Acoustique : Propagation en champ libre

Ricardo Atienza 2008-2009

Suzel Balez / Nicolas Remy

CRESSON

École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble

L5C

Rappels

- le dB(A) est la plus petite unité perçue par l'oreille humaine… en théorie, en labo.
  - couramment, on se rend compte d'un changement de niveau sonore **si la variation est de l'ordre de 3dB(A)**
  - quand on **double la source**, on **augmente le niveau sonore de 3dB(A)** : 60 dB(A) + 60 dB(A) = 63 dB(A)
  - Inversement, diminuer par 2 la puissance de la source, c'est diminuer son niveau sonore de 3dB(A).
  - pour avoir la sensation qu'on a diminué ou augmenté la puissance de la source par 2, il **faut une variation physique de 10 dB(A).**
  - Une source ponctuelle, en champ libre **décroît de -6dB(A) par doublement de distance**
  - Une source linéique, en champ libre, **décroît de -3dB(A) par doublement de distance**

PLAN

- Grandeurs acoustiques
  - Niveau de puissance
  - Intensité acoustique
  - Niveau d'intensité acoustique
- Cas d'une onde plane
- Traitement du bruit en champ libre
- Les obligations

Grandeurs acoustiques Niveau de puissance

- **1- Niveau de puissance (en dB)** $Lw = 10 \log \frac{W}{W_0}$

  avec

  - W, puissance acoustique de la source
  - W0, puissance acoustique de référence = 10^{-12} watts

Grandeurs acoustiques **Intensité**

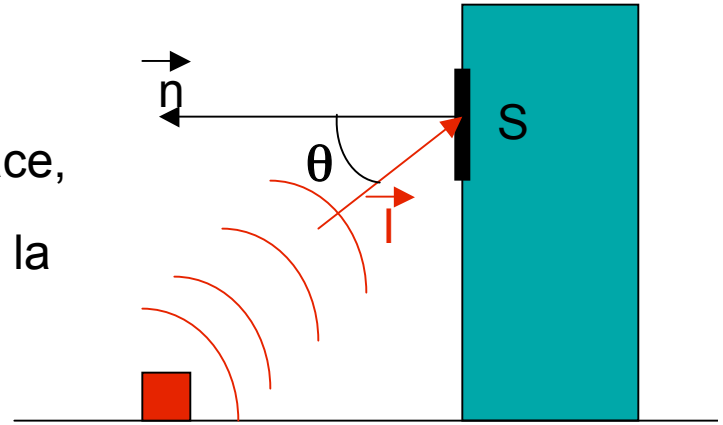
- **2- Intensité acoustique (en W/m2)**

$$W = I \times S \times \cos\theta$$

avec

  - W, puissance acoustique qui passe par la surface S
  - I, intensité acoustique de la source
  - θ, angle entre la normale à S et l'incidence de l'onde acoustique

- Autrement dit, **l'intensité acoustique** de la source se définit comme un vecteur qui a :
  - une direction et un sens, celle et celui de l'onde acoustique
  - une norme qui représente l'énergie qui se propage exprimée en Watt/m2
  - Si l'onde arrive perpendiculairement à la surface, le cosΘ vaut 1, sa valeur maximale. Le cosΘ permet de caractériser l'orientation relative de la surface par rapport à l'incidence de l'onde acoustique.



Grandeurs acoustiques Niveau d'intensité

- **3- Niveau d'intensité acoustique (en dB)**

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

avec

  - I, intensité acoustique de la source
  - I0, intensité acoustique de référence = 10-12 watts

- Attention au vocabulaire : Il ne faut pas confondre
  - La puissance acoustique (**W**, en watts) et le *niveau* de puissance acoustique (**Lw**, en dB)
  - L'intensité acoustique (**I**, en W/m2) et le *niveau* d'intensité acoustique (LI, en dB)
  - La pression acoustique (**P**, en pascal) et le *niveau* de pression acoustique (**Lp**, en dB)

  - Ce qu'on entend ou ce que l'on mesure, c'est **Lp**, le **niveau de pression** acoustique **exprimé en dB ou en décibel A [dB(A)]**
  - Tout problème d'acoustique vise à relier le Lp (niveau de pression acoustique) au niveau de puissance acoustique (Lw) en utilisant LI comme intermédiaire de calcul.

Grandeurs acoustiques

- La puissance acoustique (**W**, en watts) et le *niveau* de puissance acoustique (**Lw**, en dB)
- L'intensité acoustique (**I**, en W/m2) et le *niveau* d'intensité acoustique (LI, en dB)
- La pression acoustique (**P**, en pascal) et le *niveau* de pression acoustique (**Lp**, en dB)

- Ce qu'on entend ou ce que l'on mesure, c'est **Lp**, le niveau de pression acoustique **exprimé en dB ou en décibel A [dB(A)]**

- Tout problème d'acoustique vise à relier le Lp (niveau de pression acoustique) au niveau de puissance acoustique (Lw) en utilisant LI comme intermédiaire de calcul.

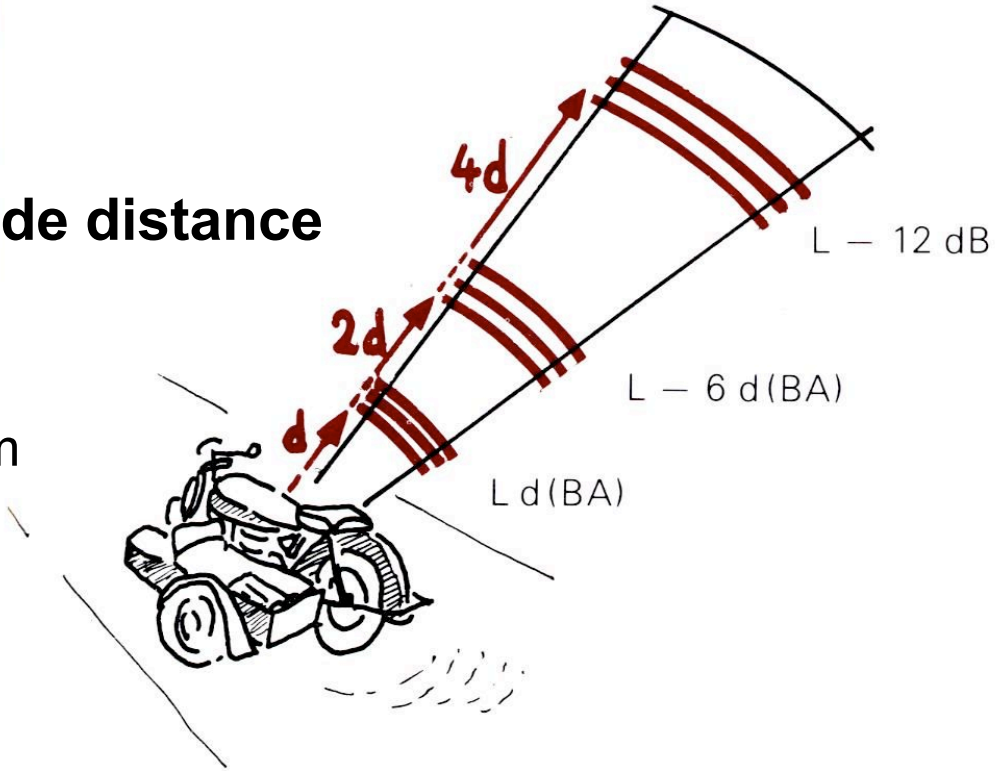
$$W = I \times S \times \cos\theta$$

$$Lw = 10\log\frac{W}{W_0} \qquad L_I = 10\log\frac{I}{I_0} \qquad L_p = 10\log\frac{P^2}{P_0^2}$$

$W_0 = 10^{-12}$ W $\qquad I_0 = 10^{-12}$ W/m2 $\qquad P_0 = 20\mu$Pa ou 2.10^{-5} Pa

Cas d'une onde plane / 1

- En champ libre, une source ponctuelle décroît de :
  - **- 6dB(A)/ doublement de distance**
  - ***exemple***
    - Si Lp = 75 dB(A) à 10m
    - alors
    - Lp = 69 dB(A) à 20m
    - Lp = 63 dB(A) à 40m
    - Lp = 57 dB(A) à 80m
    - etc…



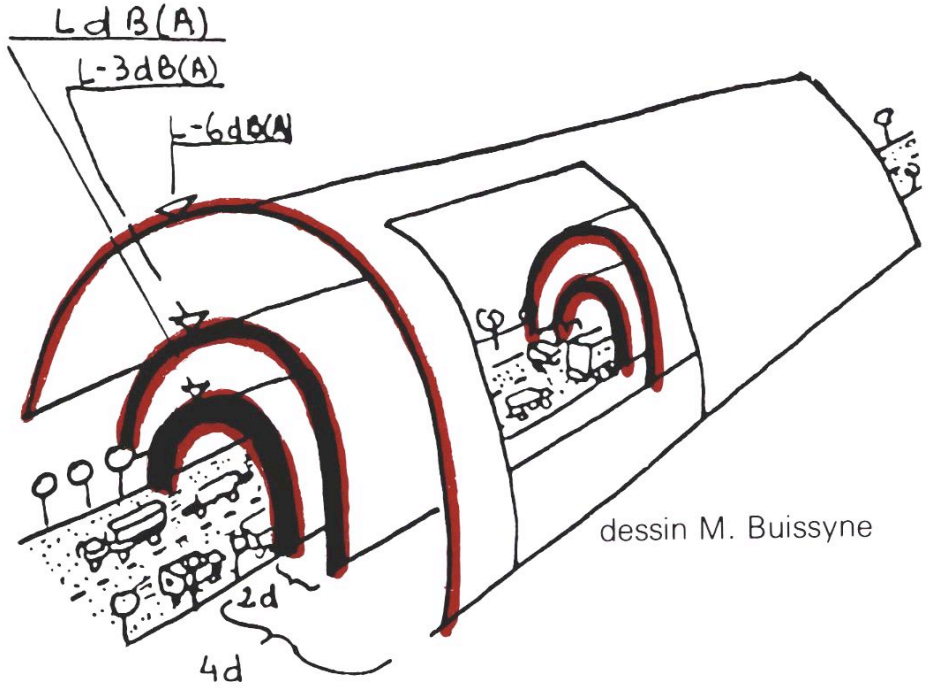
Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Cas d'une onde plane / 1

- En champ libre, une source **linéique** décroît de :

- **- 3dB(A)/ doublement de distance**

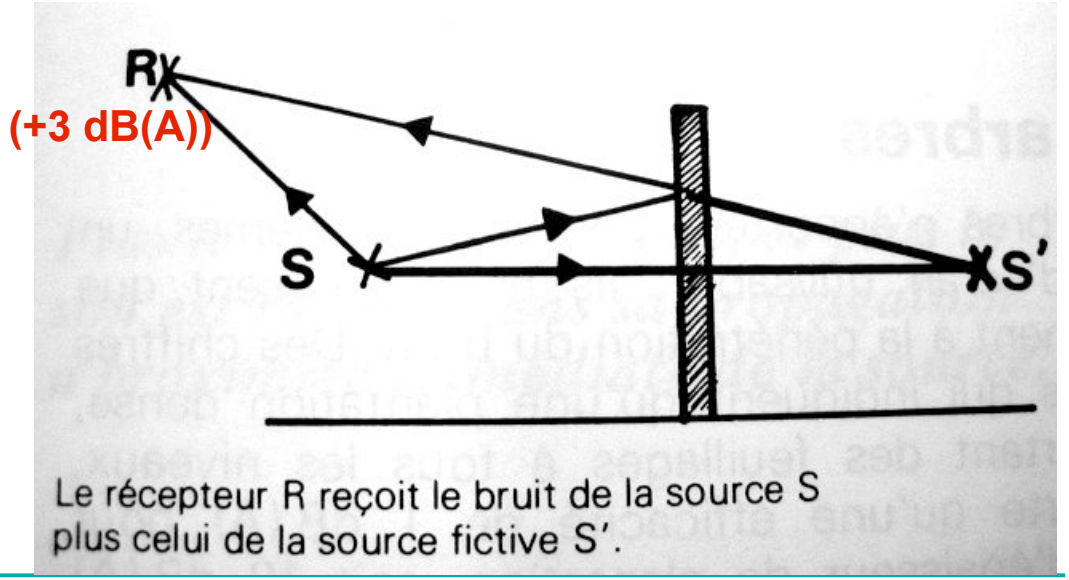
- ***exemple***
  - Si Lp = 75 dB(A) à 10m alors
  - Lp = 72 dB(A) à 20m
  - Lp = 69 dB(A) à 40m
  - Lp = 66 dB(A) à 80m
  - etc…



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Cas d'une onde plane / 2

- **Onde plane devant une paroi pleine**
  - Le point de réception reçoit l'énergie acoustique de la source S et d'une source fictive S'… comme si R recevait la contribution de 2 sources sonores de puissance identique : + 3dB(A)



Le récepteur R reçoit le bruit de la source S plus celui de la source fictive S'.

Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Cas d'une onde plane / 3

- **1- Relation entre LI, Lp et Lw**
  - On peut montrer que pour une onde plane, on a :

$$I = \frac{P^2}{\rho c}$$

avec
    - P2, puissance acoustique efficace en Pascal
    - ρ, masse volumique de l'air = 1,16Kg/m3
    - c, célérité du son (vitesse du son) = 342m/s

  - Si on forme les rapports suivants (I/I0) et P2/P02, on montre l'égalité suivante :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{P^2}{400*10^{-12}} = \frac{P^2}{4*10^{-10}}$$

$$\frac{P^2}{P_0^{\ 2}} = \frac{P^2}{(2*10^{-5})^2} = \frac{P^2}{4*10^{-10}}$$

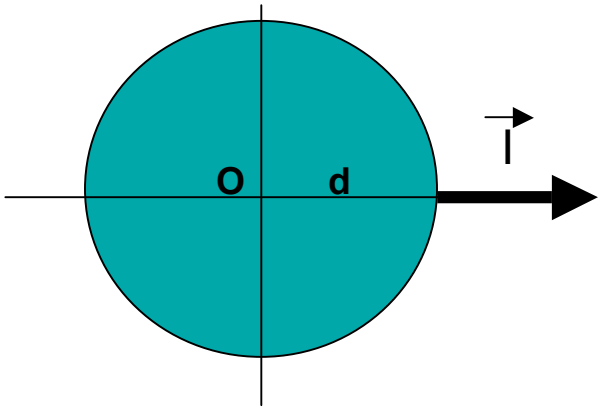
(P_0 = 20μPa ou 2.10^{-5} Pa)

  - et qu'on prend le 10log de chacun des morceaux de l'égalité, on montre que pour une onde plane, on a :

LI = Lp

2- Source omnidirectionnelle en champ libre

- On imagine une source ponctuelle qui émet une puissance acoustique W qui est égale à celle qui traverse une sphère virtuelle de rayon d.



Source ponctuelle située en O selon une sphère de rayon d (ici projetée sur un plan)

Par définition, la puissance acoustique rayonnée par un élément de surface est :

$$dW = \int_s I \, dS$$

$$W = I . \int_s dS$$

$$W = I . 4\pi . d^2$$

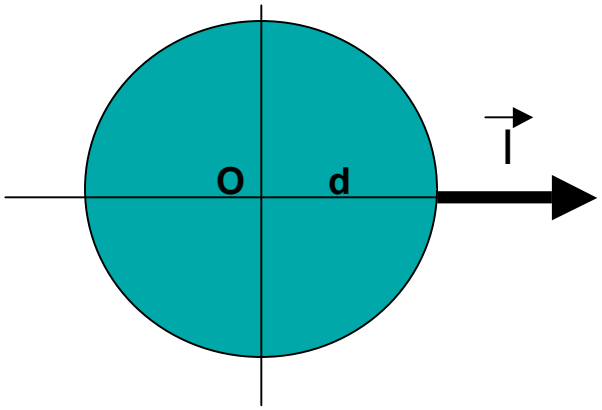
Exemple :

à 1m, I = W / 12.56

à 2m, I = W / 50.27

à 4m, I = W / 201.06

Cas d'une onde plane / 3



Source ponctuelle située en O selon une sphère de rayon d (ici projetée sur un plan)

Par suite, on peut montrer que :

$$\frac{W}{10^{-12}} = \frac{I}{10^{-12}}.4\pi d^2$$

$$10\log(\frac{W}{10^{-12}}) = 10\log(\frac{I}{10^{-12}}.4\pi d^2)$$

$$Lw = 10\log(\frac{I}{10^{-12}}) + 10\log(4\pi d^2)$$

$$Lw = L_I + 10\log(4\pi d^2)$$

avec

$$L_I = Lp$$

$$Lp = Lw - 10\log(4\pi d^2)$$

Exemple :

à 1m, Lp = Lw – 10.99

à 2m, Lp = Lw – 17.01

à 4m, Lp = Lw – 23.03

** à une certaine distance d, grande, on peut considérer que localement l'onde sphérique se comporte comme une onde plane*

Cas d'une onde plane / 4

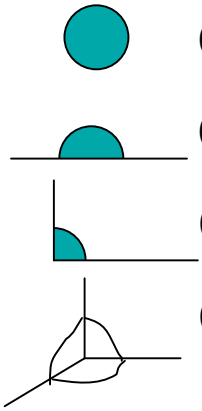
3- Source omnidirectionnelle en champ libre – Généralisation

- Si la source est « contrainte » par un obstacle (plan, angle…), l'onde qui est réfléchie n'est plus sphérique. On doit corriger la pression ou l'intensité acoustique **par un facteur de directivité Q.**

  La formule de propagation en champ libre s'écrit donc :

$$Lp = Lw + 10\log\frac{Q}{4\pi.d^2}$$ **en dB(A)**

- **Avec Q, facteur de directivité égal à :**



Q = 1, omnidirectionnelle

Q = 2, omni posée sur un sol

Q = 4, omni dans angle dièdre

Q = 8, omni dans angle trièdre

Exemple: à 1m,

Q=1 > Lp = Lw +10log1/12.56 = Lw - 10.99

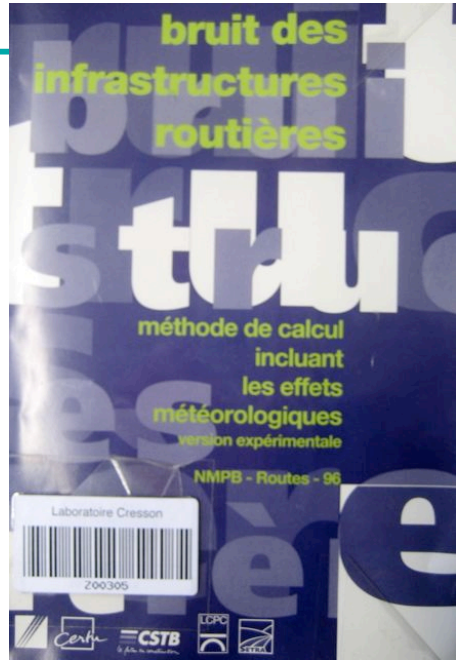
Q=2 > Lp = Lw – 7.98

Q=4 > Lp = Lw – 4.97

Q=8 > Lp = Lw – 1.95

Cas d'une onde plane / 4

$$Lp = Lw + 10\log\frac{Q}{4\pi.d^2}$$ en dB(A)



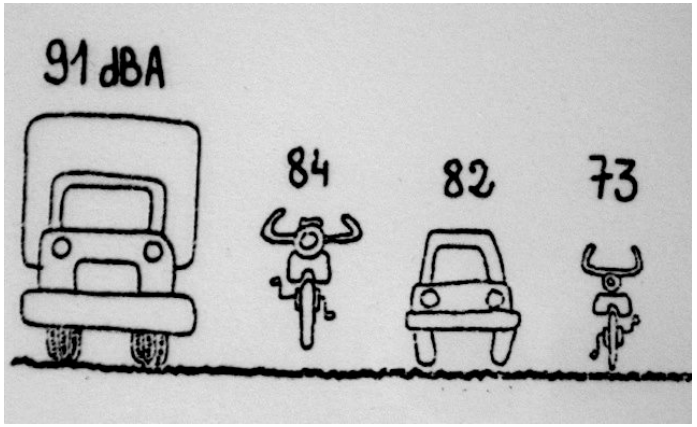
- **Attention cette formule n'est valable que pour une distance d<150m**
- Au-delà, on ne peut plus négliger :
  - **le revêtement de sol**
  - **l'humidité de l'air** : le niveau sonore augmente avec l'humidité de l'air (exception neige et brouillard)
  - **la température** : le niveau sonore augmente légèrement avec la température
  - **le vent**
    - **Modification du niveau sonore en dB(A)**

	d=100m	**d=500m**	**d=1000m**
avec le vent	+0,5 à 1	+1	+4 à 5
contre le vent	-5 à -10	-16	-20

1- Réduire à la source

- C'est généralement contre les sources d'origine mécaniques que l'on développe des stratégies de protection (principalement bruits liés aux transports)

- Pour le trafic routier
  - bruit de contact pneumatique/chaussée
    - Chaussées poreuses « silencieuses »
    - Travail sur les pneumatiques
  - Détournement de trafic
  - Réduction de la vitesse



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Seuil de 50Km/h :

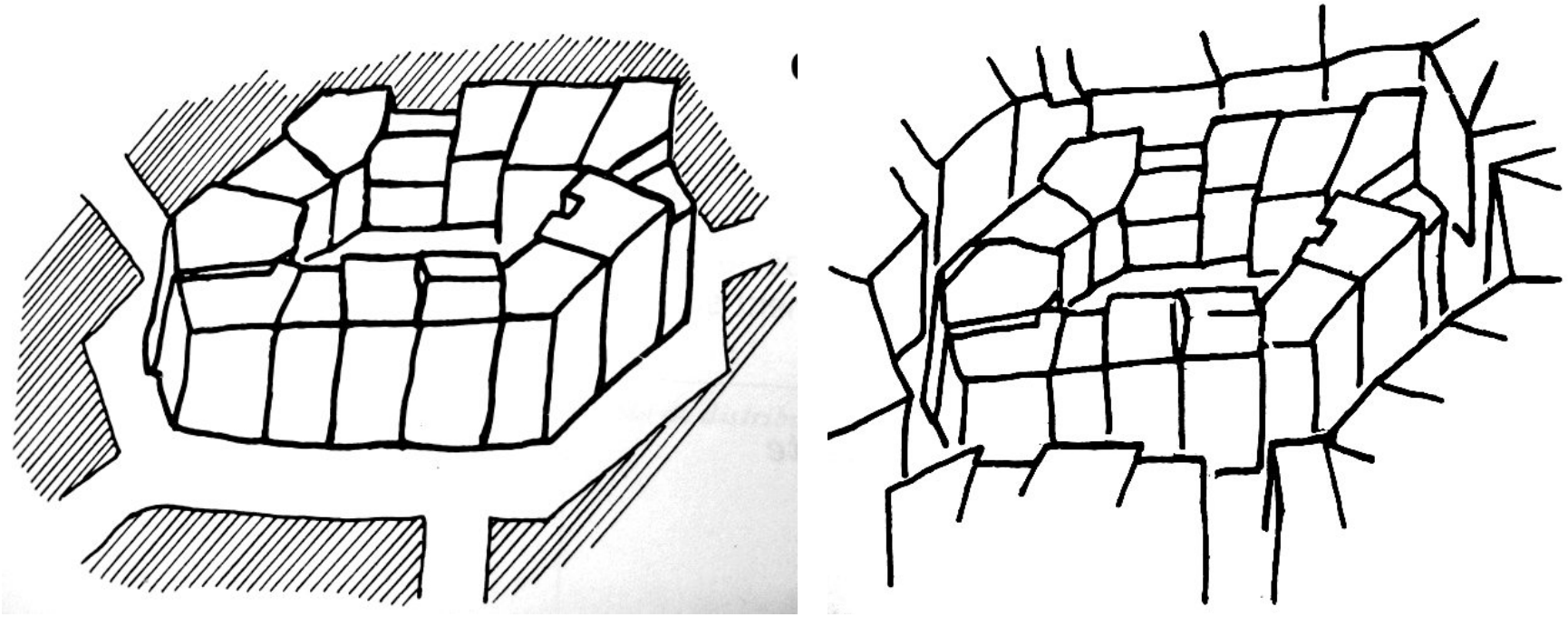
- au-dessous, les bruits mécaniques dominent : moteur, …

-au-dessus, les sons de frottement pneumatique-chaussée.

- Pour les trains et avions, stratégies similaires.

2- Formes urbaines et « étanchéité » sonore

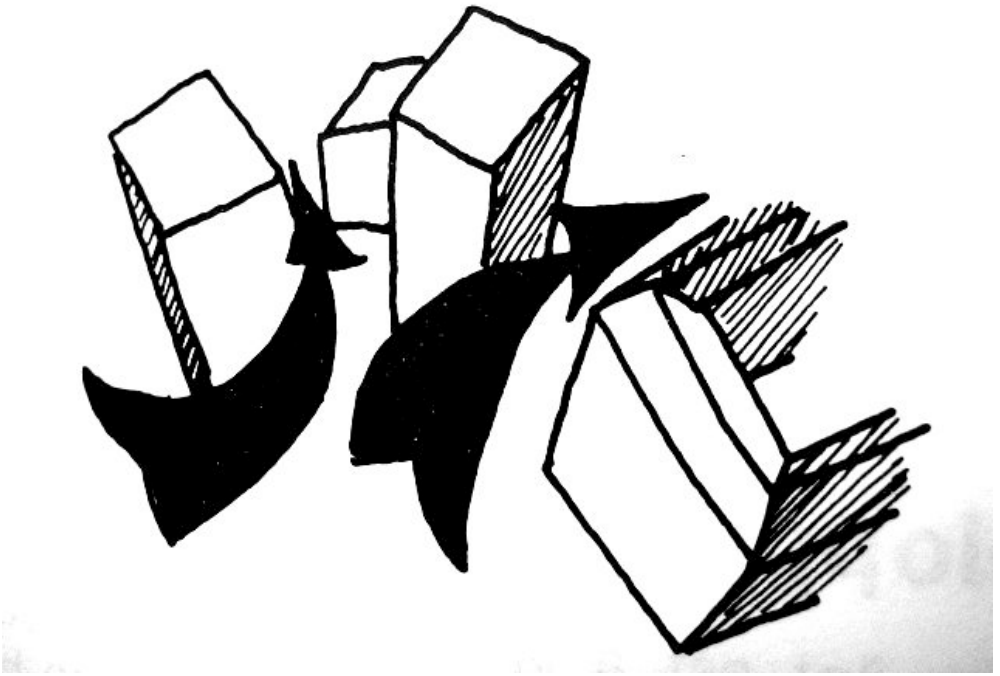
L'îlot est une forme urbaine qui peut se protéger des bruits des transports… l'enveloppe îlot encore plus..



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

3- Formes urbaines et « porosité » sonore

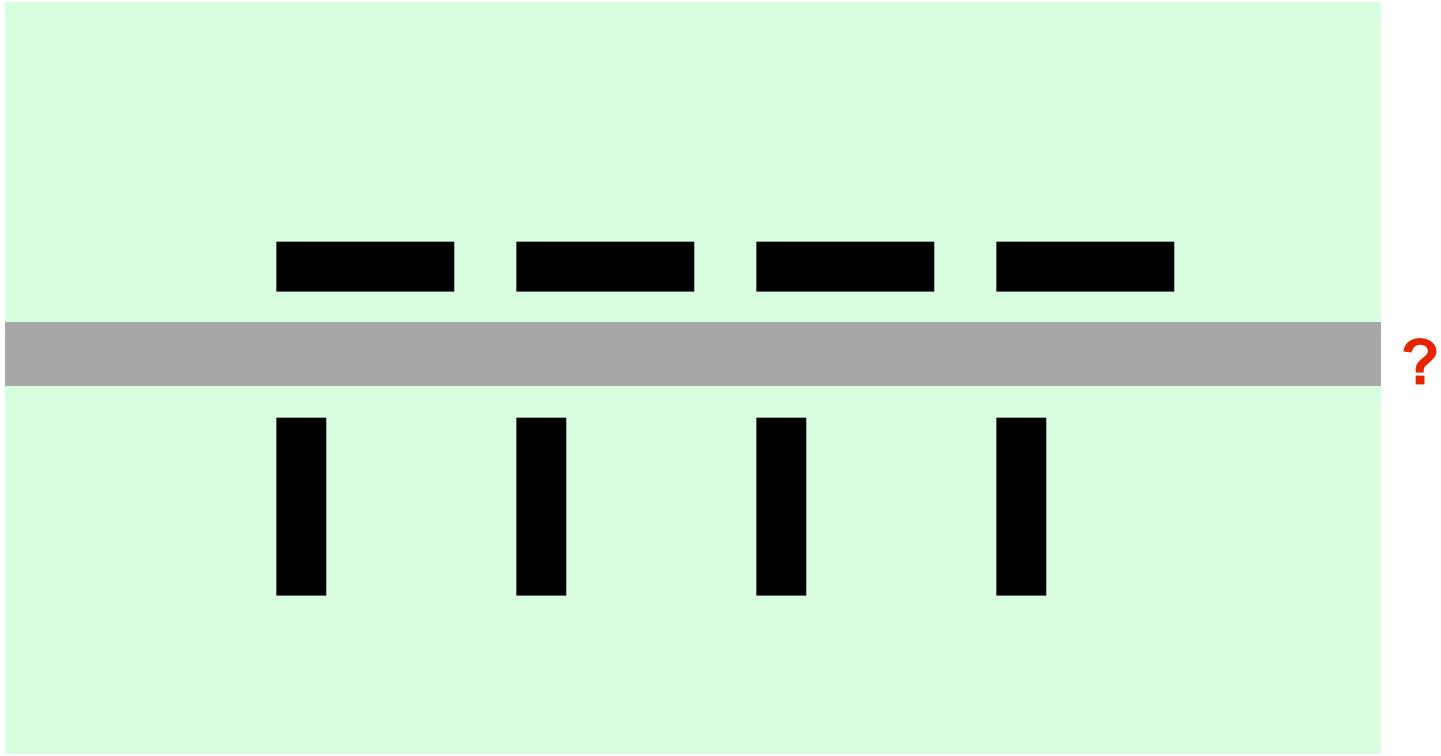
- Analogie possible avec le comportement du vent en milieu urbain.



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

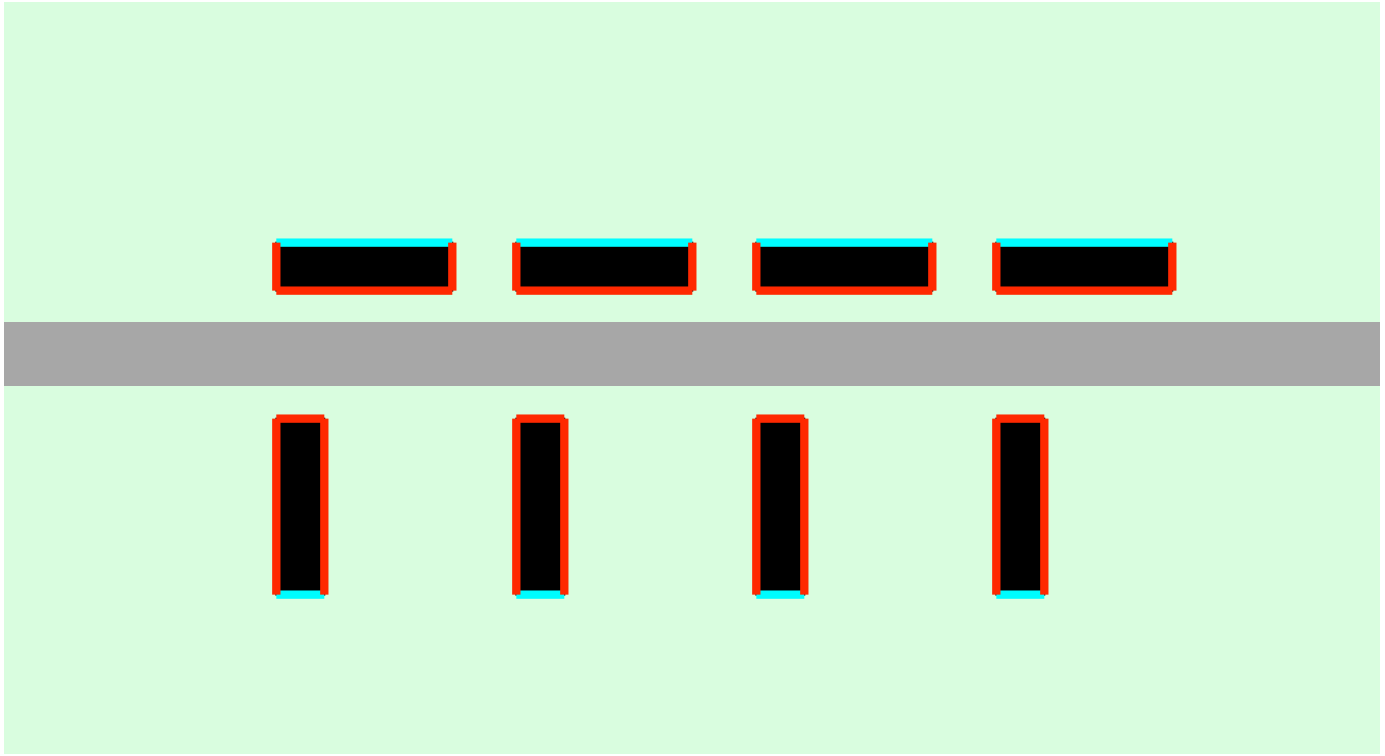
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



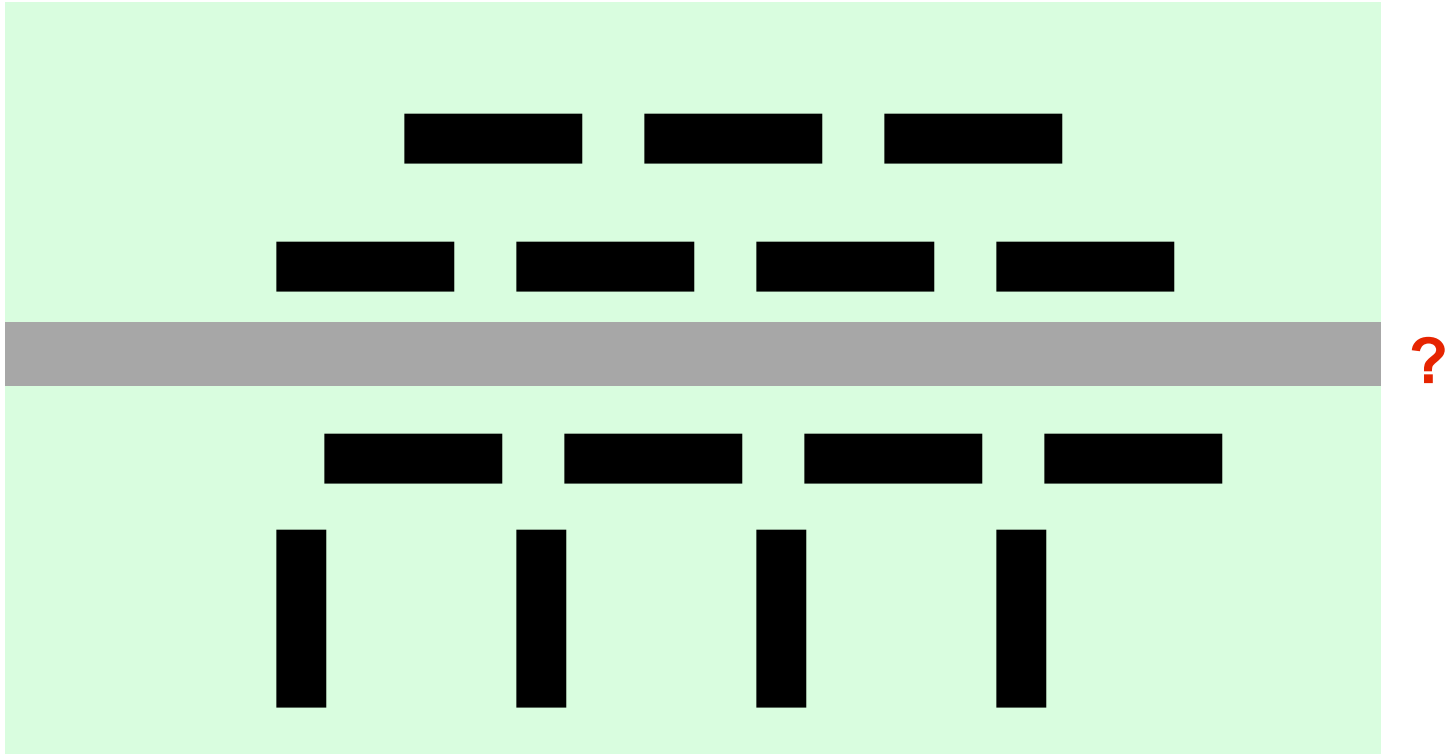
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



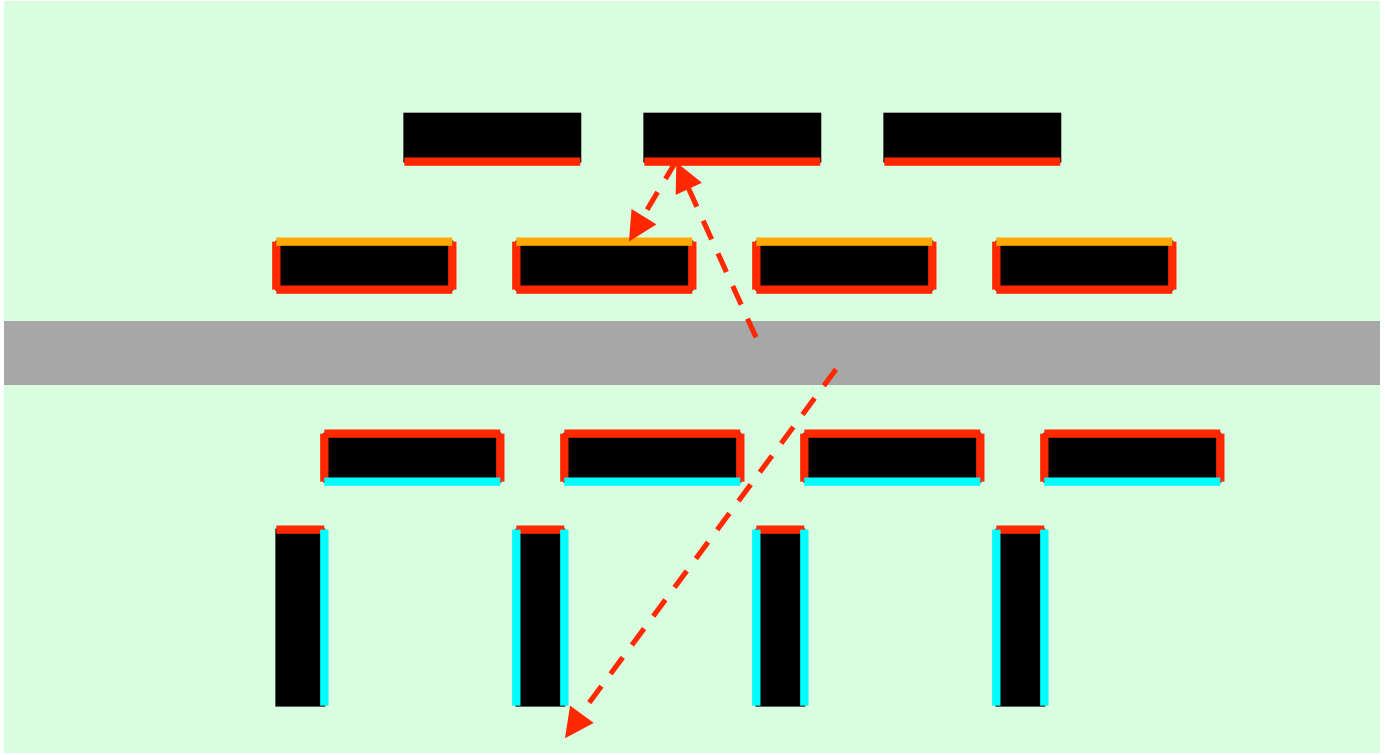
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



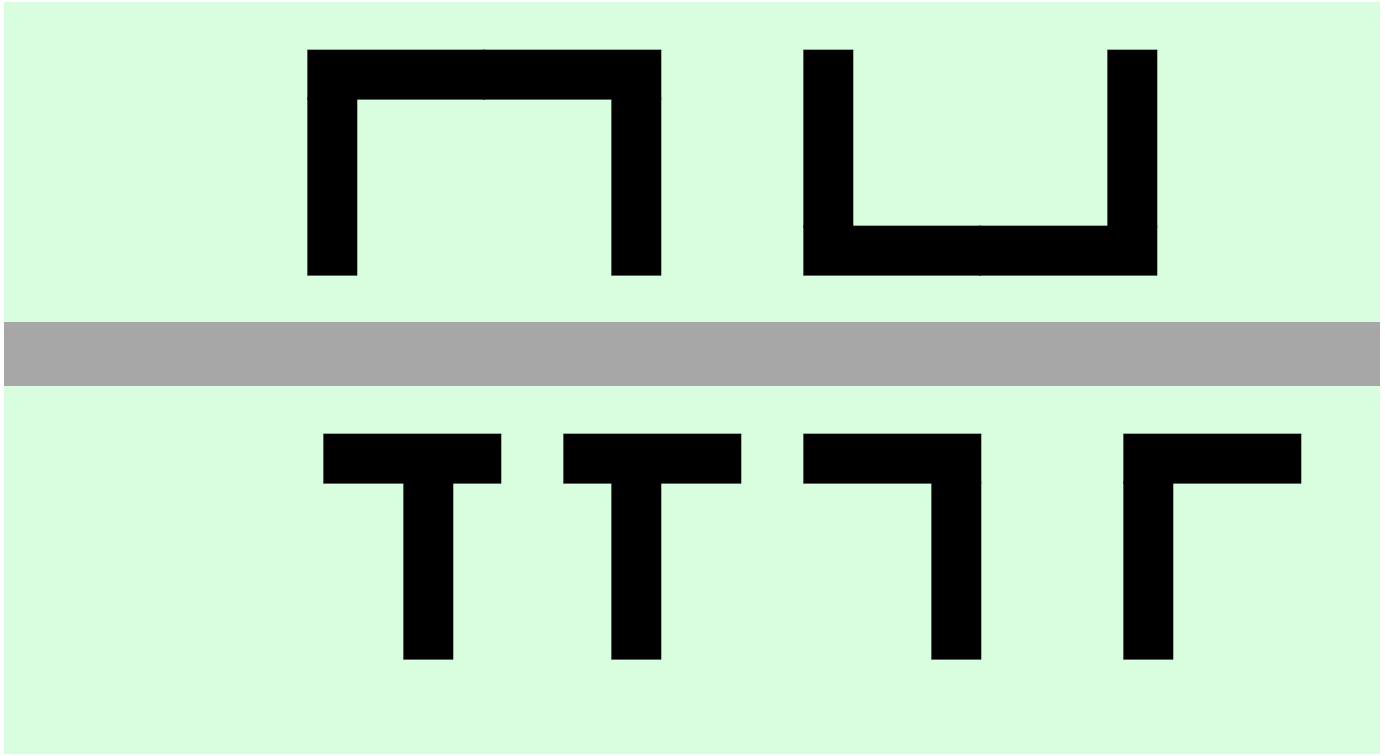
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



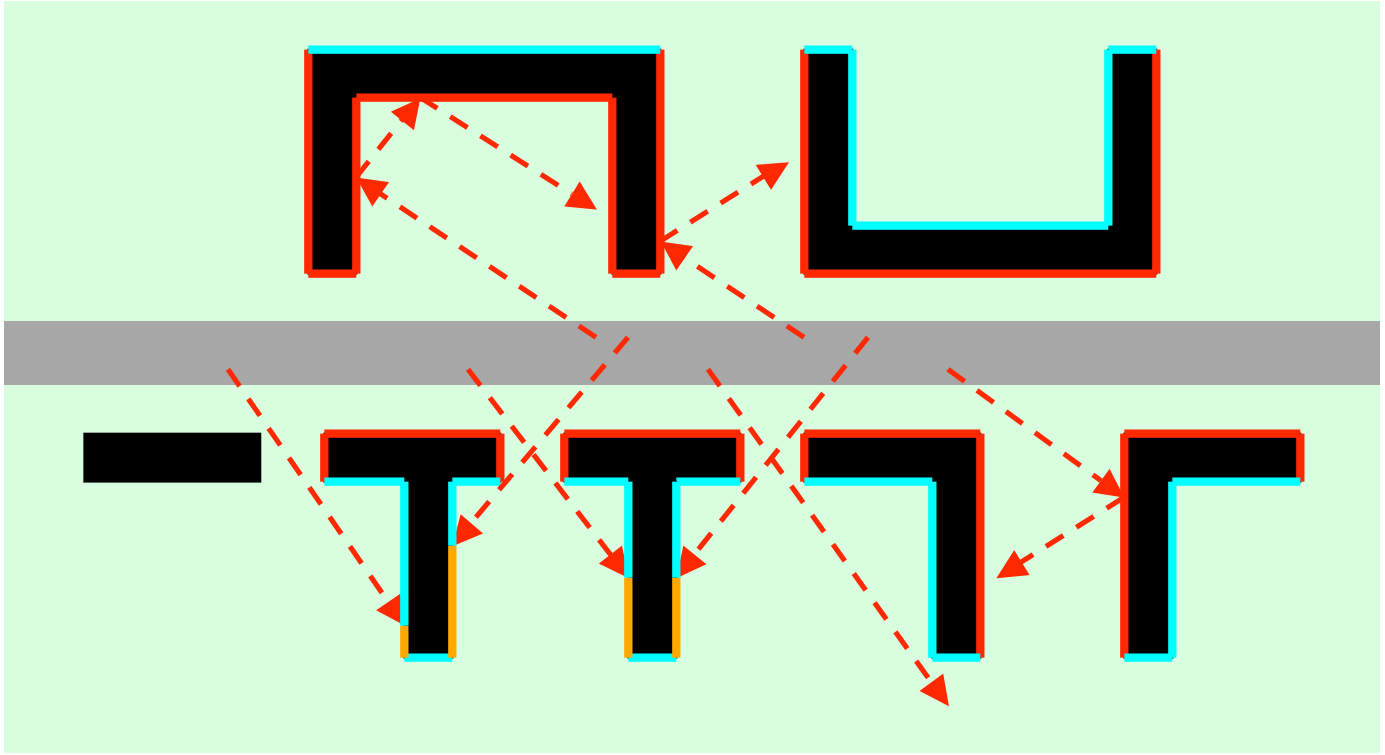
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



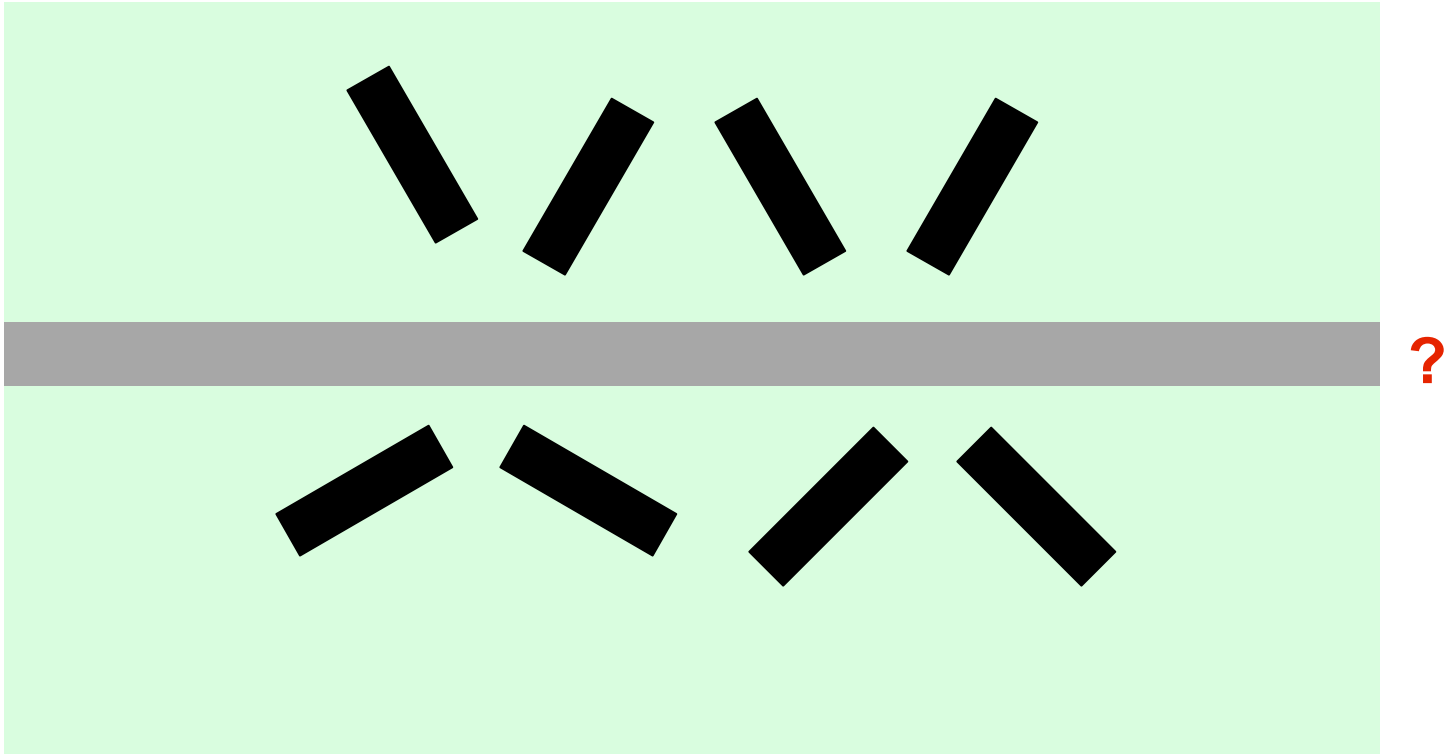
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



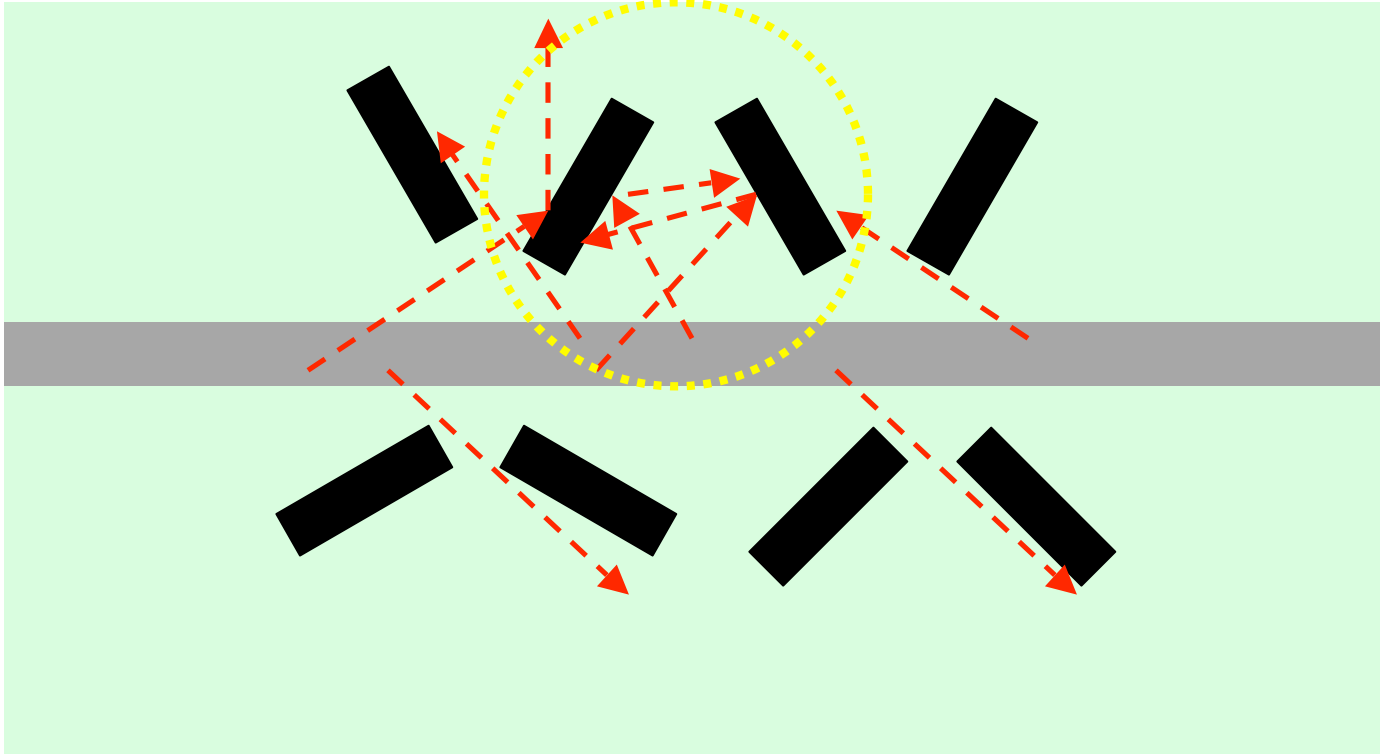
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



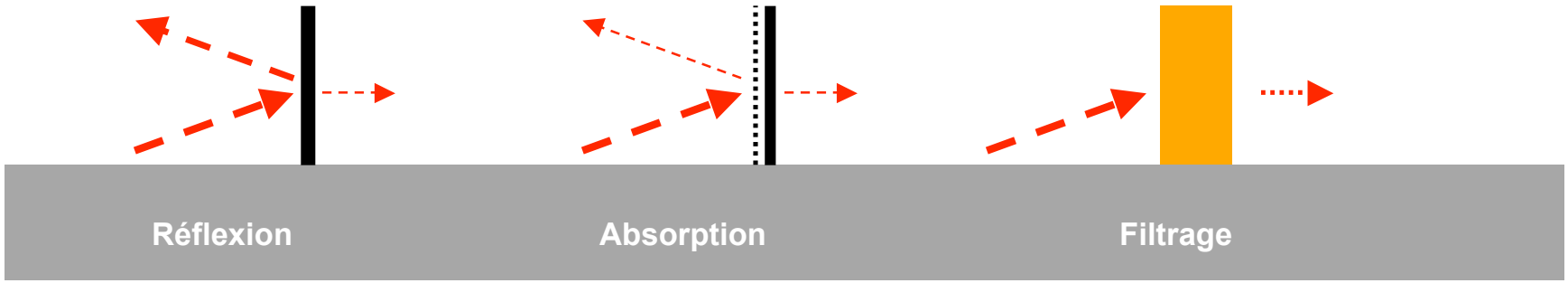
Traitement du bruit en champ libre

3- Formes urbaines et « porosité » sonore



Traitement du bruit en champ libre

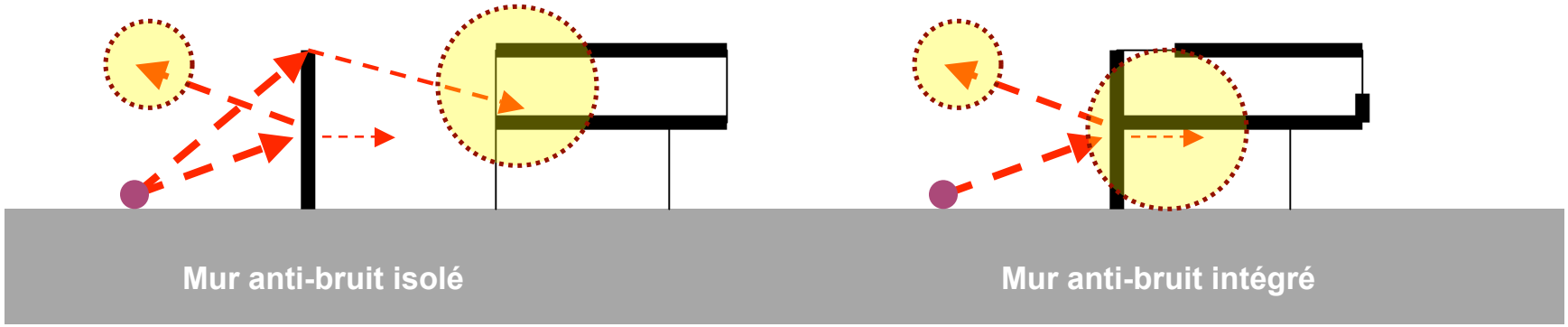
Stratégies



Réflexion	Absorption	Filtrage
fermeture	fermeture	perméabilité

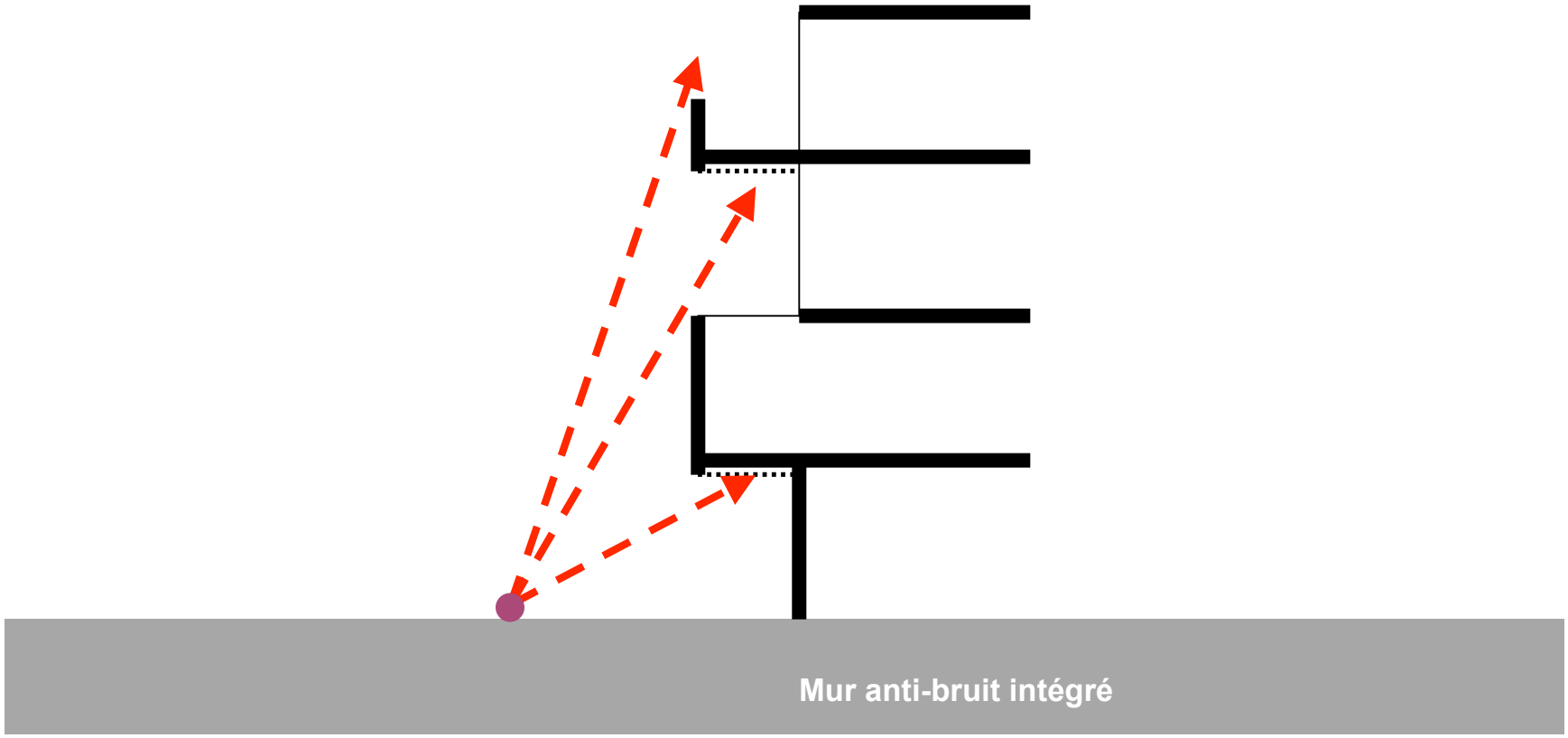
Traitement du bruit en champ libre

Stratégies: réflexion



Traitement du bruit en champ libre

Stratégies: réflexion

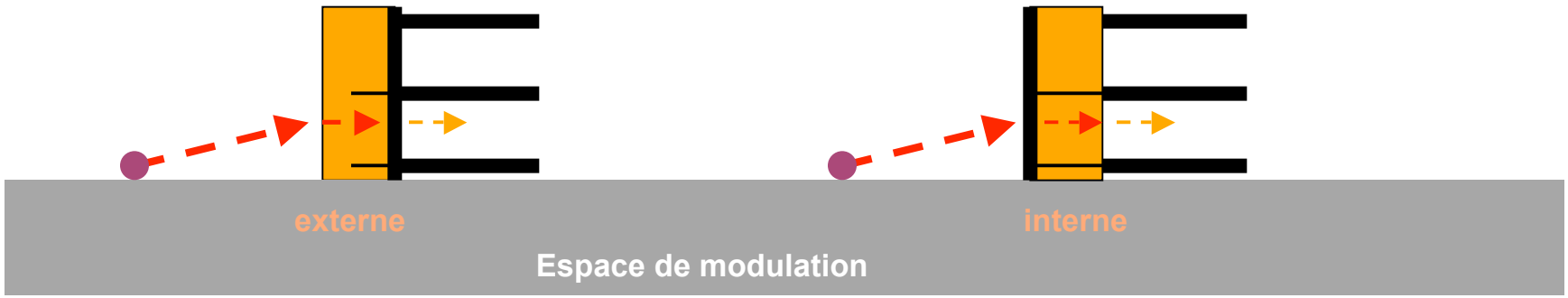


Traitement du bruit en champ libre

Stratégies: réflexion > absorption

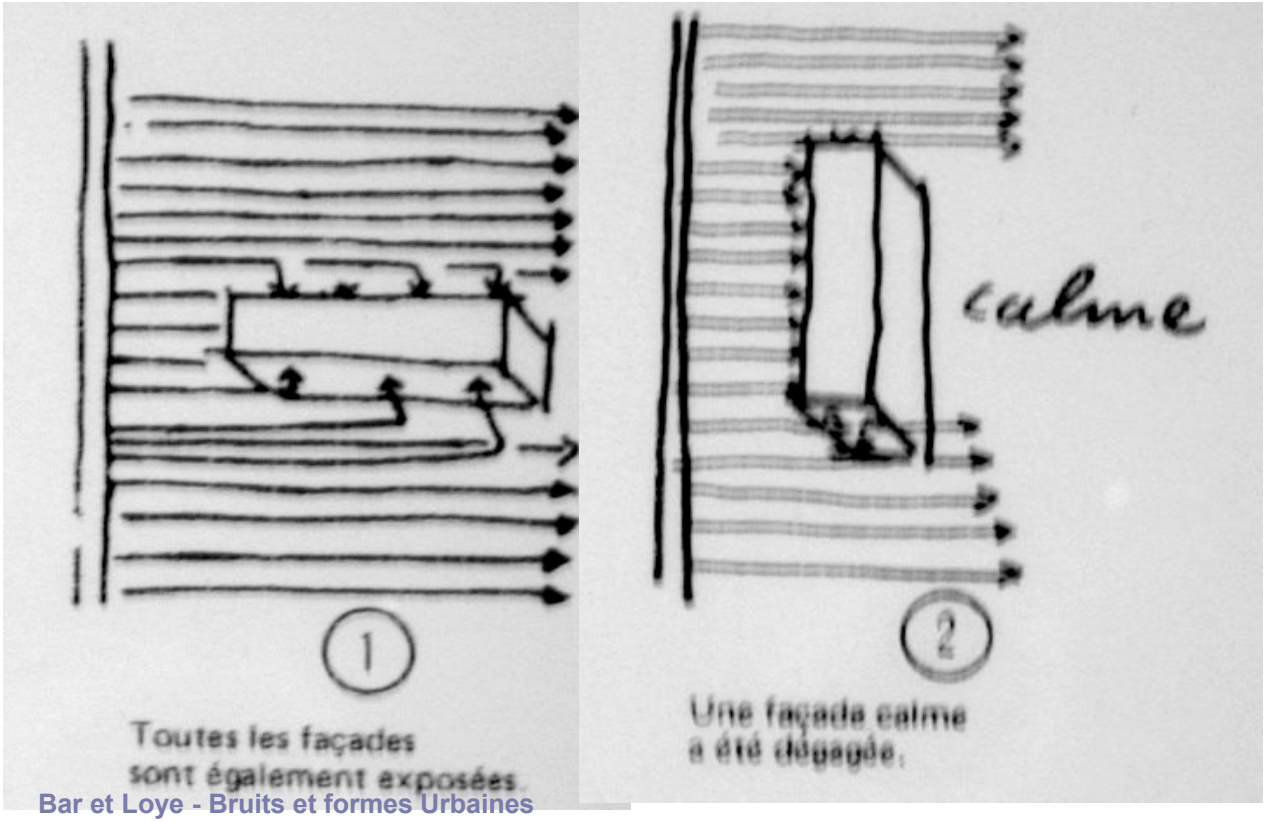
Traitement du bruit en champ libre

Stratégies: filtrage



Traitement du bruit en champ libre

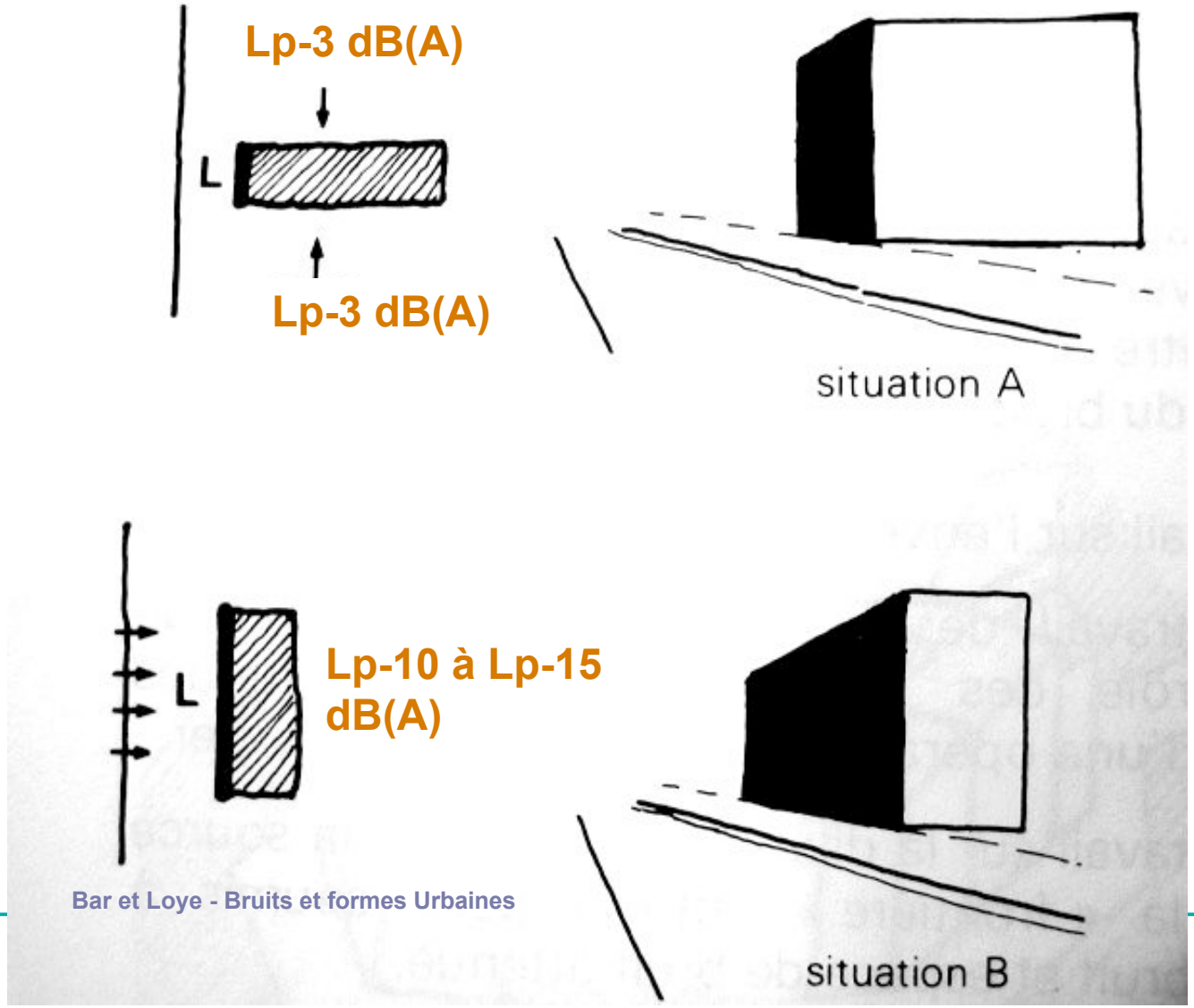
Limiter le nombre de façades exposées



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Traitement du bruit en champ libre

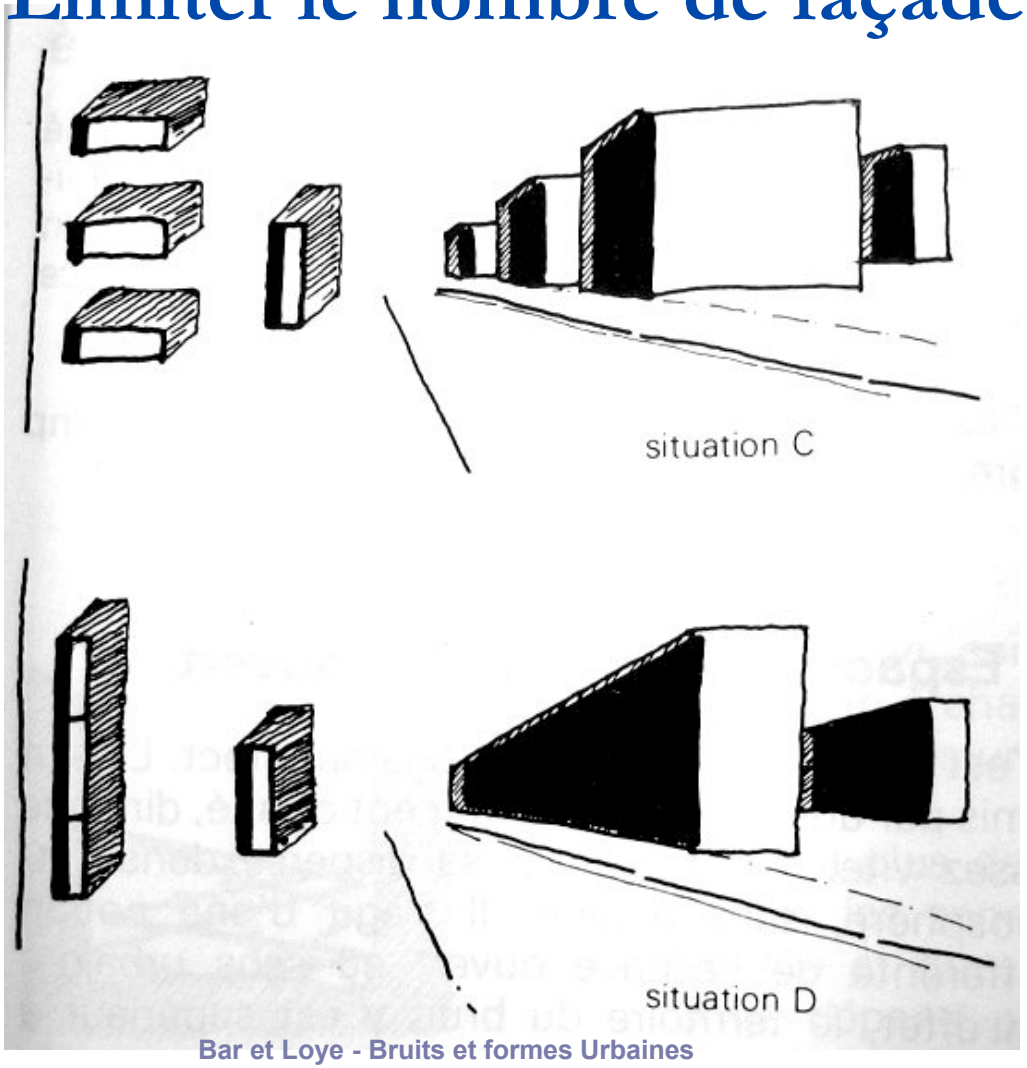
Limiter le nombre de façades exposées



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Traitement du bruit en champ libre

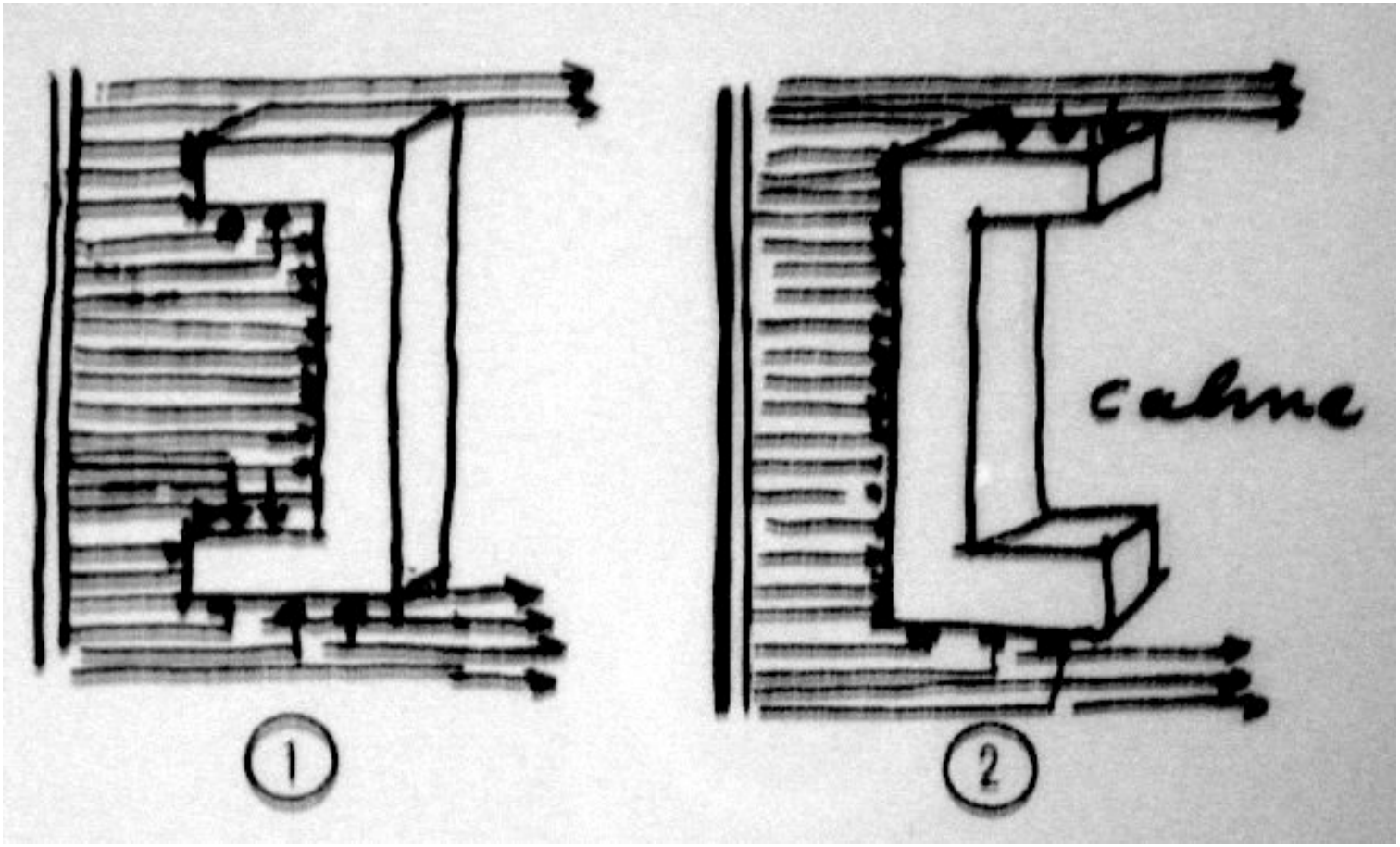
Limiter le nombre de façades exposées



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Traitement du bruit en champ libre

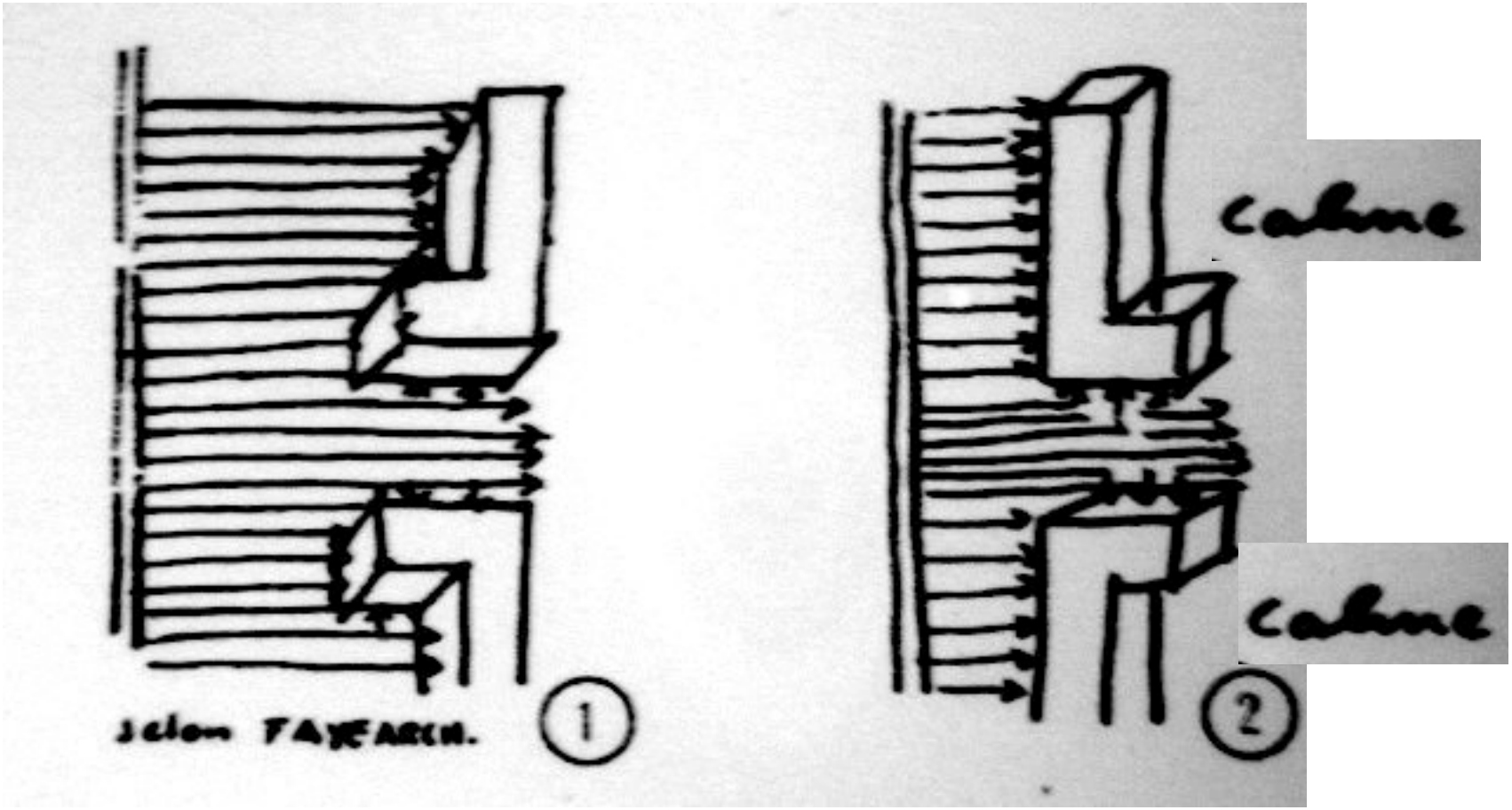
Limiter le nombre de façades exposées



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

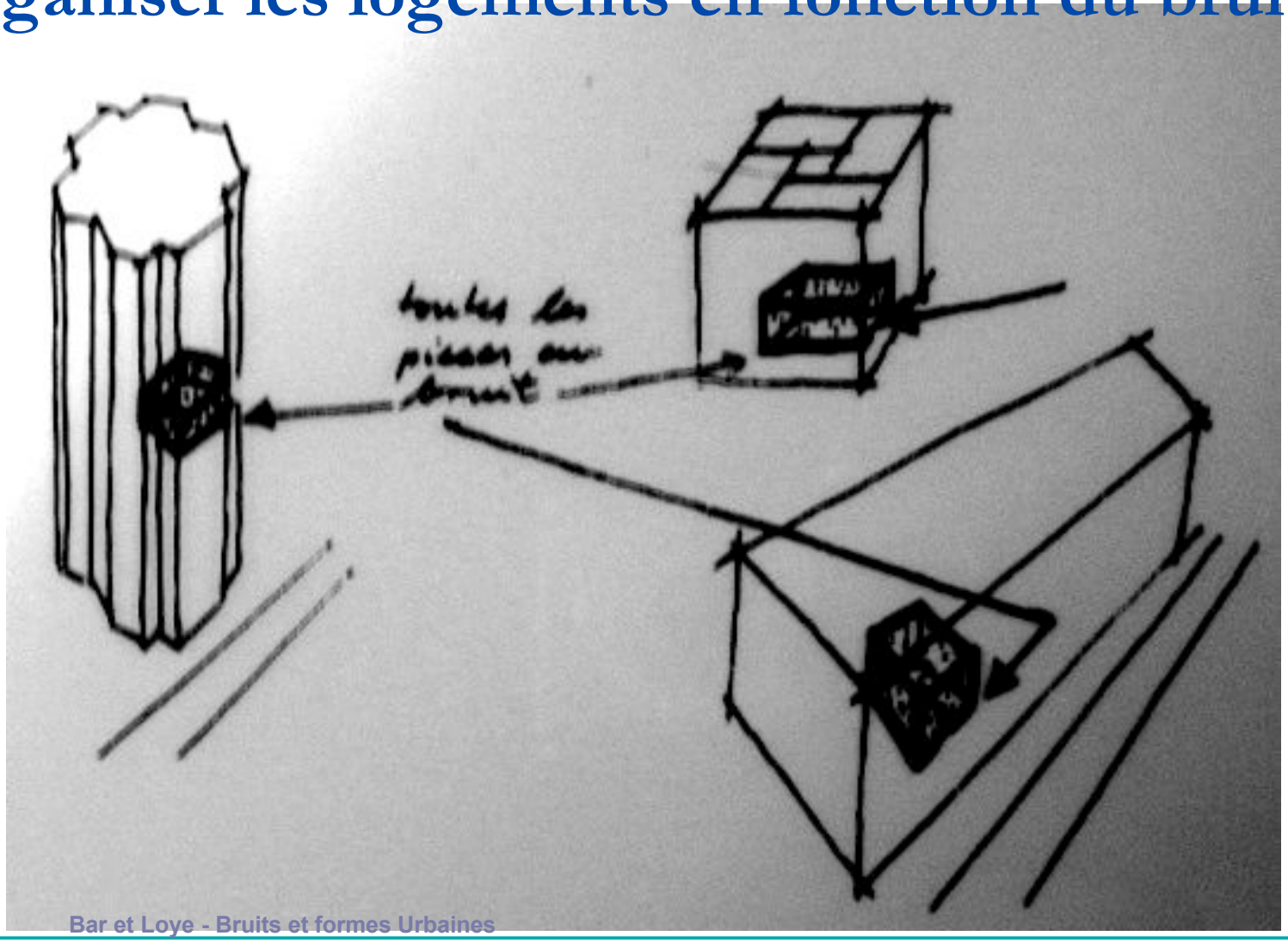
Traitement du bruit en champ libre

Limiter le nombre de façades exposées



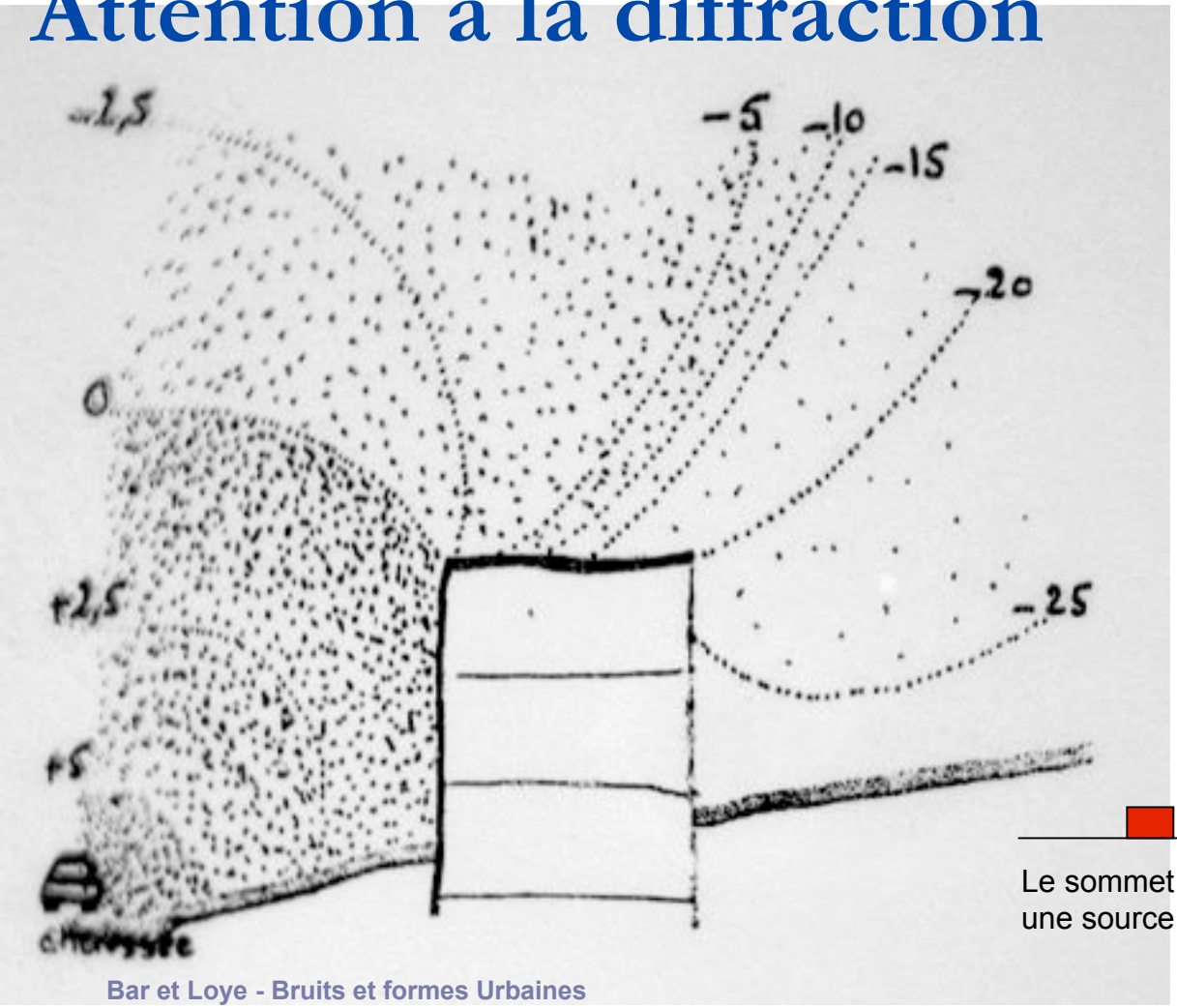
Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Organiser les logements en fonction du bruit

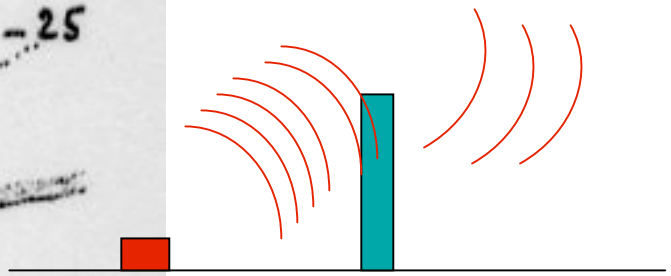


Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Attention à la diffraction

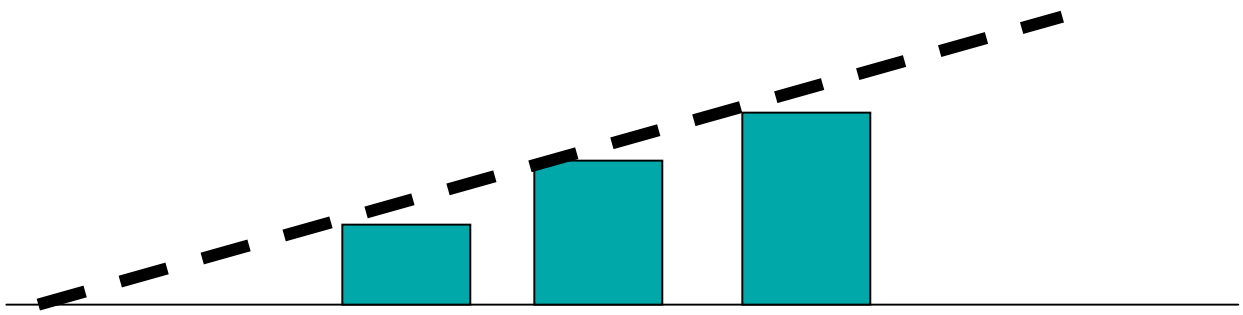


Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines



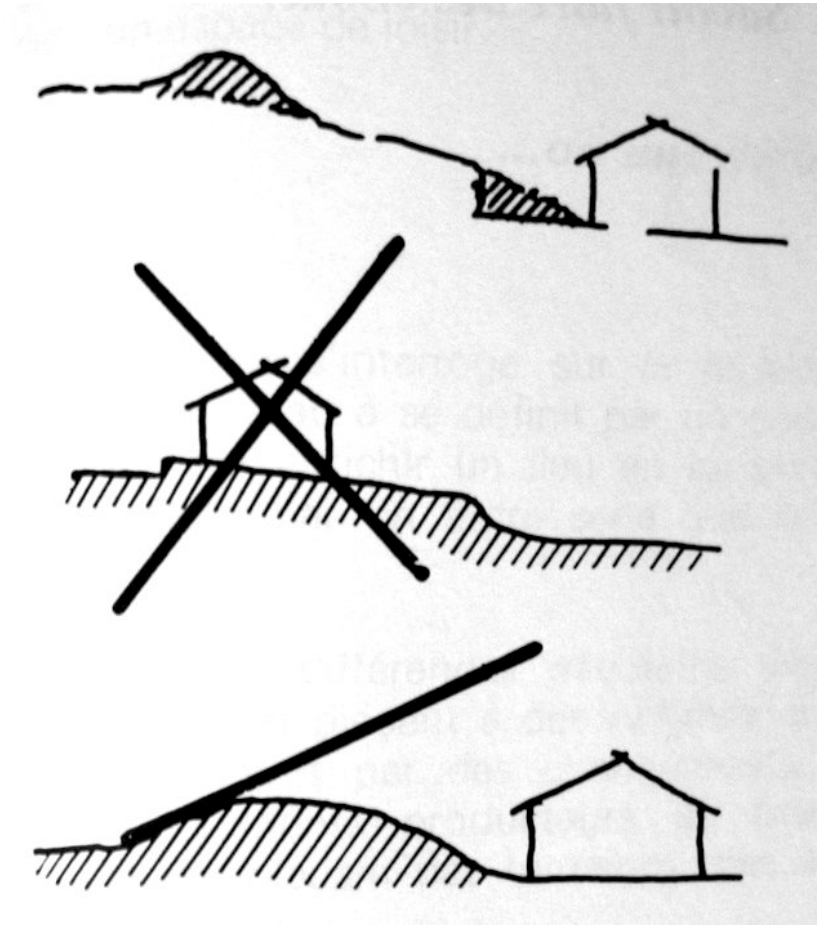
Le sommet d'un obstacle rayonne comme une source

Epannelage



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Protections naturelles



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

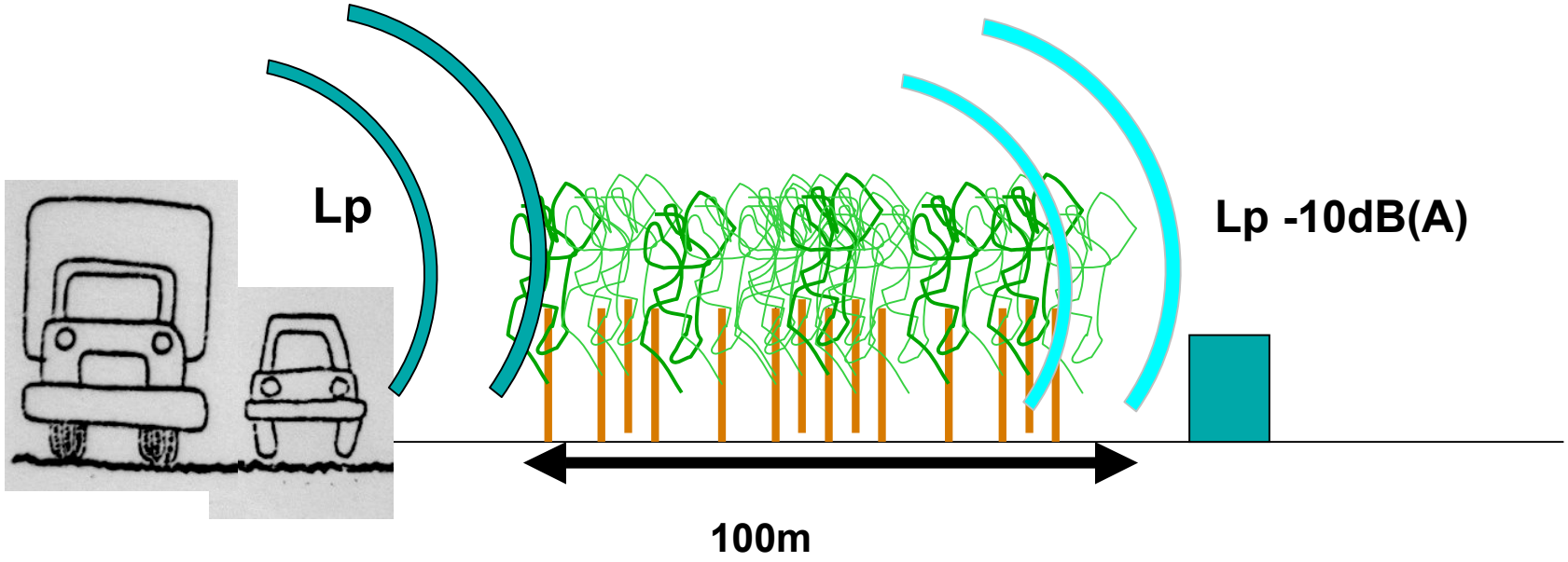
Protections naturelles

Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Ce n’est pas l’éloignement qui protège la maison mais la butte…

Protections naturelles

Il faut **100m de forêt dense** pour obtenir une diminution notable du niveau sonore

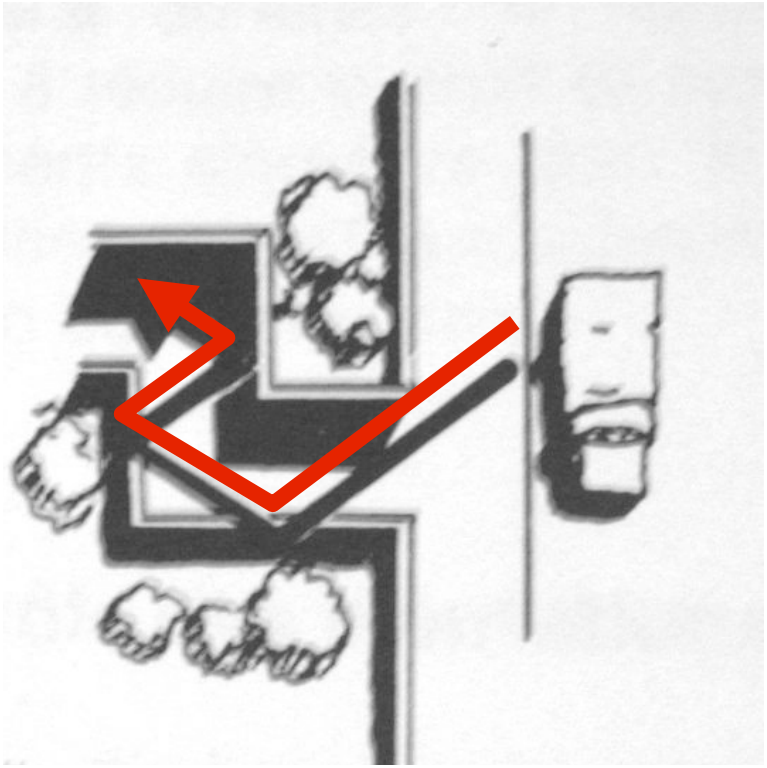


Créer des barrières au bruit

- **Barrières naturelles (buttes en terre) ou murs anti-bruits…**
- ***Attention***
  - L'efficacité d'un bon mur anti-bruit est de -7dB(A). D'un point de vue énergétique, c'est donc :

    -3 et - 3 et -1 dB(A)

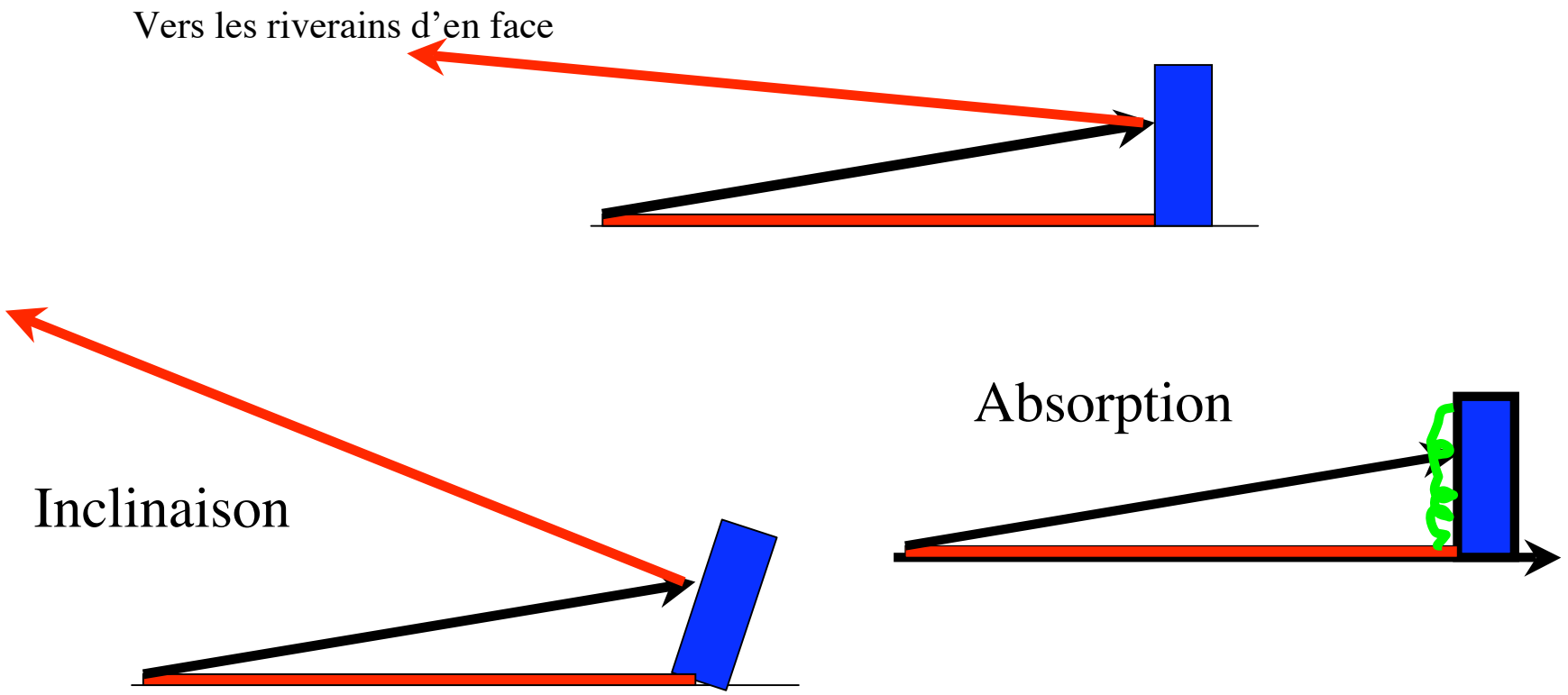
    Soit la puissance sonore divisée par 4
  - D'un point de vue perceptif, encore à -10dB un sentiment d'avoir divisé par 2 le niveau sonore



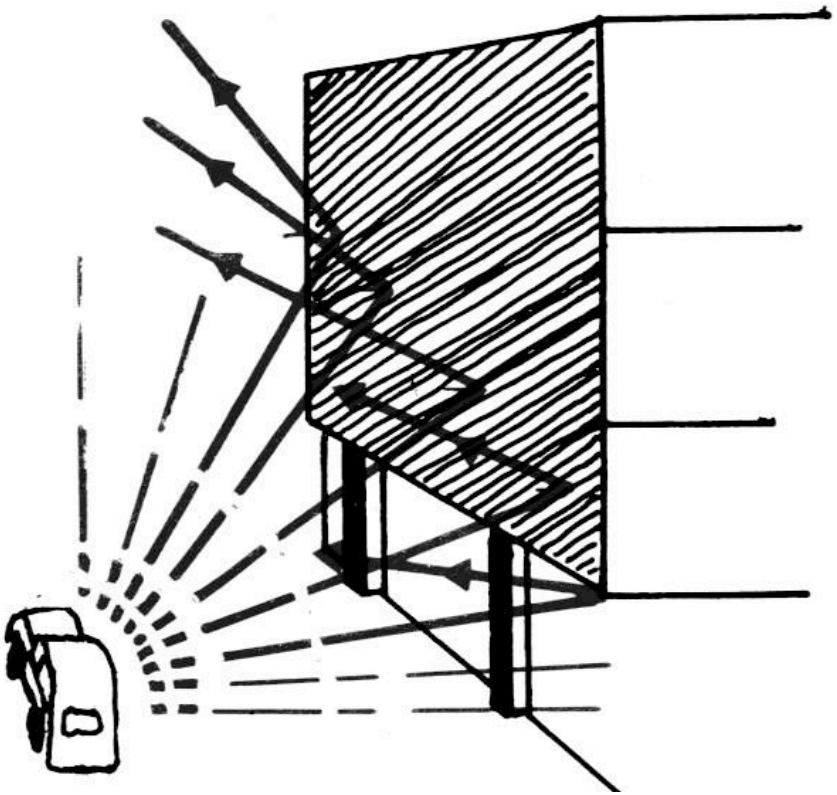
Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Créer des barrières au bruit

Différent types d'écrans anti-bruit



Traiter les façades

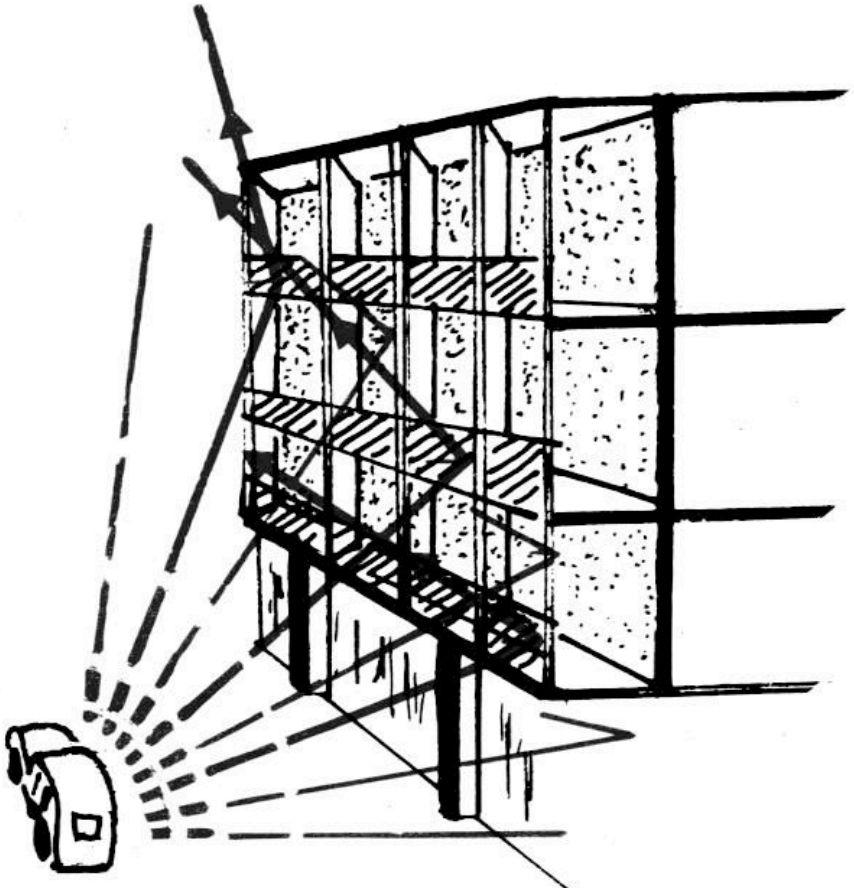


Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Utiliser l'épaisseur du bâti (multiplication des peaux) … opposer de la masse à la pénétration du bruit…

Traitement du bruit en champ libre

Organiser les logements et Traiter les façades

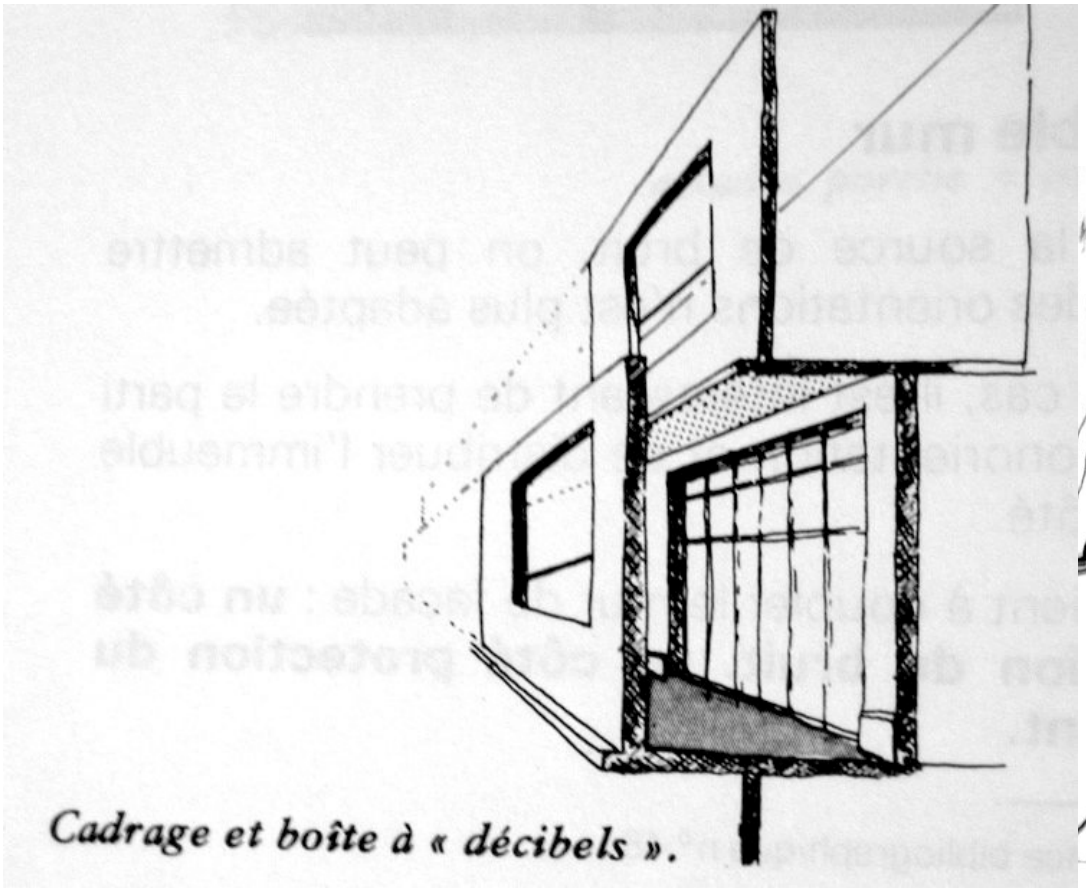


Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

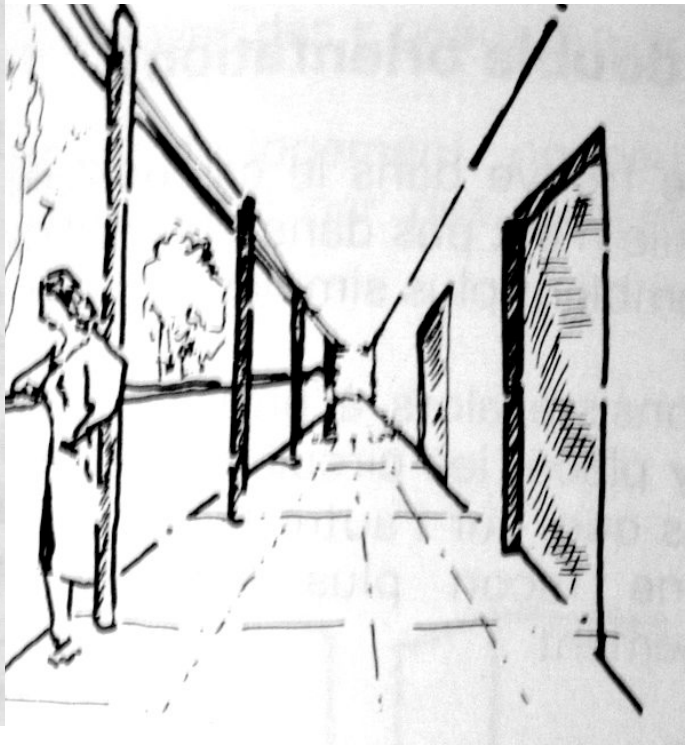
Balcons, loggias, coursives, escaliers intérieurs … tout espace tampon dont on traitera l'efficacité acoustique.

Traitement du bruit en champ libre

Organiser les logements et Traiter les façades

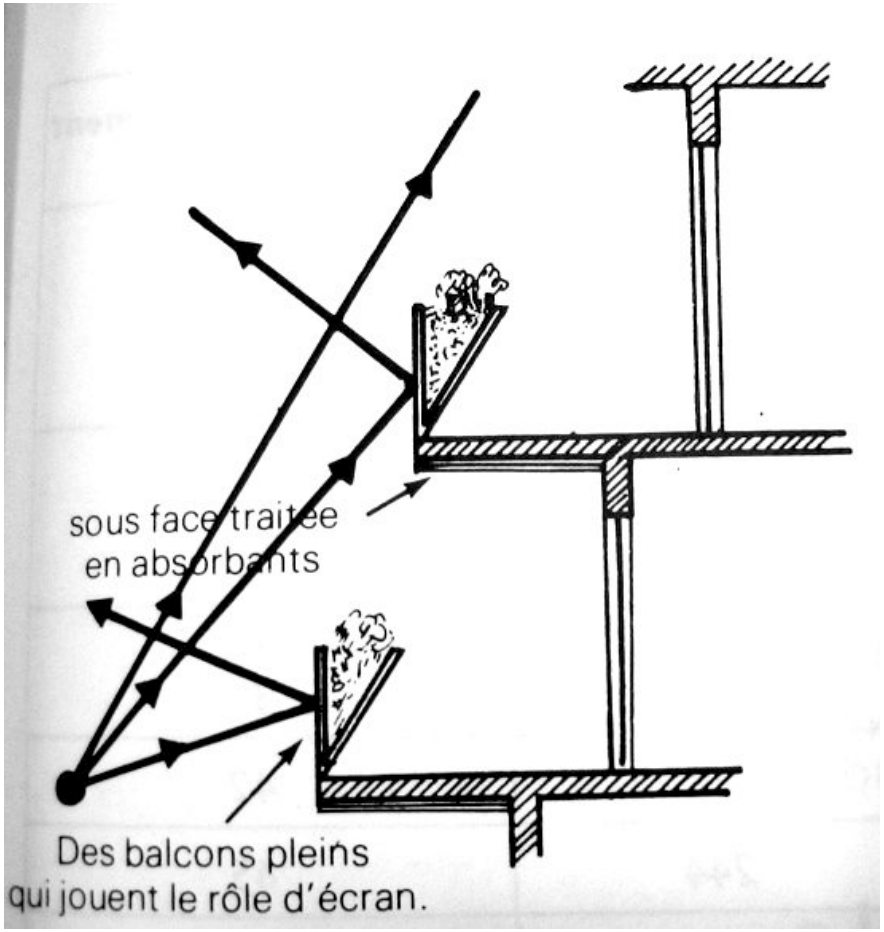


Cadrage et boîte à « décibels ».



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Organiser les logements et Traiter les façades

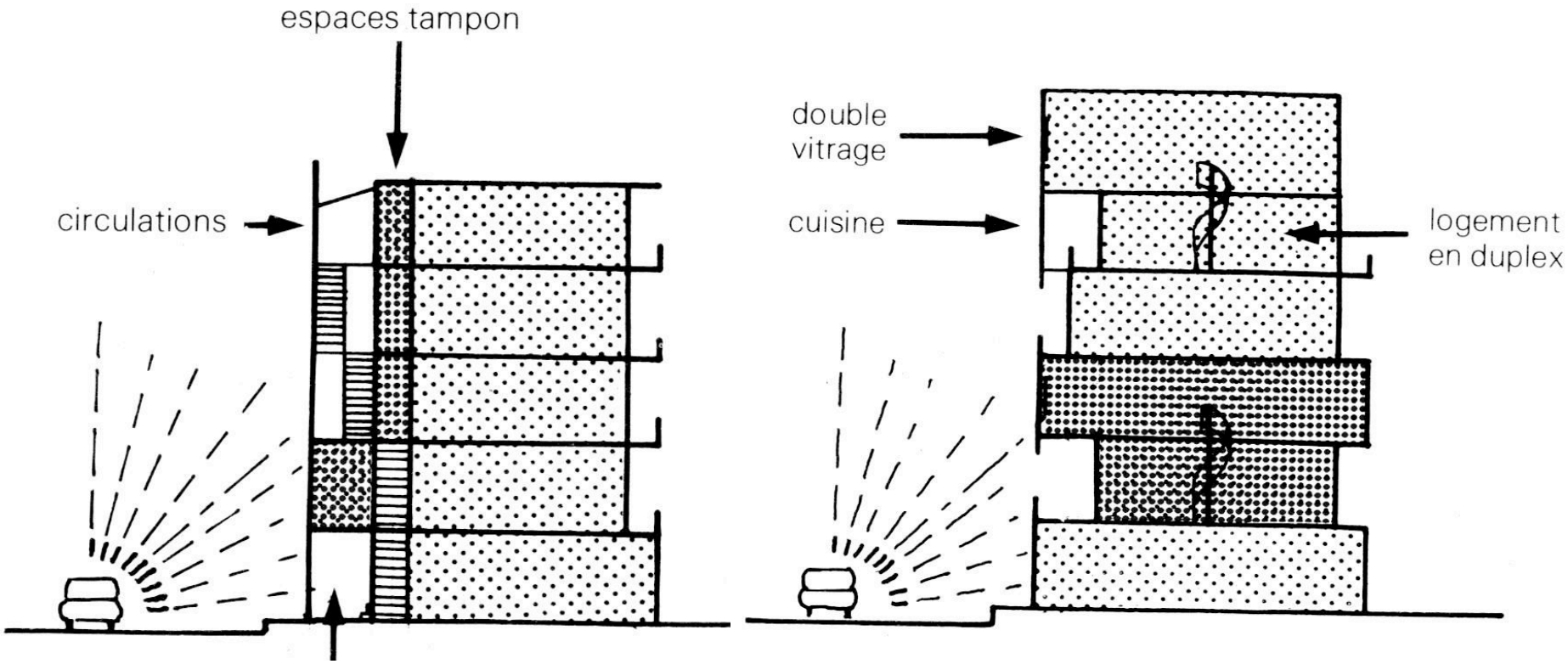


Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Les balcons peuvent être traités par une rambarde pleine (jardinières en béton, muret en brique…)
On peut aussi traiter la sous face des balcons par des matériaux absorbants

Traitement du bruit en champ libre

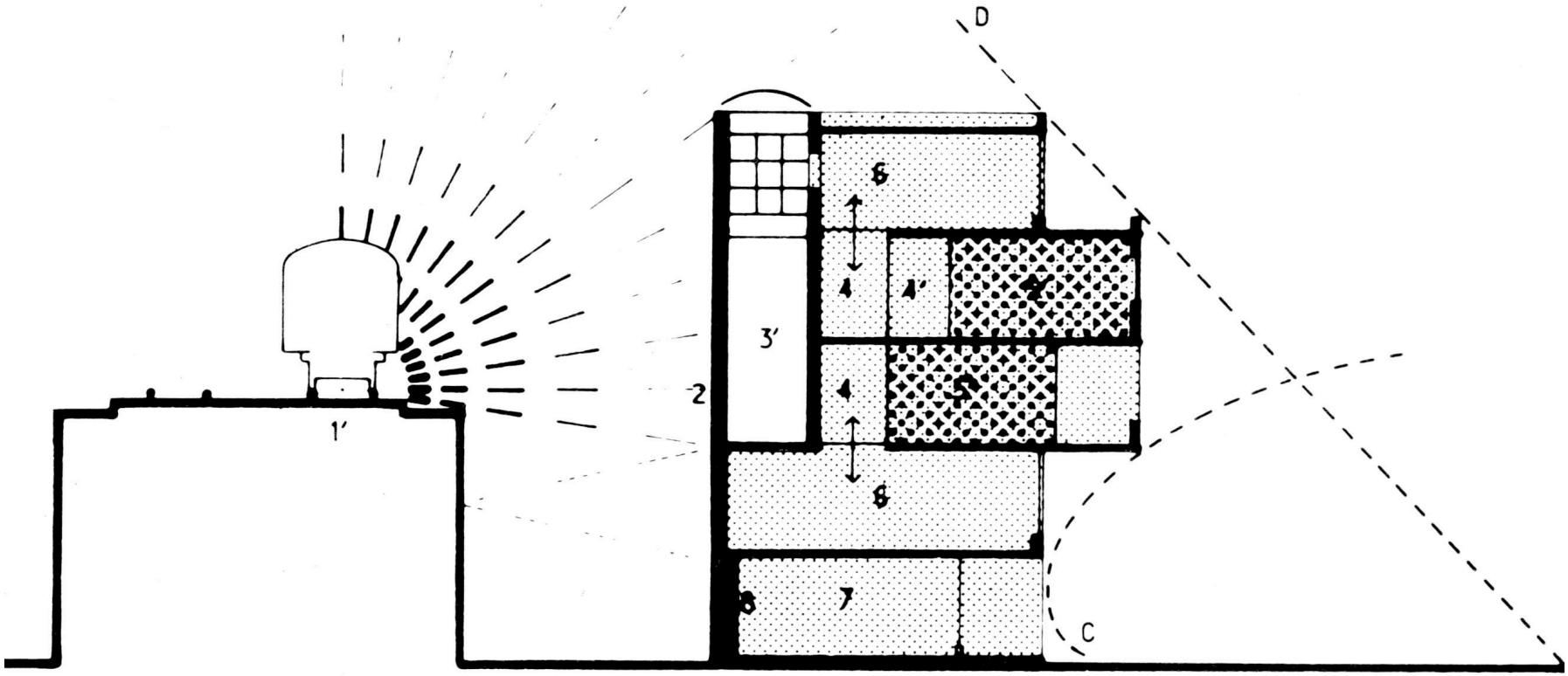
Organiser les logements et Traiter les façades



Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Traitement du bruit en champ libre

Organiser les logements et Traiter les façades

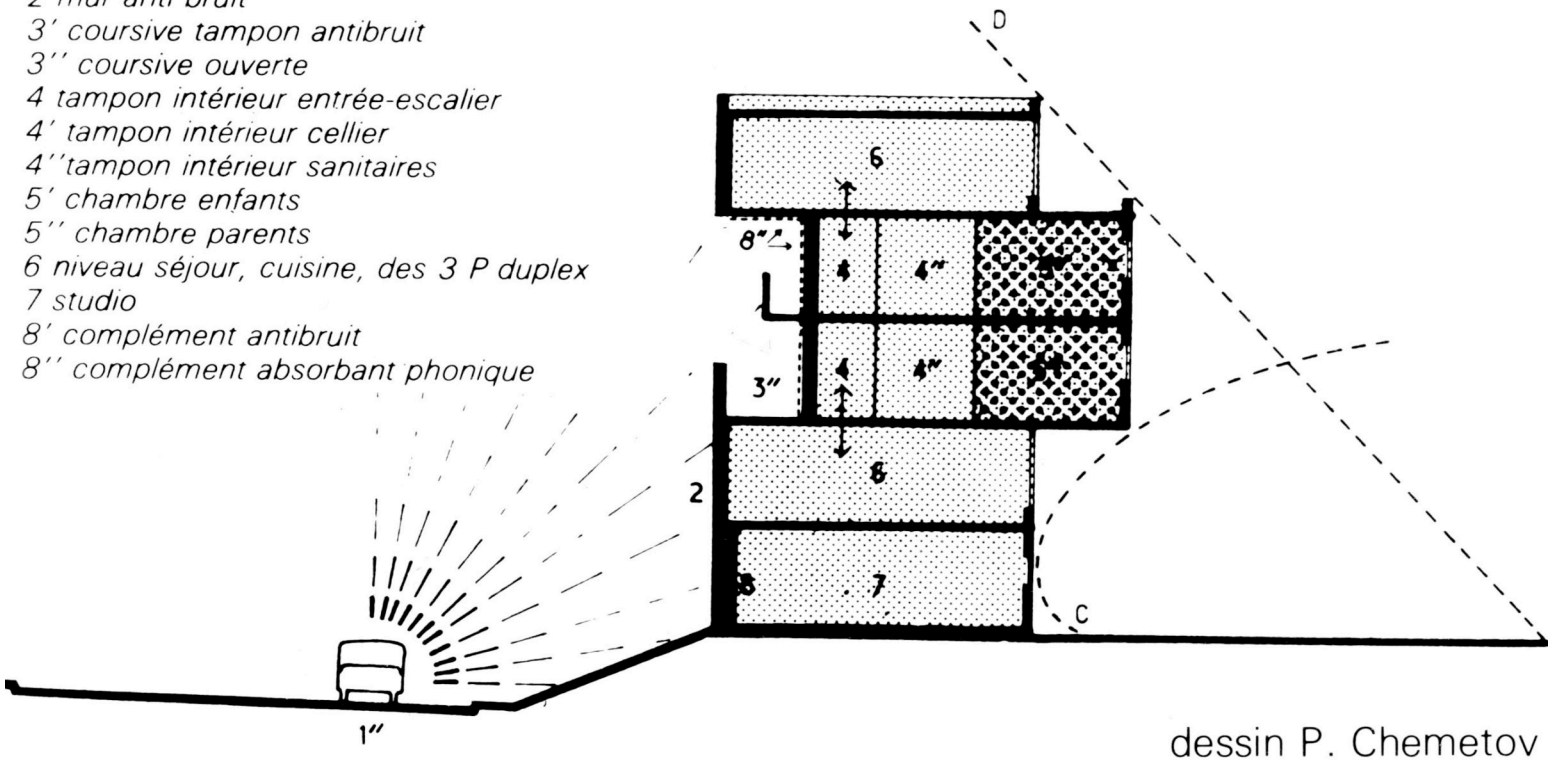


Bar et Loye - Bruits et formes Urbaines

Traitement du bruit en champ libre

Organiser les logements et Traiter les façades

Sections courantes
1' bruit s.n.c.f. (bruit maximum au niveau des rails)
1'' bruit cd 41
2 mur anti bruit
3' coursive tampon antibruit
3'' coursive ouverte
4 tampon intérieur entrée-escalier
4' tampon intérieur cellier
4''tampon intérieur sanitaires
5' chambre enfants
5'' chambre parents
6 niveau séjour, cuisine, des 3 P duplex
7 studio
8' complément antibruit
8'' complément absorbant phonique



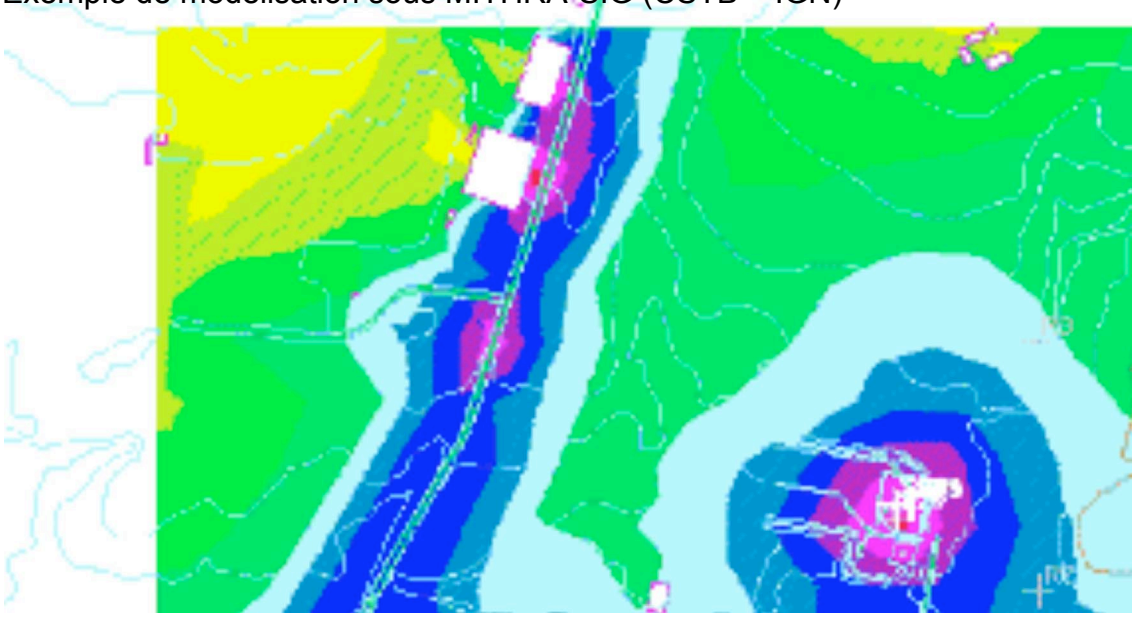
dessin P. Chemetov

Les obligations

- **Le contexte réglementaire**
  - Le Code de l'environnement francais a été complété le 12 novembre 2004 par ordonnance (n° 2004-1199) pour prendre en compte la directive européenne 2002/49/CE du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement.
  - Un nouveau chapitre « Évaluation, prévention et réduction du bruit dans l'environnement » prévoit qu'une carte de bruit et un plan de prévention du bruit seront établis et publiés avant le 30 juin 2007 pour :
    - 1. toutes les routes et autoroutes dont le trafic annuel est supérieur à 6 millions de véhicules (soit en moyenne 16.400 véhicules / jour)
    - 2. toutes les voies ferrées dont le trafic annuel est supérieur à 60.000 passages de trains (soit en moyenne 164 trains / jour)
    - 3. tous les aéroports civils dont le trafic annuel est supérieur à 50.000 mouvements (soit en moyenne 137 mouvements / jour)
    - 4. chaque unité urbaine de plus de 250.000 habitants.
    - Les seuils seront ramenées à 3 millions de véhicules / an, 30.000 trains / an et 100.000 hab. dans les années à venir.
- **Les logiciels**
  - MITHRA-SIG (CSTB + IGN) ou CAADNA (01dB)

Les obligations

Exemple de modélisation sous MITHRA-SIG (CSTB + IGN)



Démarche volontaire à Paris
http://www.v1.paris.fr/fr/environnement/bruit/carto_jour_nuit/cartobruit.html

Bibliographie

Acoustique urbaine :
- C.E.T.U.R. : *Guide du bruit des transports terrestres* (plusieurs tomes spécialisés).Paris
- BAR P, LOYE B : *Bruit et formes urbaines : propagation du bruit dans les tissus urbains,*Paris. CETUR. 1981
-MIGNERON : *Acoustique urbaine.* Paris : Masson, 1980, 126 p.,

Revues

- Technique et architecture
- Les cahiers techniques du moniteur
- Actualité de la scénographie
- Les cahiers du CSTB
- Acta Acustica (et les versions précédentes: : Revue d'acoustique /Journal d'acoustique)
- Le bulletin du CIDB
- Echo Bruit. Revue du CIDB
- Isolation -Information , la revue du CFI