



OPÉRATION *mécanique* ET *SYSTÈMES VIVANTS*
DÉPARTEMENT DE *mécanique - LADHYX / LMS*
MECHANICS AND LIVING SYSTEMS INITIATIVE



SONIC
emotion
the 3D sound experts

De la vibration à la perception ...

Création d'environnements virtuels audio-visuels à l'aide de plaques multi-exciteurs de grandes dimensions

Marc Rébillat

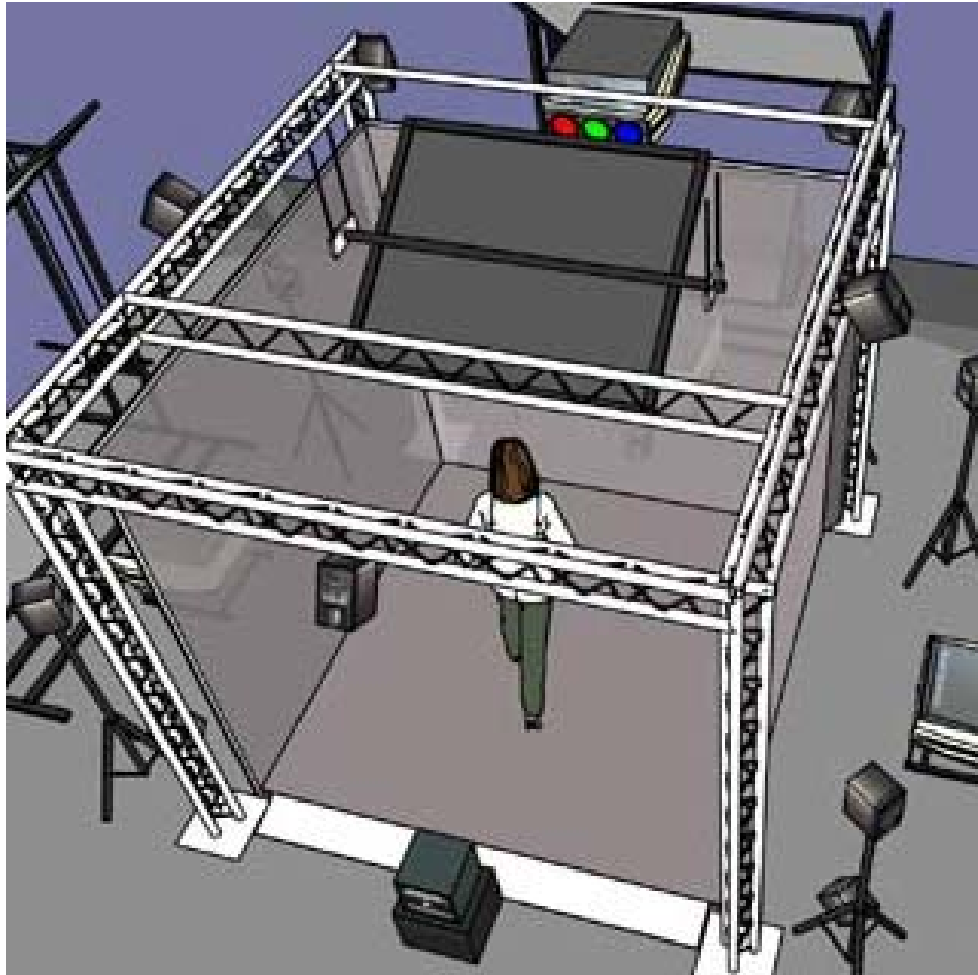
LMS, École Polytechnique & LIMSI-CNRS, Université Paris-Sud

Direction: **Xavier Boutillon**, *Directeur de Recherche au CNRS, LMS École Polytechnique*

Co-direction: **Brian F.G. Katz**, *Chargé de Recherche au CNRS, LIMSI, Université Paris-Sud*

Étienne Corteel, *Directeur scientifique (CSO), sonic emotion labs*

Dispositifs audio-visuels pour la réalité virtuelle



Source: EVE project: <http://eve.hut.fi/>

**Solutions sonores
actuelles peu
satisfaisantes**



**Faible cohérence
spatiale audio-visuelle**

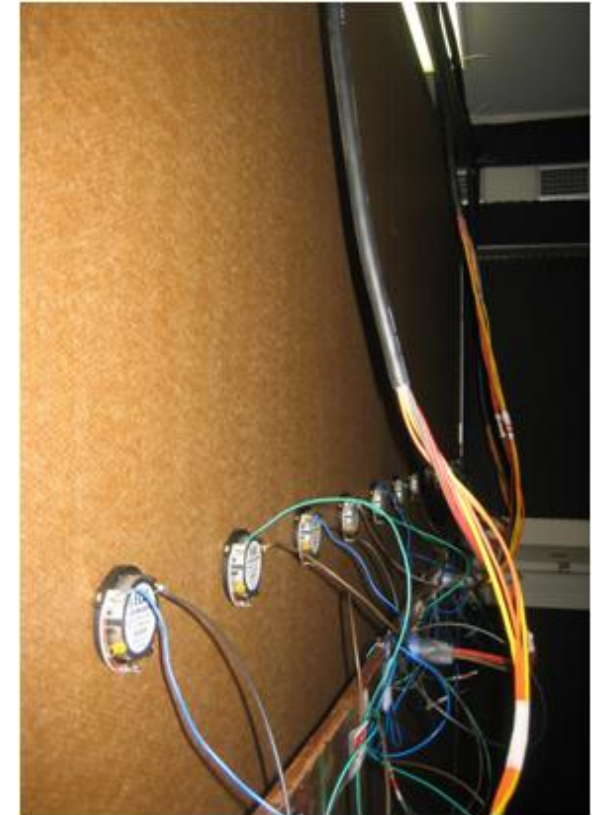
Apports du son spatialisé à la réalité virtuelle

- ❑ **Qualité audio-visuelle perçue** [You et al., 2010]
 - Qualités audio et visuelle non-indépendantes

- ❑ **Sensation de présence** [Hendrix et al., 1995]
 - Sensation d'être « dans la scène virtuelle »

- ❑ **Intelligibilité** [Boone, 2004]
 - Compréhension de scènes complexes

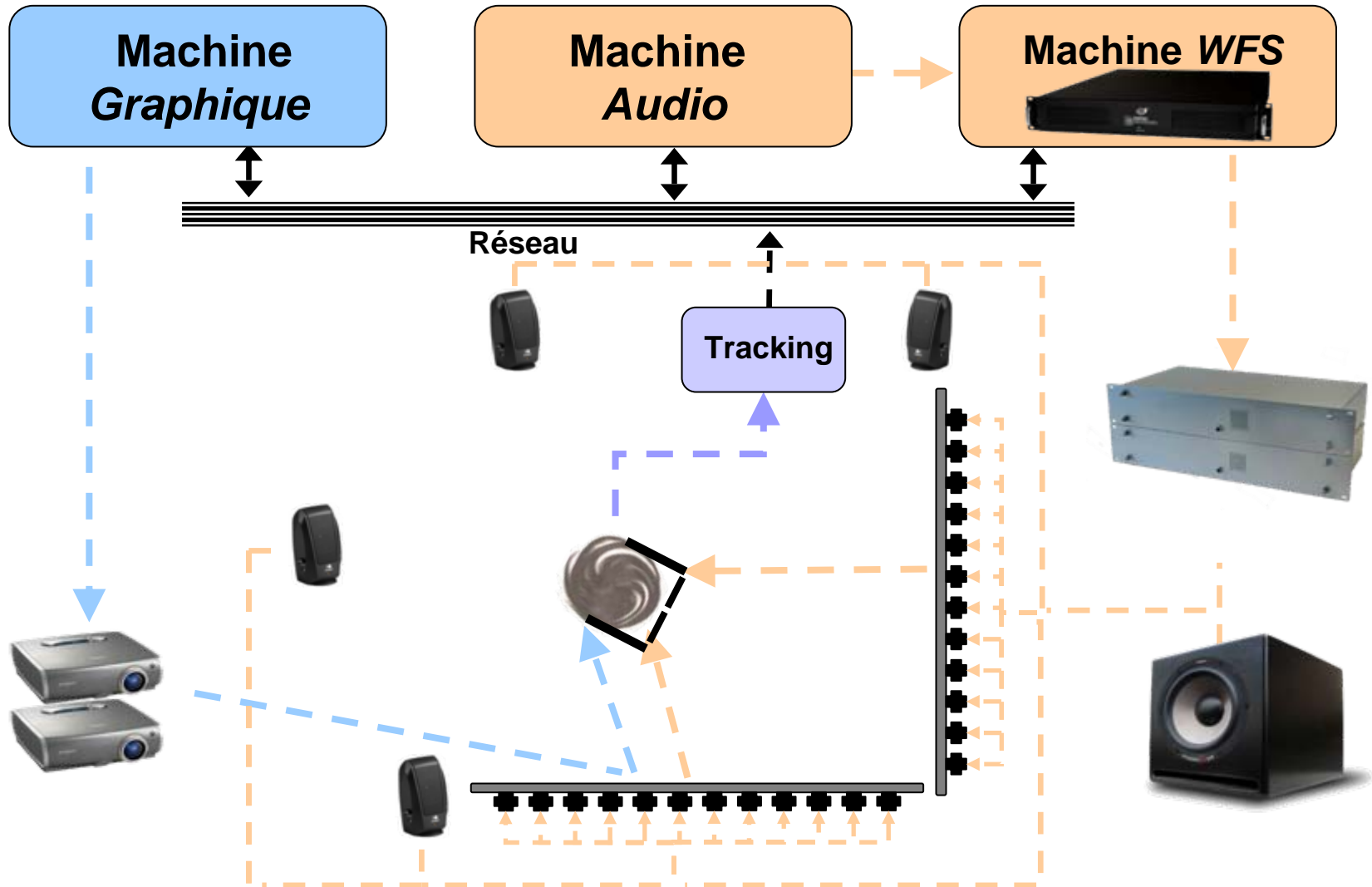
Solution proposée: le SMART-I²



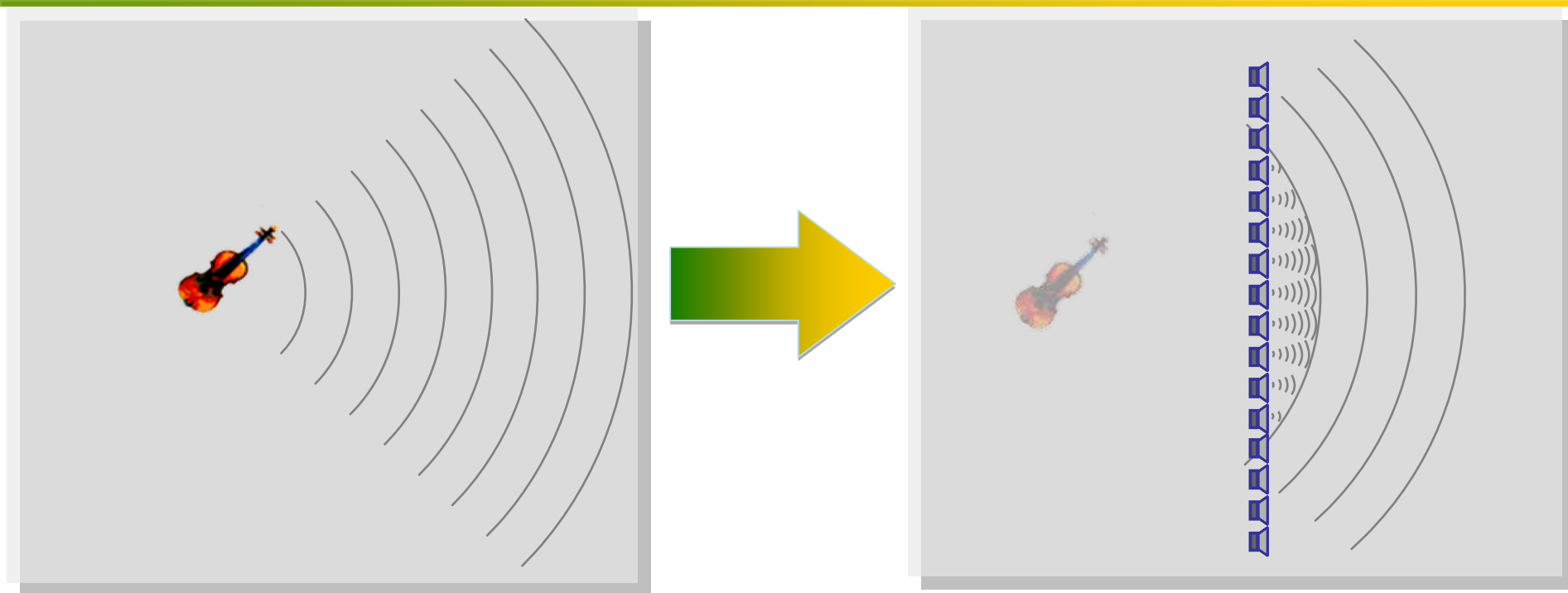
Les écrans sont les haut-parleurs

M. Rébillat, E. Corteel & B. F.G. Katz « SMART-I²: Spatial Multi-user Audio-visual Real-Time Interactive Interface »
125th Convention of the Audio Engineering Society, 2008

Architecture du SMART-I²



Holophonie [Berkhout, JASA, 1993]

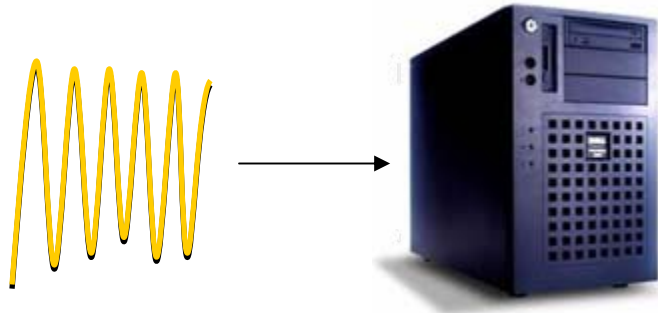


□ Huygens-Fresnel & Kirchhoff-Helmholtz

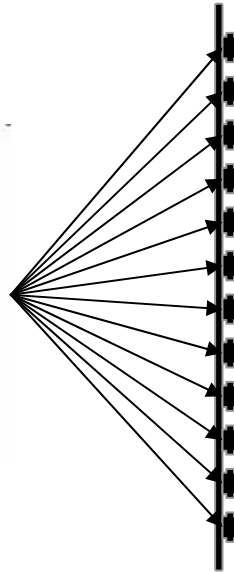
- 24 excitateurs espacés de 20 cm
 - ✓ Champ physiquement reconstruit jusqu'à $f_{al} \approx 1.5$ kHz (Nyquist)
 - ✓ Caractéristiques perceptives conservées pour $f > f_{al}$

Problématique

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



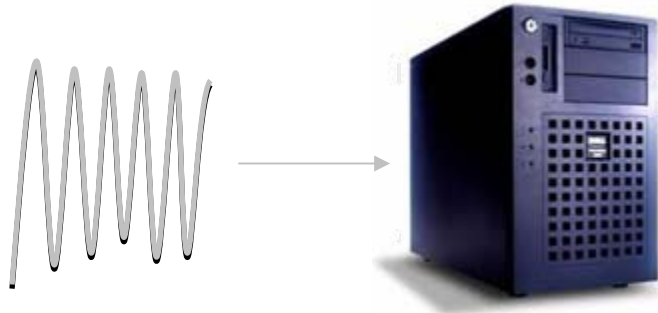
Perception



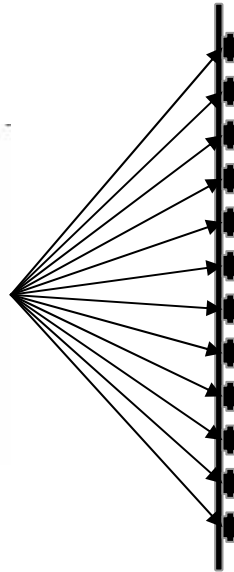
Comment transformer des vibrations en indices sonores spatiaux perceptibles d'un environnement virtuel audio-visuel ?

Problématique

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



Perception



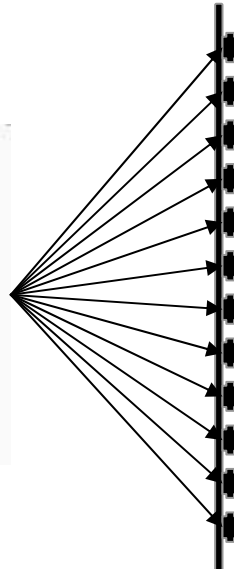
- Création de sources secondaires pour l'holophonie
 - Sources **linéaires** (signal) et **ponctuelles** (acoustique)
 - *Impact*: qualité du champ sonore et du timbre

Problématique

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



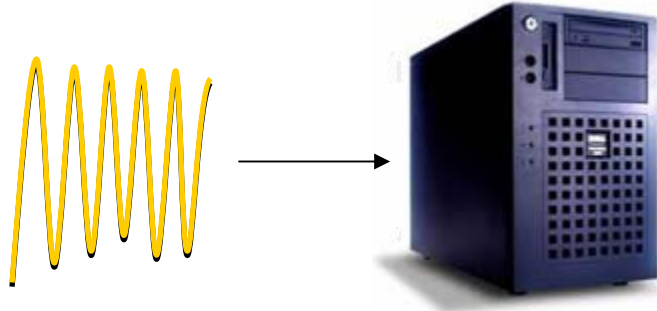
Perception



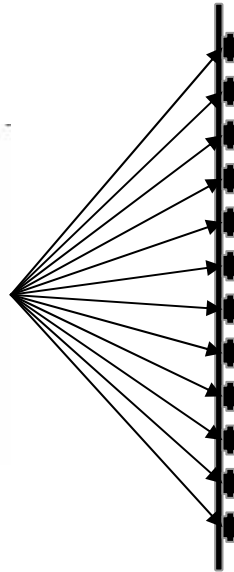
- ❑ Perception spatiale du monde virtuel
 - **Cohérence spatiale audio-visuelle**

Plan

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)

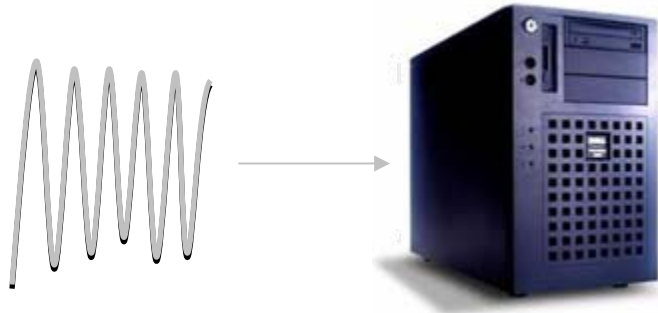


Perception

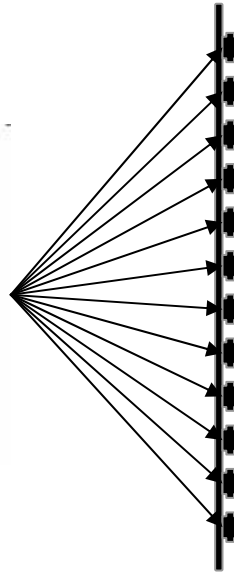


- I) **Non-linéarités dans les systèmes vibrants** (signal)
- II) **Dynamique des panneaux « sandwich »** (mécanique)
- III) **Perception spatiale du monde virtuel** (psychophysique)

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



Perception



I) Non-linéarités dans les systèmes vibrants

- ❑ L'holophonie suppose des sources **linéaires** (signal)

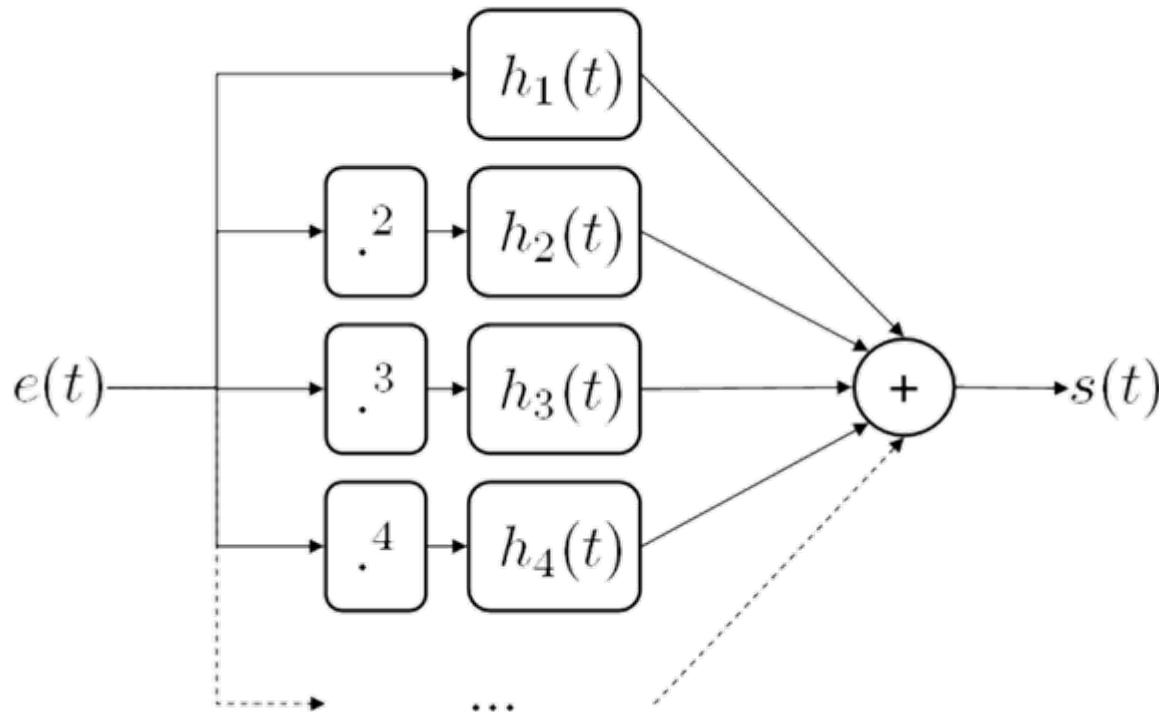
Distorsion harmonique totale (DHT) [Czerwinski, JAES, 2001]



❑ **Non-représentatif** du système

➤ Ce n'est pas un modèle prédictif

Modèle « signal » [Chen, Proceedings of the IEEE, 1995]



➤ Hypothèses:

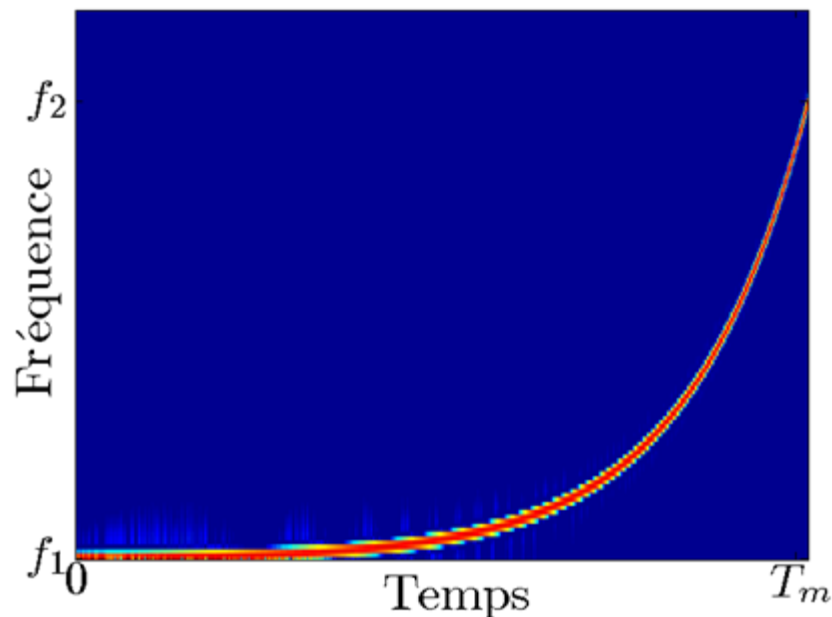
- ✓ Système faiblement non-linéaire
- ✓ Noyaux de Volterra diagonaux

□ Modèles de Hammerstein en cascade

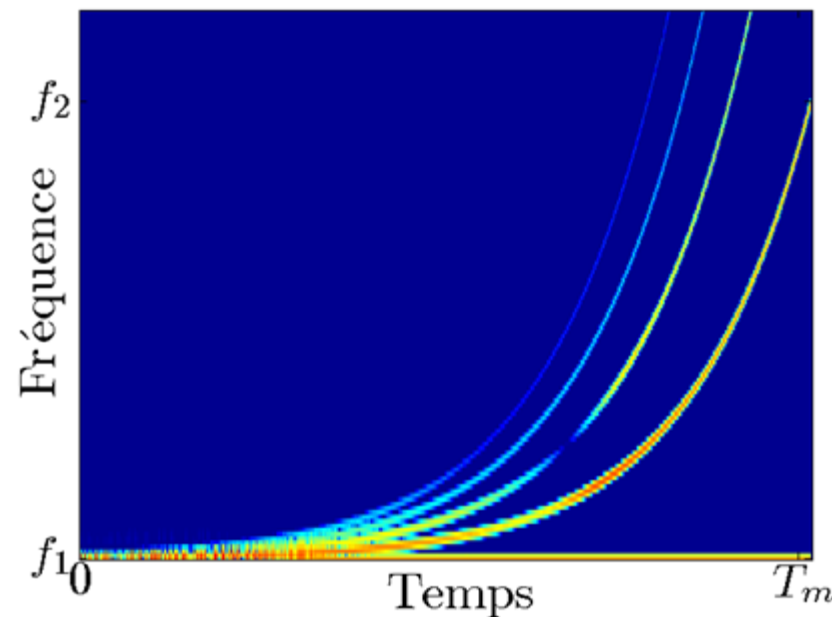
- **Adapté au haut-parleurs?**
- **Estimation des noyaux $h_k(t)$?**

Sweeps sinusoidaux exponentiels

Entrée $e(t)$



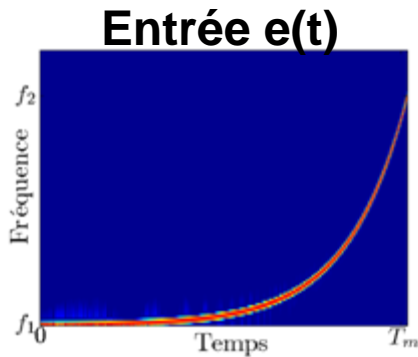
Sortie $s(t)$



□ $k^{\text{ième}}$ harmonique:

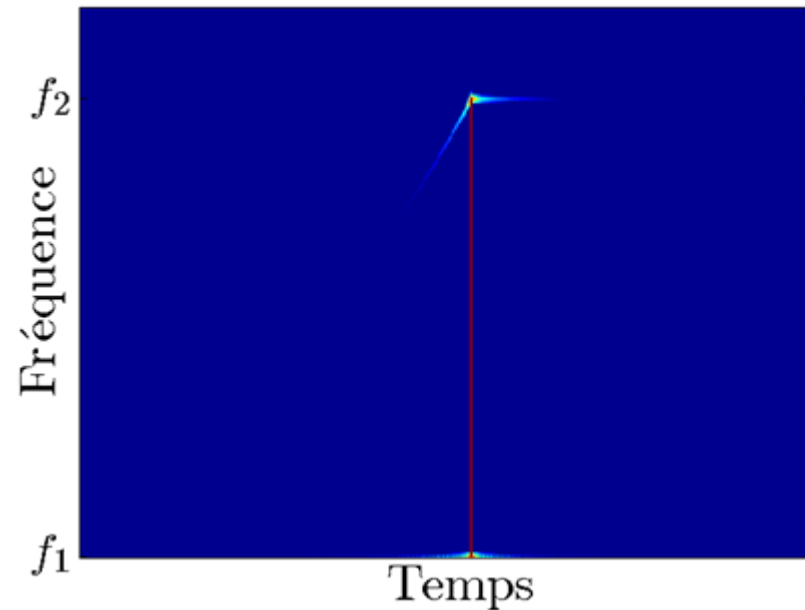
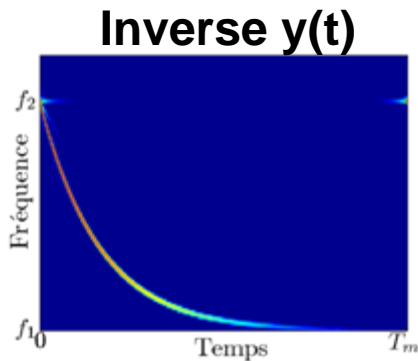
Si $T_m \in \{T_1, T_2, \dots\}$, alors $\cos [k\phi(t)] = \cos [\phi(t + \Delta t_k)]$

Filtre inverse



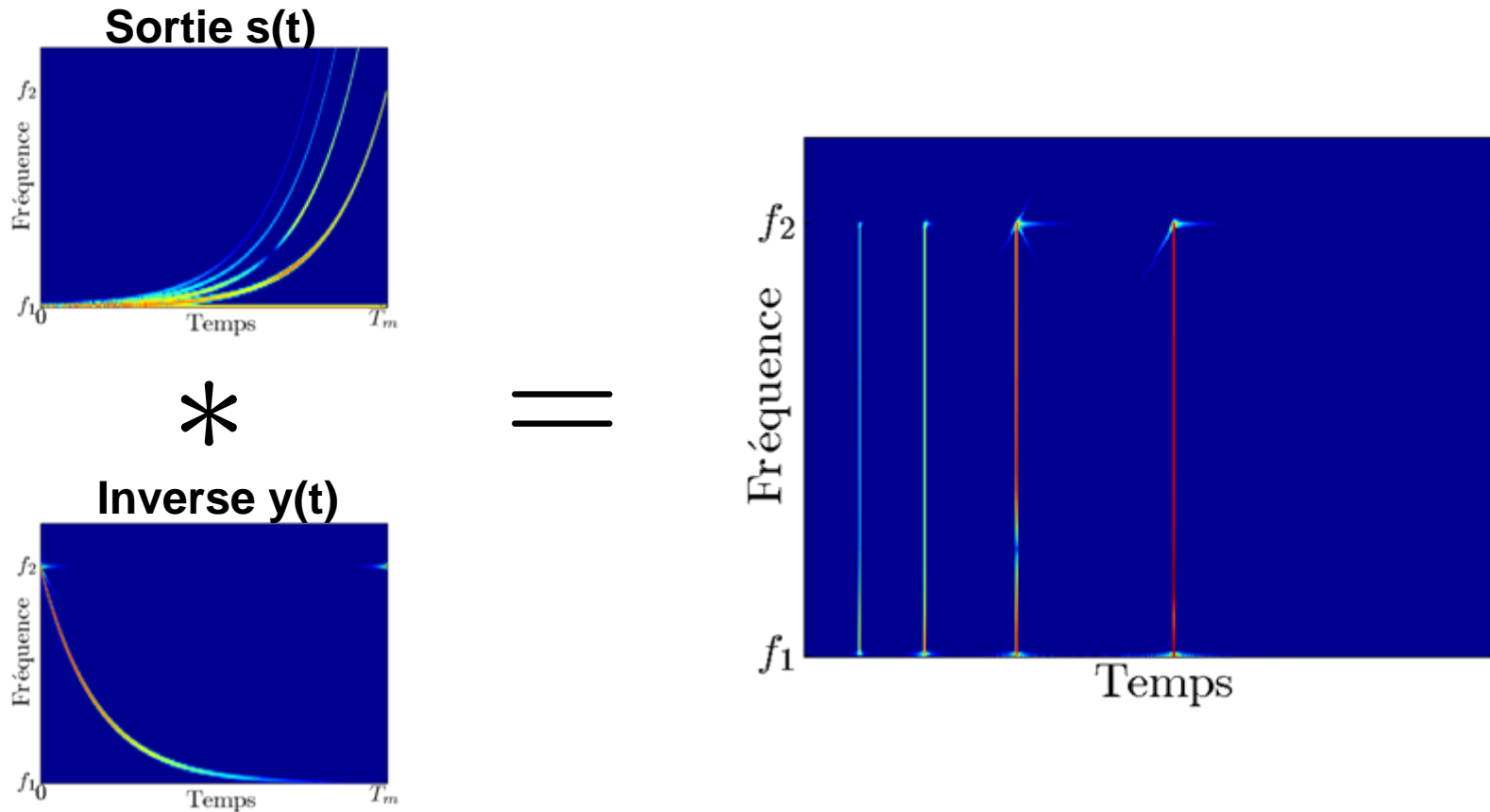
*

=



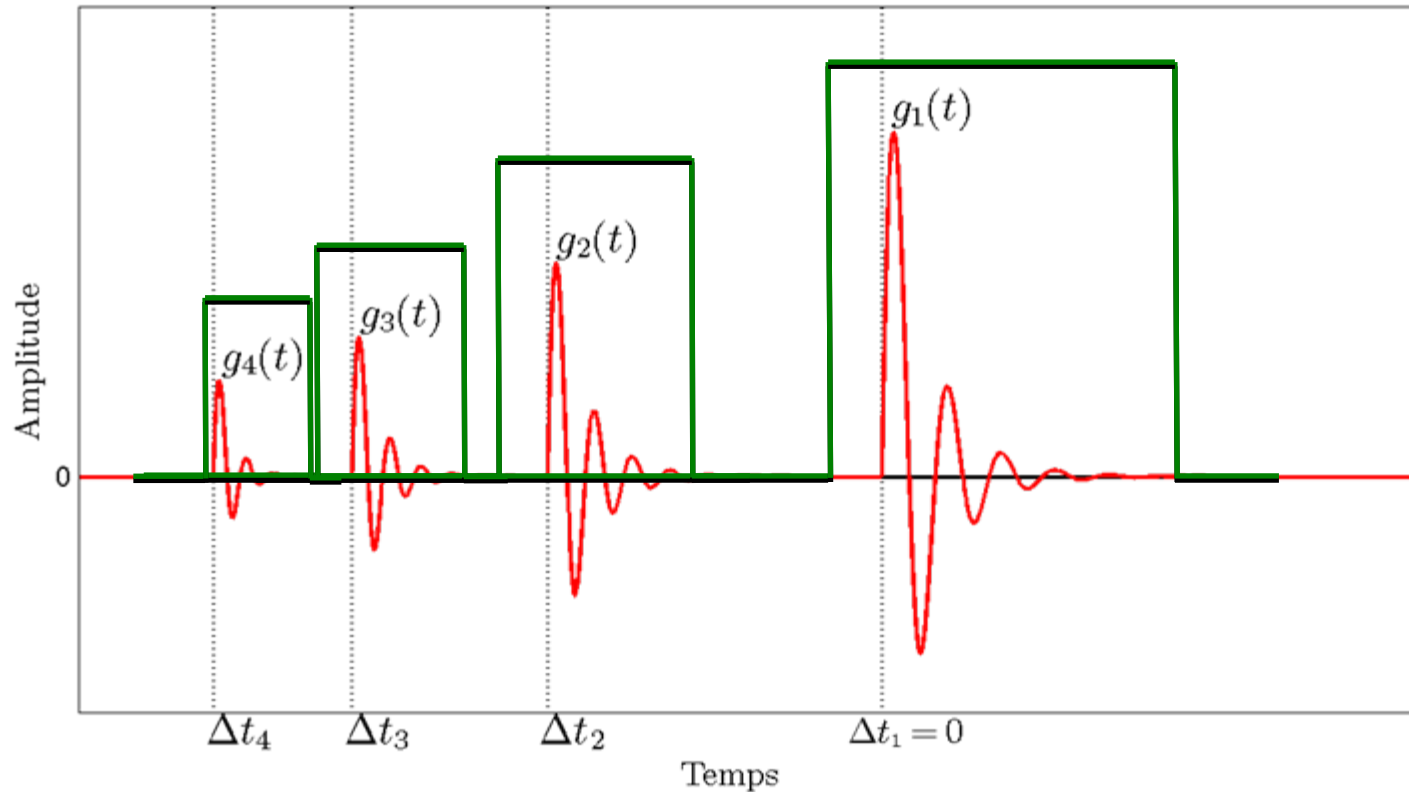
- Il faut rendre la **sortie indépendante** de l'entrée
- Alignement temporel** de l'énergie du fondamental

Effet du filtre inverse sur le signal de sortie [Farina 2000]



□ **Alignement temporel** de l'énergie des harmoniques

Fenêtrage temporel



□ $g_n(t)$: contributions des différents harmoniques

Des harmoniques aux puissances ...

$h_2(t)$: contribution de la
puissance 2

$g_2(t)$: contribution du
2^{ème} harmonique

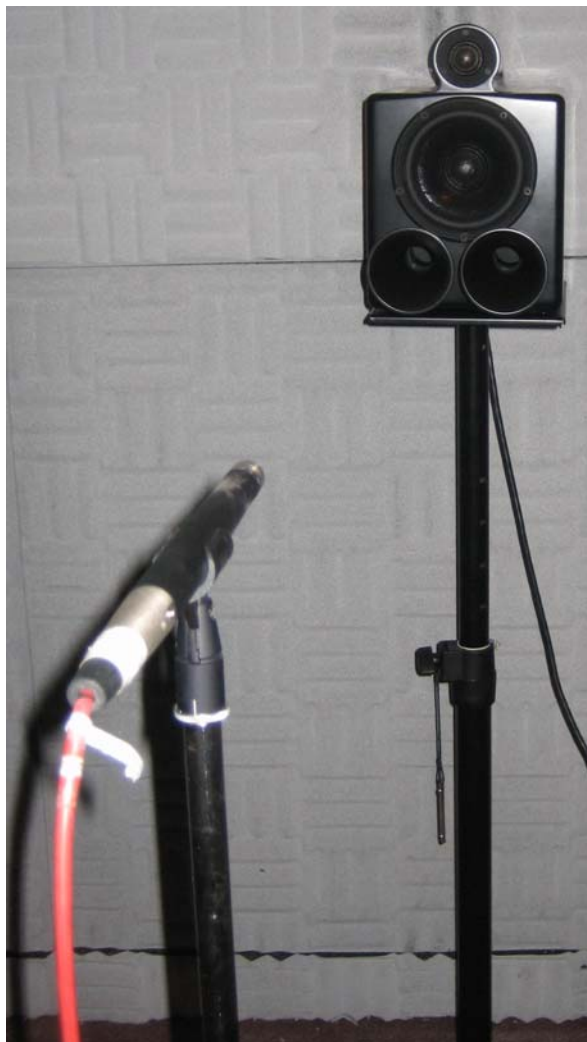
$$\cos^2(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2x)$$

□ Relations linéaires entre $h_k(t)$ et $g_n(t)$:

$$\begin{pmatrix} h_1(t) \\ \vdots \\ h_N(t) \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} g_1(t) \\ \vdots \\ g_N(t) \end{pmatrix}$$

□ **Tous les noyaux $h_k(t)$ sont estimés**

Mise en œuvre

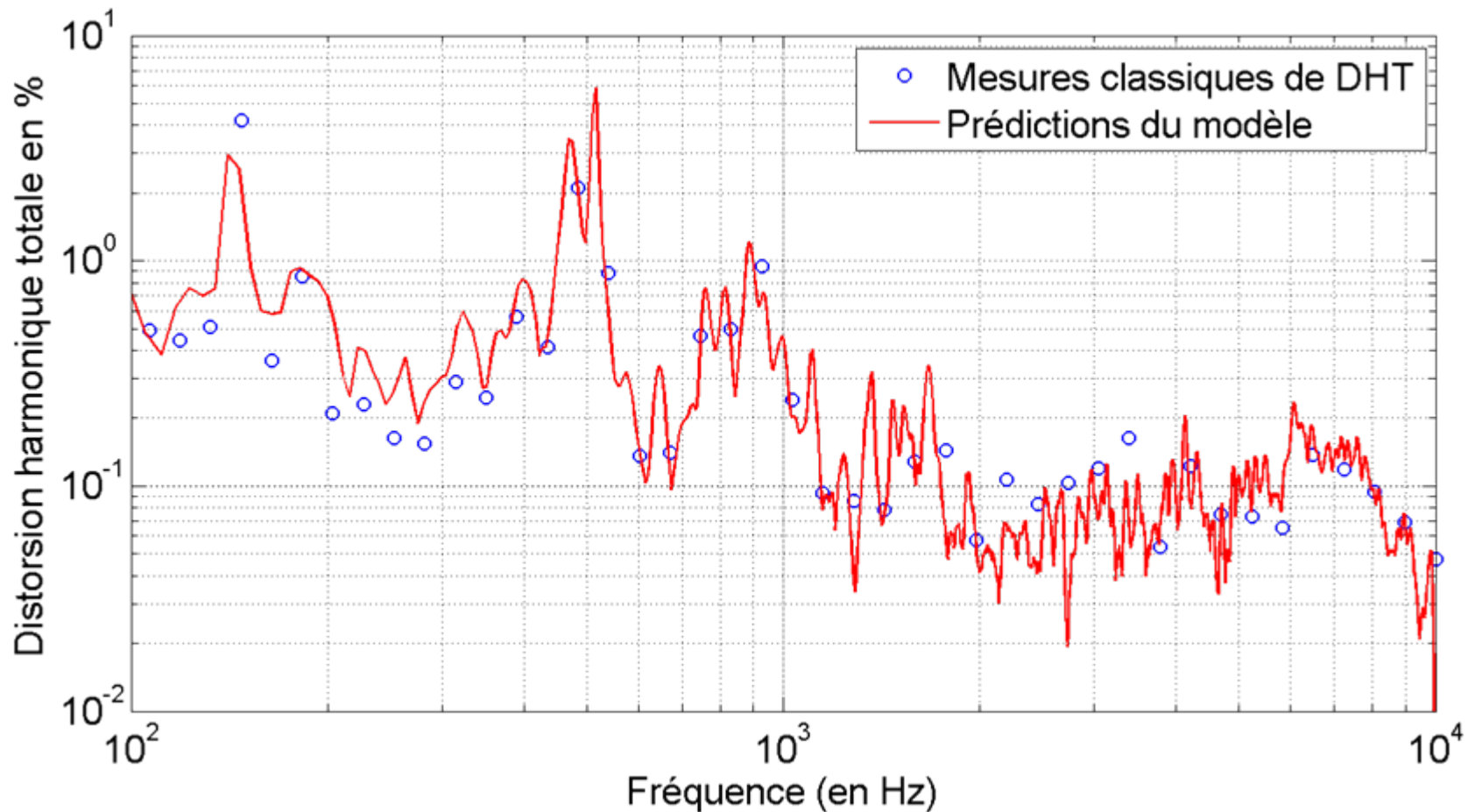


- Distorsion harmonique totale
- Estimation des noyaux $h_k(t)$

Paramètre	f_1	f_2	f_s	T	N
Valeur	20 Hz	20 kHz	192 kHz	15 s	5

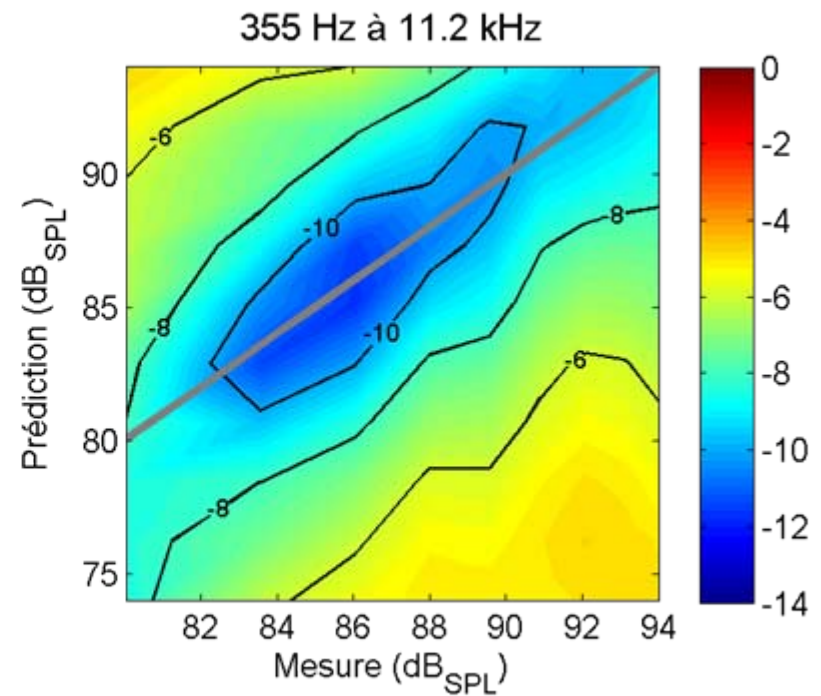
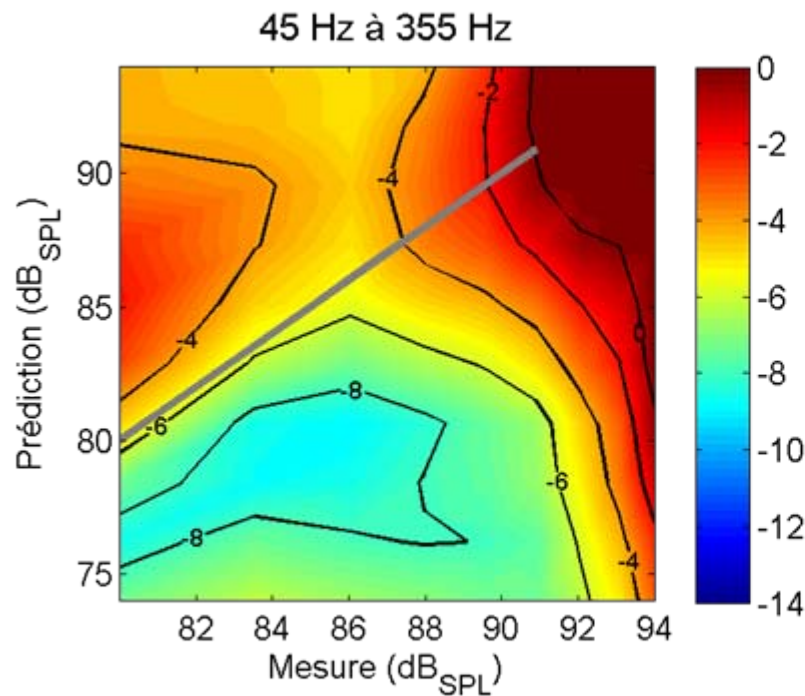
I) Non-linéarités

Haut-parleur électrodynamique: 85 dB_{SPL} à 1 m



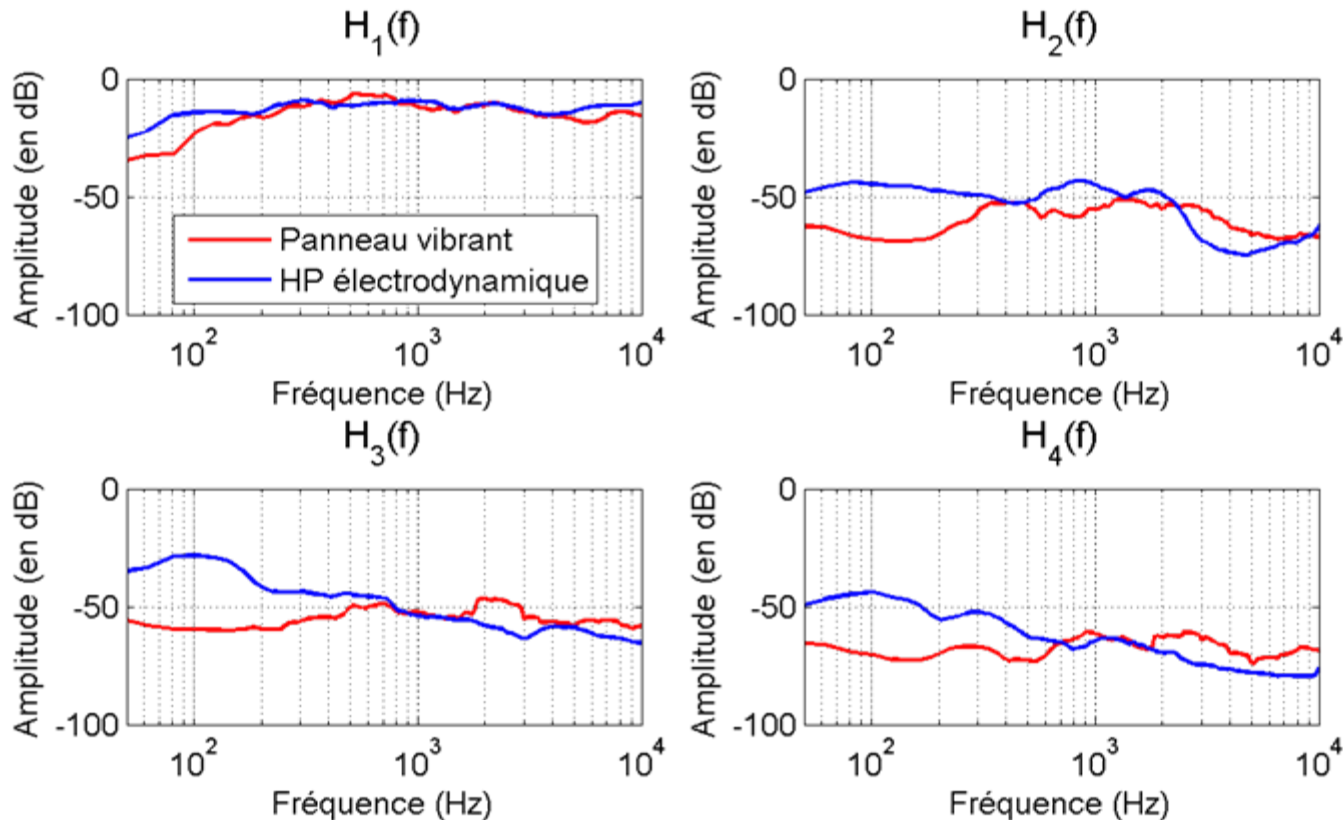
Haut-parleur électrodynamique à différents niveaux

➤ Erreur moyenne fréquentielle de prédiction



□ Modèles de Hammerstein en cascade **adaptés**

Comparaison



□ Panneau vibrant \approx bon haut-parleur

➤ Pas d'augmentation des non-linéarités en basses fréquences

Bilan

Modélisation et caractérisation des non-linéarités dans les systèmes vibrants

□ Méthodologie

- Méthode **rapide** de caractérisation des non-linéarités
- Séparation des non-linéarités dans une **chaîne de systèmes non-linéaires**

□ Application aux panneaux vibrants

- Modèles de Hammerstein en cascade **adapté**
- Linéarité **comparable** aux HPs électrodynamiques

M. Rébillat, R. Hennequin, E. Corteel, & B. F. G. Katz « Identification of cascade of Hammerstein models for the description of nonlinearities in vibrating devices », *Journal of Sound and Vibration*, **2011**, 330, 1018-1038

K. Ege, X. Boutillon, M. Rébillat « Vibroacoustics of the piano soundboard (part I): non-linearity and modal properties in the low and mid-frequency ranges », soumis au *Journal of Sound and Vibration*

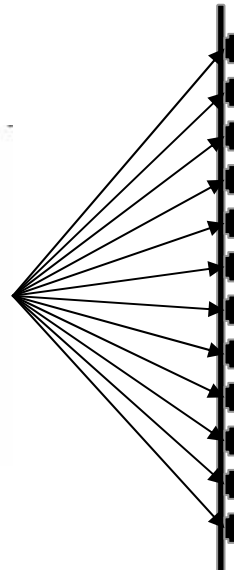
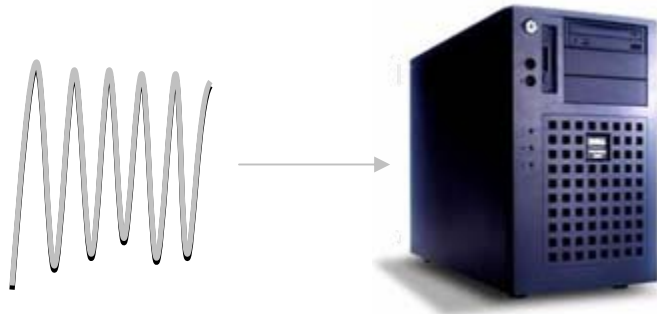
II) Panneaux « Sandwich »

Plan

Spatialisation
(Holophonie)

Restitution AV
(SMART-I²)

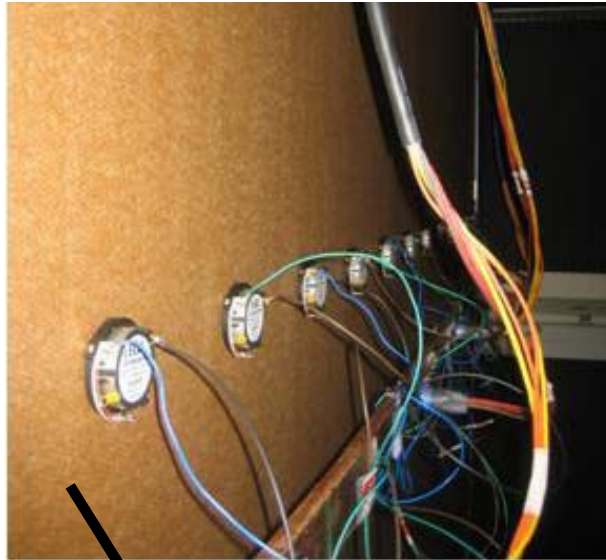
Perception



II) Dynamique des panneaux « sandwich »

- L'holophonie suppose des sources acoustiques **ponctuelles**

Caractérisation mécanique



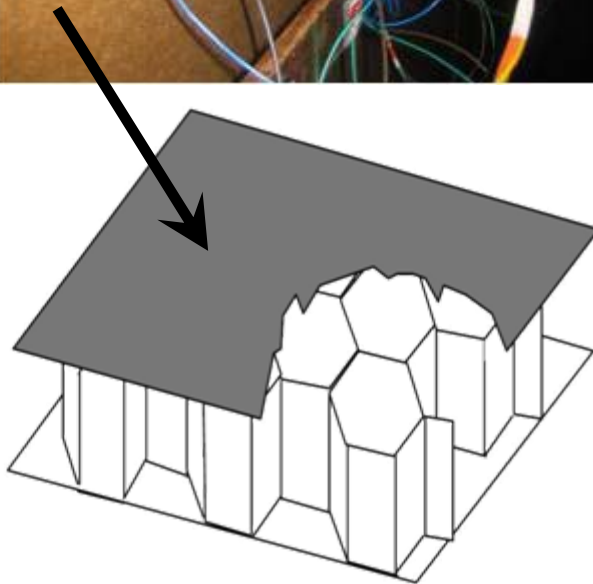
□ **Panneaux:** $m=2.2$ kg, $\mu = 424$ g/m²

➤ **Peaux:** Papier Epoxy

$h_s = 0.2$ mm, $\rho_s = 713$ kg/m³

➤ **Cœur:** Nid d'abeilles Epoxy

$h_c = 4.9$ mm, $h_{\text{cell}} = 4$ mm, $\rho_c = 38$ kg/m³



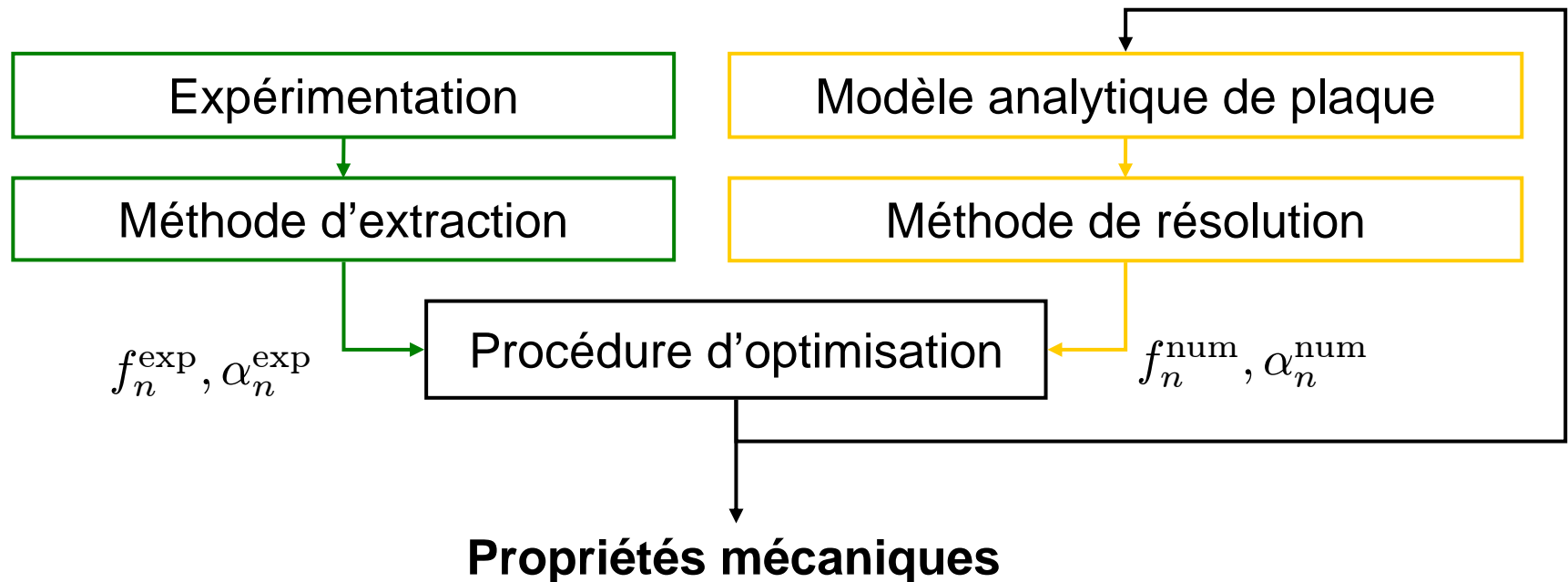
Fabrication
complexe

Matériau
hétérogène

Propriétés mécaniques ?

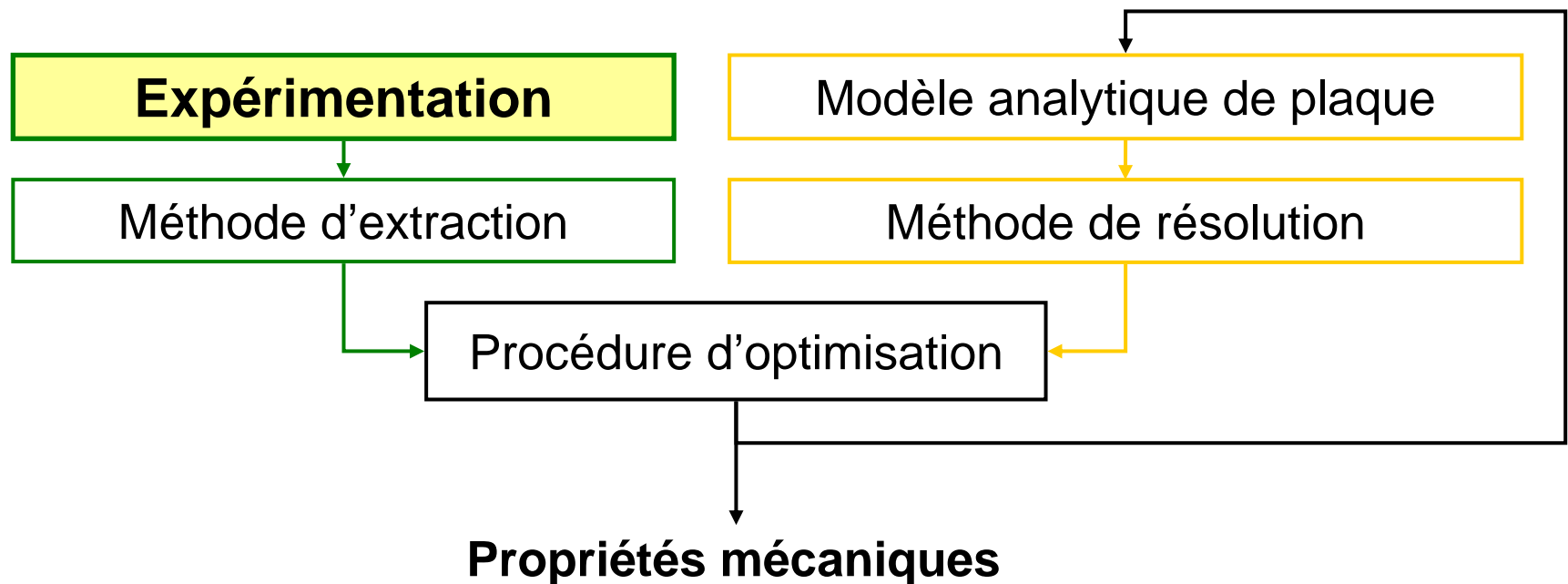
II) Panneaux « Sandwich »

Procédure expérimentale/numérique [Ayorinde, JSV, 2005]



II) Panneaux « Sandwich »

Expérimentation



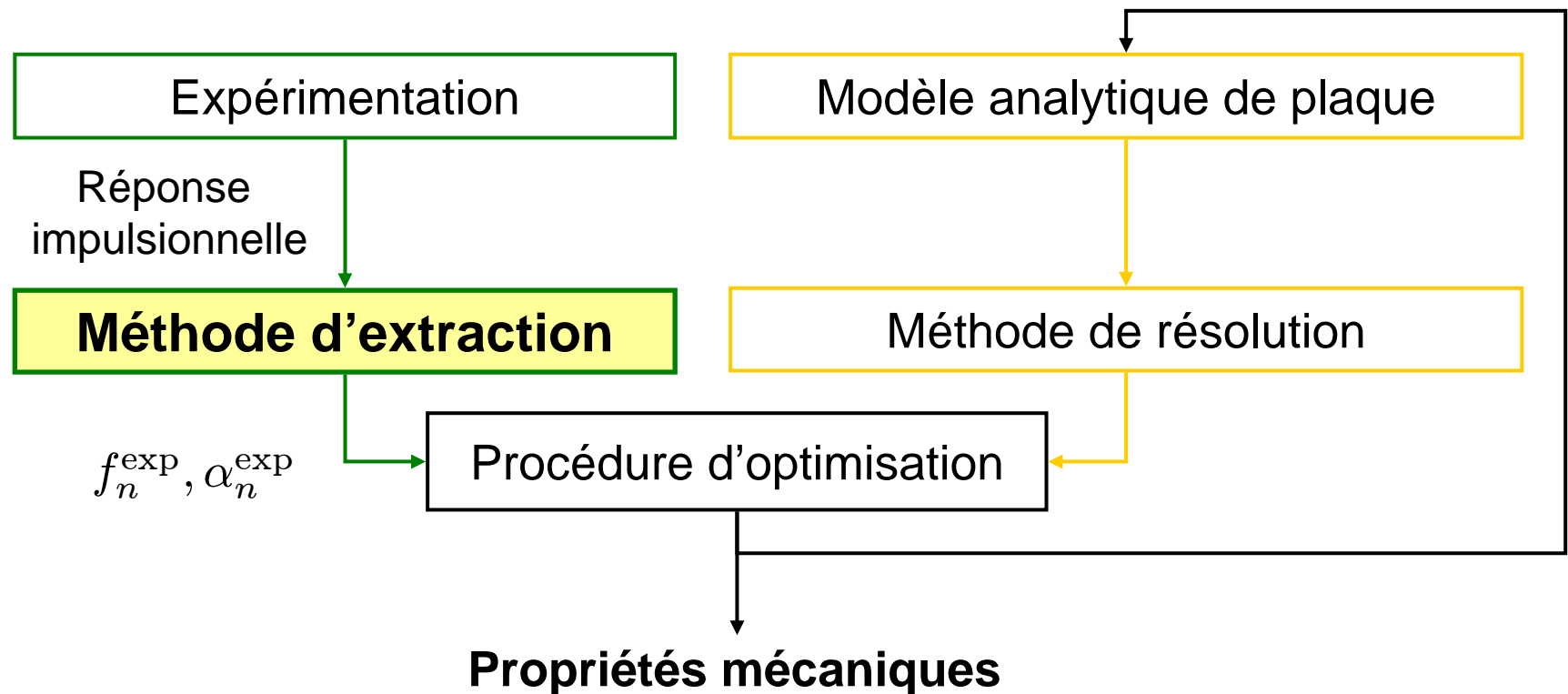
Expérimentation



- Plaque sandwich suspendue “**librement**”
- Excitation **acoustique**
- Mesure de la **vitesse**
- Déconvolution et compensation des non-linéarités

II) Panneaux « Sandwich »

Extraction



Analyse modale haute-résolution [Ege *et al.*, JSV, 2009]

- Modèle: **Somme d'exponentielles décroissantes avec bruit blanc gaussien**

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \xi_n \exp(j2\pi f_n t - \alpha_n t + j\phi_n) + b(t)$$

- **Analyse modale haute-résolution**

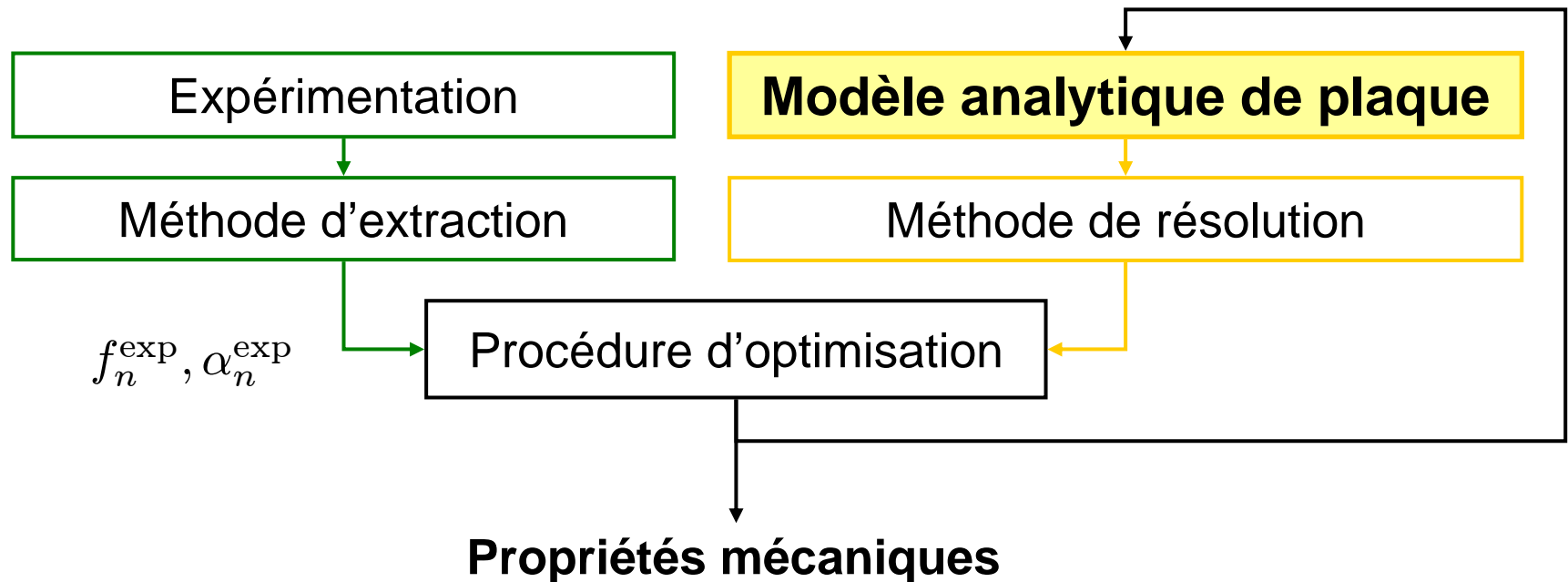
- *ESTER*: Estimation de N (nombre d'exponentielles décroissantes)
- *ESPRIT*: Identification de f_n, α_n

- **Recouvrements modaux importants**

- dépend du rapport « signal/bruit »

II) Panneaux « Sandwich »

Modèle analytique

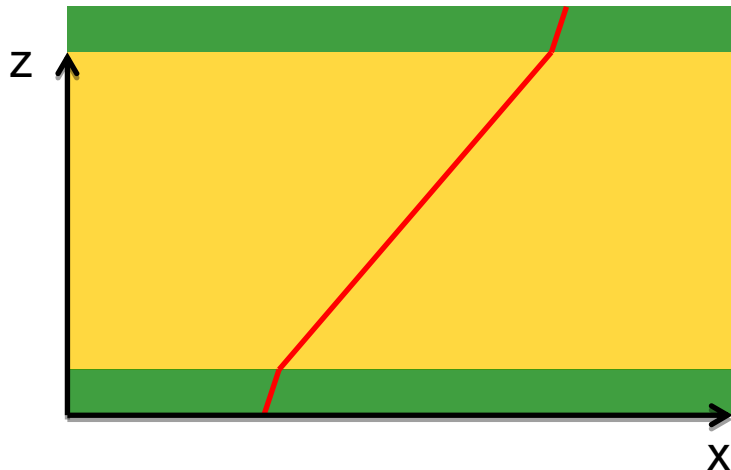
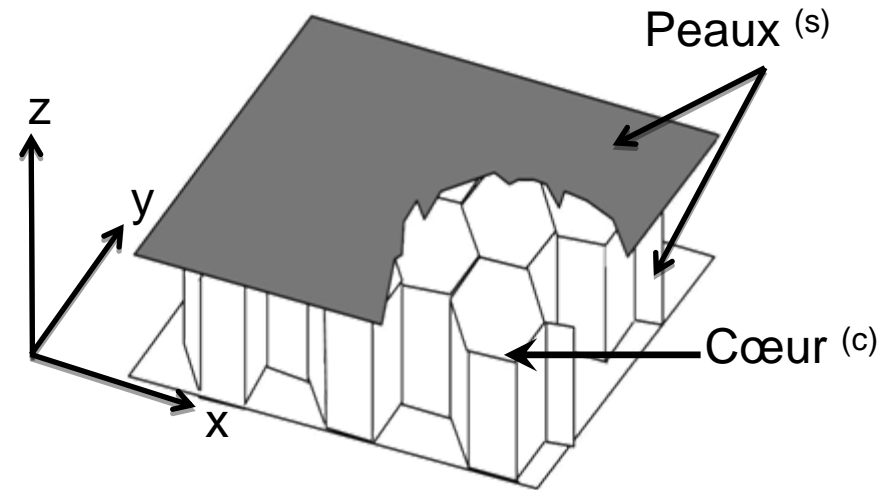


II) Panneaux « Sandwich »

Modèle « Zig/Zag » [Kim, JSV, 2007]

□ Dans **chaque** couche:

- Flexion dans le plan
- Cisaillement hors du plan
- Amortissement



□ Une **seule** couche suffit

- Flexion majoritairement supportée par les peaux
- Cisaillement hors du plan majoritairement supporté par le cœur

Dépendance fréquentielle [Backström, JSV, 2007]

□ Plaque équivalente

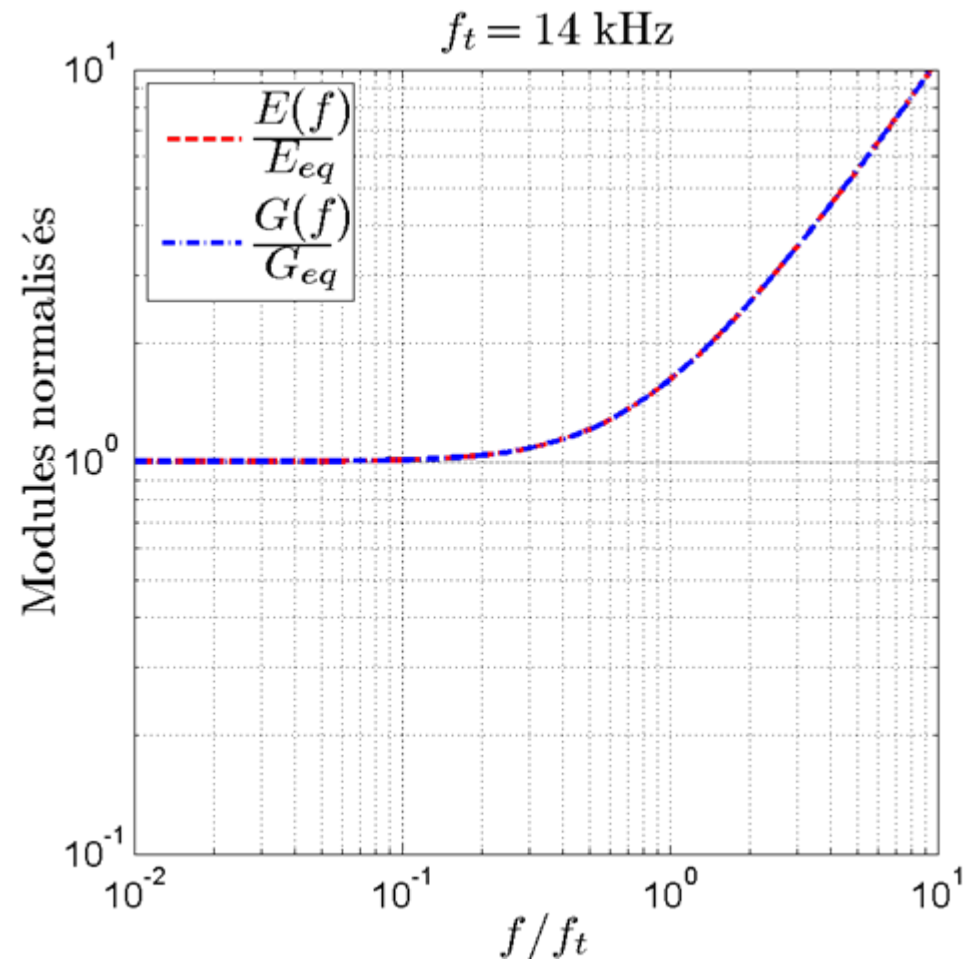
- Flexion dans le plan
- Cisaillement hors du plan
- Modules dépendants de la fréquence



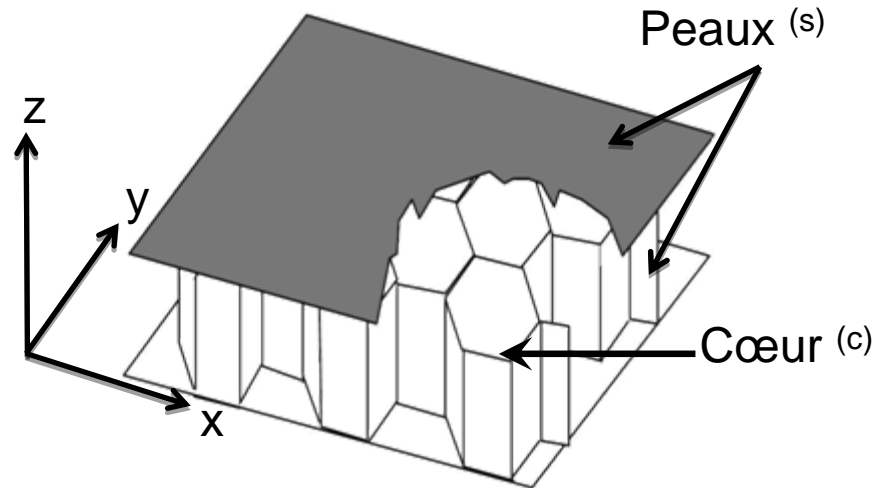
$G(f)$ et $E(f)$

□ Pas **nécessaire** si:

$$f \ll f_t = 14 \text{ kHz}$$



Plaque épaisse [Cremer et al. 2005]



❑ **Plaque épaisse homogène orthotrope amortie**

❑ **Paramètres principaux**

➤ Propriétés dans le plan des peaux:

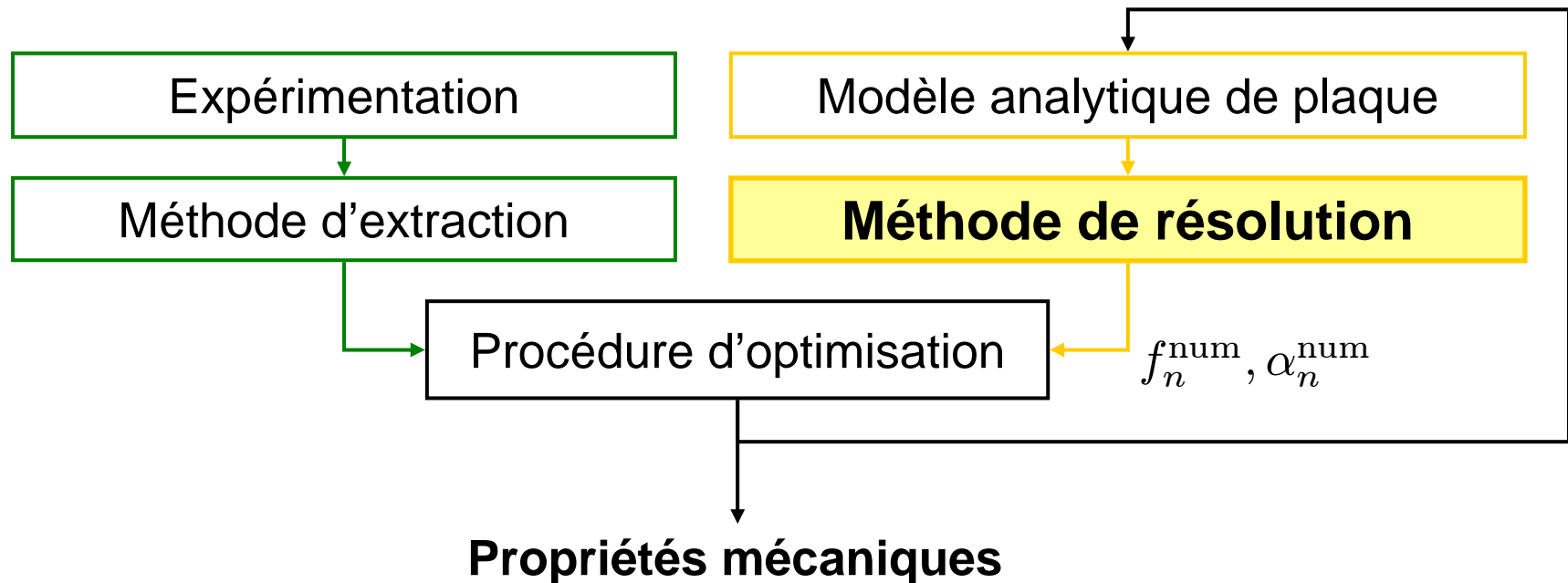
$$E_x^s(1 + j\eta_x^s), E_y^s(1 + j\eta_y^s), G_{xy}^s(1 + j\eta_{xy}^s), \nu_{xy}^s(1 + j\eta_{\nu_{xy}^s}^s)$$

➤ Propriétés « hors-plan » du cœur:

$$G_{xz}^c(1 + j\eta_{xz}^c), G_{yz}^c(1 + j\eta_{yz}^c)$$

II) Panneaux « Sandwich »

Résolution numérique



Résolution numérique

- **Hypothèse: système faiblement amorti**

$$\begin{array}{ccc} \xi_n, f_n & \underset{\sim}{=} & \xi_n, f_n \\ \text{conservatif} & & \text{dissipatif} \end{array}$$

- **Méthode de Rayleigh-Ritz (système conservatif)**

- Base polynomiale
- Principe de Hamilton

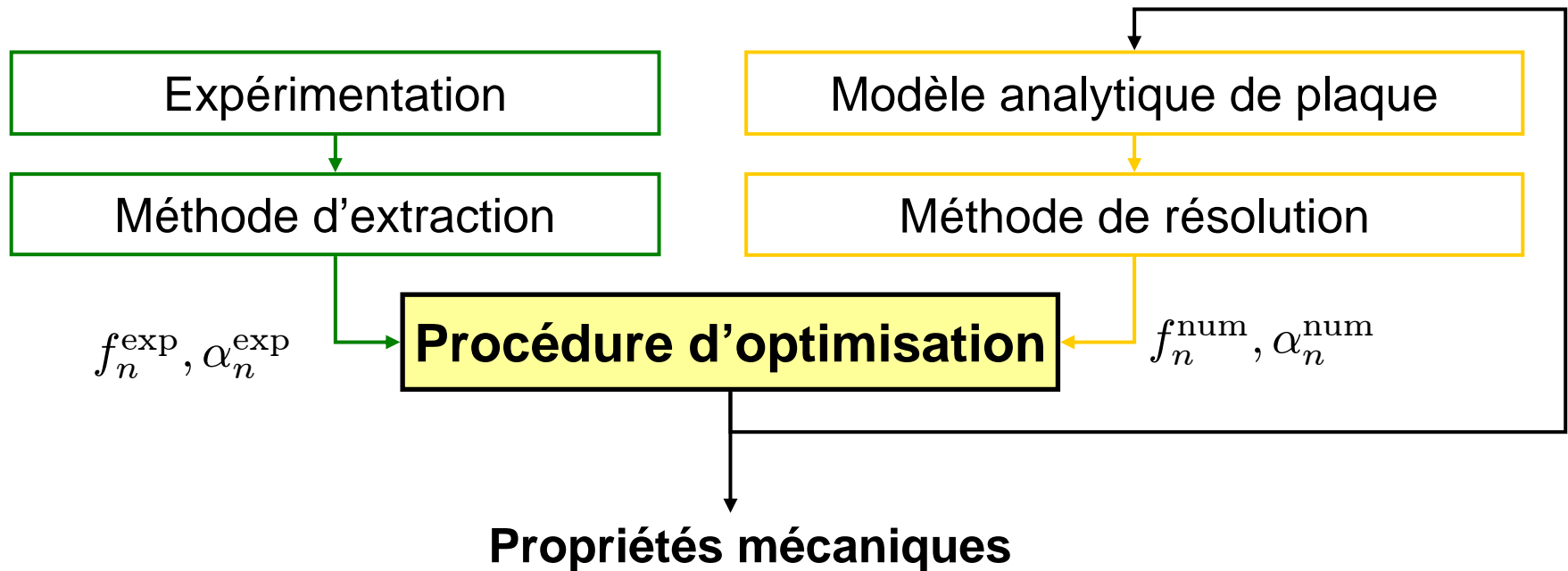


$$\xi_n, f_n$$

- **Amortissements modaux (système dissipatif)**

$$\xi_n, f_n \quad \longrightarrow \quad T_n, \Delta U_n \quad \longrightarrow \quad \alpha_n = \frac{f_n \Delta U_n}{2T_n}$$

Optimisation



Optimisation

□ Fonctions à minimiser

$$C_f = \sum_{n=1}^N \frac{(f_n^{XP} - f_n^{Num})^2}{(f_n^{XP})^2} \quad C_\alpha = \sum_{n=1}^N \frac{(\alpha_n^{XP} - \alpha_n^{Num})^2}{(\alpha_n^{XP})^2}$$

□ Paramètres d'élasticité (problème non-linéaire)

➤ Méthode du gradient

□ Paramètres d'amortissement (problème linéaire)

➤ Méthode des moindres carrés

II) Panneaux « Sandwich »

Possible non-unicité de la solution...

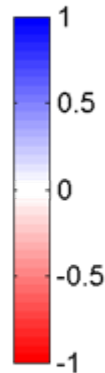
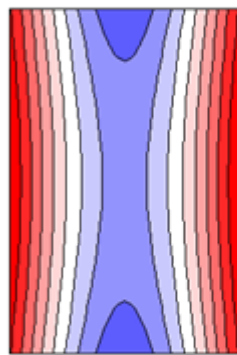
❑ Recherche d'une **solution « physique »**

➤ Paramètres d'élasticité **positifs**

❑ Procédure **d'initialisation**

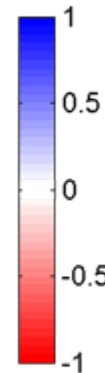
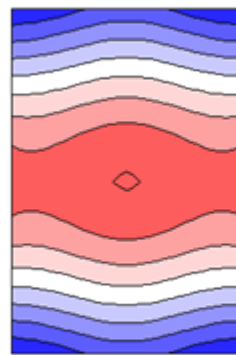
➤ Départ à proximité d'une solution « physique »

Translation selon Z



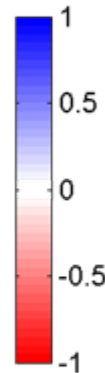
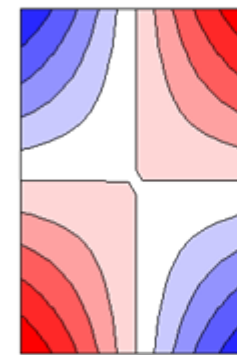
➤ \tilde{E}_x

Translation selon Z



➤ \tilde{E}_y

Translation selon Z



➤ \tilde{G}_{xy}

II) Panneaux « Sandwich »

Mise en œuvre



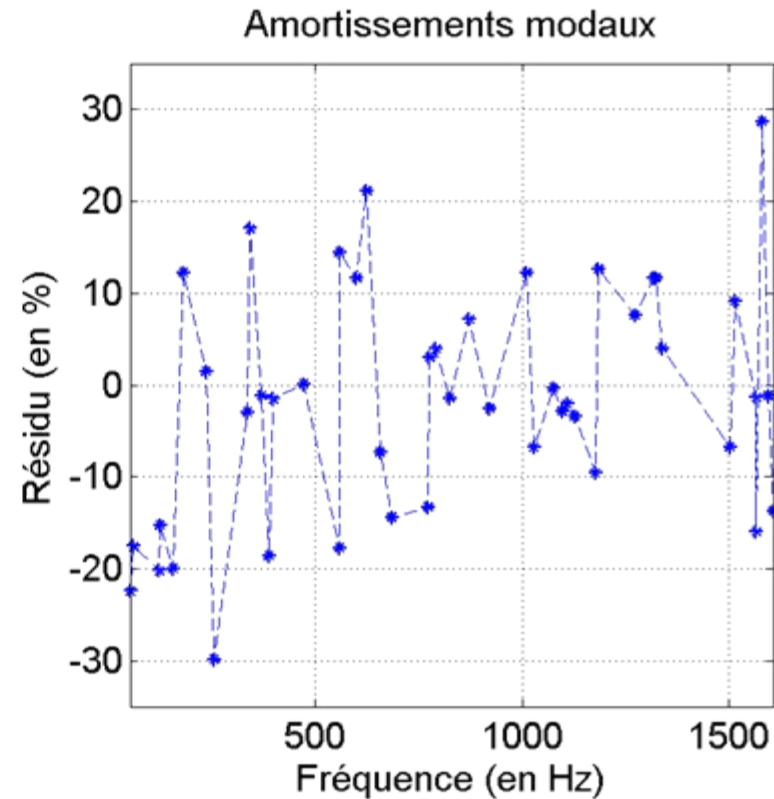
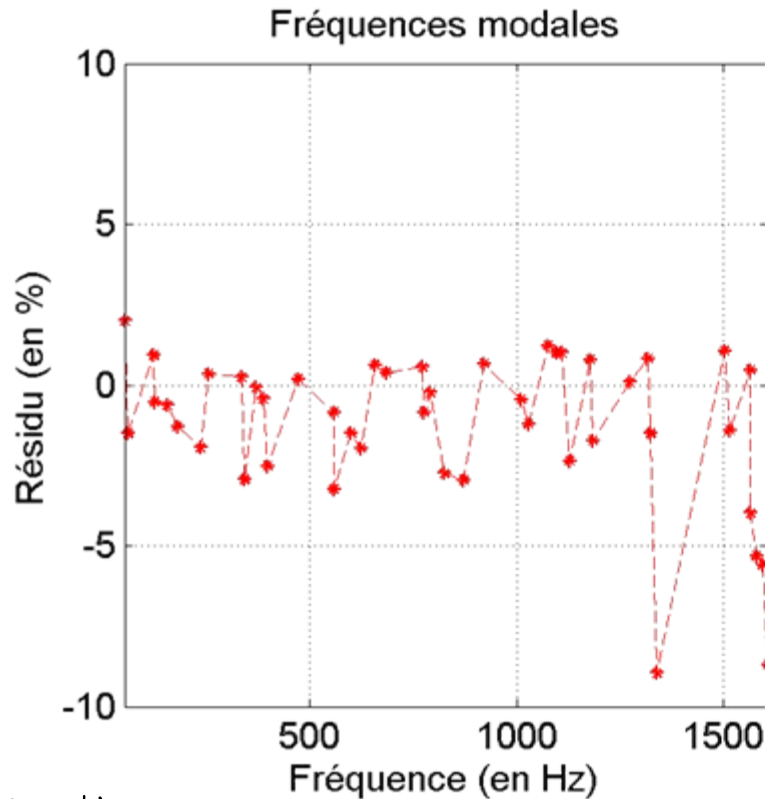
□ Géométrie: 391 x 591 x 5,3 mm³

- Peaux: Papier Epoxy ($h_s = 0.2 \text{ mm}$, $\rho_s = 713 \text{ kg/m}^3$)
- Cœur: nid d'abeilles Epoxy ($h_c = 4.9 \text{ mm}$, $h_{\text{cell}} = 4 \text{ mm}$, $\rho_c = 38 \text{ kg/m}^3$)

□ 45 modes extraits (recouvrement modal de 60%)

II) Panneaux « Sandwich »

Mise en œuvre



$$\left\langle \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \right\rangle = 1.8\%$$



Modèle adapté: **plaque épaisse**

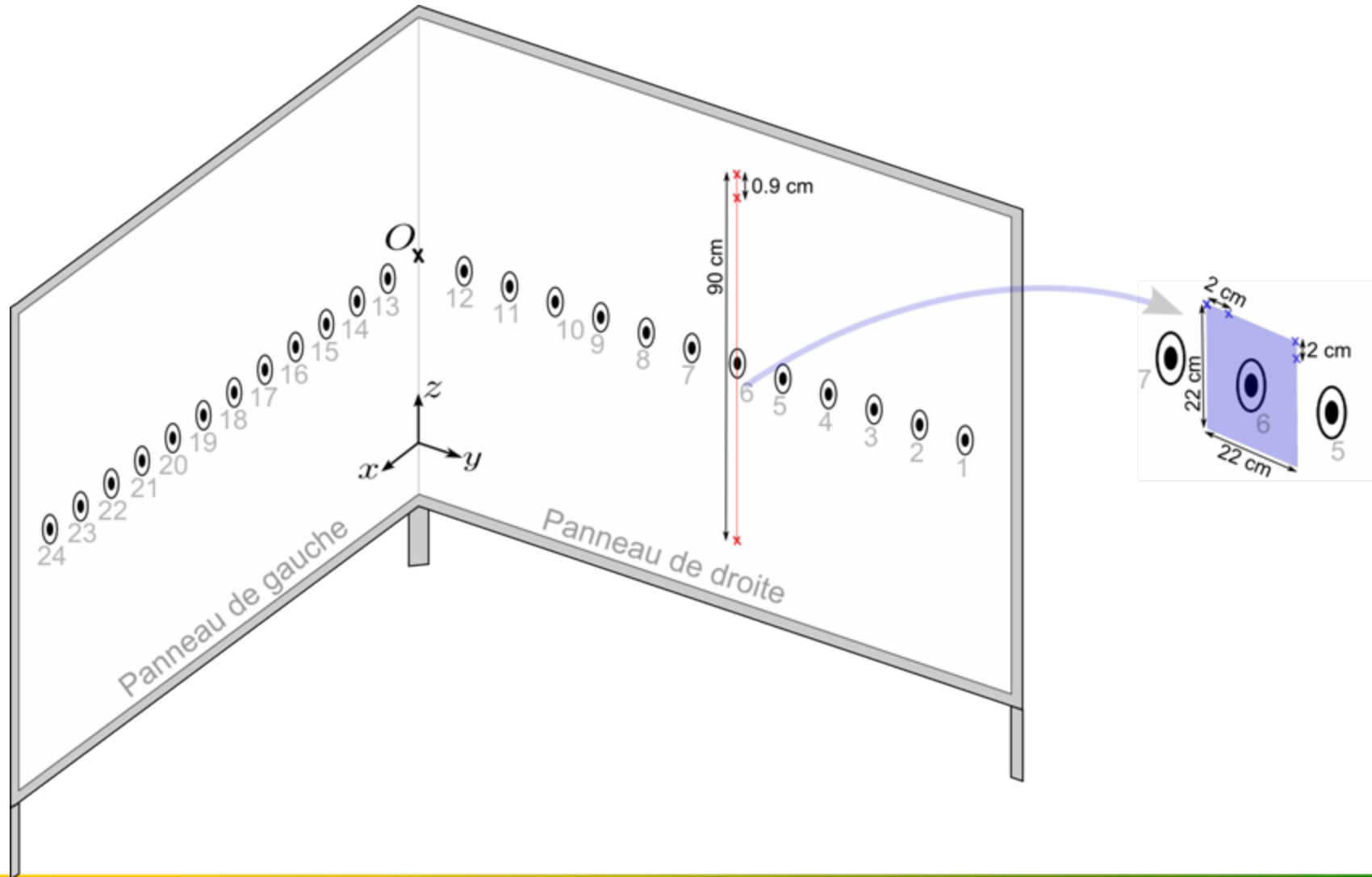
$$\left\langle \left| \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right| \right\rangle = 10.2\%$$



Modèle de matériau adapté: $E_i(1 + j\eta_i)$

II) Panneaux « Sandwich »

Mesures sur les panneaux



Résultats

- **Propagation** du front d'onde autour d'un excitateur

- **Confrontation à un modèle simple**
 - Excitateur **ponctuel** excitant une plaque **infinie**

Bilan

Modélisation du panneau « sandwich » et estimation de ses propriétés mécaniques

- ❑ Méthode proposée
 - **Rapide** (mesure ponctuelle, non destructive, sans contact)
 - Propriétés d'**élasticité** et d'**amortissement**
- ❑ Application au matériau composant le SMART-I²
 - Modèles de plaque et de matériau **adaptés**
 - Action **quasi-ponctuelle** de l'excitateur
 - Plaque « **infinie** » pour $f > 500$ Hz

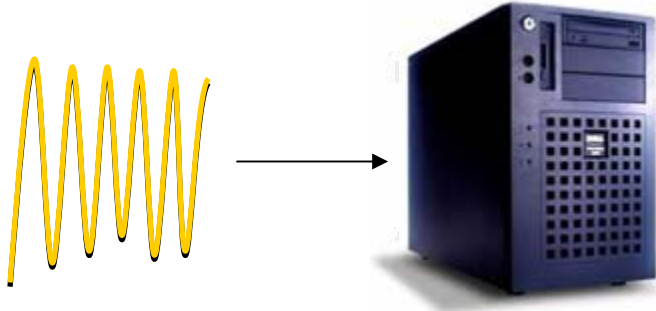
M. Rébillat & X. Boutillon

« Measurement of relevant elastic and damping material properties in sandwich thick-plates »

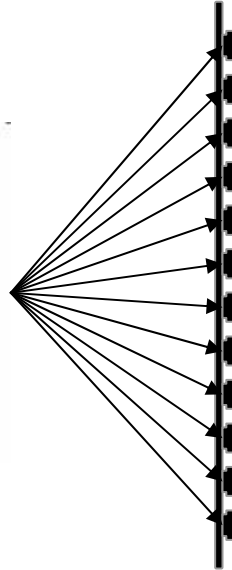
Journal of Sound and Vibration, **2011**, 330(25), 6098-6121

III) Perception du monde virtuel

Spatialisation
(Holophonie)



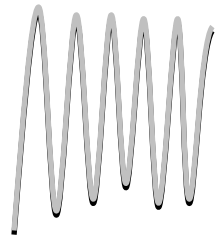
Restitution AV
(SMART-I²)



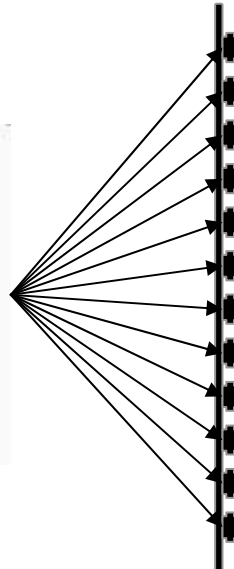
Perception



Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



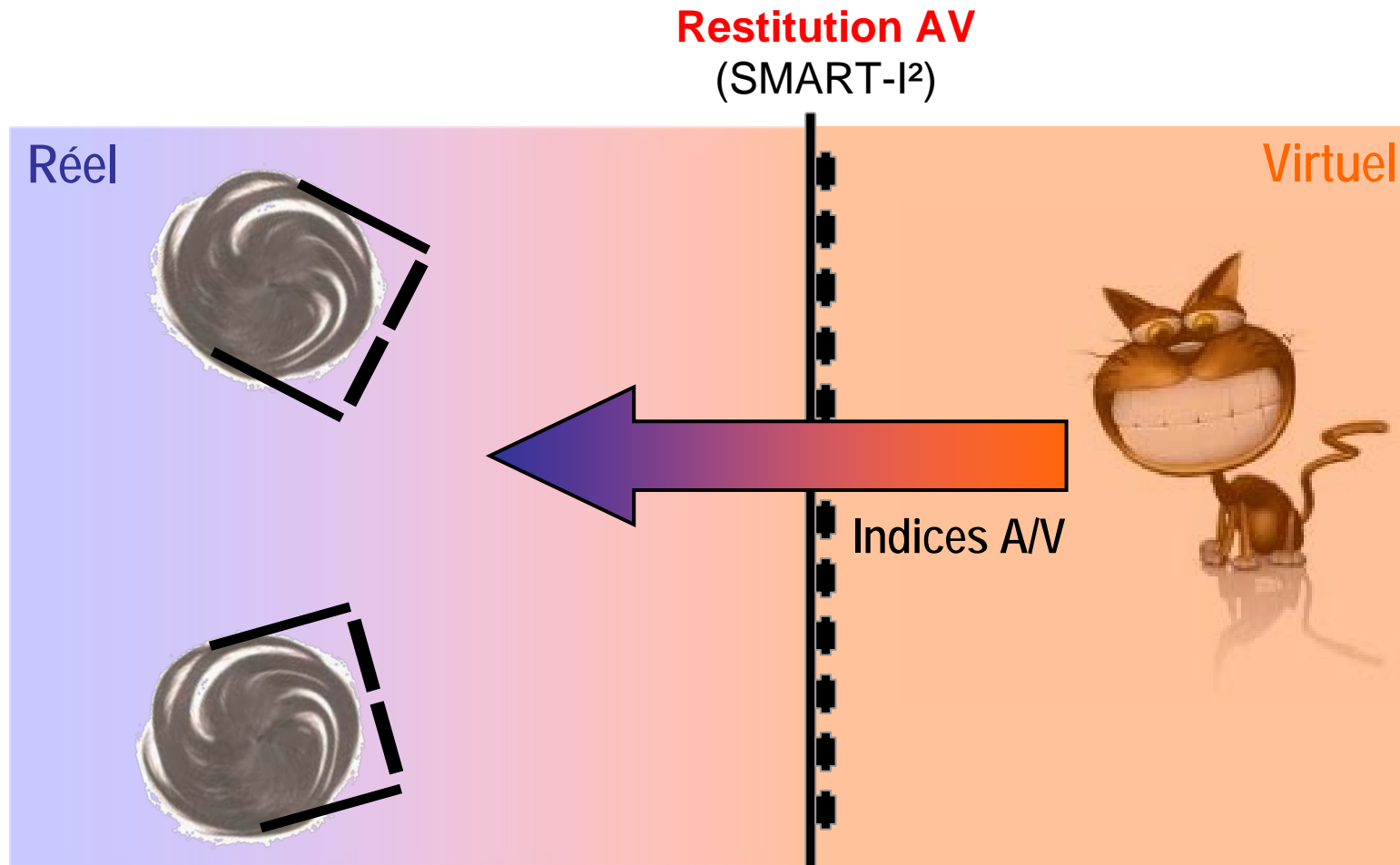
Perception



III) Perception spatiale du monde virtuel

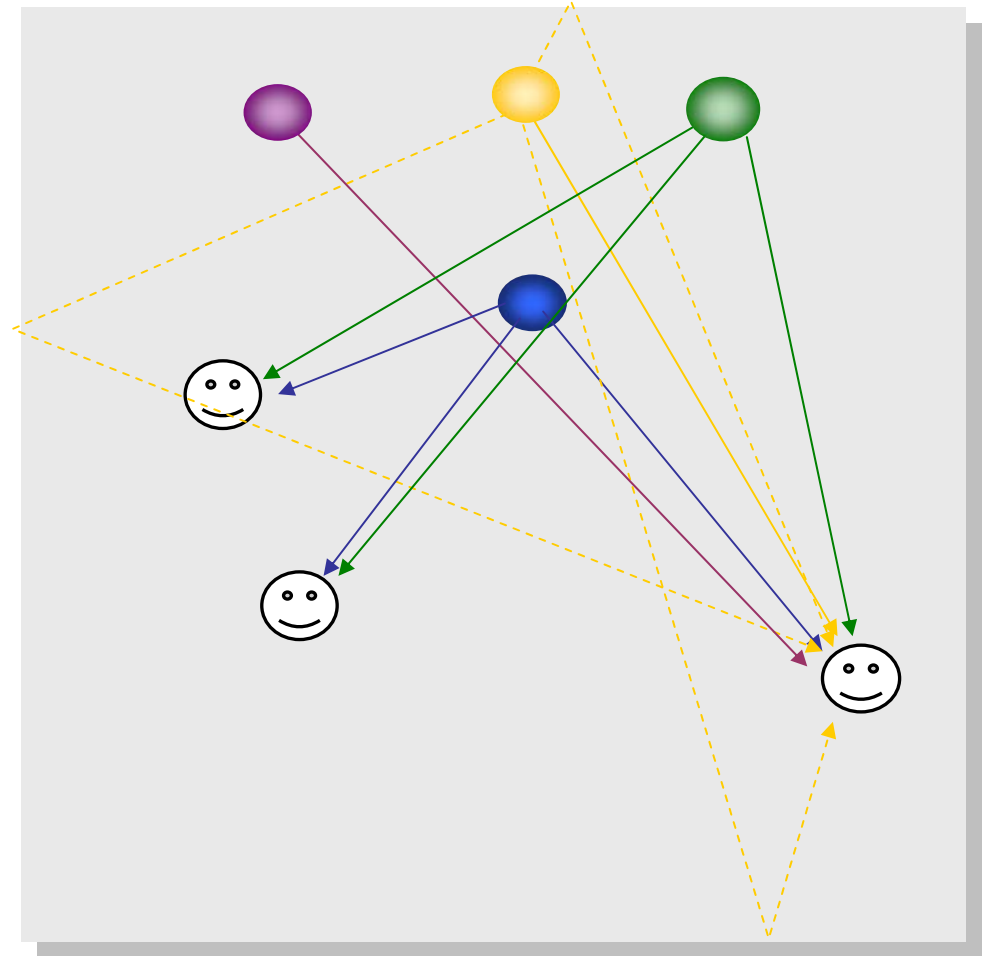
- *Hypothèse*: rendu visuel correct
- **Intégration perceptive du rendu sonore spatialisé**

Transparence du dispositif



Rendu sonore spatialisé [Corteeel, 2004]

- Position
- Environnement
- Effet de parallaxe



Intégration perceptive du rendu sonore spatialisé

□ Azimut

- Localisation précise ($\approx 3^\circ$)
- Cohérence audio-visuelle

□ Effet de parallaxe

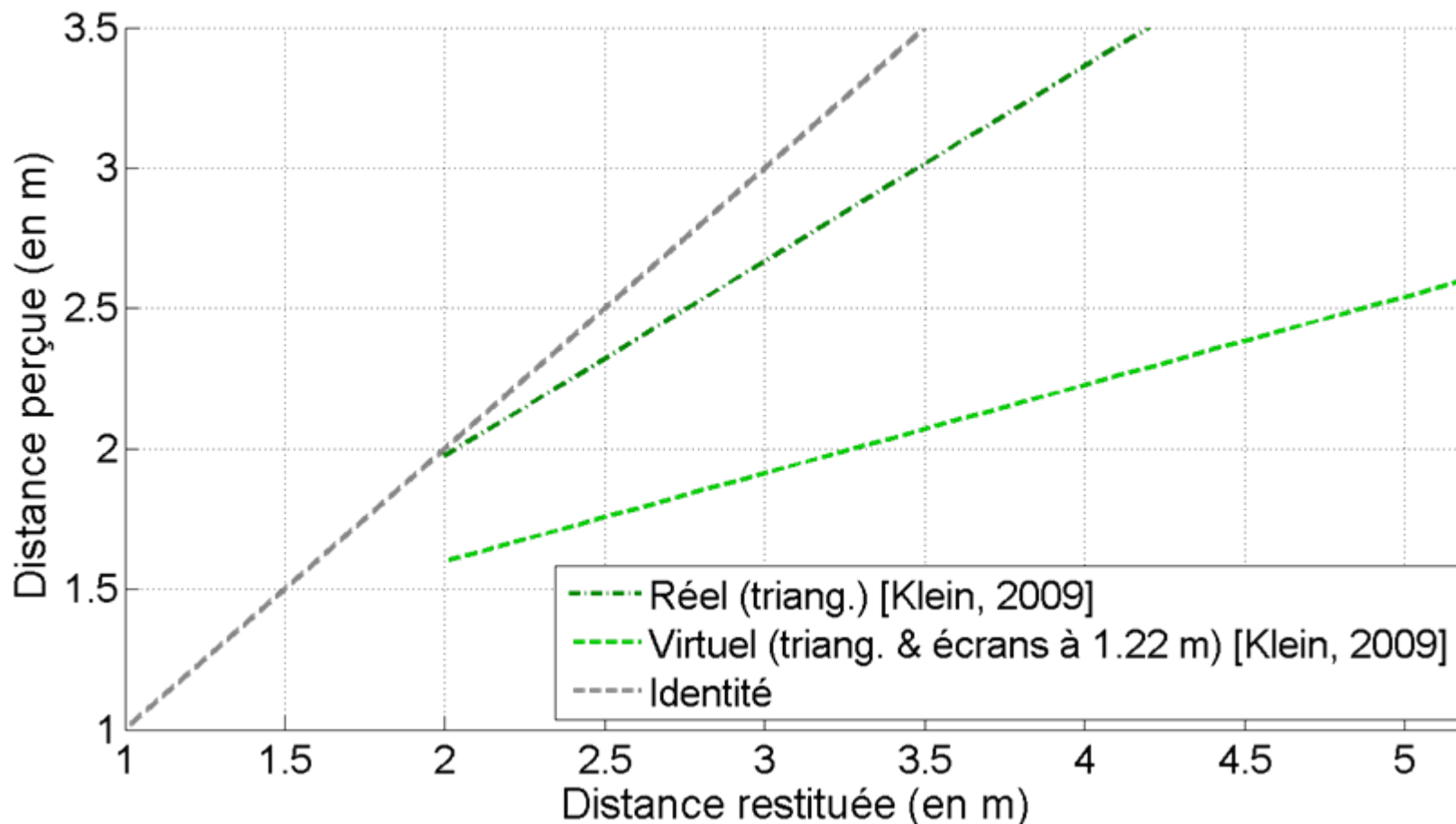
- Effet de parallaxe audio-visuel utilisable

□ Distance

Perception de la distance [Zahorik, 2005 & Cutting 1997]

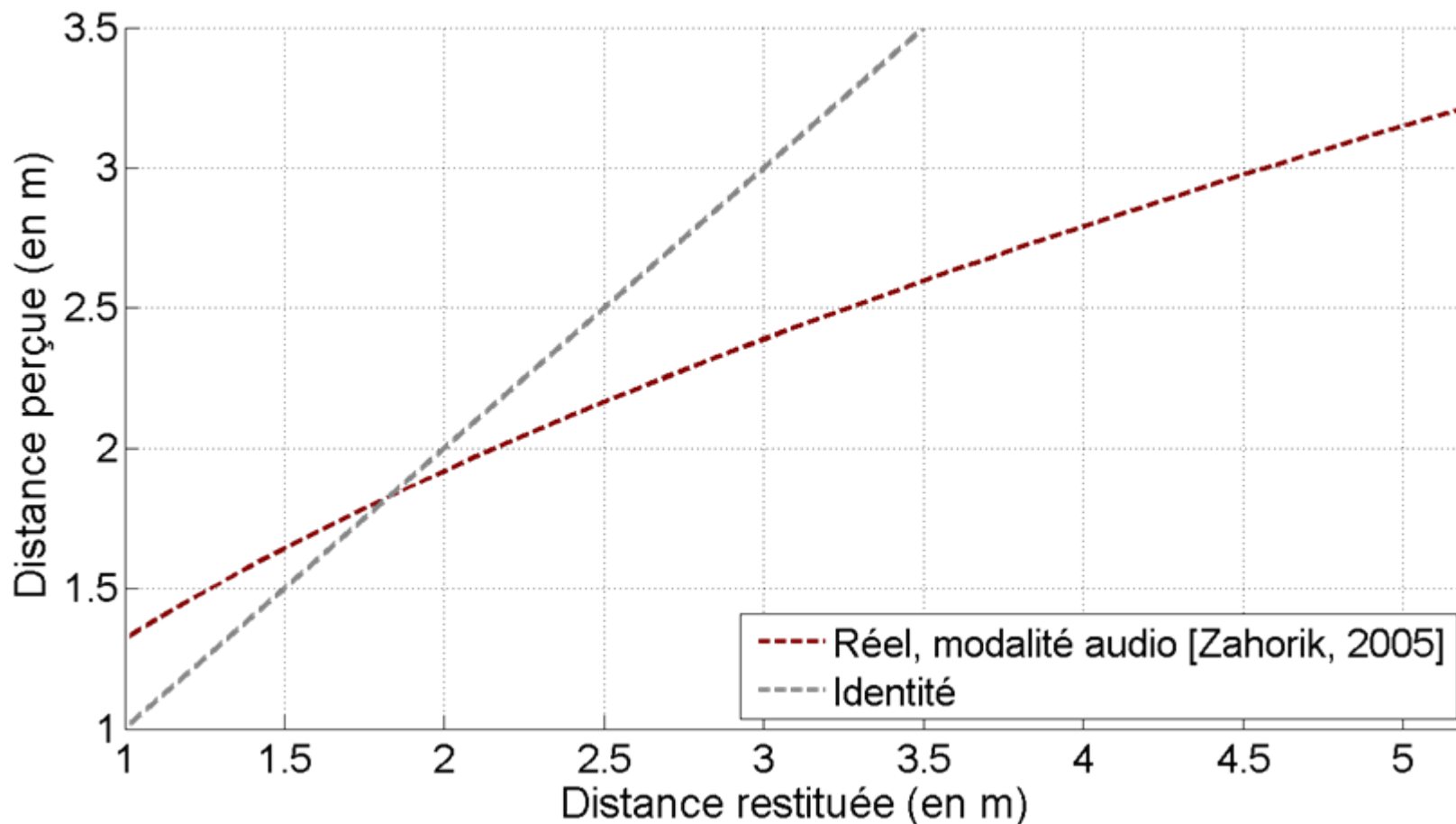
Principaux indices	Modalité	Classe
<i>Taille visuelle & niveau sonore</i>	A et V	Relatif
<i>Effet de parallaxe</i>	A et V	Absolu
<i>Indices binoculaires & binauraux</i>	A et V	Absolu
<i>Rapport « direct / réverbéré »</i>	A	Absolu

Distance visuelle perçue



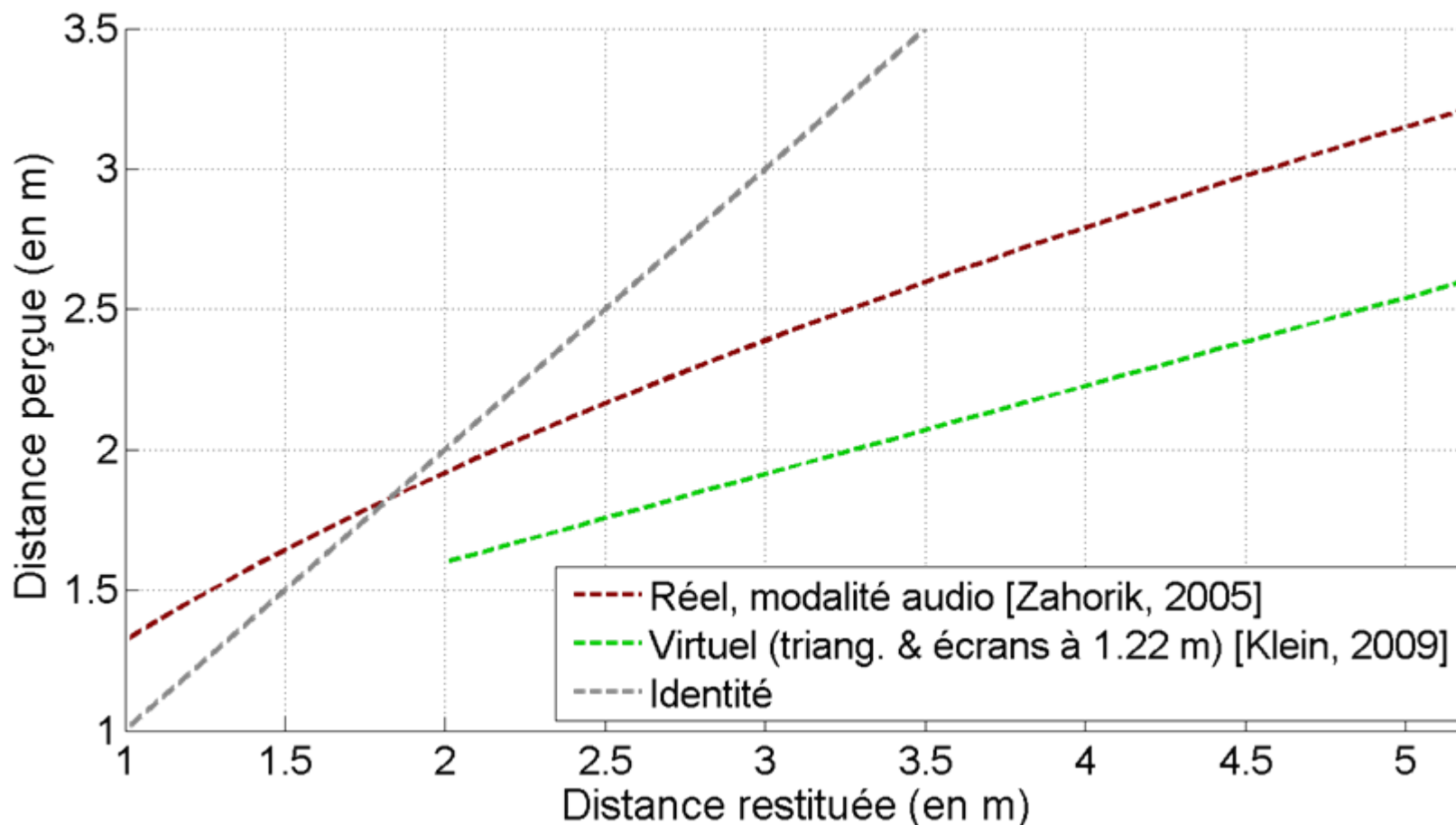
□ Sous-estimation

Distance **auditive** perçue



Compression

Distance audio-visuelle perçue



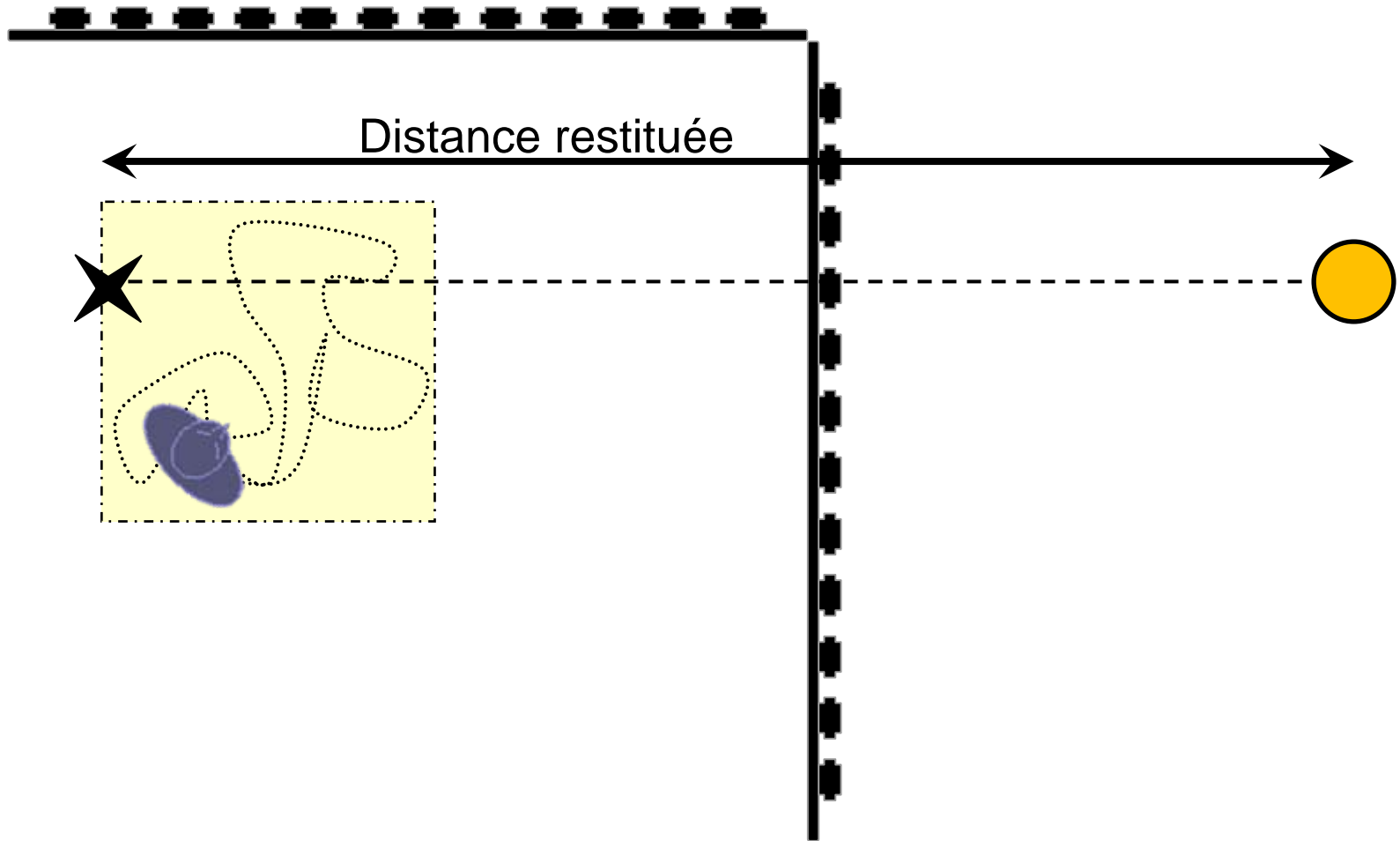
□ Mise en cohérence?

Méthode

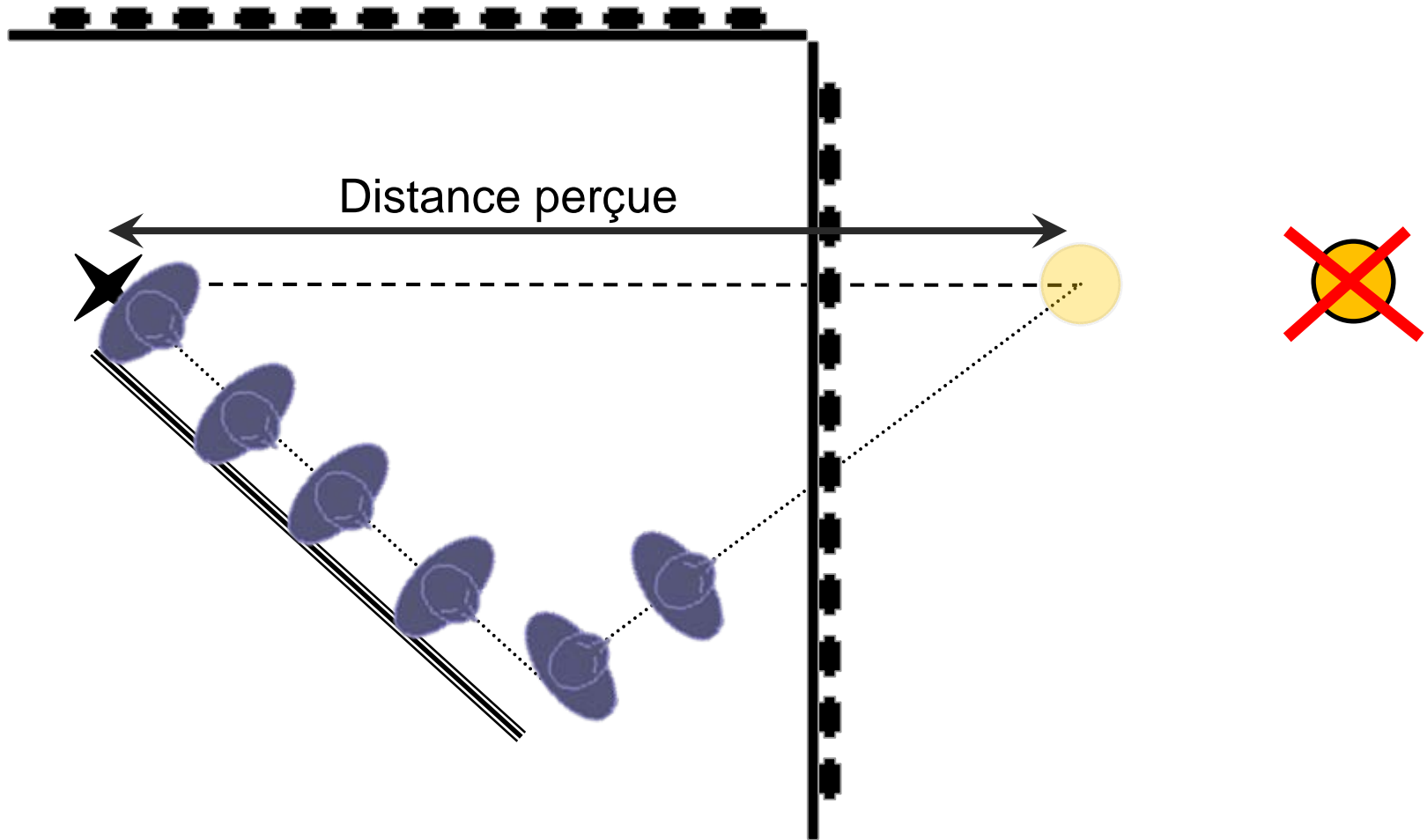


- ❑ Environnement **audio-visuel**
 - Champ herbeux visuel
 - Environnement sonore (36 dBA)
- ❑ Stimulus **visuel**
 - Haut-parleur sans pied
 - Diamètre de 30 cm
- ❑ Stimulus **audio**
 - Bruit blanc filtré à 4 kHz
 - Modulation d'amplitude à 15 Hz
 - Stimulus répété
 - SPL = 78 dB à 1 m

Phase d'exploration



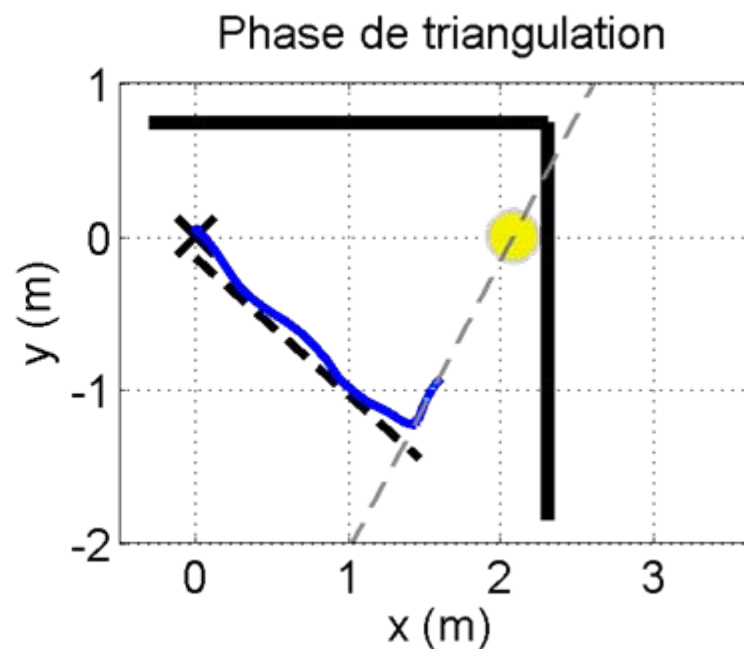
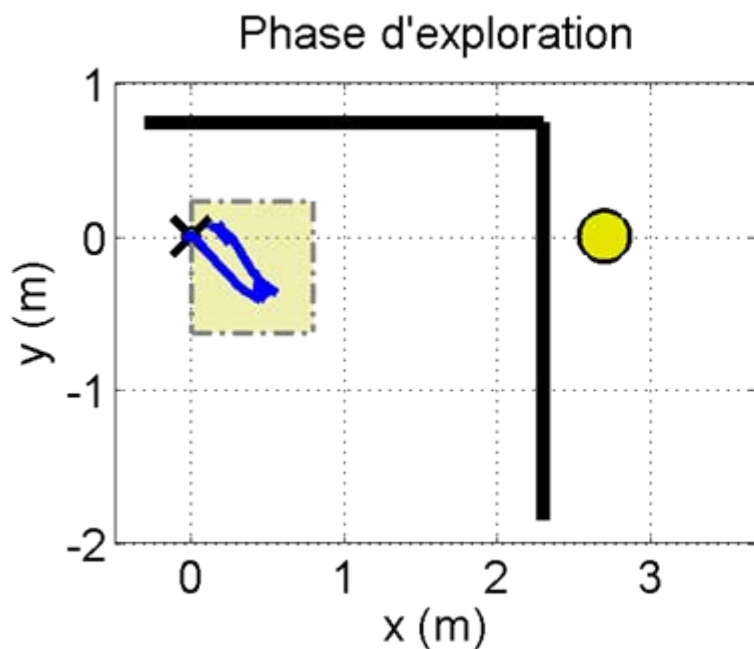
Phase de triangulation [Loomis et al., 1998]



Protocole expérimental

- ❑ 5 distances restituées
 - 1.5 m ; 2 m ; 2.7 m ; 3.5 m et 5 m
- ❑ 3 conditions de rendu
 - ✓ Environnement audio-visuel toujours restitué
 - *Audio* (A)
 - *Visuel* (V)
 - *Audio-visuel* (AV)
- ❑ 20 sujets
 - ✓ 4 répétitions x 5 distances x 3 conditions (60 essais)

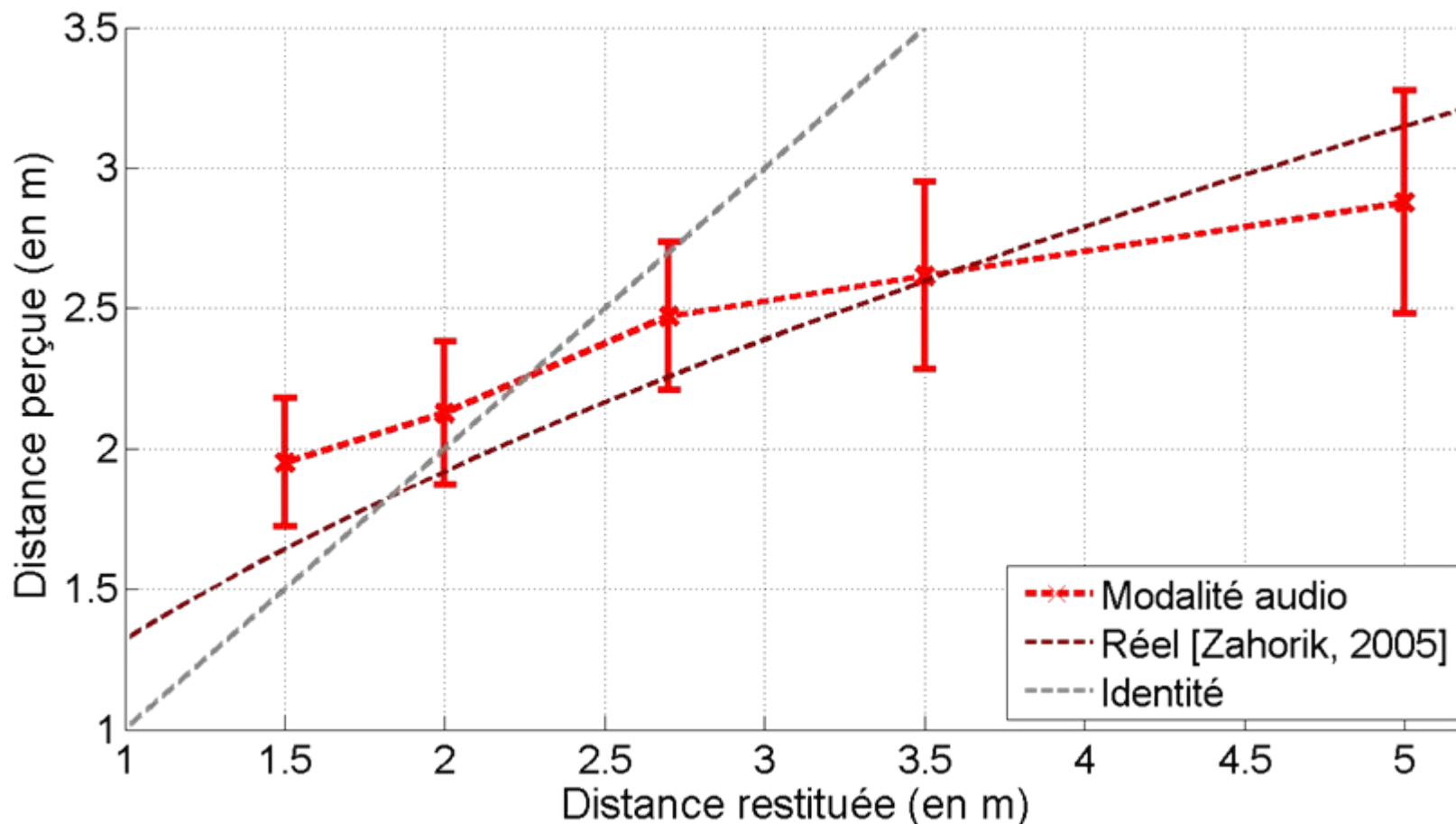
Exemple de trajectoire



□ Condition **audio**

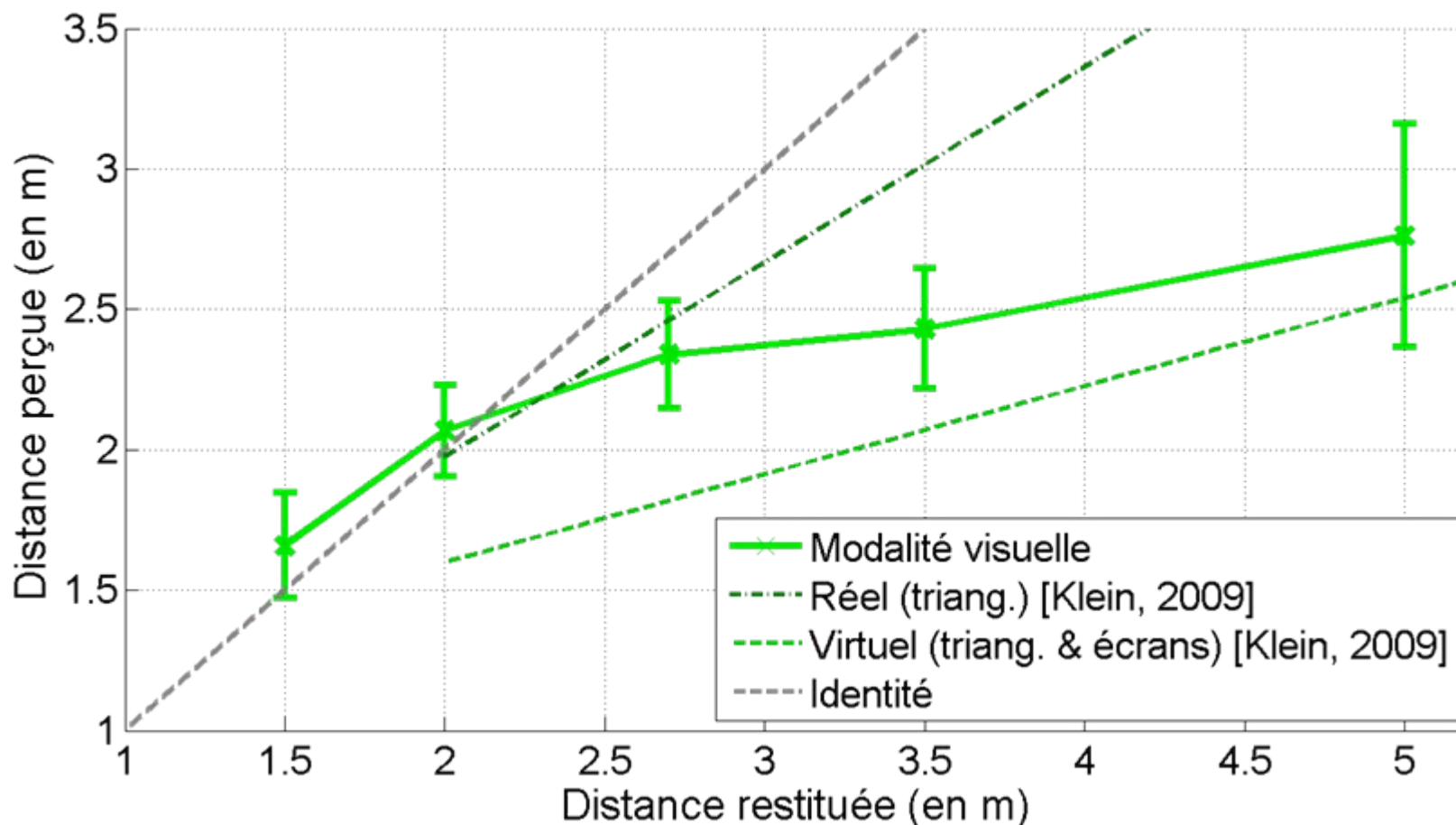
- Distance restituée: **2.7 m**
- Distance perçue: **1.85 m**

Résultats **audio**



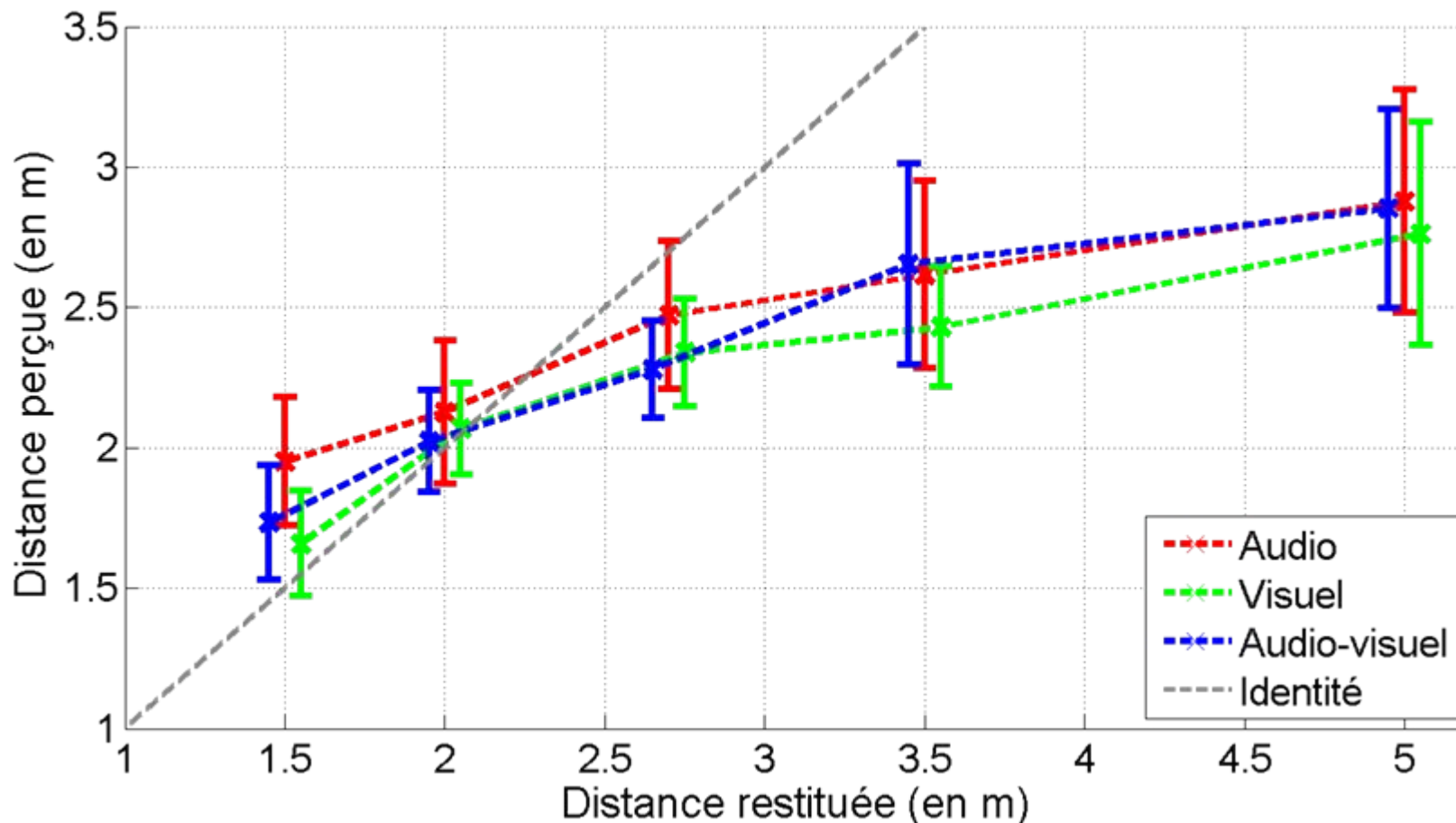
□ Compression **légèrement plus forte** qu'en réel

Résultats **visuels**



Cohérent avec le réel pour $d < 3$ m

Résultats toutes modalités



Cohérence inter-modalité ($F_{2,64}=1.96$ et $p=0.09$)

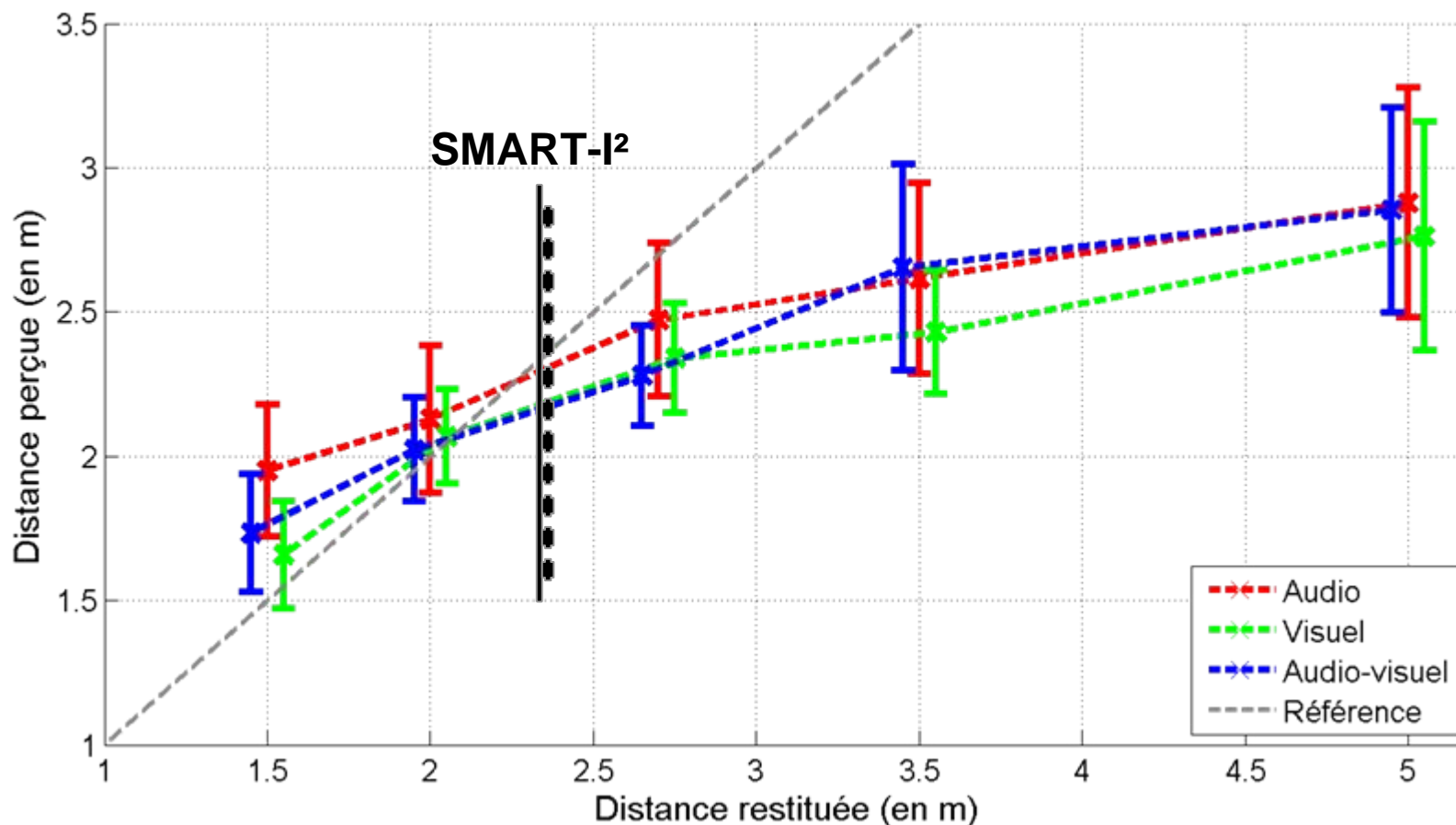
Indices conflictuels

- ❑ Conflit « **accommodation/vergence** »
 - Accommodation sur le SMART-I²
 - Vergence sur l'objet virtuel

- ❑ Conflit entre **indices audio**
 - Acoustique de la salle (réflexion du sol)

- ❑ Objets virtuels **repoussés** vers le SMART-I²

Conséquences de la présence du SMART-I²



□ Possible effet « d'ancrage »

Bilan

Perception cohérente mais compressée de l'espace virtuel audio-visuel

- ❑ Distances perçues de façon **cohérente**
- ❑ Possible **effet « d'ancrage »** audio-visuel

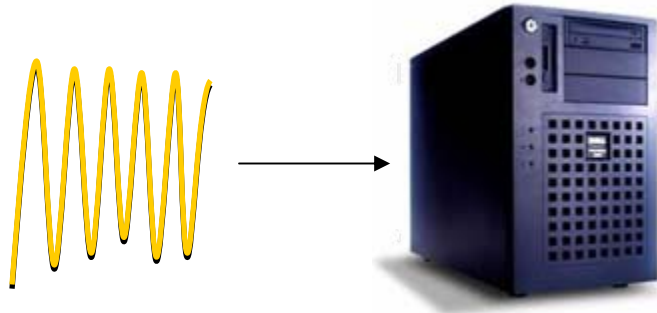
M. Rébillat, X. Boutillon, É. Corteel & B. F.G. Katz

« Audio, visual, and audio-visual egocentric distance perception by moving subjects in virtual environments »

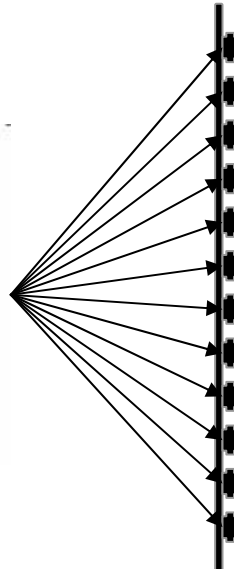
Soumis à ACM Transactions on Applied Perception (première révision)

Source acoustique ponctuelle

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



Perception

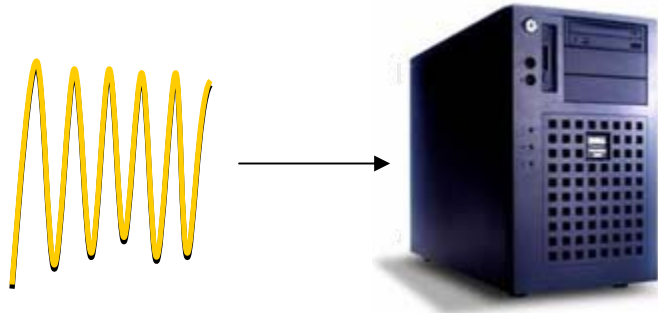


□ Source acoustique ponctuelle

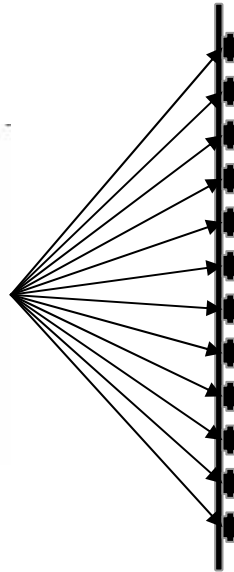
- Étude du rayonnement engendré par les vibrations de la plaque
- Contrôle:
 - ✓ Global du champ rayonné
 - ✓ Vers une source acoustique ponctuelle

Ancrage

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



Perception

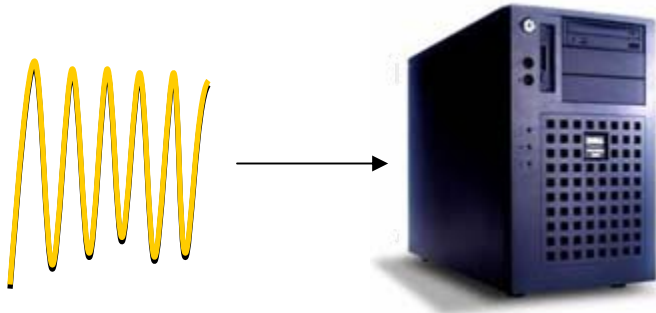


□ Possibilité d'ancrage du monde virtuel au SMART-I²

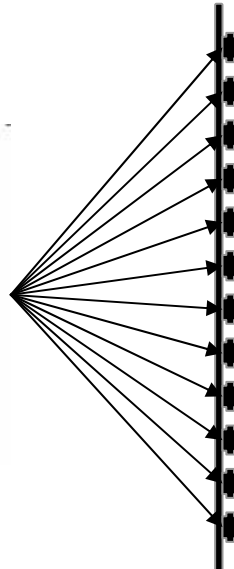
- De nombreux indices laissent penser que c'est le cas
- Hypothèse à valider perceptivement

Son spatialisé & réalité virtuelle

Spatialisation
(Holophonie)



Restitution AV
(SMART-I²)



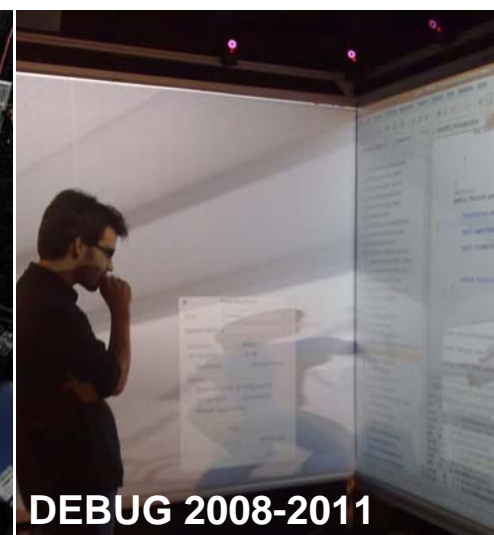
Perception



❑ **Quantifier l'apport du son spatialisé**

➤ **Différents scénarios envisageables**

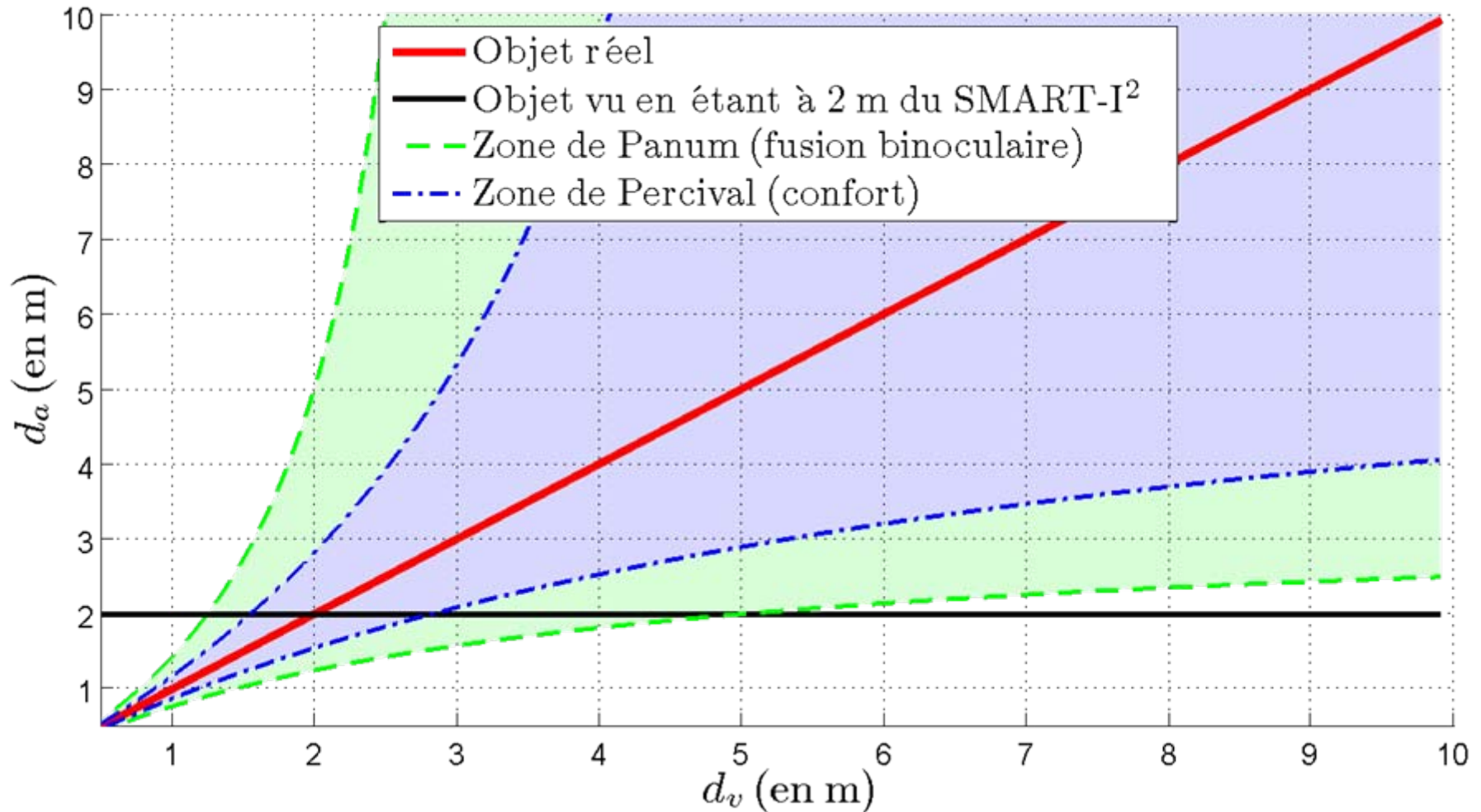
Le SMART-I² dans tous ses états...



Avantages et inconvénients de l'holophonie...

	Rendu sur casque		Rendu sur réseau de haut-parleurs (HPs)				
	<i>Stéréophonie</i>	<i>HRTF</i>	<i>Multicanal</i>	<i>VBAP</i>	<i>Binaural sur HPs</i>	<i>Ambisonique</i>	<i>WFS</i>
Zone de rendu	Mobile	Mobile	Petite et fixe	Petite et fixe	Petite et mobile	Grande, fixe et qui diminue avec la fréquence	Grande et fixe, jusqu'à une certaine fréquence
Objets virtuels	Dans la tête	Partout	Entre les HPs	Entre les HPs	Partout	Derrière les HPs	Partout
Individualisation	Externalisation impossible	Nécessaire	Inutile	Inutile	Nécessaire	Inutile	Inutile
Suivi de la tête	Nécessaire	Nécessaire	Inutile	Inutile	Nécessaire	Inutile	Inutile
Utilisateurs	Multi	Multi	Mono	Mono	Mono	Multi	Multi
Dimensionnalité	2D	3D	2D	3D	3D	3D	2D
Calculs	Peu	Moyen	Peu	Peu	Moyen	Moyen	Beaucoup
Matériel	Casque	Casque	≥ 2 HPs	≥ 10 HPs	2 ou 4 HPs	≥ 8 HPs	≥ 12 HPs

Conflit « accomodation/vergence »...

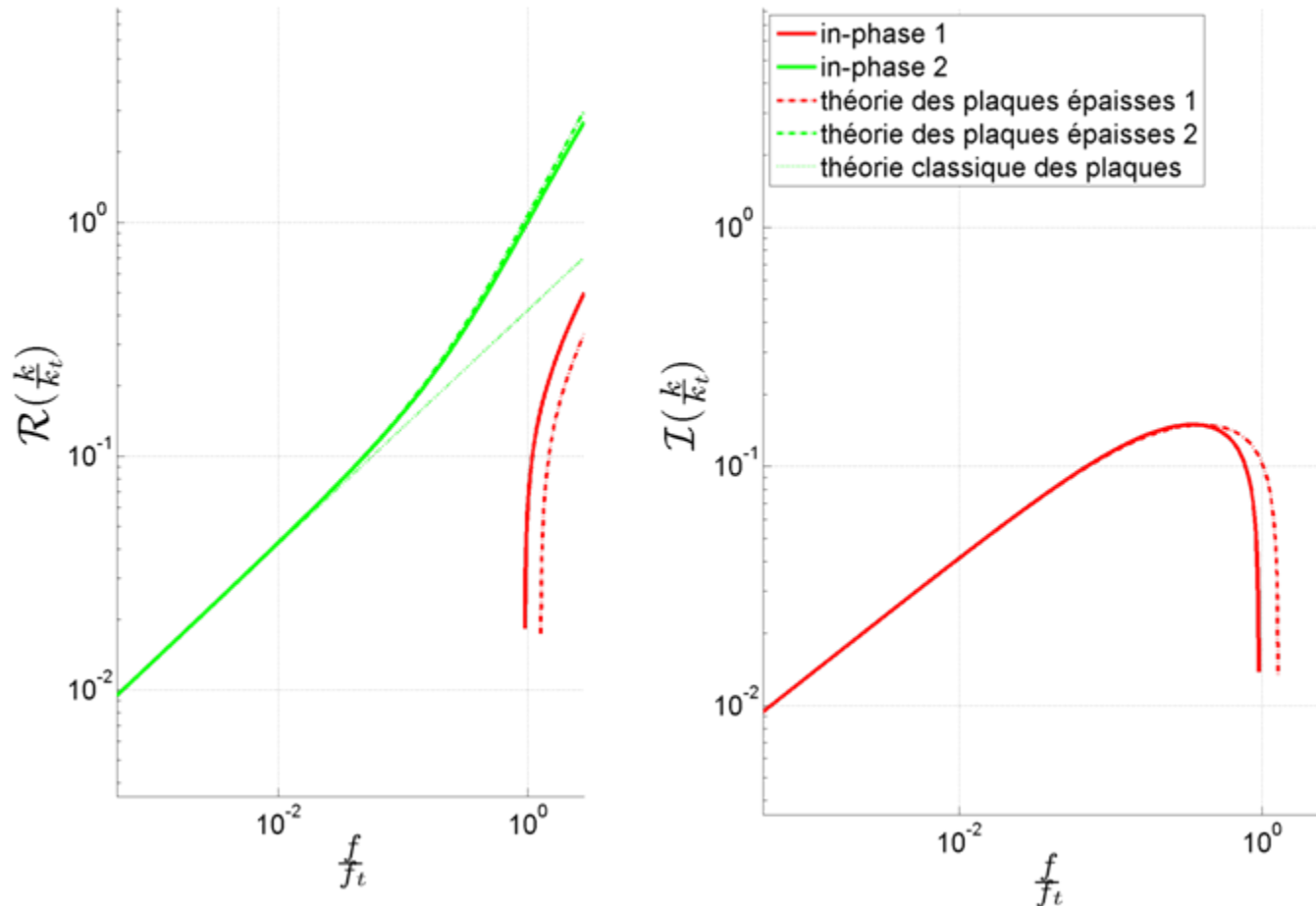


Impact du son spatialisé...

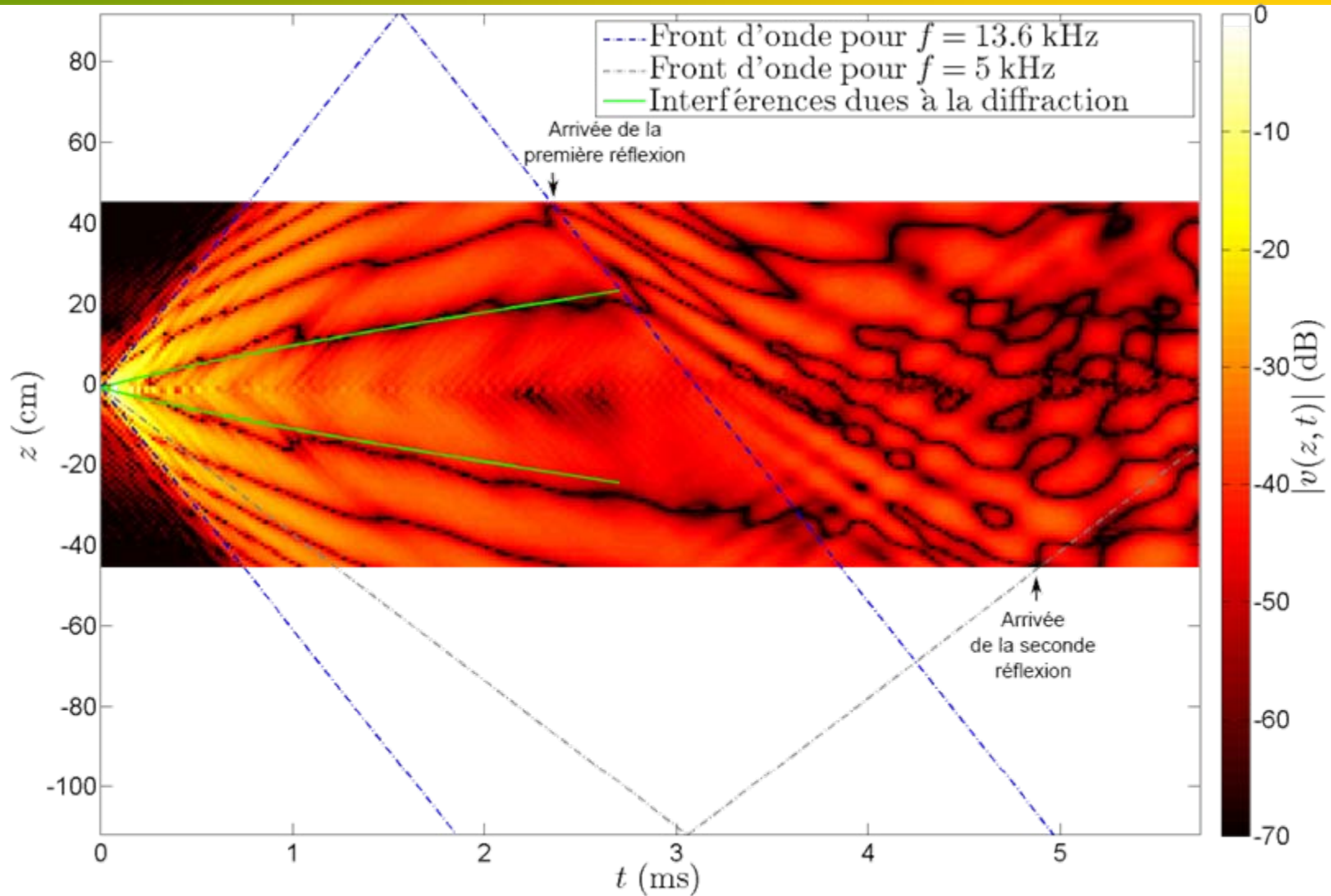
	Présence perçue	Émotions	Intelligibilité	Performances de navigation	Qualité audio-visuelle
Direction	Augmentée	Intensité des réactions augmentée	Augmentée	Augmentées	Augmentée en général et diminuée en cas d'incohérences AV
Distance	Diminuée, et maximale en cas de cohérence AV	?	Augmentée	Augmentées	?
Effet de parallaxe	?	?	Augmentée en théorie	Augmentées	Diminuée en cas d'incohérences AV
Réverbération	Augmentée	Sensation de plaisir diminuée	Augmentée par les réflexions précoces et diminuée par la réverbération tardive	Diminuées	?

Validité du modèle de plaque épaisse...

$f_t = 35$ kHz

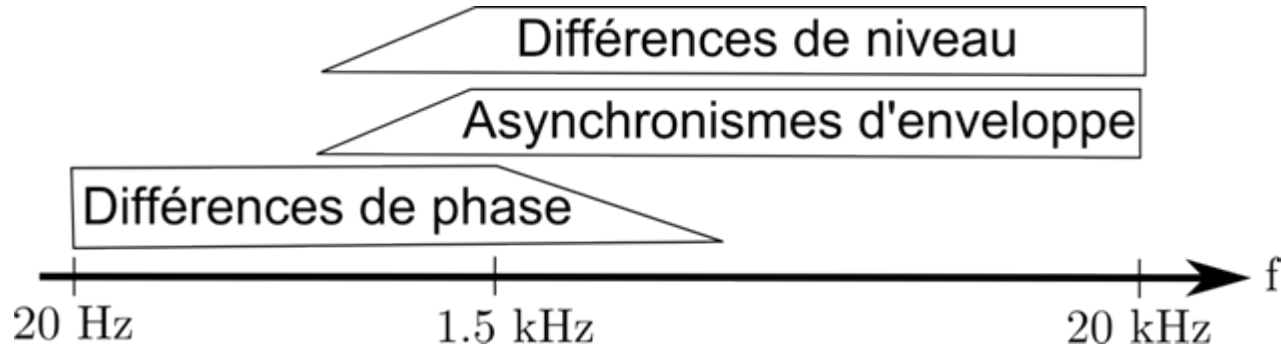


Analyse temporelle des fronts d'onde...

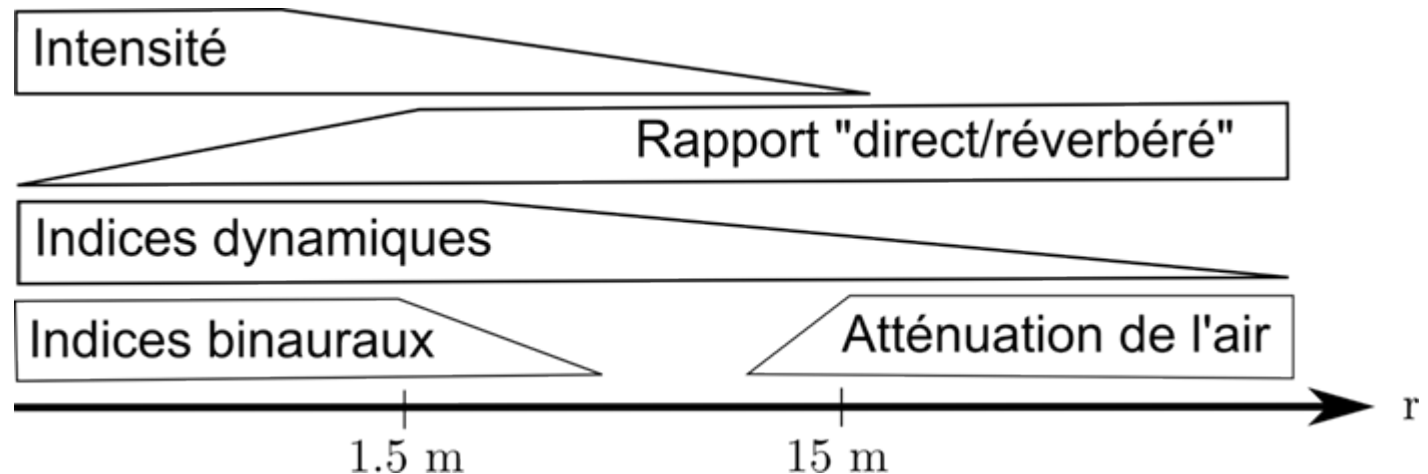


Indices pour la perception de l'espace audio...

□ Azimut



□ Distance



Indices pour la perception visuelle de la distance...

