

Propagation acoustique en milieu extérieur Cours 6

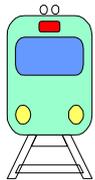
D. Duhamel

Plan

1. Facteurs influant sur la propagation
2. Sources sonores
3. Effets météo
4. Effets des matériaux et du sol
5. Murs antibruit
6. Méthodes de calcul

1. Facteurs influant sur la propagation

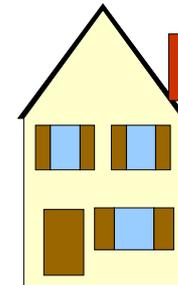
Source sonore



?



Récepteur



Divergence géométrique

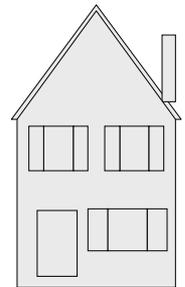
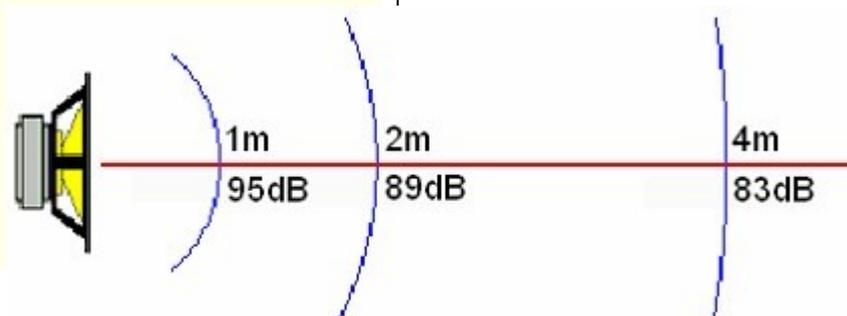
Atténuation avec la distance

Dépend peu de la fréquence

Dépend de la source, de la distance et du milieu de propagation

Divergence géométrique

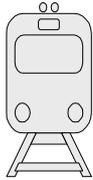
Récepteur



Absorption atmosphérique

**Absorption
atmosphérique**

Source Sonore

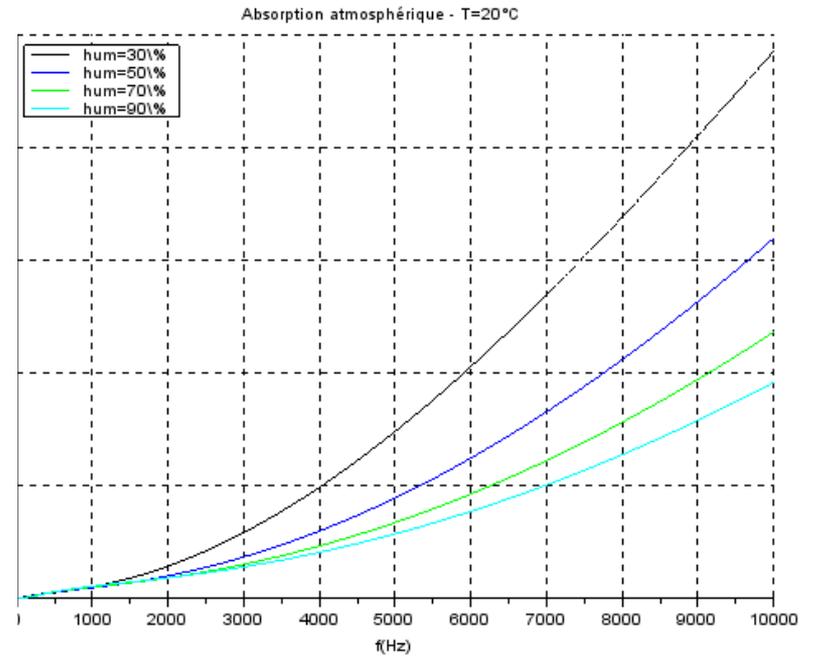
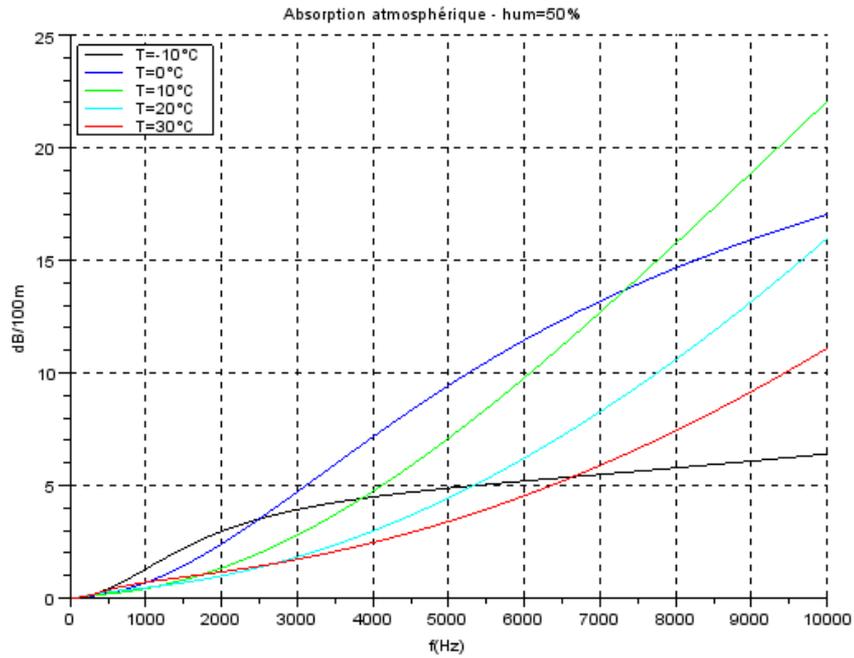


Dissipation de l'énergie
acoustique sous forme de
chaleur

Proportionnel à la distance

Dépend de la fréquence, de
l'humidité et de la température

Absorption pour 100m



Absorption par le sol et les obstacles

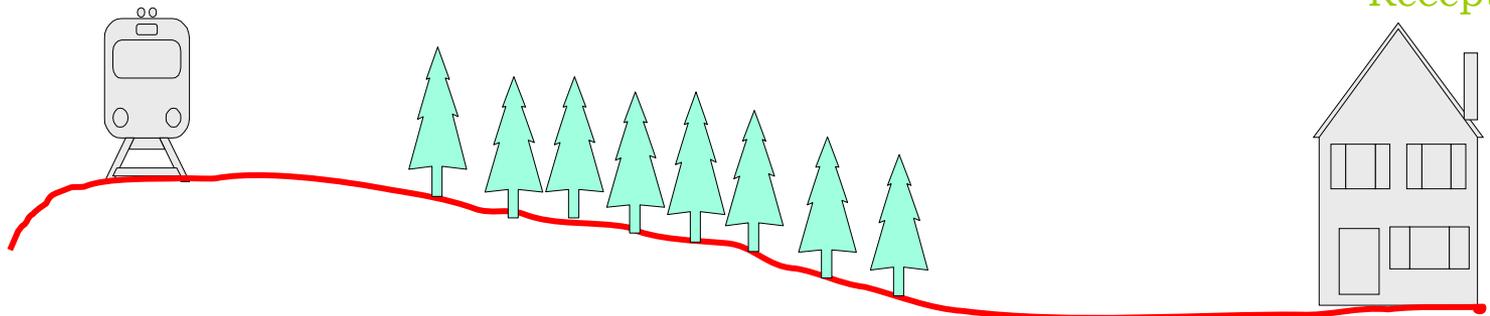
IMPEDANCE

Atténuation de l'énergie acoustique due à des pertes sur les frontières du domaine

Absorption atmosphérique

Dépend de la nature du sol, des angles d'incidence des ondes, de la nature des obstacles

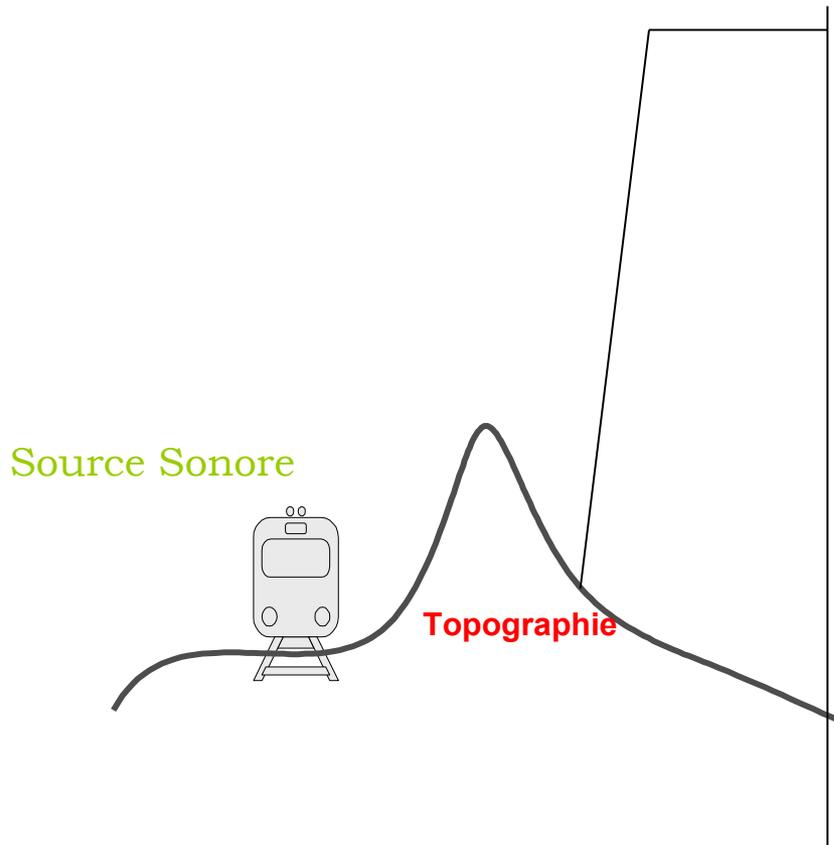
Source Sonore



Divergence géométrique

Sol

Réflexion et diffraction



Topographie

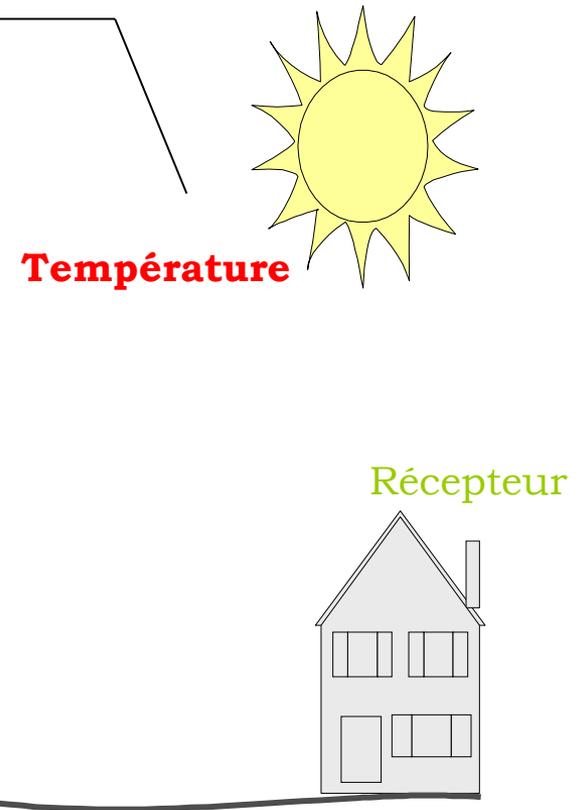
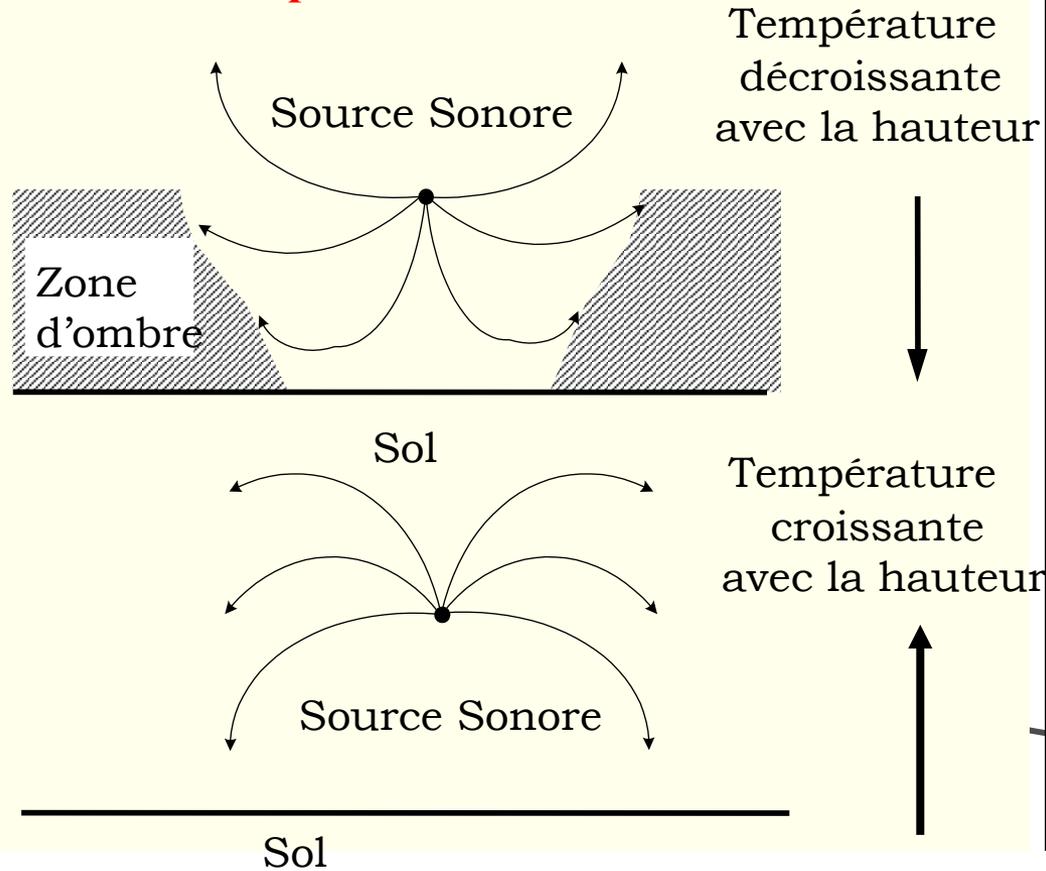
Mur antibruit, colline, bâtiment etc.

Création de réflexions, diffractions et de zones d'ombre

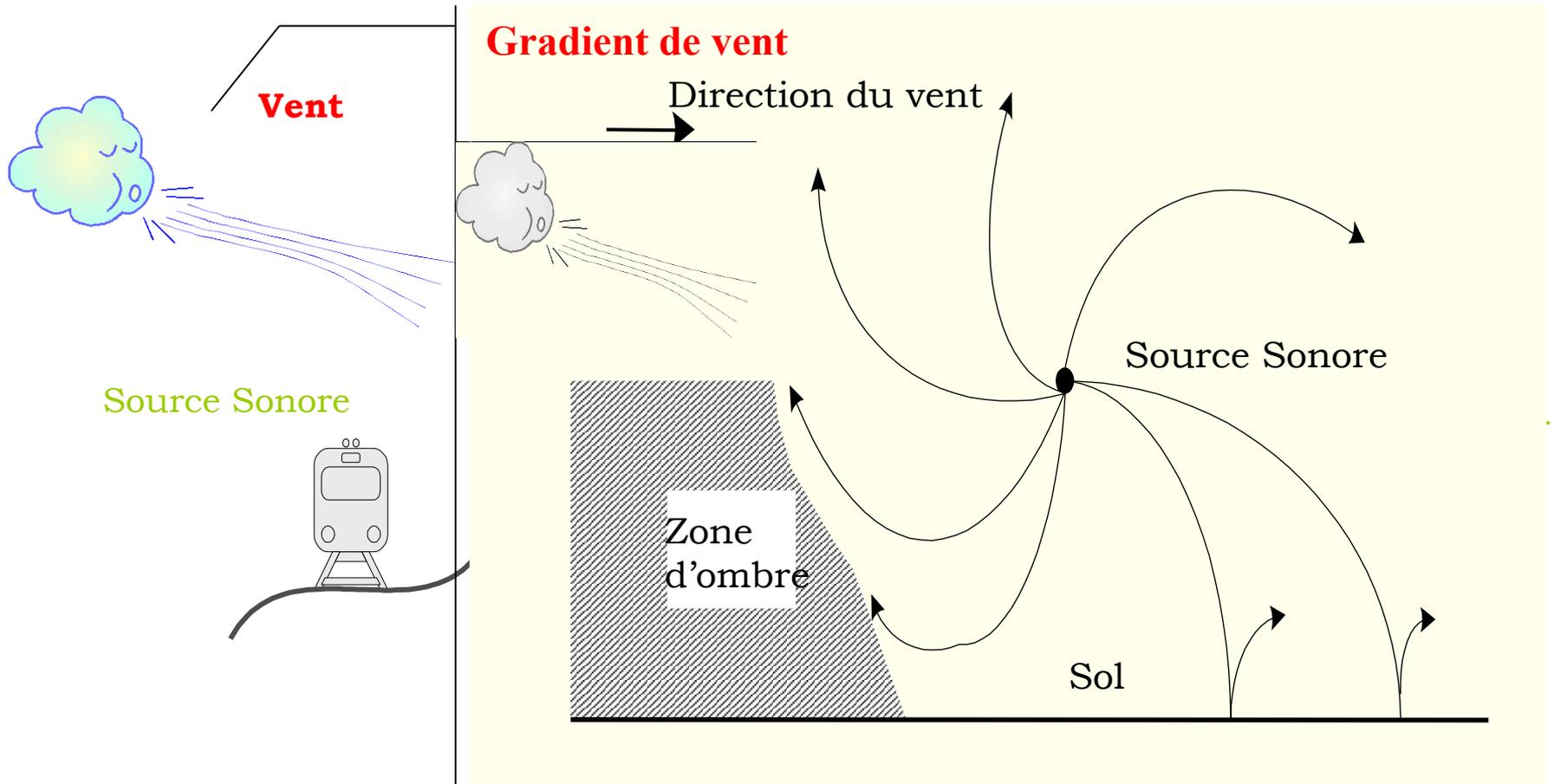
Effets plus importants pour une source près du sol

Effets météo

Gradient de température



Effet météo

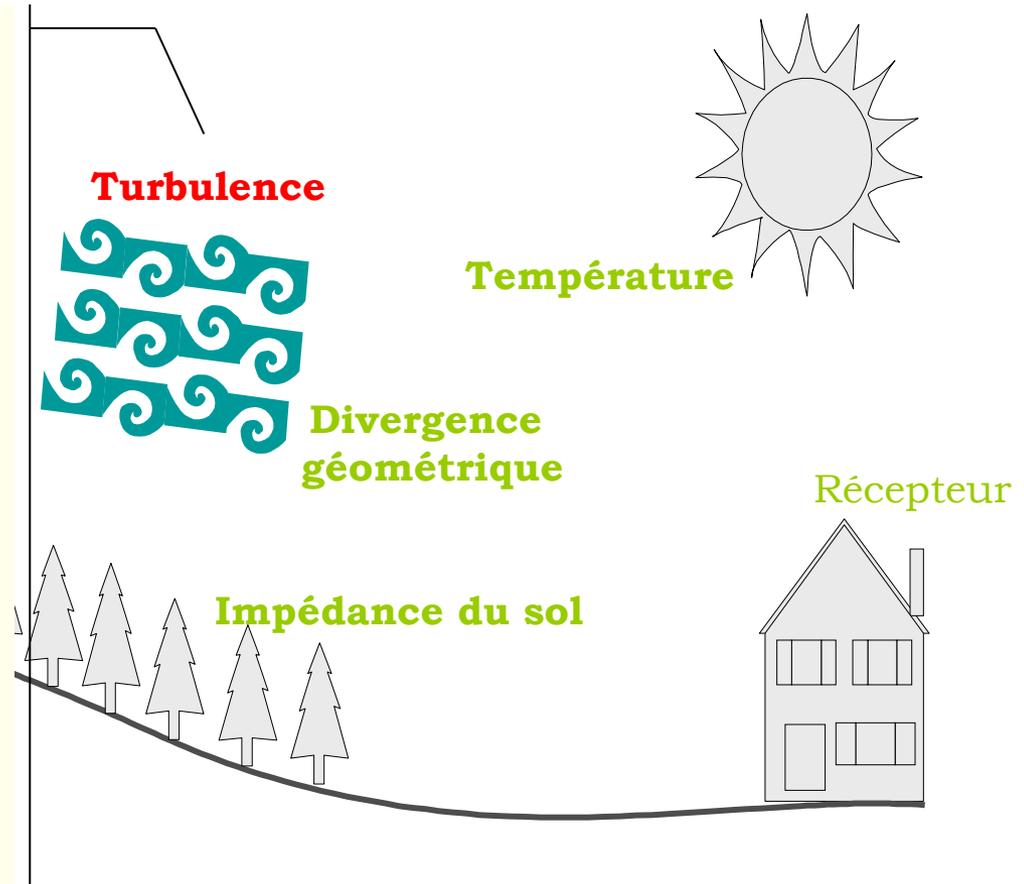


Turbulence atmosphérique

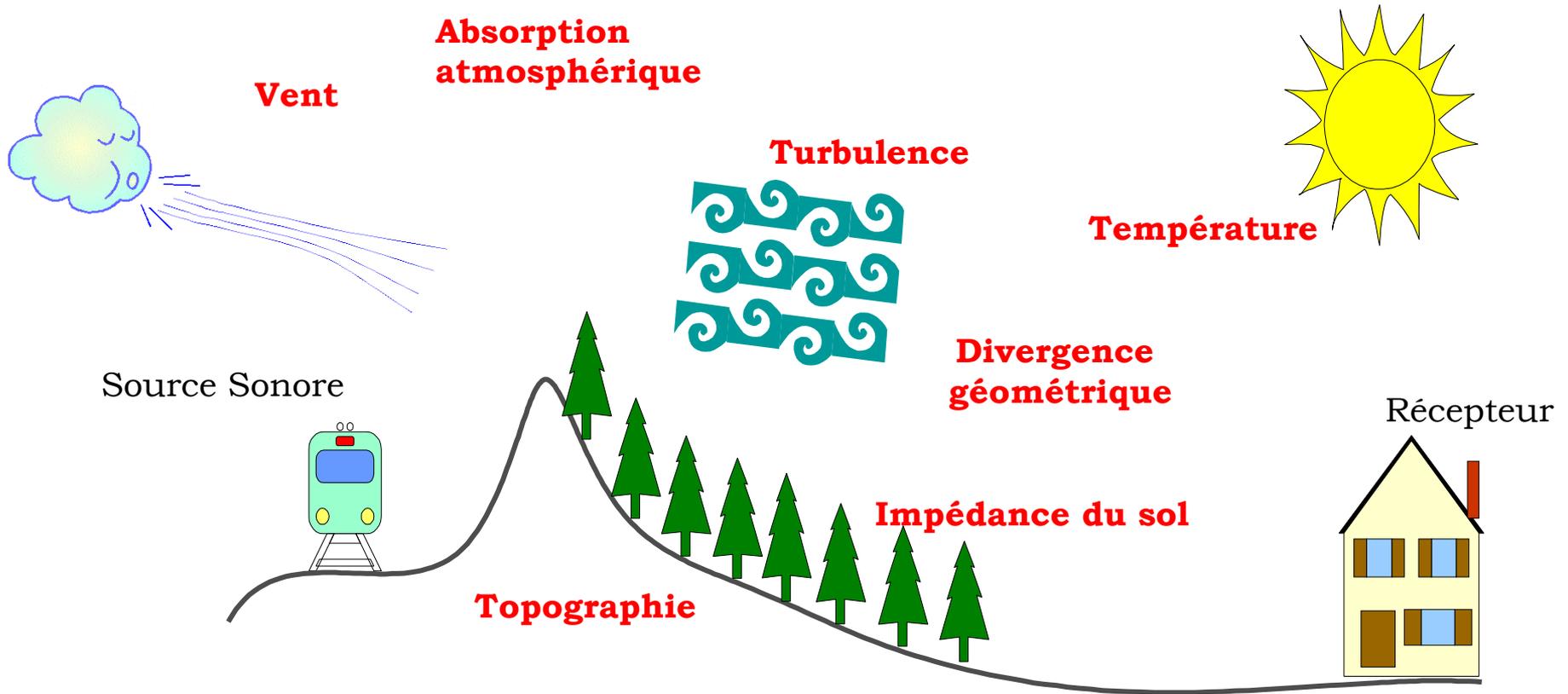
TURBULENCE

Variations locales de la température,
du vent, etc
engendrent
Des fluctuations de vitesse du son
qui génèrent de la diffusion de
l'énergie sonore

Dépend de la distance, de la
fréquence et de l'amplitude des
variations

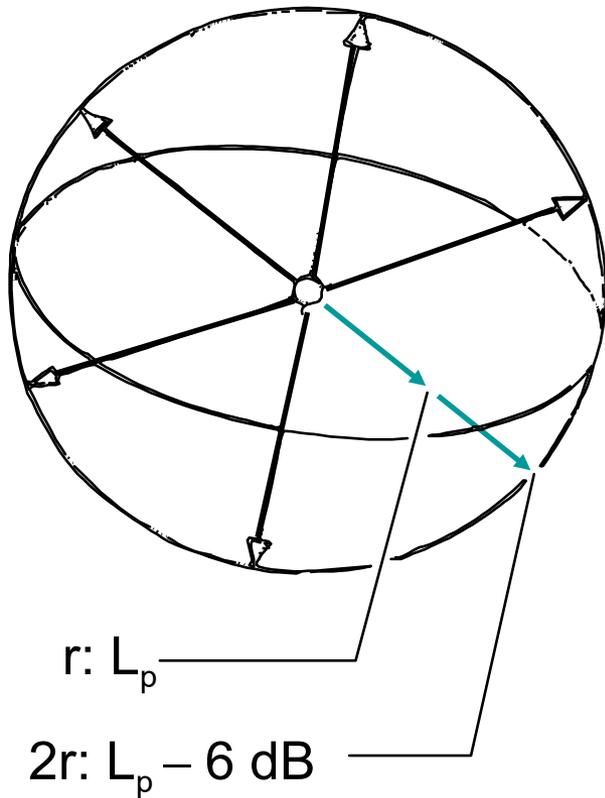


Principaux effets

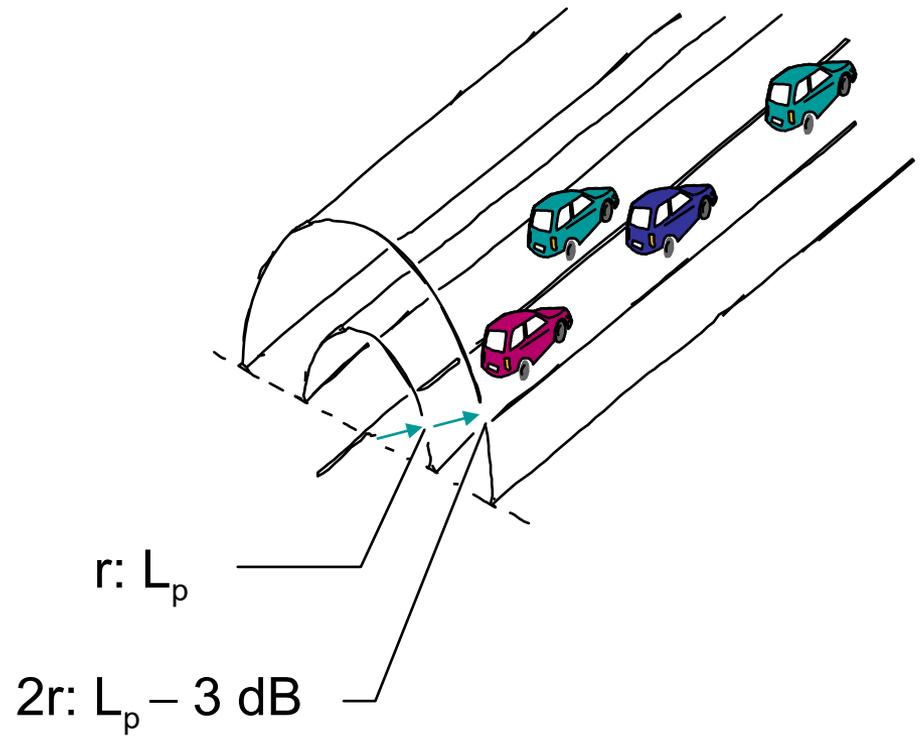


2. Sources sonores

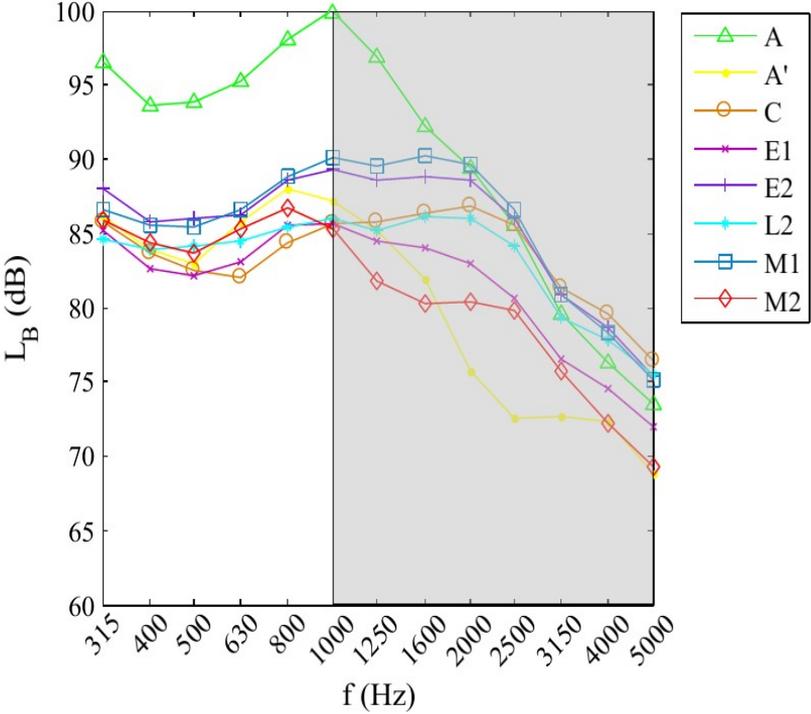
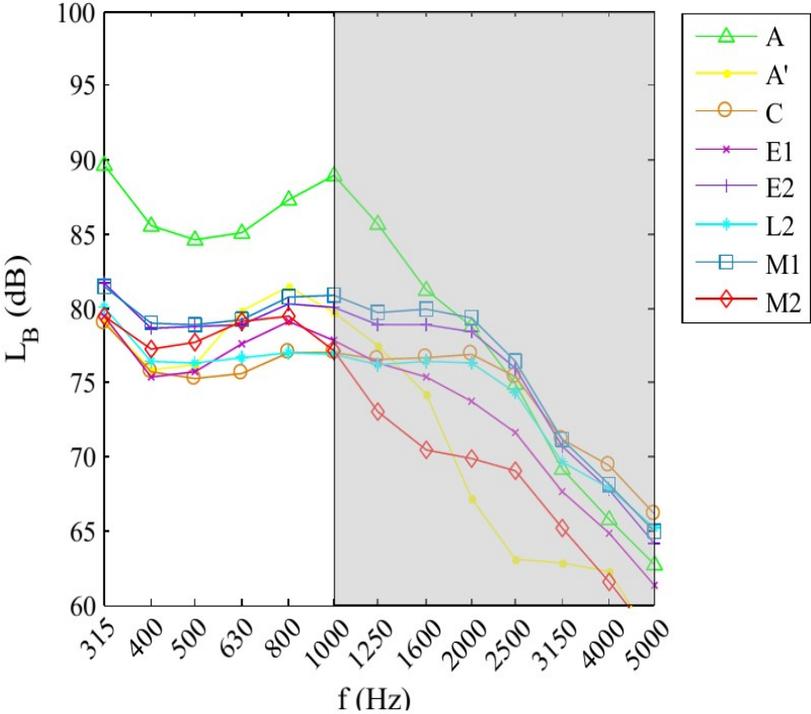
Source ponctuelle



Ligne de sources



Spectre de bruit routier sur différents revêtements



Spectres de bruit à 50 km/h (à gauche) et à 90 km/h (à droite)

Trafic routier

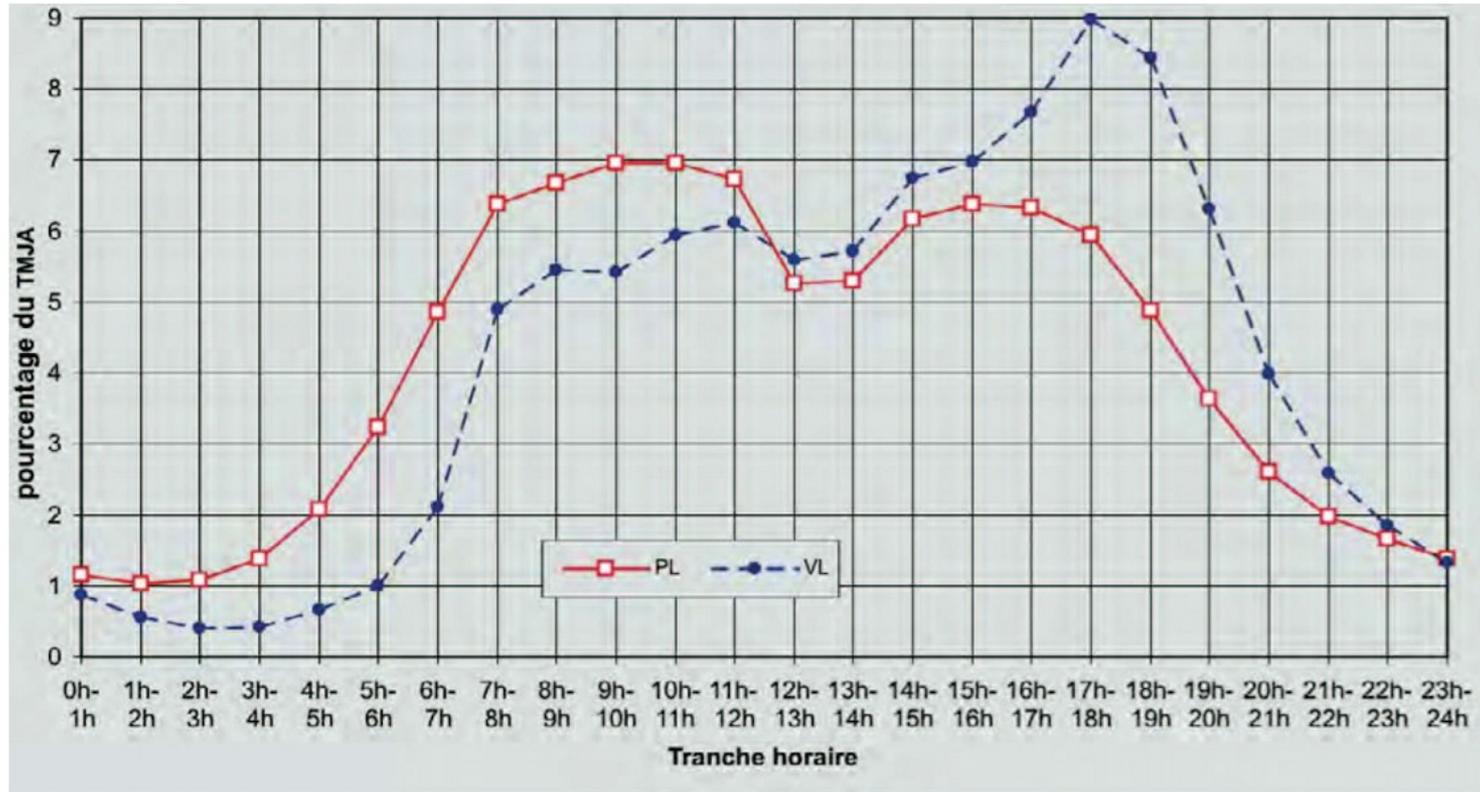


Figure 1.4 : profils moyens journaliers annuels de trafic Véhicules Légers (VL) et Poids Lourds (PL) sur Routes Nationales par tranche horaire. (source : Prédiction du bruit routier – SETRA [7])

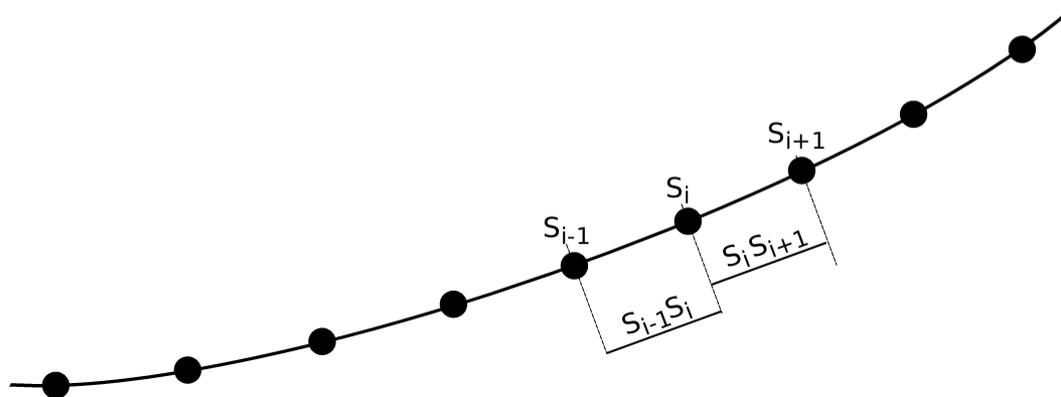
Exemple de calcul du niveau de la source

$$L_{Awi} = [(L_{W/mVL} + 10\log_{10} Q_{VL}) \oplus (L_{W/mPL} + 10\log_{10} Q_{PL})] + 10\log_{10} l_i + R(j)$$

- $L_{W/mVL}$ et $L_{W/mPL}$ sont les niveaux de puissance par unité de longueur, tels que définis dans [Abq2008], respectivement pour les véhicules légers et les poids-lourds. Ces niveaux dépendent de la formulation du revêtement de chaussée, de son âge, de la déclivité et de la vitesse des véhicules ;
- Q_{VL} et Q_{PL} sont respectivement les débit horaires de véhicules légers et de poids-lourds, représentatifs de la période considérée ;
- l_i est la longueur en mètres de la portion de ligne-source représentée par la source ponctuelle i (Cf. Figure 4.3) :

$$l_i = 1/2(S_{i-1}S_i + S_iS_{i+1}) \quad (4.2)$$

- $R(j)$ est la valeur du spectre de bruit routier normalisé à 0 dB et pondéré A, tel que défini dans [Abq2008]. Le spectre est à choisir en fonction du revêtement de chaussée, entre “Drainant” et “non Drainant” .



3. Effets météo

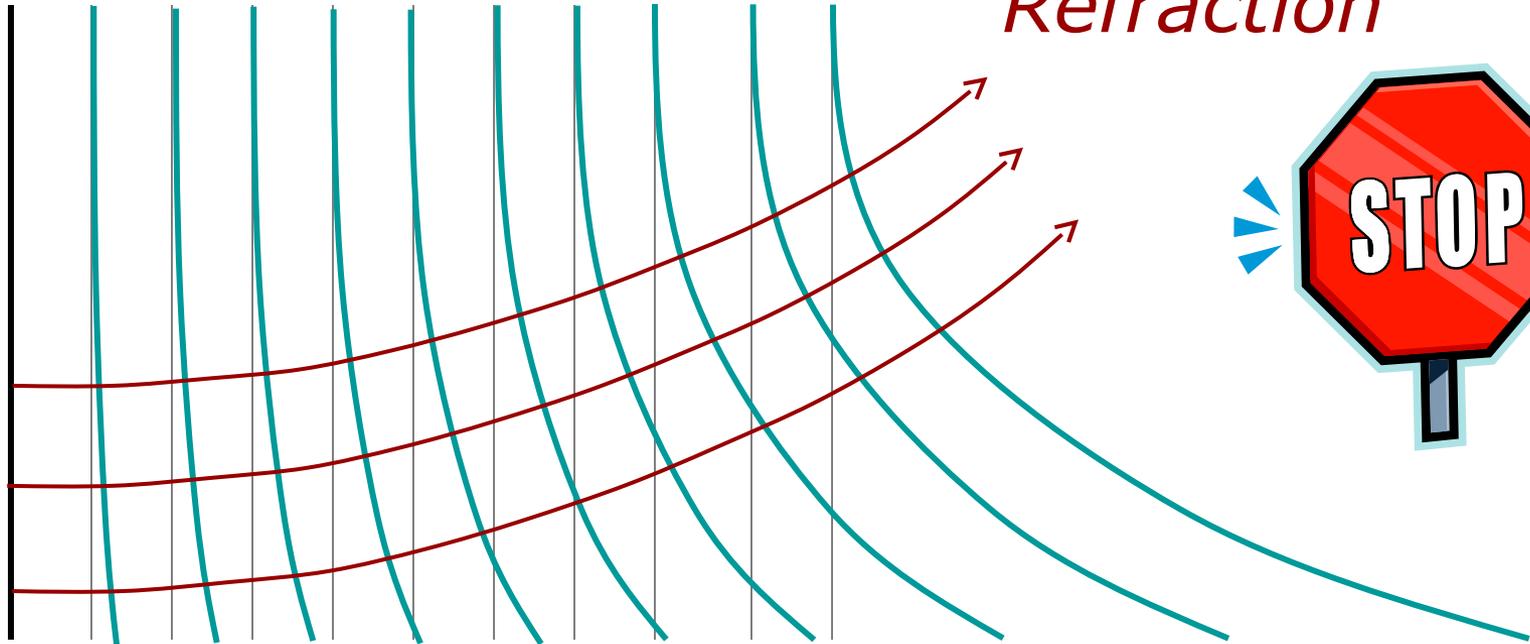
Vitesse du son variable

Air froid = basse vitesse

Les rayons sont courbés vers le haut

Réfraction

Front d'onde



Air chaud = grande vitesse

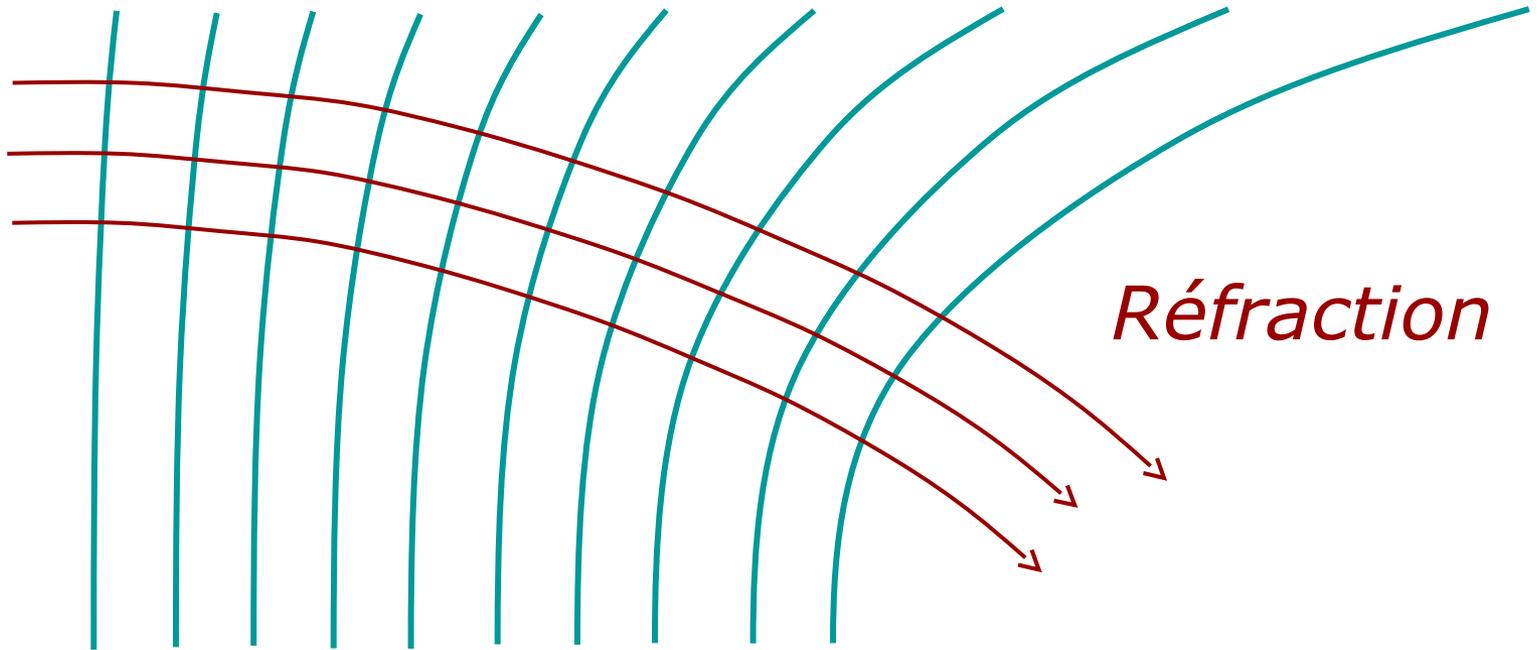
Front d'onde si l'air est plus chaud au sol

Vitesse du son variable

Air chaud = grande vitesse

Les rayons sont courbés vers le sol

inversion



Réfraction

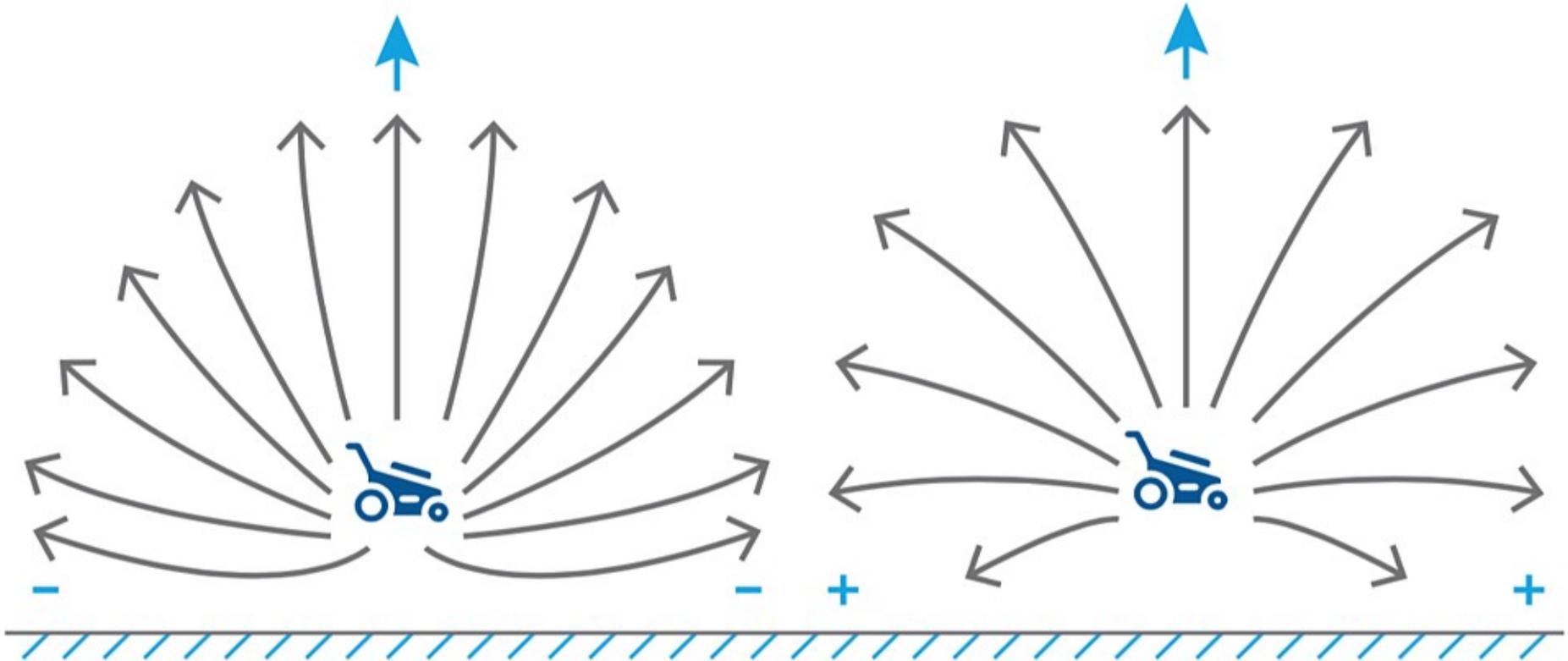
Air froid = petite vitesse

Front d'onde si l'air est plus froid au niveau du sol

Effets sur le niveau sonore

DECREASING TEMPERATURE

INCREASING TEMPERATURE



Exemple de champ de pression

$$c(z) = \frac{c(0)}{\sqrt{1-2az}} \approx c(0)(1+az) \quad c(z) = \frac{c(0)}{\sqrt{1+2az}} \approx c(0)(1-az)$$

$$p(r, z) = \frac{i\pi}{l} \sum_n \frac{H_0^1(k_n r) Ai(\tau_n + z_s/l) Ai(\tau_n + z/l)}{\tau_n [Ai(\tau_n)]^2 - [Ai'(\tau_n)]^2}$$

$$k_0 = 2\pi f/c(0), \quad q = (ik_0 l \rho c)/Z$$

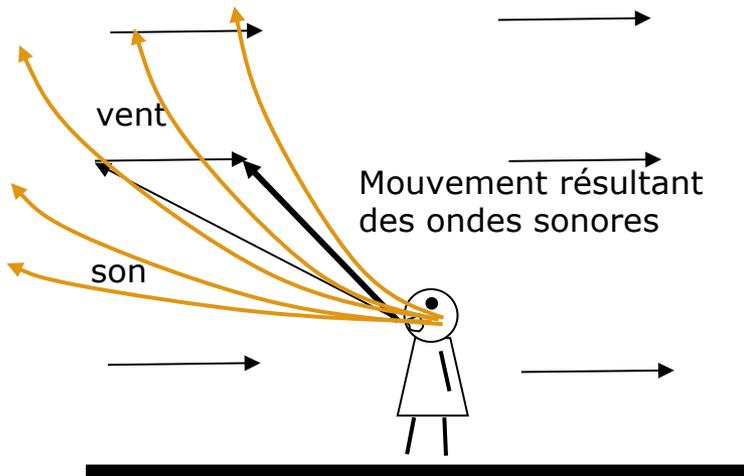
$$l = (R_c/2k_0^2)^{1/3}, \quad R_c = c/(dc/dz)$$

Z impédance du sol

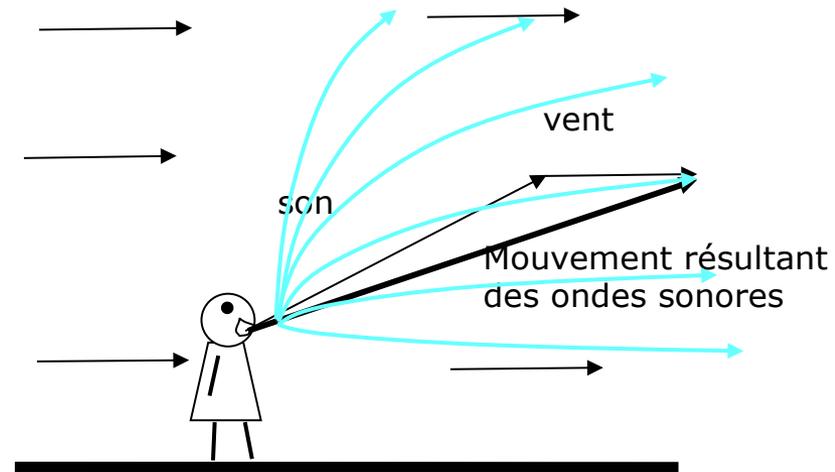
$$\tau_n = (k_n^2 - k_0^2) l^2$$

$$Ai'(\tau_n) + q Ai(\tau_n) = 0$$

Effet du vent



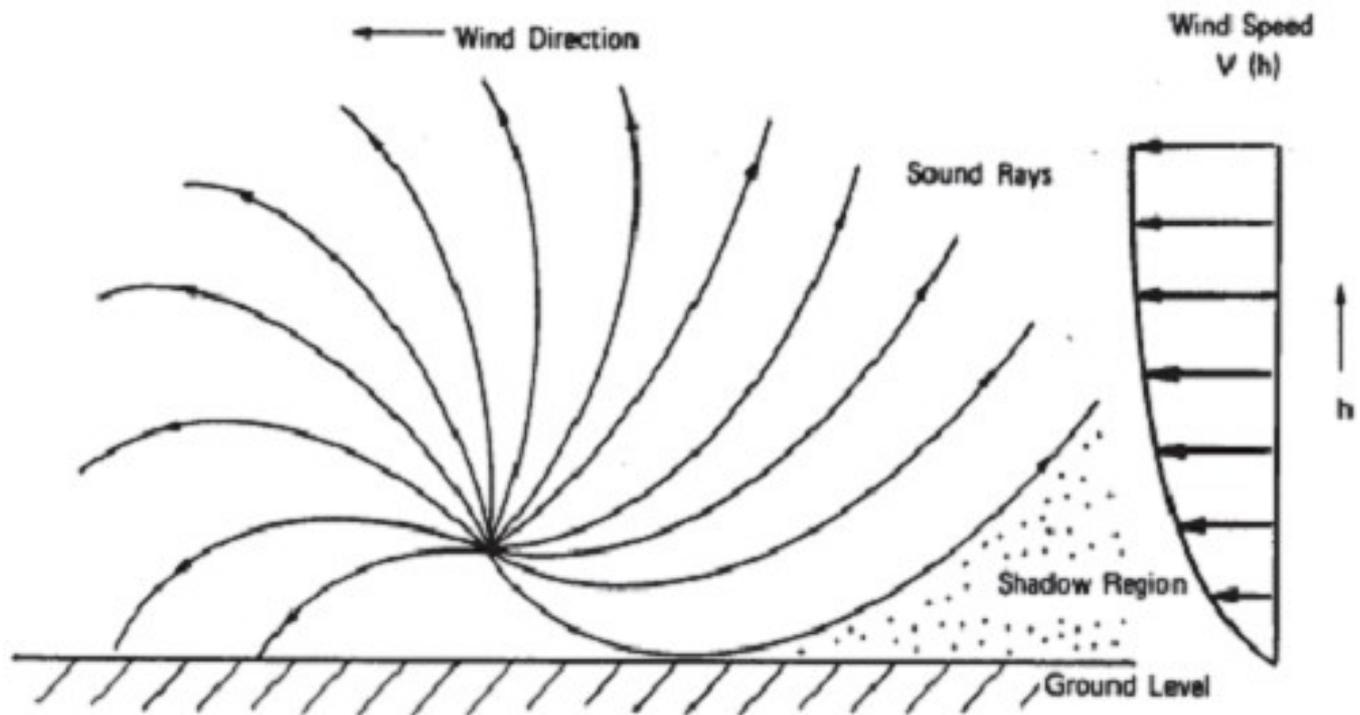
Les rayons sont courbés vers le haut



Les rayons sont courbés vers le bas

Réfraction

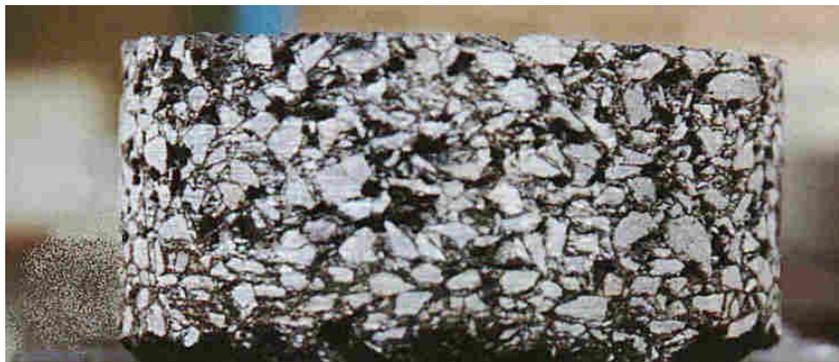
Effets sur le niveau sonore



4. Effet des matériaux et du sol



Enrobés drainants



Pression avec effet de sol

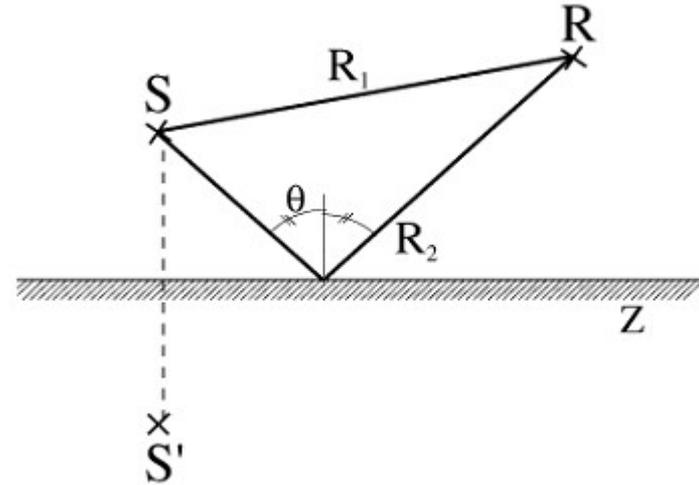
$$p(r, z) = \frac{A(R_1)}{R_1} e^{ikR_1} + Q \frac{A(R_2)}{R_2} e^{ikR_2}$$

$$Q = R_p(\theta) + (1 - R_p(\theta)) F(w)$$

$$R_p(\theta) = \frac{Z \cos \theta - 1}{Z \cos \theta + 1}$$

$$w^2 = \frac{1}{2} ikR_2 (\cos \theta + 1/Z)^2$$

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi} w e^{-w} \operatorname{erfc}(-iw)$$

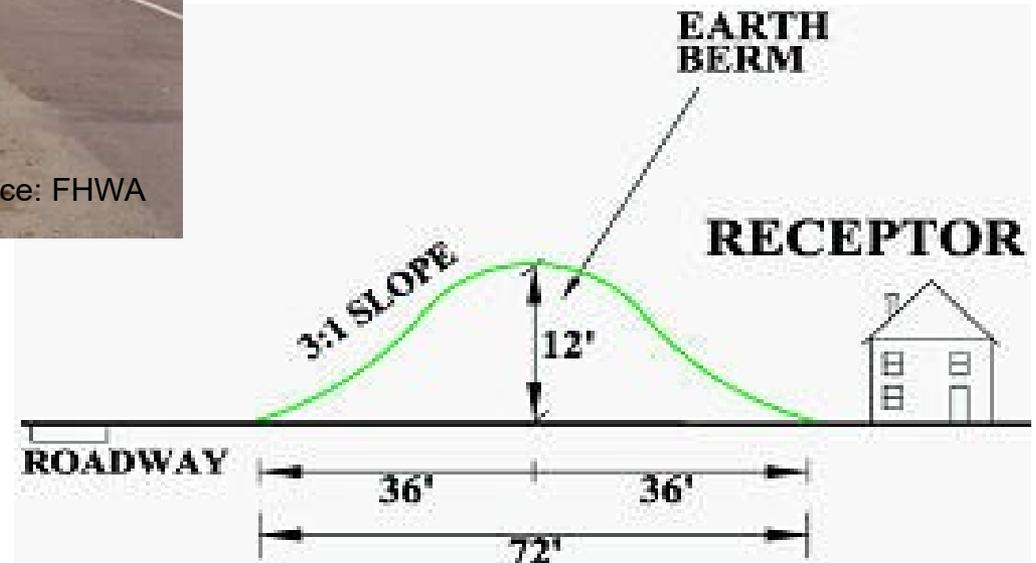


5. Mur antibruit

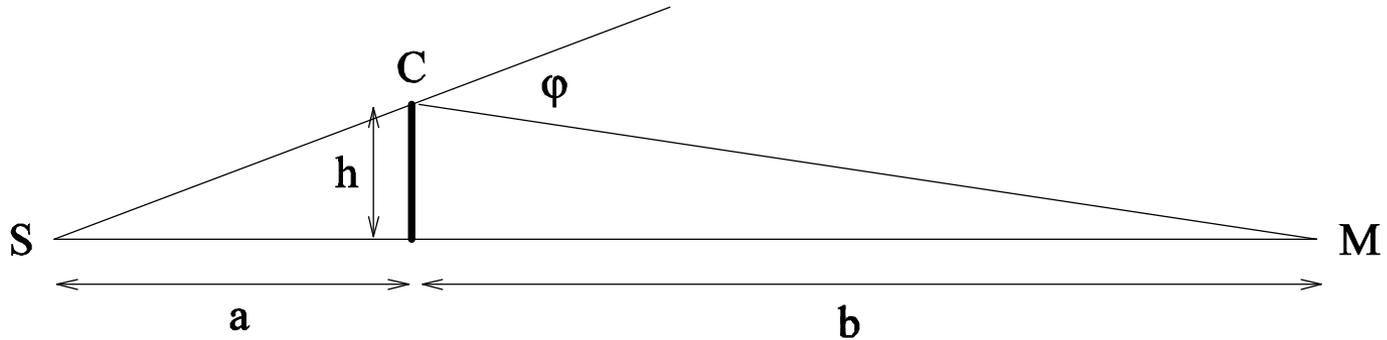




Butte de terre



Mur antibruit



Une formule approchée de Kurze exprime l'atténuation en fonction du paramètre de Fresnel

$$N = 2 \delta / \lambda$$

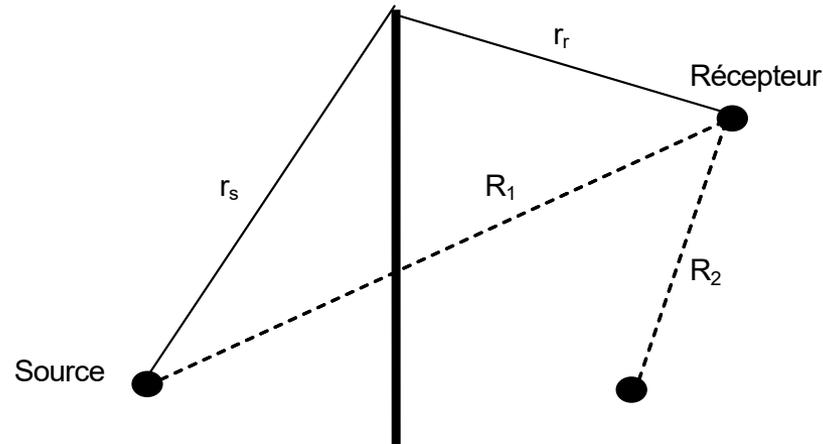
$$\delta = SC + CM - SM$$

$$\Delta L = 20 \log \frac{\sqrt{2 \pi N}}{\tanh \sqrt{2 \pi N}} + 5$$

pour $N \geq -0.2$ avec un maximum de 20 dB

pour $N \leq -0.2$ $\Delta L = 0$

Estimation analytique de la diffraction



Dans la zone d'ombre, à fréquence élevée

$$p \approx i \frac{e^{-i\pi/4}}{8\pi\sqrt{2\pi kR'}} \frac{e^{ikR'}}{\sqrt{r_s r_r}} \left\{ \frac{1}{\cos\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{2}\right)} + \frac{1}{\cos\left(\frac{\theta_s + \theta_r}{2}\right)} \right\}$$

6. Méthodes de calcul

Résoudre l'équation de Helmholtz

$$\Delta p + k^2 p = 0$$

Conditions aux limites sur les surfaces

$$\begin{cases} v = v_0 & \text{sur } \Gamma_1 \\ p = Zv & \text{sur } \Gamma_2 \end{cases}$$

Condition à l'infini : condition de Sommerfeld ou condition de radiation

$$\frac{\partial p}{\partial r} - ikp = o\left(\frac{1}{r}\right) \quad \text{quand } r \rightarrow \infty$$

Equation parabolique

Cas où une direction de propagation principale peut être observée

$$p(x_1, x_2, x_3) = \Psi(x_1, x_2, x_3) e^{-ik_0 x_1}$$

À variation lente selon x_1

À variation rapide selon x_1 (direction privilégiée, typiquement l'horizontale)

Ψ est une sorte d'enveloppe à variation lente modulant « l'onde plane » $e^{-ik_0 x_1}$

$$\Delta p \rightarrow \Delta \Psi - 2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} - k_0^2 \Psi$$

$$\text{or } \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} \ll -2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial x_1}$$

$$\mathbf{1/L^2} \quad \mathbf{1/L \lambda}$$

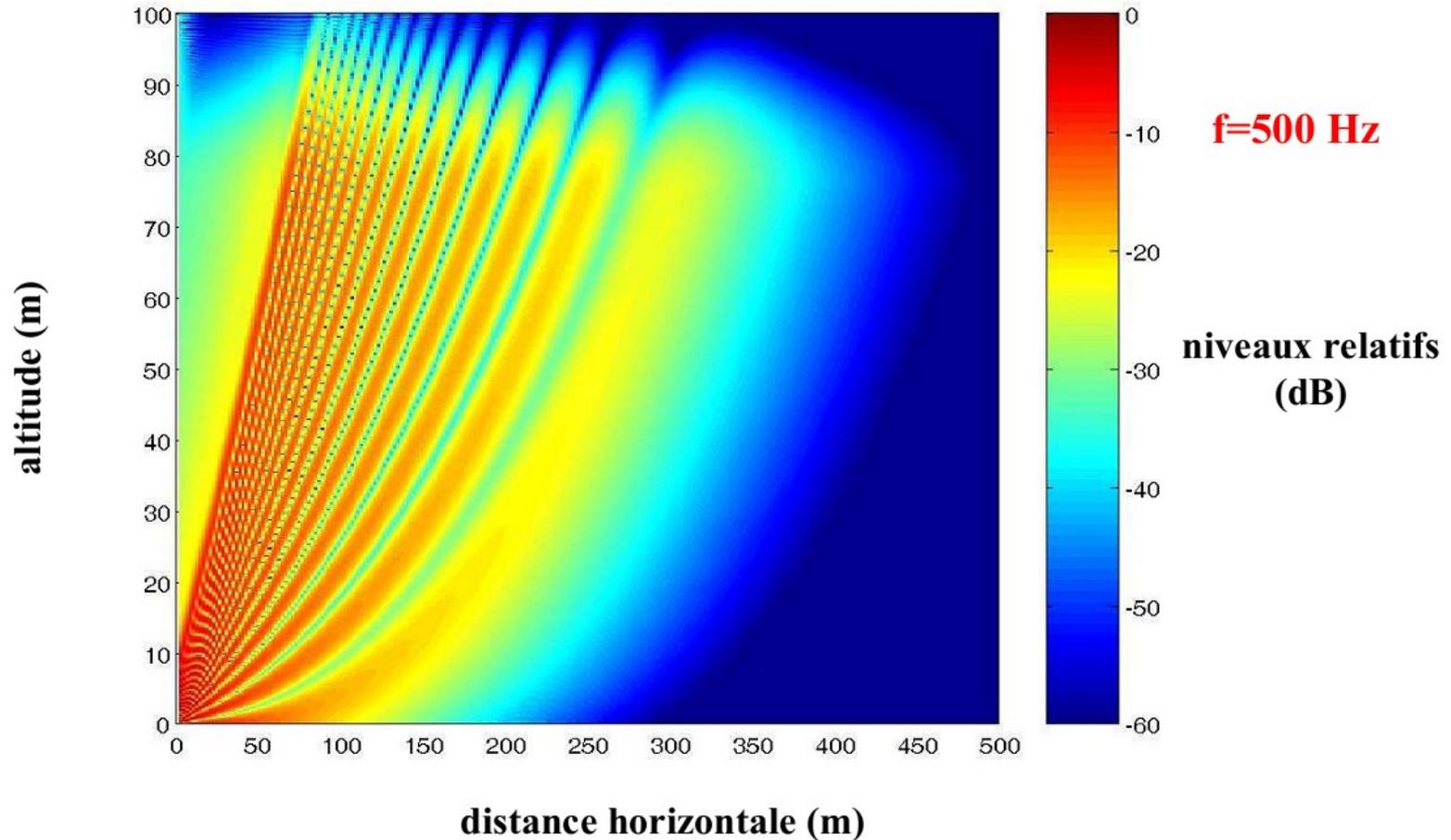
$$-2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} + \Delta_T \Psi + k_0^2 (n^2 - 1) \Psi = 0$$

Cette équation peut se résoudre par une **avancée pas à pas de la solution selon x_1** .

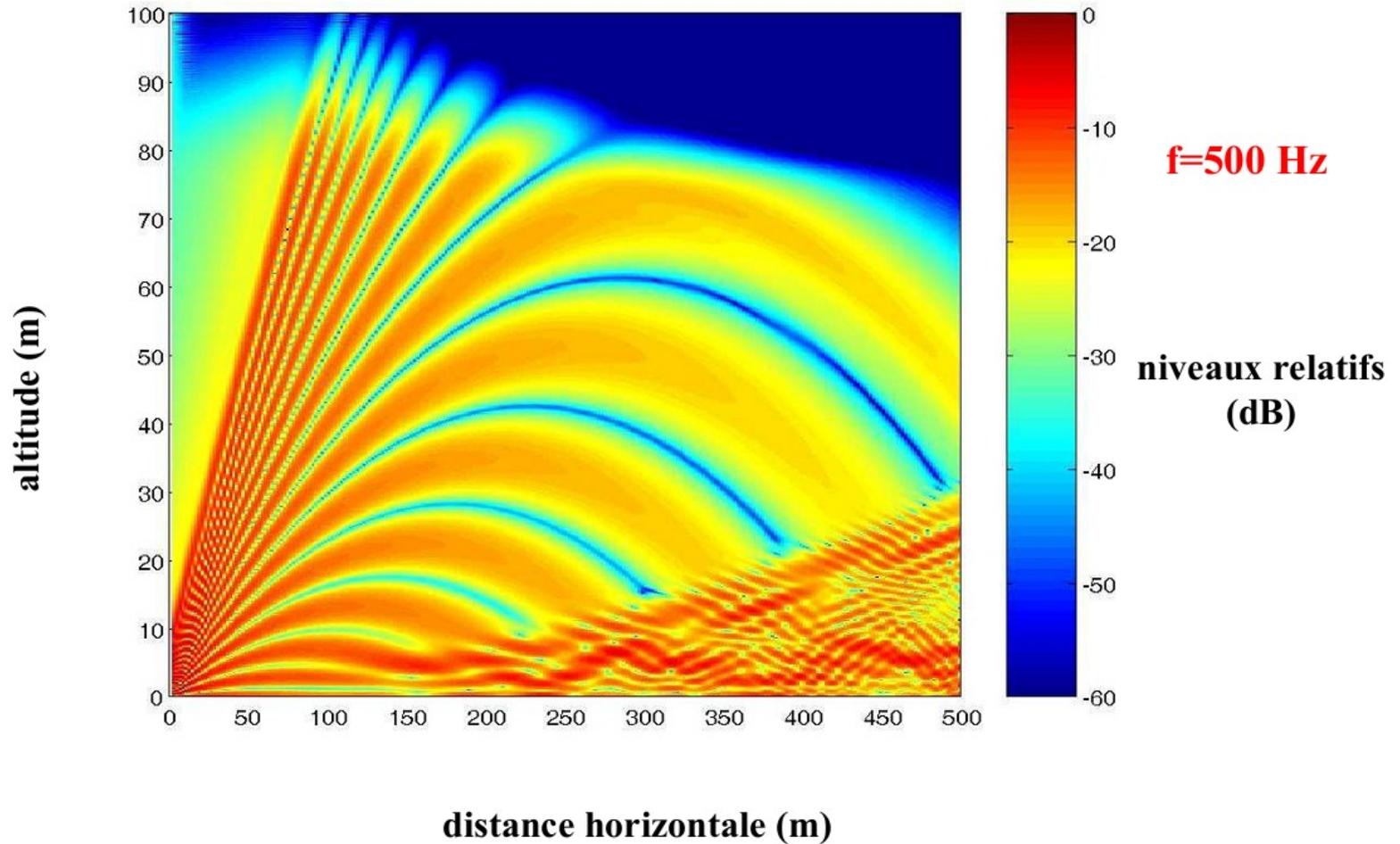
2 avantages décisifs : maillage réduit en x_1 ; résolution « séquentielle » pas à pas au lieu d'un maillage simultané dans les 3 directions.

Le prix à payer : une validité de l'approximation limitée à un cône d'axe x_1 , d'angle au sommet de l'ordre de 15° .

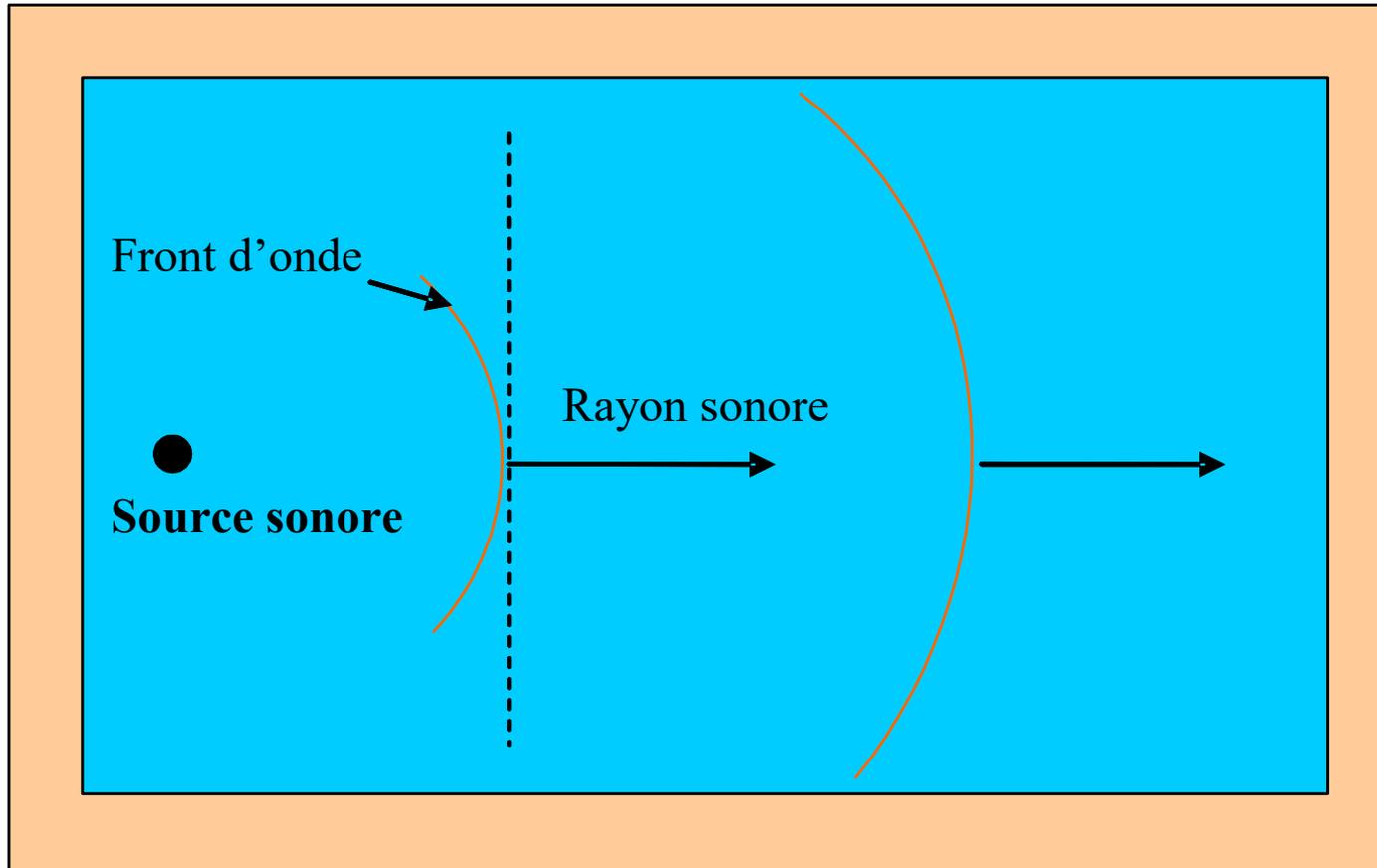
Exemple de calcul de niveaux sonores par la méthode de l'équation parabolique; célérité décroissant linéairement avec l'altitude



Exemple de calcul de niveaux sonores par la méthode de l'équation parabolique; célérité croissant linéairement avec l'altitude

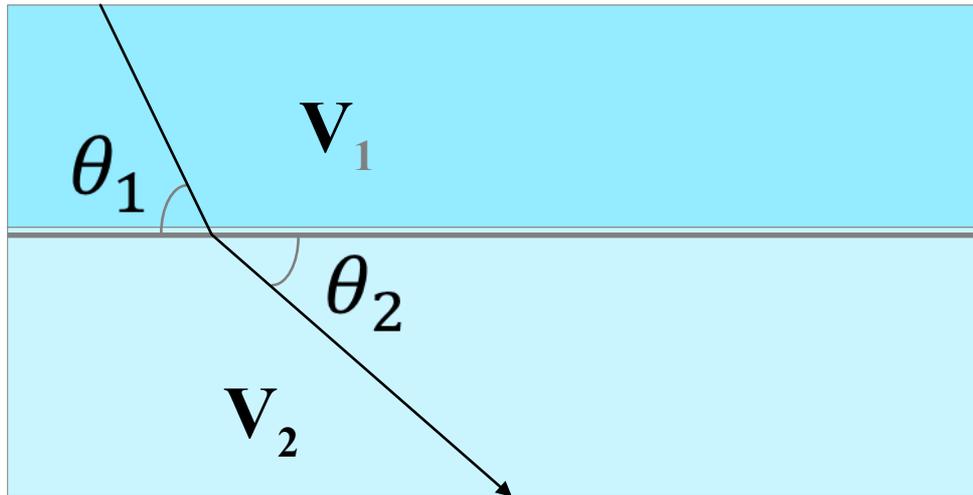


Méthode des rayons

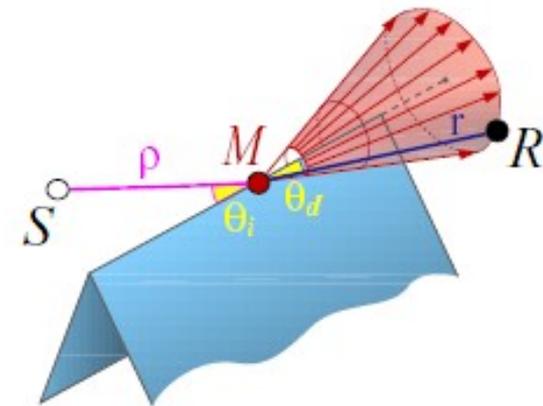
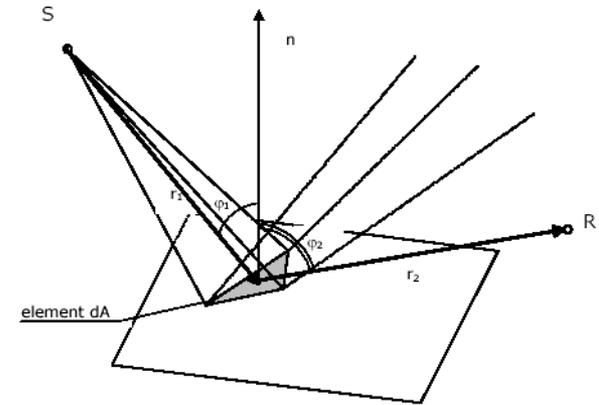


Méthode hautes fréquences $\lambda \ll d$

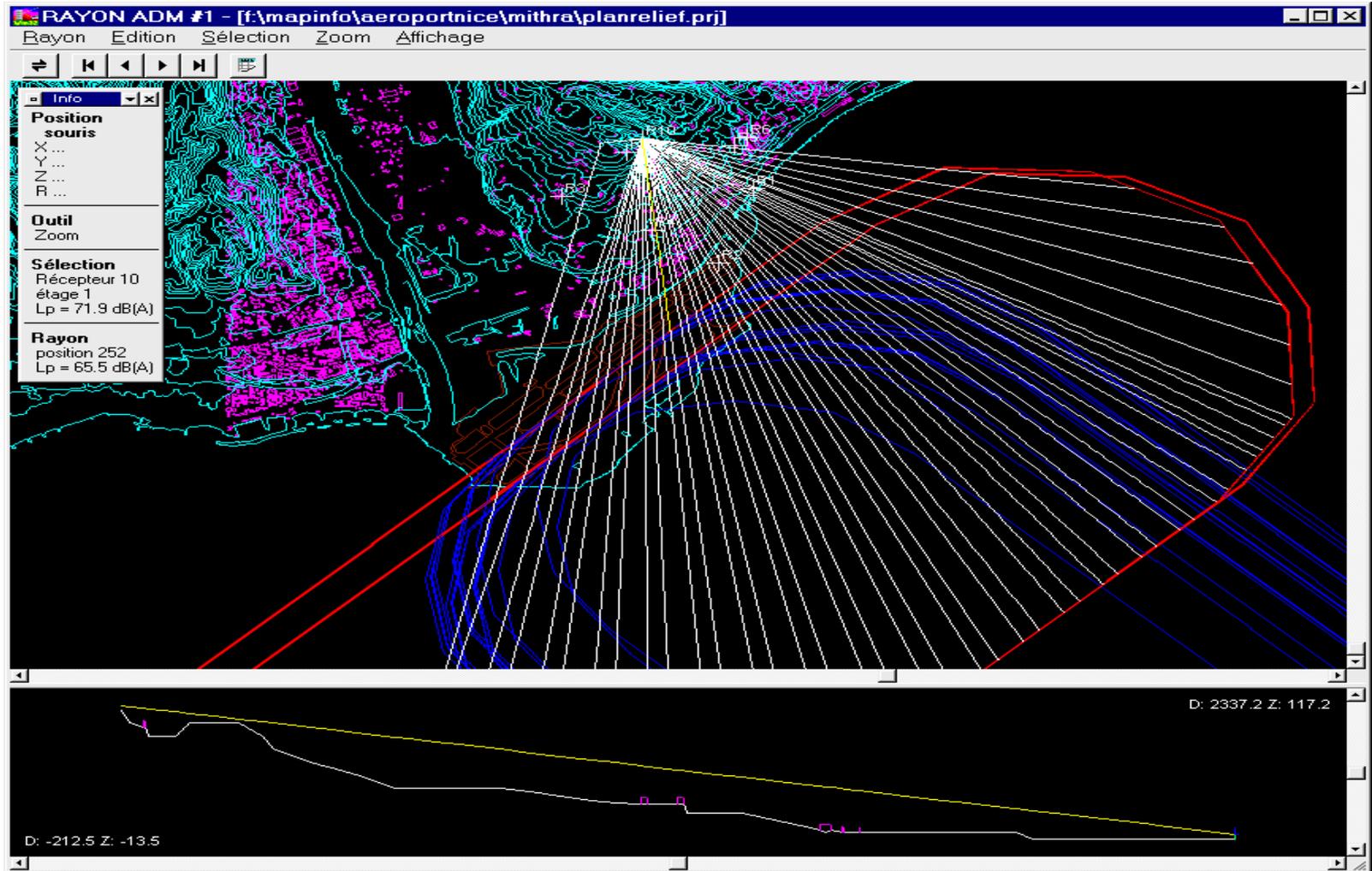
Lois de propagation géométriques



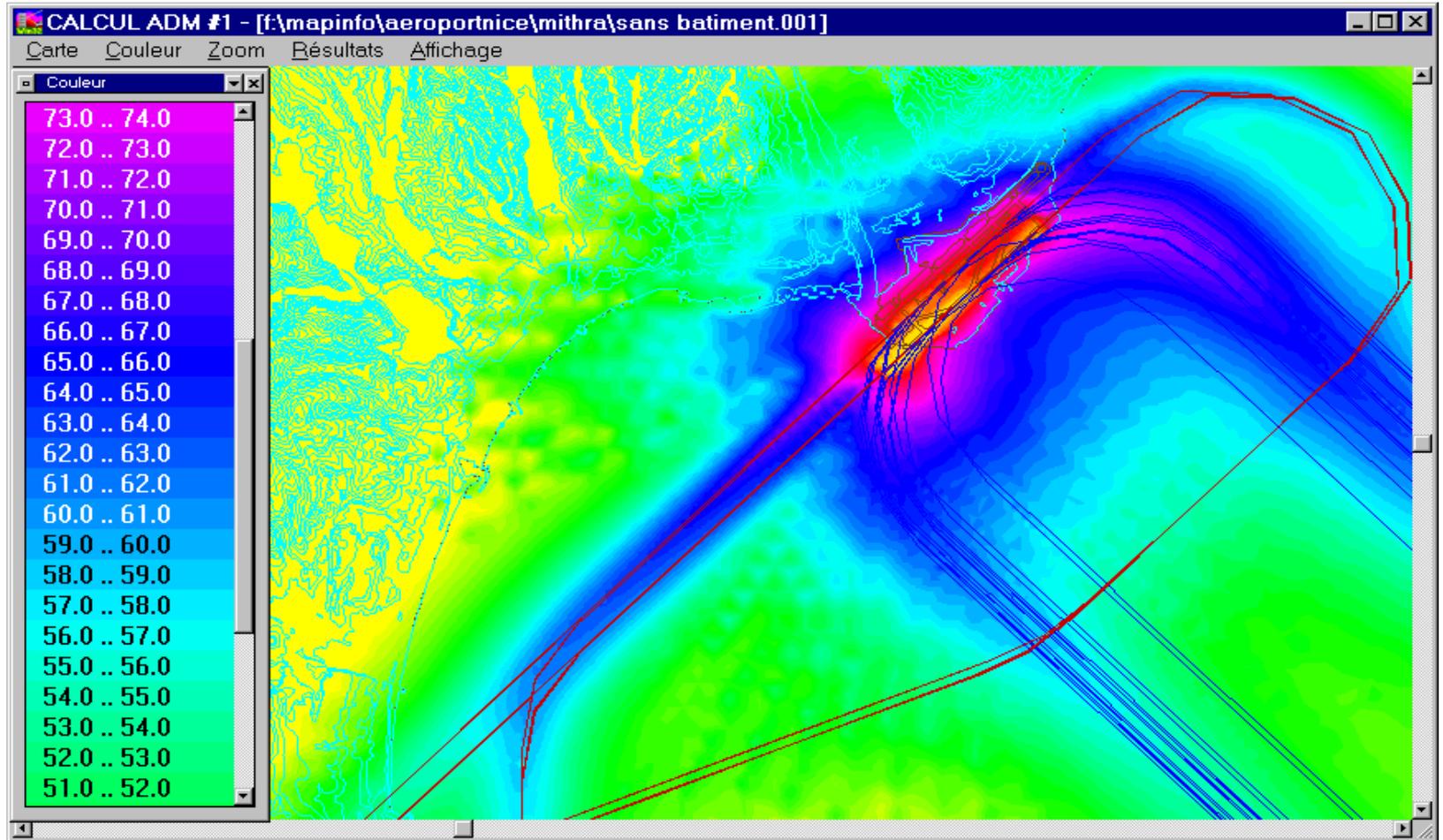
$$\frac{V_1}{\cos \theta_1} = \frac{V_2}{\cos \theta_2} = V_x$$



Tracé de rayons



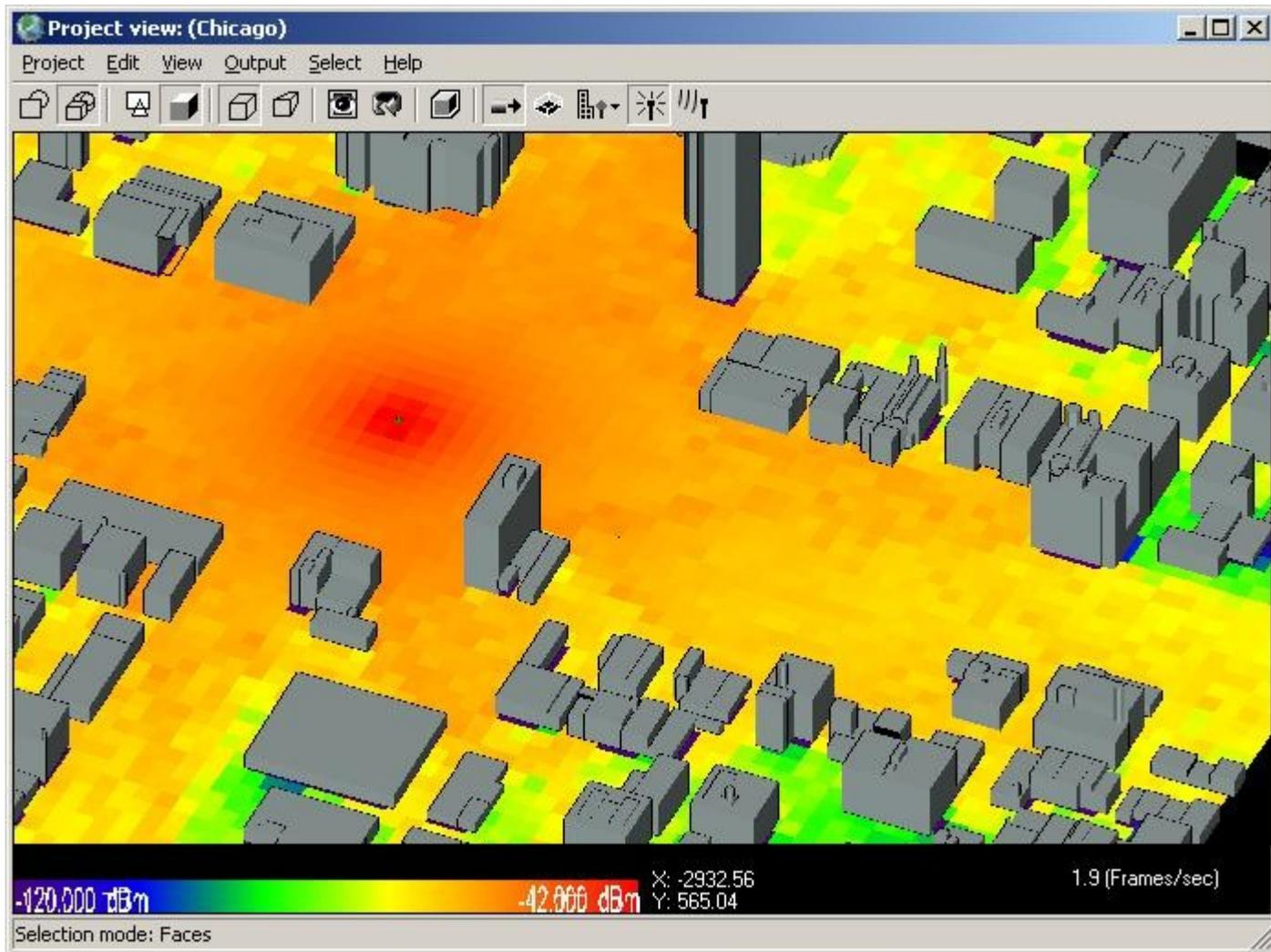
Bruit aérien



Cartographie du bruit à Paris



Cartographie 3D



FIN