



Modèle de prédiction acoustique du champ sonore dans les locaux

Applicabilité à une approche conjointe acoustique/thermique

Journée d'échanges Recherche-Ingénierie sur les interactions entre performances acoustiques et performances thermiques dans le bâtiment

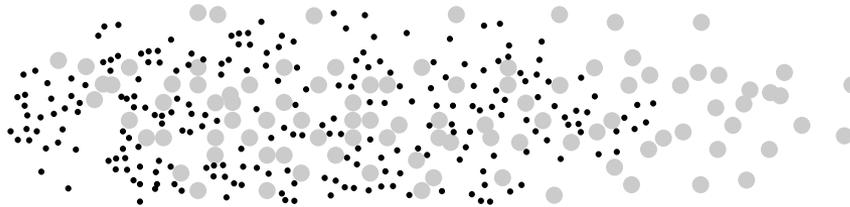
Octobre 2013



- I o La théorie du transport au sein d'un milieu diffusant et le cas particulier de la diffusion
- II o Le modèle de diffusion acoustique
un modèle de prévision acoustique pour les bâtiments
- III o Synthèse et approche conjointe acoustique / thermique

I - La théorie du transport au sein d'un milieu diffusant et le cas particulier de la diffusion

- o [Morse & Feshbach, 1953]
- o Pénétration d'un « milieu diffusant » au sein d'un « milieu diffuseur »



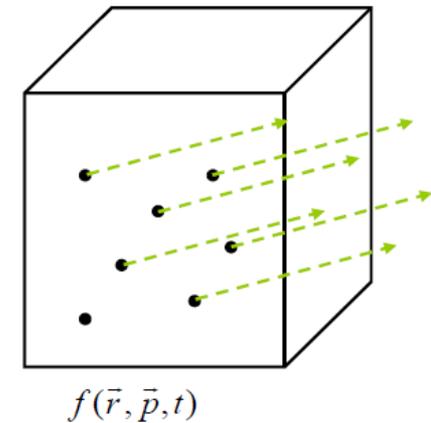
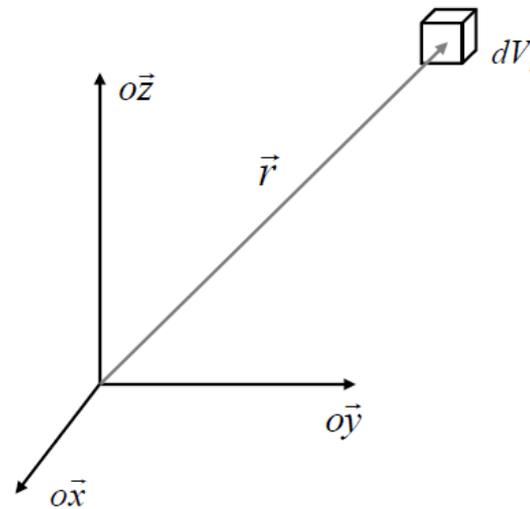
Exemple : lumière à travers un brouillard

- o Milieux constitués d'un grand nombre N d'éléments , de particules.
- o Éléments diffuseurs au repos
- o Les particules diffusantes sont chacune porteuses d'une énergie élémentaire
- o Impossibilité de définir \vec{r} (position) et \vec{p} (mouvement) dans l'espace des phases $dV_p dV_r$ pour toutes les N particules du milieu diffusant

o Théorie cinétique

o Introduction d'une fonction de distribution $f(\vec{r}, \vec{p}, t)$: Probabilité de répartition des N particules diffusantes • dans l'espace des phases $dV_r dV_p$

$$N(\vec{r}, t) = \int_{V_p} f(\vec{r}, \vec{p}, t) dV_p$$



$$\rho(\vec{r}, t) = x \int_{V_p} f(\vec{r}, \vec{p}, t) dV_p$$

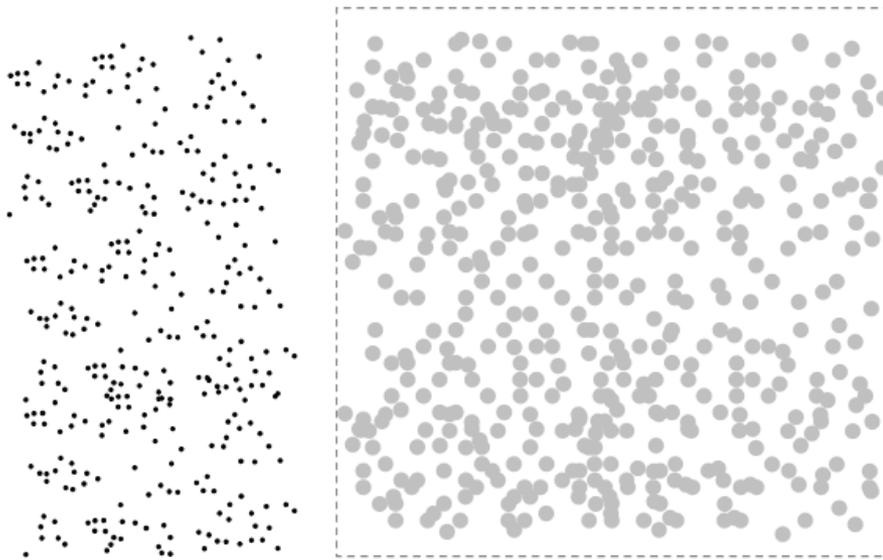
Densité effective (ou masse volumique si particules avec masse $x = m$)

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = \int_{V_p} \vec{p} f(\vec{r}, \vec{p}, t) dV_p$$

Flux (massique) par mètre carré

o Densité d'éléments diffuseurs ● n_t

o Probabilité de collision P_t , d'absorption P_a , de réflexion P_e

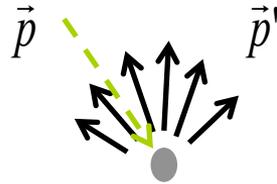


$$Q_t = Q_e + Q_a \quad P_t = \frac{Q_t}{1} \quad P_e = \frac{Q_e}{1}, P_a = \frac{Q_a}{1}$$



o Propagation uniforme

o Loi de réflexion



Équiprobabilité des directions
de réflexion

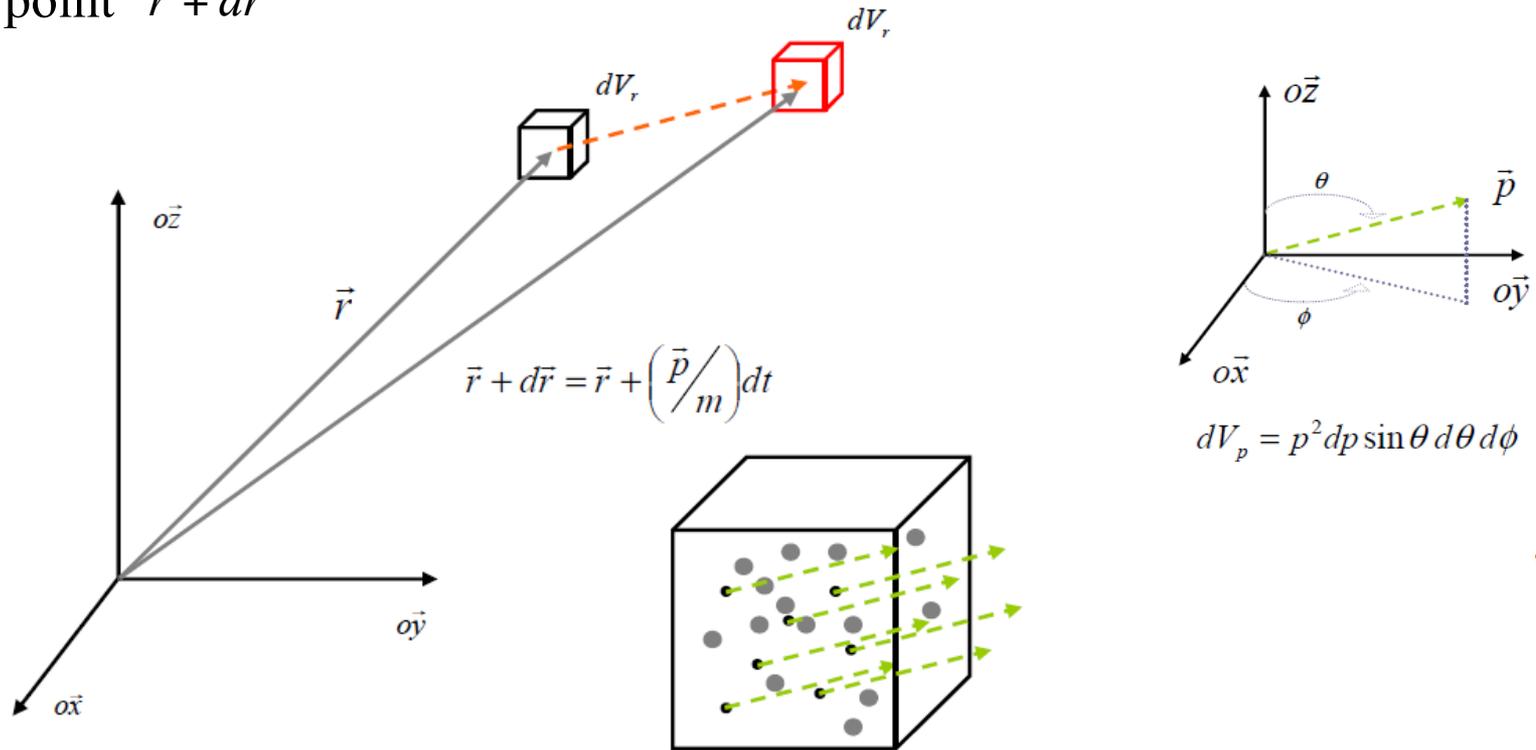
o Probabilité de parcourir la distance \vec{r} sans subir de collisions

$$P(\vec{r}) = \exp(-Q_t n_t \vec{r})$$

o Libre parcours moyen

$$\lambda_{LPM} = \int_0^{\infty} \vec{r} P(\vec{r}) d\vec{r} = \frac{1}{Q_t n_t}$$

o Étude de la propagation des particules diffusantes d'un point \vec{r} à un point $\vec{r} + d\vec{r}$

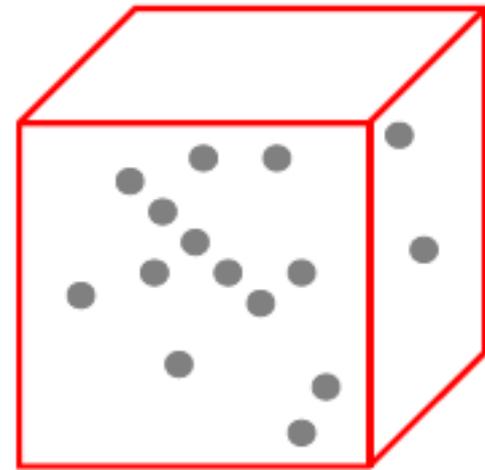
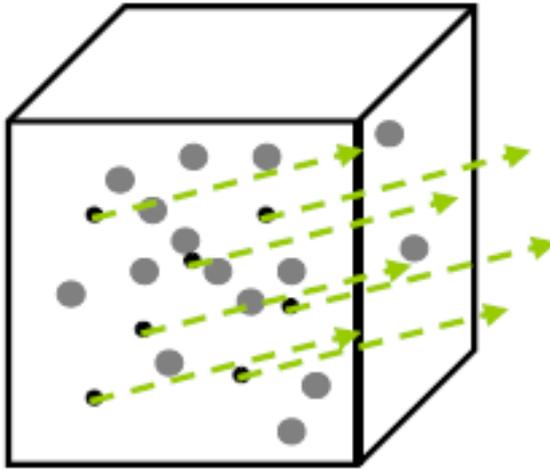


o Variation de la fonction de distribution

$$\frac{\partial f}{\partial t} ?$$

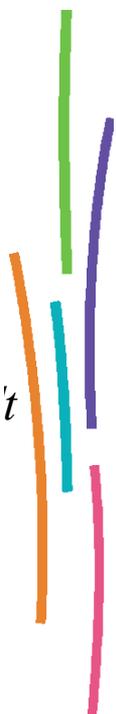
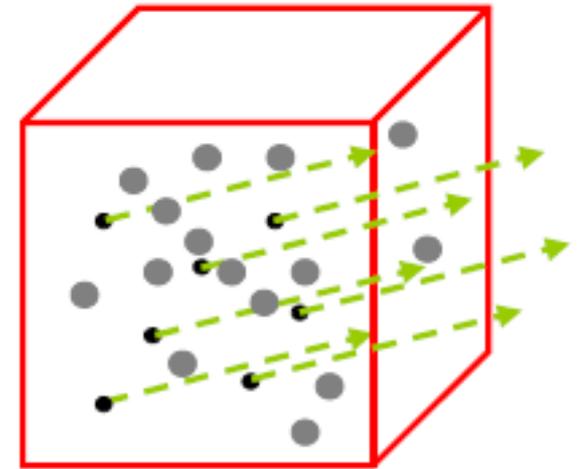
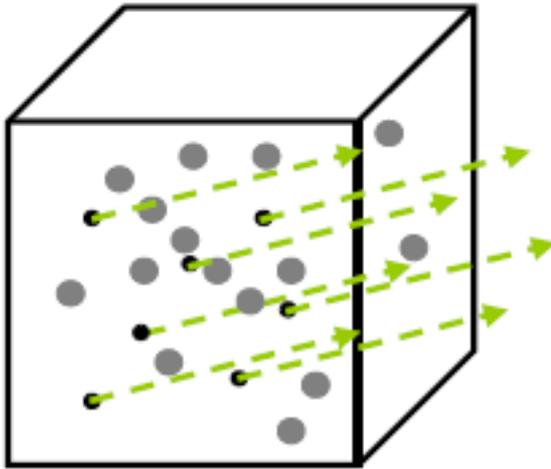
o Nc

...et parvenant



... et parvenant en $\vec{r} + \left(\frac{\vec{p}}{m}\right) dt$ en ayant subit une collision et été absorbés pendant le temps dt

... et parvenant



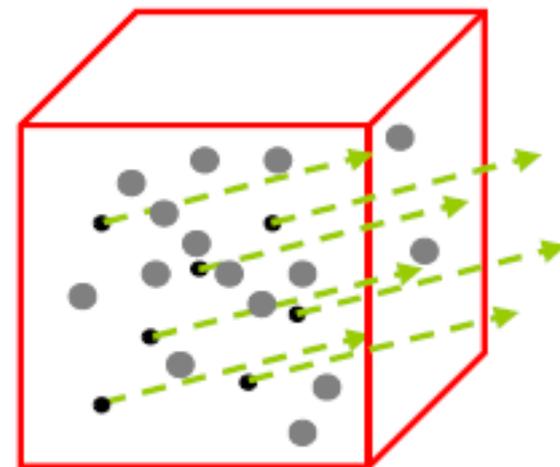
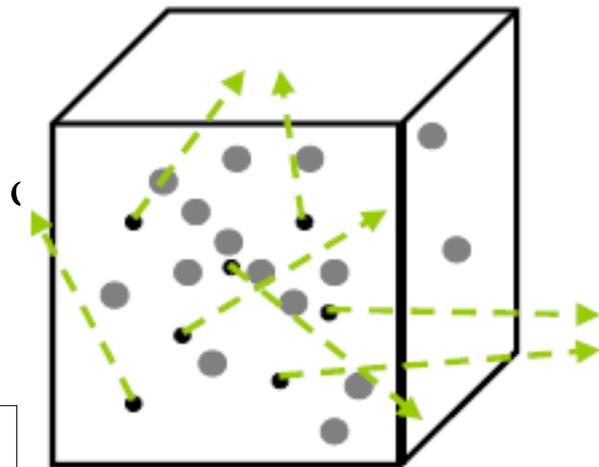
◦ Nombre de particules diffusantes \vec{p}' situé en \vec{r} à l'instant t ...

... et parvenant en $\vec{r} + \left(\frac{\vec{p}}{m}\right) dt$ en ayant subit une collision et été réfléchis \vec{p} pendant le temps dt

$$\frac{\partial f}{\partial t} = +n_t \frac{\|\vec{p}'\|}{m} \frac{Q_e}{1} \iint_0^{2\pi} f(\vec{r}, \|\vec{p}'\|, \theta', \phi', t) \frac{\sin\theta' d\theta' d\phi'}{4\pi}$$

◦ *Terme source* ... $+q$

équiprobabilité des directions de réflexions



o Cas particulier de l'équation de transport : la diffusion

o Hypothèses

$$H1: \frac{\partial \rho}{\partial \lambda_{LPM}}, \frac{\partial \|\vec{J}\|}{\partial \lambda_{LPM}} \ll 1; \quad H2: \frac{\|\vec{J}\|}{\|\vec{p}\|/m} \ll \rho.$$

o Forme de la fonction de distribution

$$f \approx \frac{1}{4\pi m} \rho + \frac{3}{4\pi \|\vec{p}\|} \vec{p} \cdot \vec{J}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \approx \frac{\|\vec{p}\|}{m} \frac{\lambda_{LPM}}{3} \Delta \rho - n_t Q_a \frac{\|\vec{p}\|}{m} \rho + q$$

Équation de diffusion

$$\vec{J} \approx - \frac{\|\vec{p}\|}{m} \frac{\lambda_{LPM}}{3} \vec{\nabla} \rho$$

Équation de gradient

o Équations identiques si propagation non uniforme

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} \rho \approx D \Delta \rho - \sigma \rho + q \\ \vec{J} \approx -D \vec{\nabla} \rho \end{array} \right.$$

$$D = \frac{\|\vec{p}\|}{m} \frac{\lambda_{LPM}}{3} = \frac{\lambda_{LPM} c}{3} \quad [m^2 s^{-1}]$$

$$\sigma = n_t Q_a c \quad [s^{-1}]$$

c : vitesse des particules diffusantes

D : coefficient de diffusion

σ : terme d'absorption

Diffusion

d'un fluide à travers un poreux,

d'électrons libres à travers un gaz,

de neutrons à travers la matière,

de la chaleur à travers la matière

Densité du flux de chaleur

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T$$

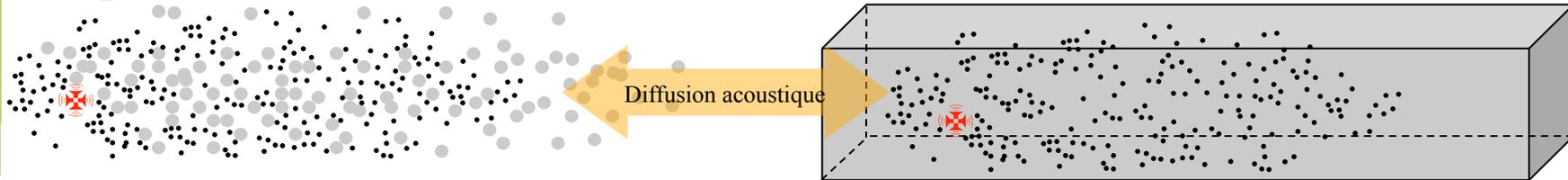
$$\vec{J} = -\lambda \vec{\nabla} T$$

T : température

λ : conductivité thermique

II – Le modèle de diffusion acoustique un modèle de prévision acoustique pour les bâtiments

o Processus de diffusion du champ sonore réverbéré lié aux multiples réflexions aux parois



$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \approx D \Delta \rho - \sigma \rho + q \quad \text{--->}$$

$$\vec{J} \approx -D \vec{\nabla} \rho \quad \text{--->}$$

$$\begin{aligned} \frac{S}{V} &= n_t \times 4\pi R^2 \\ &= n_t \times 4Q_t \end{aligned} \quad \text{--->}$$

Conditions
aux limites

$$\frac{\partial}{\partial t} w \approx D \Delta w - \sigma w + W_s \delta(\vec{r} - \vec{r}_s)$$

$$\vec{I} \approx -D \vec{\nabla} w$$

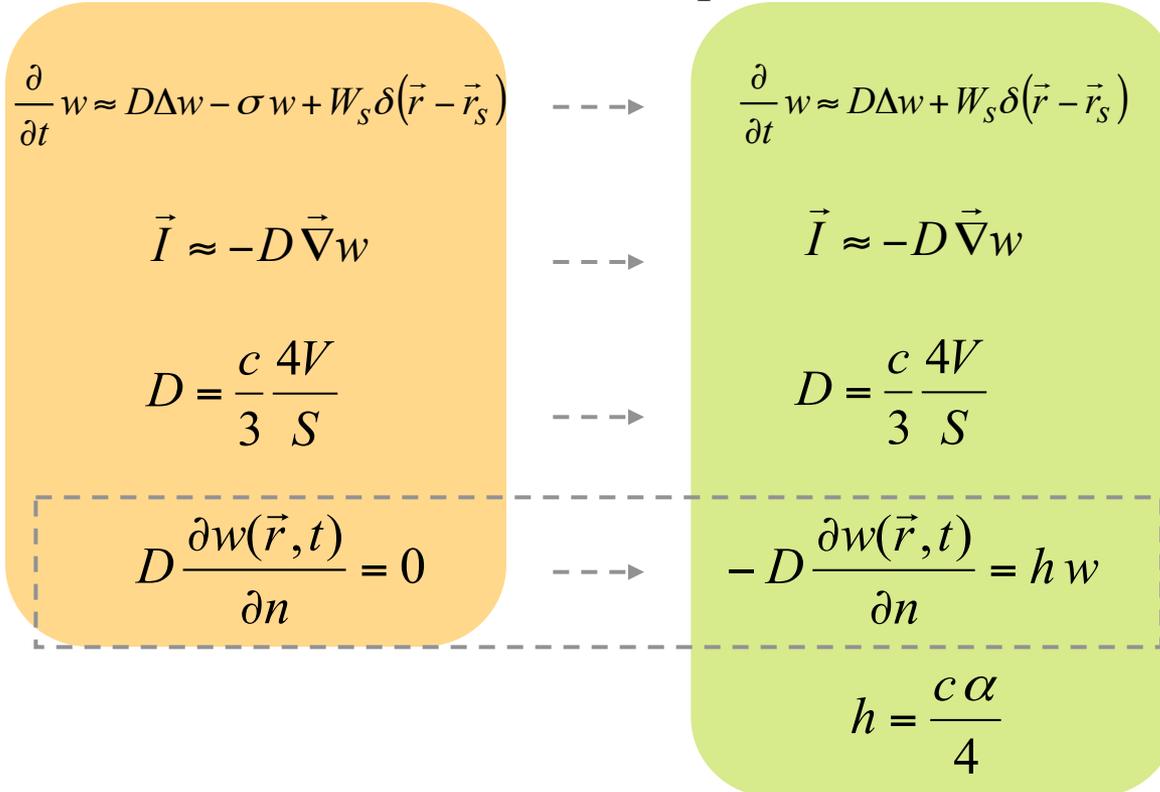
$$D = \frac{\lambda_{LPM} c}{3}$$

$$\lambda_{LPM} = \frac{1}{n_t Q_t} = \frac{4V}{S}$$

$$D \frac{\partial w(\vec{r}, t)}{\partial n} = 0$$

- w densité d'énergie acoustique
- \vec{I} intensité acoustique
- c vitesse du son (343ms^{-1})
- D coefficient de diffusion de la salle
- σ absorption aux parois
- V volume de la salle
- S enveloppe de la salle
- W_s puissance de la source

o Processus de diffusion du champ sonore réverbéré



h coefficient d'échange
α absorption aux parois
ρ₀ densité de l'air
W_s puissance de la source

o Passage de la densité acoustique à la pression acoustique

$$p^2(\vec{r}, t) = w(\vec{r}, t) \times \rho_0 c^2$$

o Introduction du champ direct

$$w_d(\vec{r} - \vec{r}_s) = \frac{W_s}{4\pi c \|\vec{r} - \vec{r}_s\|^2}$$

o Prise en compte de fortes absorptions surfaciques

$$h = -\frac{c \ln(1 - \alpha)}{4} \quad h = \frac{\alpha}{2(2 - \alpha)}$$

o Prise en compte de la diffusivité des parois

$$D = \frac{c}{3} \frac{4V}{S} [-2.24 \ln(s) + 1.55]$$

s : coefficient de diffusivité des parois

o Prise en compte de l'atténuation atmosphérique

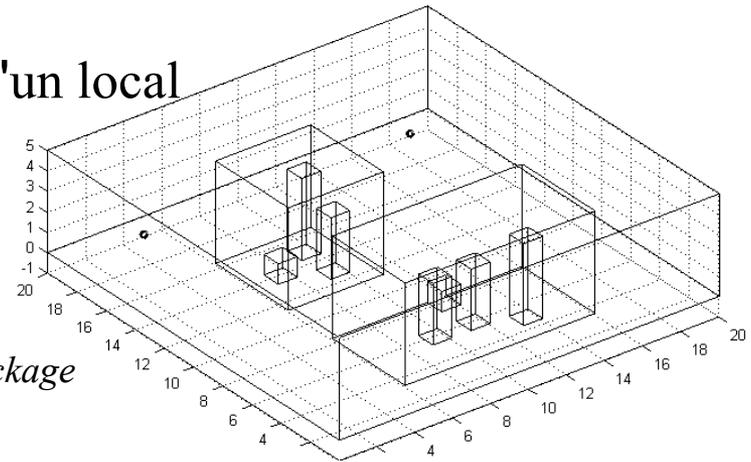
$$\frac{\partial w}{\partial t} - D \Delta w + mc w = W_s \delta(\vec{r} - \vec{r}_s)$$

m : coefficient d'atténuation atmosphérique

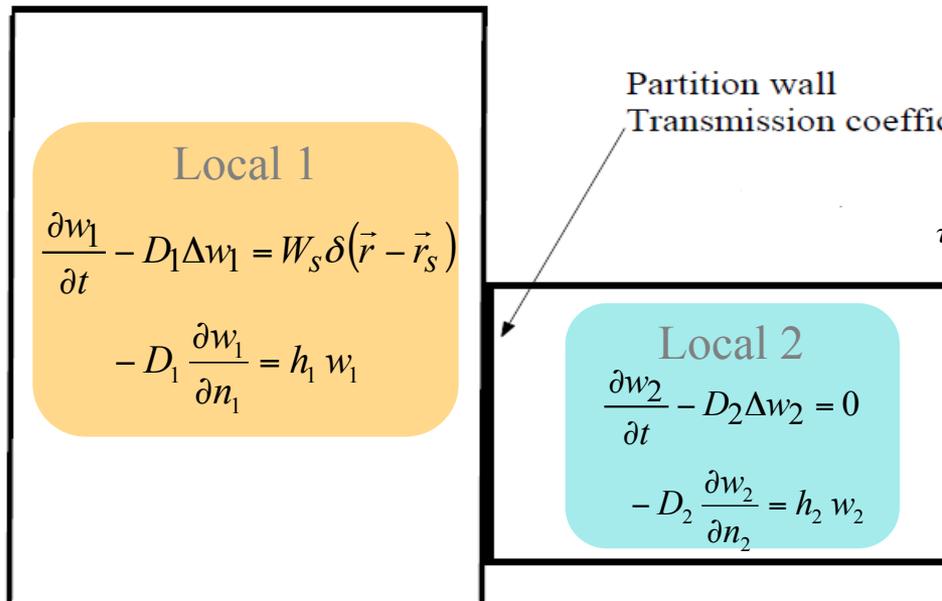
o Prise en compte de l'encombrement d'un local

$$\lambda_{LPM} = \frac{1}{n_{t1}Q_{t1} + n_{t2}Q_{t2}} = \frac{\lambda_{LPM1} \lambda_{LPM2}}{\lambda_{LPM1} + \lambda_{LPM2}}$$

1 : salle sans zone de stockage 2 : zone(s) de stockage



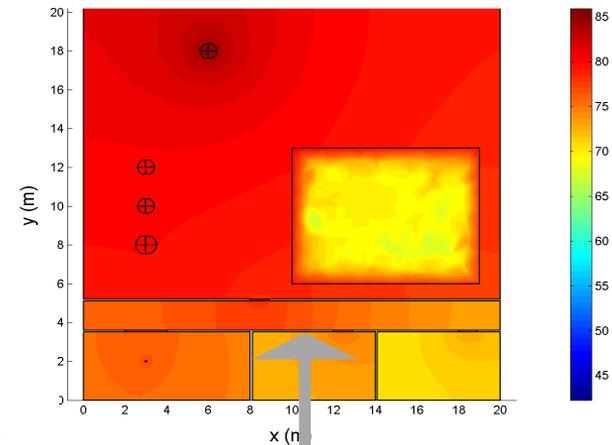
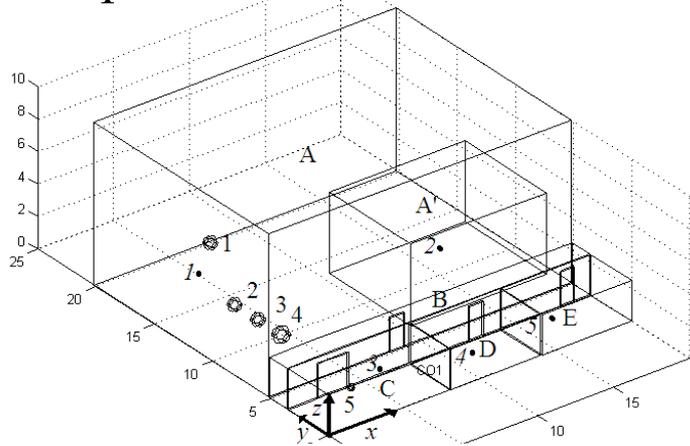
o Prise en compte de la transmission (couplage)



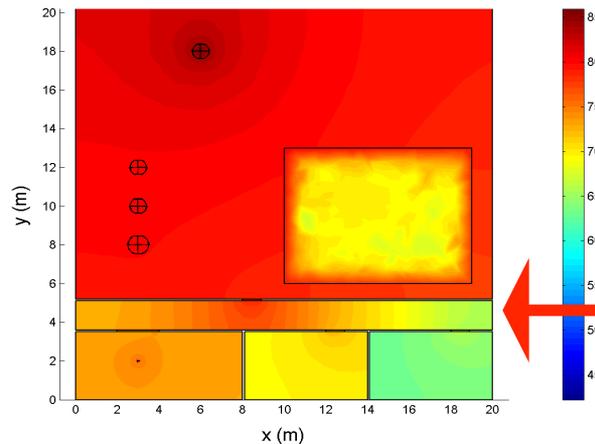
$$\begin{cases} D_2 \frac{\partial w_2}{\partial n_2} + h_2 w_2 = \frac{\tau c}{4} w_1 \\ D_1 \frac{\partial w_1}{\partial n_1} + h_1 w_1 = \frac{\tau c}{4} w_2 \end{cases}$$

τ : coefficient de transmission des parois

- o Modélisation 3d du champ sonore de locaux complexes
- o Résolution par éléments finis : temps de calcul faibles
- o Outil d'optimisation des solutions acoustiques en ingénierie



Plafond Réfléchissant



Plafond Absorbant

III

Synthèse

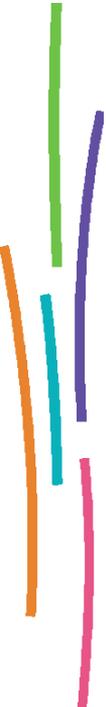
et approche conjointe acoustique / thermique ?

o Synthèse

- Présentation d'une théorie de propagation
- Étude d'un cas particulier de propagation : le processus de diffusion
- Applicable à de nombreux domaines du génie civil et notamment au cas de la thermique (conduction) et ...
- ...au cas de l'acoustique : modèle de diffusion acoustique

o Perspectives de recherche

- Création d'un modèle plus général Acoustique / Thermique ?
- Création d'un outil d'optimisation Acoustique / Thermique ?
- Un unique code de calcul



- [Billon *et al.* 2006] A. Billon, V. Valeau, A. Sakout et J. Picaut. *On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 120, p. 2043–2054, 2006.
- [Billon *et al.* 2008a] A. Billon, C. Foy, J. Picaut, V. Valeau et A. Sakout. *Modeling the sound transmission between rooms coupled through partition walls by using a diffusion model*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, no. 6, p. 4261–4271, 2008.
- [Billon *et al.* 2008b] A. Billon, J. Picaut et A. Sakout. *Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model*. Applied Acoustics, vol. 69, p. 68–74, 2008.
- [Billon *et al.* 2008c] A. Billon, A. Sakout, J. Picaut, C. Foy et V. Valeau. *Introducing atmospheric attenuation within a diffusion model for room-acoustic predictions (L)*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, no. 6, p. 4040–4043, 2008.
- [Escolano *et al.* 2010] J. Escolano, J. M. Navarro et J. J. Lopez. *On the limitation of a diffusion equation model for acoustic predictions of rooms with homogeneous dimensions (L)*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128, no. 4, p. 1586–1589, 2010.
- [Foy *et al.* 2009] C. Foy, V. Valeau, A. Billon, J. Picaut et A. Sakout. *An empirical diffusion model for acoustic prediction in rooms with mixed diffuse and specular reflections*. Acta Acustica United with Acustica, vol. 95, p. 97–105, 2009.
- [Foy 2007] C. Foy. *Simulation de l'acoustique intérieure d'un bâtiment par la résolution numérique d'une équation de diffusion : introduction de la diffusivité aux parois*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2007.
- [Jing & Xiang 2007] Y. Jing et N. Xiang. *A modified diffusion equation for room-acoustic prediction (L)*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 121, no. 6, p. 3284–3287, 2007.
- [Jing & Xiang 2008a] Y. Jing et N. Xiang. *On boundary conditions for the diffusion equation in room-acoustic prediction : theory, simulations, and experiments*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, p. 145–153, 2008.
- [Jing & Xiang 2008b] Y. Jing et N. Xiang. *Visualizations of sound energy across coupled rooms using a diffusion equation model*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124, no. 6, p. EL360–EL365, 2008.
- [jing & Xiang 2010a] Y. jing et N. Xiang. *One-dimensionnal transport equation models for sound energy propagation in long spaces : simulations and experiments*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 127, p. 2323–2331, 2010.
- [Jing & Xiang 2010b] Y. Jing et N. Xiang. *One-dimensionnal transport equation models for sound energy propagation in long spaces : theory*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 127, no. 4, p. 2312–2322, 2010.
- [Navarro *et al.* 2010] J. M. Navarro, F. Jacobsen, J. Escolano et J. J. Lopez. *A theoretical approach to room acoustic simulations based on a radiative transfer model*. Acta Acustica United with Acustica, vol. 96, p. 1078–1089, 2010.
- [Navarro *et al.* 2012] J. M. Navarro, J. Escolano et J. J. Lopez. *Implementation and evaluation of a diffusion equation model based on finite difference schmes for sound field prediction in rooms*. Applied Acoustics, vol. 73, p. 659–665, 2012.

- [Morse & Feshbach 1953] P. M. Morse et H. Feshbach. *Methods of theoretical physics*. Mc Graw Hill Book Compagny, 1953.
- [Navarro *et al.* 2013] J. M. Navarro, J. Escolano, M. Cobos et J. J. Lopez. *Influence of the scattering and absorption coefficients on homogeneous room simulations that use a diffusion equation model (L)*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 3, p. 1218–1221, 2013.
- [Picaut *et al.* 1997] J. Picaut, L. Simon et J.-D. Polack. *A mathematical model of diffuse sound field based on a diffusion equation*. *Acta Acustica United with Acustica*, vol. 83, p. 614–621, 1997.
- [Picaut *et al.* 1999] J. Picaut, L. Simon et J. D. Polack. *Sound field in long rooms with diffusely reflecting boundaries*. *Applied Acoustics*, vol. 56, p. 217–240, 1999.
- [Picaut 1999] J. Picaut. *Modélisation des champs diffus par une équation de diffusion*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1999.
- [Pierce 1991] A. D. Pierce. *Acoustics - an introduction to its physical principles and applications*. The Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1991.
- [Schroeder 1965] M. R. Schroeder. *New method of measuring reverberation time*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, p. 409–412, 1965.
- [Valeau *et al.* 2006] V. Valeau, J. Picaut et M. Hodgson. *On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 119, p. 1504–1513, 2006.
- [Valeau *et al.* 2007] V. Valeau, M. Hodgson et J. Picaut. *A diffusion-based analogy for the prediction of sound fields in fitted rooms*. *Acta Acustica United with Acustica*, vol. 93, p. 94–105, 2007.
- [Visentin *et al.* 2010] C. Visentin, V. Valeau, N. Prodi et J. Picaut. *A numerical investigation of the sound intensity field in rooms by using diffusion theory and particle tracing*. In *International Congress on Acoustics*, 2010.
- [Visentin *et al.* 2012a] C. Visentin, N. Prodi, V. Valeau et J. Picaut. *An experimental analysis of the relationship between reverberant acoustic intensity and energy density inside long rooms*. In *Internoise*, 2012.
- [Visentin *et al.* 2012b] C. Visentin, N. Prodi, V. Valeau et J. Picaut. *A numerical investigation of the Fick's law of diffusion in room acoustics*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, no. 5, p. 3180–3189, 2012.
- [Visentin 2011] C. Visentin. *A numerical and experimental validation of the diffusion equation applied to room acoustics*. Thèse de doctorat, Université de Ferrara, 2011.
- [Xiang & Goggans 2001] N. Xiang et P.M. Goggans. *Evaluation of decay times in coupled spaces : Bayesian parameter estimation*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, p. 1415–1424, 2001.
- [Xiang *et al.* 2009] N. Xiang, Y. Jing et A. C. Bockman. *Investigation of acoustically coupled enclosures using a diffusion-equation model*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, no. 6, p. 1187–1198, 2009.
- [Xiang *et al.* 2013] N. Xiang, J. Escolano, J.M. Navarro et Y. Jing. *Investigation on the effect of aperture sizes and receiver positions in coupled rooms*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 6, p. 3975–3985, 2013.

Modèle de prédiction acoustique du champ sonore dans les locaux

Applicabilité à une approche conjointe acoustique/thermique

Merci de votre attention

