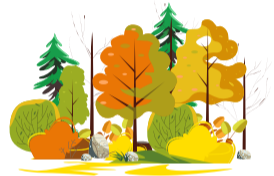


Analyse des propriétés numériques du modèle TLM pour la propagation du son en milieu extérieur

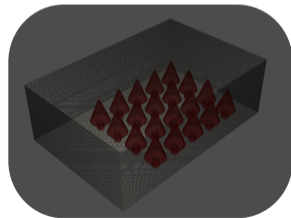
Quentin Goestchel, Gwenaël Guillaume, David Ecotièrre, Benoit Gauvreau

16ème Congrès Français d'Acoustique - Marseille 22 avril 2022

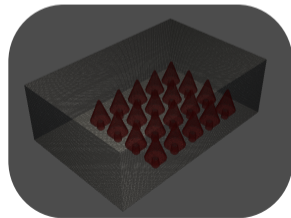
- Propagation acoustique en milieu boisé



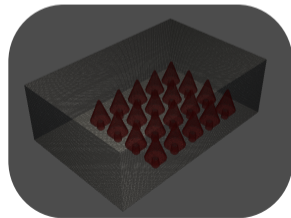
- Propagation acoustique en milieu boisé
 - Multi-échelles
 - Réflecteurs multiples
 - Conditions d'impédance



- 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/EC] : protection des zones calmes



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

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]

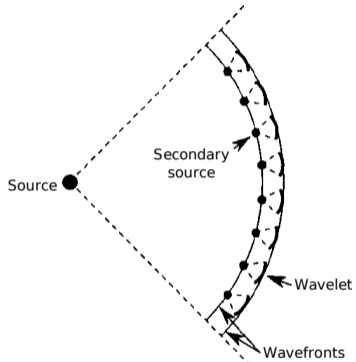
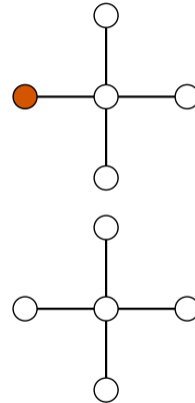


Illustration du principe de Huygens, [G. Guillaume, PhD thesis 2009].

+ détaillé : [Goestchel *et al.*, JSV 2022] (en cours de révision mineure)



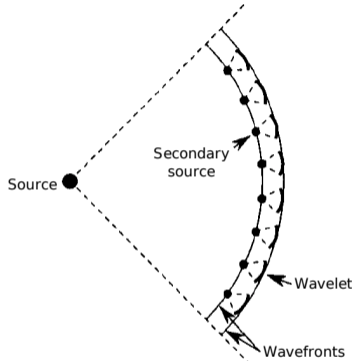
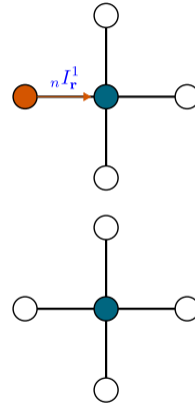


Illustration du principe de Huygens, [G. Guillaume, PhD thesis 2009].

+ détaillé : [Goestchel *et al.*, JSV 2022] (en cours de révision mineure)



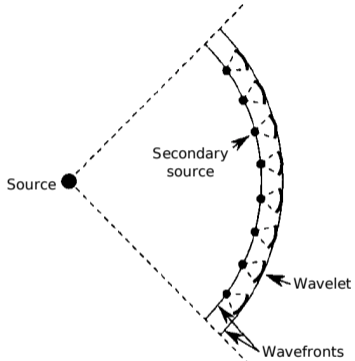
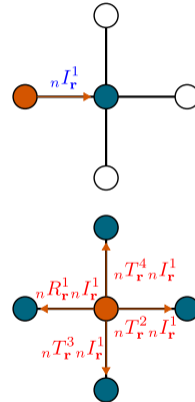


Illustration du principe de Huygens, [G. Guillaume, PhD thesis 2009].

+ détaillé : [Goestchel *et al.*, JSV 2022] (en cours de révision mineure)



Cas homogène

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

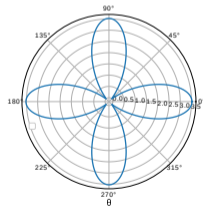
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_{\text{TLM}}^2 \nabla^2 p = \mathcal{O}(\Delta t^2) + \mathcal{O}\left(\frac{\Delta \ell^4}{\Delta t^2}\right), \quad \text{with } c_{\text{TLM}} = \frac{\Delta \ell}{\sqrt{d} \Delta t}. \quad (2)$$

Dispersion axiale

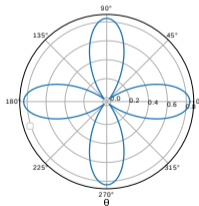
$$\cos(\omega \Delta t) = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d \cos(k_{x_m} \Delta \ell) \quad \forall \Delta t, \quad \forall \Delta \ell. \quad (3)$$

Équation de dispersion 2D

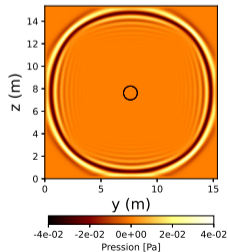
$$c_{ph} = \frac{1}{k\Delta t} \arccos \left[\frac{1}{2} (\cos(k \cos(\theta)\Delta\ell) + \cos(k \sin(\theta)\Delta\ell)) \right]. \quad (4)$$

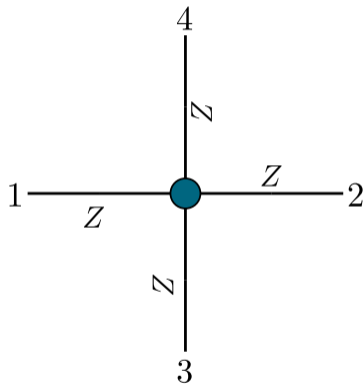


$$\Delta\ell = \lambda/5$$

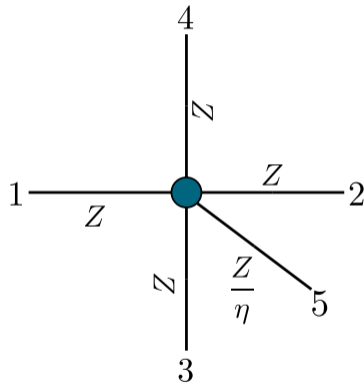


$$\Delta\ell = \lambda/10$$

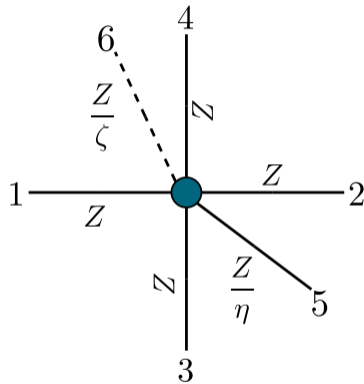




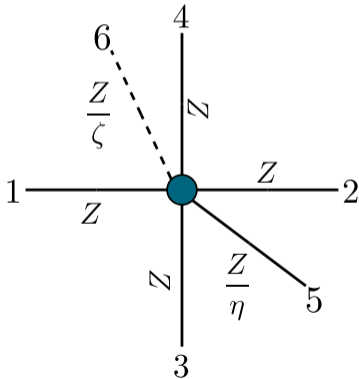
Environnement 2D autour d'un nœud



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

$$c_{\text{TLM}}(\mathbf{x}_r) = \sqrt{\frac{2}{\eta_r + 2d} \frac{\Delta \ell}{\Delta t}} \quad (6)$$
$$\eta \geq 0$$

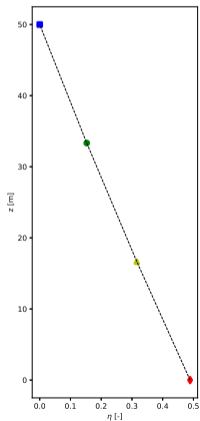
Dispersion

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

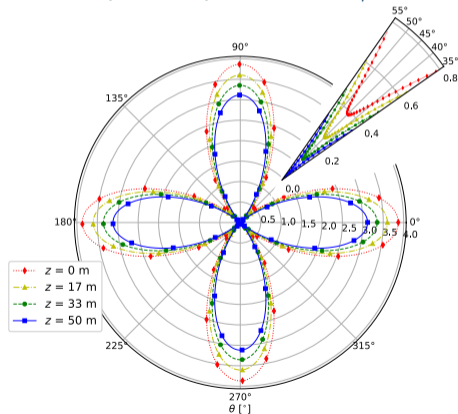
$$k_{0\text{TLM}} = \frac{\omega}{c_{\text{TLM}}} \text{ and}$$

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

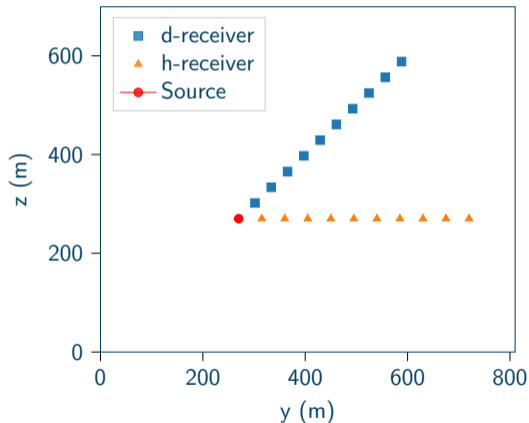
Cas downward : η en fct de z



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



Calculation domain

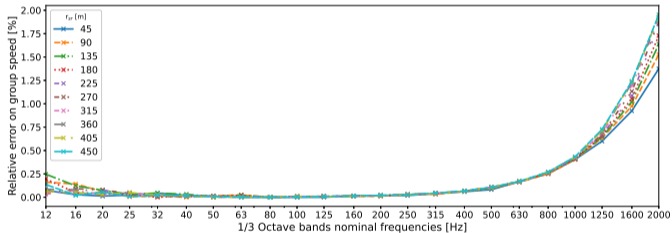
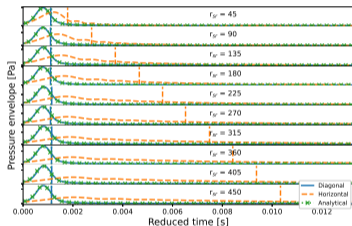


Configuration pour $f_{\max} = 2400$ Hz,
 $\Delta \ell = \lambda/10$, $r_{\max} = 450$ m :

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

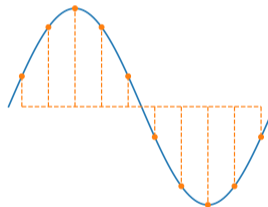
Memory [Gb] (float32 numpy array)	t_{sim} [s]	r_{\max}/λ_{\min} [-]
10.22	11143	3176

Effet de la distance sur l'enveloppe

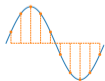
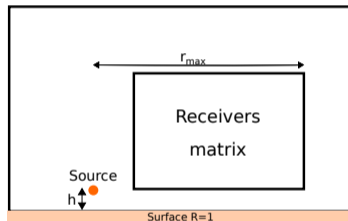


Erreur sur la vitesse de groupe, $\Delta\ell = \lambda/10$
 $f_{\max} = 2400$ Hz.

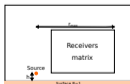
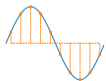
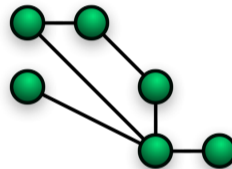
- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide



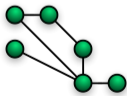
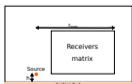
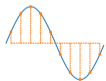
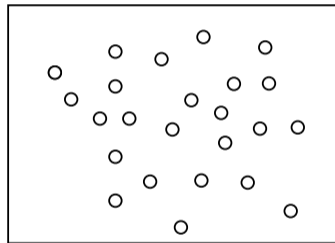
- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide
- Impact de la dispersion en présence d'un sol



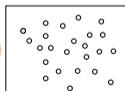
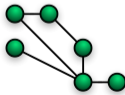
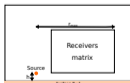
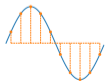
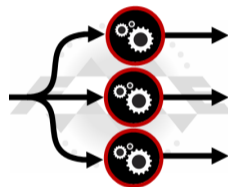
- Critère de 10 points par longueur d'onde non valide
- Impact de la dispersion en présence d'un sol
- Augmentation nppw // ordre du schéma ?



- 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 ?

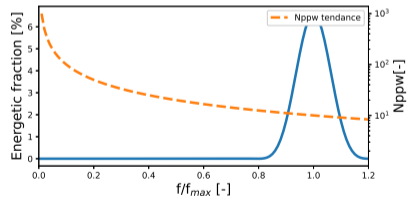
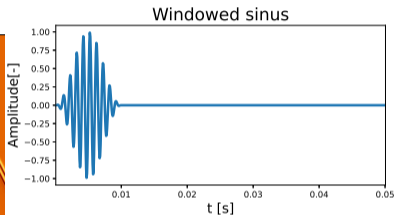
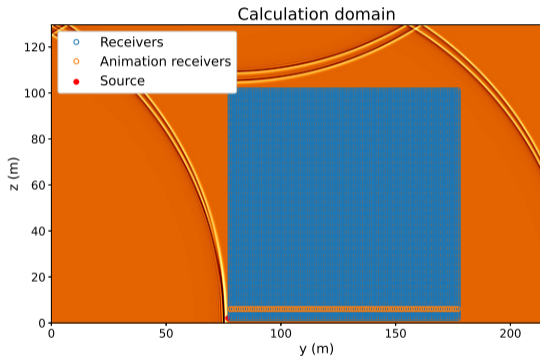


- Contacts :
 - quentin.goestchel@cerema.fr
 - gwenael.guillaume@cerema.fr
 - david.ecotiere@cerema.fr
 - benoit.gauvreau@univ-eiffel.fr
- Liens :
 - <http://www.umrae.fr/>



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 reflechissant



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

