

# Sonification binaurale pour l'aide à la navigation

**Gaëtan Parseihian**

LIMSI-CNRS, UPMC Sorbonne Universités

Direction: **Brian FG Katz**, *Chargé de Recherche au LIMSI-CNRS*

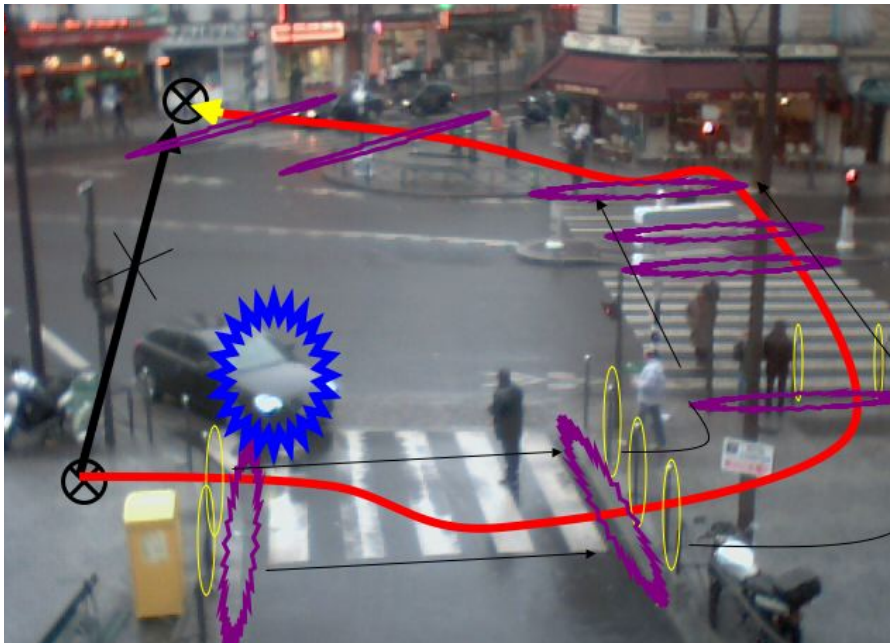
Co-direction: **Christophe d'Alessandro**, *Directeur de Recherche au LIMSI-CNRS*

# Contexte général

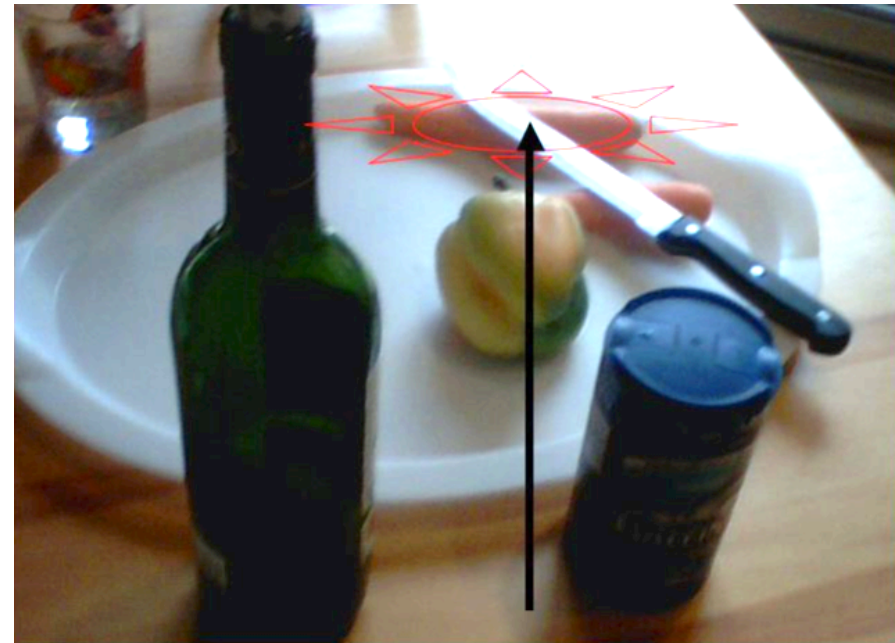


Projet ANR-**NAVIG** (Navigation Assistée par **VI**sion embarquée et **G**éolocalisation)

Navigation en champ lointain



Guidage en champ proche

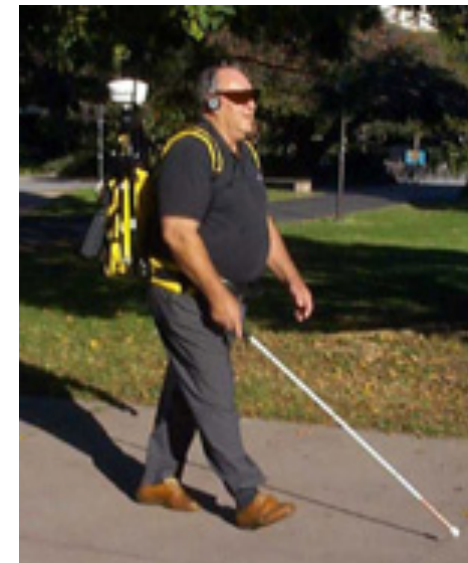


Enjeu : Augmenter la réalité avec des informations auditives permettant de guider un utilisateur

# Sonification, Son 3D et guidage



- Sonification
  - Présentation de données via la modalité sonore
- Son 3D
  - Procédé de reproduction des dimensions spatiales du son
- Utilisation pour le guidage
  - Guidage avec son 3D plus efficace que le guidage verbal [Loomis, 05]
  - L'utilisation d'information sonore diminue la charge cognitive [Klatzky, 06]



PGS [Loomis, 05]

# Sonification, Son 3D et guidage

---



- Le son 3D et la sonification permettent de guider un utilisateur
- Mais ...
  - Le son 3D binaural doit être individuel
  - Le son 3D binaural contient un modèle de la distance peu réaliste
  - La sonification est jugée trop désagréable par les utilisateurs pour une utilisation quotidienne

**Problématique : Comment peut-on améliorer le son 3D et la sonification pour guider les non-voyants ?**



- Partie 1 : Amélioration du rendu binaural non-individuel
- Partie 2 : Amélioration des indices de perception de la distance par l'utilisation de la sonification
- Partie 3 : Les *morphocons* : une sonification personnalisable basée sur des *earcons* morphologiques
- Conclusion
- Perspectives



---

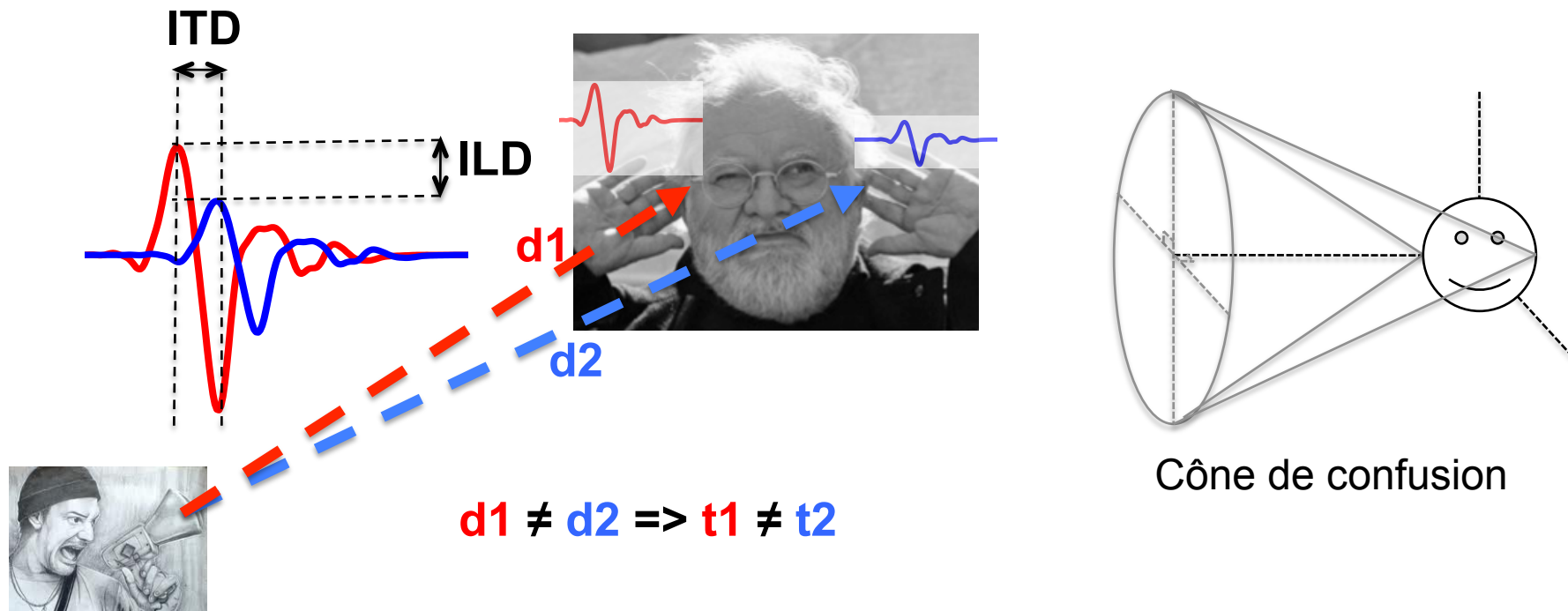
## Partie 1 : Amélioration du rendu binaural avec des HRTF non-individuelles

# Contexte : perception sonore 3D



## ■ La perception auditive spatiale

- Indices interauraux : ITD (Interaural Time Difference), ILD (Interaural Level Difference)
  - ✓ Azimut
- Indices spectraux : HRTF (Head Related Transfer Function)



# Contexte : perception sonore 3D



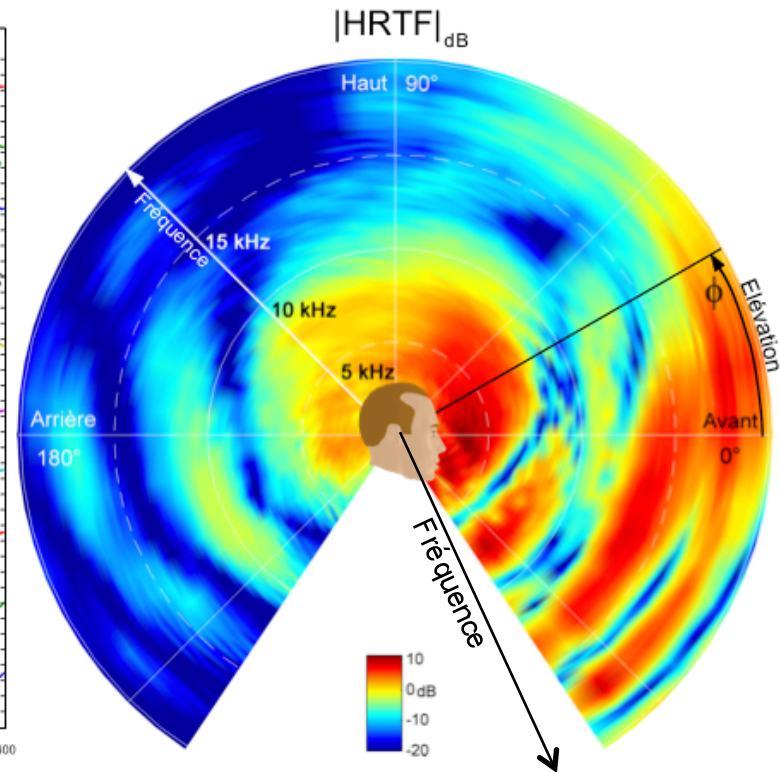
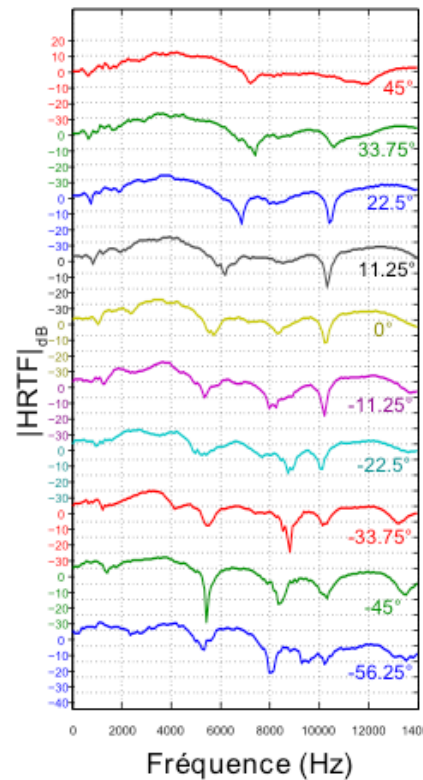
- La perception auditive spatiale

- Indices interauraux : ITD, ILD

- Indices spectraux : HRTF (Head Related Transfer Function) ou HRIR

- ✓ Élévation

- ✓ Avant/Arrière



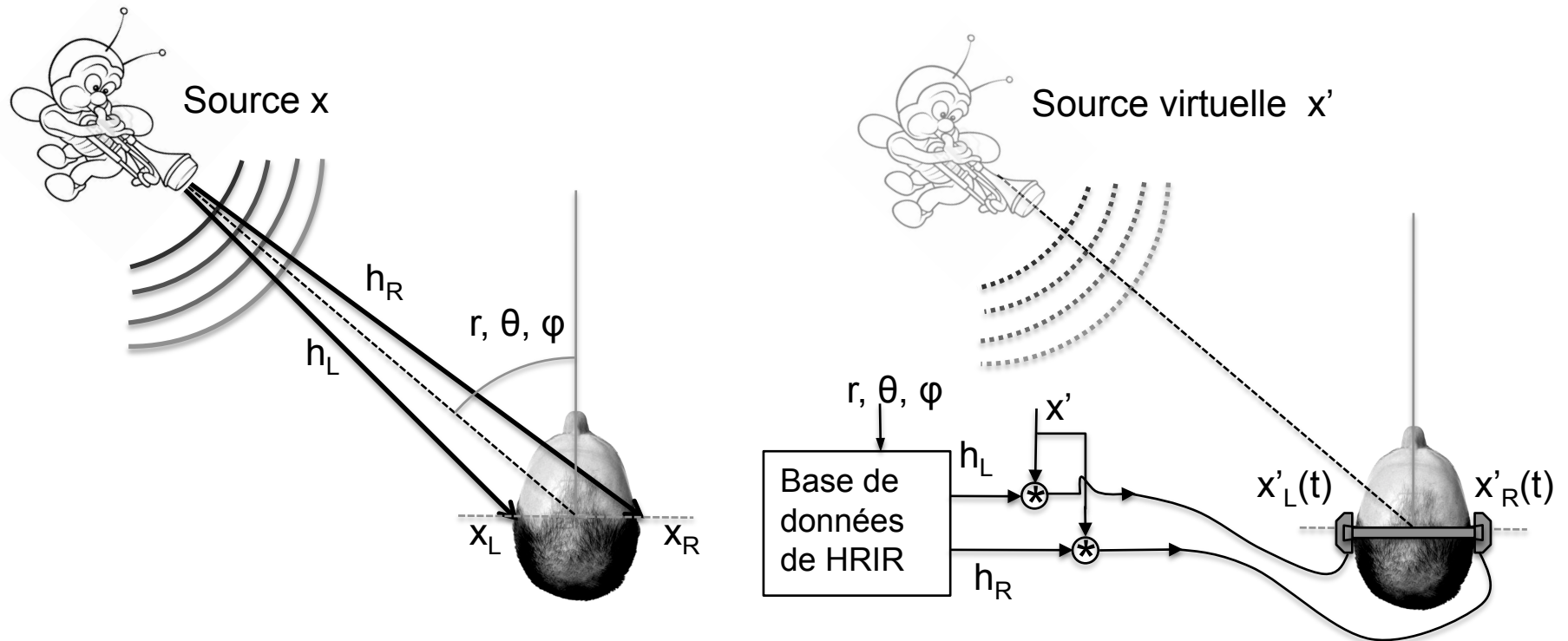
[Guillon, 09]



# Contexte : le son binaural 3D



- Synthèse de son 3D virtuel au casque



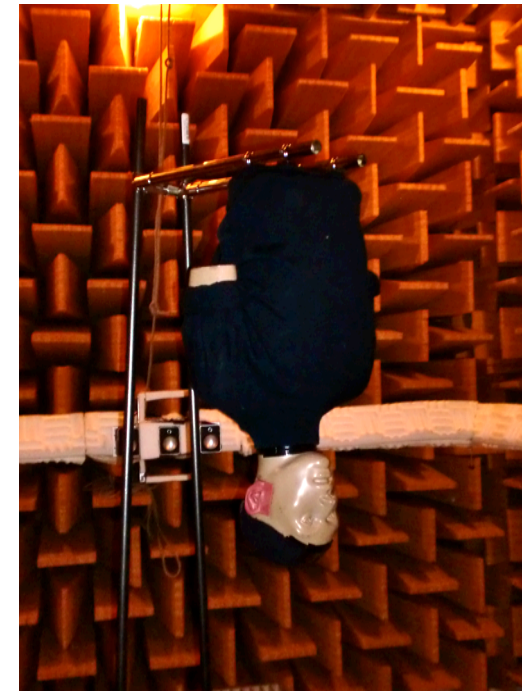
# Contexte : le son binaural 3D



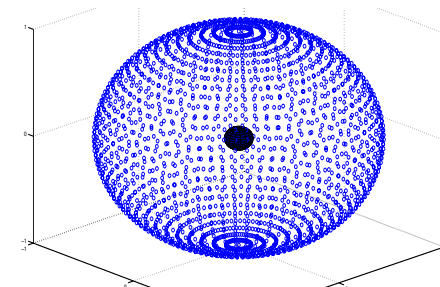
- Mesure des filtres HRTF (ou HRIR)
  - Chambre anéchoïque
  - Discrétisation de l'espace
  - Mesures dépendantes de l'individu



Différentes personnes = différentes morphologies = différentes HRTF



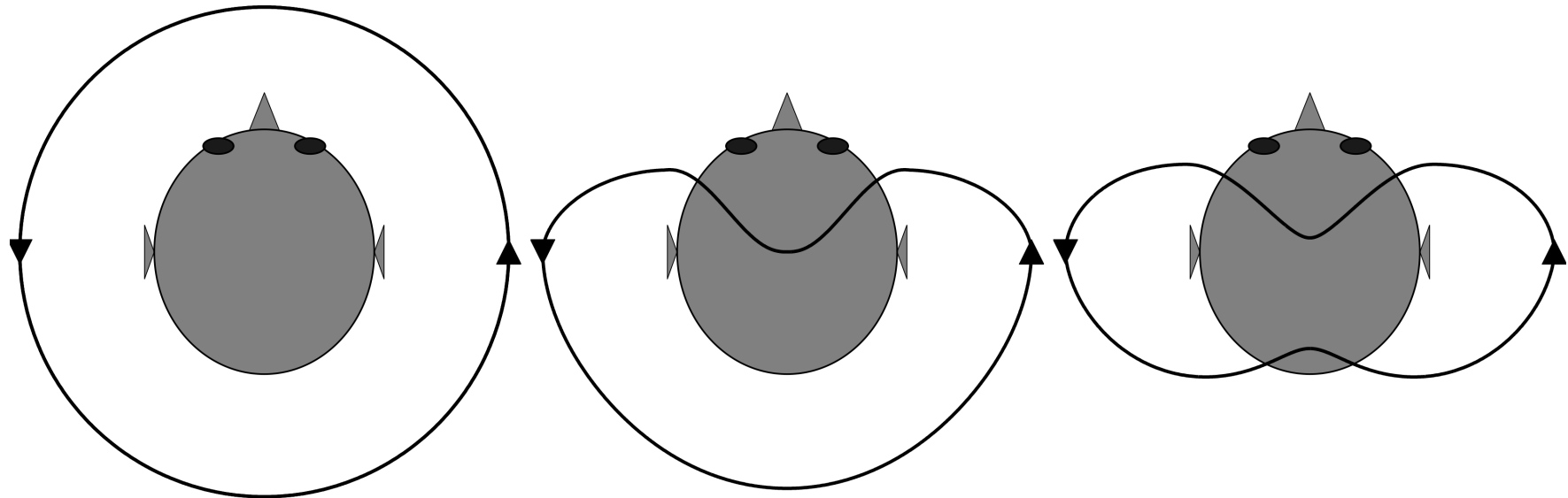
Mesure du mannequin KEMAR dans la chambre anéchoïque de l'IRCAM



Grille de mesure des HRTF sur toute la sphère => 2664 mesures ( $\pm 6$  heures)

# 1. HRTF non-individuelles

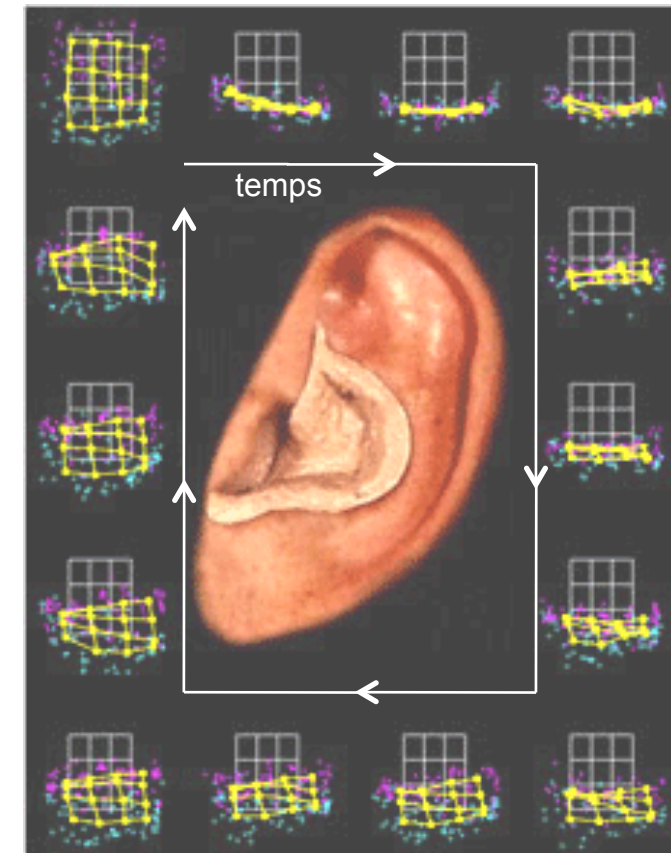
- Projet grand publique : pas d'HRTF individuelles
- HRTF non individuelles ( $HRTF_{NI}$ ) → augmentation des artefacts de localisation
  - Problèmes d'externalisation
  - Confusions avant/arrière et haut/bas
  - Distorsions angulaires



# 1. Comment individualiser les HRTF ?



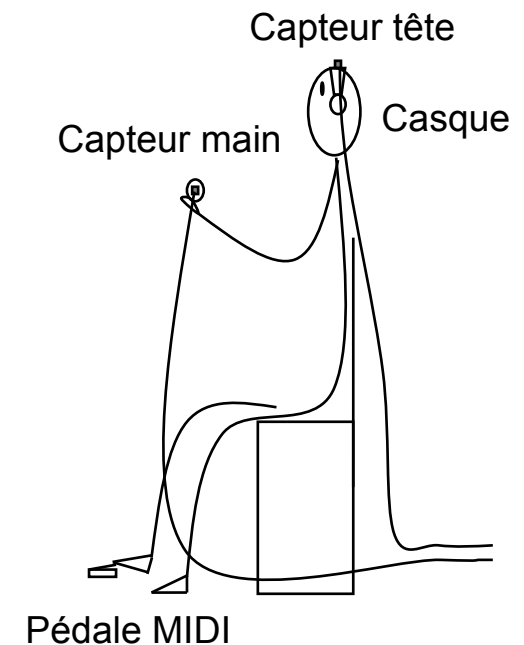
- Littérature : Individualiser les HRTF
  - Modèle numérique, transformation du signal, sélection dans une base de donnée, ...
- Adapter l'auditeur à des  $HRTF_{NI}$ 
  - En vieillissant :
    - ✓ Construction d'une carte audio-spatiale
    - ✓ Adaptation aux changements de morphologie
  - Plasticité du système auditif
  - Calibration :
    - ✓ Par la vue [Hofman, 98]
  - Adaptation passive



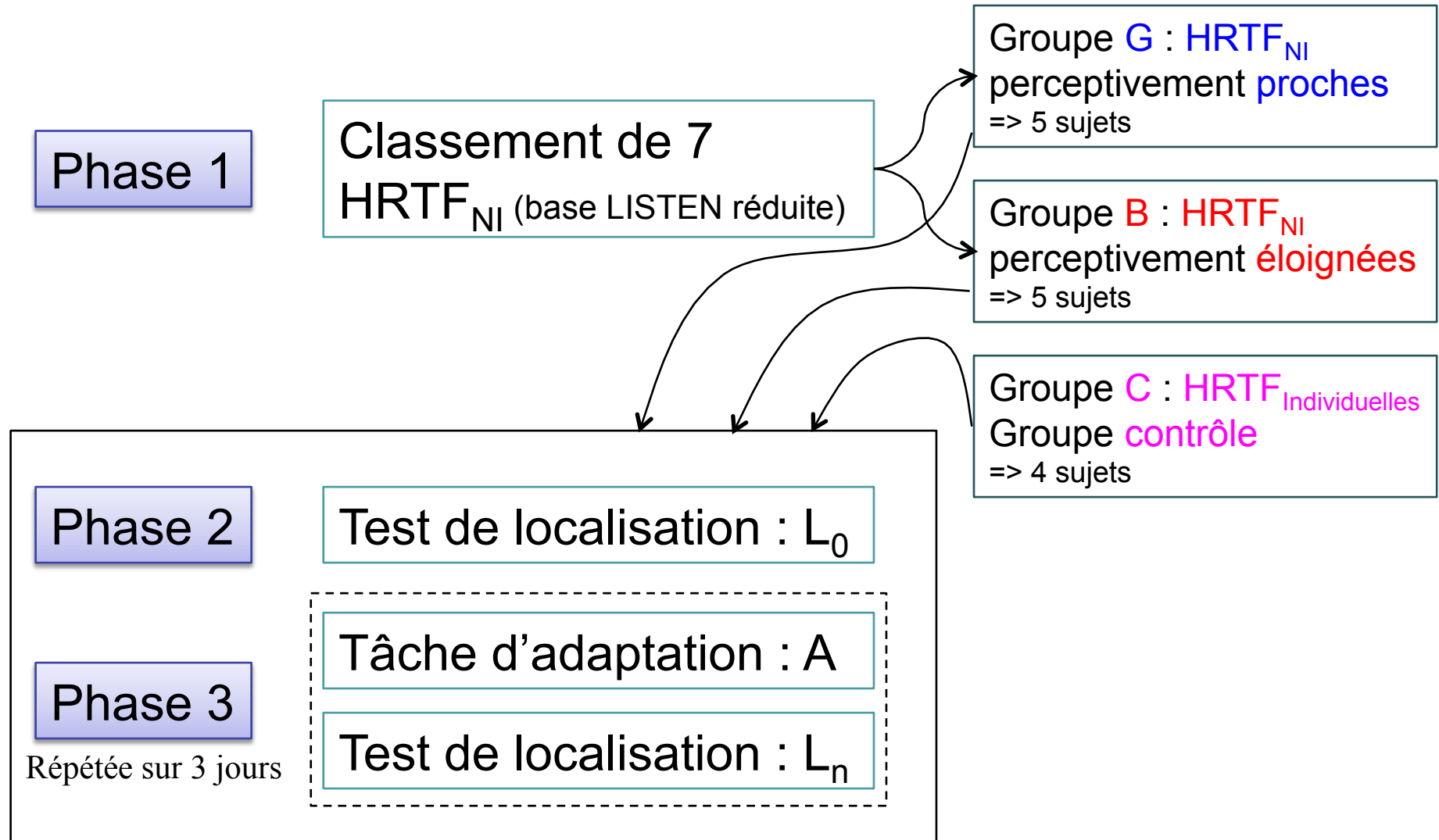
[Hofman, 98]

# 1. Adaptation aux HRTF<sub>NI</sub>

- Adaptation [Blum, 04] :
  - Active
  - Sans la modalité visuelle
  - Rapide
  - Sur toute la sphère auditive
  - Aux indices spectraux seulement
    - ✓ Individualisation des indices ITD
  - Fonction de la similarité entre les HRTF du sujet et celles utilisées pour la synthèse ?
- Environnement auditif virtuel :
  - Rendu binaural dynamique avec tracking
  - Couplage perception/action naturel



# 1. Procédure



# 1. Tâche d'adaptation (A)



- Consigne : Chercher des sons d'animaux cachés dans l'espace (tâche ludique)
- Durée : 12 min
- Stimuli : alternance bruit rose/bruit blanc (fréquence d'alternance : métaphore compteur Geiger)



# 1. Test de localisation ( $L_0$ et $L_n$ )

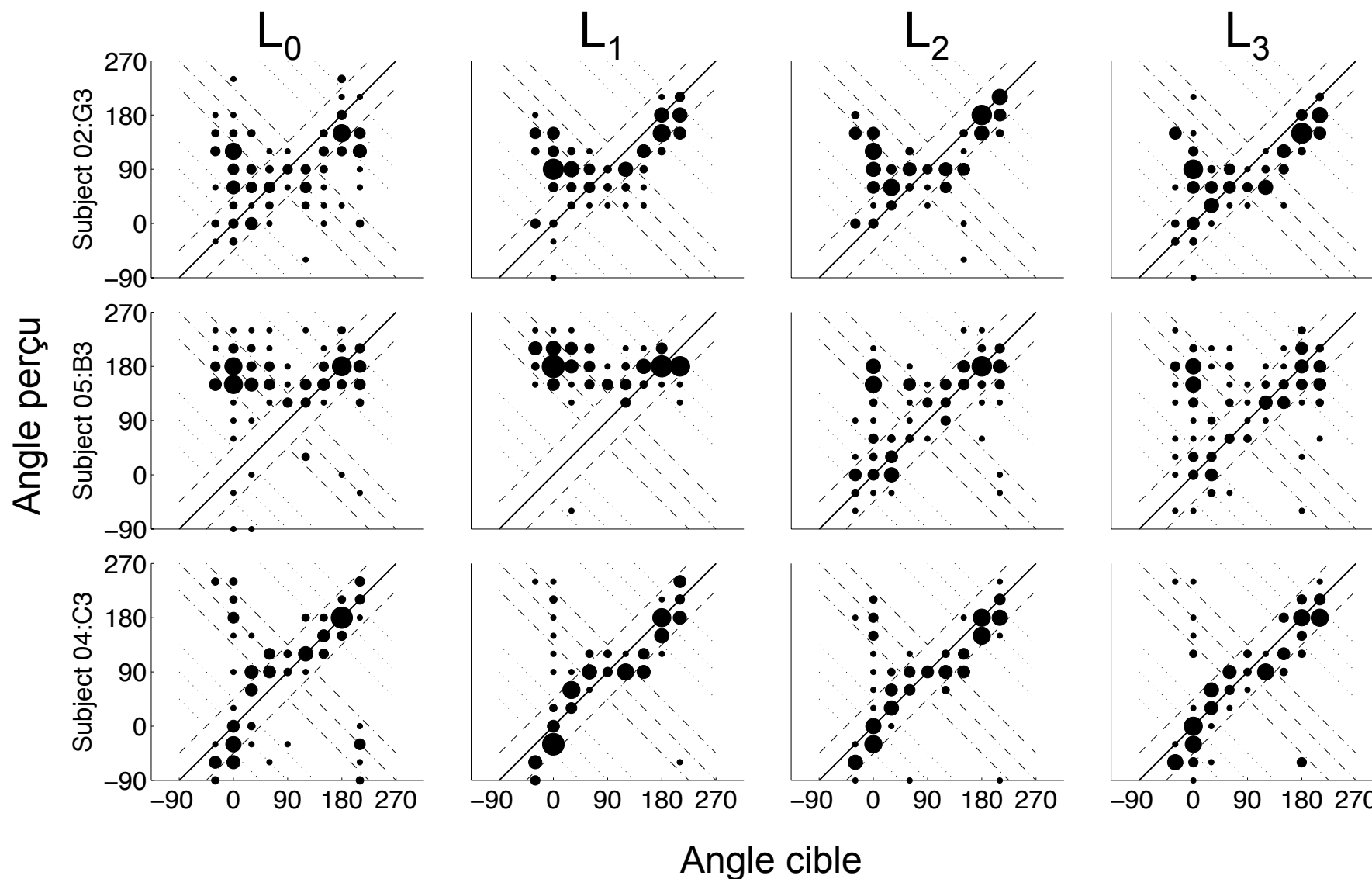
---



- **Tâche:** Reporter la position perçue d'un son en utilisant une technique de pointage égocentré
- **Stimulus:** 3 burst de bruit blanc de 40ms
- 25 positions distribuées de façon équitable entre les hémisphères avant/arrière et haut/bas
- 5 répétitions de chaque position
- Durée moyenne : 10 minutes

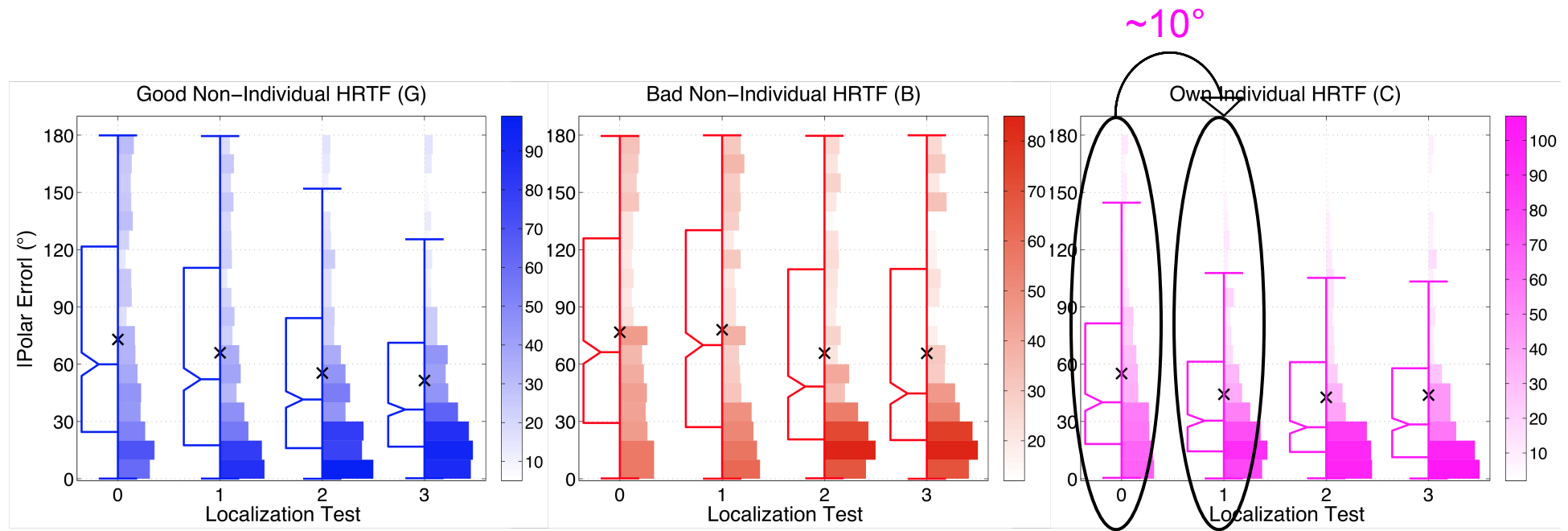


# 1. Erreur en angle polaire



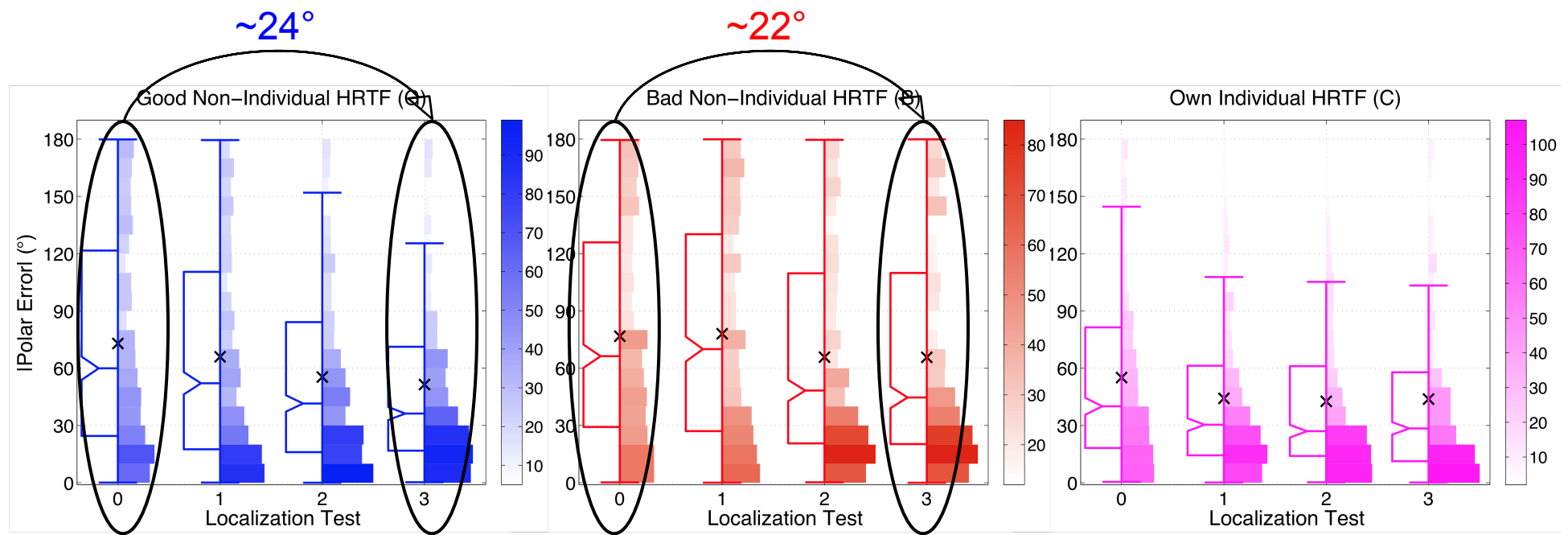
# 1. Résultats en angle polaire

- C (“adaptation procédurale”) : amélioration de  $\sim 10^\circ$  (erreur médiane) entre  $L_0$  et  $L_1$



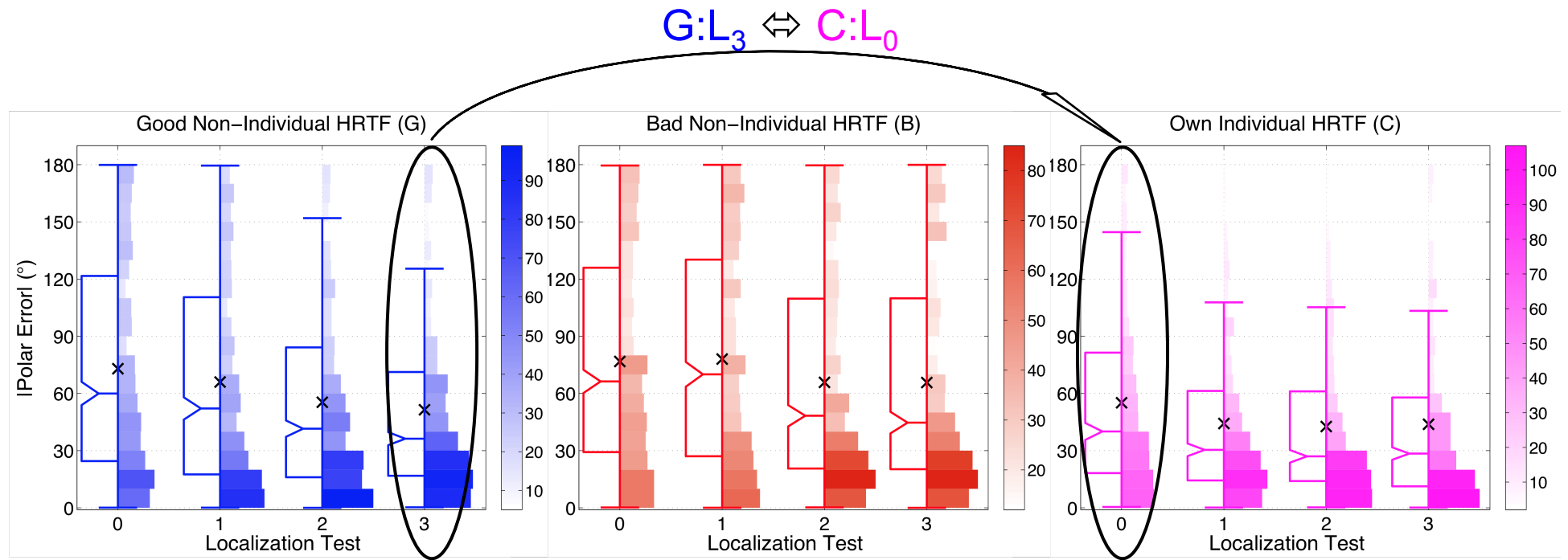
# 1. Résultats en angle polaire

- **C** (“adaptation procédurale”) : amélioration de  $\sim 10^\circ$  (erreur médiane) entre  $L_0$  et  $L_1$
- **G** et **B**: Amélioration de  $\sim 24^\circ$  et  $\sim 22^\circ$  (erreur médiane) entre  $L_0$  et  $L_3$ 
  - Adaptation perceptive d’au moins  $14^\circ$  et  $12^\circ$



# 1. Résultats en angle polaire

- **C** (“adaptation procédurale”) : amélioration de  $\sim 10^\circ$  (erreur médiane) entre  $L_0$  et  $L_1$
- **G** et **B**: Amélioration de  $\sim 24^\circ$  et  $\sim 22^\circ$  (erreur médiane) entre  $L_0$  et  $L_3$ 
  - Adaptation perceptive d’au moins  $14^\circ$  et  $12^\circ$





# 1. Bilan partie 1

---

## Adaptation de l'utilisateur à des HRTF non-individuelles

- ➔ Mise en place d'une plateforme audio-kinésthésique permettant une adaptation :
    - Rapide (3x12 min)
    - Sans la vue, sur toute la sphère
    - Aux indices spectraux
  - ➔ Adaptation perceptive quelque soit la similarité entre les HRTF du sujet et les HRTF utilisées pour le rendu
- 
- Katz, B.F.G. ; Parseihian, G. "Perceptually based Head-Related Transfer Function database optimization." *J. Acoustical Society of America*, 2012, vol. 131(2), pp. EL99-EL105
  - Parseihian, G. ; Katz, B.F.G. "Rapid Head-Related Transfer Function adaptation using a virtual auditory environment." *J. Acoustical Society of America*, 2012, vol. 131(4), pp.2948-2957



## Partie 2 : Amélioration des indices de perception de la distance en champ proche par l'utilisation de la sonification

## 2. NAVIG champ proche



**Localiser et attraper un objet**

## 2. Plan de l'étude

---



### 1. Description du dispositif expérimental

### 2. Expériences préliminaires

- Effet de la main de pointage (sons réels)
- Comparaison des performances de localisation de sons réels / sons virtuels dans l'espace péripersonnel

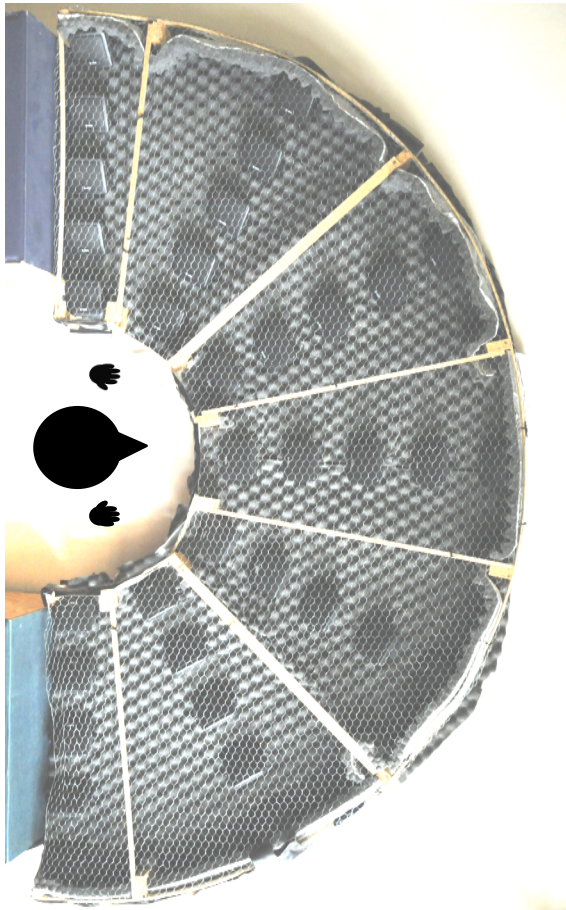
### 3. Sonification de la distance



## 2.1 Dispositif expérimental



### Sons réels (Haut-Parleurs)




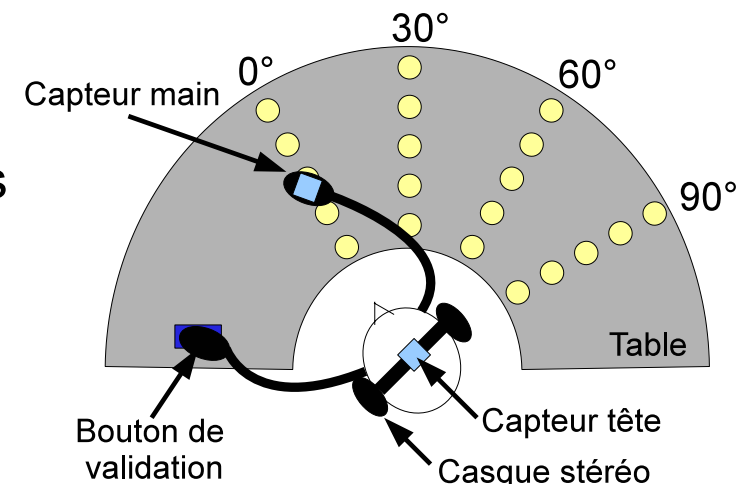
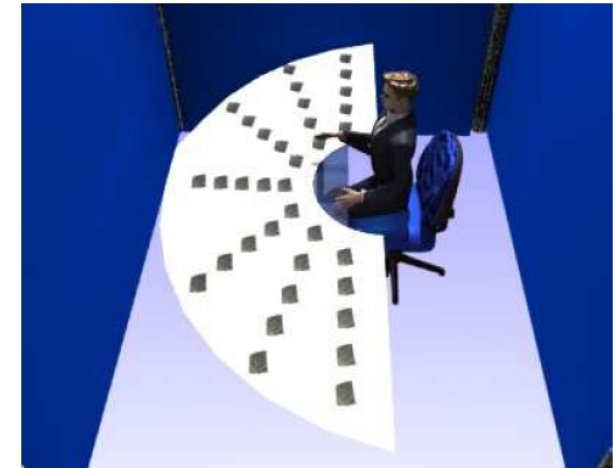
### Sons virtuels (Synthèse binaurale 3d)



## 2.1 Dispositif expérimental



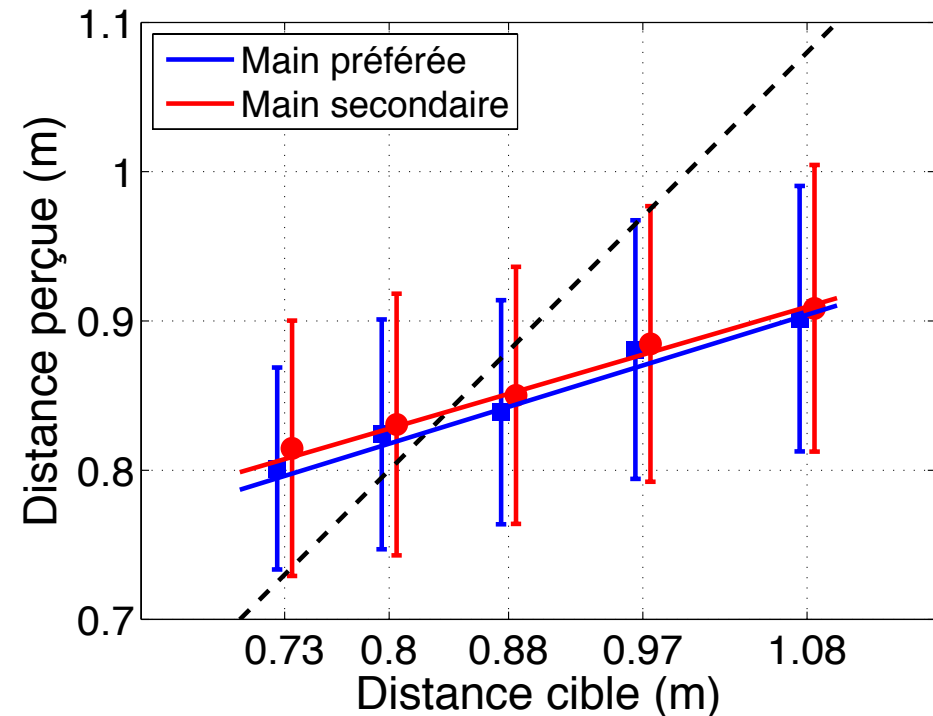
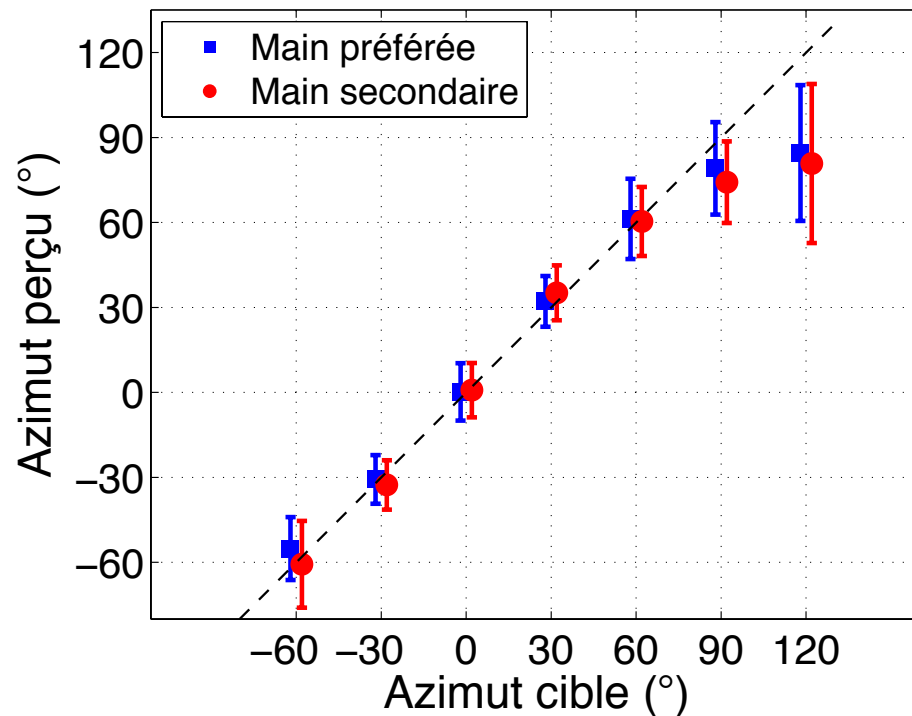
- Distribution des sources sonores :
  - 7 azimuts possibles
  - 5 distances (séparées par 13cm)
- Oreilles : 65cm au dessus de la table
- Niveau sonore : 60dBA (au point d'écoute)
- Stimulus: 3x40ms bursts 
- Synthèse binaurale 3D
  - HRTF du mannequin KEMAR mesurées sur toute la sphère
  - Indices disponibles :
    - ✓ HRTF et ITD non-individuels
    - ✓ ILD champ proche



## 2.2 Expériences préliminaires



### Configuration : sons réels

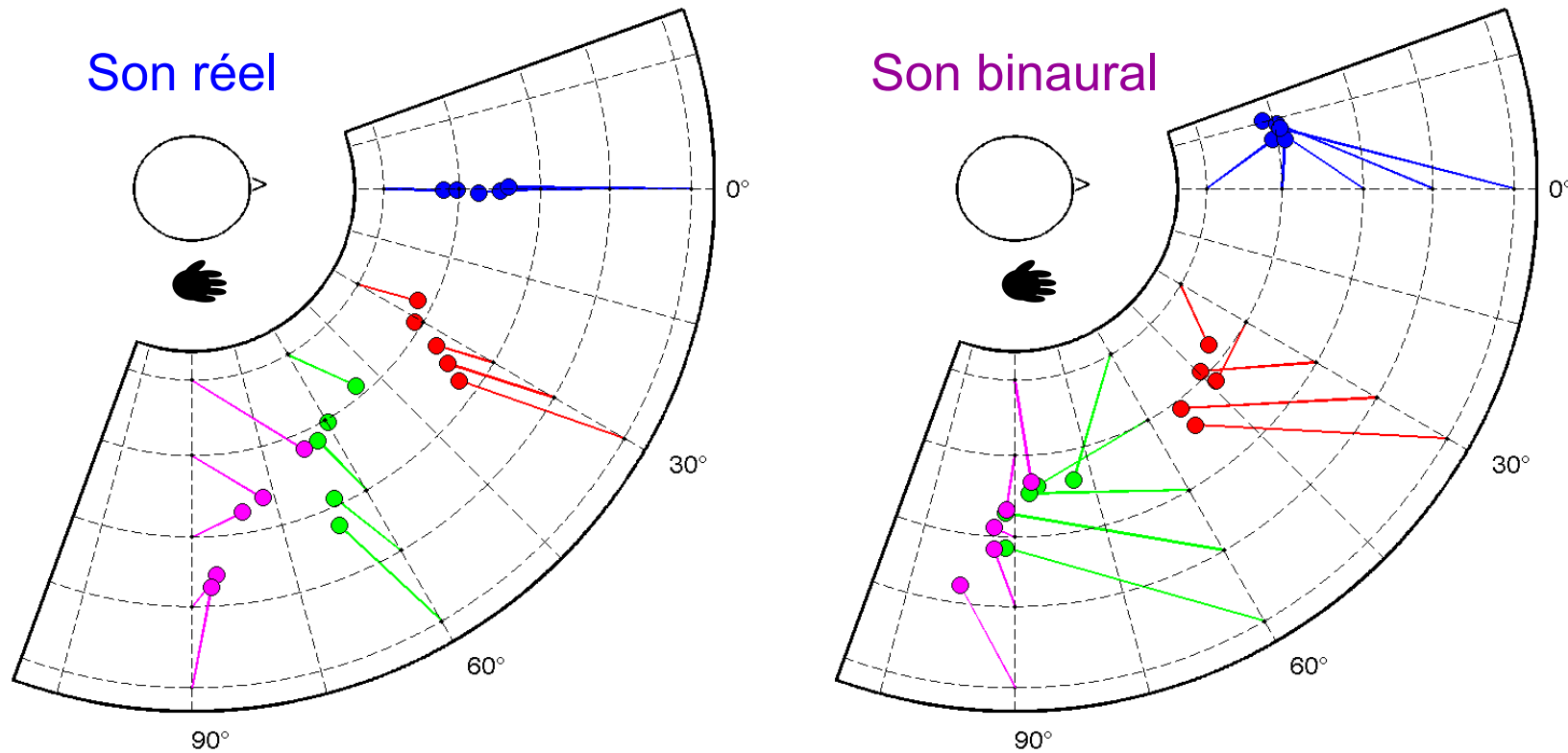


- ⇒ Erreur angulaire :  $12.3^\circ \pm 14.6^\circ$
- ⇒ Compression de la distance
- ⇒ Pas d'effet de la main de pointage

## 2.2 Expériences préliminaires



Comparaison de la localisation de sources réelles et virtuelles



⇒ Son virtuel : peu de perception de la distance, distorsion angulaire

## 2.3 Sonification de la distance

---



### Métaphores d'effets sonores

- Contraintes :
  - Rendu binaural : Spectre large bande ; Attaques brèves ; Pas d'intensité
  - Utilisateurs : Sons brefs, Sons personnalisables
- Sonification basée sur des effets
  - Sonification par mapping de paramètres [Walker, 96]
    - ✓ Paramètres sonores varient en fonction des données
      - Sons de synthèse, sons MIDI
      - Paramètres : fréquence, intensité, tempo, attaque, ...
  - Extension : Valeur à sonifier reliée à un paramètre de l'effet audio
    - ✓ Applicable à tout type de son
    - ✓ Morphologie du son dépendante de l'information à transmettre à l'utilisateur

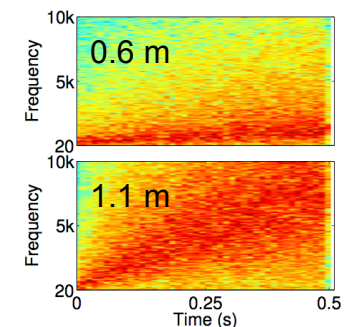
## 2.3 Métaphores de distance



- **Réflexions Précoces (métaphore instinctive)**
  - Perception de la distance meilleure en présence d'indices de réverbération [Mershon, 1975]
  - Effet de salle ; Source-Image 2<sup>ème</sup> ordre spatialisées (salle = 5x5x3 m<sup>3</sup>)

- **Compteur Geiger**  $T_{\text{répétition}} \propto \text{distance}$ 
  - Sonification basée sur une fréquence de répétition
  - 3 répétitions du stimulus

- **Filtre Passe-bande Glissant**  $\Delta f \propto \text{distance}$ 
  - Perception fréquentielle précise
  - Paramètre efficace pour la sonification [Brown, 2003]
  - Variation de la fréquence en fonction de la distance



## 2.3 Design expérimental



- 4 conditions (ordre aléatoire) :
  - Contrôle (C) (sans sonification)
  - Réflexions Précoces (RP)
  - Compteur Geiger (CG)
  - Filtre Passe-bande Glissant (FPG)
- 16 sujets les yeux bandés
- Tâche de localisation
  - 5 distances
    - ✓ 0.73, 0.80, 0.88, 0.97, and 1.08 m
  - 4 azimuts
    - ✓ 0°, 30°, 60°, and 90°
  - 4 répétitions x 5 dist x 4 azim (80 essais)

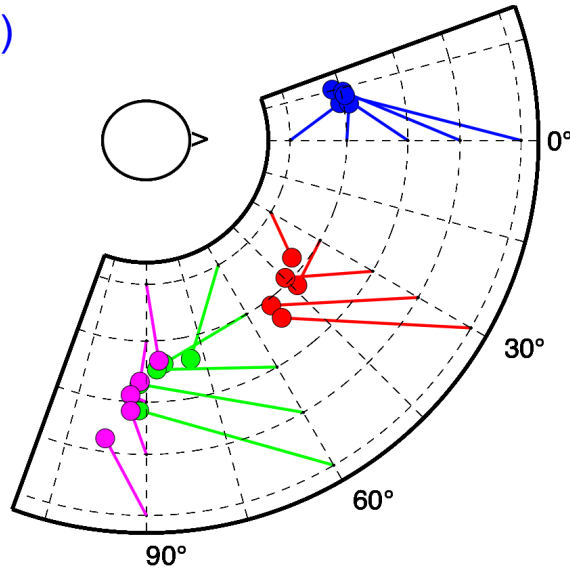
J-2	Adaptation HRTF	
J-1	Adaptation HRTF	
J0	Adaptation HRTF	
	Entraînement	Métaphore 1
	Test	
	-----	
	Entraînement	Métaphore 4
	Test	

Protocole de l'évaluation des métaphores

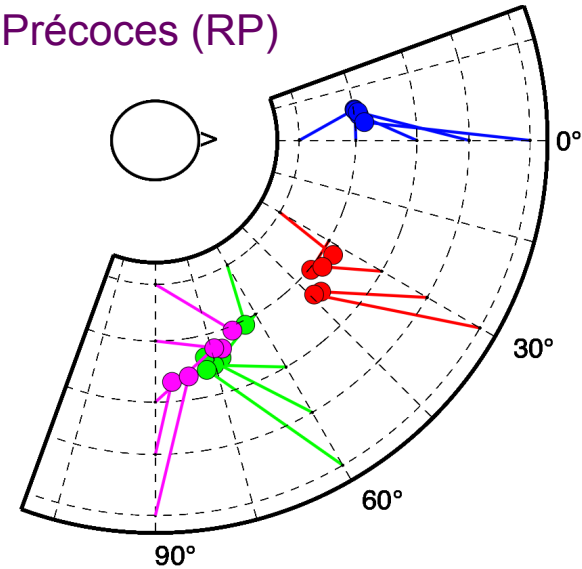
## 2.3 Résultats généraux



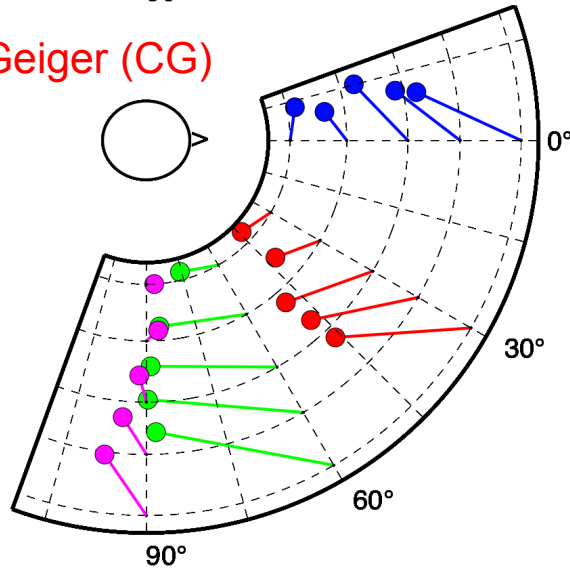
Contrôle (C)



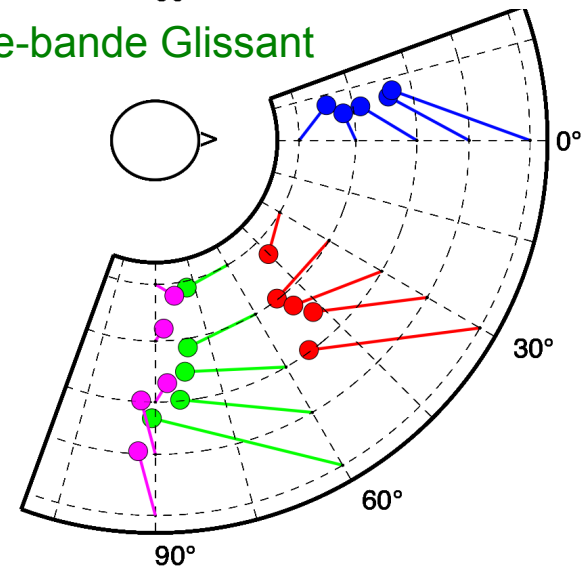
Réflexions Précoces (RP)



Compteur Geiger (CG)

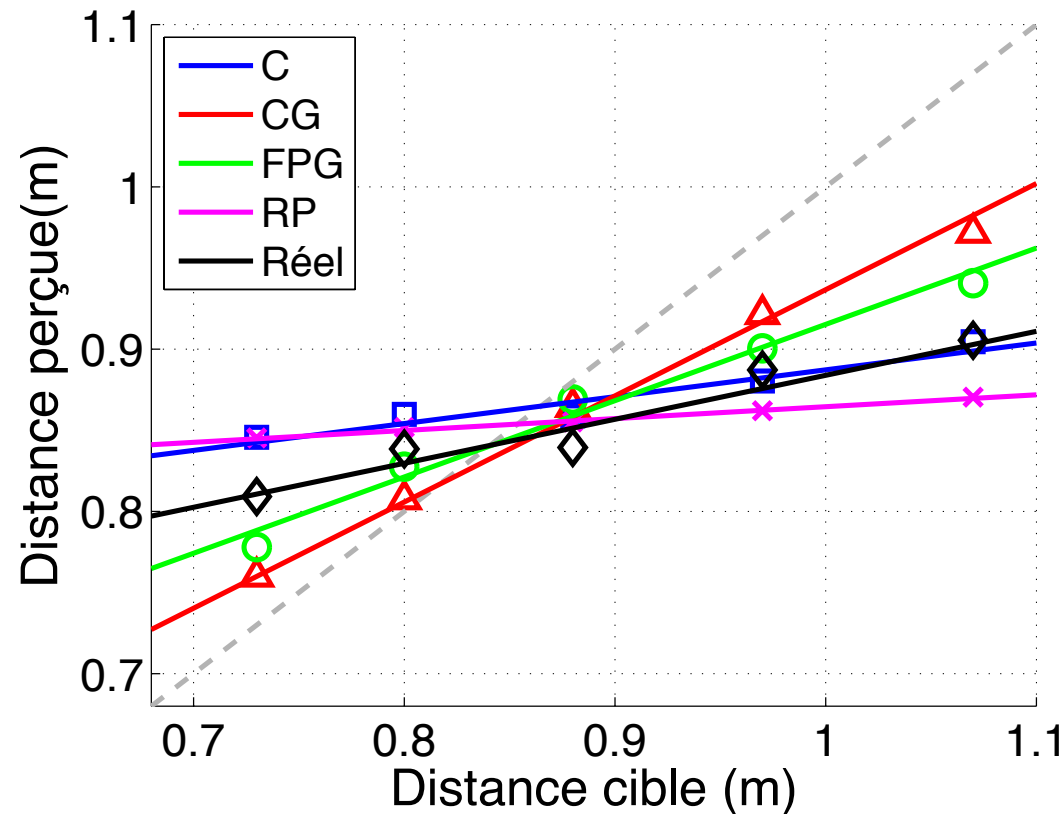


Filtre Passe-bande Glissant (FPG)





## 2.3 Erreur en distance



- Meilleures performances avec les conditions CG et FPG
- Effet significatif de la métaphore : ANOVA [ $F(3,42) = 19.76, p < 0.001$ ]
- Métaphores de distance > Son réel

## 2. Bilan partie 2



### Amélioration des indices de perception de la distance par l'utilisation de la sonification

- ➔ Etude des capacités de localisation et saisie d'objets sonores dans l'espace péripersonnel
  - Perception compressée des distances avec les sons réels
  - Peu de discrimination des distances en champ proche avec la synthèse binaurale 3D utilisée
- ➔ Mise en place d'une méthode de sonification de la distance
  - 2 métaphores conduisent à une discrimination des distances supérieure à la normale
  - Méthode applicable à tout type de son

• Parseihian, G. ; Katz, B.F.G. ; Conan, S. Sound effect metaphors for near field distance sonification. *International Conference on Auditory Display (ICAD)*, June 18-21, 2012, Atlanta, GA, USA, pp. 6-13.



---

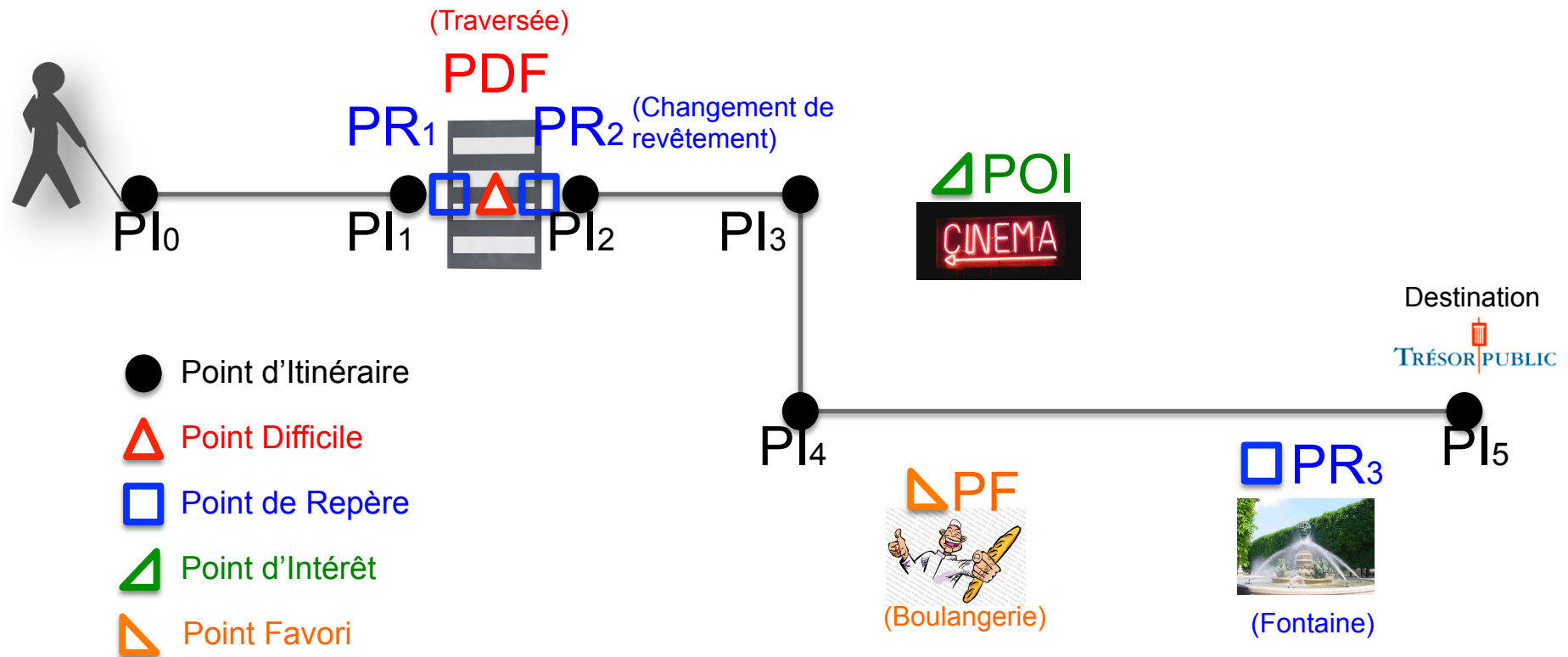
## Partie 3 : Les morphocons – une sonification personnalisable basée sur des earcons morphologiques

# 3. NAVIG champ lointain



- Contexte

- Guidage du piéton vers une destination voulue (PI, PDF)
- Ajout d'informations utiles (POI, PF, PR)



# 3. NAVIG champ lointain

---



- Constat
  - Systèmes du commerce : synthèse vocale
  - Projet de recherches : balises sonores 3D
    - ✓ Etude de la précision du guidage [Loomis, 05]
    - ✓ Etude de la facilité d'apprentissage des icônes auditives [Dingler, 08]
    - ⇒ Satisfaction des utilisateurs pour les interfaces sonores peu étudiées
  - Utilisateur : pouvoir changer le type de son
  
- **But** : Développer un vocabulaire sonore personnalisable par l'utilisateur

# 3. Les Morphocons

---



- Concept :
  - Extension du concept d'*Earcons* (motifs de notes) [Blattner, 89]
    - ✓ Pas de relation sémantique entre le son et l'information
    - ✓ Apprentissage nécessaire
  - Ecoute réduite [Schaeffer, 77]
  - *Morphocons* : Vocabulaire sonore basé sur des variations morphologiques (motifs de paramètres acoustiques : fréquence, tempo, intensité)
- But :
  - Vocabulaire indépendant du type de son
  - Permettre à l'utilisateur de changer de palette sonore sans introduire d'apprentissage supplémentaire

# 3. Application au projet NAVIG



Informations à fournir : 5 catégories d'info, 13 sous-cat.

## ■ Guider et avertir

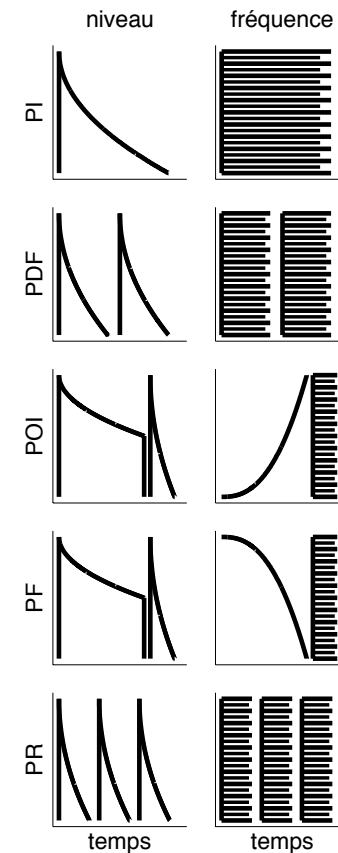
- PI : définition de la trajectoire
  - 🔊 ✓ 1 son bref
- PDF : croisements + traversées
  - 🔊 ✓ 2 sons brefs

## ■ Informer :

- 7 POI : destination potentiellement intéressante
  - 🔊 ✓ Son dont la fréquence augmente + son bref
- 2 PF : POI spécifique à l'utilisateur
  - 🔊 ✓ Son dont la fréquence diminue + son bref

## ■ Rassurer :

- 4 PR : confirmer la position de l'utilisateur par des indices détectables
  - 🔊 ✓ Motif rythmique de 3 sons brefs

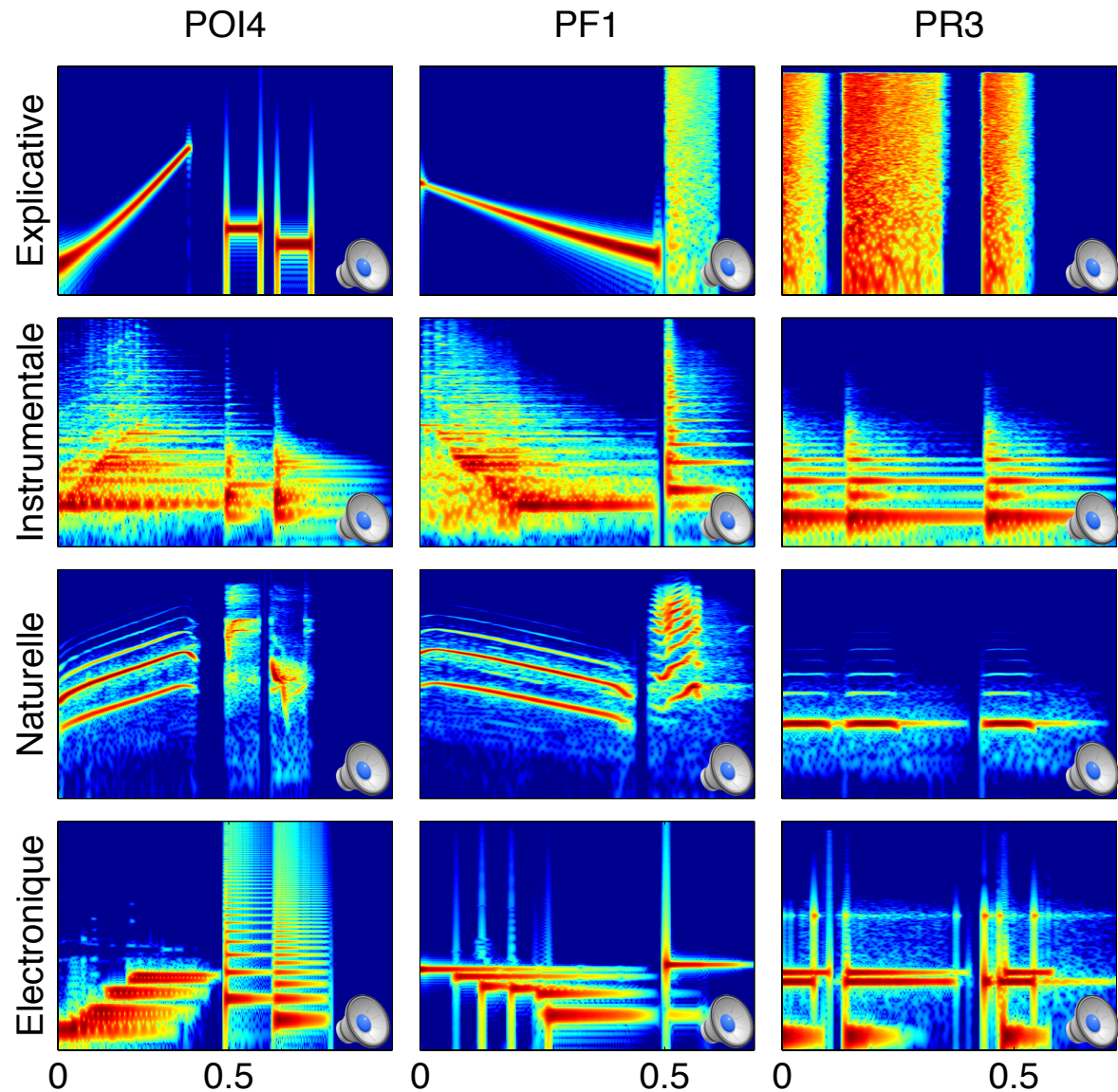


# 3. Application au projet NAVIG



- Construction de 4 palettes :

- *Explicative* :
  - ✓ Sons purs et bruits blancs
- *Instrumentale* :
  - ✓ Sons d'instruments à cordes
- *Naturelle* :
  - ✓ Sons d'oiseaux
- *Electronique* :
  - ✓ Synthèse sonore





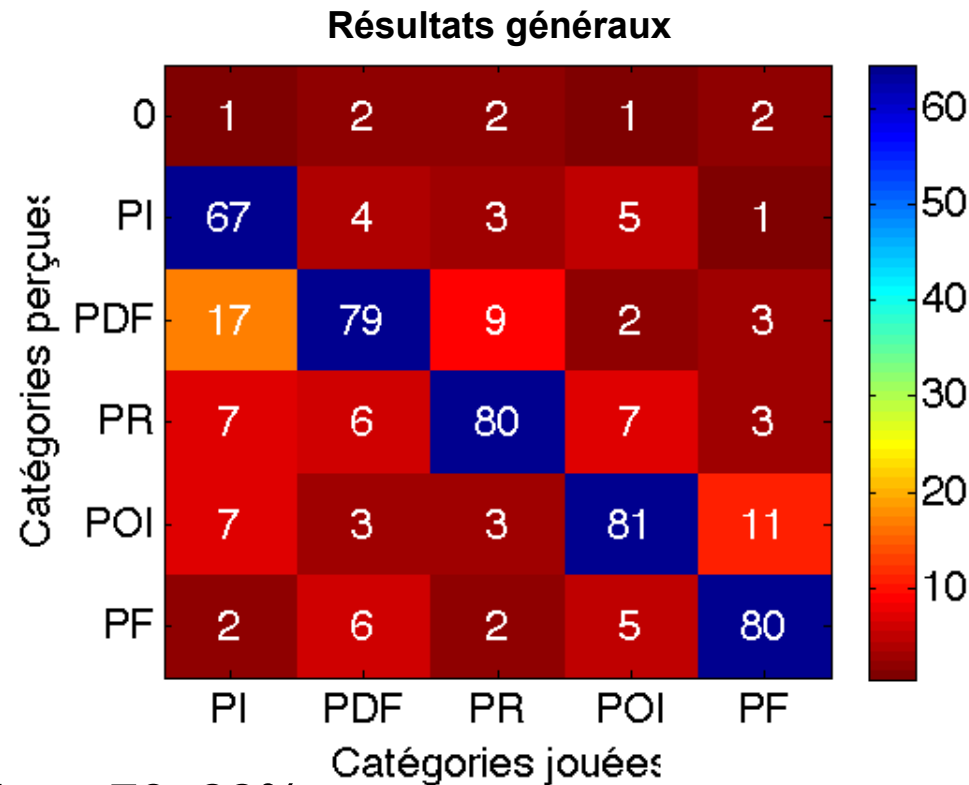
# 3. Expérience

---



- **But** : Evaluer les ressemblances morphologiques entre les palettes
- **Méthode** : Test de reconnaissance web (accessible aux NV)
- **Sujets** : 60 réponses (31 Voyants, 29 NV)
- **Procédure** :
  - Description verbale et sonore du vocabulaire
  - Identification de la catégorie d'information (PI, PDF, POI, PF et PR) pour 20 sons tirés aléatoirement dans les sons des 3 palettes

# 3. Résultats

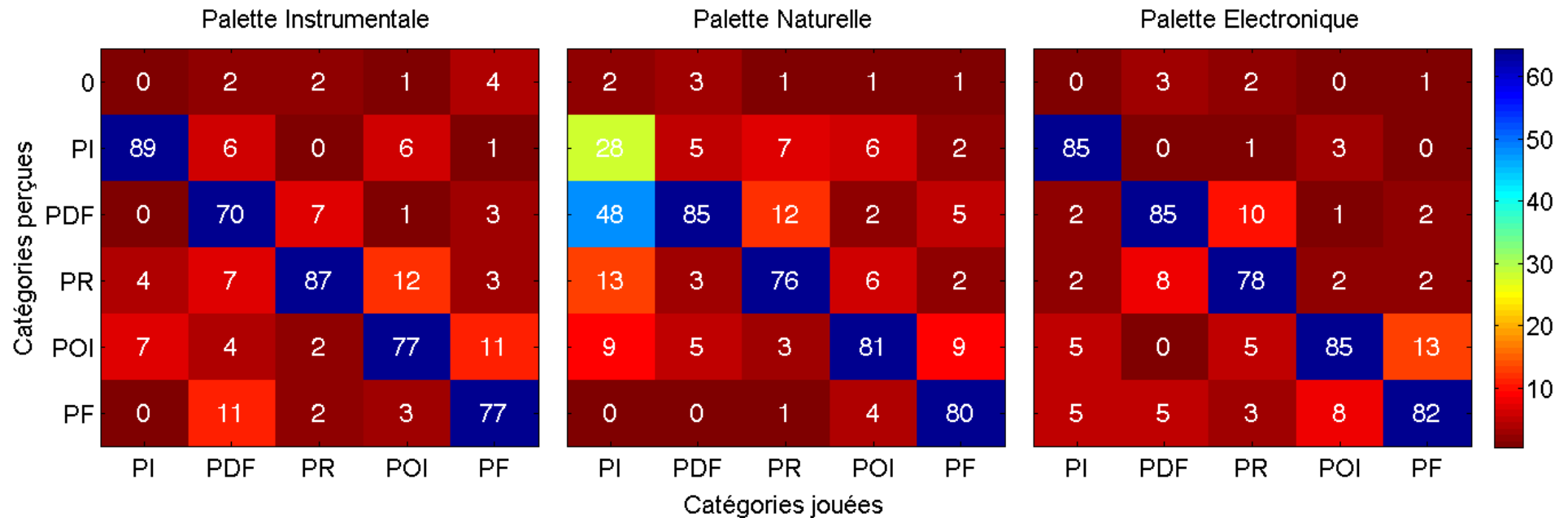


- Taux d'identification :  $78 \pm 22\%$ 
  - ✓ Voyants :  $81 \pm 17\%$
  - ✓ Non-voyants :  $74 \pm 27\%$
- Différence marginalement significative entre voyants/non-voyants ( $p=0.058$ )
  - ✓ Problèmes dus à l'accessibilité de l'interface pour les NV (test trop long)

# 3. Résultats



- Problème dans le design des sons de la palette naturelle



### 3. Bilan partie 3



Conception d'une méthode de sonification permettant la mise en place de vocabulaire sonore personnalisable

- ➔ Signaux auditifs définis à partir de variations temporelles de paramètres acoustiques
  - Vocabulaire sonore indépendant du type de son utilisé
  - Possibilité de changer de palette sonore sans devoir réapprendre le lien entre les sons et les informations
- ➔ Formes sonores reconnues par l'utilisateur indépendamment du son qui les transmet

• Parseihian, G. ; Katz, B.F.G. "Morphocons: A new sonification concept based on morphological earcons." *J. Audio Engineering Society*, 2012, vol. 60(6), pp. 409-418.

# Conclusion

---

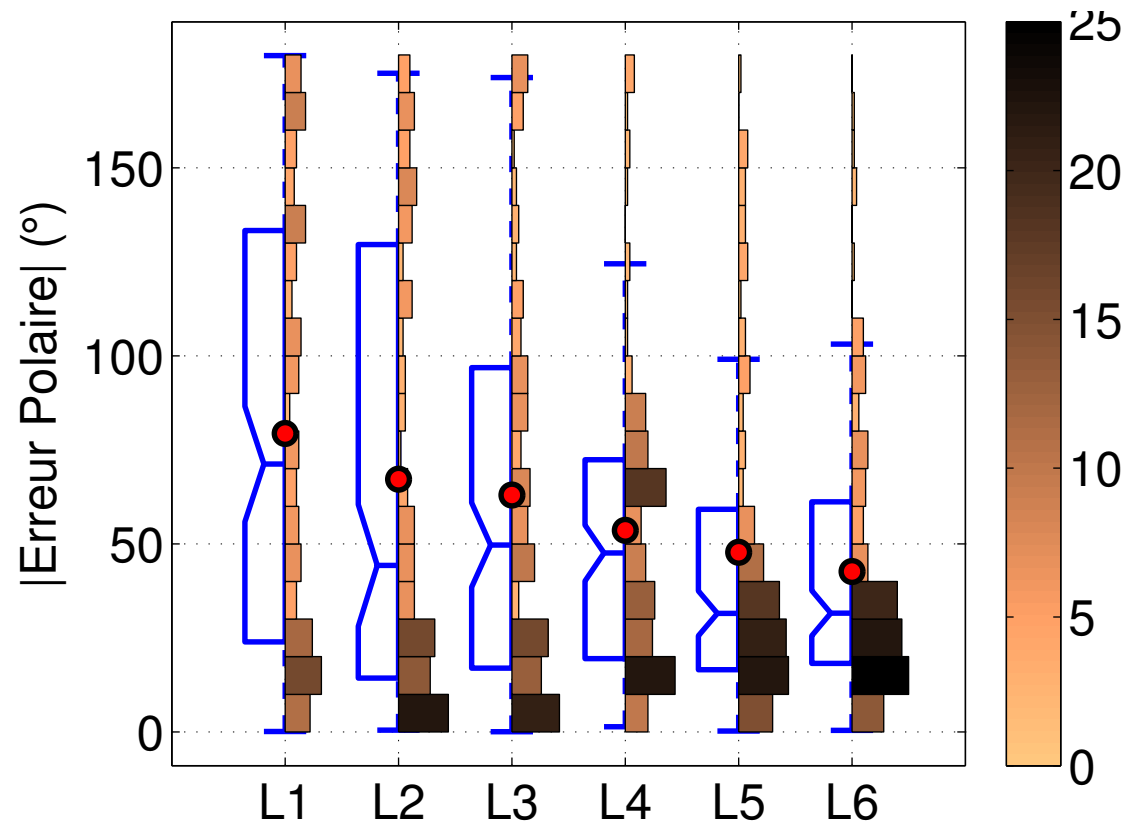


- Amélioration du rendu binaural avec des HRTF non-individuelles
  - Possibilité d'adapter rapidement l'utilisateur à des HRTF non-individuelles
- Amélioration des indices de perception de la distance par l'utilisation de la sonification
  - Etude des capacités de localisation en champ proche pour des sons réels/virtuels
  - Mise en place d'une méthode de sonification de la distance
- Sonification personnalisable par les utilisateurs
  - Amélioration de l'esthétique de la sonification par la mise en place de méthodes de sonifications personnalisables

# Perspectives



- Généralisation de la méthode d'apprentissage des HRTF non-individuelles
  - Plus de session d'adaptation (1 sujet)





- Généralisation de la méthode d'apprentissage des HRTF non-individuelles
  - Plus de session d'adaptation
  - Pérennité de l'adaptation
- Mise en place et test d'un dispositif de navigation en situation réelle
  - Comparaison du guidage sonore 3D (proche et lointain) aux méthodes plus traditionnelles
- Evaluation de l'ergonomie des méthodes de sonification mises en place
  - L'amélioration de l'esthétique des signaux sonores permet-elle d'augmenter l'utilisabilité de la sonification ?

# Questions ...



## Revues :

- Parseihian, G., Katz, B.F.G., *“Rapid Head-Related Transfer Function adaptation using a virtual auditory environment”*, JASA, Volume 131, Issue 4, 2012.
- Parseihian, G., Katz, B.F.G., *“Morphocons: A new sonification concept based on morphological earcons”*, JAES, Volume 60, Issue 6, 2012.
- Katz, B.F.G., Parseihian, G., *“Perceptually based head-related transfer function database optimization”*, JASA-EL, Volume 131, Issue 2, 2012.
- Katz, B.F.G., Kammoun, S., Parseihian, G., and al., *“NAVIG : augmented reality guidance system for the visually impaired. Combining object localization, GNSS, and spatial audio”*, Virtual Reality, Volume 16, Issue 3, 2012.

## Conférence :

- Parseihian, G., Conan, S., Katz, B.F.G., *“Sound effect metaphors for near field distance sonification”*, ICAD, 2012
- Parseihian, G., Brilhault, A., Dramas, F., *“NAVIG: An object localization system for the blind”*, Workshop Pervasive 2010: Multimodal Location Based Techniques for Extreme Navigation, 2010.

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) au travers du programme TecSan (projet NAVIG n° ANR-08-TECS-011) et la Région Midi-Pyrénées par le biais du programme APRRTT.



# Bibliographie

---



- Klatzky, R., Marston, J., Giudice, N., Golledge, R. et Loomis, J. “Cognitive load of navigating without vision when guided by virtual sound versus spatial language”, *J of Exp Psychol Appl*, 12(4):223–232, 2006.
- Loomis, J., Marston, J., Golledge, R. et Klatzky, R. L. “Personal guidance system for people with visual impairment : A comparison of spatial displays for route guidance”, *J. of Visual Impairment & Blindness*, 99:219–232, 2005.
- Guillon, P. “Individualisation des indices spectraux pour la synthèse binaurale : recherche et exploitation des similarités inter-individuelles pour l’adaptation ou la reconstruction de HRTF”, *Thèse de doctorat*, Université du Maine, 2009
- Hofman, P.M., Van Riswick, J.G.A., Van Opstal, A.J., “Relearning sound localization with new ears”, *Nature Neuroscience*, 1998.
- Blum, A., Katz, B. F. et Warusfel, O., “Eliciting adaptation to non- individual HRTF spectral cues with multi-modal training”, In Proc. CFA/DAGA, 2004

# Bibliographie

---



- Walker, B. N. et Kramer, G. “Mappings and metaphors in auditory displays : An experimental assessment.”, *ICAD*, 1996.
- Mershon, D.H., King, L.E., “*Intensity and reverberation as factors in the auditory perception of egocentric distance*”, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 1975.
- Dingler, T., Lindsay, J. et Walker, B. “Learnability of sound cues for environmental features : Auditory icons, earcons, spearcons, and speech”, *Methods*, p.1–6, 2008.
- Blattner, M., Sumikawa, D. et Greenberg, R. “Earcons and icons : Their structure and common design principles”, *SIGCHI Bull.*, 1989.
- Schaeffer, P. “*Traité des objets musicaux*”, Seuil, 1977.