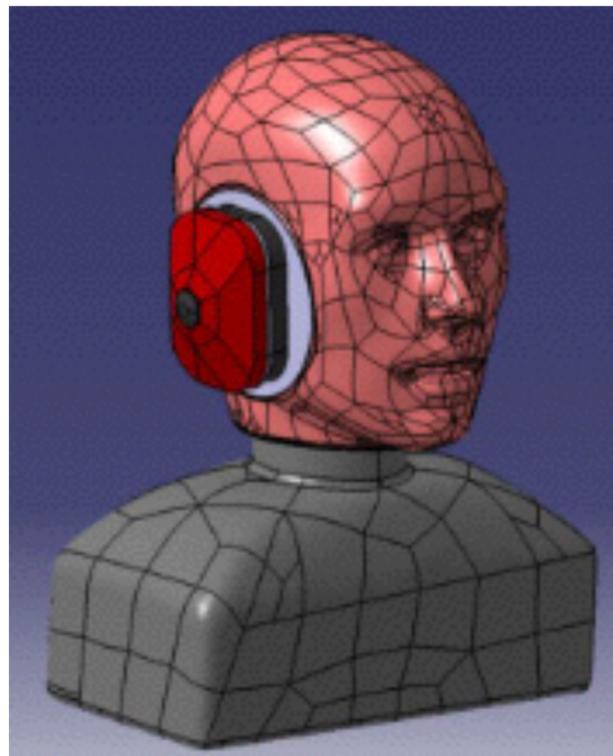


Développement d'outils et de méthodes pour mieux évaluer et améliorer la protection auditive individuelle des travailleurs



Hugues NÉLISSE, IRSST / Franck SGARD, IRSST

Olivier Doutres, ÉTS

Frédéric Laville, ÉTS

Jérôme Boutin, IRSST

Cécile Le Cocq, ÉTS

Jérémy Voix, ÉTS

Plan

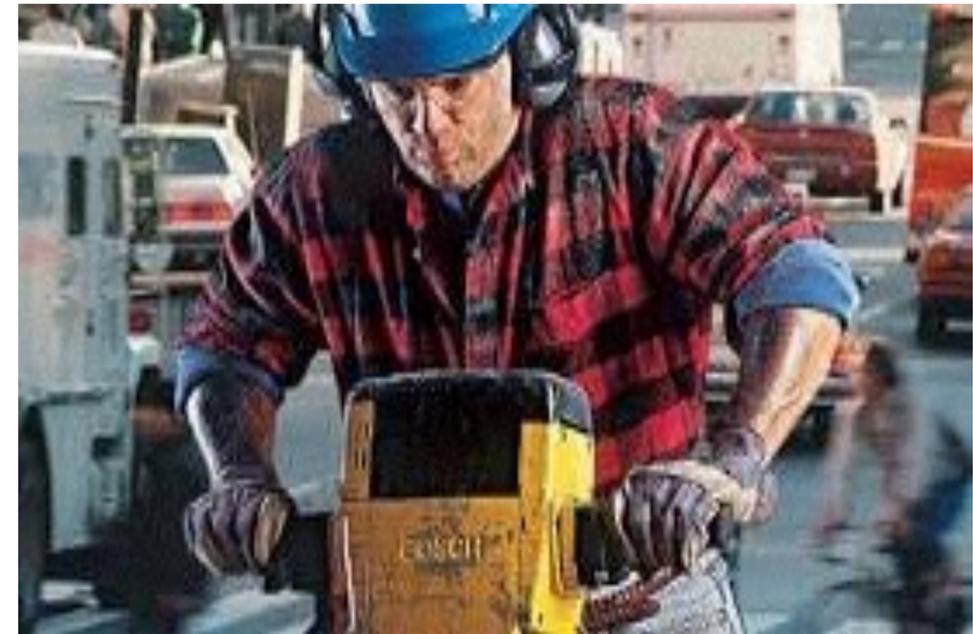
- Contexte et objectifs
- Volet mesures : atténuation et effet d'occlusion
- Volet modélisation des protecteurs
- Retombées et perspectives

Atténuation des protecteurs

Laboratoire



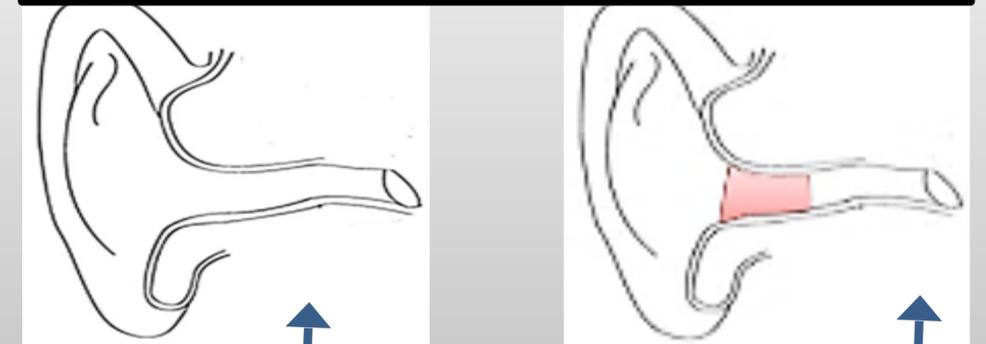
Milieu de travail



Mesures atténuation – 2 méthodes populaires

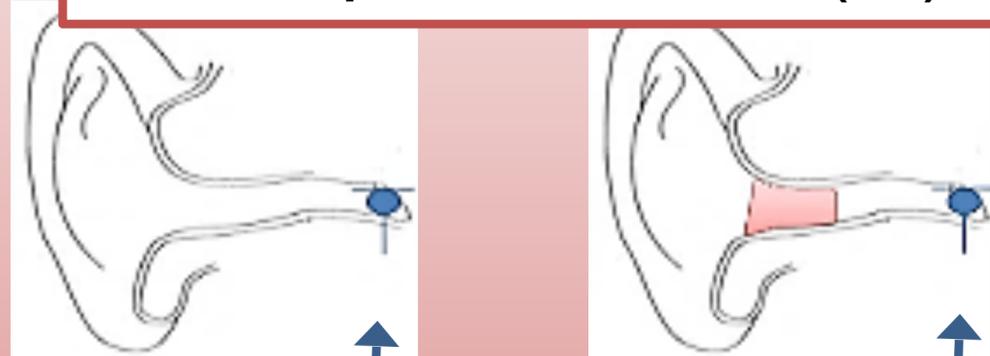
Seuils audiométriques (REAT)

REAT
Perte par insertion (IL)



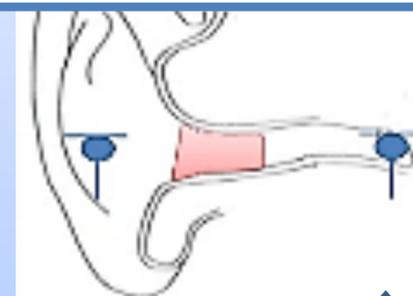
Seuils AVEC et SANS

MIRE
Perte par insertion (IL)



Niveaux de bruit
AVEC et SANS

MIRE
Affaiblissement sonore
(NR)



Niveaux de bruit
DE PART ET D'AUTRE

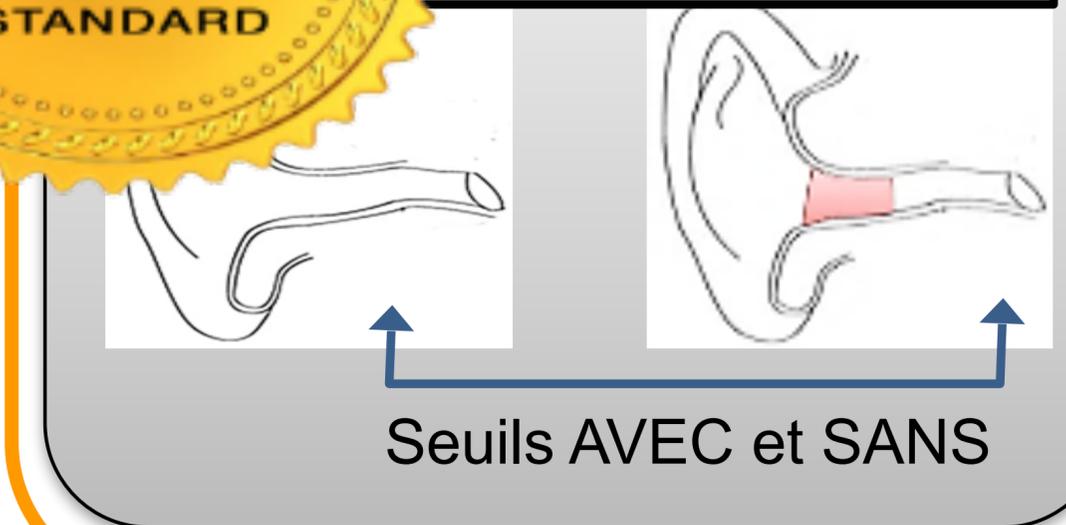
Microphones (MIRE)

Mesures atténuation – 2 méthodes populaires

Seuils audiométriques (RE)



REAT
par insertion (IL)

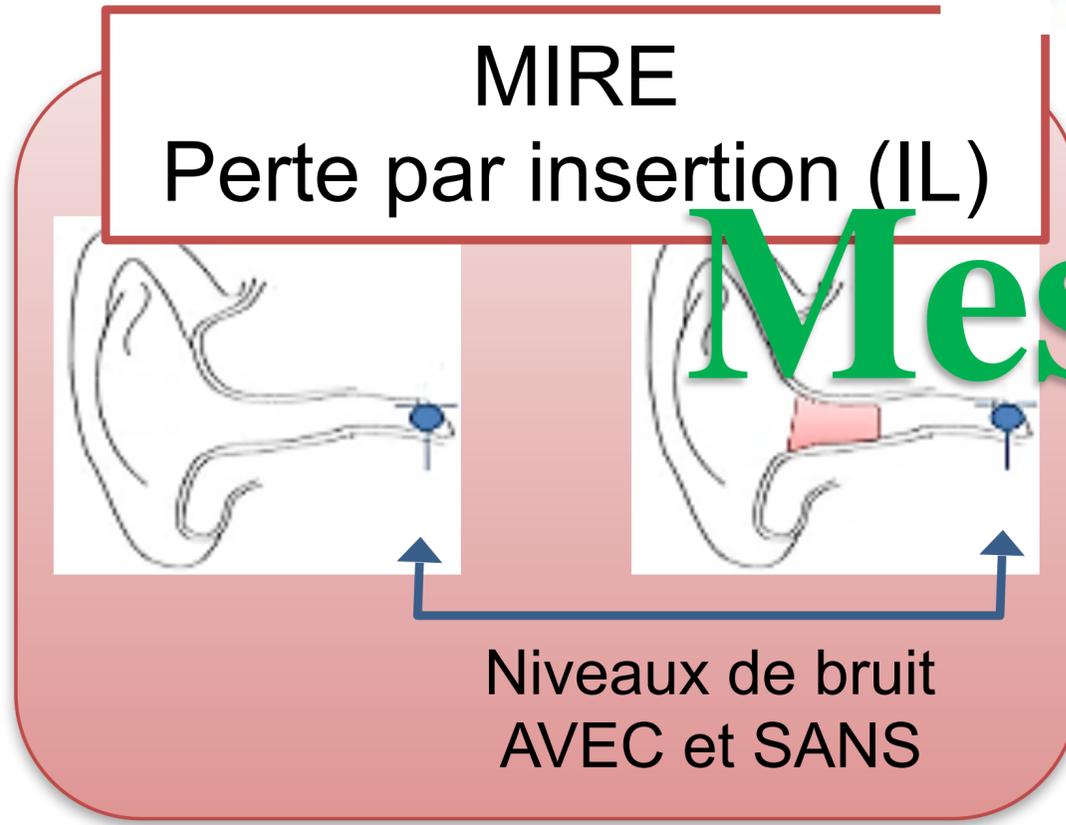


MIRE
Affaiblissement sonore
(NR)



Niveaux de bruit
DE PART ET D'AUTRE

MIRE
Perte par insertion (IL)



Niveaux de bruit
AVEC et SANS

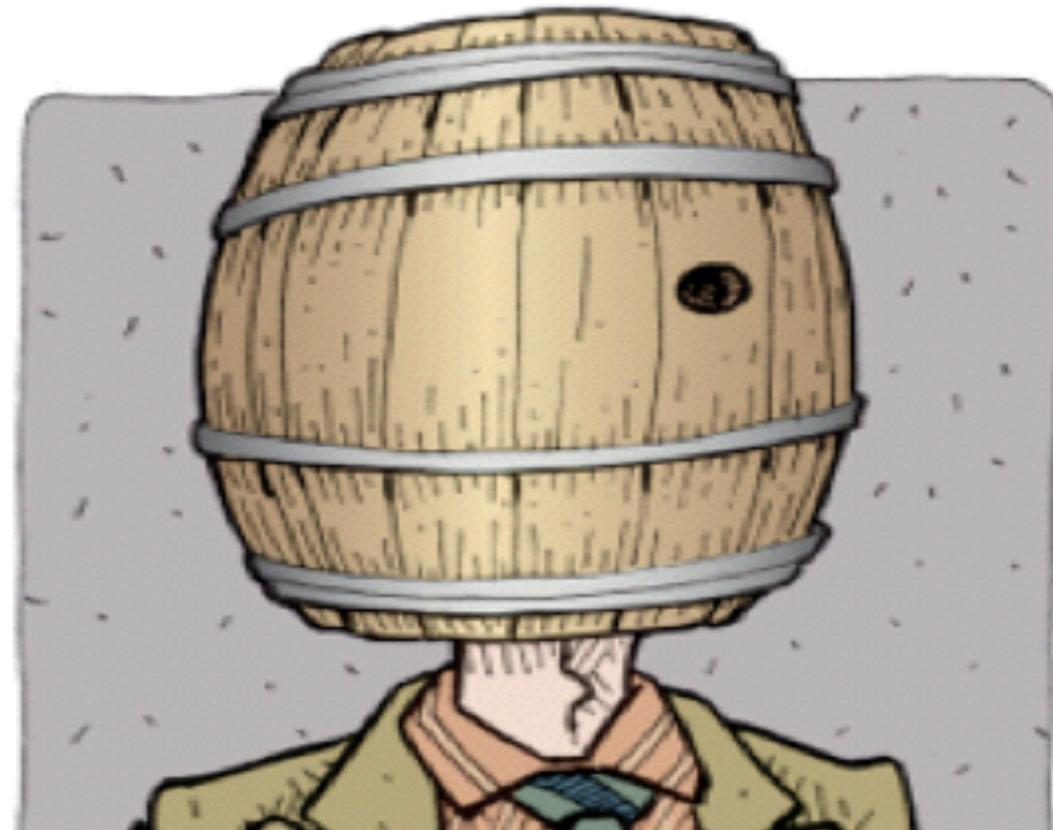
Mesures terrain

Microphones (MIRE)

Effet d'occlusion

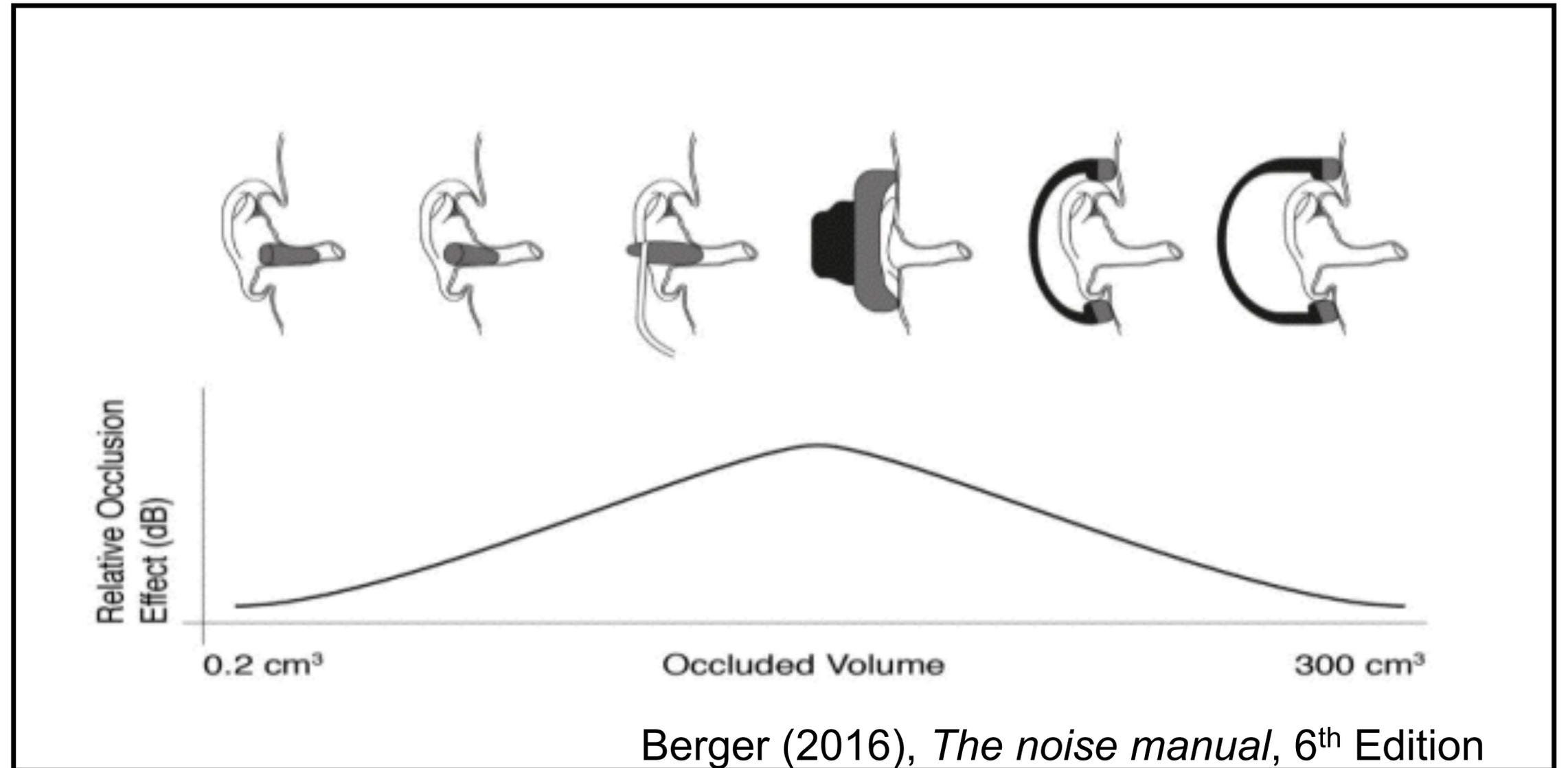
- Oreille occluse : amplification et perception modifiées de notre propre voix

Ça sonne drôle tout ça !



Effet d'occlusion

- Oreille occluse : amplification et perception modifiées de notre propre voix

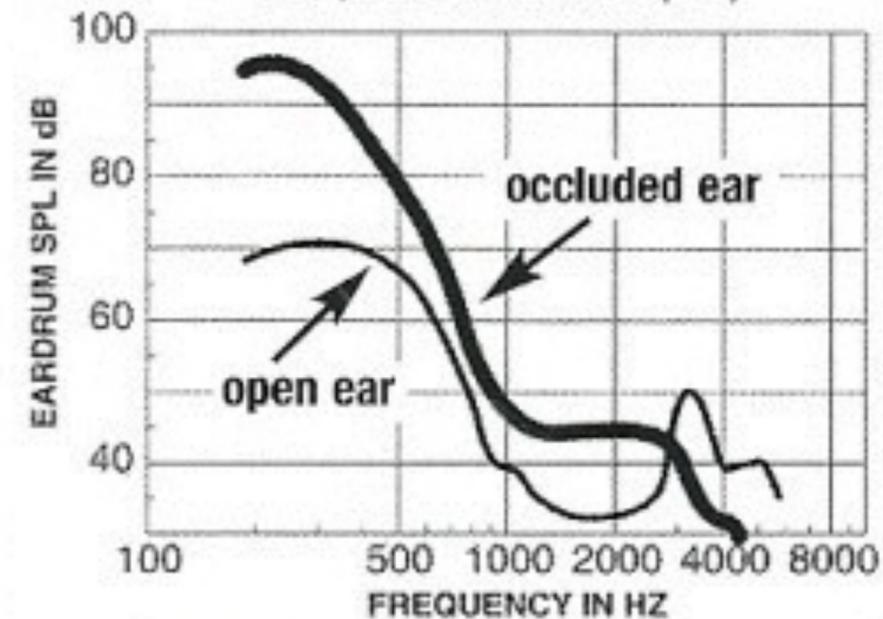


Mesure de l'effet d'occlusion

- Méthode avec ossivibrateur
 - Avec et sans protecteur
 - Seuils ou microphones
- Méthode avec effort vocal
 - Avec et sans protecteur



Earcanal SPLs measured behind sealed shallow earmold while female vocalized "ee"
Killion, Wilber and Gudmundsen (1988)



Objectifs

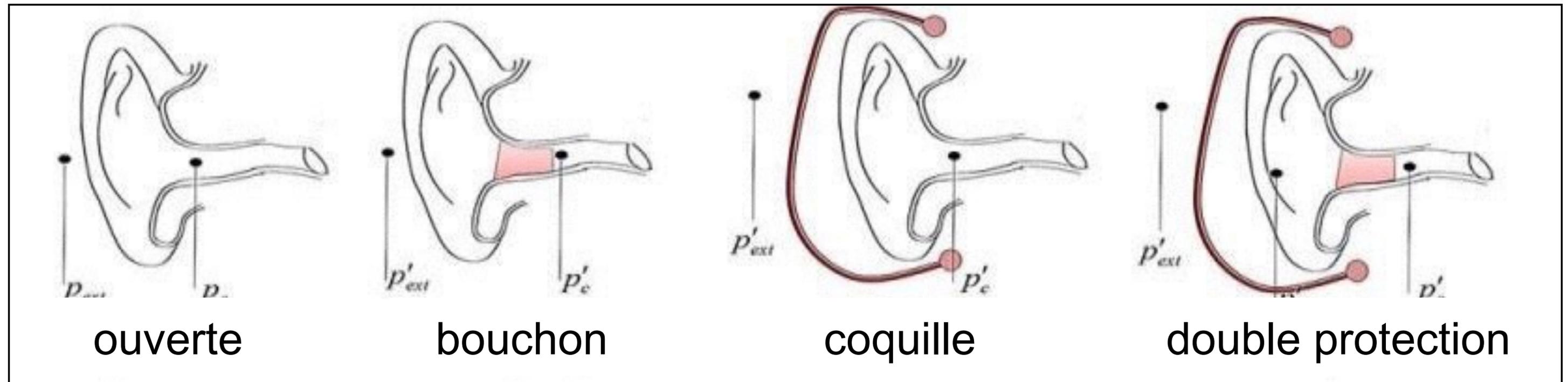
Volet expérimental

- Atténuation : **liens** entre REAT et MIRE
- Occlusion : **méthode robuste plus représentative du terrain**

Volet modélisation

- Modèles numériques pour une **meilleure conception** et pour **guider** les méthodes de mesure

4 conditions



3 étapes par condition

- 1 REAT - seuils
 - 2 MIRE - bruit blanc @ 90 dB
 - 3 Effort vocal
- } Atténuation
- } Occlusion

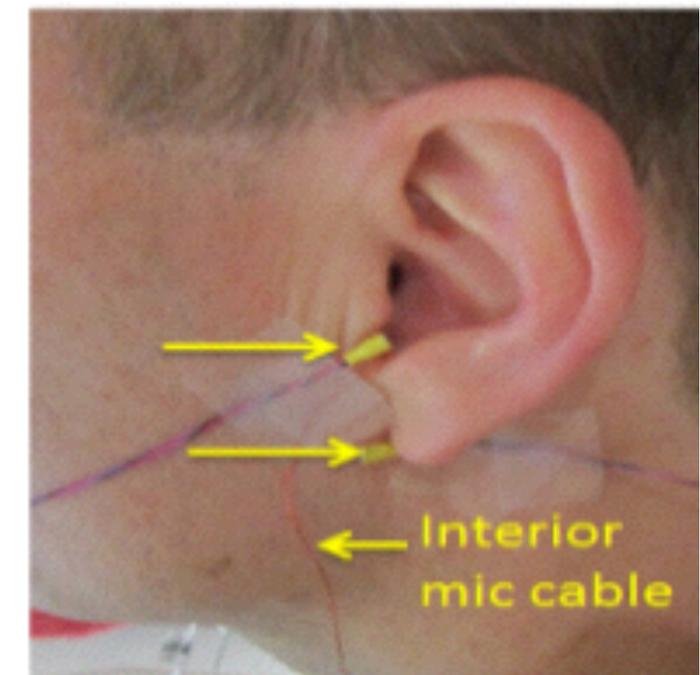
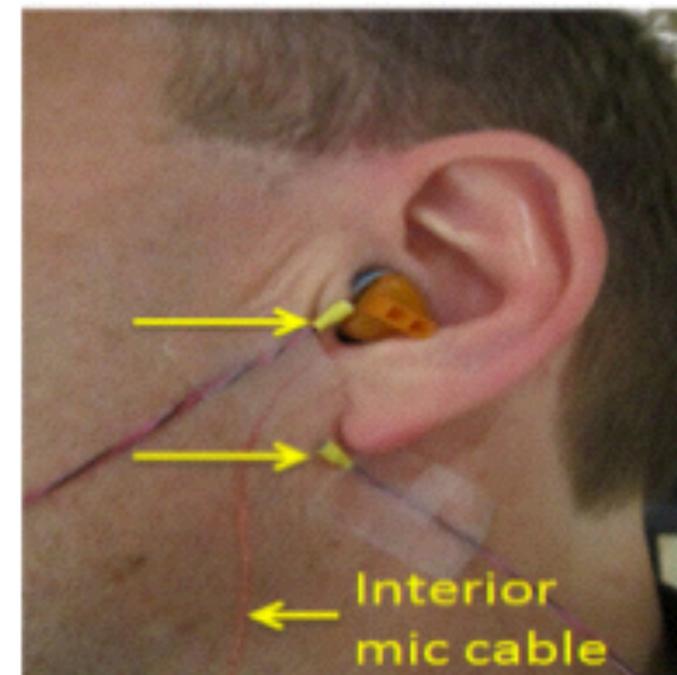
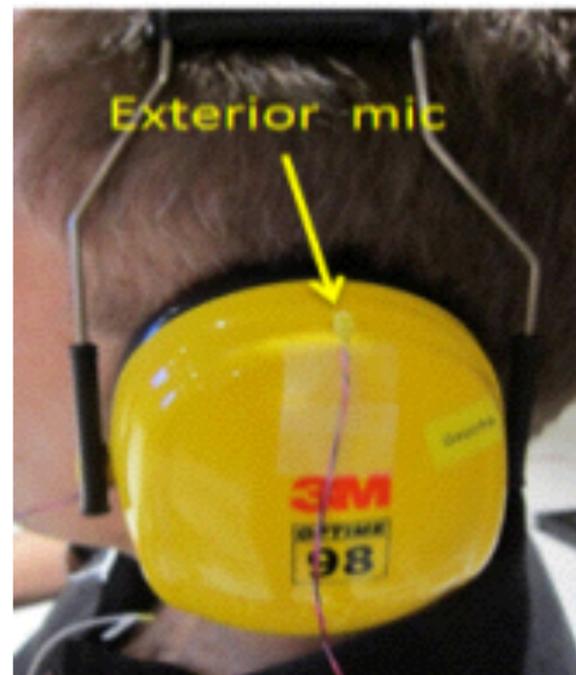
Essais en laboratoire (2)



Champ diffus ICAR (per ANSI S12.6)

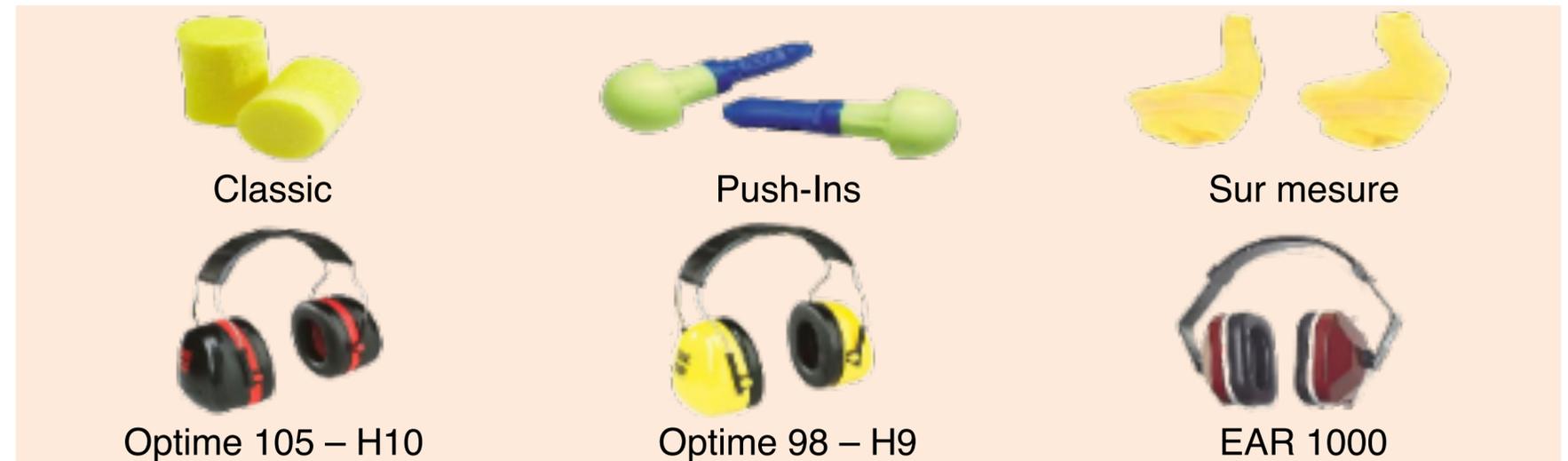


Microphones



Essais en laboratoire (3)

- 29 sujets (audition normale)
- 57 séquences de tests
- 3 serre-têtes et 3 bouchons

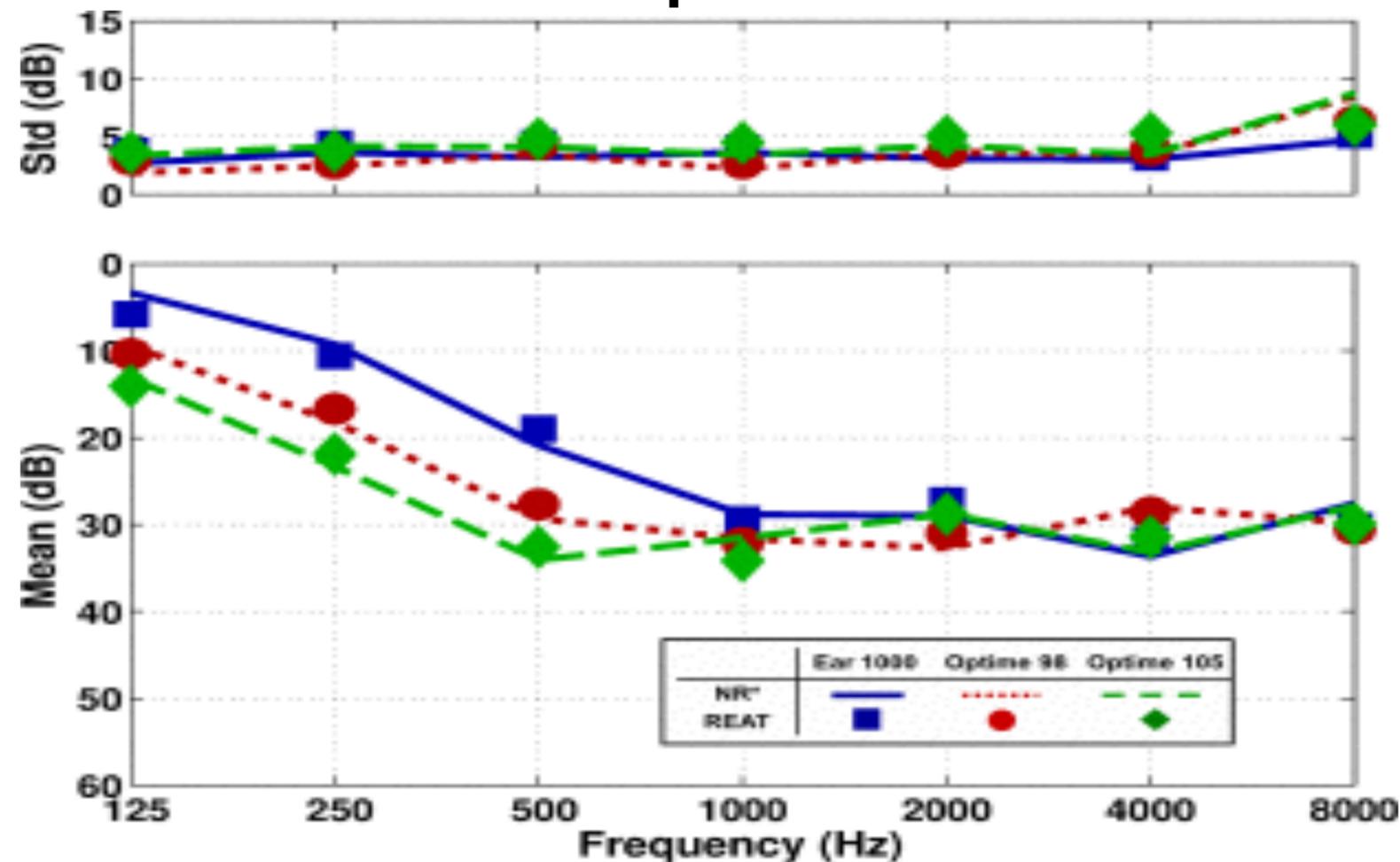


		Bouchons			# sessions / coquilles
		Classic	Push-ins	Sur mesure	
Coquilles	NRR	29	28	23	
Optime 105	30	6	6	6	18
Optime 98	25	7	6	6	19
Ear 1000	20	6	6	6	18
# sessions / bouchons		19	18	18	55

REAT vs MIRE : données spectrales

$$\boxed{REAT} = \boxed{NR^* + TF_{c-ext}} + (TF'_{canal} - TF_{canal}) + (TF_{ext} - TF'_{ext}) + PN$$

Coquilles



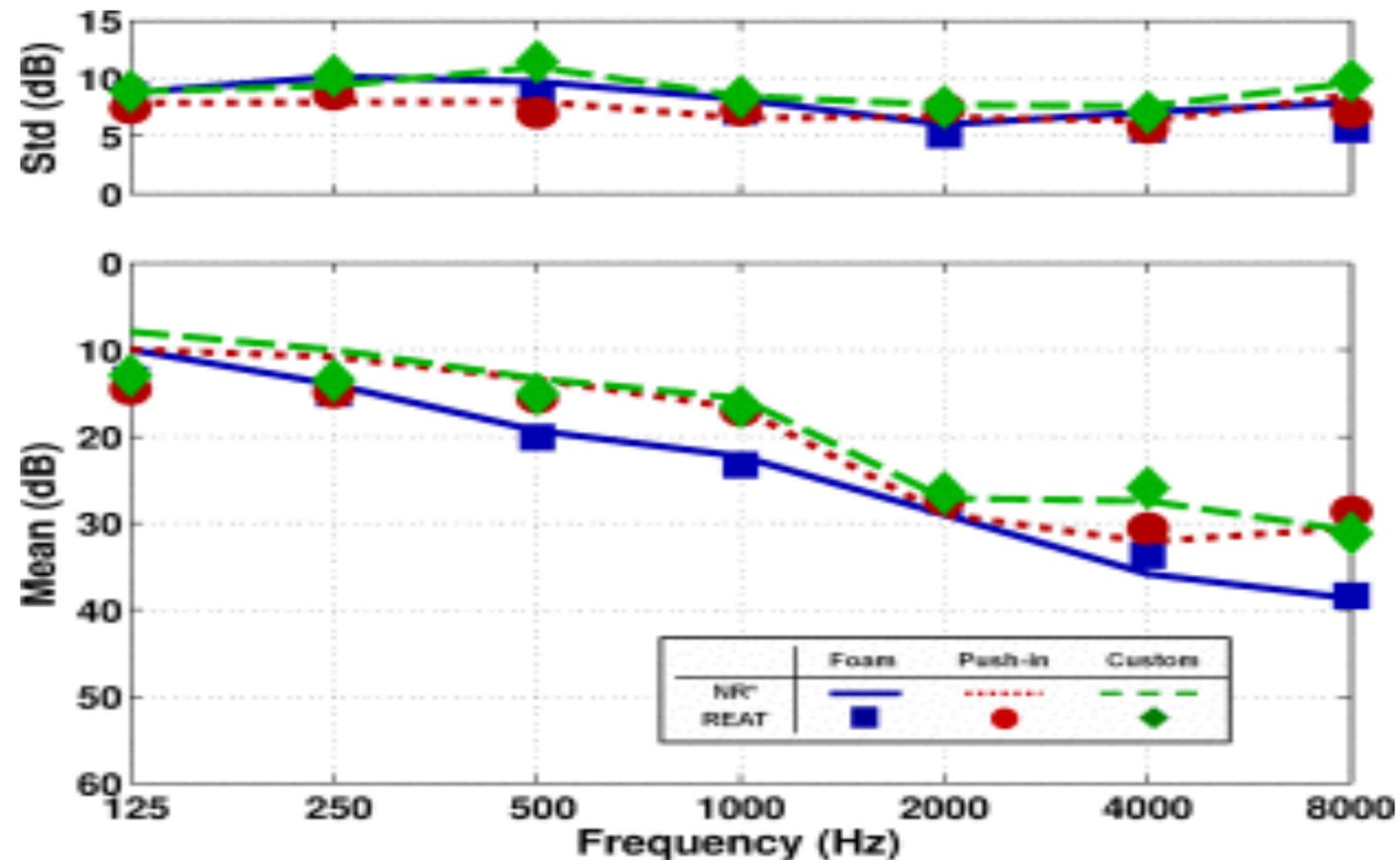
◆ : REAT
— : MIRE

MIRE : Transformation binaurale (Voix et Laville, 2009)
+ Correction pour conduction osseuse (ANSI S12.42)

REAT vs MIRE : données spectrales

$$\boxed{REAT} = \boxed{NR^* + TF_{c-ext}} + (TF'_{canal} - TF_{canal}) + (TF_{ext} - TF'_{ext}) + PN$$

Bouchons



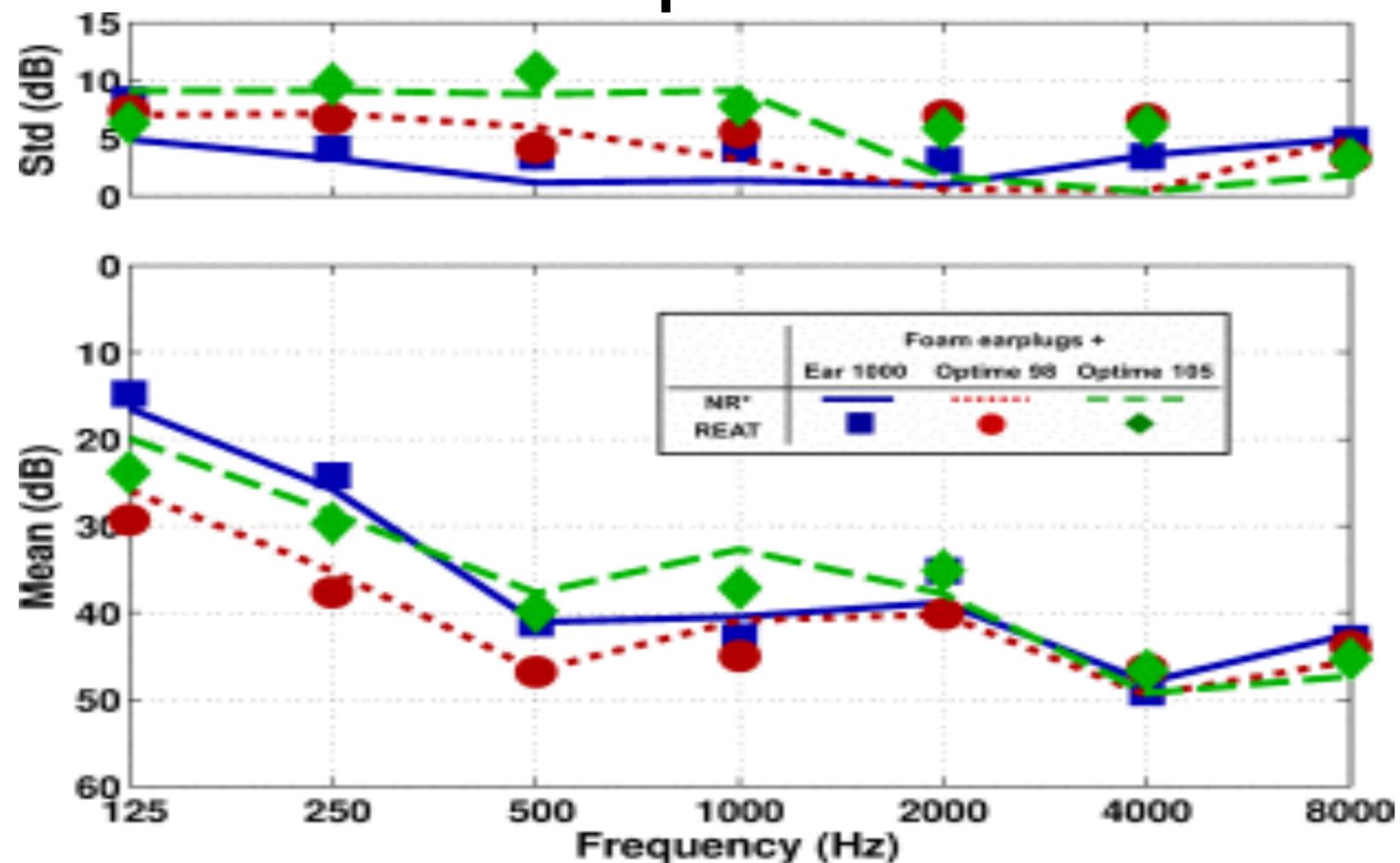
◆ : REAT
■ : MIRE

MIRE : Transformation binaurale (Voix et Laville, 2009)
+ Correction pour conduction osseuse (ANSI S12.42)

REAT vs MIRE : données spectrales

$$\boxed{REAT} = \boxed{NR^* + TF_{c-ext}} + (TF'_{canal} - TF_{canal}) + (TF_{ext} - TF'_{ext}) + PN$$

Double protection



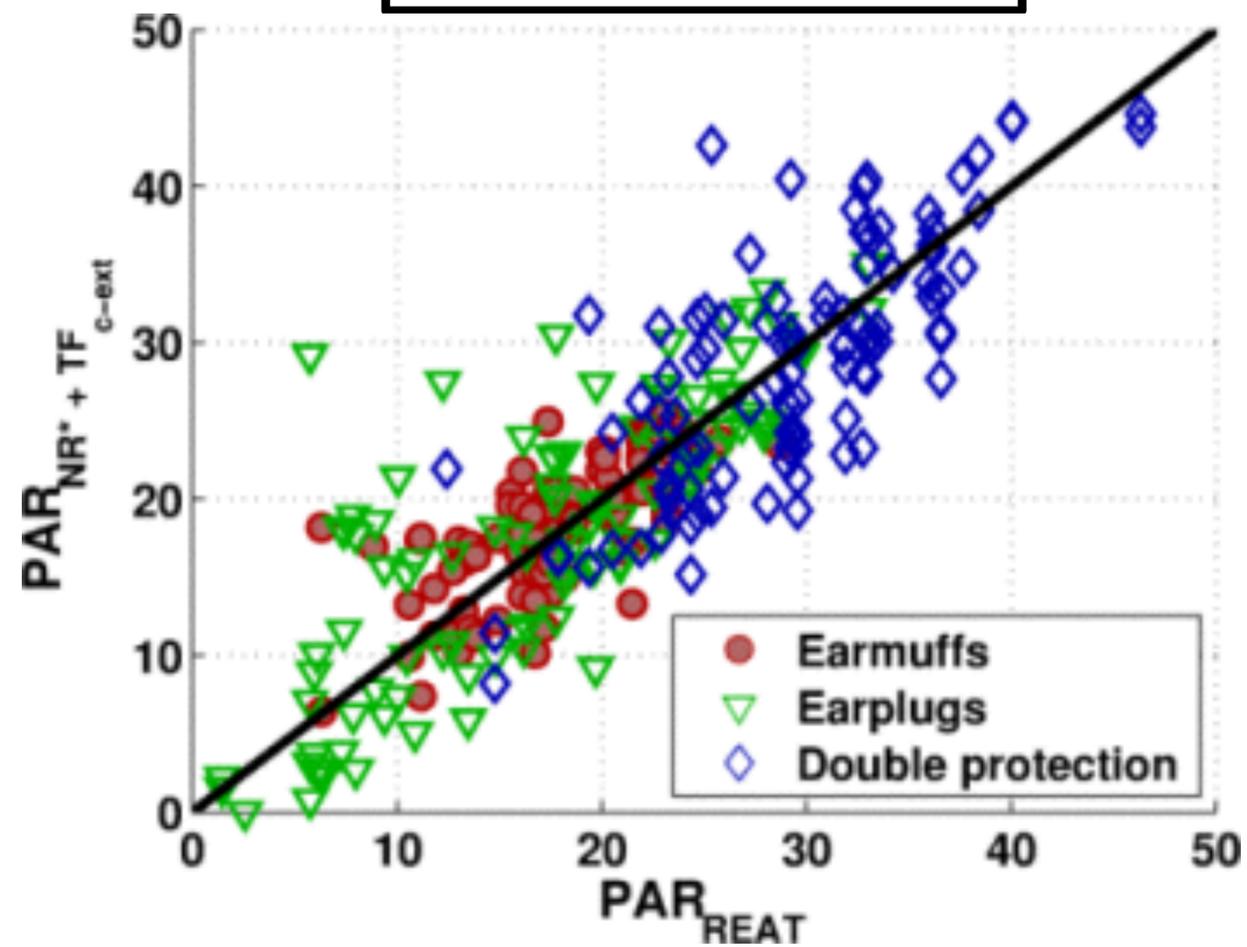
◆ : REAT
 — : MIRE

MIRE : Transformation binaurale (Voix et Laville, 2009)
 + Correction pour conduction osseuse (ANSI S12.42)

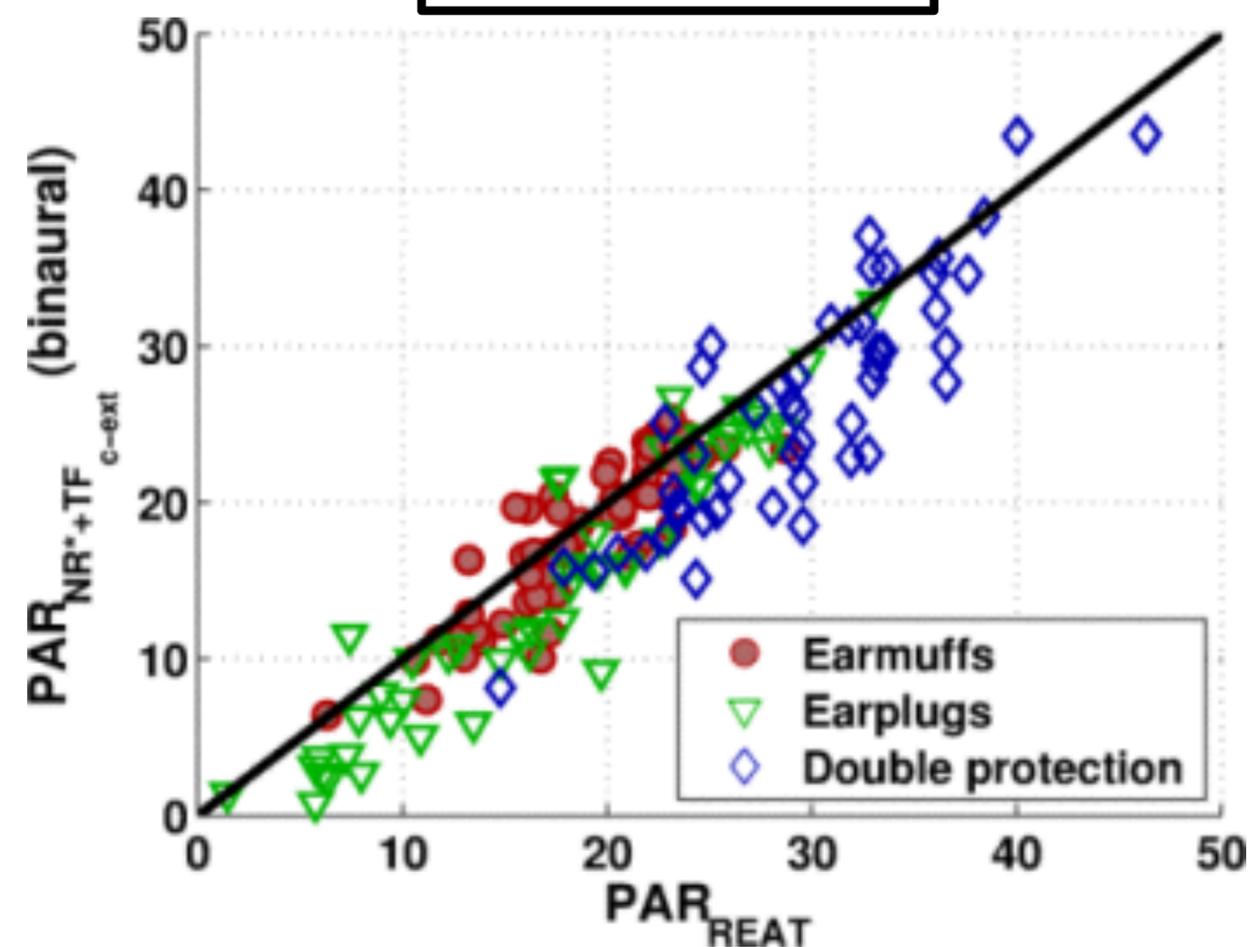
REAT vs MIRE : indice global PAR

PAR_{MIRE} VS PAR_{REAT}

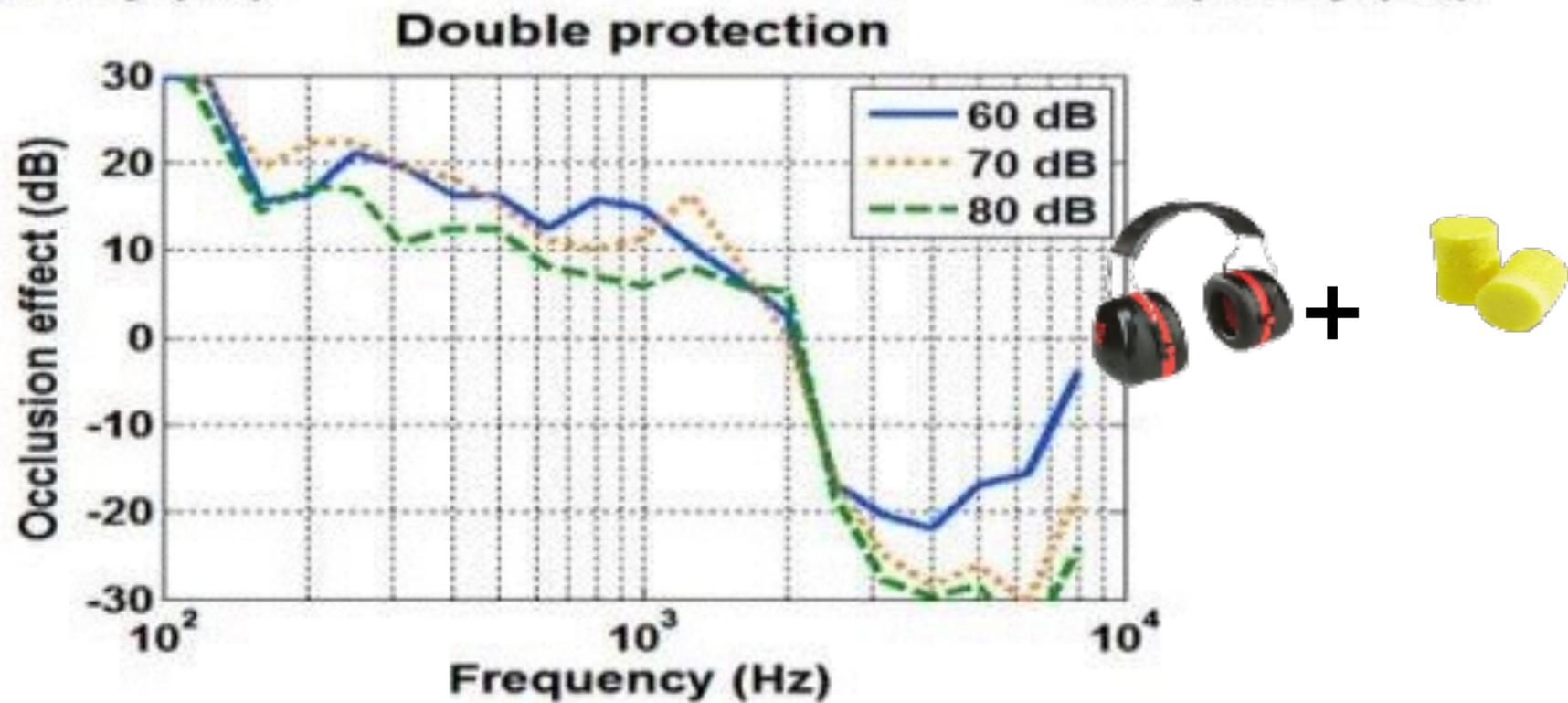
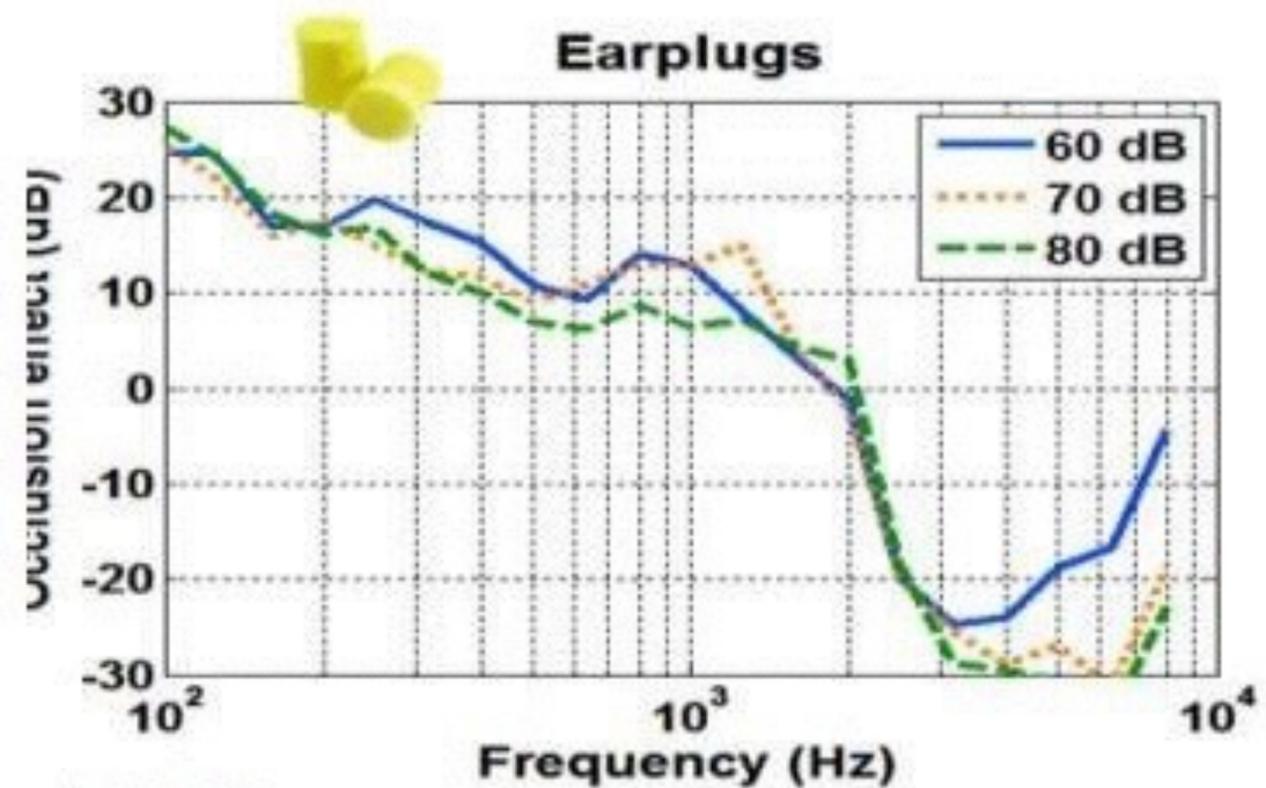
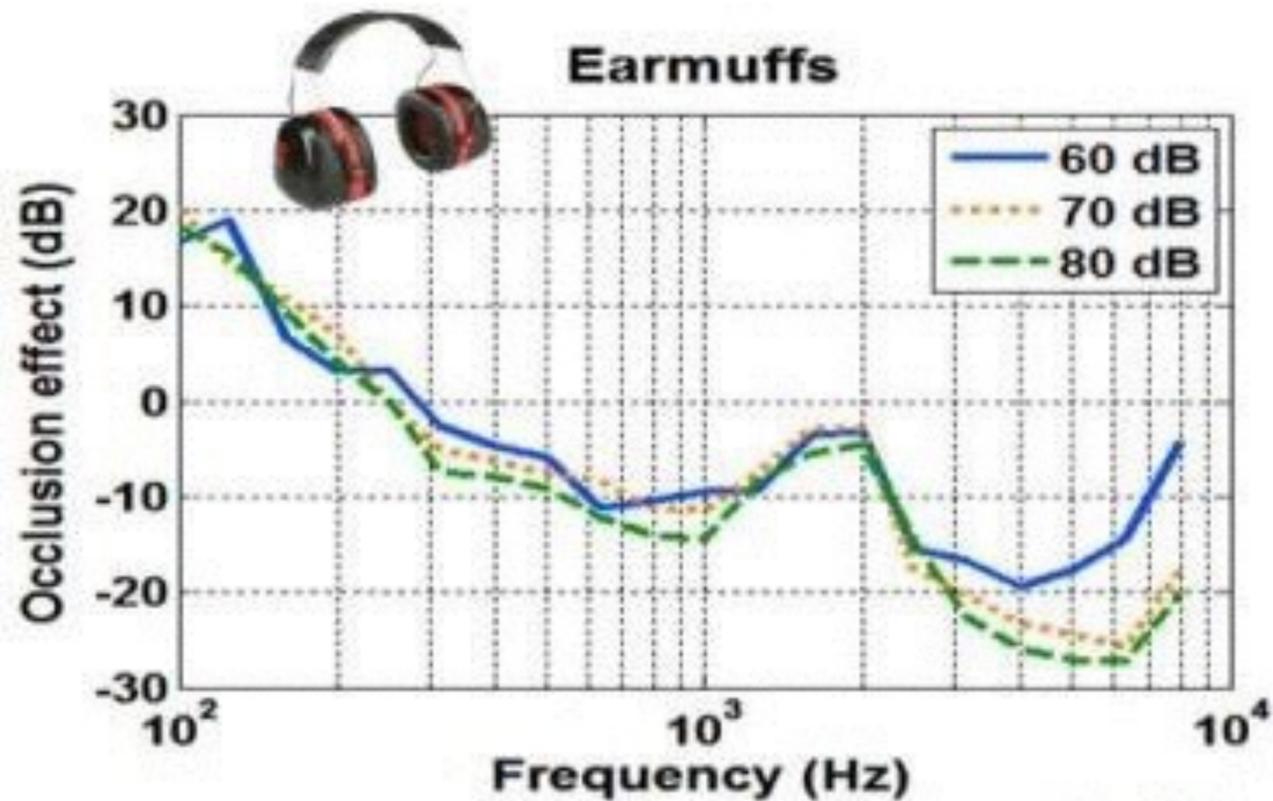
Monoaural



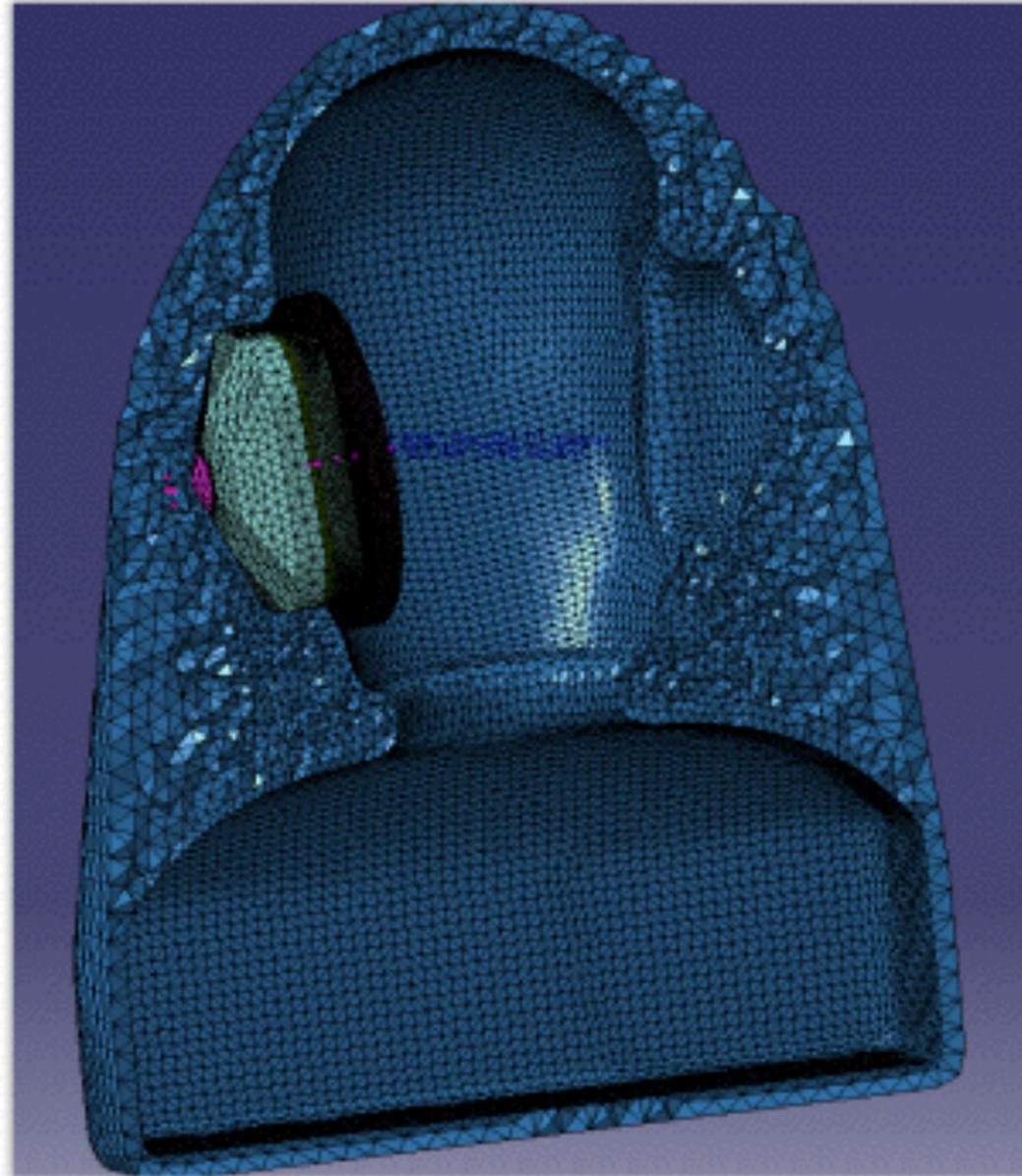
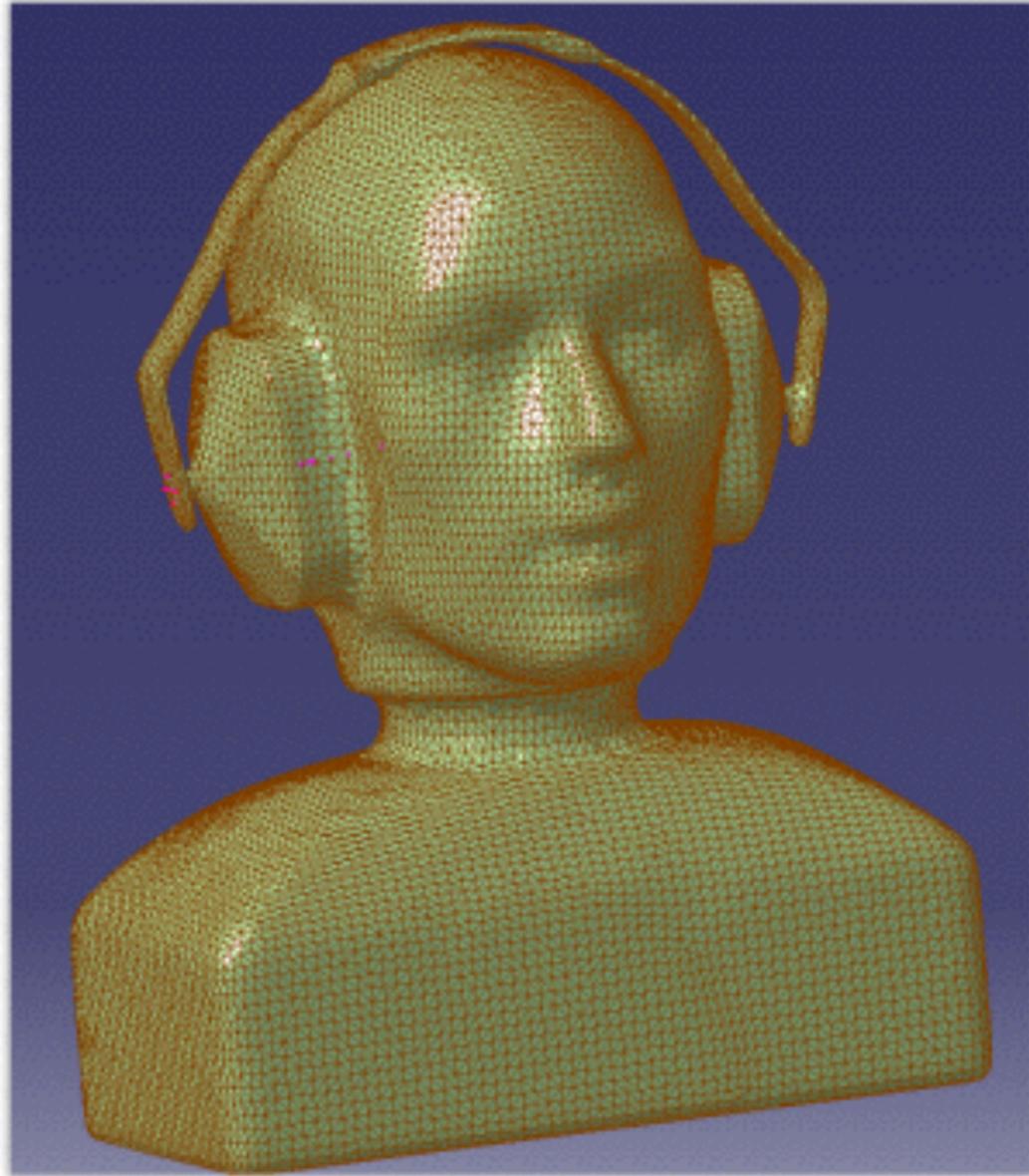
Binaural



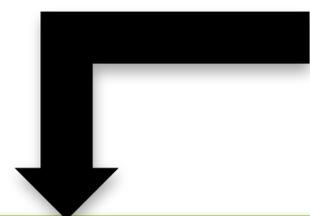
Effet d'occlusion : un exemple



Volet modélisation



Stratégies de modélisation



Excitation acoustique Perte par insertion (IL)



1. Interaction coquille/tête/torse/champ acoustique externe
2. Coquille + chair
3. Canal auditif
4. Couplages



1. Interaction bouchon/tête/torse/champ acoustique externe
2. Bouchon
3. Canal auditif + tissus (géométrie, lois de comportement des biomatériaux, CL)
4. Couplages

Excitation par voie osseuse Effet d'occlusion (OE)



1. Bouchon
2. Canal auditif + tissus (géométrie, lois de comportement des biomatériaux, CL, excitation)
3. Couplages

Modélisation interaction oreille ouverte / champ acoustique externe; protecteur auditif/champ acoustique externe

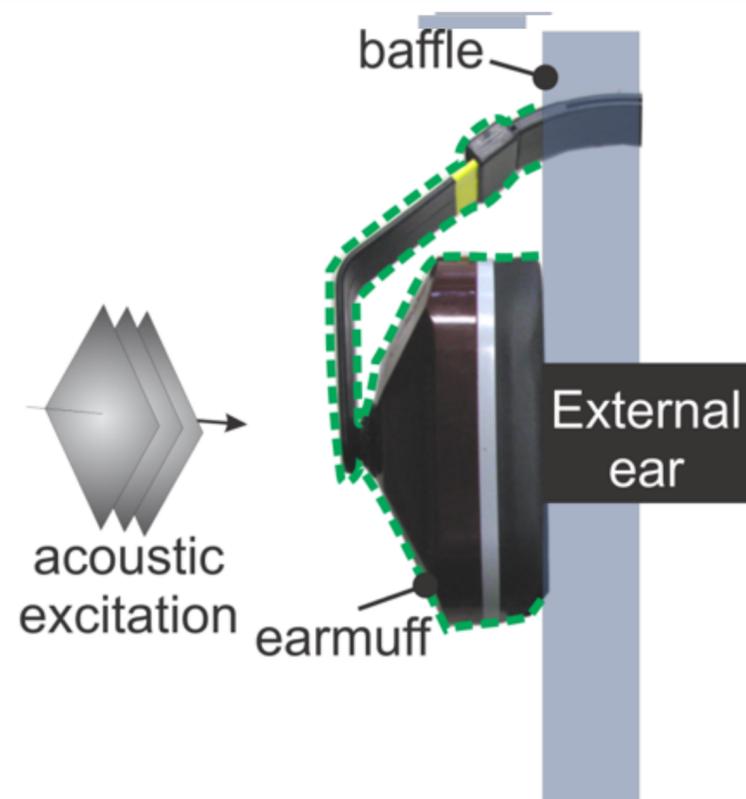


Première simplification

Géométrie complexe de la tête/torse basée sur le CAD de l'ATF

Configurations simplifiées (tête/torse négligés) insérées dans un baffle

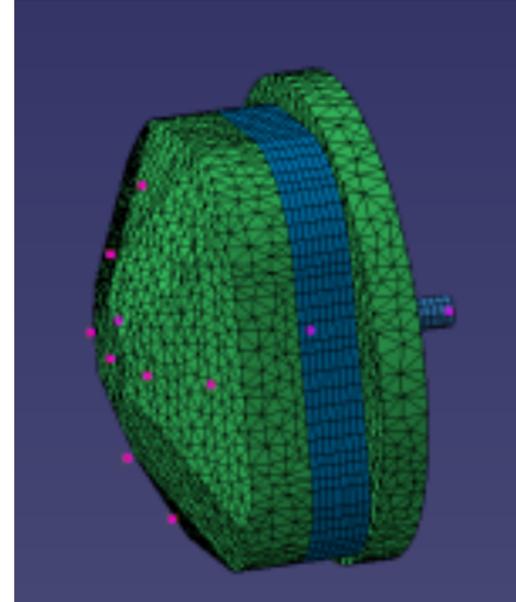
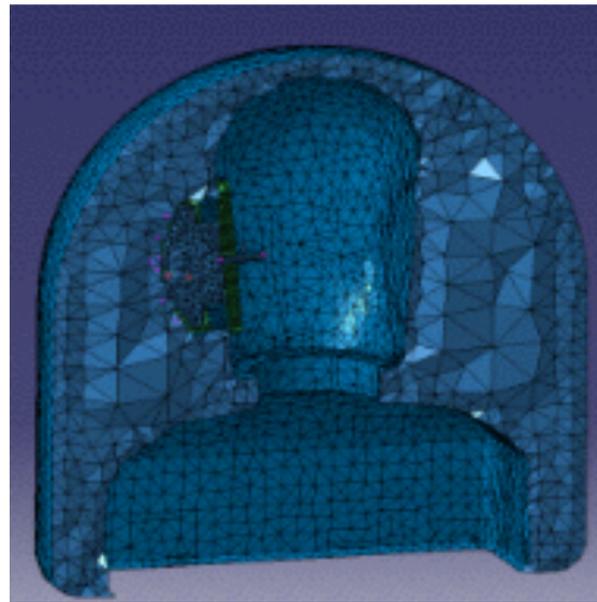
Seconde simplification



- Diminution de la lourdeur des modèles numériques
- Suffisant pour comprendre la physique
- Plus facile à valider expérimentalement
- Dispositif expérimental simplifié à concevoir pour évaluer l'effet d'occlusion

Modélisation interaction oreille ouverte / champ acoustique externe; protecteur auditif/champ acoustique externe

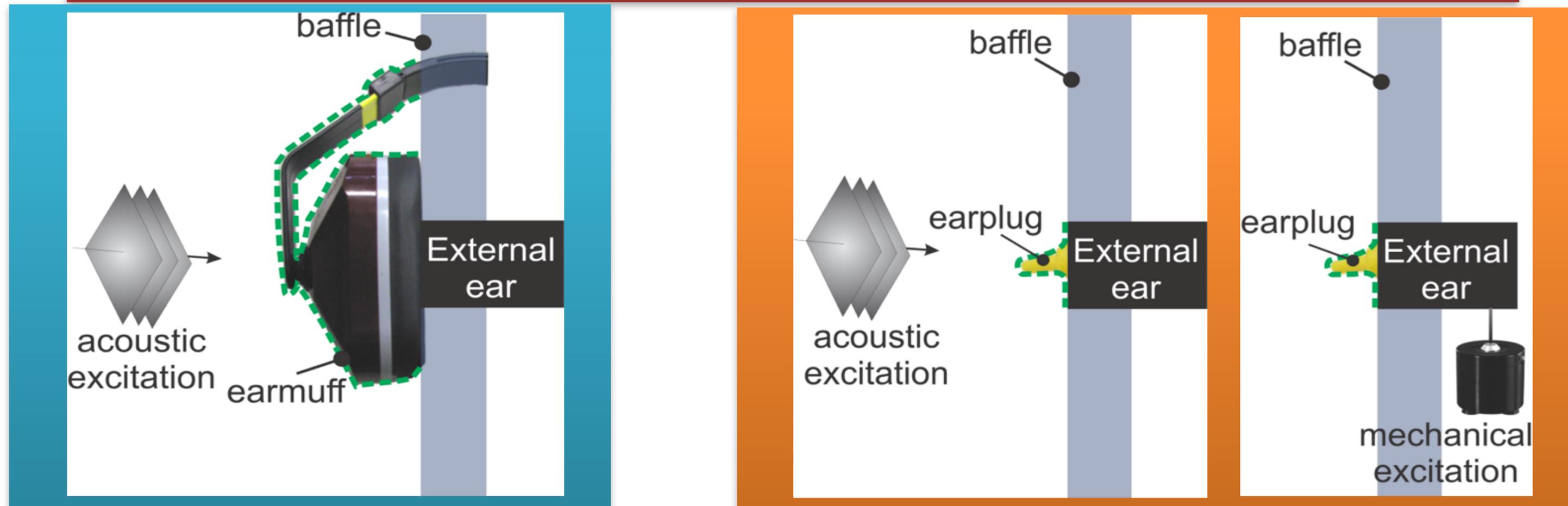
Cas d'une excitation acoustique sur l'ATF (oreille occluse par une coquille)



Problème couplé fluide /
structure résolu à partir
d'une méthode par
éléments finis (LMS Virtual
Lab 13.1 © Siemens)

Modélisation interaction oreille ouverte / champ acoustique externe; protecteur auditif/champ acoustique externe

Cas d'une excitation acoustique ou par voie osseuse dans une configuration simplifiée (oreille occluse)



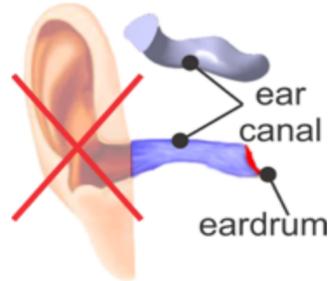
👉 Méthodologie basée sur la méthode des éléments finis – Utilisation de deux logiciels commerciaux ([LMS Virtual Lab 13.1 © Siemens](#) ou [COMSOL Multiphysics © COMSOL](#)) selon la configuration étudiée

Modélisation du canal auditif et des tissus biologiques environnants

Excitation acoustique



2D axisymétrique – pas de tissus autour du canal

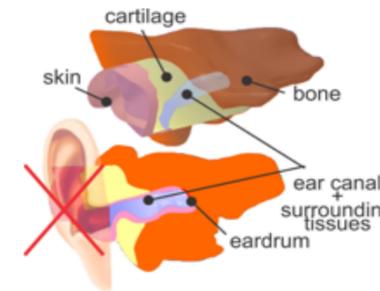


Forme 3D complexe – pas de tissus autour du canal



2D axisymétrique – peau autour du canal

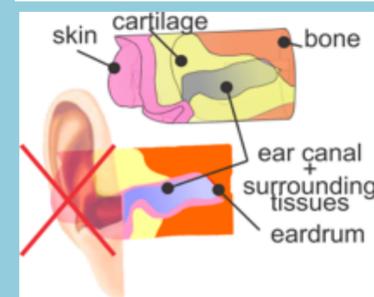
Excitation par voie osseuse



Forme 3D complexe – modèle 3D complet pour l'os temporal – autres tissus autour du canal avec frontière externe cylindrique



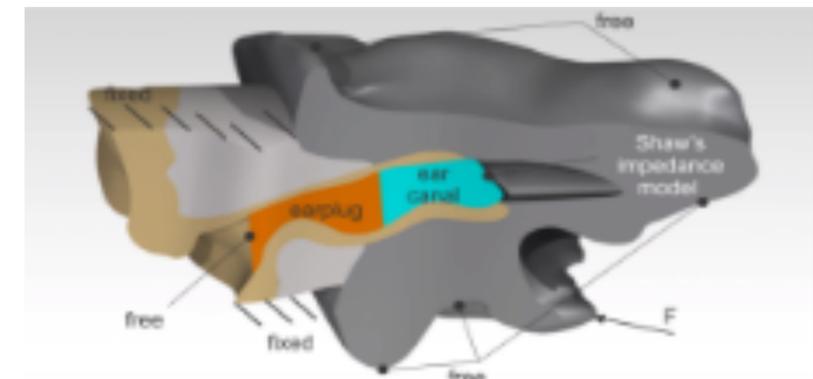
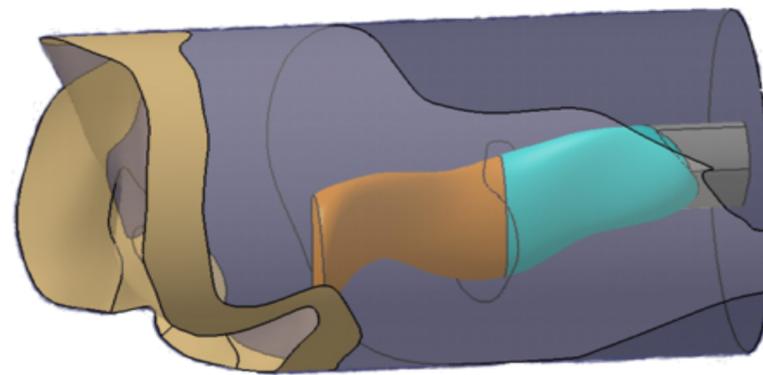
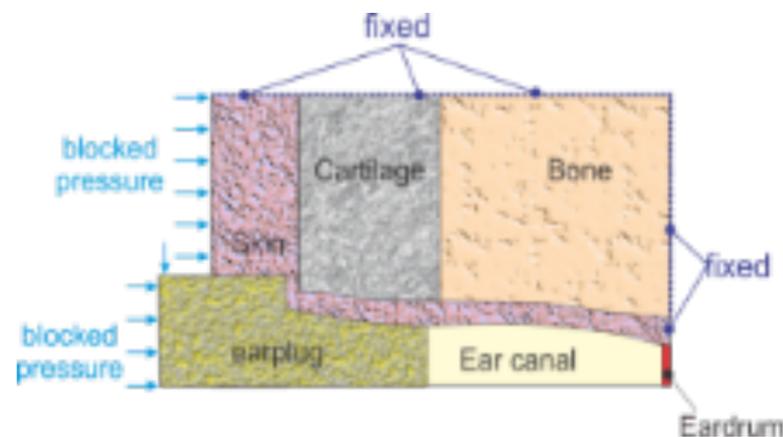
2D axisymétrique – tissus autour du canal



Forme 3D complexe – tissus autour du canal avec frontière externe cylindrique

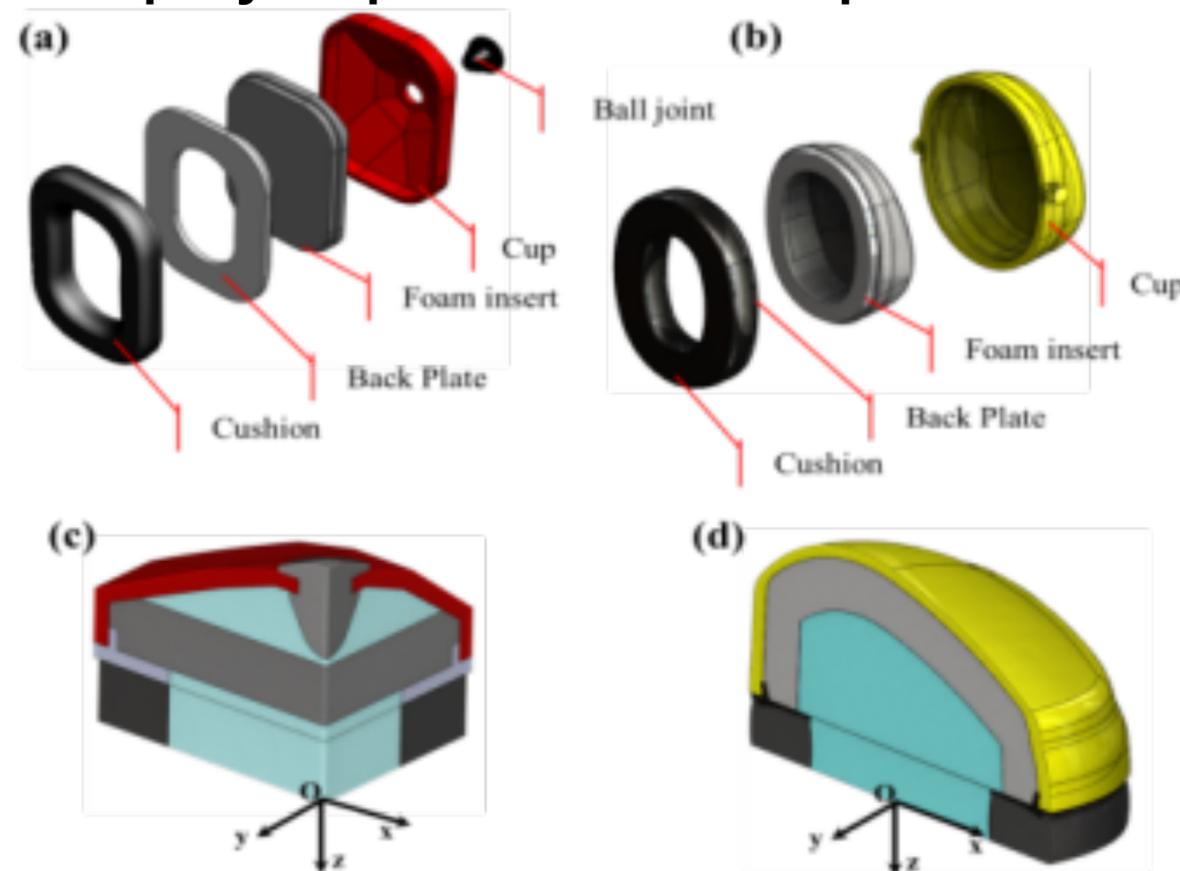
Modélisation des bouchons

- ☞ Lois du comportement des matériaux (caractérisé en laboratoire (bouchon silicone) ou tirées de la littérature (bouchon mousse))
- ☞ Canal auditif ne se déforme pas
- ☞ Plusieurs conditions de couplage entre les parois du conduit auditif et le bouchon étudiées
- ☞ Analyses de sensibilité du modèle à la géométrie et propriétés des matériaux pour identifier les paramètres importants qui doivent être connus avec précision



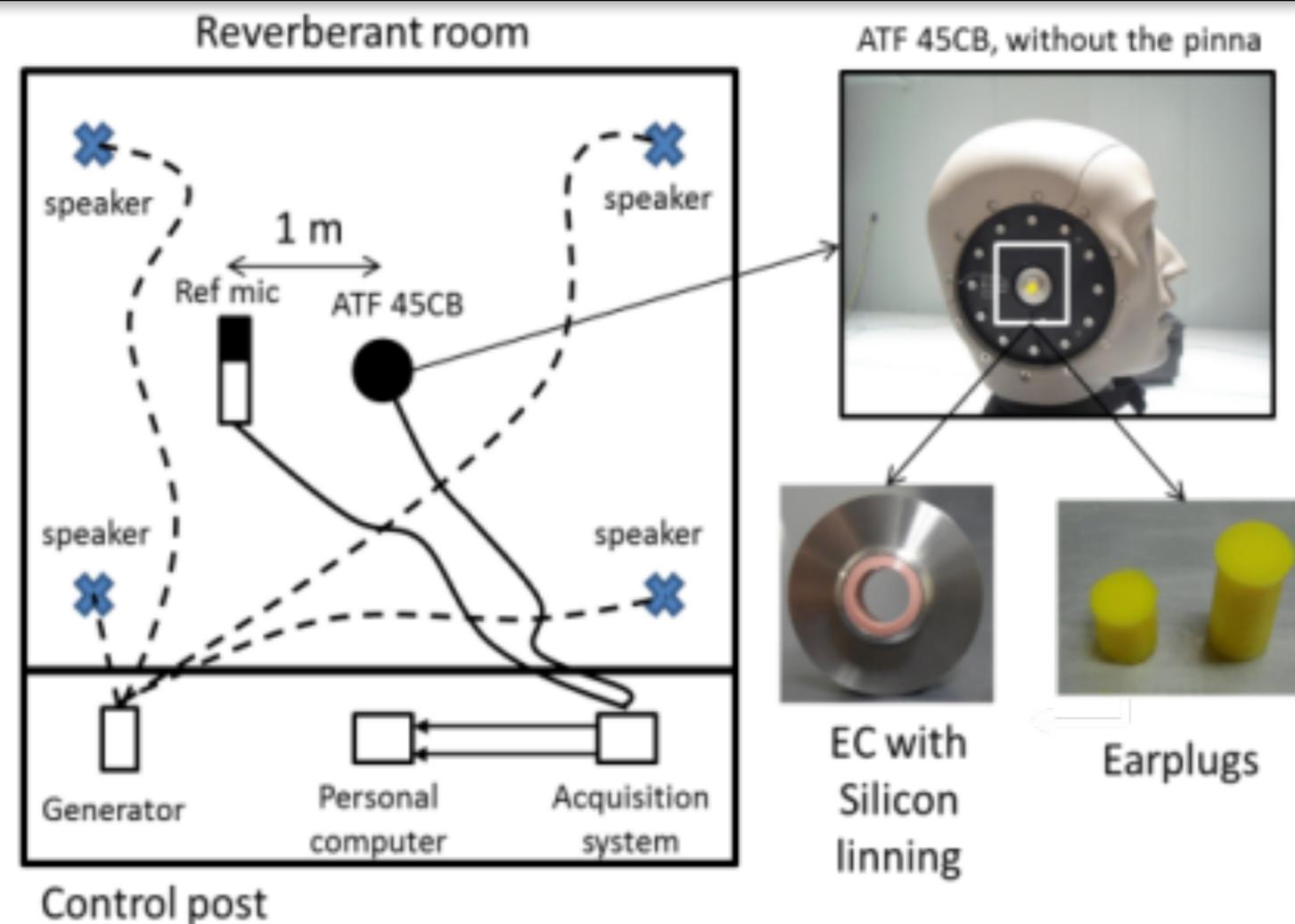
Modélisation des coquilles

- ☞ Modèles numériques de deux coquilles commerciales
- ☞ Performance acoustique des coquilles dépend fortement du joint entre la coquille et la tête (coussin)
- ☞ Plusieurs modèles de coussin étudiés (ressort, solide viscoélastique équivalent)
- ☞ Procédures de caractérisation hybrides expérimentalo-numériques développées pour identifier les propriétés physiques mécaniques du coussin



Résultats

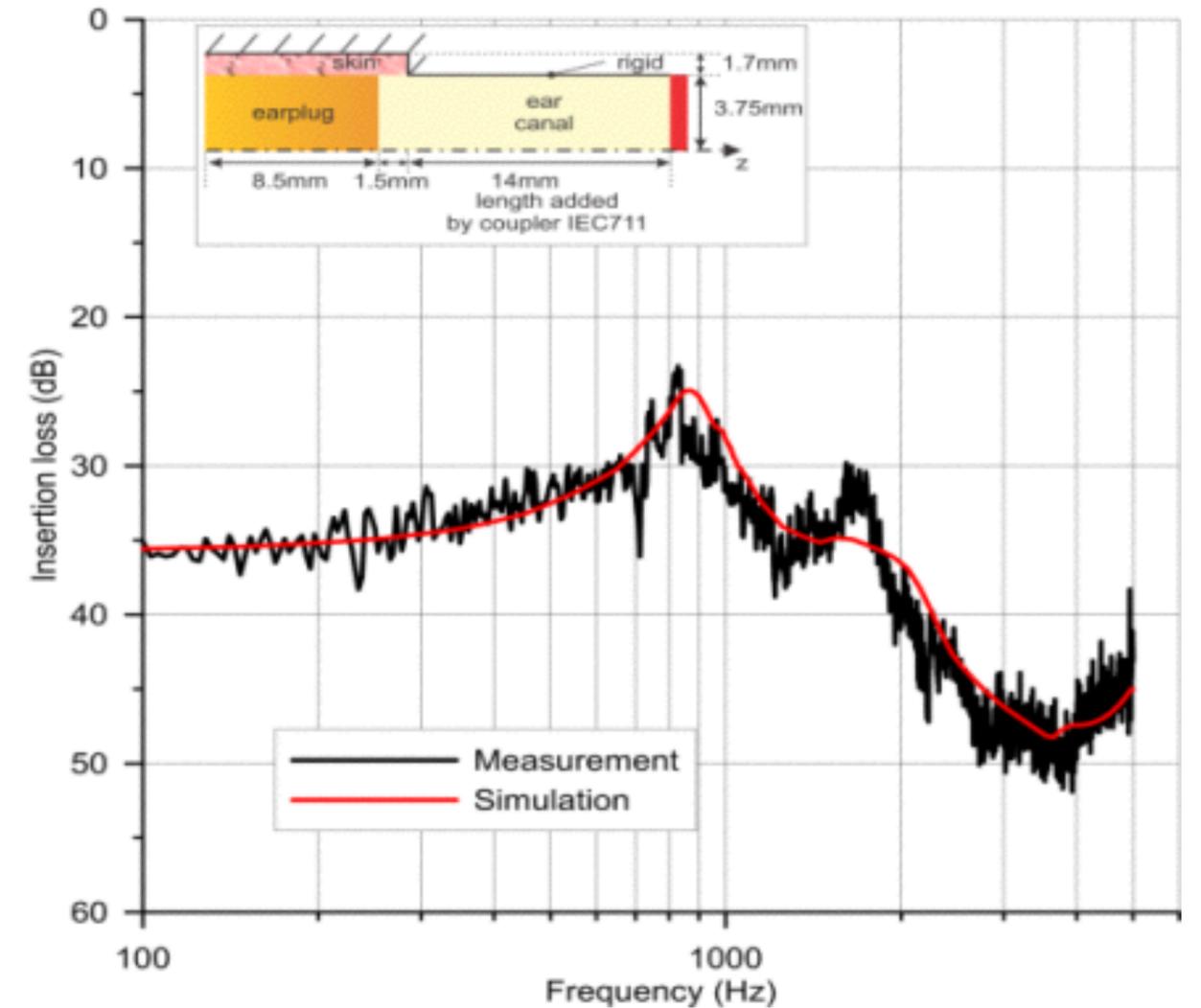
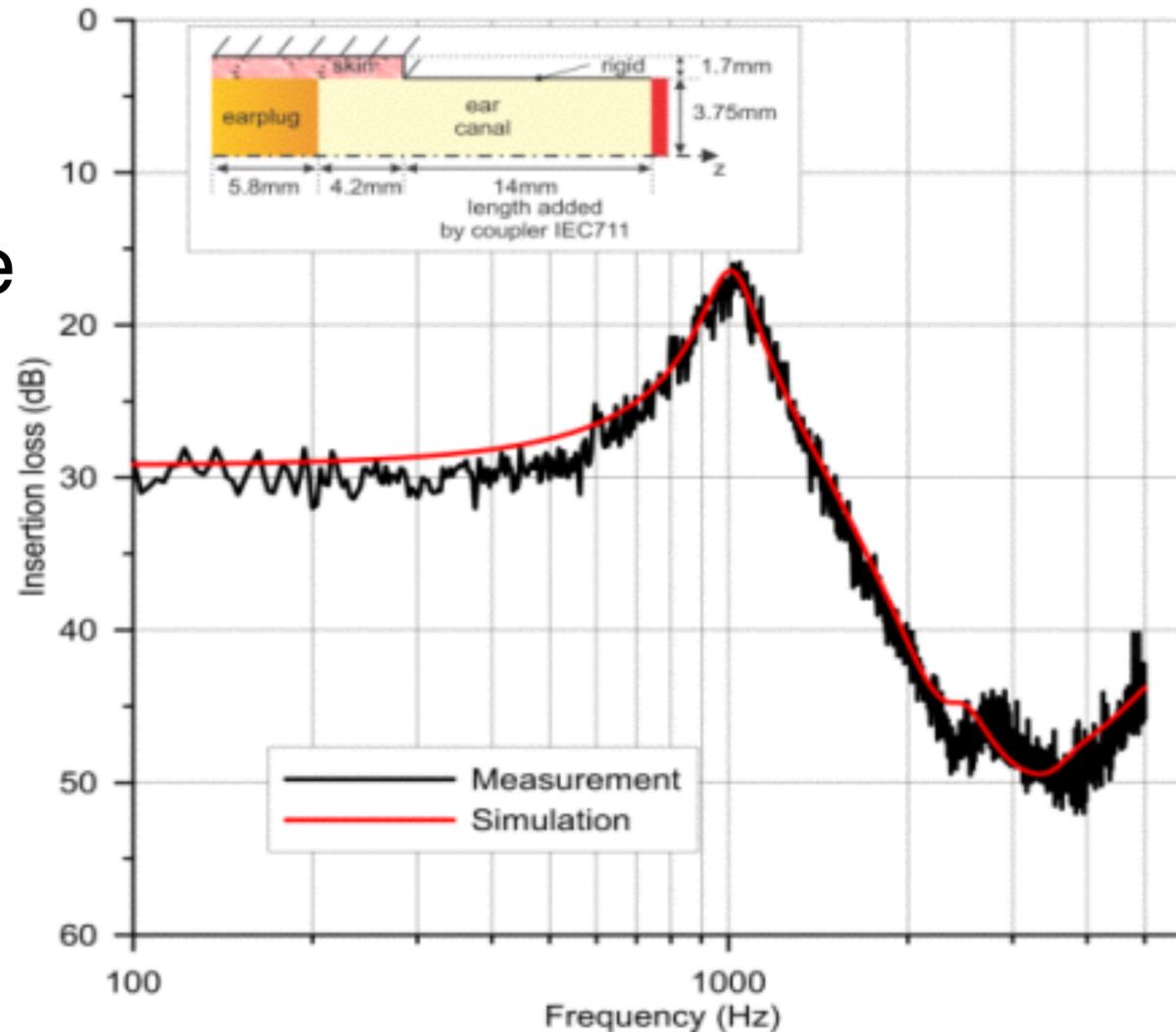
IL d'un bouchon en silicone – comparaisons avec des mesures sur tête artificielle



Résultats

IL d'un bouchon en silicone – comparaisons avec des mesures sur tête artificielle

Bouchon silicone
 $E=1.2\text{MPa}$
 $\eta=0.12$
 $\rho=1150\text{kg/m}^3$
 $\nu=0.48$



Résultats

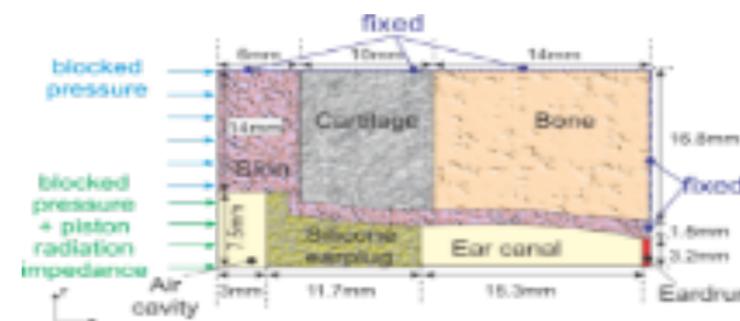
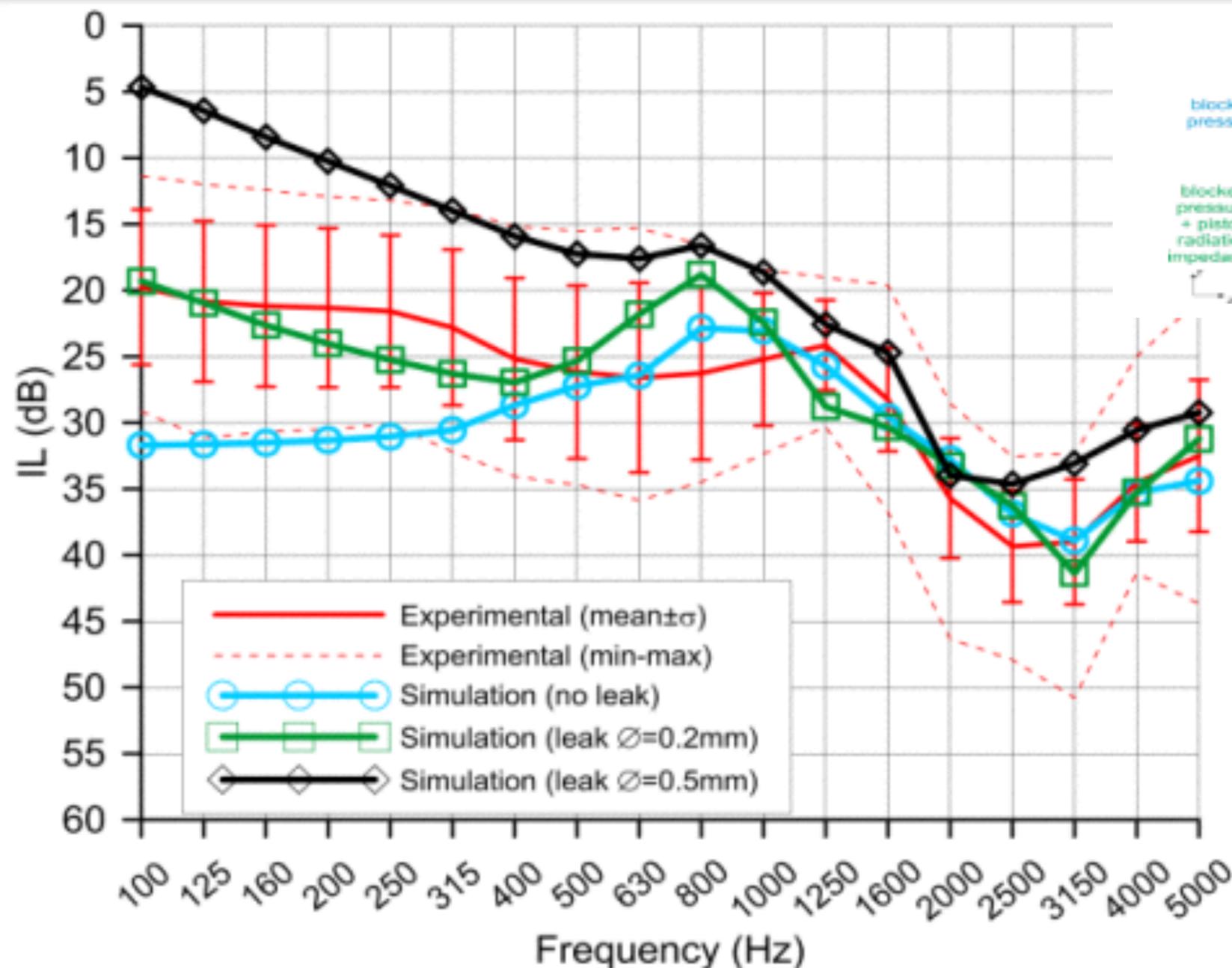
IL de bouchons – comparaison avec des mesures sur sujets humains



Résultats

IL de bouchons – comparaison avec des mesures sur sujets humains

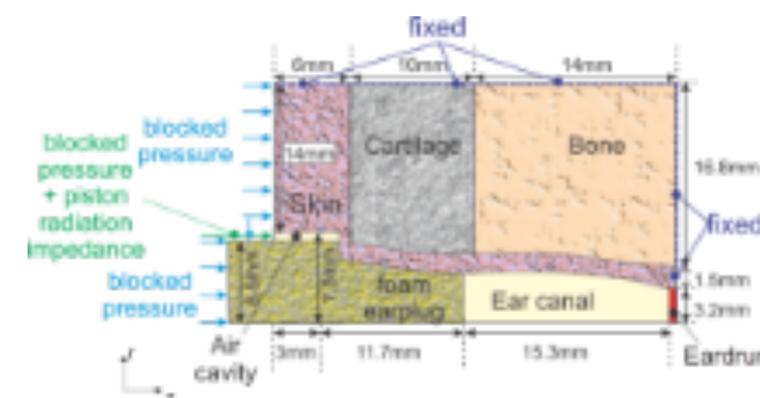
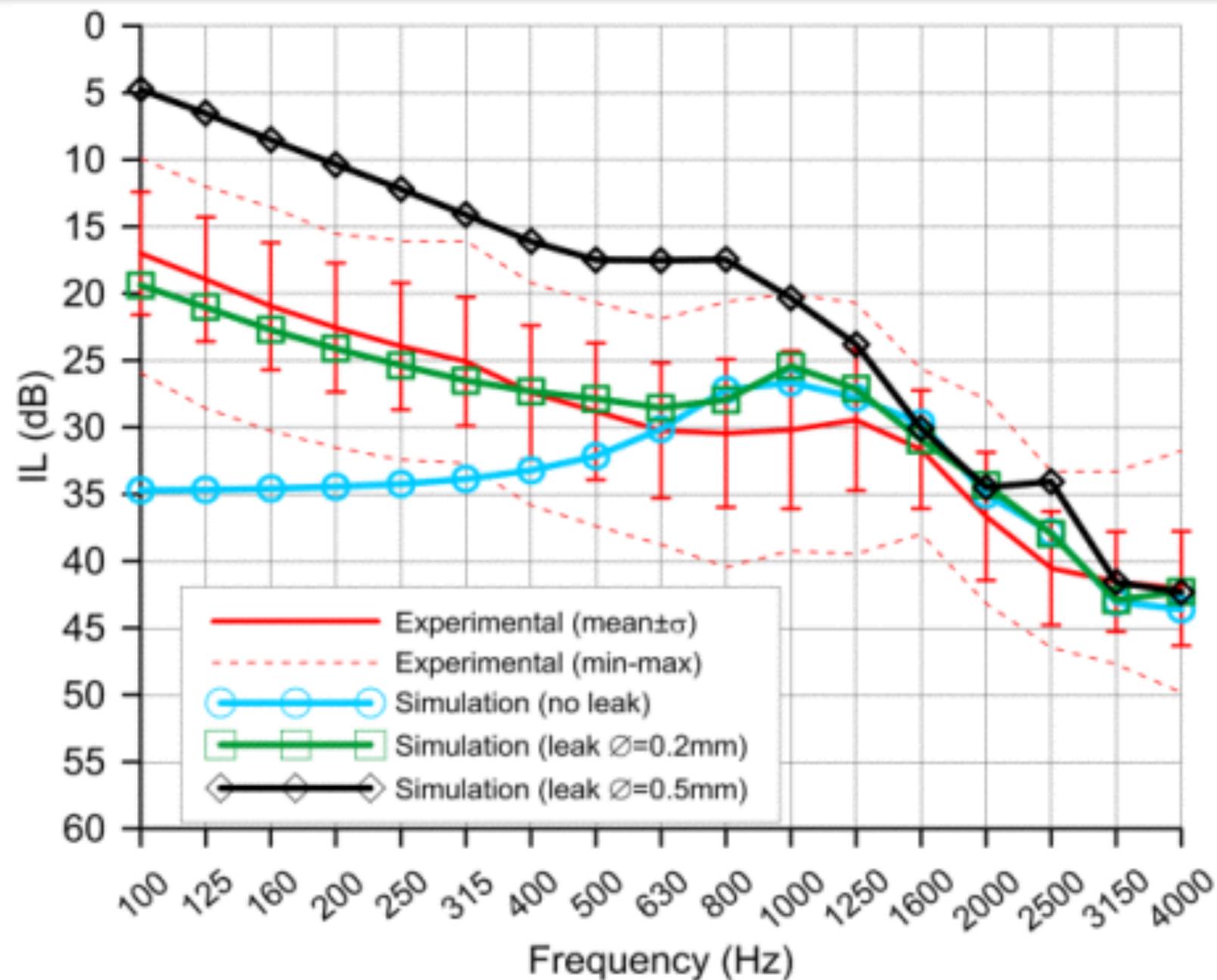
Bouchon silicone
 $E=1.2\text{MPa}$
 $\eta=0.12$
 $\rho=1150\text{kg/m}^3$
 $\nu=0.48$



Résultats

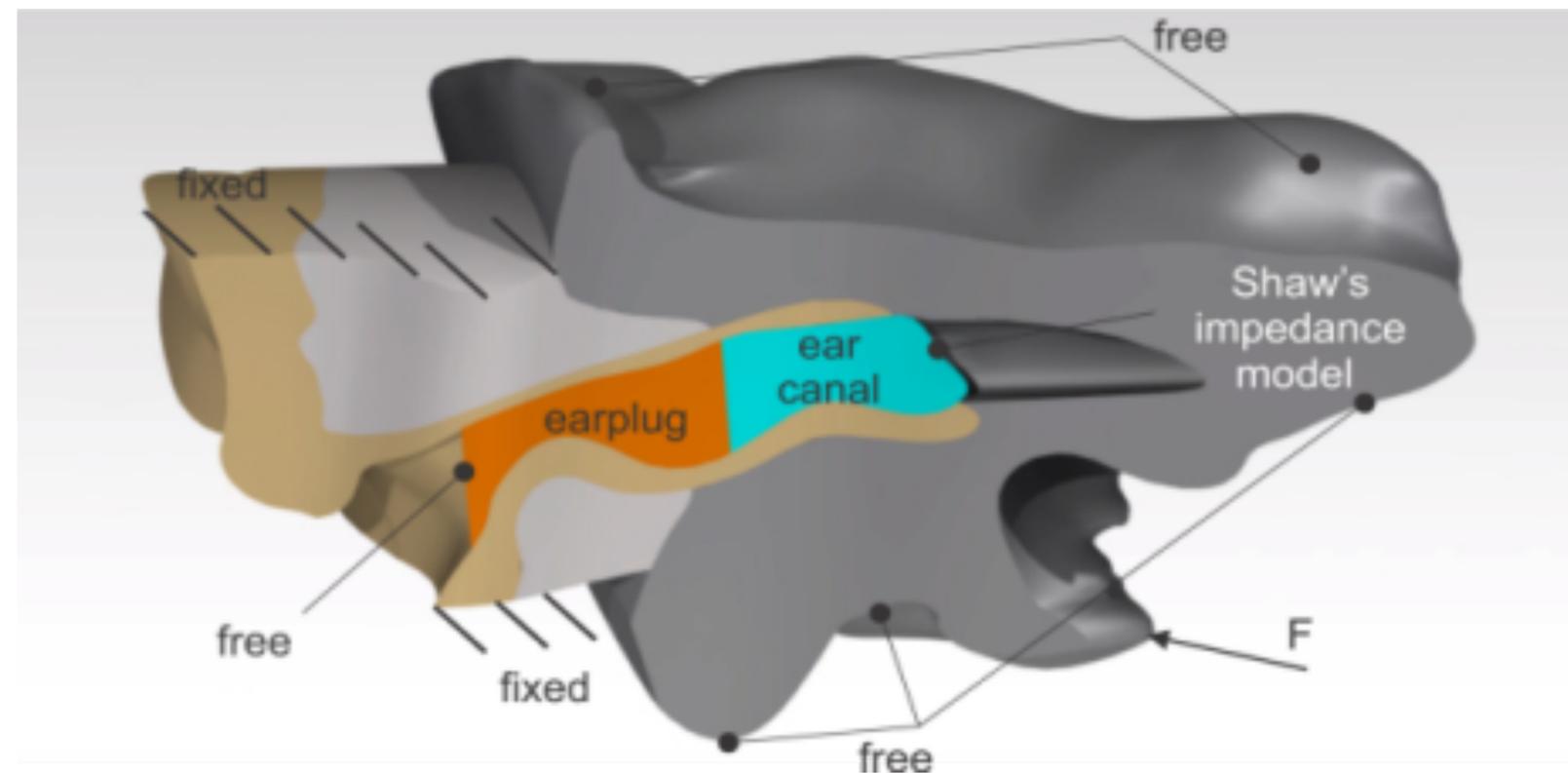
IL de bouchons – comparaison avec des mesures sur sujets humains

Bouchon mousse
 $E=0,1\text{MPa}$
 $\eta=0.5$
 $\rho=220\text{kg/m}^3$
 $\nu=0.1$



Résultats

Effet d'occlusion de bouchons – comparaisons avec des mesures sur sujets humains



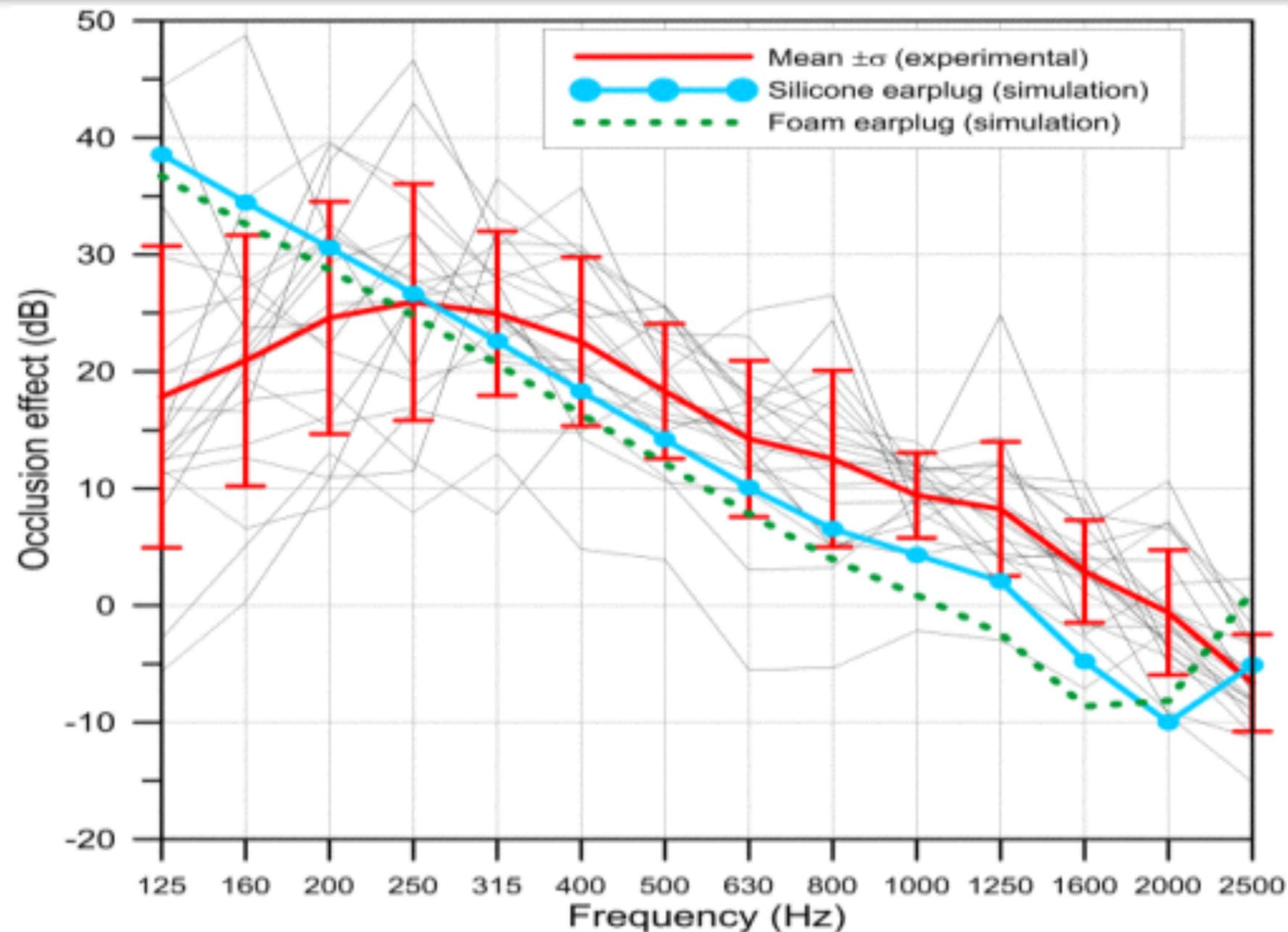
$$OE = Lp_{occ} - Lp_{open} \quad [dB]$$

Résultats

Effet d'occlusion de bouchons – comparaisons avec des mesures sur sujets humains

Profondeur
insertion
15mm

Données
expérimentales
Stenfelt and
Reinfeldt (2007)



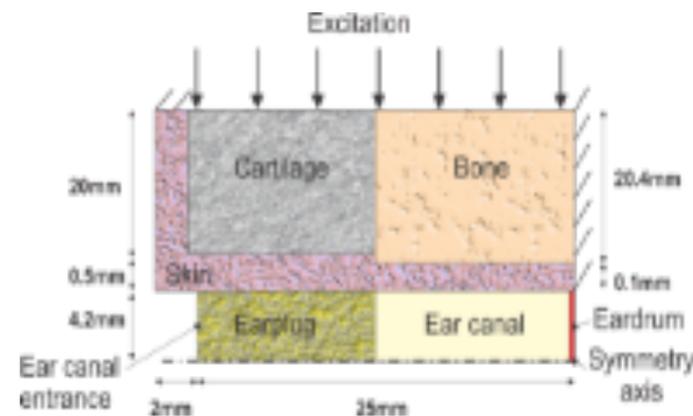
Résultats

Effet d'occlusion de bouchons – comparaisons avec des mesures sur sujets humains

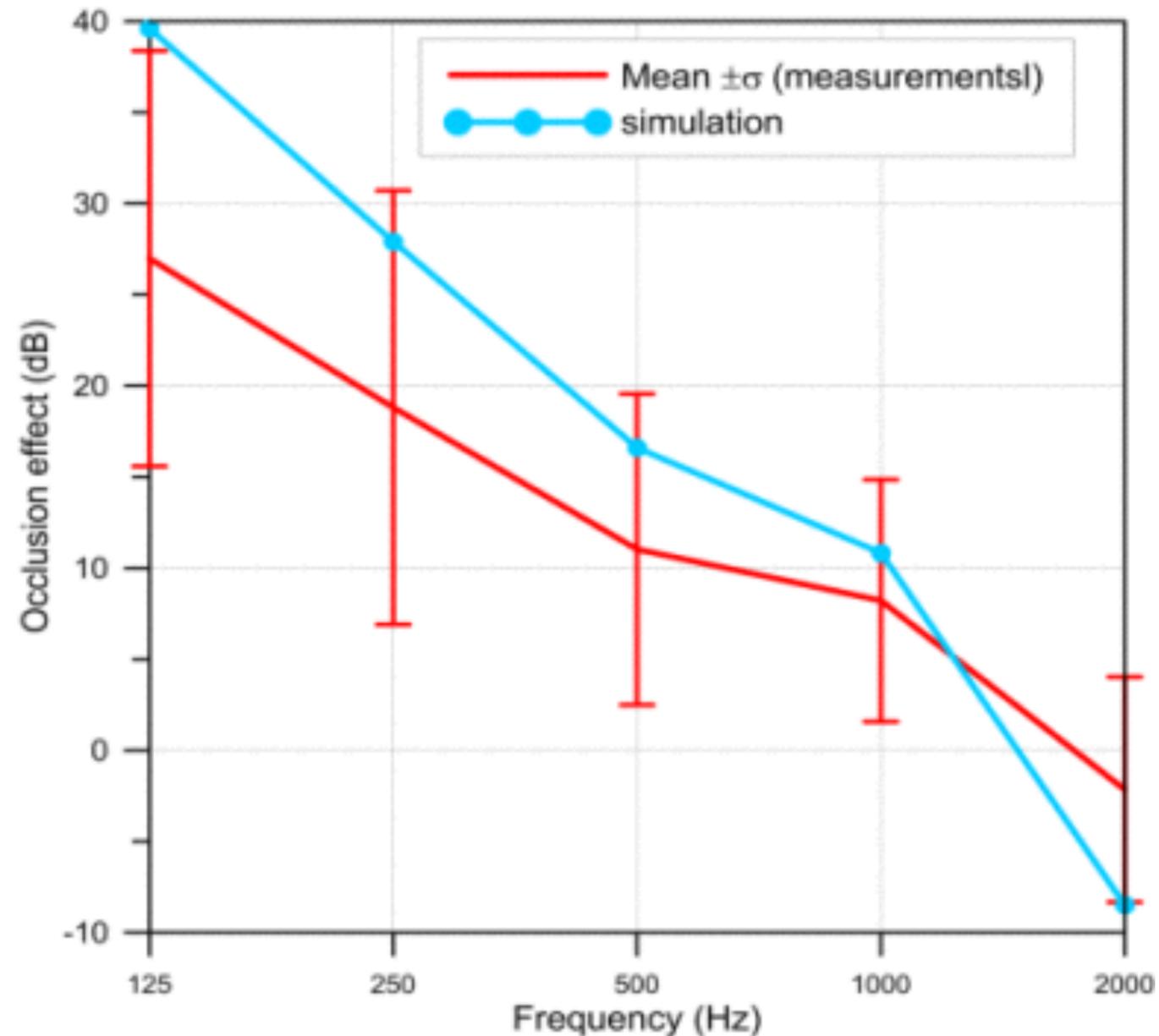


Résultats

Effet d'occlusion de bouchons – comparaisons avec des mesures sur sujets humains

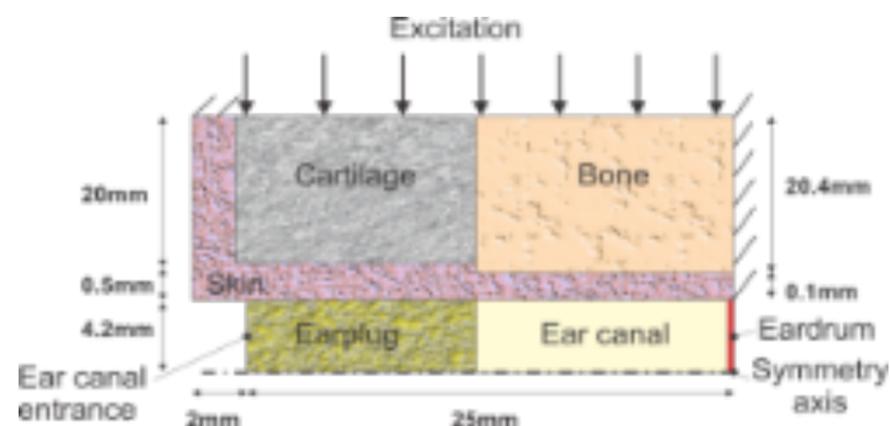


Bouchon
mousse
11.1mm

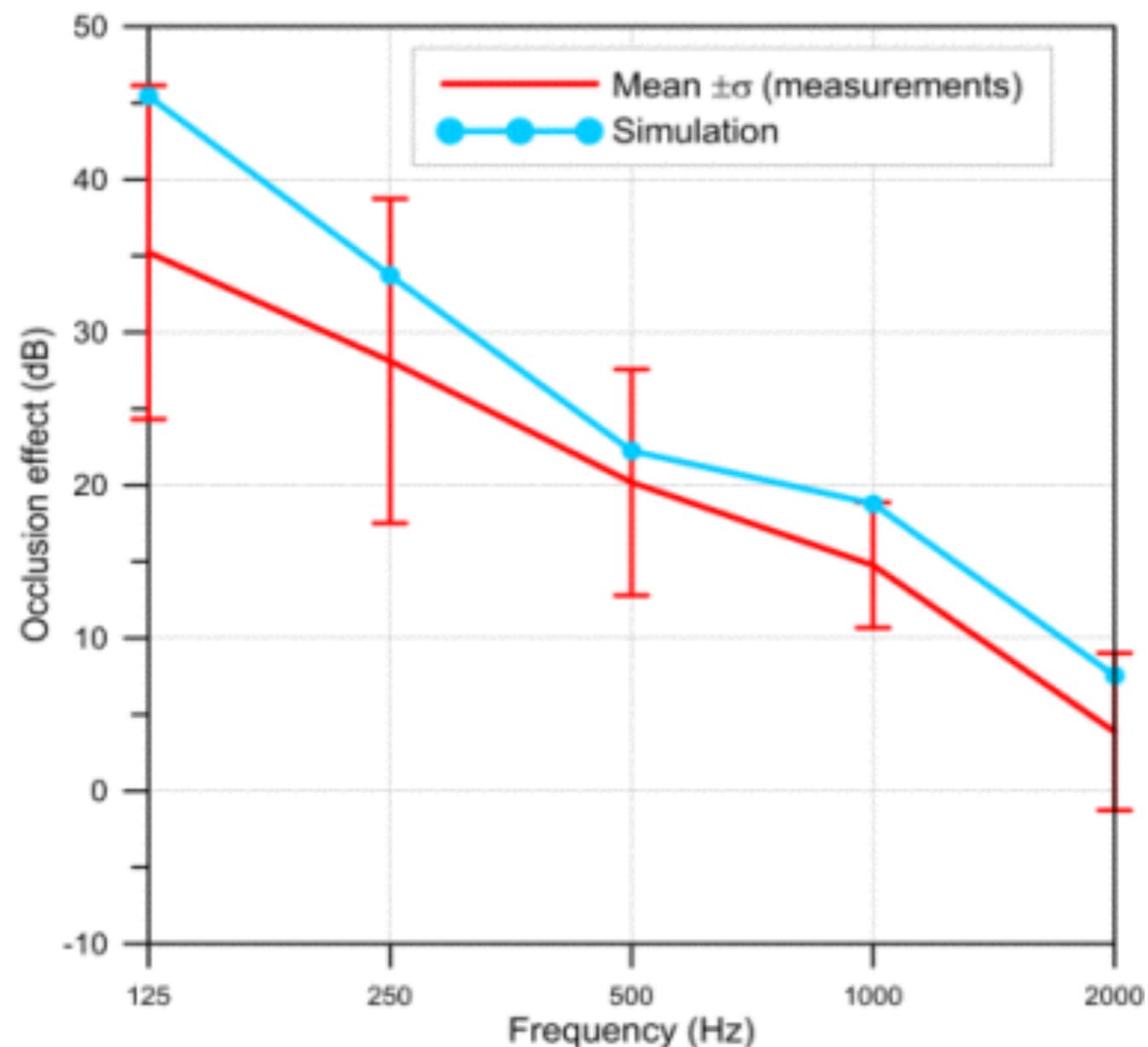


Résultats

Effet d'occlusion de bouchons – comparaisons avec des mesures sur sujets humains



Bouchon
en silicone
11.7mm



Limites de l'étude

Volet expérimental

- Protecteurs passifs
- Champ diffus
- Pas de mesure au tympan
- Pas de mesure au seuil pour l'effet d'occlusion

Volet modélisation

- Nombre restreint de protecteurs passifs étudiés
- Bruits stationnaires
- Réalisme des modèles numériques pour prédire l'atténuation et l'effet d'occlusion à améliorer
- Validation des modèles numériques dans des cas simplifiés
- Confort global du protecteur non étudié

Conclusions

Volet expérimental

- Méthode MIRE
 - Comparable à REAT, même individuellement
 - Bien adapté pour mesures terrain
 - Liens avec REAT mis en évidence
- Effet d'occlusion
 - Développement d'un test facile à mettre en œuvre

Volet modélisation

- Modèles numériques pour coquilles et bouchons
 - Prédiction de l'atténuation et de l'effet d'occlusion
 - Inclusion de la peau, cartilage et os
 - Inclusion de la diffraction par la tête
 - Chemins aériens et solidiens

Retombées

- 9 articles dans des journaux scientifiques (+ deux en préparation)
- 19 conférences (avec ou sans *proceedings*)
- 1 rapport IRSST
- Formation de 4 Ph. D. à l'ÉTS (S. Boyer, G. Viallet, M. Brummund, M.-A. Gaudreau)
- Implication d'un nouveau professeur (Olivier Doutres, ÉTS)
- Intérêt de manufacturiers pour la conception de protecteurs
- Retombées terrain dans les projets qui suivent

Suites

- Dosimétrie intra-auriculaire (Projet de recherche 2013-0017 en cours)
- Développement d'une oreille artificielle (Post-Doctorat, activité 2016-0020)
- Confort des bouchons (Projet de recherche 2015-0014)
- Nouvelles collaborations (INRS, Marseille, ÉTS, Sheffield)
- Aides auditives (Projet à venir : IRSST, ÉTS, U. Ottawa, U. de Montréal)