

**Institut français  
des sciences et technologies  
des transports, de l'aménagement  
et des réseaux**

# Modélisation numérique de la propagation du bruit dans les villes

**Laboratoire d'Acoustique Environnementale**  
Judicaël PICAUT



# Le bruit dans l'environnement



- **Sociétal**

Le bruit est une nuisance pour 2 français sur 3 (en particulier en urbain).  
Il rend très irritable (25%) et donne envie de déménager (20%).

[Source : Sondage TNS Sofres - commande MEEDDM, 2010]

- **Sanitaire**

Selon OMS, les nuisances sonores sont la deuxième cause de morbidité, derrière la pollution atmosphérique, parmi les facteurs de risques environnementaux en Europe.

[Source : Commissariat général au développement durable. Synthèse de l'édition 2014 du rapport sur l'environnement en France - Décembre 2014]

- **Économique**

Depuis 2000, les dépenses de lutte contre le bruit n'ont cessé d'augmenter pour s'établir à près de 2,3 milliards d'euros en 2012, dont 1,8 milliard d'euros consacré à la construction de dispositifs de protection.

[Source : Commissariat général au développement durable. Synthèse de l'édition 2014 du rapport sur l'environnement en France - Décembre 2014]

- **Réglementaire**

Nombreux dispositifs réglementaires (France et EU)  
(Directive 2002/49/CE : cartographie de bruit à grande échelle, plans d'action...).



# La modélisation numérique

- **La modélisation numérique de la propagation acoustique est à la base de tout outil de prévision du bruit dans l'environnement :**

***les applications sont nombreuses...***

- Acoustique urbaine, des salles, industrielle, du bâtiment...

***...dans des contextes différents***

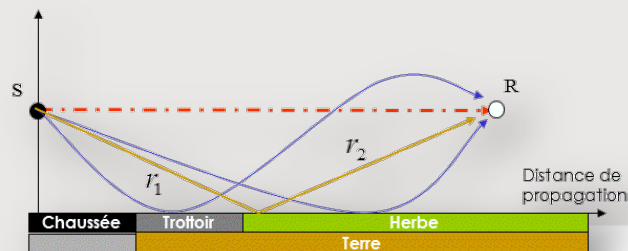
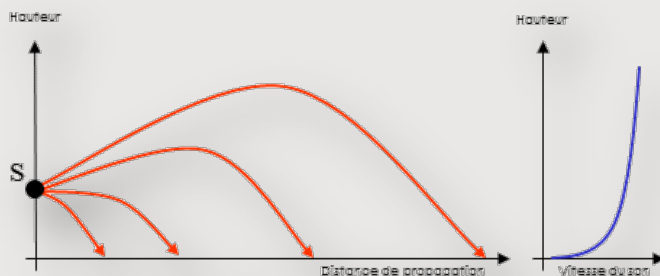
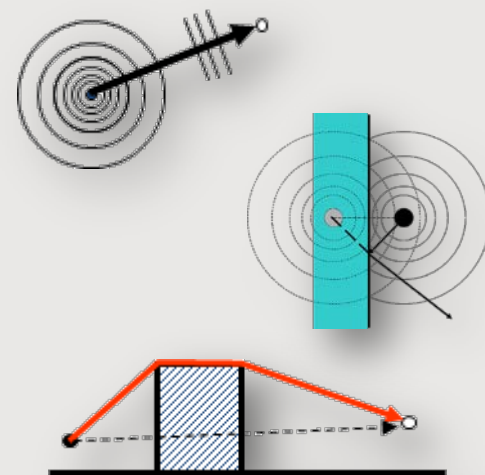
- Calcul réglementaire, cartographie des villes, optimisation acoustique, protection des personnes, amélioration de l'environnement sonore...

# La propagation acoustique

- **La propagation acoustique :**
  - Phénomène ondulatoire (pression, vitesse)
  - Régie par des équations de la physique :
    - Équation de propagation ou équation d'onde (temporel)
    - Équation d'Helmholtz (fréquentiel)
  - Régie par des conditions aux limites :
    - De Dirichelet
    - De Neumann
    - Mixtes
  - Avec des conditions initiales

# Les phénomènes propagatifs

- Dispersion géométrique
- Réflexion-absorption sur les façades
- Diffusion par les façades
- Diffraction par les bâtiments (verticale, horizontale)
- Effets de sol (absorption, discontinuité, rugosité)
- Atténuation atmosphérique
- Effets météorologiques (réfraction, turbulence)
- Réflexion-diffusion-absorption sur les « objets urbains »



# Les approches de modélisation (1)

- **Approches « ondulatoires » (équations de propagation)**
  - Résolution analytique
    - Approche modale
  - Résolution numérique
    - Domaine fréquentiel (FEM, FDM, EP, ESM, BEM, FASTBEM)
    - Domaine temporel (FDTD, TLM, LBM, LEE, PSTD)
  - Approches mixtes analytiques & numériques
    - Modale & EF
    - BEM & EP

# Les approches de modélisation (2)

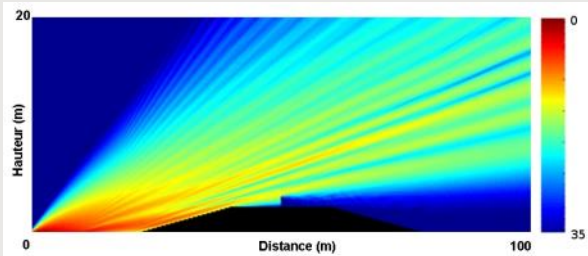
- **Approches « géométriques & énergétiques »**
  - Méthode des sources-images et des récepteurs-images
  - Méthode de lancer de rayons, faisceaux, cônes, pyramides, particules...
- **Approches « statistiques & énergétiques »**
  - Équation de transport
  - Équation de diffusion
- **Approches hybrides**
  - Ondulatoire & géométrique
    - BEM & rayons

# Les « types » de modélisation

- **Approches de référence**
  - « de laboratoire »
  - Priorité à la modélisation des phénomènes propagatifs au détriment des temps de calcul (pression acoustique)
- **Approches d'ingénierie**
  - « opérationnelle »
  - Priorité au temps de calcul au détriment de la stricte modélisation des phénomènes propagatifs (énergie acoustique)
- **Domaine géométrique**
  - 1D, 2D, 2D½, 3D

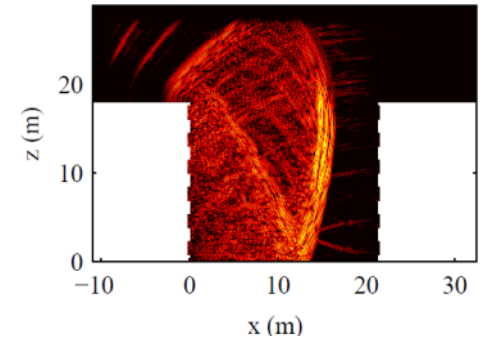
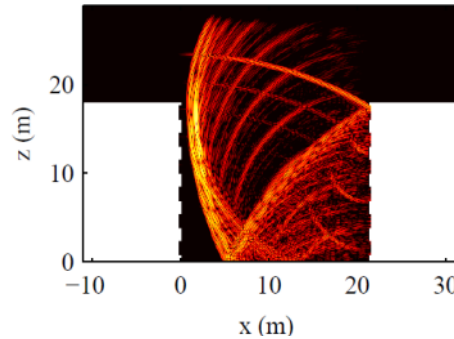


# Exemples d'application (1)

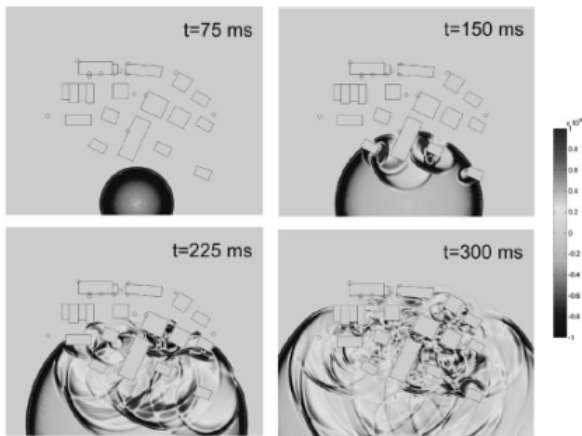


Modélisation de la propagation acoustique au-dessus d'un site non-plan, en présence d'un écran acoustique et en milieu hétérogène.

Équation Parabolique [LCPC]  
(modèle de référence, résolution fréquentielle 2D)

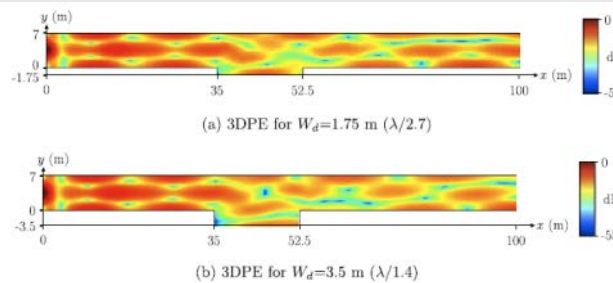


Modélisation de la propagation acoustique dans une section de rue, avec des façades « irrégulières ». Méthode PSTD [Chalmers University, M. Hornikx 2009]  
(modèle de référence, résolution temporelle 2D)

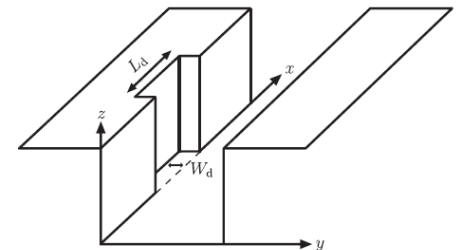


Propagation d'un bruit impulsionnel dans un village

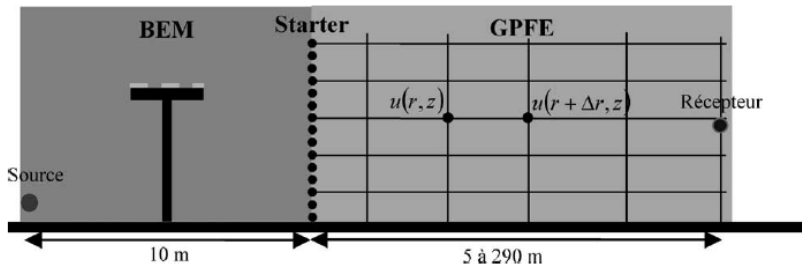
FDTD [Albert & Liu, 2010]  
(modèle de référence, FDTD 2D)



Modélisation de la propagation acoustique dans une rue avec renforcement.  
Équation parabolique 3D [LAUM, 2015] (modèle de référence, résolution fréquentielle 3D)

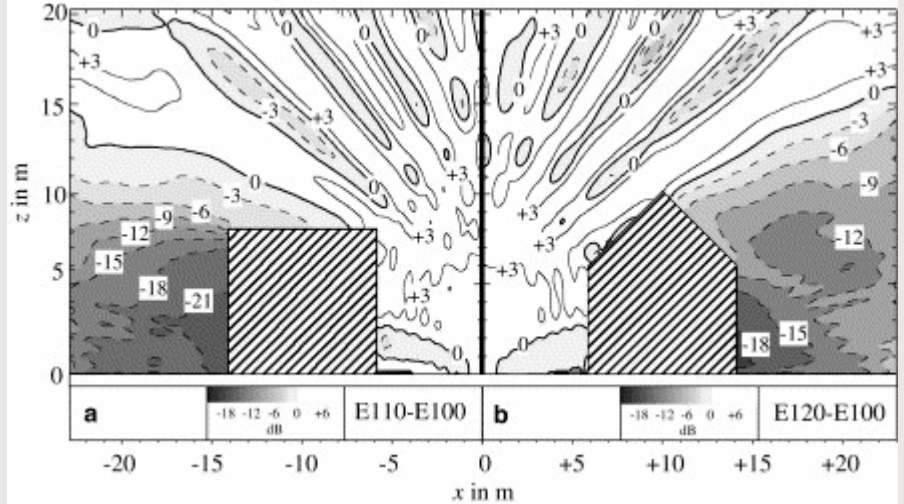


# Exemples d'application (2)



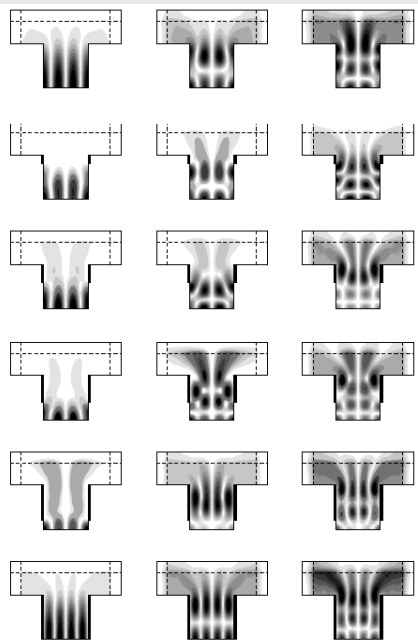
Approche hybride BEM & EP (GFPE)

(modèle de référence, résolution fréquentielle 2D) [CSTB, Aballea 2003]



Simulation FDTD avec prise en compte d'un écoulement (vent)

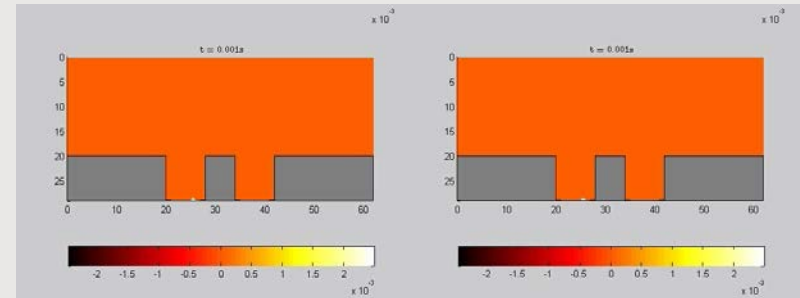
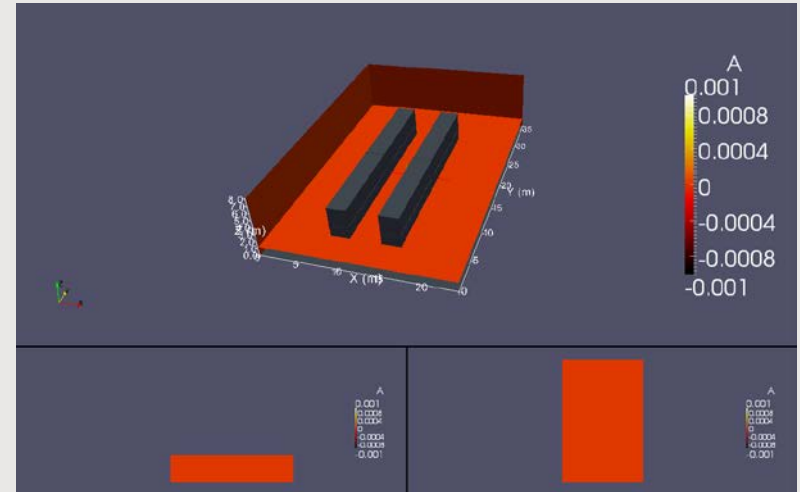
(modèle de référence, résolution temporelle 2D) [Heimann 2007]



Approche hybride FE & Modal.  
Effet d'absorption sur les façades  
pour différents modes de la rue  
[LAUM, Pelat 2009]

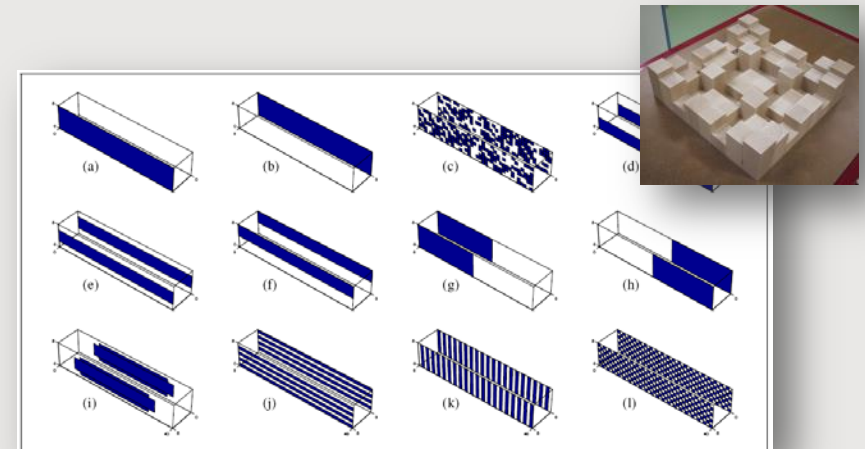
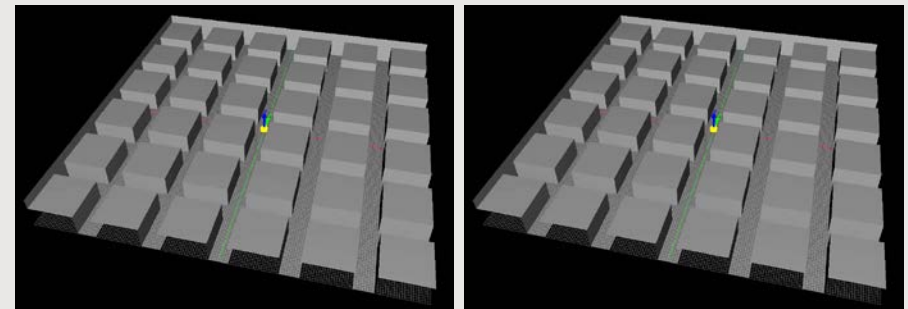
# Focus : TLM (lignes de transmission)

- Principe général :
  - Description physique de la propagation acoustique (numérique)
    - Approche temporelle
    - Approche ondulatoire
  - Avantages :
    - Méthode « universelle »
    - Modélisation de (presque) tous les phénomènes physiques mis en jeu
  - Inconvénients :
    - Coût en temps de calcul : nécessité du calcul parallèle (CPU, GPU)
    - Limiter aux BF
  - Applications (Ifsttar) :
    - Étude de la propagation acoustique dans des rues
    - Effet de la végétation/végétalisation en milieu urbain



# Focus : Lancer de particules

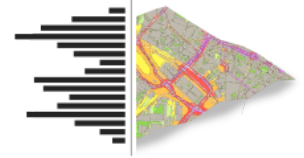
- Principe général :
  - Suivi de particules dans un domaine 3D, au cours du temps
    - Approche géométrique
    - Approche énergétique
  - Hypothèses :
    - Approche MF et HF
    - Champ sonore incohérent
    - Obstacles et dimensions du domaine  $\ll$  distance parcourue
  - Applications (Ifsttar) :
    - Étude de la diffusion de façade
    - Étude de la propagation acoustique dans des rues
    - Modèle de référence pour la validation d'autres modèles de propagation
    - Effet de diffuseurs urbains



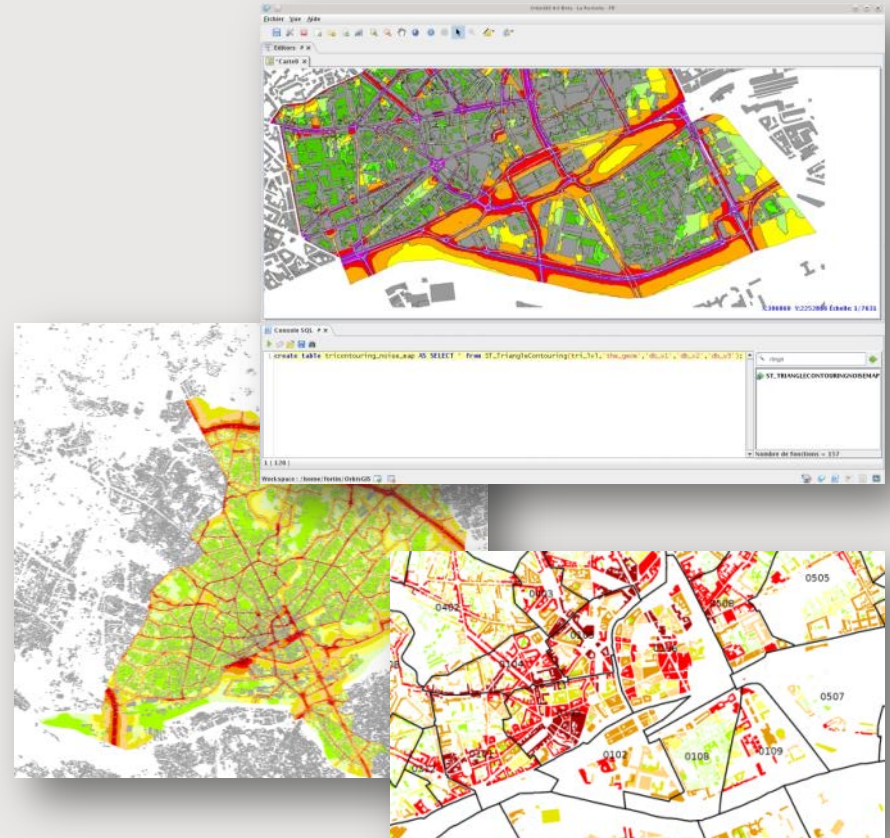
# A l'échelle urbaine...

- **Limite des approches « classiques »** pour de grands domaines de propagation (rue, quartier, ville, métropole)
- **Contexte réglementaire** (directive EU 2002/49/CE) : cartographie des villes de plus de 100k habitants
- **Nécessité:**
  - de disposer d'un modèle standardisé (France, EU)
  - de produire des indicateurs acoustiques « représentatif » de la nuisance ou de la qualité
- **Référence : NMPB 2008**
  - Approche « mixte »

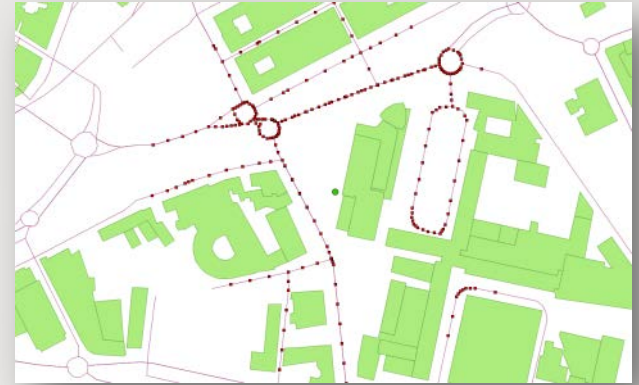
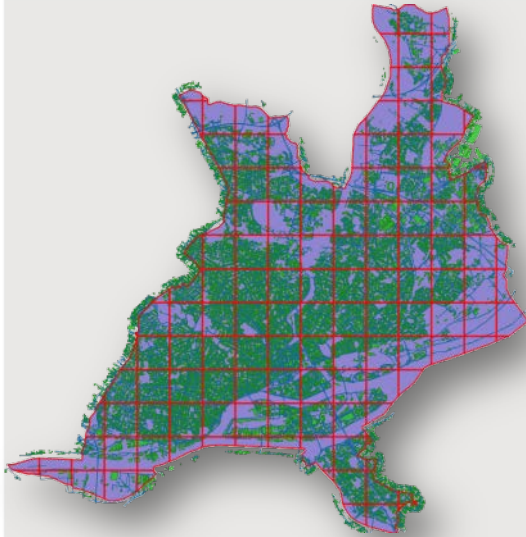
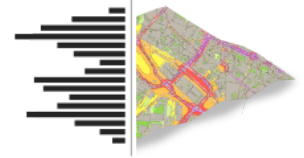
# Focus : NoiseM@p : la prévision du bruit sous SIG



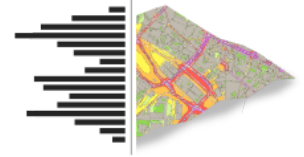
- Principe général :
  - Application de la NMPB 2008
  - Avantages :
    - Implémenté dans un SIG (OrbisGIS)
    - Optimisation des calculs acoustiques (apport de la géomatique)
    - Démarche « Open »
  - Inconvénients :
    - IHM (NoiseM@p)
    - Données d'entrée (trafic, topo)
  - **Applications** (Ifsttar) :
    - Cartographie des villes
    - Évaluation de « stratégies » d'aménagement (PDU, urbanisme)
    - Enseignements et recherche



# Focus : NoiseM@p : la prévision du bruit sous SIG



# Focus : NoiseM@p : la prévision du bruit sous SIG

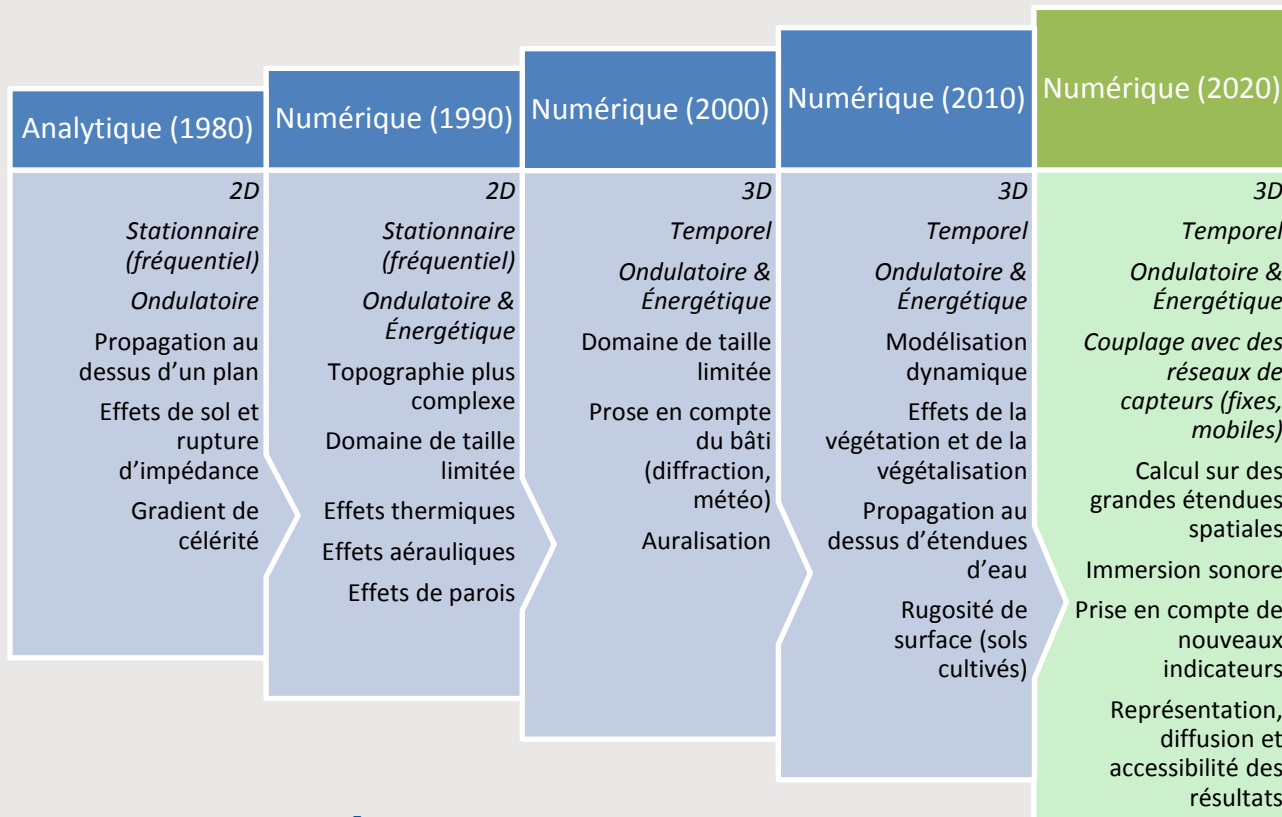


- **Quelques perspectives :**
  - Production/diffusion automatisée de cartes de bruit (intégration de modèles de trafic, qualité des données d'entrée)
  - Couplage modélisation & mesure (assimilation de données)
  - Réseaux de capteurs fixes & mobiles (problématique « capteurs » : du classe 1 au « bas coût »)
  - Mesure participative (problématique « capteurs », mesure, « motivation »)
  - Production de nouveaux indicateurs (au-delà du « réglementaire »)





# Conclusion : une évolution continue...



- **Deux visions en parallèle :**
  - Approche de référence
  - Approche d'ingénierie

# Merci pour votre attention

## en ligne...

[www.lae.ifsttar.fr](http://www.lae.ifsttar.fr) : présentation du Laboratoire d'Acoustique Environnementale

[i-simpa.ifsttar.fr](http://i-simpa.ifsttar.fr) : I-Simpa, un logiciel open-source pour l'acoustique des salles

[noisemap.orbisgis.org](http://noisemap.orbisgis.org) : NoiseM@p, un logiciel open-source pour des études d'impact en milieu extérieur

[lms2002-2007.ifsttar.fr](http://lms2002-2007.ifsttar.fr) : LMTS, une base de données expérimentale pour l'étude de la propagation acoustique en milieu extérieur

## Ifsttar

Centre de Nantes

Route de Bouaye, CS 4

44344 Bouguenais Cedex

Tél. +33 (0)2 40 84 57 89

Fax. +33 (0)2 40 84 59 00

[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)

[www.lae.ifsttar.fr](http://www.lae.ifsttar.fr)

## Contributions :

- Benoit GAUVREAU (CR LAE)
- Gwenaël GUILLAUME (CDD LAE puis CNRS)
- Nicolas FORTIN (CDD LAE puis CNRS)
- Atelier SIG de l'IRSTV (CNRS)



# Références

- Aballea, François, Maud Priour, Jérôme Defrance, et Eric Premat. 2003. « Une approche hybride pour la propagation du son en milieu extérieur complexe ». *Mécanique & Industries* 4 (4): 411-14. doi:10.1016/S1296-2139(03)00081-2.
- Albert, Donald G., et Lanbo Liu. 2010. « The effect of buildings on acoustic pulse propagation in an urban environment ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 127 (3): 1335-46. doi:10.1121/1.3277245.
- Doc, Jean-Baptiste, Bertrand Lihoreau, Simon Félix, Cédric Faure, et Guillaume Dubois. 2015. « Three-dimensional parabolic equation model for low frequency sound propagation in irregular urban canyons ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 137 (1): 310-20. doi:10.1121/1.4904700.
- Heimann, Dietrich. 2007. « Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects ». *Applied Acoustics, Time-domain modelling in outdoor sound propagation*, 68 (2): 217-37. doi:10.1016/j.apacoust.2005.10.002.
- Hornikx, Maarten. 2009. « Numerical Modelling of Sound Propagation to Closed Urban Courtyards ». Doctoral thesis, Chalmers University of Technology. <http://publications.lib.chalmers.se/publication/94249-numerical-modelling-of-sound-propagation-to-closed-urban-courtyards>.
- Pelat, Adrien. 2009. *Approche modale de la propagation acoustique dans les guides d'ondes ouverts : application à l'acoustique urbaine*. Le Mans. <http://www.theses.fr/2009LEMA1014>.