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

Gwenaël GUILLAUME

Division ESAR, Section ARU

Directeur de thèse : Judicaël PICAUT (LCPC)
Co-directeur de thèse : Christophe AYRAULT (LAUM)
Comité de suivi : Guillaume DUTILLEUX (LRPC Strasbourg)
Isabelle SCHMICH (CSTB)

Limitations des logiciels de prévision acoustique

- basés sur des modèles énergétiques ou des notions géométriques ;
- restreints aux hautes fréquences ;
- applications en milieu ouvert (*i.e.* seulement quelques obstacles) ;
- pas de dépendance temporelle ;

⇒ Ces logiciels ne sont pas réellement bien adaptés à la prévision acoustique en milieu urbain.

Méthodes temporelles (*e.g.* FDTD[a], TLM[b])

[a] *Finite-Difference Time-Domain method*
[b] *Transmission Line Modeling*

- basses et moyennes fréquences ;
- modélisation des phénomènes d'interférences ;
- paramètres dépendants du temps et de la fréquence ;
- description à la fois temporelle et fréquentielle.

Limitations des logiciels de prévision acoustique

- basés sur des modèles énergétiques ou des notions géométriques ;
- restreints aux hautes fréquences ;
- applications en milieu ouvert (*i.e.* seulement quelques obstacles) ;
- pas de dépendance temporelle ;

⇒ Ces logiciels ne sont pas réellement bien adaptés à la prévision acoustique en milieu urbain.

Méthodes temporelles (*e.g.* FDTD[a], TLM[b])

[a] *Finite-Difference Time-Domain method*
[b] *Transmission Line Modeling*

- basses et moyennes fréquences ;
- modélisation des phénomènes d'interférences ;
- paramètres dépendants du temps et de la fréquence ;
- description à la fois temporelle et fréquentielle.

Objectif de la thèse : modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain

- développement d'un modèle numérique original et générique

⇒ utilisation de la méthode TLM[a].

[a] *Transmission Line Modeling*

État de l'art

- propagation en fluide homogène et non-dissipatif : implicite ;
- propagation en fluide dissipatif : absorption atmosphérique[a] ;
- propagation en fluide inhomogène : effets météorologiques[b] ;
- conditions aux frontières (parois) : coefficient de réflexion en pression ;
- conditions aux frontières (sol) : condition d'impédance[a] ;
- conditions aux limites du domaine de calcul (ciel) : développement de TAYLOR du champ de pression[c].

[a] J. HOFMANN et K. HEUTSCHI, *Applied Acoustics* (2007)
[b] G. DUTILLEUX, *Wind Turbine Noise* (2007)
[c] S. EL-MASRI *et coll.*, *Proc. of the Int. Conf. on Speech and Language Processing* (1996)

Objectif de la thèse : modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain

- développement d'un modèle numérique original et générique

⇒ utilisation de la méthode TLM[a].

[a] *Transmission Line Modeling*

État de l'art

- propagation en fluide homogène et non-dissipatif : implicite ;
- propagation en fluide dissipatif : absorption atmosphérique[a] ;
- propagation en fluide inhomogène : effets météorologiques[b] ;
- conditions aux frontières (parois) : coefficient de réflexion en pression ;
- conditions aux frontières (sol) : condition d'impédance[a] ;
- conditions aux limites du domaine de calcul (ciel) : développement de TAYLOR du champ de pression[c].

[a] J. HOFMANN et K. HEUTSCHI, *Applied Acoustics* (2007)
[b] G. DUTILLEUX, *Wind Turbine Noise* (2007)
[c] S. EL-MASRI *et coll.*, *Proc. of the Int. Conf. on Speech and Language Processing* (1996)

Contributions

- proposition d'une formulation générale générique 2D/3D ;
- conditions aux frontières (sol et façades) :

  $\Rightarrow$ nouvelle formulation d'une condition d'impédance ;
- conditions aux limites du domaine de calcul :

  $\Rightarrow$ développement de couches absorbantes adaptées.

1 Méthode TLM

- Principe de la méthode TLM
- Propagation en milieu homogène et non-dissipatif
- Propagation en milieu inhomogène et dissipatif
- Analogie avec l'équation des ondes

2 Modélisation des frontières

- Condition d'impédance complexe
- Condition aux frontières absorbantes

3 Conclusion

- Application
- Perspectives

1. Méthode TLM
   - Principe de la méthode TLM
   - Propagation en milieu homogène et non-dissipatif
   - Propagation en milieu inhomogène et dissipatif
   - Analogie avec l'équation des ondes

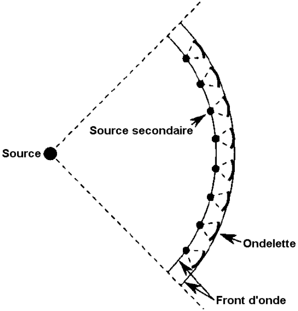
2. Modélisation des frontières
   - Condition d'impédance complexe
   - Condition aux frontières absorbantes

3. Conclusion
   - Application
   - Perspectives

MÉTHODE TLM
principe

Principe de HUYGENS (1690)

Un front d'onde peut être décomposé en un ensemble de sources secondaires émettant des ondelettes sphériques de fréquence, d'amplitude et de phase identiques.



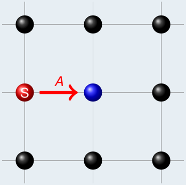
Adaptation numérique en électromagnétisme[a]

[a] P. JOHNS et R. BEURLE, *Proceedings IEEE* (1971)

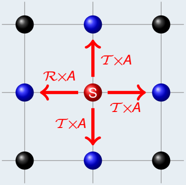
- les sources secondaires sont assimilées à des nœuds ;
- la «diffusion» du champ entre nœuds est réalisée par l'intermédiaire de lignes de transmission.

Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement

Cas simple en 2D



Impulsion incidente



Impulsions diffusées par le nœud

Coefficients de réflexion et de transmission nodaux :

$$\mathcal{R} = \frac{Z_T - Z_L}{Z_T + Z_L}, \quad \mathcal{R} < 0$$

$$\mathcal{T} = 1 + \mathcal{R} = \frac{2Z_T}{Z_T + Z_L}$$

Z_T : impédance de la terminaison
Z_L : impédance de la ligne de transmission incidente

$\left(\text{ici, } Z_L = Z_0 \text{ et } Z_T = Z_0/3, \text{ donc } \mathcal{R} = -\frac{1}{2} \text{ et } \mathcal{T} = \frac{1}{2}\right)$

Cas général en 2D

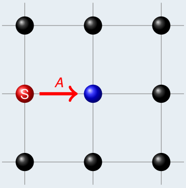
- **Relation matricielle :** $_t\mathbf{S} = \mathbf{D}\ _t\mathbf{I}$,

où $_t\mathbf{I} = \left[{_tI^1}, {_tI^2}, {_tI^3}, {_tI^4}\right]^T$,

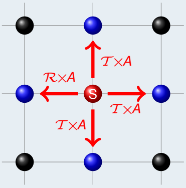
$_t\mathbf{S} = \left[{_tS^1}, {_tS^2}, {_tS^3}, {_tS^4}\right]^T$,

et $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathcal{R} & \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{T} \\ \mathcal{T} & \mathcal{R} & \mathcal{T} & \mathcal{T} \\ \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{R} & \mathcal{T} \\ \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{R} \end{bmatrix}$.

Cas simple en 2D



Impulsion incidente



Impulsions diffusées par le nœud

Coefficients de réflexion et de transmission nodaux :

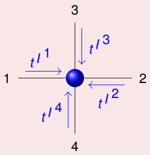
$$\mathcal{R} = \frac{Z_T - Z_L}{Z_T + Z_L}, \quad \mathcal{R} < 0$$

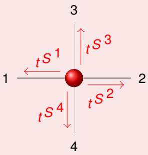
$$\mathcal{T} = 1 + \mathcal{R} = \frac{2Z_T}{Z_T + Z_L}$$

Z_T : impédance de la terminaison
Z_L : impédance de la ligne de transmission incidente

$\left(\text{ici, } Z_L = Z_0 \text{ et } Z_T = Z_0/3, \text{ donc } \mathcal{R} = -\frac{1}{2} \text{ et } \mathcal{T} = \frac{1}{2}\right)$

Cas général en 2D





- **Relation matricielle : $_t\mathbf{S} = \mathbf{D}\ _t\mathbf{I}$,**

où $_t\mathbf{I} = \left[{_tI^1}, {_tI^2}, {_tI^3}, {_tI^4}\right]^T$,

$_t\mathbf{S} = \left[{_tS^1}, {_tS^2}, {_tS^3}, {_tS^4}\right]^T$,

et $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathcal{R} & \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{T} \\ \mathcal{T} & \mathcal{R} & \mathcal{T} & \mathcal{T} \\ \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{R} & \mathcal{T} \\ \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{T} & \mathcal{R} \end{bmatrix}.$

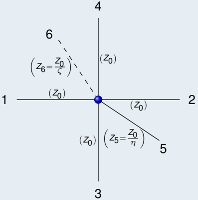
Modélisation en milieu inhomogène et dissipatif

Relation matricielle : $\quad {}_t\mathbf{S}_{(i,j)} = {}_t\mathbf{D}_{(i,j)}\ {}_t\mathbf{I}_{(i,j)},$

où $\quad {}_t\mathbf{I}_{(i,j)} = \left[{}_tI^1\,;\,{}_tI^2\,;\,{}_tI^3\,;\,{}_tI^4\,;\,{}_tI^5\right]^{\mathsf{T}},$

$${}_t\mathbf{S}_{(i,j)} = \left[{}_tS^1\,;\,{}_tS^2\,;\,{}_tS^3\,;\,{}_tS^4\,;\,{}_tS^5\right]^{\mathsf{T}},$$

et $\quad {}_t\mathbf{D}_{(i,j)} = \dfrac{2}{{}_t\eta_{(i,j)} + {}_t\zeta_{(i,j)} + 4}\ {}_t\begin{bmatrix} a & 1 & 1 & 1 & \eta \\ 1 & a & 1 & 1 & \eta \\ 1 & 1 & a & 1 & \eta \\ 1 & 1 & 1 & a & \eta \\ 1 & 1 & 1 & 1 & b \end{bmatrix}_{(i,j)},$



avec $\quad {}_ta_{(i,j)} = -\left(\dfrac{{}_t\eta_{(i,j)}}{2} + \dfrac{{}_t\zeta_{(i,j)}}{2} + 1\right)$ et $\quad {}_tb_{(i,j)} = \dfrac{{}_t\eta_{(i,j)}}{2} - \left(\dfrac{{}_t\zeta_{(i,j)}}{2} + 2\right).$

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

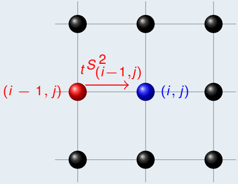
$$_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)}$$



Définition de la pression nodale

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

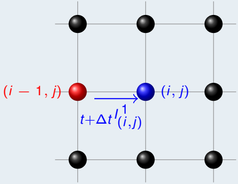
$$_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)}$$



Définition de la pression nodale

Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

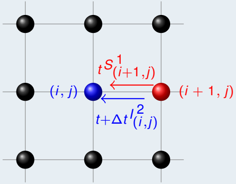
$$_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)}$$



Définition de la pression nodale

Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

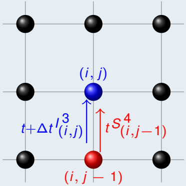
$$_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)}$$



Définition de la pression nodale

Réseau Scientifique et Technique de l'Equipement

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

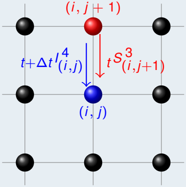
$$ {}_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)} $$

$$ {}_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)} $$

$$ {}_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)} $$

$$ {}_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)} $$

$$ {}_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)} $$



Définition de la pression nodale

$$ {}_t p_{(i,j)} = \frac{2}{{}_t\eta_{(i,j)} + {}_t\zeta_{(i,j)} + 4}\left(\sum_{n=1}^{4} {}_t I^{n}_{(i,j)} + {}_t\eta_{(i,j)}\, {}_t I^{5}_{(i,j)}\right) \cdot $$

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

$$_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)}$$

Définition de la pression nodale

$$_{t}P_{(i,j)} = \frac{2}{_{t}\eta_{(i,j)} + {}_{t}\zeta_{(i,j)} + 4}\left(\sum_{n=1}^{4} {}_{t}I^{n}_{(i,j)} + {}_{t}\eta_{(i,j)}\, {}_{t}I^{5}_{(i,j)}\right).$$

Diffusion dans le réseau de lignes de transmission

Lois de connexion entre nœuds :

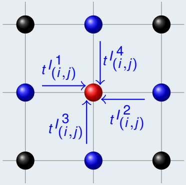
$$_{t+\Delta t}I^{1}_{(i,j)} = {}_{t}S^{2}_{(i-1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{2}_{(i,j)} = {}_{t}S^{1}_{(i+1,j)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{3}_{(i,j)} = {}_{t}S^{4}_{(i,j-1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{4}_{(i,j)} = {}_{t}S^{3}_{(i,j+1)}$$

$$_{t+\Delta t}I^{5}_{(i,j)} = {}_{t}S^{5}_{(i,j)}$$



Définition de la pression nodale

$$_{t}p_{(i,j)} = \frac{2}{_{t}\eta_{(i,j)} + {}_{t}\zeta_{(i,j)} + 4}\left(\sum_{n=1}^{4} {}_{t}I^{n}_{(i,j)} + {}_{t}\eta_{(i,j)}\ {}_{t}I^{5}_{(i,j)}\right).$$

Analogie avec l'équation des ondes

- Combinaison de la relation matricielle, des lois de connexion et de la définition de la pression nodale :

$$\frac{\eta_{(i,j)}+4}{2}\frac{\Delta t^2}{\Delta l^2}\overbrace{\frac{{}_{t+\Delta t}p_{(i,j)} - 2\,{}_{t}p_{(i,j)} + {}_{t-\Delta t}p_{(i,j)}}{\Delta t^2}}^{\partial^2_{tt}p_{(i,j)}} + \zeta_{(i,j)}\frac{\Delta t}{\Delta l^2}\overbrace{\frac{{}_{t+\Delta t}p_{(i,j)} - {}_{t-\Delta t}p_{(i,j)}}{2\,\Delta t}}^{\partial_{t}p_{(i,j)}} = \underbrace{\frac{{}_{t}p_{(i+1,j)} - 2\,{}_{t}p_{(i,j)} + {}_{t}p_{(i-1,j)}}{\Delta l^2}}_{\partial^2_{xx}p_{(i,j)}} + \underbrace{\frac{{}_{t}p_{(i,j+1)} - 2\,{}_{t}p_{(i,j)} + {}_{t}p_{(i,j-1)}}{\Delta l^2}}_{\partial^2_{yy}p_{(i,j)}}.$$

- Équation des ondes en milieu inhomogène et dissipatif :

$$\left[\Delta + \left(\frac{\omega^2}{c^2_{\mathrm{TLM}}} - j\frac{\omega\;{}_{t}\zeta_{(i,j)}}{c_0\,\Delta l}\right)\right]{}_{t}p_{(i,j)} = 0,$$

avec $c_{\mathrm{TLM}} = \sqrt{\frac{2}{{}_{t}\eta_{(i,j)}+4}}\,c_0.$

1. Méthode TLM
   - Principe de la méthode TLM
   - Propagation en milieu homogène et non-dissipatif
   - Propagation en milieu inhomogène et dissipatif
   - Analogie avec l'équation des ondes
2. Modélisation des frontières
   - Condition d'impédance complexe
   - Condition aux frontières absorbantes
3. Conclusion
   - Application
   - Perspectives

Modélisation des frontières dans un modèle TLM : cas du sol

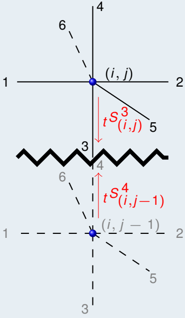
- Définition de la pression sur la frontière :

$$p\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right) = {}_tS^3_{(i,j)} + {}_tS^4_{(i,j-1)};$$

- Définition de la vitesse particulaire normale à la frontière :

$$v_n\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right) = \frac{{}_tS^3_{(i,j)} - {}_tS^4_{(i,j-1)}}{\rho_0\, c}$$

$$c_{\text{TLM}} = \sqrt{\frac{2}{{}_t\eta_{(i,j)}+4}}\; c_0 \quad \Rightarrow \quad c = \sqrt{\frac{{}_t\eta_{(i,j)}+4}{2}}\; c_0$$



Frontière définie par une condition d'impédance complexe

Définition de la pression sur la frontière :

- dans le domaine fréquentiel :

$$P_{(b)}\left(\omega\right) = Z\left(\omega\right).V_{n_{(b)}}\left(\omega\right);$$

- dans le domaine temporel :

$$p_{(b)}\left(t\right) = z\left(t\right) * v_{n_{(b)}}\left(t\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} z\left(t'\right).v_{n_{(b)}}\left(t-t'\right)dt',$$

où

$$\begin{aligned} p_{(b)}\left(t\right) &= \mathfrak{F}^{-1}\left[P_{(b)}\left(\omega\right)\right], \\ v_{n_{(b)}}\left(t\right) &= \mathfrak{F}^{-1}\left[V_{n_{(b)}}\left(\omega\right)\right], \\ z\left(t\right) &= \mathfrak{F}^{-1}\left[Z\left(\omega\right)\right]. \end{aligned}$$

Représentation de l'impédance par une somme de systèmes linéaires du 1^er ordre

Y. REYMEN *et coll.*, 12^th AIAA/CEAS (2006)

Écriture de l'impédance :

- dans le domaine de FOURIER (réponses de K systèmes linéaires) :

$$Z(\omega) = \sum_{k=1}^{K} \frac{a_k}{\gamma_k - j\omega},$$

  où γ_k sont des pôles réels ($\gamma_k > 0$) ;

- dans le domaine temporel (somme de K réponses impulsionnelles) :

$$z(t) = \sum_{k=1}^{K} a_k e^{-\gamma_k t} H(t),$$

  où $H(t)$ est la fonction de HEAVISIDE.

Application au modèle d'impédance de ZWIKKER et KOSTEN

- Modèle d'impédance de ZWIKKER et KOSTEN (1949) :

$$Z(\omega) = Z_\infty \sqrt{\frac{1 - j\omega\tau}{-j\omega\tau}},$$

avec $\tau = \dfrac{\rho_0 q^2 \gamma}{R_S \Omega}$ une constante de temps

et $Z_\infty = \dfrac{\rho_0 c_0 q}{\Omega}$ l'impédance à la limite $\omega\tau \to \infty$

(R_s : résistance au passage de l'air, q : tortuosité et Ω : porosité).

- Transposition dans le domaine temporel (OSTASHEV *et coll.* - 2007) :

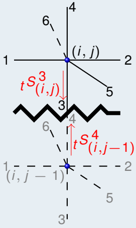
$$z(t) = Z_\infty \left[\delta(t) + \frac{1}{\tau} f(\bar{t})\right], \quad \text{où} \quad \bar{t} = t/\tau.$$

- Approximation de la réponse impulsionnelle $f(\bar{t})$:

$$f(\bar{t}) = \frac{e^{-\bar{t}/2}}{2}\left[I_1\left(\frac{\bar{t}}{2}\right) + I_0\left(\frac{\bar{t}}{2}\right)\right] H(\bar{t}) = \sum_{k=1}^{K} a_k e^{-\gamma_k \bar{t}} H(\bar{t}).$$

Pression sur la frontière ⇒ méthode de convolution récursive

$$\underbrace{\mathbf{p}_{(\mathbf{b})}(\mathbf{t})}_{{}_tS^3_{(i,j)}+{}_tS^4_{(i,j-1)}} = \underbrace{\mathbf{z}(\mathbf{t})}_{Z_\infty\left[\delta(t)+\frac{1}{\tau}\sum_{k=1}^{K} a_k e^{-\gamma_k \bar{t}} H(\bar{t})\right]} \underbrace{*}_{\psi_k(t-\Delta t)} \underbrace{\mathbf{v}_{\mathbf{n}_{(\mathbf{b})}}(\mathbf{t})}_{\frac{{}_tS^3_{(i,j)}-{}_tS^4_{(i,j-1)}}{\rho_0\, c}}$$

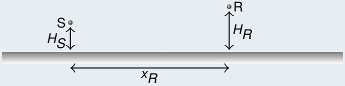


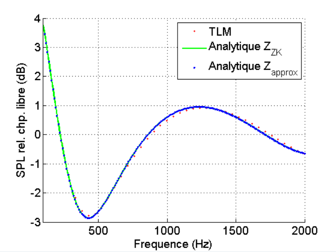
⇒ calcul de l'impulsion diffusée ${}_tS^4_{(i,j-1)}$ par le nœud virtuel.

Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement

Sol plan homogène : modèle d'impédance de ZWIKKER et KOSTEN

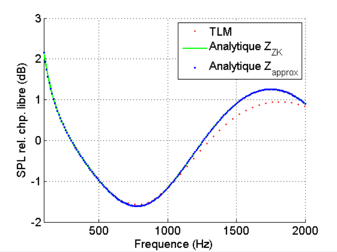
- source sonore : impulsion gaussienne à f=1500 Hz ;
- discrétisation spatiale : $\Delta L = 2$ cm ;
- pas de temps : $\Delta t = 4.1.10^{-5}$ s ;
- H_S =1 m, H_R =2 m et x_R =20 m.





sol herbeux

(R_S = 100 kN.s.m^{-4}, $q = \sqrt{10}$ et Ω =0.5)

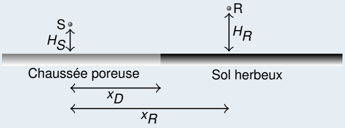


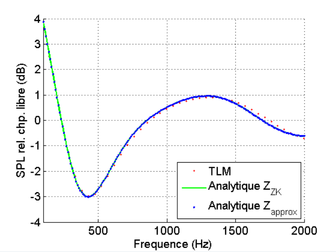
chaussée poreuse

(R_S = 10 kN.s.m^{-4}, $q = \sqrt{3.5}$ et Ω =0.2)

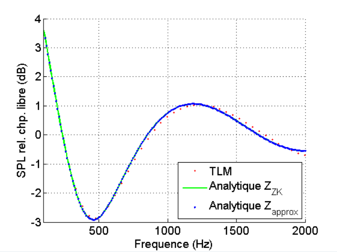
Sol plan discontinu : modèle d'impédance de ZWIKKER et KOSTEN

- source sonore : impulsion gaussienne à f=1500 Hz ;
- discrétisation spatiale : $\Delta L = 2$ cm ;
- pas de temps : $\Delta t = 4.1.10^{-5}$ s ;
- H_S =0.2 m, H_R =1.5 m et x_R =20 m.





x_D=1 m



x_D=2 m

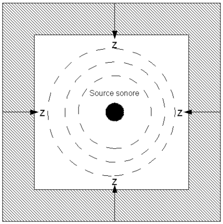
Réseau Scientifique et Technique de l'Équipement

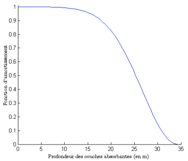
Couches absorbantes adaptées : modélisation d'un espace « infini »

- Introduction de couches absorbantes en amont des limites du domaine de calcul ;
- Application d'un facteur d'amortissement $F(z)$ croissant au fur et à mesure de la progression dans la couche absorbante

$$F(z) = 1 - e^{\left(\frac{-z^2}{B}\right)}, \quad 0 < F(z) \leq 1$$

où z est la distance dans la couche absorbante et B est une constante d'affaiblissement.

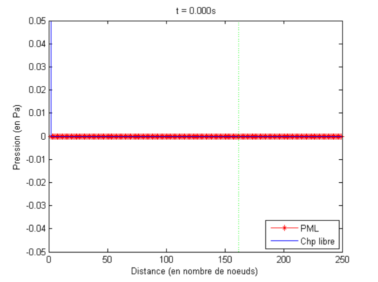




Couches absorbantes adaptées : application à la TLM

- Modification des lois de connexion : cas du ciel

$$_{t+\Delta t}I^1_{(i,j)} = {}_tS^2_{(i-1,j)}$$
$$_{t+\Delta t}I^2_{(i,j)} = {}_tS^1_{(i+1,j)}$$
$$_{t+\Delta t}I^3_{(i,j)} = F_{(i,j-1)} \times {}_tS^4_{(i,j-1)}$$
$$_{t+\Delta t}I^4_{(i,j)} = {}_tS^3_{(i,j+1)}$$



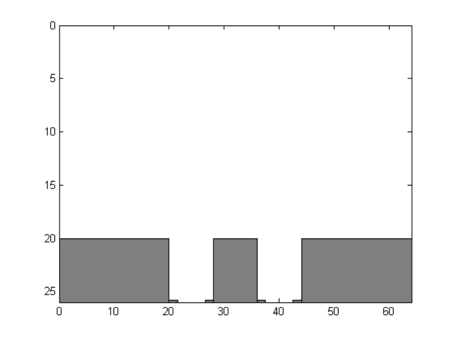
JTA
10 juin 2009

Gwenaël GUILLAUME

Contexte
Sommaire
Méthode TLM
Modélisation des frontières
Conclusion
Application
Perspectives

Application à la modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain

- façades et toits végétalisés ;
- sol : chaussée poreuse ;
- ciel et extrémités « ouvertes » du domaine : couches absorbantes adaptées ;
- source stationnaire à H_S=0.5 m ($f \equiv 3^e$ mode de résonance transversal)



Perspectives pour la fin de thèse

- applications urbaines.

Perspectives du modèle

- parallélisation du code de calcul ;
- discrétisation spatiale par le biais d'un maillage tétraédrique ;
- couplage avec un modèle de traffic routier (sources mobiles).

Merci de votre attention