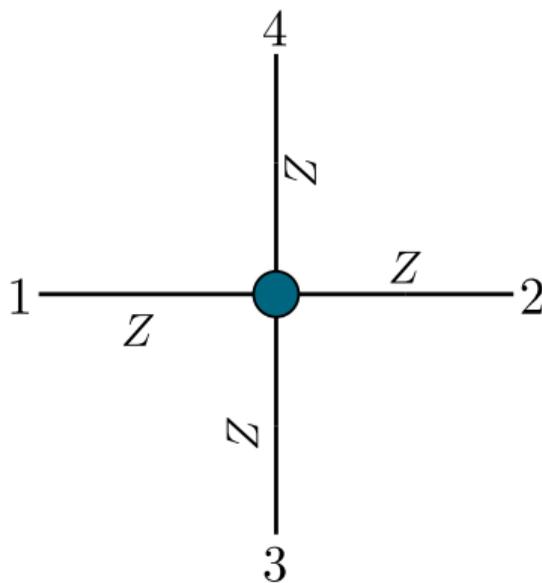


$$\Delta\ell = \lambda/5$$

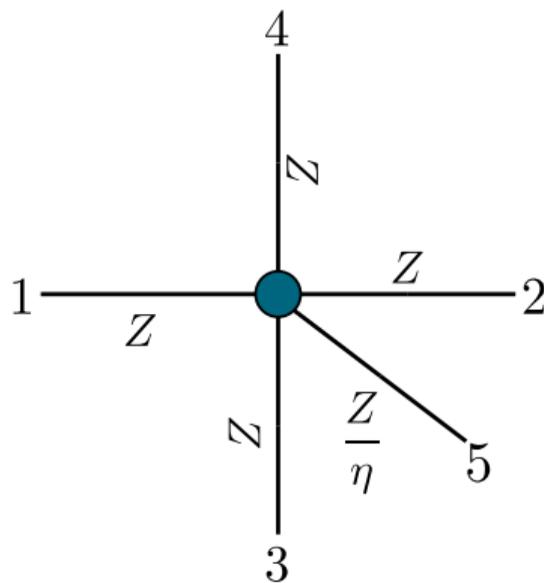


$$\Delta\ell = \lambda/10$$

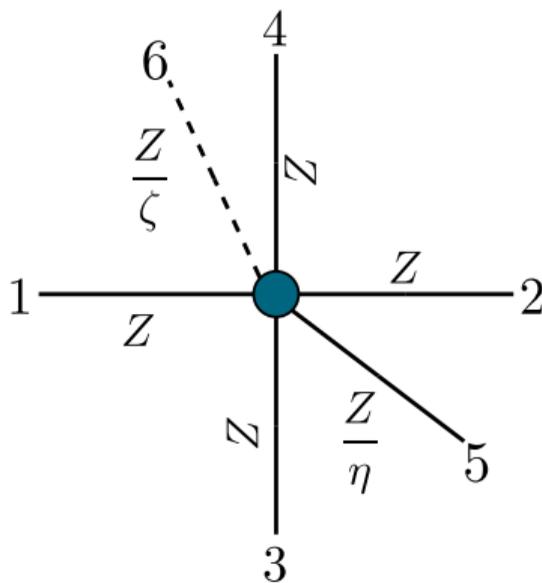




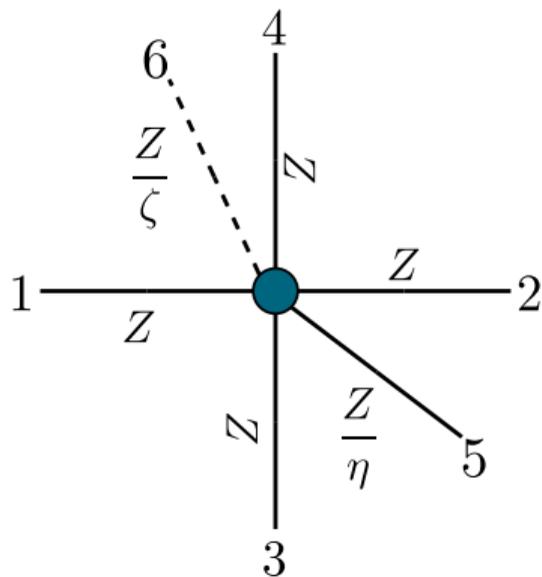
Environnement 2D autour d'un nœud



Environnement 2D autour d'un nœud



Environnement 2D autour d'un nœud



Lien avec l'équation des ondes

$$\frac{1}{c_{\text{TLM}}^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p + \frac{\zeta^{(j,l)}}{2\Delta\ell^2} \left( 2\Delta t \frac{\partial p}{\partial t} \right) = \mathcal{O} \left( \frac{\Delta t^4}{\Delta\ell^2} \right) + \mathcal{O} \left( \frac{\Delta t^3}{\Delta\ell^2} \right) + \mathcal{O} \left( \Delta\ell^2 \right) \quad (5)$$

## Stabilité

$$c_{\text{TLM}}(\mathbf{x}_r) = \sqrt{\frac{2}{\eta_r + 2d} \frac{\Delta \ell}{\Delta t}} \quad (6)$$

$$\eta \geq 0$$

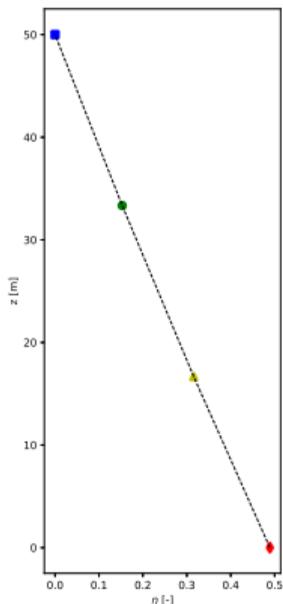
## Dispersion

$$\|\underline{k}\| \approx k_{0\text{TLM}} + i\alpha_{\text{TLM}} + \mathcal{O}(\zeta^2) \quad (7)$$

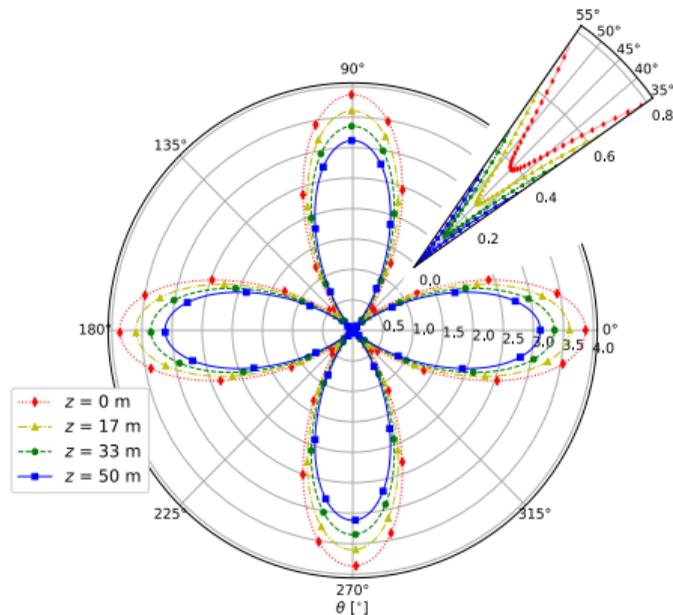
$$k_{0\text{TLM}} = \frac{\omega}{c_{\text{TLM}}} \text{ and}$$

$$\alpha_{\text{TLM}} = \frac{\zeta}{\sqrt{2(\eta + 2d)\Delta \ell}}$$

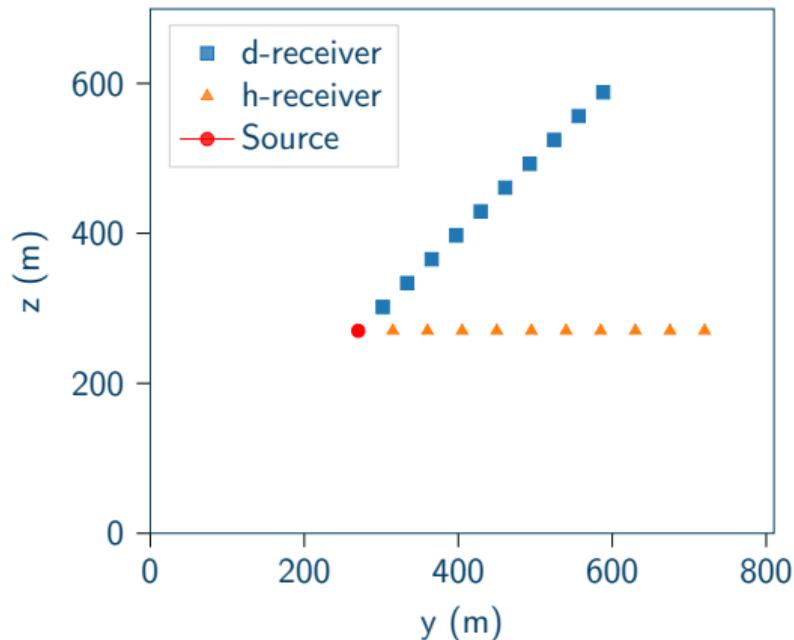
Cas downward :  $n$  en fct de  $z$



Dispersion pour  $\Delta \ell = \lambda/5$



Calculation domain

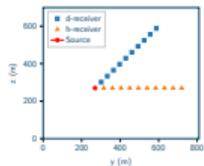


Configuration pour  $f_{\max} = 2400$  Hz,

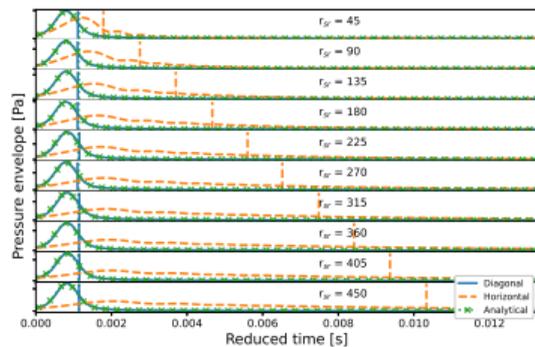
$\Delta \ell = \lambda/10$ ,  $r_{\max} = 450$  m :

$\Delta \ell$ [m]	$\Delta t$ [s]	$\Delta \ell_{\text{mic}}$ [m]	$N_y \times N_z$ [-]
0.014	2.95E-05	45	56476*48746

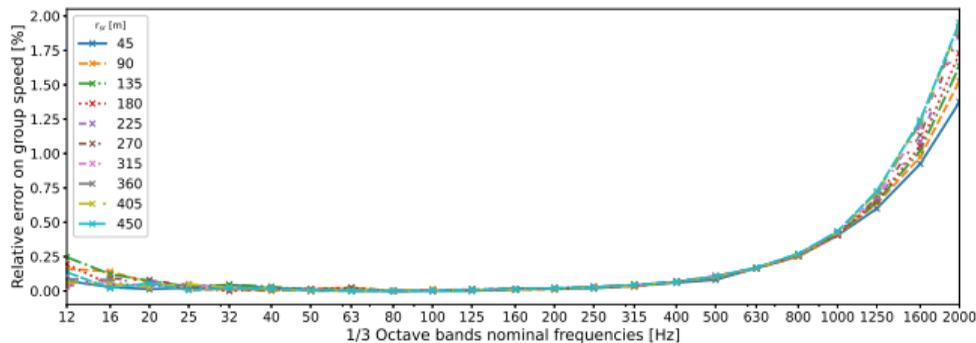
Memory [Gb] (float32 numpy array)	$t_{\text{sim}}$ [s]	$r_{\max}/\lambda_{\min}$ [-]
10.22	11143	3176



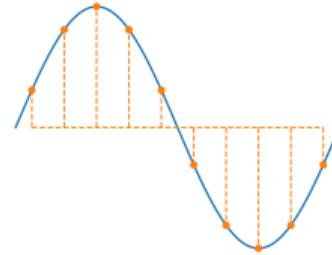
## Effet de la distance sur l'enveloppe



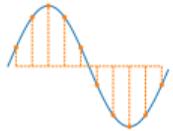
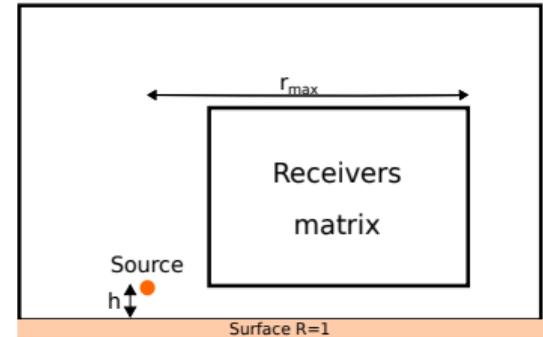
## Erreur sur la vitesse de groupe



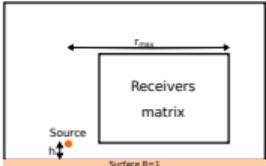
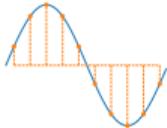
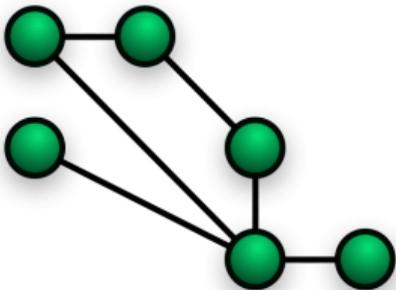
- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide



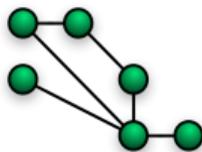
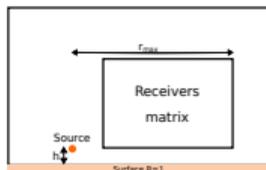
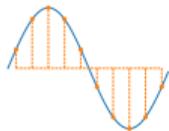
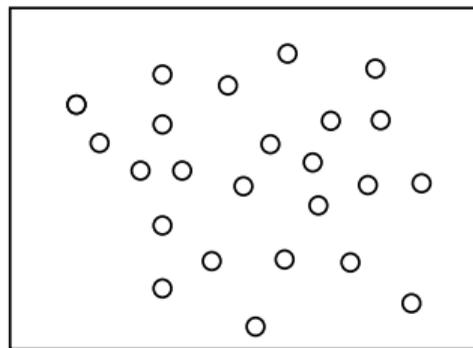
- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide
- Impact de la dispersion en présence d'un sol



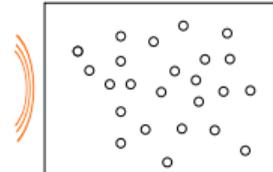
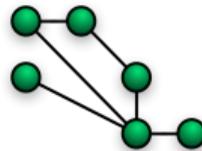
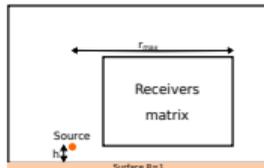
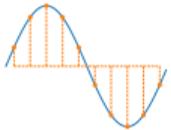
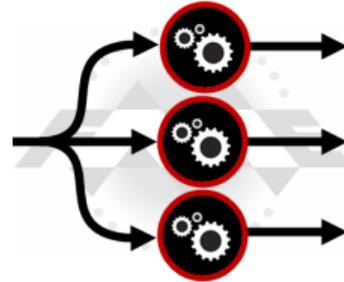
- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide
- Impact de la dispersion en présence d'un sol
- Augmentation nppw // ordre du schéma ?



- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide
- Impact de la dispersion en présence d'un sol
- Augmentation nppw // ordre du schéma ?
- Théorie milieux complexes



- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide
- Impact de la dispersion en présence d'un sol
- Augmentation nppw // ordre du schéma ?
- Théorie milieux complexes
- Parallélisation MPI ?



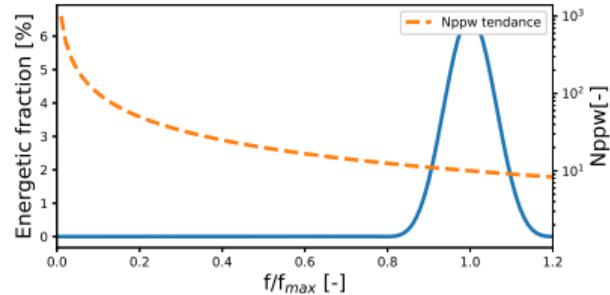
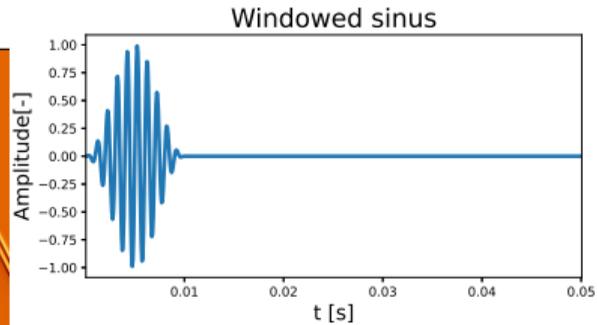
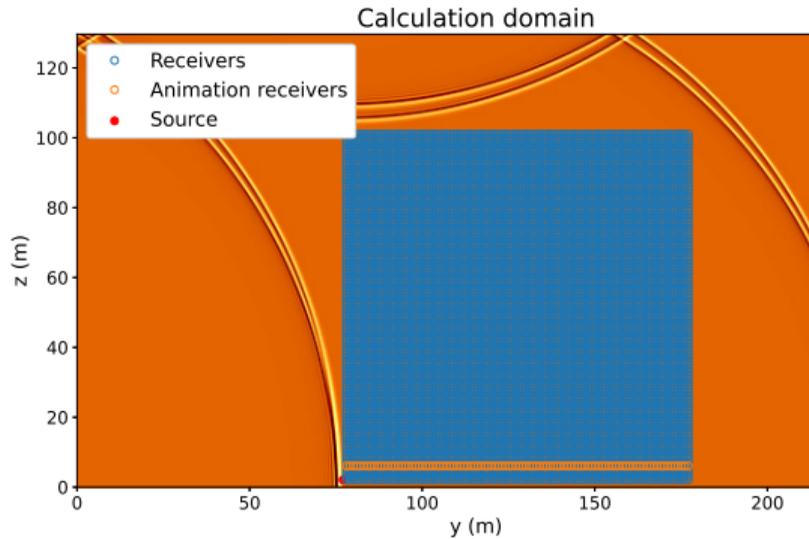
- Contacts :
  - [quentin.goestchel@cerema.fr](mailto:quentin.goestchel@cerema.fr)
  - [gwenael.guillaume@cerema.fr](mailto:gwenael.guillaume@cerema.fr)
  - [david.ecotiere@cerema.fr](mailto:david.ecotiere@cerema.fr)
  - [benoit.gauvreau@univ-eiffel.fr](mailto:benoit.gauvreau@univ-eiffel.fr)
- Liens :
  - <http://www.umrae.fr/>



L'Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale (UMRAE) est un laboratoire de recherche commun entre l'Université Gustave Eiffel et le Cerema.



# Annexe A - "setup" sol réfléchissant



Carte d'erreur :  $f_{\max} = 2000$  Hz,  $r_{\max} = 500$  m et  $h_{\text{src}} = 2$  m

