



Modélisations des systèmes d'assistance à la réverbération régénératifs

Jérémy Rouch

Mercredi 3 Juillet 2013

Composition du jury

Jean Jacques Embrechts (ULG)	: rapporteur
Judicaël Picaut (IFSTTAR)	: rapporteur
Jean Dominique Polack (UPMC)	
Michel Roger (ECL)	
Hervé Lissek (UPFL)	
Marie-Annick Galland (ECL)	: Directrice de thèse
Isabelle Schmich-Yamane (CSTB)	: Encadrante CSTB

Conditions acoustiques d'une salle déterminées par l'architecture et les matériaux : **architecture fixée** → **acoustique fixée**

Or chaque type de représentation demande des conditions acoustiques particulières

Comment modifier les conditions acoustiques ?

Modulation physique de l'espace

(panneaux mobiles, rideaux...) :

+augmentation et diminution d'énergie

-mise en œuvre lourde et coûteuse

-peu possible sur les bâtiments classés

-changement de configuration non instantanée

Systèmes d'assistance à la réverbération

(systèmes électroacoustiques) :

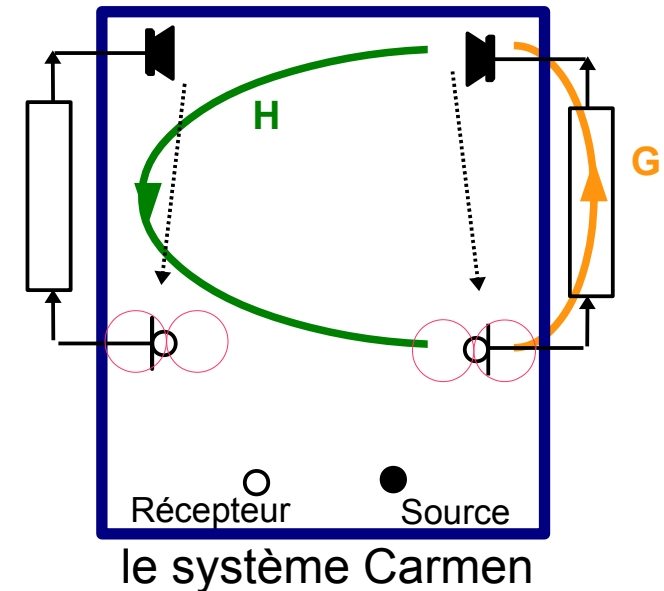
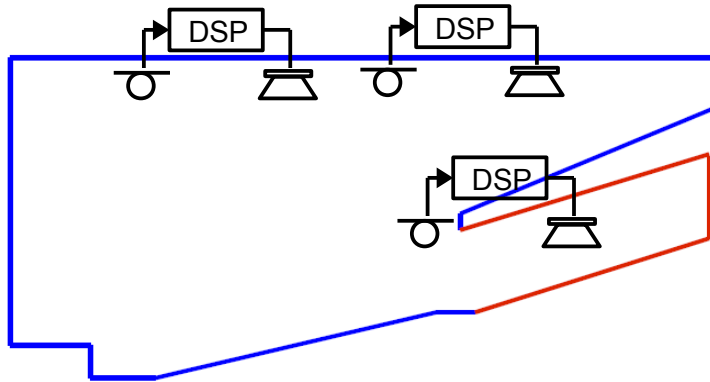
+mise en œuvre rapide et relativement peu chère

+possible sur les bâtiments classés

+plus facilement et rapidement modulables

-ajout d'énergie uniquement

Les systèmes d'assistance à la réverbération régénératifs (SAR)



SAR régénératifs

Prélève le son dans la salle, le réinjecte dans la salle

Composés de plusieurs canaux électroacoustiques

Systèmes électroacoustiques bouclés → instabilité → GBO (H x G)

Traitement du signal ~simple (gain+délai+léger filtrage)

SAR Carmen (CSTB)

diminution de l'instabilité → micro bidirectionnels

Comment dimensionner le système Carmen ?

Comment connaître à l'avance le nombre de canaux en fonction des conditions acoustiques désirées?



**Comment prévoir l'action du système de manière rapide en fonction des caractéristiques du système et de la salle?
En particulier en phase de pré-projet (devis)**



Modèles prédictifs simplifiés de l'action du système sur l'acoustique de la salle

- le système dans une salle simple
- le système sous-balcon

Plan de l'exposé

1 – Approches existantes

2 – Modèles prédictifs simplifiés dans une salle simple

3 – Résultats

4 – Modèle prédictif simplifié dans les salles couplées

5 – Conclusion et perspectives

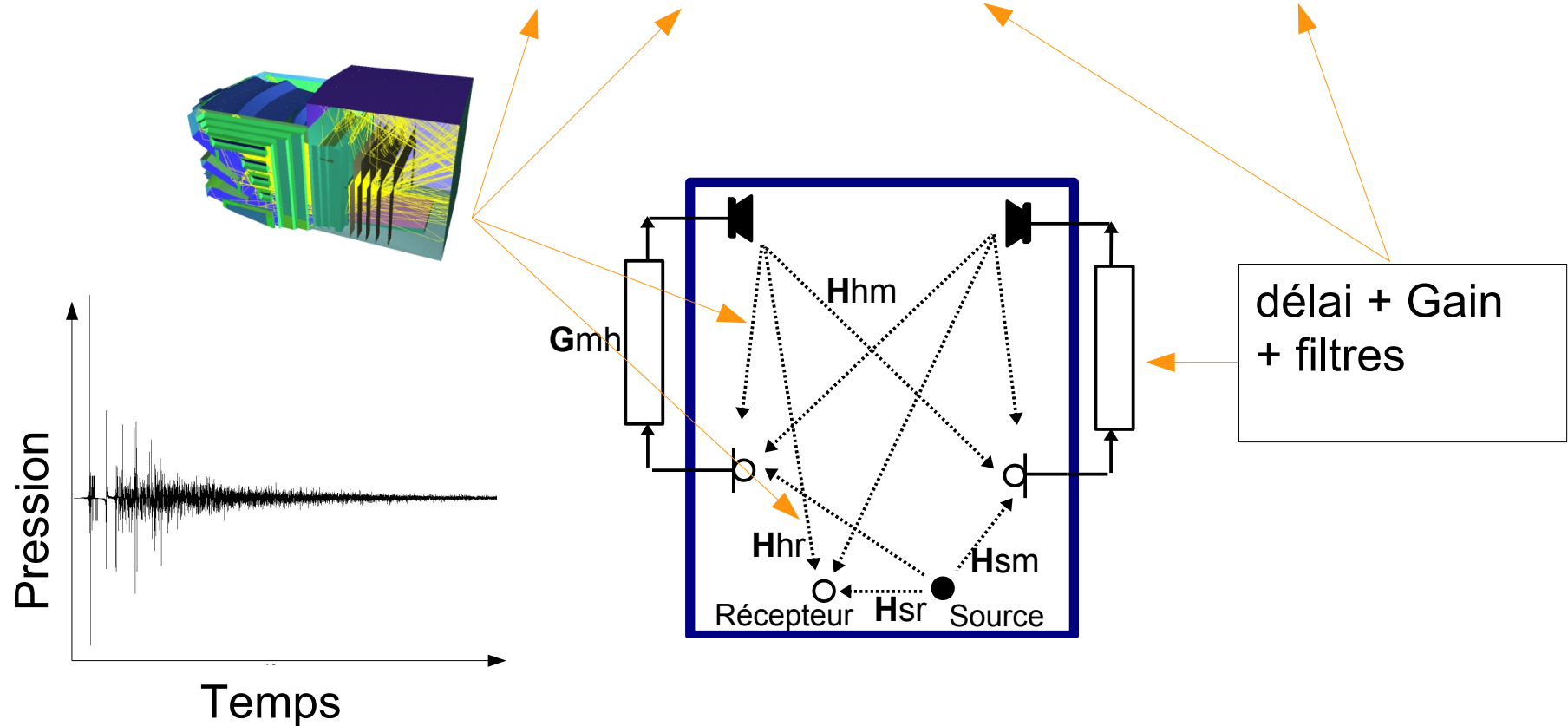
1- Approches existantes

- **Simulations numériques**
- **Approche énergétique**
- **Approche systémique simplifiée**

Simulations numériques d'un SAR

Approche systémique + simulations numériques (lancer de rayons, faisceaux, etc.)

$$H_{ea}(f) = H_{sr}(f) + \underline{H_{hr}}(f)^t \left(\underline{I_d} - \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f) \right)^{-1} \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{sm}}(f) \quad (1)$$



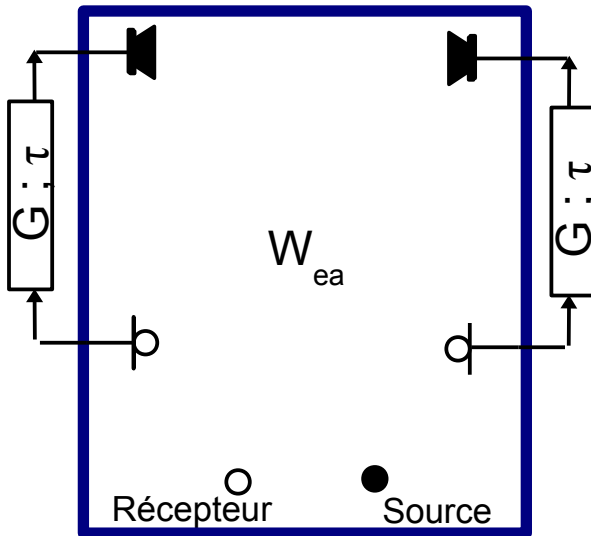
Simulations numériques d'un SAR

- + Approche systémique exacte → pas d'approximation de l'effet du système
- + Simulations numériques → prise en compte de nombreux phénomènes
- demande des connaissances approfondies sur la géométrie et les matériaux
- temps de modélisation de la salle (salle 3D)
- temps de calcul (SAR 30 canaux, 1 source, 1 récept. : 961 RI)

Méthode non compatible avec une phase de pré-projet mais la plus proche de la réalité :

→ peut servir de référence pour la mise à l'épreuve de modèles simplifiés

Approche énergétique (Poletti 1993)



Sabine + SAR (SAR= source équivalente retardée)

$$V \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A + 4mV)c}{4} w_{ea}(t) = \sum_{i=1}^N G_i^2 w_{ea}(t) * \delta(t - \tau_i) \quad (2)$$

approximation de l'action des délais au premier ordre dans l'espace de Laplace



$$V (sW_{ea}(s) - w_{ea}(0^-)) + \frac{(A + 4mV)c}{4} W_{ea}(s) = \sum_{i=1}^N G_i^2 W_{ea}(s) (1 - \tau_i s + o((\tau_i s)^2)) \quad (3)$$

Approche énergétique (Poletti 1993)

retour dans l'espace
des temps

$$\bar{\Gamma} = \frac{4\bar{G}}{(A+4mV)c} \quad (5)$$

$$V \left(1 + N \frac{(A+4mV)c\bar{\Gamma}\bar{\tau}}{4V} \right) \frac{dw_{ea}(t)}{dt} + \frac{(A+4mV)c}{4} (1 - N\bar{\Gamma}) w_{ea}(t) = 0 \quad (4)$$



$$w_{ea}(t) = \beta' e^{-\left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+N \frac{(A+4mV)c\bar{\Gamma}\bar{\tau}}{4V}} \right) \left(\frac{Ac}{4V} + mc \right) t} \quad (6)$$



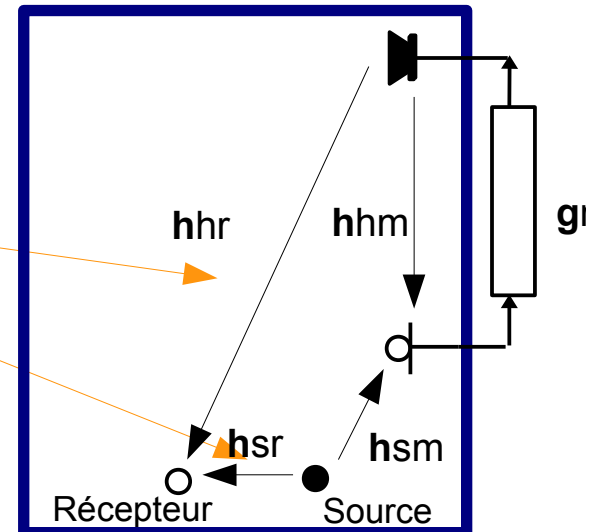
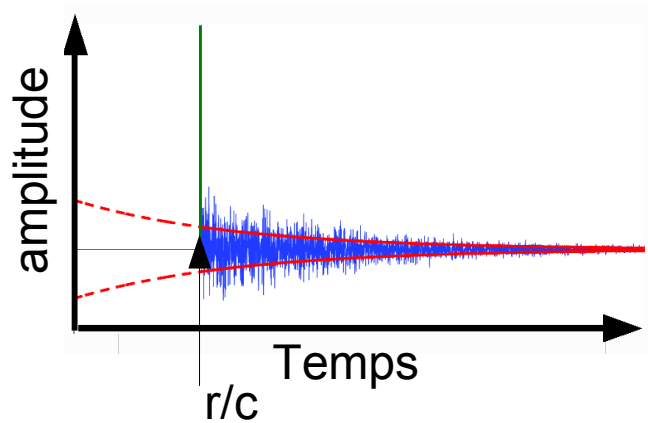
$$\frac{T_{rea}}{T_{r0}} = \frac{1 + N \frac{(A+4mV)c\bar{\Gamma}\bar{\tau}}{4V}}{1 - N\bar{\Gamma}} \quad (7)$$

+ approche simple (ED 1 ordre) → formulation analytique simple
+ permet de facilement appréhender l'action du système

- donne une forme peu réaliste d'une RI
- utilise un paramètre $\bar{\Gamma} \neq \text{GBO}$ (pour un système multicanal)

Approche systémique simplifiée (Svensson 1998)

$$h_{ea}(t) = h_{sr}(t) + h_{sm}(t) * [g_{mh}(t) + g_{mh}(t) * h_{hm}(t) * g_{mh}(t) + \dots] * h_{hr}(t) \quad (8)$$



+ Utilisation de RI plus réaliste (Barron & Lee 1988) → critères acoustiques + valables

- approximation au 1er ordre de boucle
- système à 1 seul canal

Synthèse des approches présentes dans la littérature

Simulations numériques

- + approche « exacte » de l'action du SAR
- + simulation numériques éprouvées

- pas compatible avec phase de pré projet



Modélisation de référence

Approche énergétique

- + Approche simple (ED 1er ordre)
- + Permet appréhender facilement l'effet du gain et des délais

- RI peu réaliste

Approche systémique

- + RI plus réaliste

- Effet du SAR limité au premier ordre
- Limité à un système à 1 canal



Améliorations possibles

2- Modèles prédictifs simplifiés dans une salle simple

- Approche énergétique**
- Approche systémique simplifiée basée sur des RI stochastiques**

Approche énergétique

Comment obtenir une forme plus réaliste de RI ?

Définir une fonction de gain du système plutôt qu'une RI directement :
Peut être appliqué à n'importe quelle RI passive

$$w_{ea}(t) = \beta' e^{-\left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+N\frac{(A+4mV)c}{4V}\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\left(\frac{Ac}{4V}+mc\right)t} \quad (6) \quad w(t) = \beta e^{-\left(\frac{Ac}{4V}+mc\right)t} \quad (8)$$

RI active = RI passive pour $t \leq t_d + \bar{\tau}$

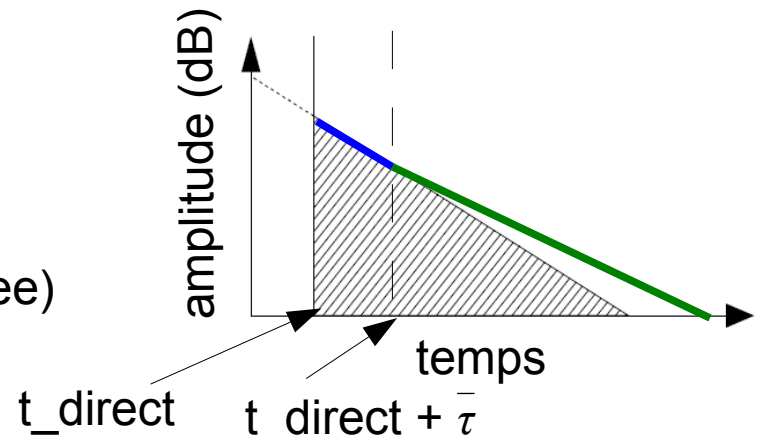
$$\Xi_{ea}(t) = \frac{w_{ea}(t)}{w(t)} = \begin{cases} 1 & t < t_d + \bar{\tau} \\ e^{\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)\left(1 - \left(\frac{1-N\bar{\Gamma}}{1+\left(\frac{(A+4mV)c}{4V}\right)N\bar{\Gamma}\bar{\tau}}\right)\right)(t-t_d-\bar{\tau})} & t \geq t_d + \bar{\tau} \end{cases} \quad (9)$$

Approche énergétique

Utilisation du GBO ($\bar{\Gamma}'$) : relation d'après l'approche énergétique $\bar{\Gamma}' = \frac{\bar{\Gamma}}{1 - (N-1)\bar{\Gamma}}$ (10)

$$\Xi_{ea}(t) = \begin{cases} 1 & t < t_d + \bar{\tau} \\ e^{\left(\frac{6 \ln(10)}{T_{r0}}\right) \left(1 - \left(\frac{1 - N \left(\frac{\bar{\Gamma}'}{1 + (N-1)\bar{\Gamma}'}\right)}{1 + \left(\frac{6 \ln(10)}{T_{r0}}\right) N \left(\frac{\bar{\Gamma}'}{1 + (N-1)\bar{\Gamma}'}\right) \bar{\tau}\right)}\right) (t - t_d - \bar{\tau})} & t \geq t_d + \bar{\tau} \end{cases} \quad (11)$$

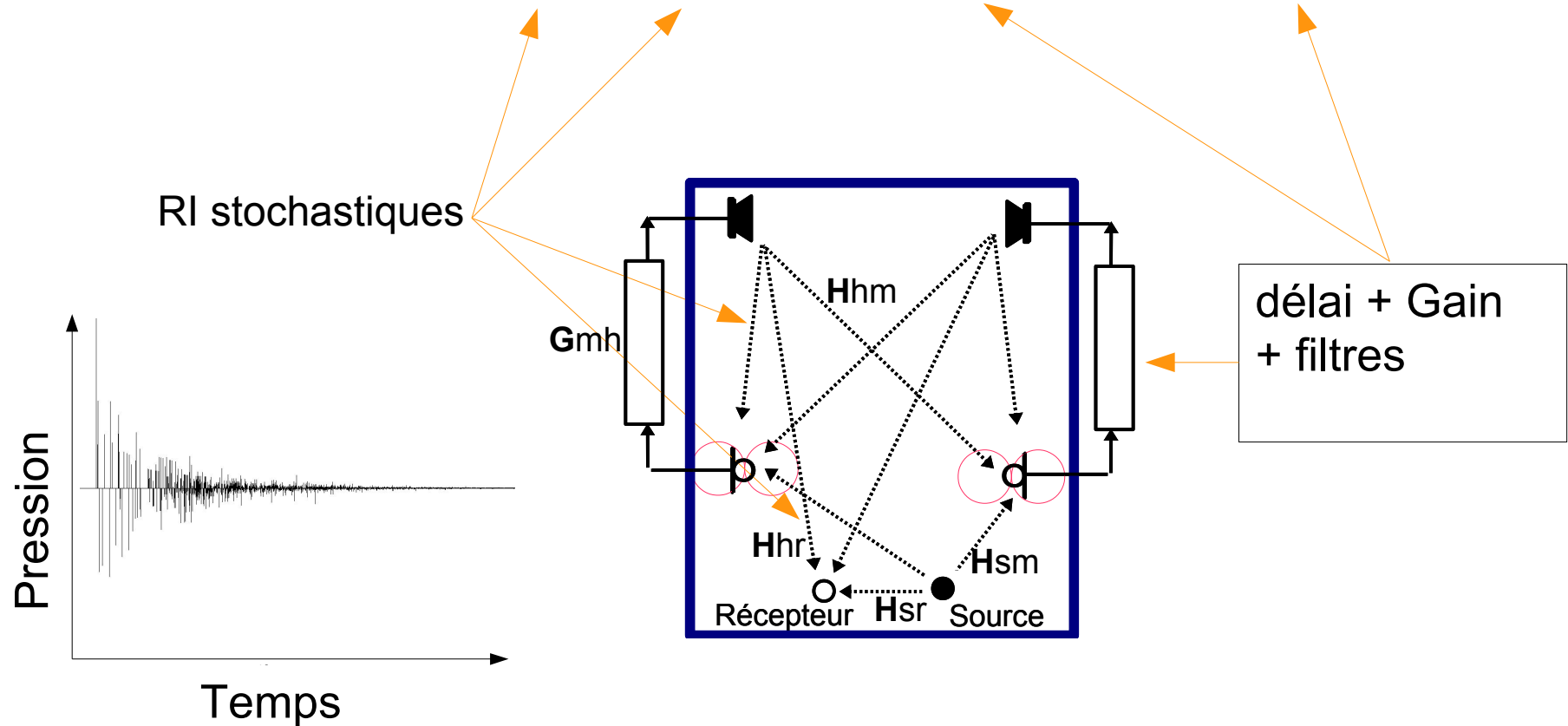
RI active = $\Xi_{ea}(t)$ X RI passive
 (approche énergétique)
 théorie révisée (Barron & Lee)



Approche systémique + RI stochastiques : principe

Approche systémique + RI stochastiques (seule différence avec simulations num.)

$$H_{ea}(f) = H_{sr}(f) + \underline{H_{hr}}(f)^t \left(\underline{I_d} - \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{hm}}(f) \right)^{-1} \underline{G_{mh}}(f) \underline{H_{sm}}(f) \quad (1)$$



RI stochastiques

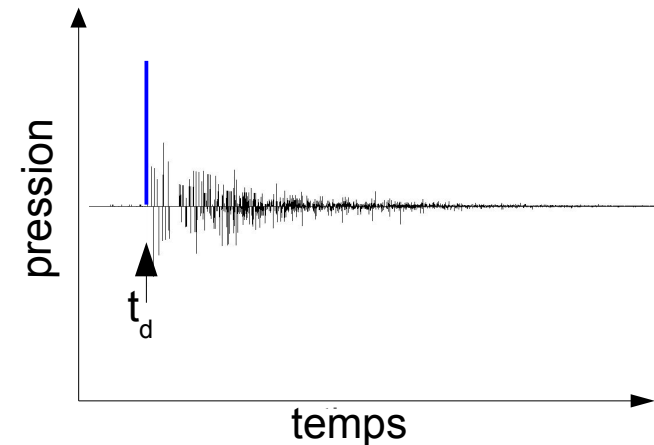
Champ direct

$$p(t_d) \propto \sqrt{\frac{P}{4\pi r^2} D_r e^{-m_r}} \quad (13)$$

$$D_r = 1$$

$$D_r = 0$$

$$D_r^r = \cos(\arccos(\mathcal{U}[-1; 1]))^2$$



Champ réverbéré

$$p(t) \propto \sigma \sqrt{\frac{P}{4\pi (ct)^2} e^{-mct} \sum_{i=1}^{N(t)} D_{ri} (1 - \bar{\alpha})^{n_i(t)}} \quad (12)$$

Polack 1993 (champ tardif récepteur omnidirectionnel)

$N(t)$: nb contributions au temps t : processus de Poisson

$n_i(t)$: nb réflexions/contribution : processus de Poisson

extensions proposées

nb réflexions/contribution : Poisson tronqué en zéro

D_{ri} : pondération stochastique : f(directionalité récepteur)

$$1 \text{ ou } \cos(\arccos(\mathcal{U}[-1; 1]))^2$$

σ : signe aléatoire

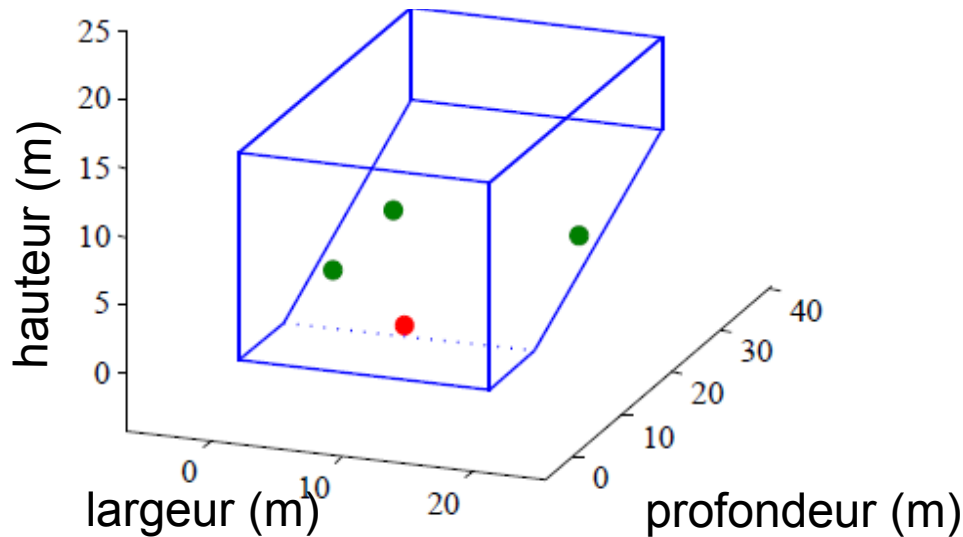
suppression des contributions avant $t_d = r/c$ (Barron & Lee)

Approche systémique

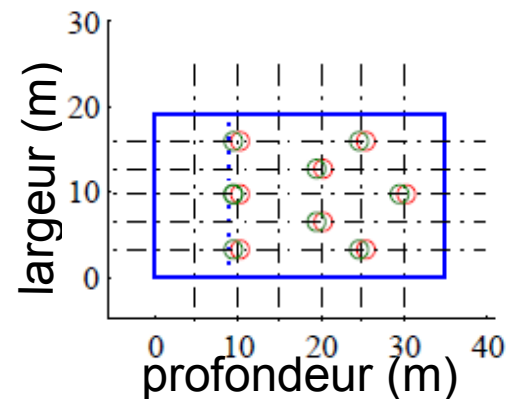
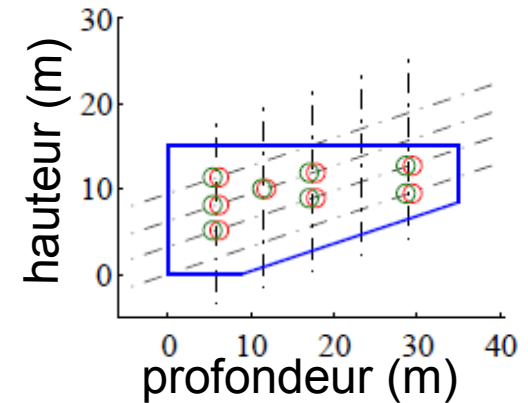
Comment générer les distances source-récepteur?

peu de connaissances sur géométrie de la salle

→ Salle type et placement type des canaux du SAR



$H \times l \times p = 1 \times 1,59 \times 1,9$
inclinaison des gradins = $\pi/10$ (18°)
largeur de scène = 9m
(Haan 1992)



3- Résultats

- Les cas d'étude (Salles, SAR)
- Les critères retenus
- Résultats
- Conclusion

Simulation numérique : la référence

Salles :

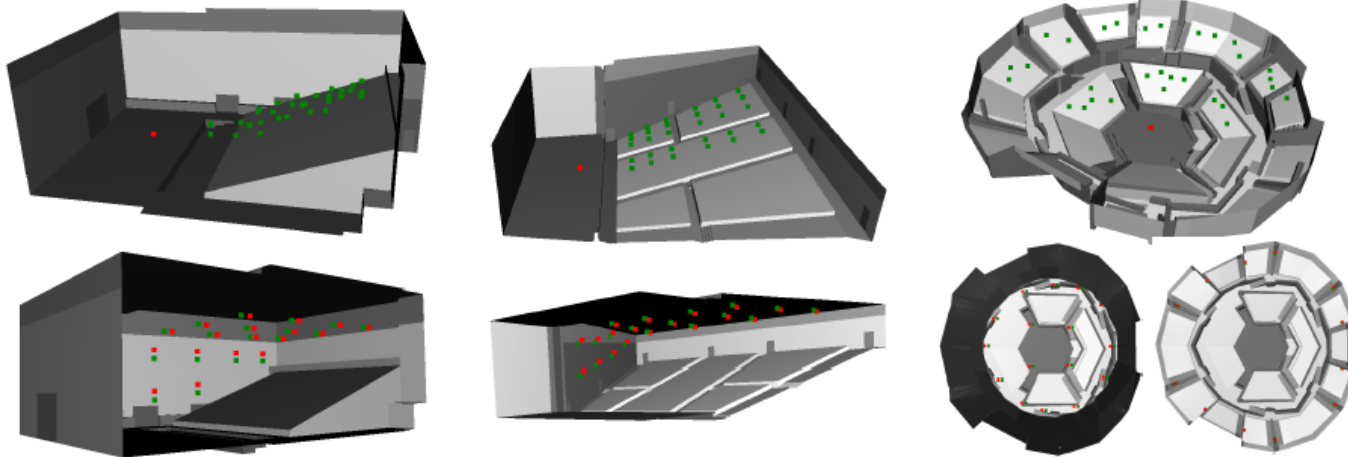
Shoebox X 2 ; Éventail X 2 ; Arène X 1

$V \approx 10000 \text{ m}^3$; $T_r \approx 1 \text{ s}$; 30 récepteurs (répartition homogène sur 1/2 salle)

SAR :

Carmen ; 24-30 canaux (répartition ~homogène murs et plafond)

GBO $\approx -18 \text{ dB}$; $\tau = 20 \text{ ms}$



Sur quoi se baser pour comparer les modèles simplifiés et les simulations numériques

Confrontations ?

Évolutions des critères acoustiques dues à l'action du SAR
Tr20 (%) , EDT (%) , G (dB) , C80 (dB) - [500 Hz, 1000 Hz]

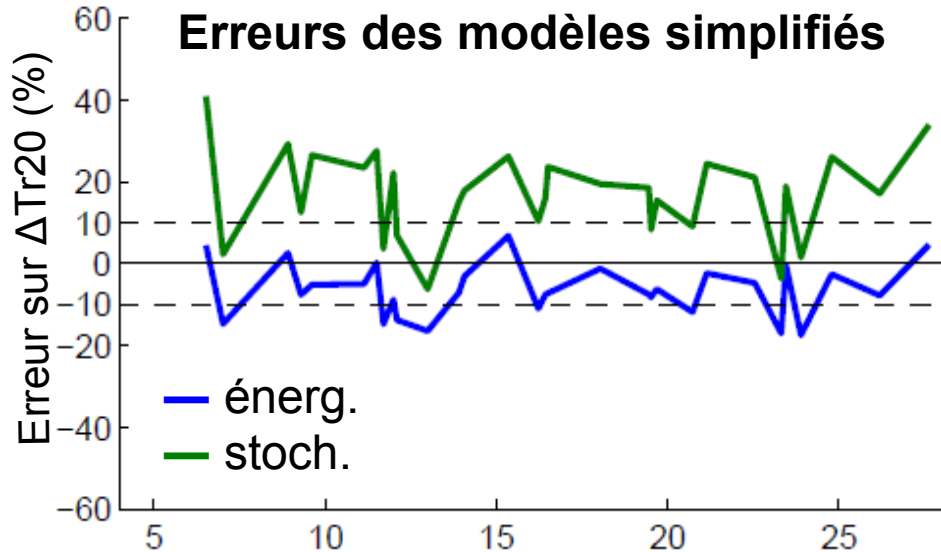
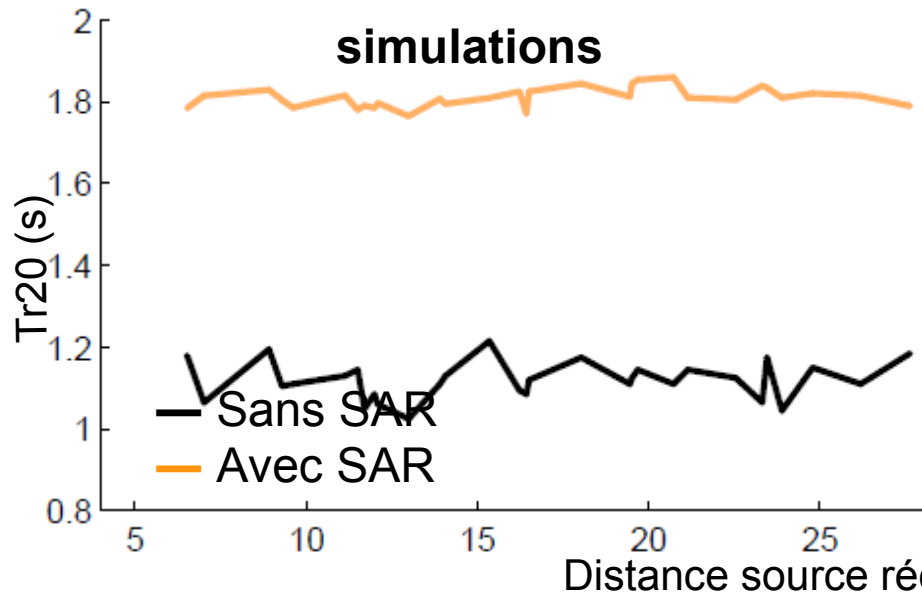
Valeurs ponctuelles et moyennes

Erreurs jugées relativement :

10 % pour Tr et EDT

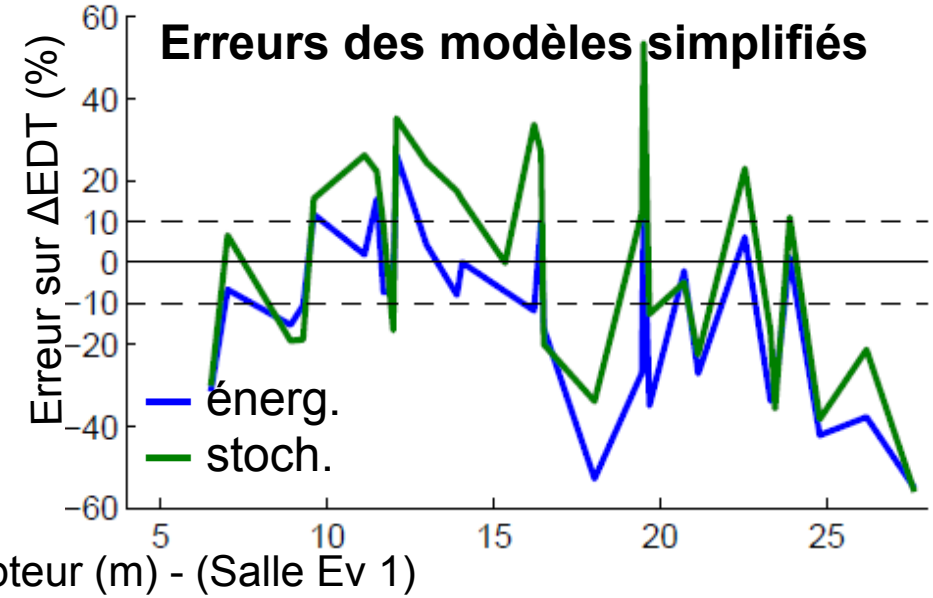
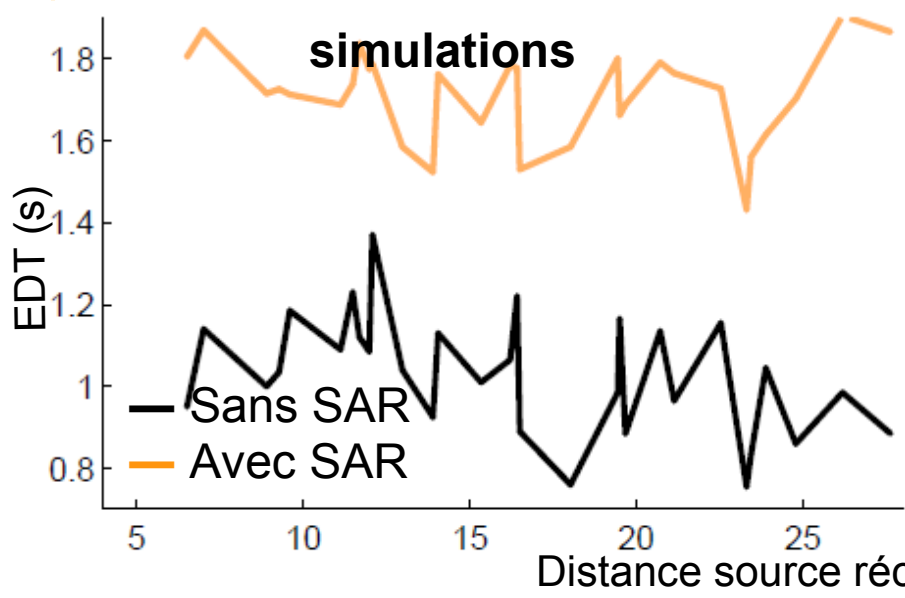
1 dB pour G et C80

résultats : Tr



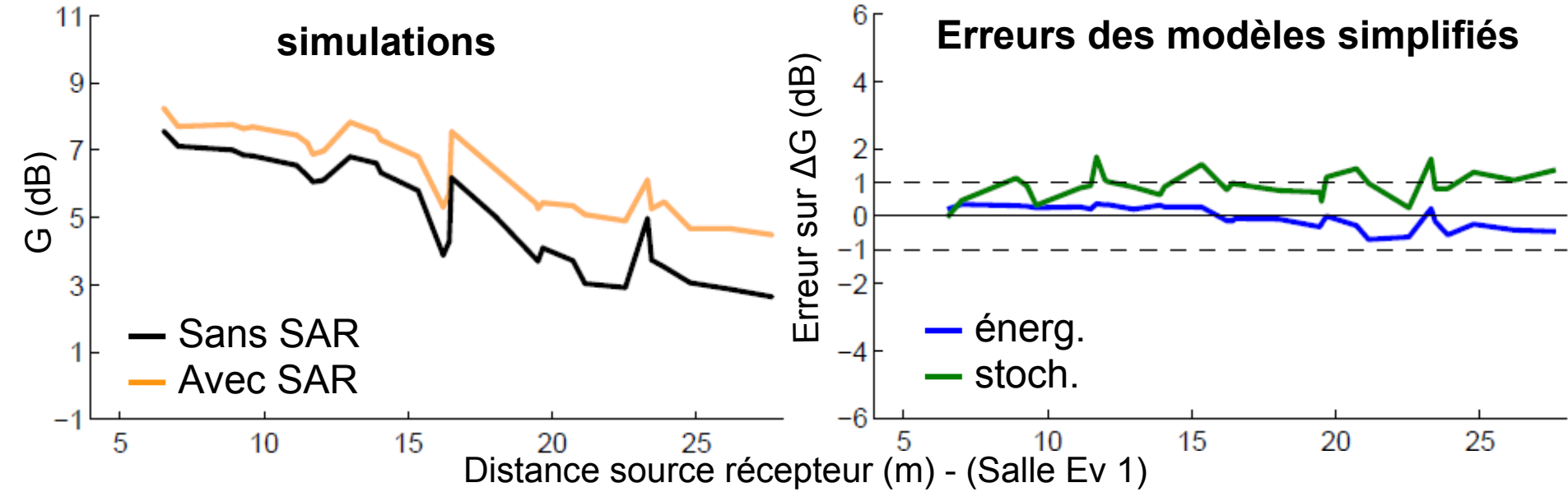
		Sb 1	Sb 2	Ev 1	Ev 2	Ar
ΔTr_{20} (%)	Simu (ref)	65	86	62	63	49
Erreur ΔTr_{20} (%)	Énerg.	-14	-21	-6	-2	12
	Stoch.	7	-5	16	-18	26

résultats : EDT



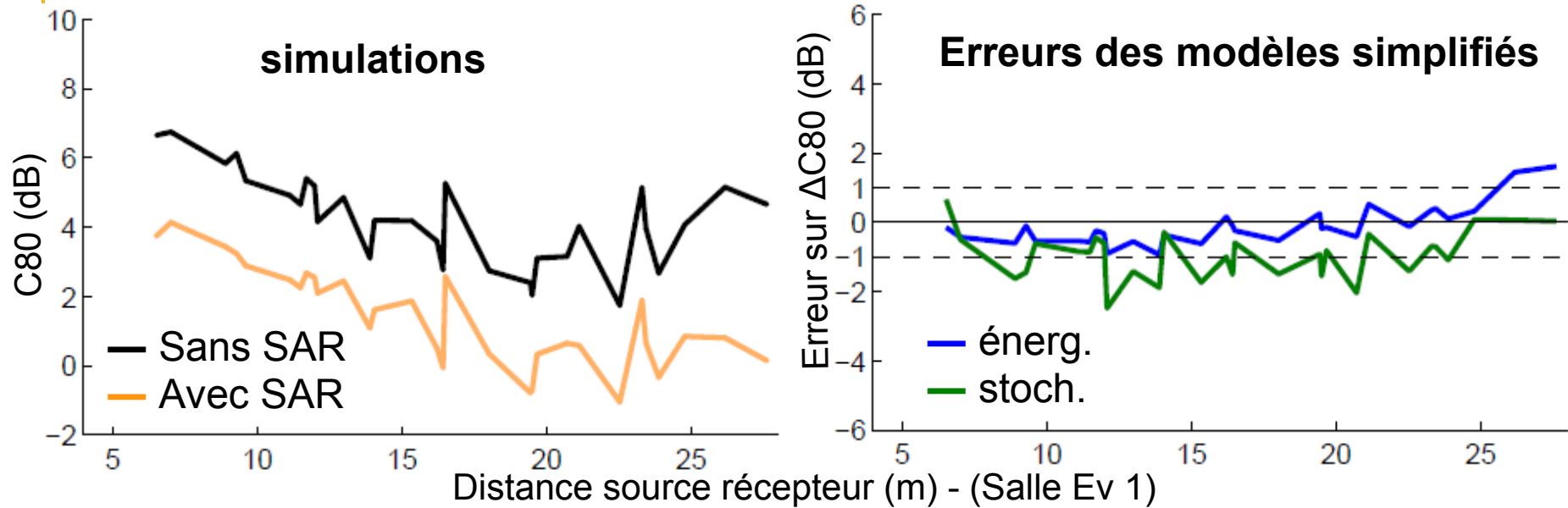
		Sb 1	Sb 2	Ev 1	Ev 2	Ar
Δ EDT (%)	Simu (ref)	86	81	68	60	63
Erreur Δ EDT (%)	Énerg.	-34	-15	-12	1	-2
	Stoch.	-23	-9	-1	14	3

résultats : G



		Sb 1	Sb 2	Ev 1	Ev 2	Ar
Δ G (dB)	Simu (ref)	1,5	1,3	1,3	1,3	1,0
Erreur Δ G (dB)	Énerg.	-0,3	0,0	0,0	0,0	0,3
	Stoch.	0,9	0,4	0,9	1,2	1,0

résultats : C80

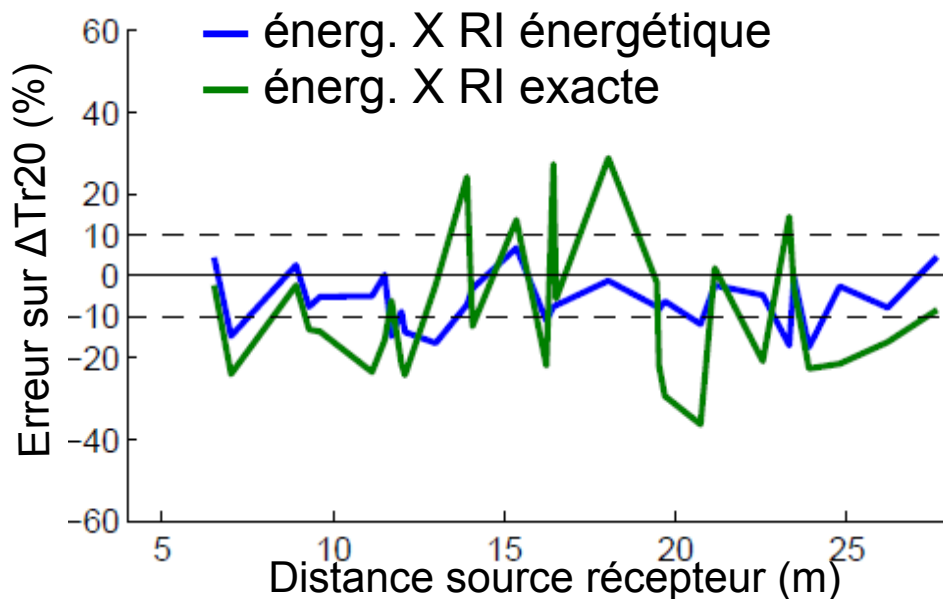


		Sb 1	Sb 2	Ev 1	Ev 2	Ar
$\Delta C80$ (dB)	Simu (ref)	-3,8	-3,5	-2,8	-2,6	-3,0
Erreur $\Delta C80$ (dB)	Énerg.	1,1	0,2	-0,1	-0,5	-0,2
	Stoch.	0,2	0,2	-0,9	-1,7	-0,8

erreur du modèle énergétique : est-ce l'action du système ou la RI passive ?

$\Xi_{ea}(t)$ X RI passive (approche énergétique) : théorie révisée (Barron & Lee)
Ou

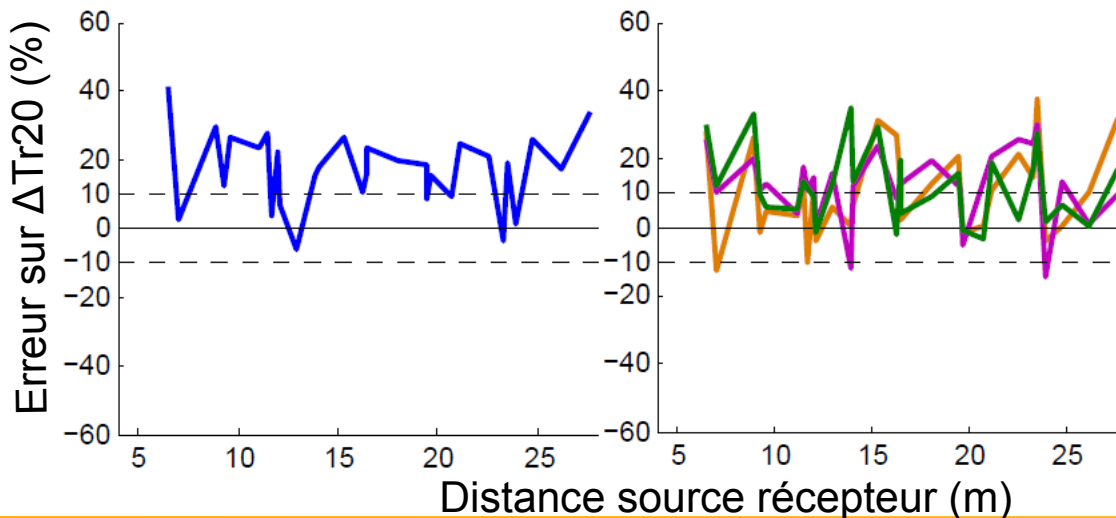
$\Xi_{ea}(t)$ X RI passive exacte (simulation)



L'action même du SAR ne peut être approchée par l'approche énergétique

erreur du modèle systémique + RI stochastiques : peut-on identifier une sensibilité du modèle système ?

Ref	$H_{sr} + \underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$	
Stoch	$H_{sr} + \underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$	—
Stoch2 +Ri exacte	$H_{sr} + \underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$	—
Stoch2 +Ri exacte ++	$H_{sr} + \underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$	—
Stoch2 +Ri exacte ++(bis)	$H_{sr} + \underline{H}_{hr}^t \left(\underline{I}_d - \underline{G}_{mh} \underline{H}_{hm} \right)^{-1} \underline{G}_{mh} \underline{H}_{sm}$	—



aucune RI ne peut
être simplifiée par
l'approche
stochastique

Synthèse sur les confrontations des modèles simplifiés aux simulations numériques

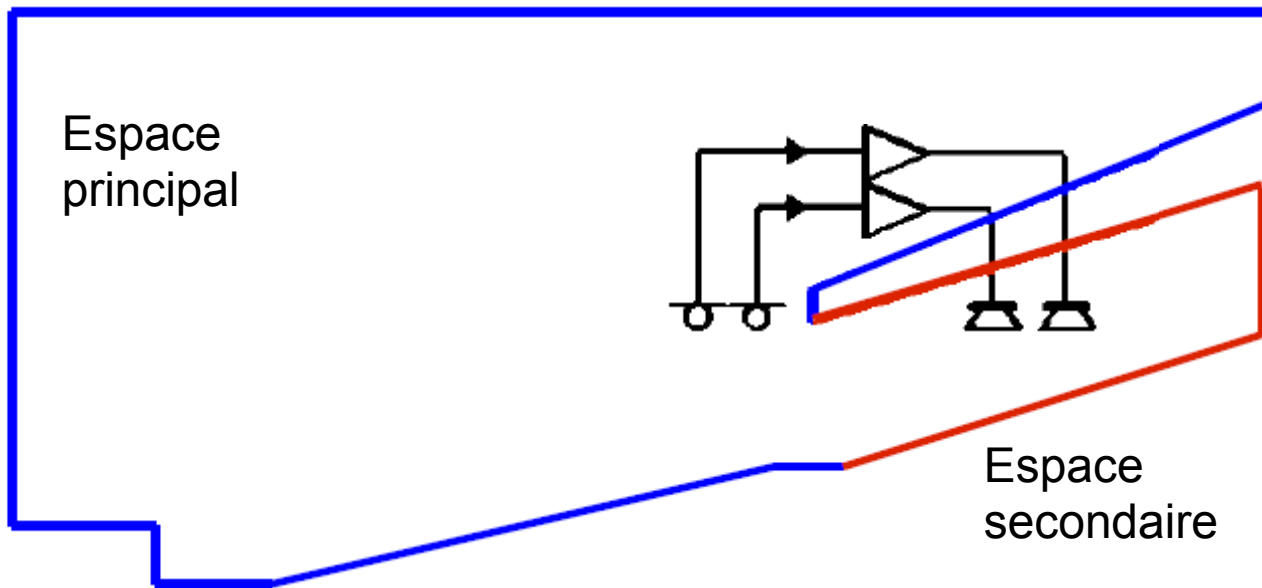
- Les erreurs des modèles prédictifs :
 - importantes sur Tr et EDT (plusieurs fois le seuil de tolérance de 10%)
 - acceptables sur G mais à mettre en relation avec l'effet du système
 - acceptables sur C80

- Les modèles proposés sont une extension des approches de types champ diffus aux salles avec SAR (théorie & validité)

4- Modèle prédictif simplifié dans les salles couplées

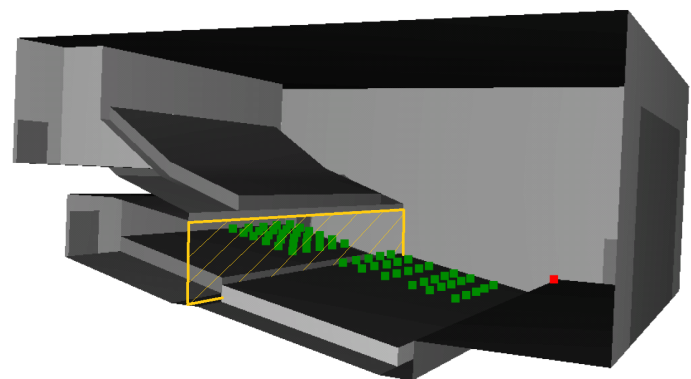
- Le problème de couplage de l'espace sous-balcon**
- Quantifier le couplage**
- Prédire l'effet du système d'augmentation de couplage**
- Effet du système d'augmentation de couplage**

Systeme électroacoustique d'augmentation de couplage

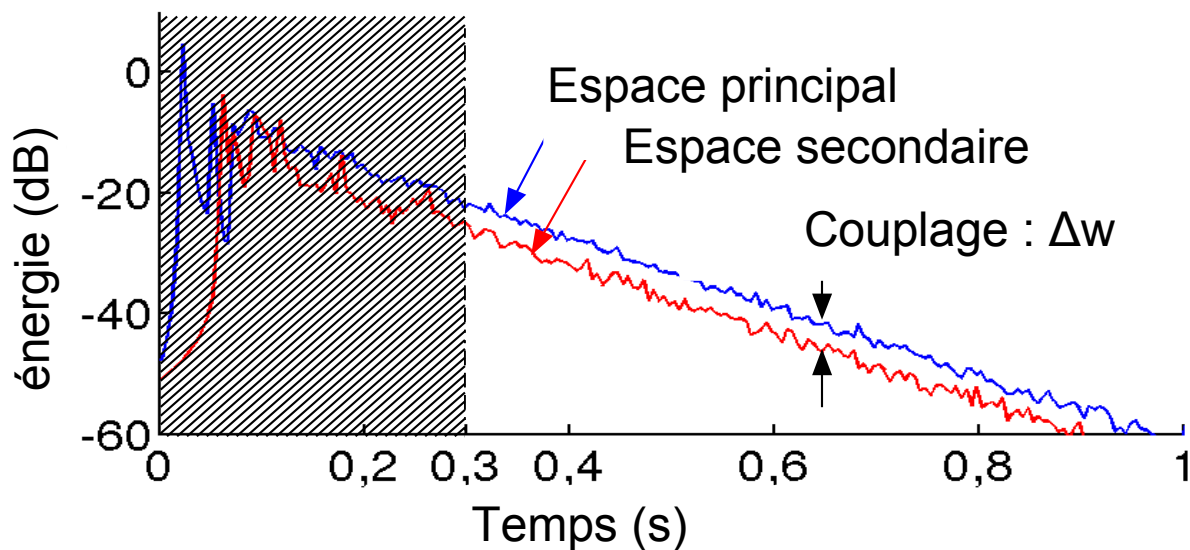


Espace secondaire / Espace principal :
-manque de EDT et G
-excès de C80

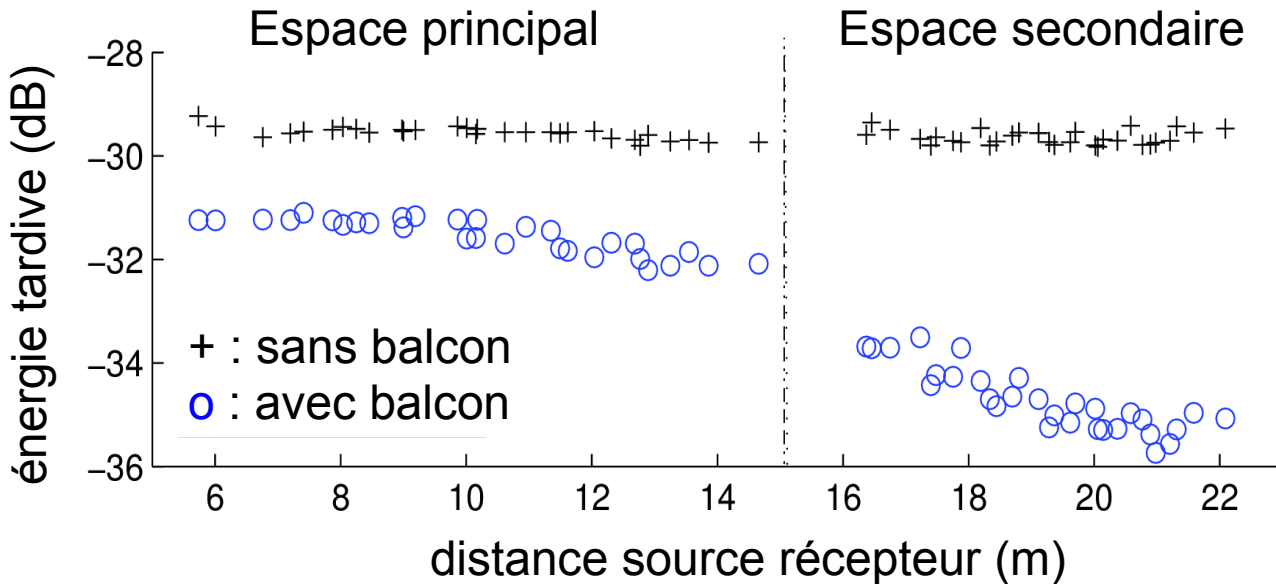
Quel est l'effet du couplage sur les RI ?



Volume principal	$V_1 = 8272 \text{ m}^3$	$A_1 = 1281 \text{ m}^2$	$S_{12} = 90 \text{ m}^2$
Volume secondaire	$V_2 = 618 \text{ m}^3$	$A_2 = 245 \text{ m}^2$	



comment définir le couplage ?

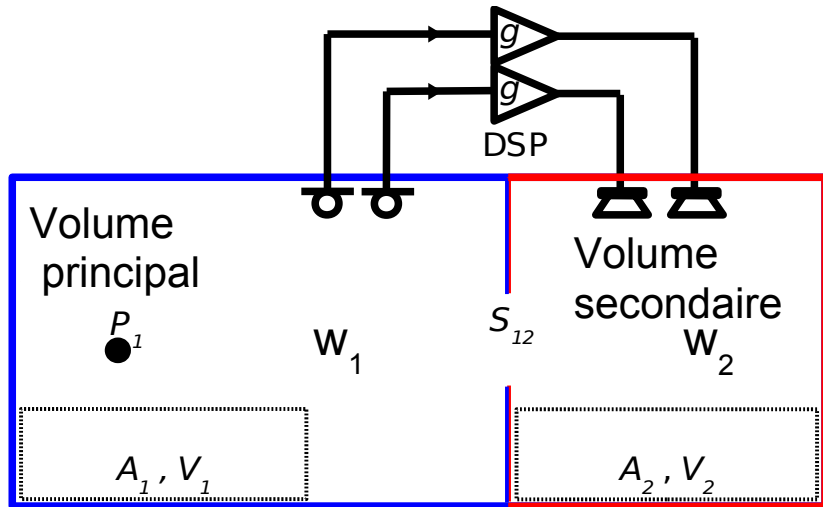


$$\Delta_w = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{0,3}^{+\infty} p_2^2(t) dt}{\int_{0,3}^{+\infty} p_1^2(t) dt} \right) \quad (14)$$

avec balcon : $\Delta_w = -3.2 \pm 0.3$ dB

sans balcon : $\Delta_w < 0.1 \pm <0.1$ dB

Comment prédire l'action du système d'augmentation de couplage ?

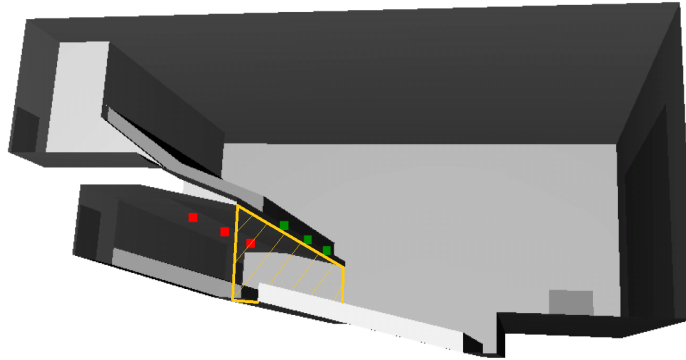


approche énergétique salles couplées
+ approche énergétique SAR (source équivalente)

$$\begin{cases} V_1 \frac{dw_1(t)}{dt} + \frac{(A_1 + S_{12})c}{4} w_1(t) - \frac{S_{12}c}{4} w_2(t) = P_1(t) \\ V_2 \frac{dw_2(t)}{dt} + \frac{(A_2 + S_{12})c}{4} w_2(t) - \frac{S_{12}c}{4} w_1(t) = N \bar{G} w_1(t) \end{cases} \quad (15)$$

↓
→ **Résolution : formule théorique de Δw**

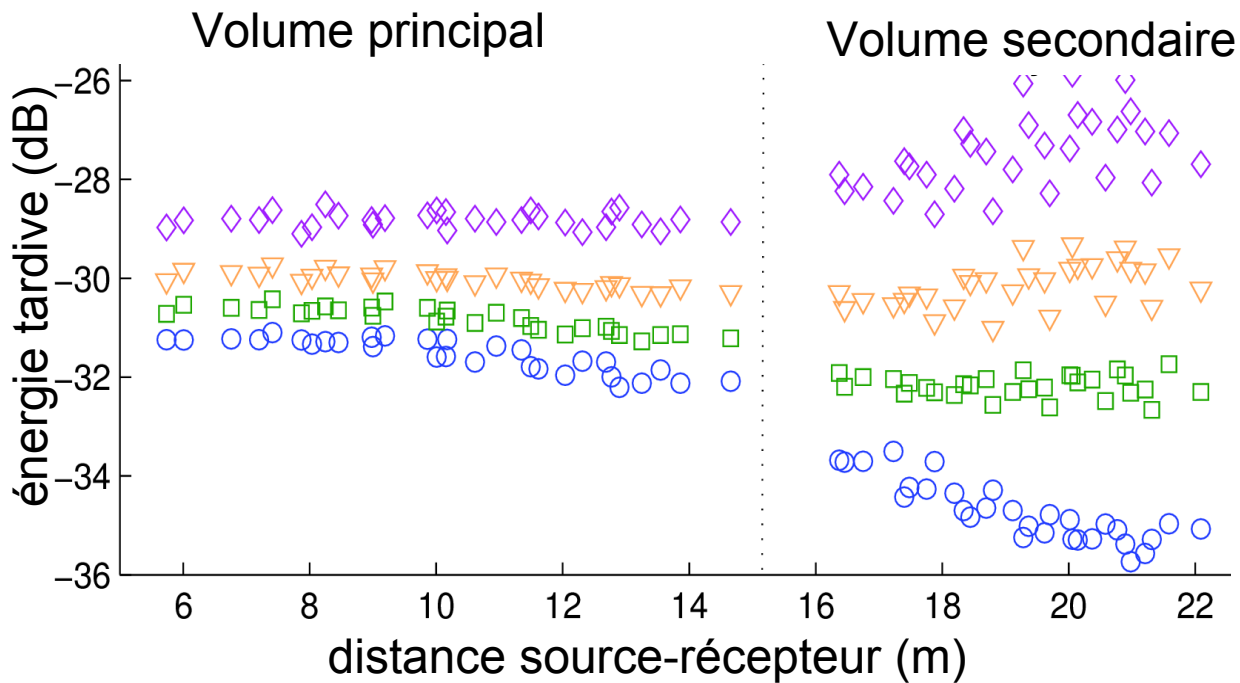
Simulation numérique : la référence



3 canaux du électroacoustiques

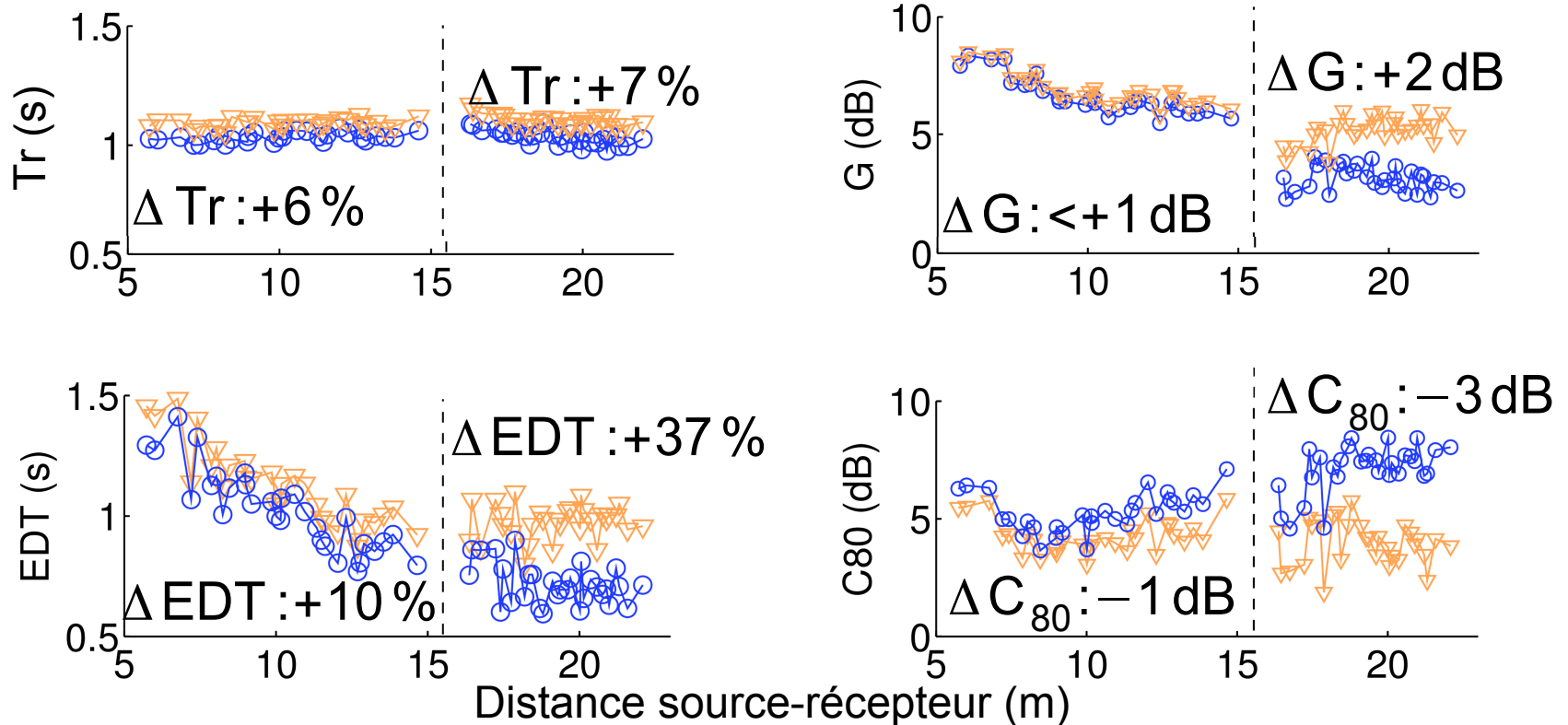
	Conf. 0	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
GBO (dB)		-21,7	-18,5	-15,9

Effet du système d'augmentation de couplage



GBO (dB)	Conf. 0	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3
Δw simu (dB)	$-3,2 \pm 0,3$	$-1,3 \pm 0,1$	$+0,1 \pm 0,2$	$+1,4 \pm 0,4$
Δw éner. (dB)	-4,1	-1,6	+0,3	+2,6

Effet du système d'augmentation de couplage sur 4 critères acoustiques



effet homogène et faible sur Tr

effet + important sous-balcon sur EDT, G (augmentation) et C80 (diminution)

→ **diminution de l'effet du balcon**

→ **homogénéisation des conditions acoustiques entre les deux volumes**

Synthèse sur le système d'augmentation de couplage

- Proposition d'un critère de couplage pour une salle avec balcon
- L'effet du système d'augmentation de couplage sur ce critère de couplage peut être théoriquement prédit à partir de l'approche énergétique
- En ayant un effet plus prononcé sur les critères acoustiques relevés au niveau des places sous-balcon que des places dans l'espace principal : le système rééquilibre les conditions acoustiques entre ces deux espaces

Conclusion

- Un modèle énergétique et un modèle systémique basé sur des RI stochastiques de l'action d'un SAR dans une salle simple :
 - extension des modèles de type champ diffus au cas d'une salle avec SAR
 - validité limitée et équivalente de ces modèles : validité équivalente aux modèles de type champ diffus dans une salle sans SAR
- Un modèle énergétique d'un SAR en amélioration du couplage :
 - proposition d'un critère objectif de couplage
 - effet du système prédictible sur l'évolution de ce critère
 - effet audible du système concernant l'homogénéisation de la qualité acoustiques entre les salles couplées

Perspectives

- Campagnes de mesures (salles simples et salles couplées)
- Études sur d'autres SAR régénératifs (MCR)
- Études sur l'influence de paramètres constructifs sur la validité des modèles (développement d'un modèle statistique ?)
- tests subjectifs sur le système d'augmentation de couplage

Merci de votre attention