

*Vendredi 8 décembre 2006*

---

# **Modélisation tridimensionnelle des organes de la parole à partir d'images IRM pour la production de nasales**

**Caractérisation articulatoire-acoustique des mouvements du voile du palais**

---

**Antoine Serrurier**



**M. Gang Feng,  
M. Philip Hoole,  
M. Yves Laprie,  
M. Pierre Badin,  
M. Shinji Maeda,  
M. Gérard Bailly,**

**Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Directeur de thèse  
Examineur  
Examineur**



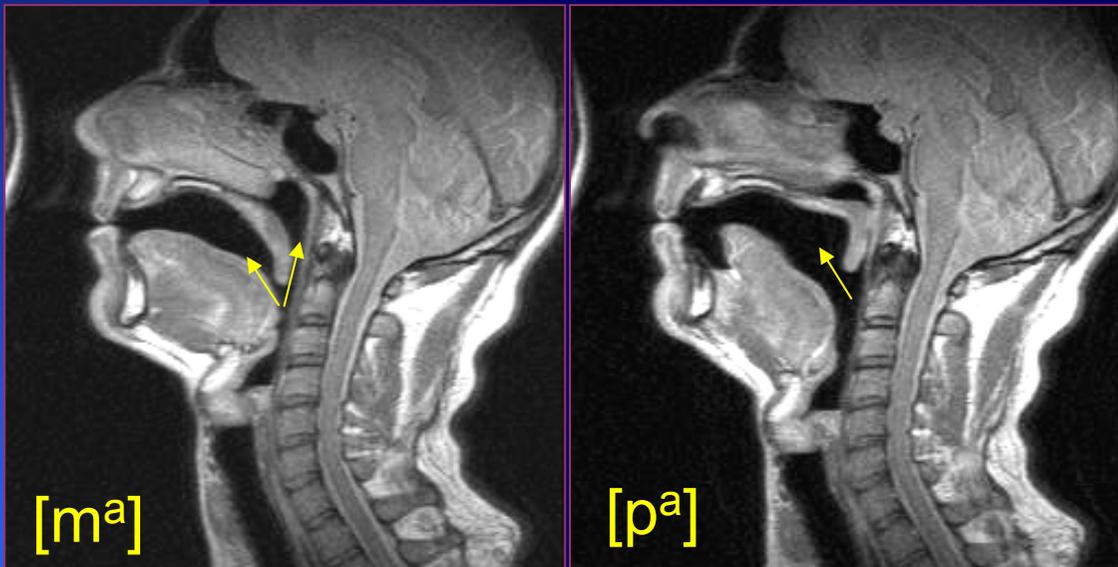
# Plan de l'exposé

---

- Nasalité: définition, objectifs, état de l'art
- Données articulatoires
- Modèle articulatoire tridimensionnel
- Modélisation articulatori-acoustique
- Conclusion et perspectives

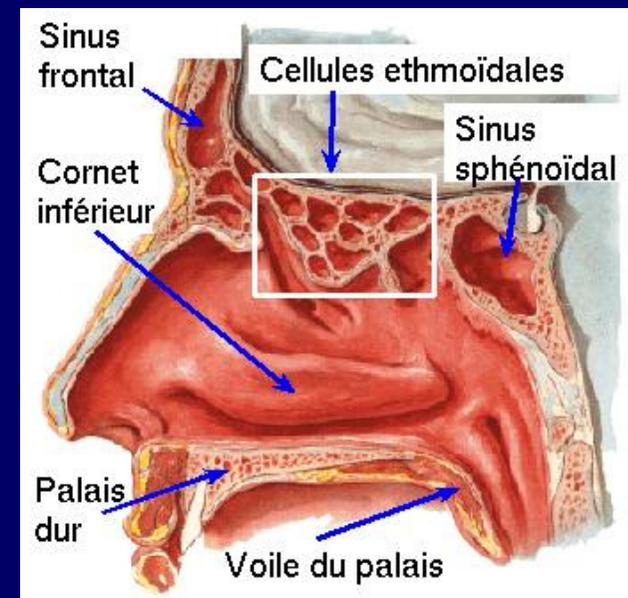
# Nasalité : définition

- « Le terme de nasalité fait référence aux sons produits avec un voile du palais suffisamment bas pour permettre un flux d'air audible à travers le conduit nasal. » (Crystal, 1997)



Structure complexe des cavités nasales et des sinus

Ouverture/fermeture du port vélopharyngé



# Objectif : comprendre la nasalité

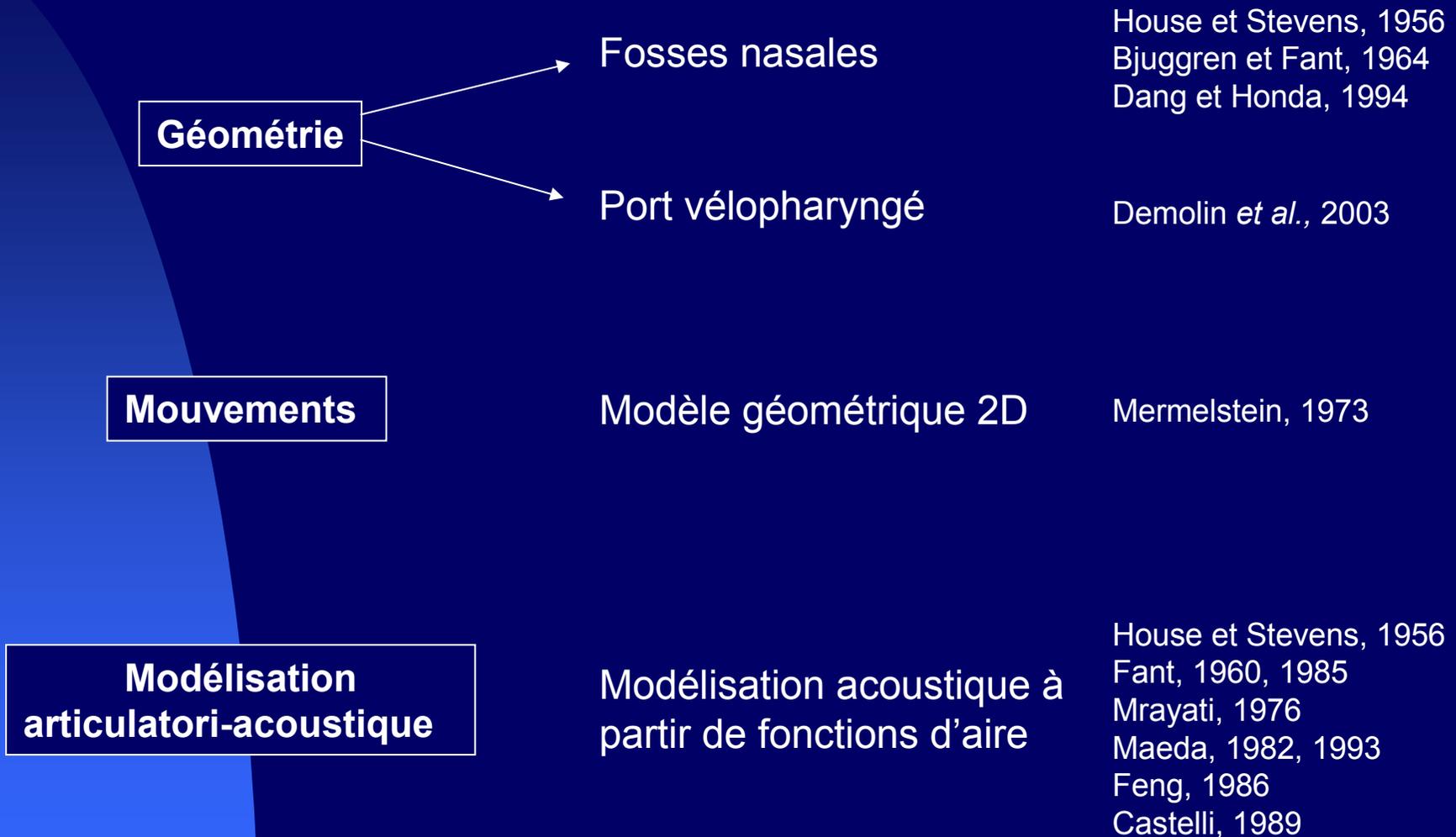
Caractériser et modéliser le geste articulatoire lié à l'abaissement du voile du palais

- Géométrie complexe globale
- Nature et dimensionnalité des mouvements

Caractériser et modéliser ses conséquences acoustiques

Synthèse articulatoire

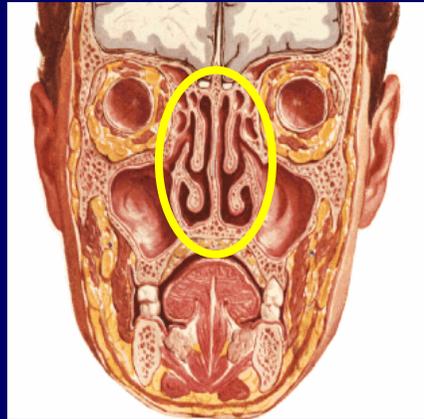
# Études articulatoire-acoustiques : état de l'art



# Modèle articulatoire

- Modèle 3D : représentation précise de la géométrie complexe

**Cavités nasales**



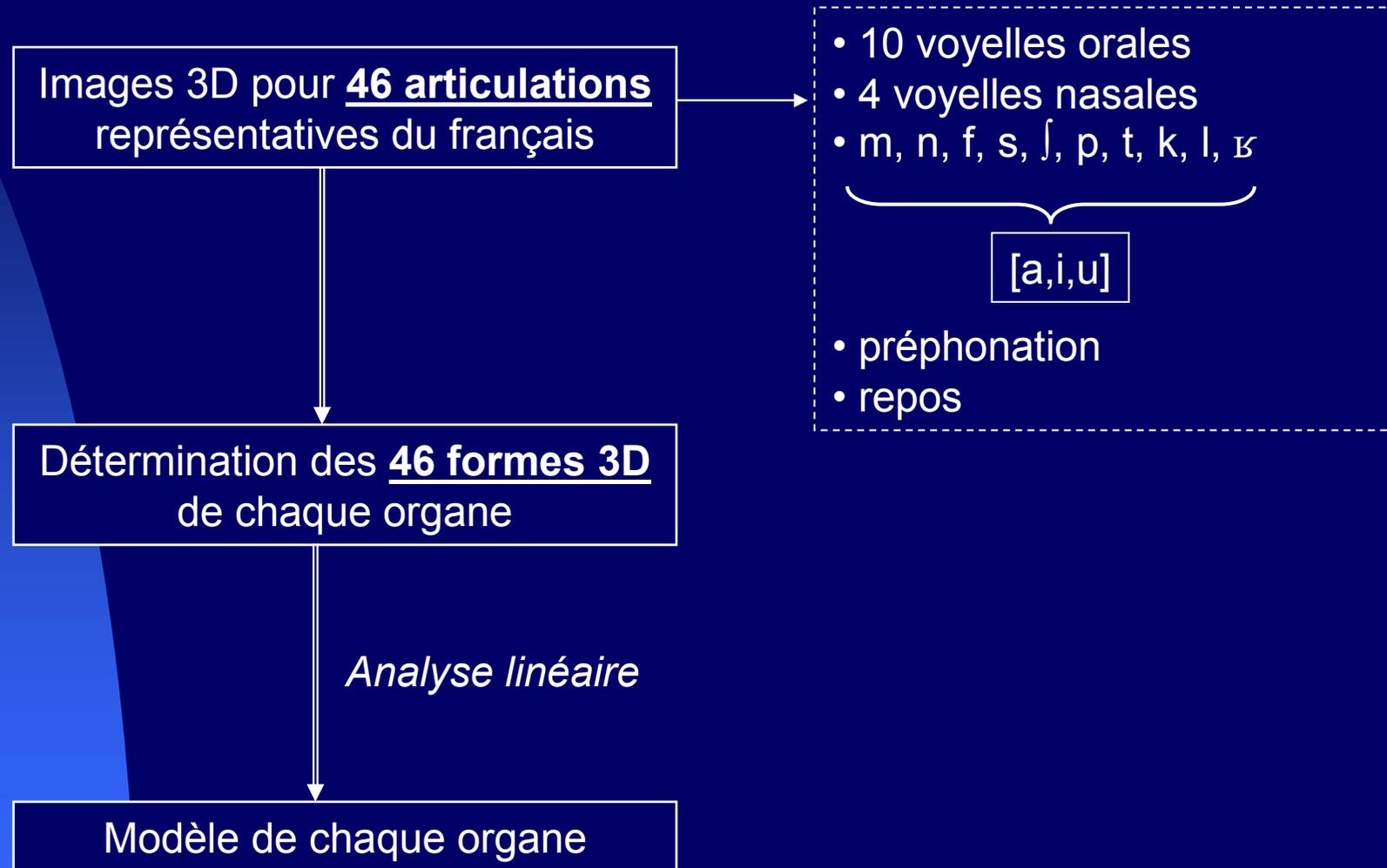
**Voile du palais**

- Modèle basé sur les données
- Modèle de surfaces d'organes
  - Voile du palais
  - Parois du nasopharynx
  - Cavités nasales

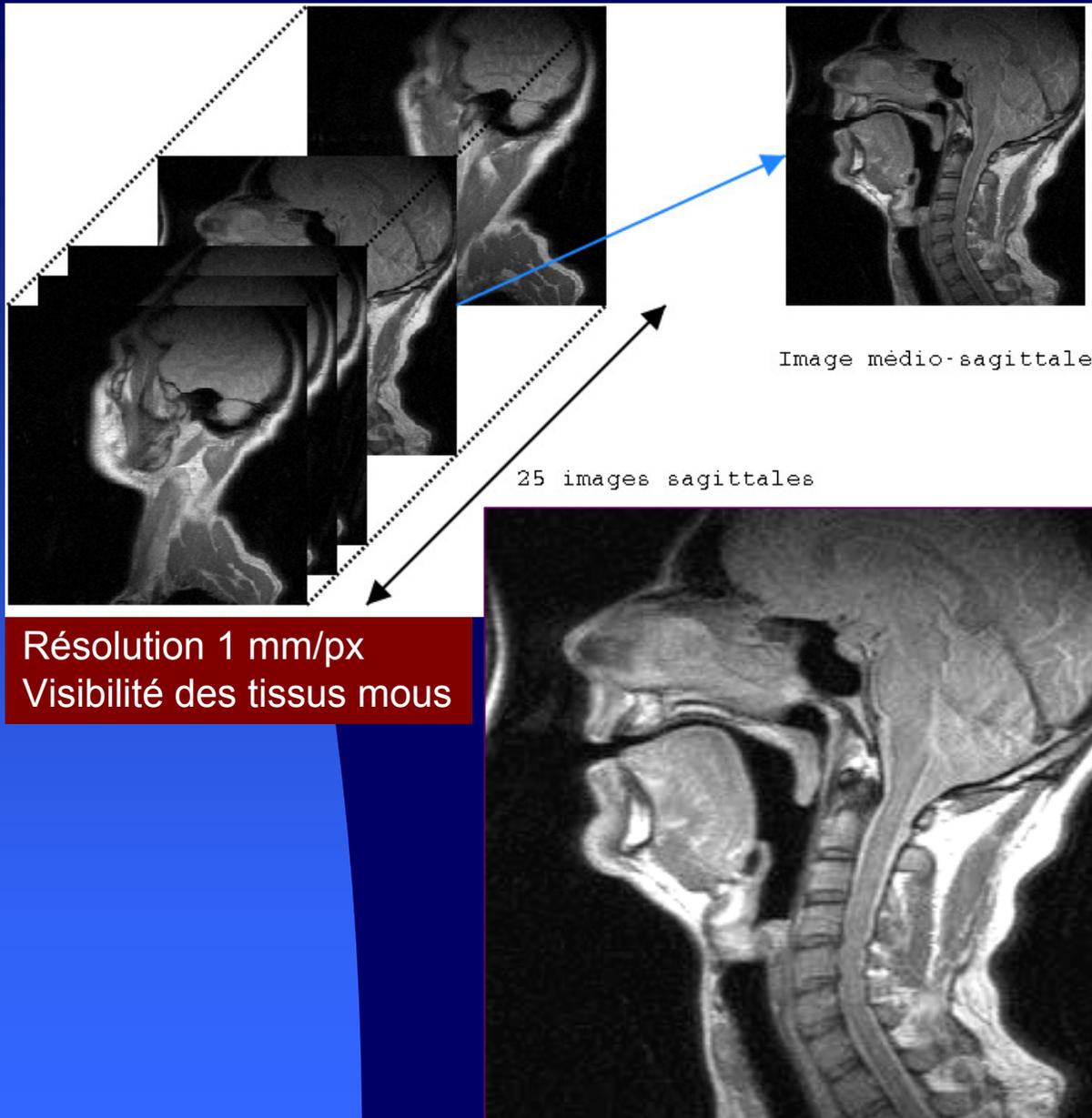
- Sujet unique



# Démarche de modélisation



# Images IRM



46 blocs 3D d'images  
sagittales à caler

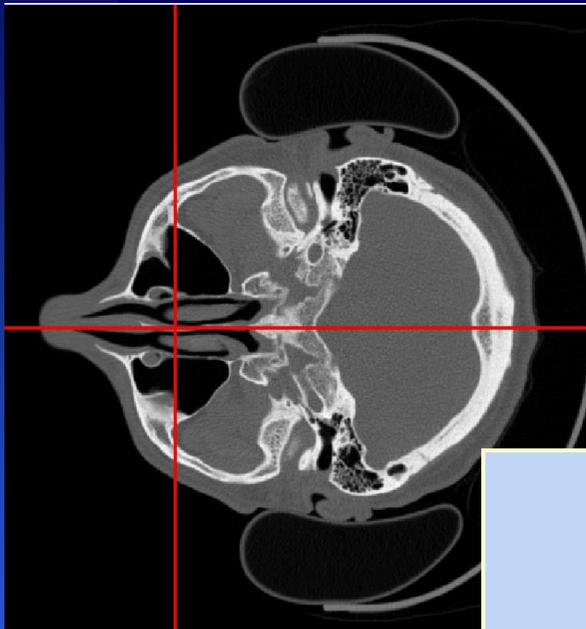


**Nécessité d'une  
reconstruction 3D des  
structures rigides**



Pas de visibilité des  
structures osseuses

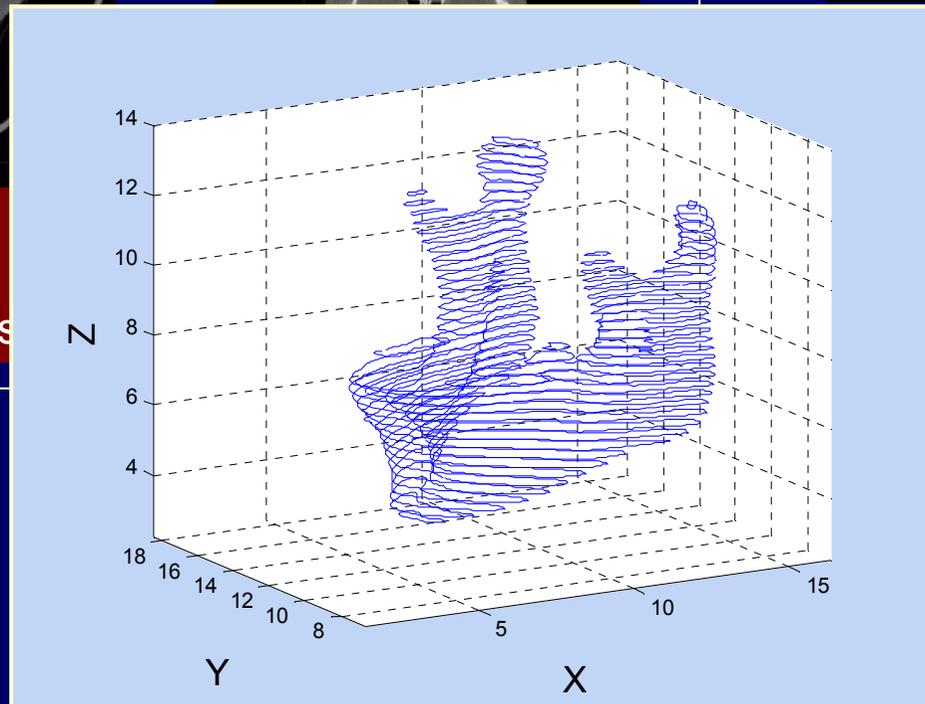
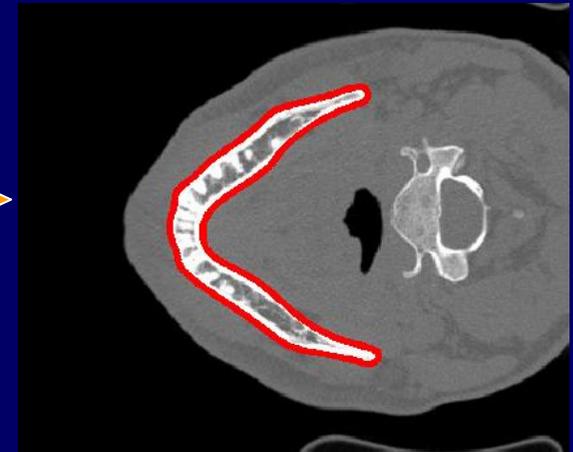
# Images Tomodensitométriques



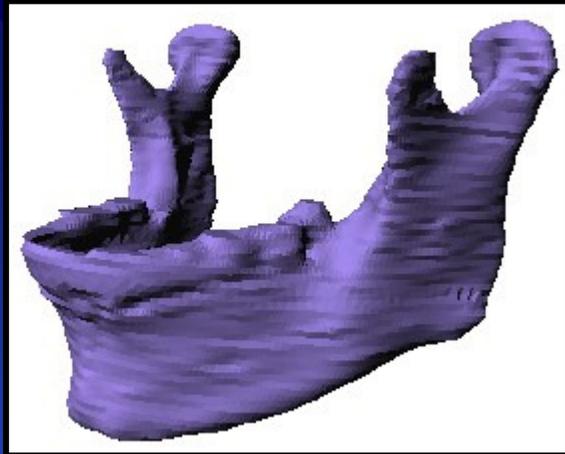
149 images axiales  
Résolution 0.5 mm/px  
Visibilité des structures osseuses



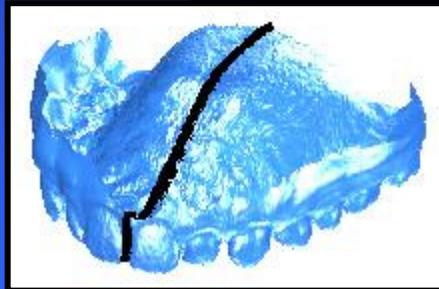
512 images sagittales



# Structures rigides

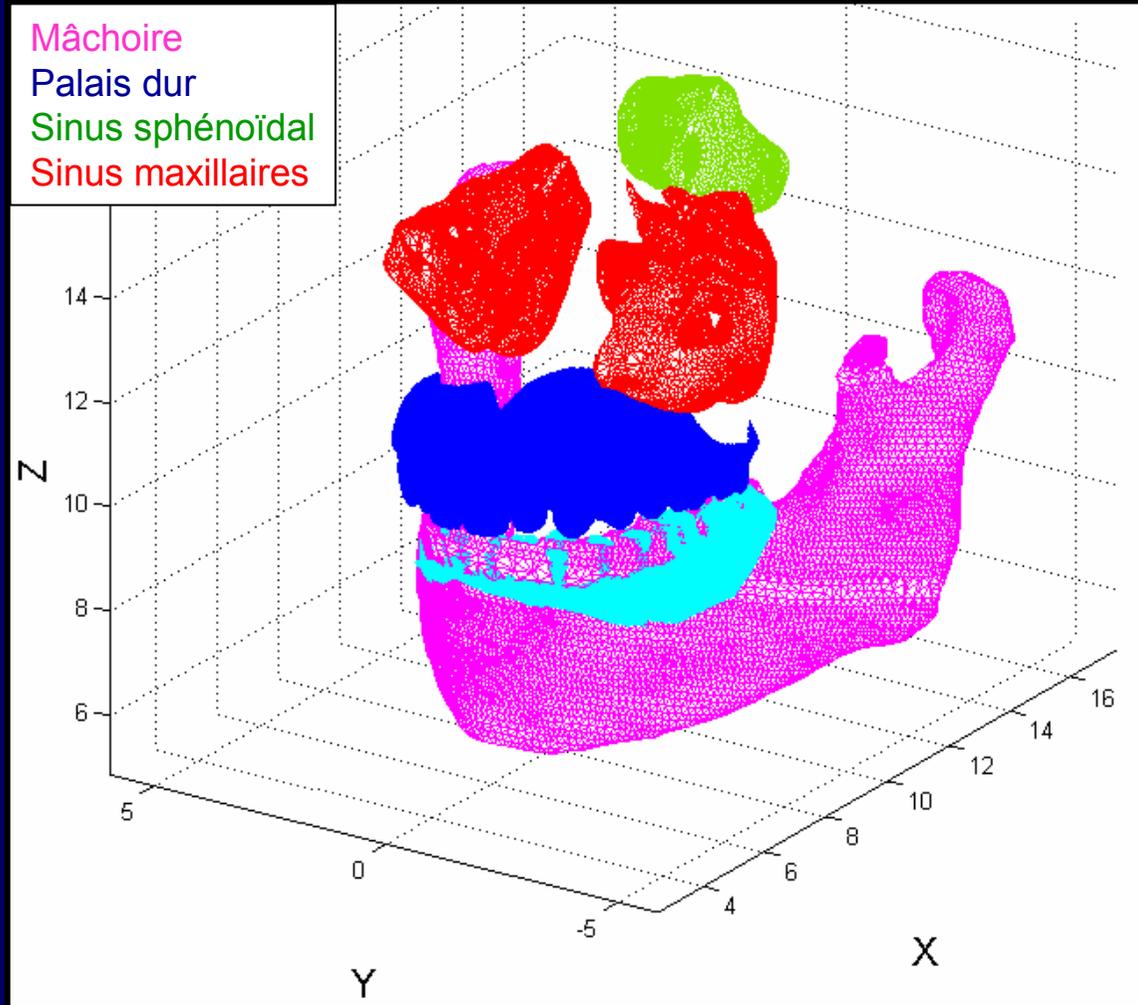


Mâchoire



Palais dur

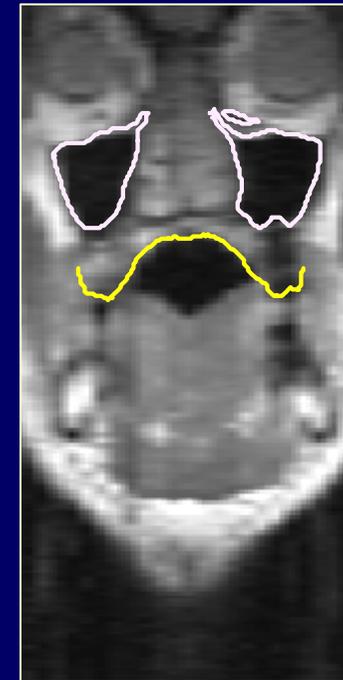
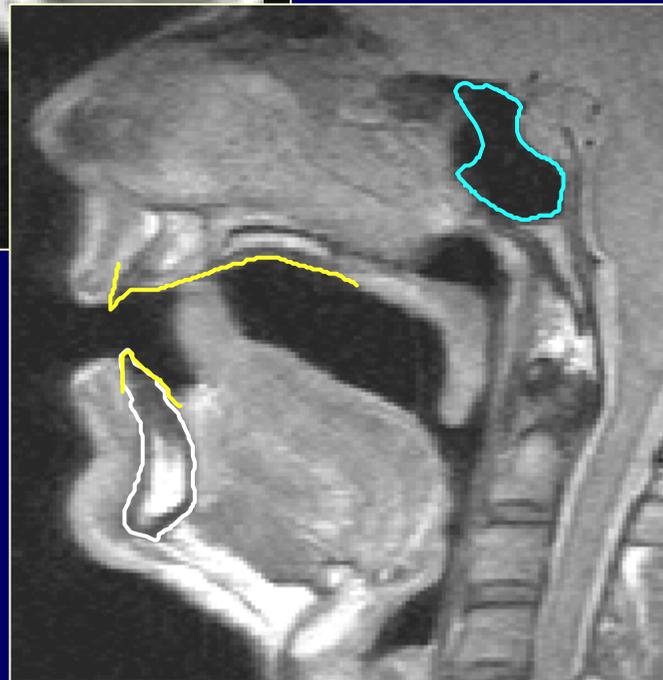
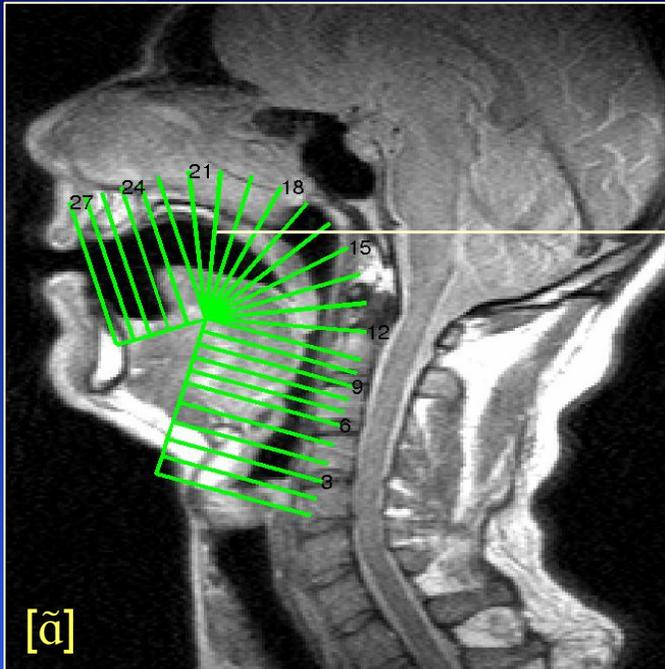
Mâchoire  
Palais dur  
Sinus sphénoïdal  
Sinus maxillaires



- Référence fixe
- Aide à l'interprétation des IRM

# Prétraitement des images IRM

## 1. Recoupe perpendiculaire des images



## 2. Superposition des structures rigides sur les IRM

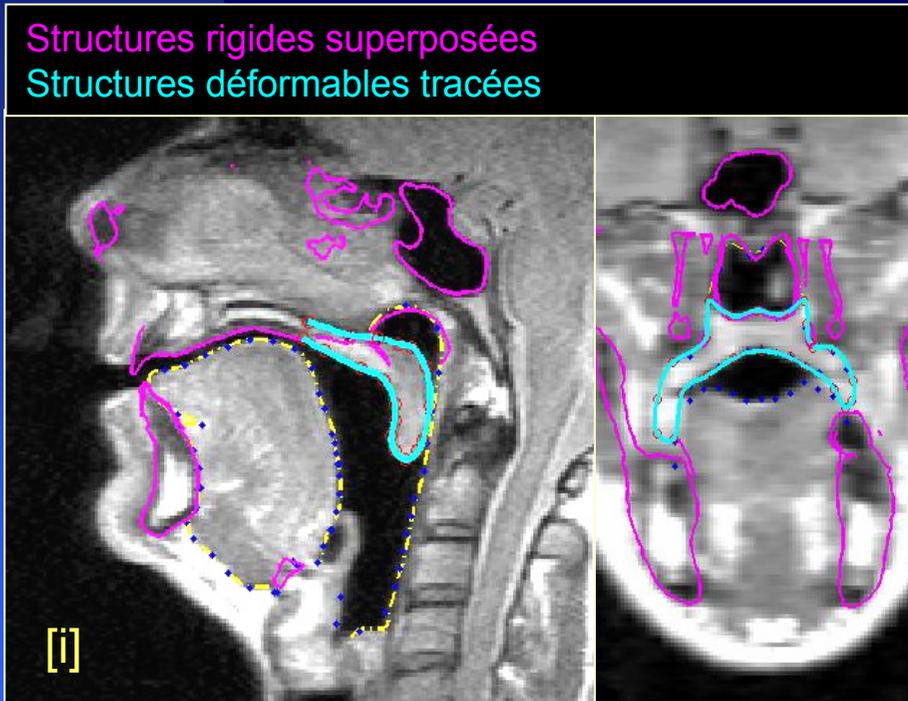
- Calage dans un repère commun
- Meilleure interprétation des IRM

# Structures déformables (1)

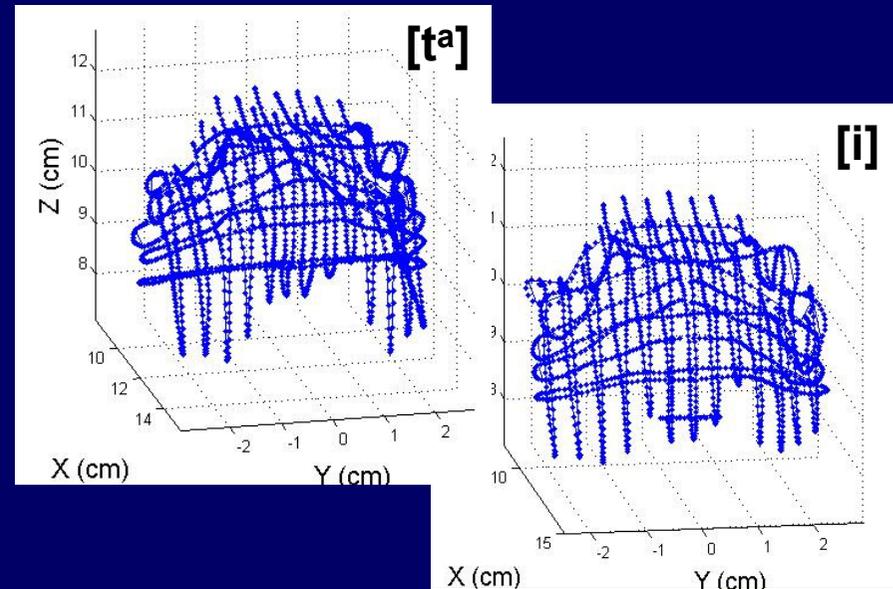
## 3. Tracés manuels :

- voile du palais
- paroi du pharynx

Structures rigides superposées  
Structures déformables tracées

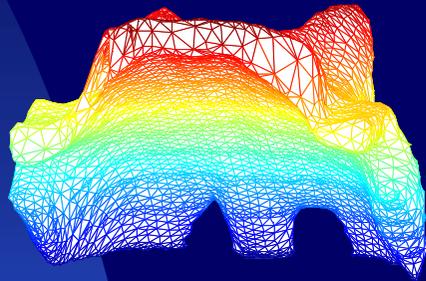


## 4. 46 formes 3D du voile du palais et de la paroi du nasopharynx

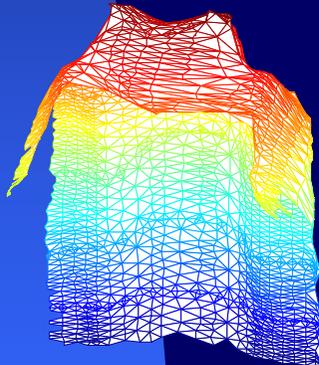


# Structures déformables (2)

4. Définition d'un maillage générique

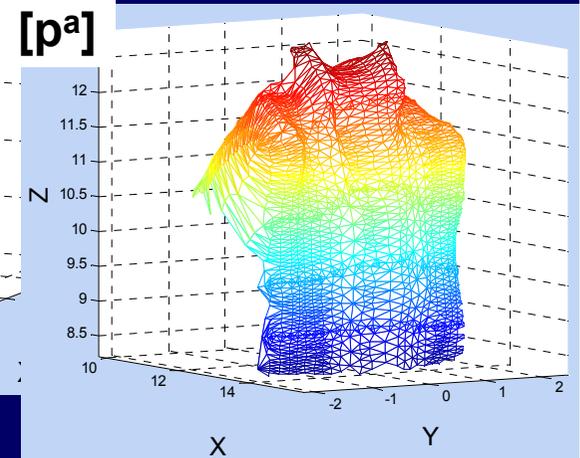
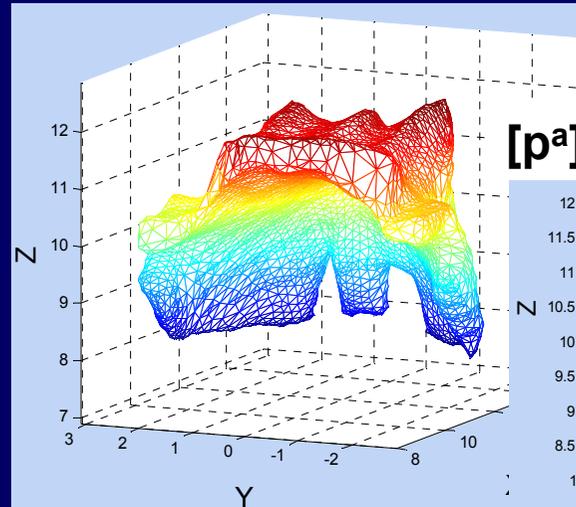


Voile du palais: 5239 points



Paroi du nasopharynx: 2110 points

5. Déformation du maillage générique vers les 46 cibles articulaires

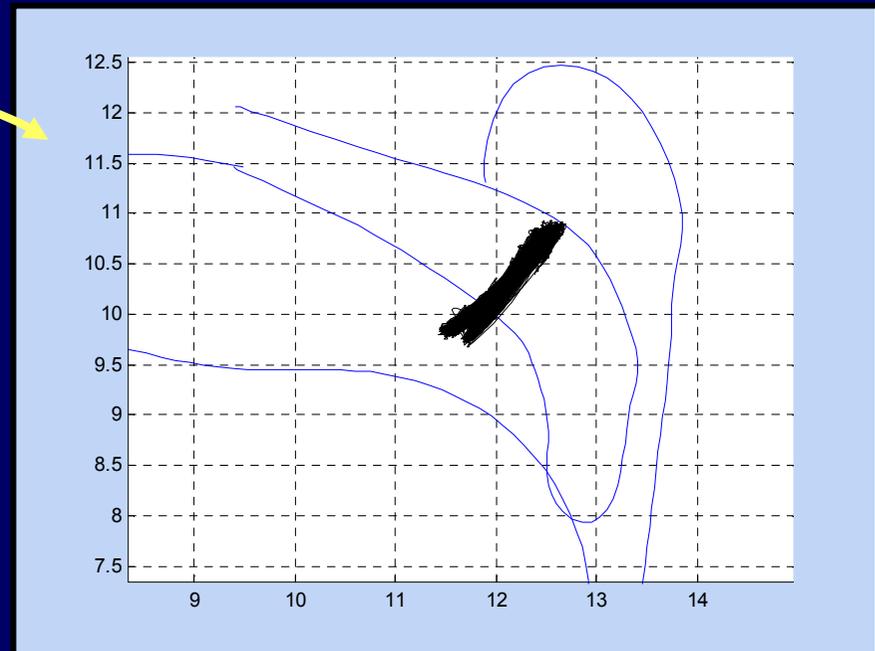
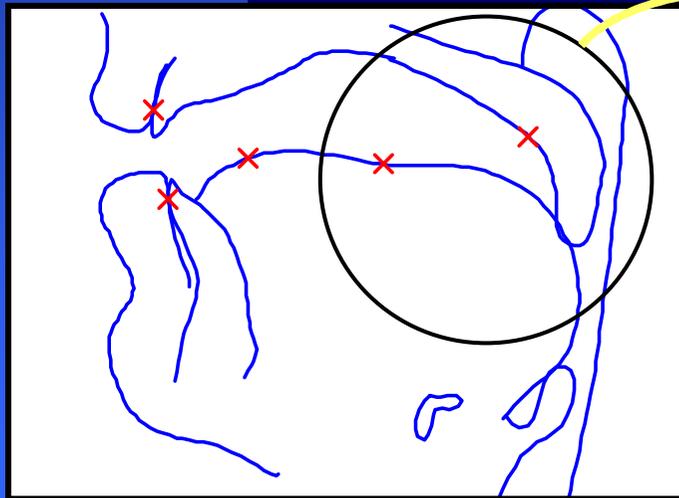


× 46 articulations du corpus

Cohérence entre le processus et les déformations réelles?

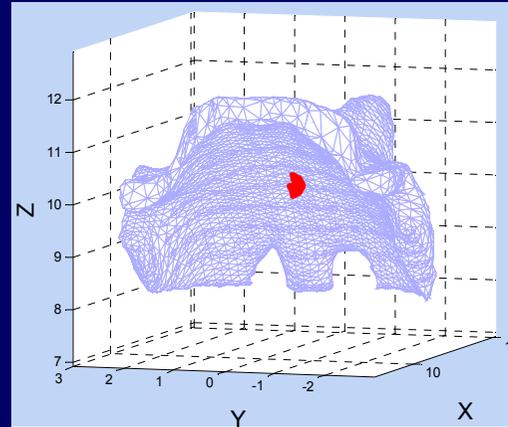
# Enregistrements EMA

- *Articulographie Électromagnétique* : enregistrement de la position d'un point de chair dans le plan médiosagittal
- Corpus de parole **dynamique**: VCV (V=14, C=16)

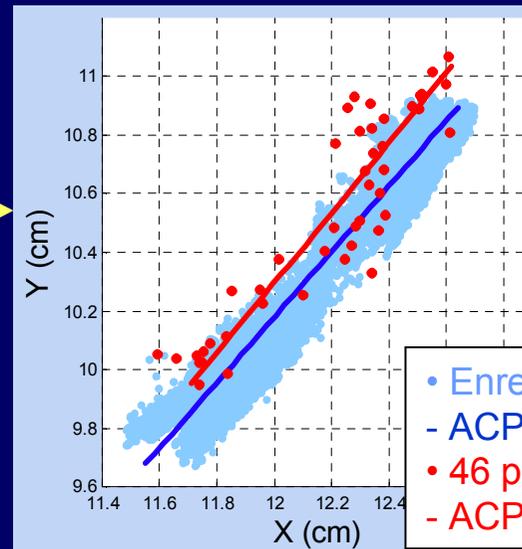
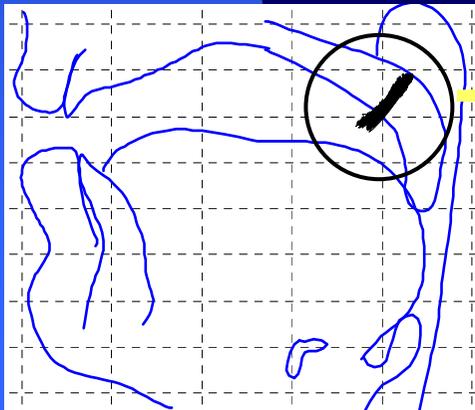


# Liens maillages - EMA

- Détermination d'un point équivalent EMA sur le maillage générique



- Déplacement de ce point par le processus de déformation du maillage



- Enregistrements EMA
- ACP EMA
- 46 points du maillage déformé
- ACP points du maillage

⇒ **Validation de l'approche**

# Les cavité nasales (1)

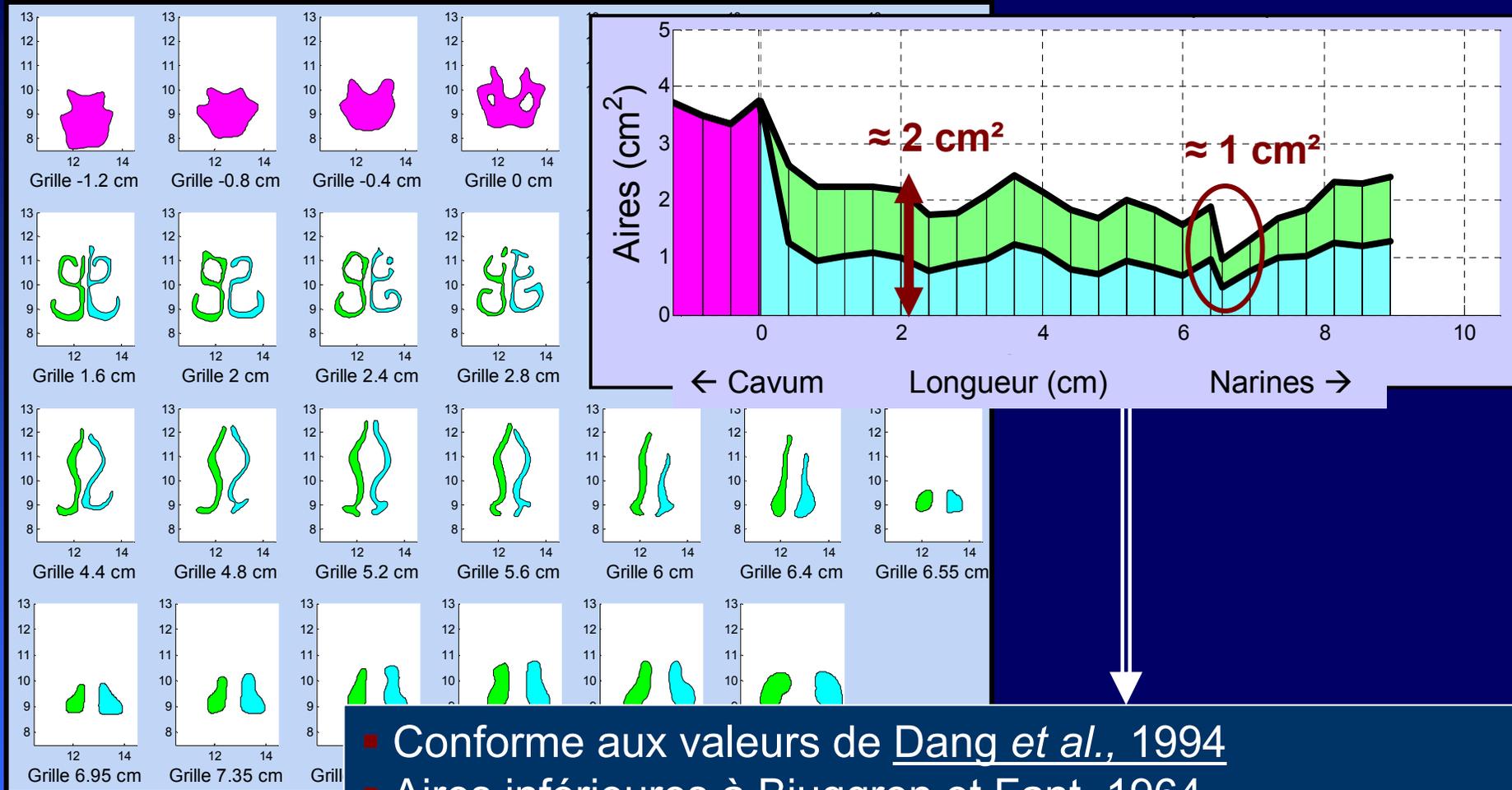


IRM coronales  
Résolution 1 mm/px  
Visibilité des muqueuses



Milieu  
Droite  
Gauche

# Les cavité nasales (2)



- Conforme aux valeurs de Dang et al., 1994
- Aires inférieures à Bjuggren et Fant, 1964
- Seuil narinaire supérieur à House et Stevens, 1956

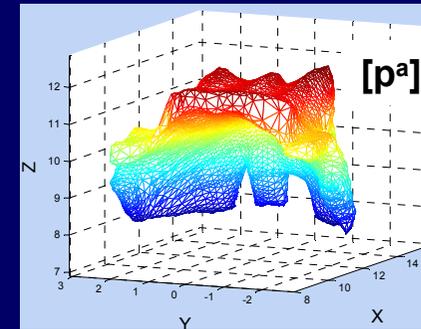
# Données articulatoires : bilan

- Calage de données de nature différente
- Maillages 3D des structures rigides
- Maillages 3D des tissus mous déformés pour 46 cibles articulatoires
  - Voile du palais et paroi du nasopharynx
  - Précision < 1 mm
  - Cohérents entre eux pour une analyse statistique
- Données 3D statiques et EMA dynamiques cohérentes
- Seuil narinaire  $\approx 1 \text{ cm}^2$

# Modélisation linéaire

46 observations représentatives de la tâche de parole:

- Voile du palais:  $5239 \times 3$  variables
- Paroi du nasopharynx:  $2110 \times 3$  variables



Analyse en Composantes Principales

**Composantes principales** ⇔ **Paramètres de contrôle du modèle**

Évaluation

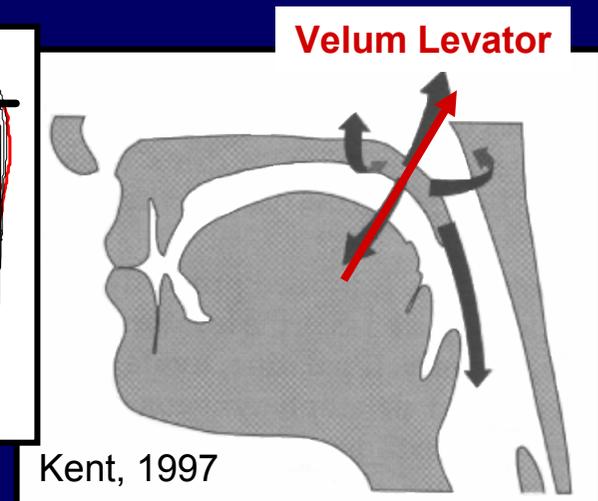
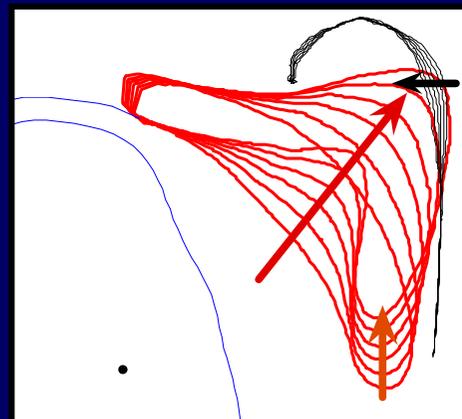
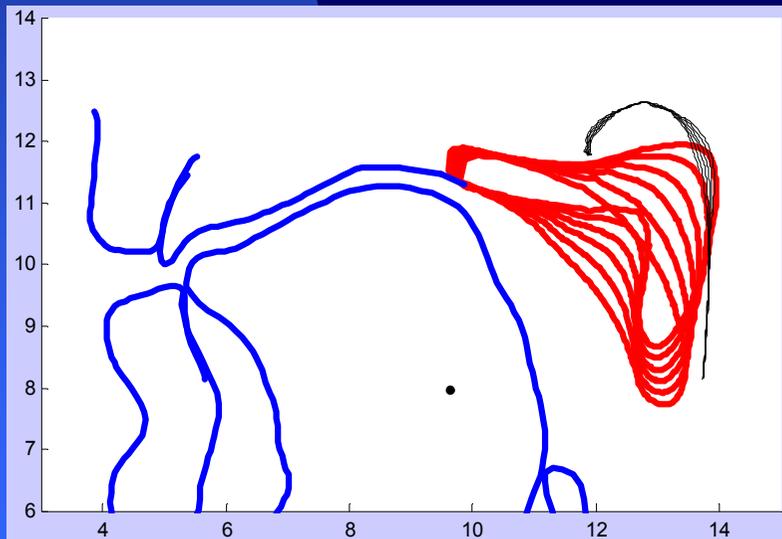
- Pourcentage d'explication de la variance des données par composante
- Erreur de reconstruction RMS du modèle en cm

# 1<sup>er</sup> paramètre : VL

ACP sur le voile du palais 3D

VL: 1 <sup>er</sup> paramètre ACP	Ex. Var. (%) (sur $\pm 1.5$ cm)	Erreur de reconst. RMS cum. (cm)
<b>Voile du palais</b>	<b>83 %</b>	0.08 cm
Paroi du pharynx	47 %	0.07 cm

⇒ **1 paramètre dominant**



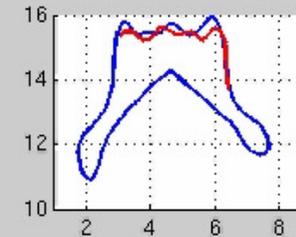
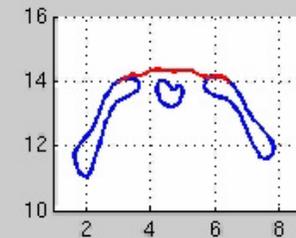
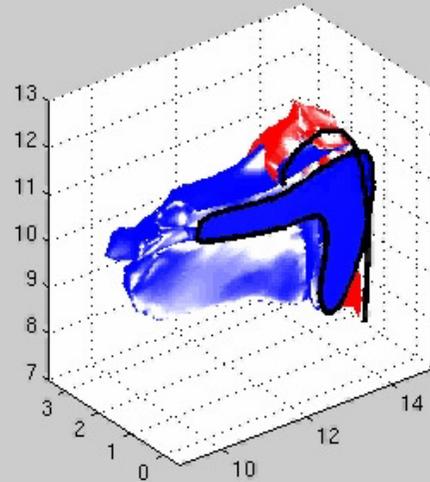
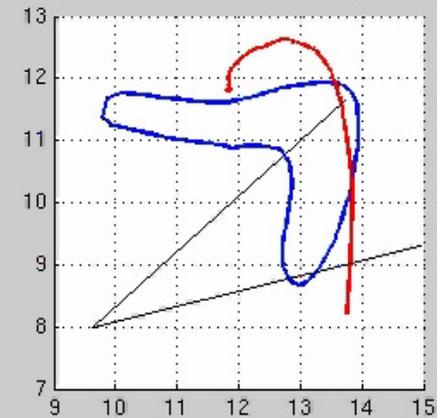
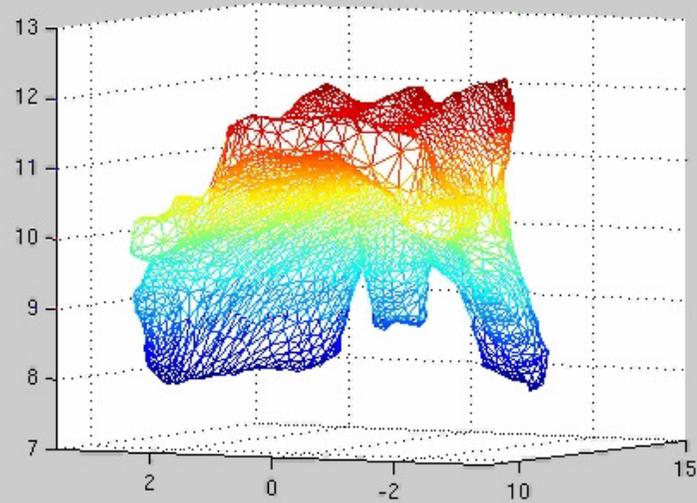
VL = *Velum Levator* et *Bourrelet de Passavant*

Voile du palais

Paroi du nasopharynx

Plan médiosagittal

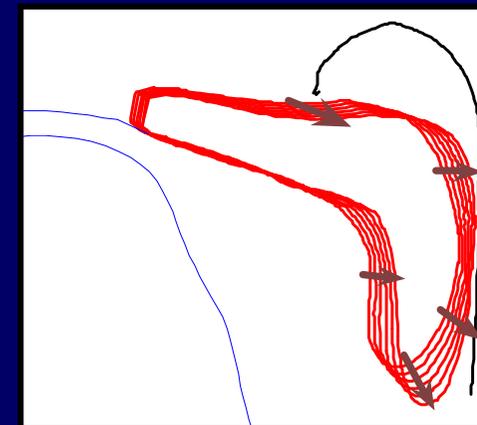
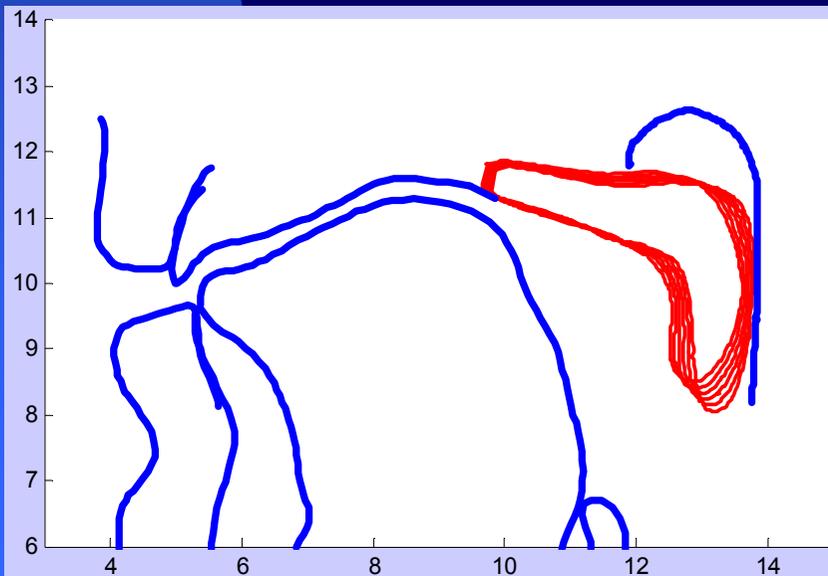
# 1<sup>er</sup> paramètre : VL



# 2<sup>ème</sup> paramètre : VS

## ACP sur le voile du palais 3D

VS: 2 <sup>ème</sup> paramètre ACP	Ex. Var. (%) (sur $\pm 1.5$ cm)	Erreur de reconst. RMS cum. (cm)
<b>Voile du palais</b>	<b>6 % (cum. 89 %)</b>	0.06 cm
Paroi du pharynx	5 % (cum. 52 %)	0.06 cm



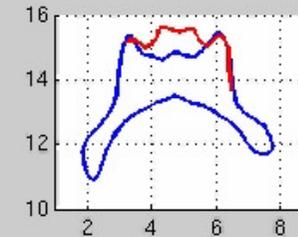
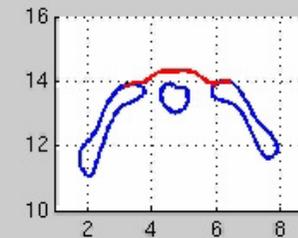
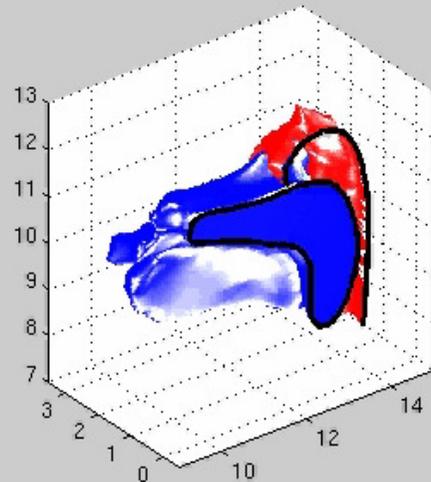
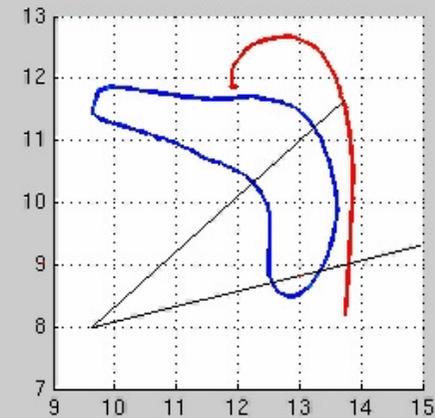
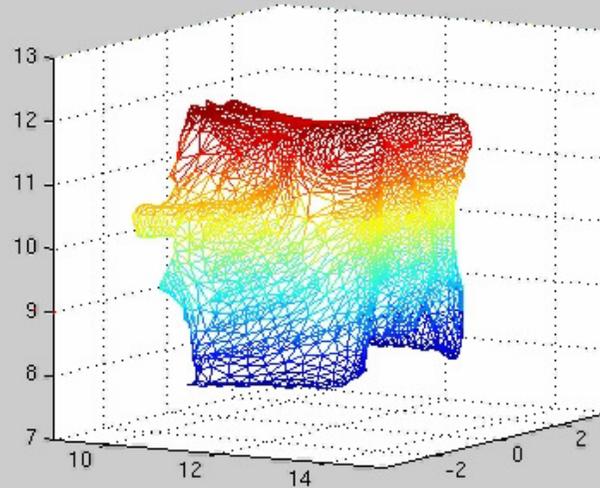
- Faible amplitude
- Actif sur l'aire de couplage nasal

Voile du palais

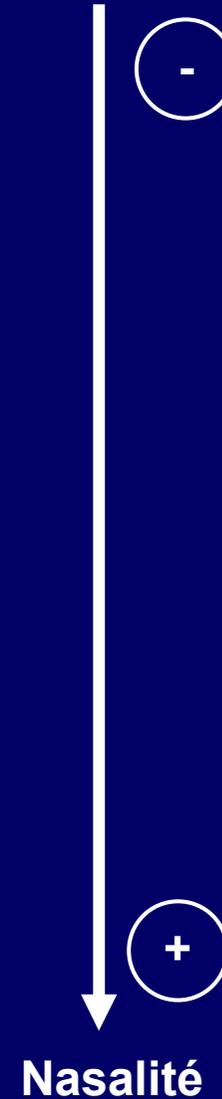
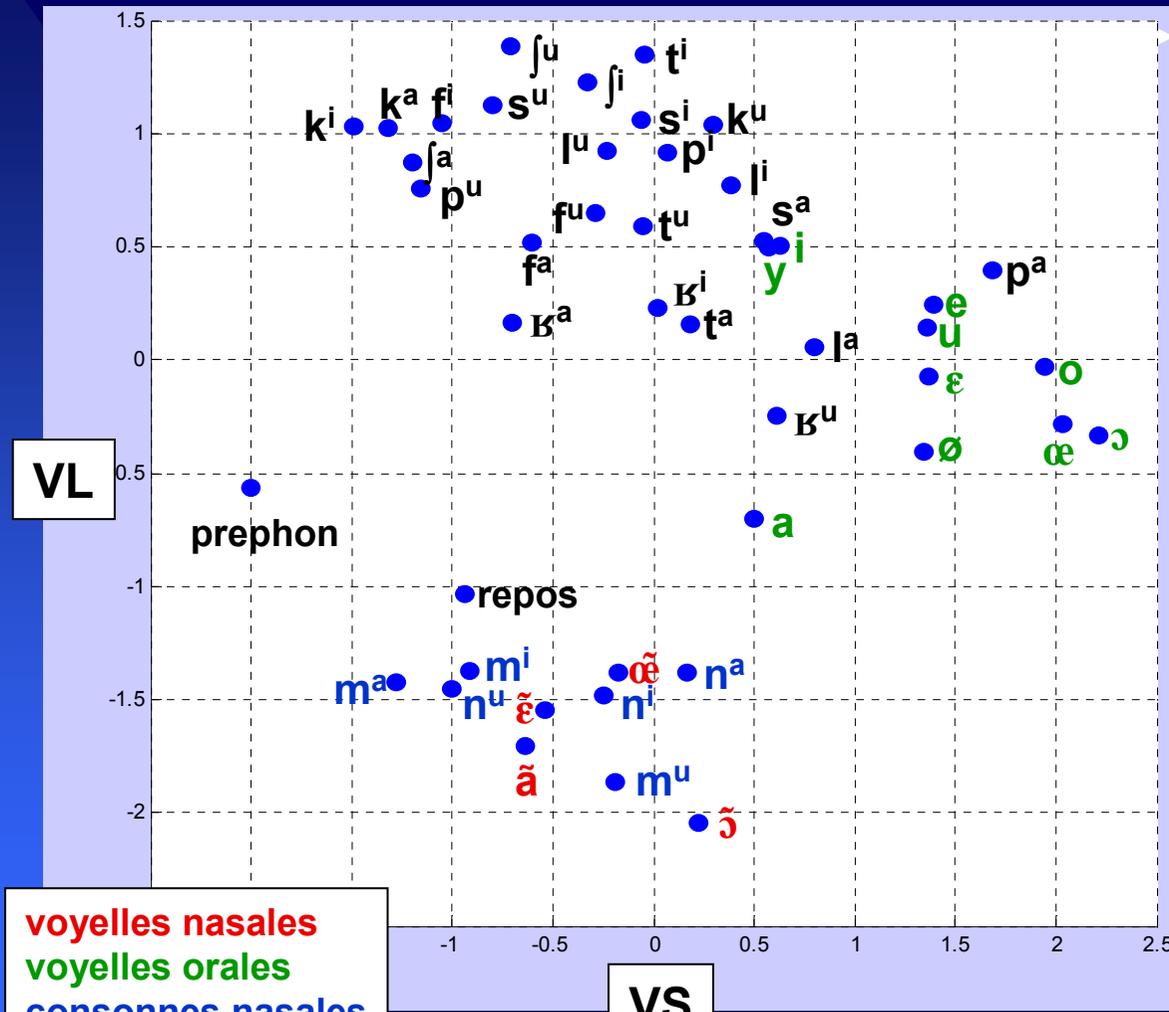
Paroi du nasopharynx

Plan médiosagittal

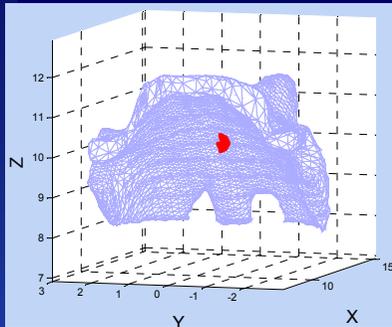
# 2ème paramètre : VS



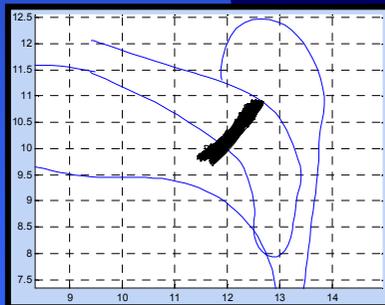
# Représentation VL / VS



# Liens modèle articulaire 3D - EMA

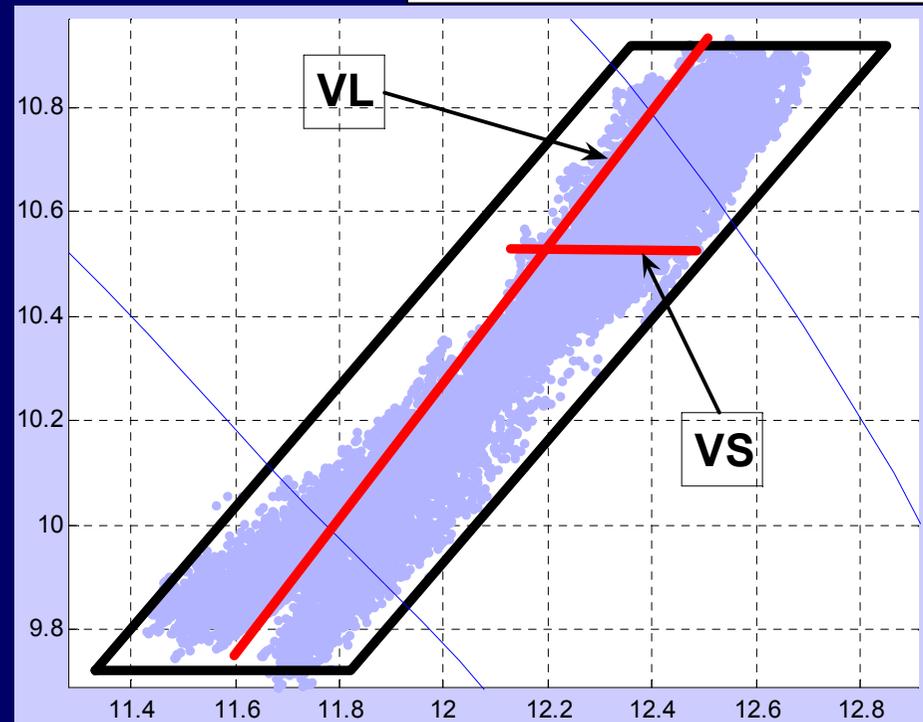


- Modèle articulaire
- Point équivalent EMA



Enregistrements EMA

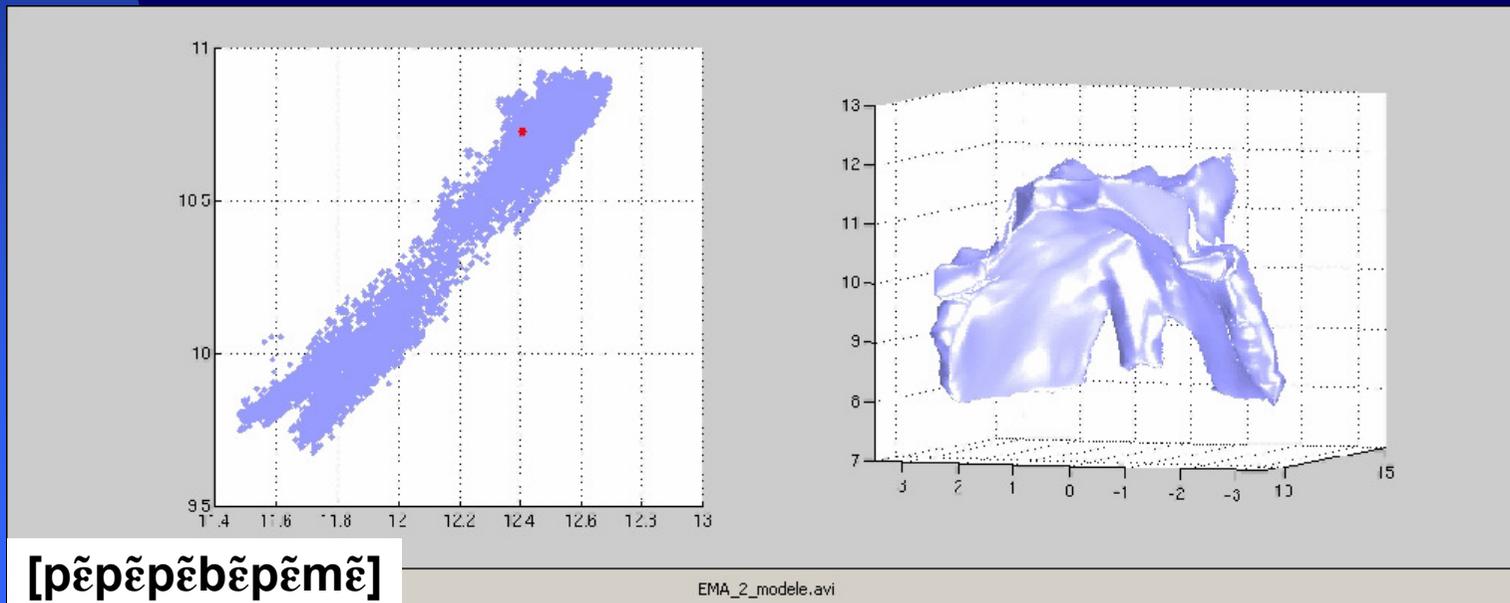
- Enregistrements EMA
- Point équivalent EMA du maillage



⇒ Correspondance des deux espaces

# Contrôle du modèle à partir d'EMA

- Inversion des paramètres VL et VS à partir du *Point équivalent EMA* → Erreur RMS 3D = 0.07 cm
- Contrôle du modèle à partir des enregistrements EMA



⇒ Reconstruction 3D à partir d'enregistrements dynamiques EMA 2D

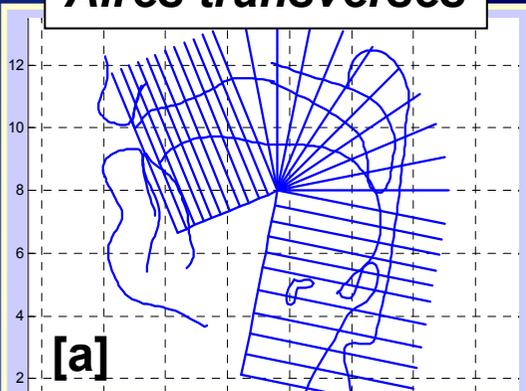
# Modèle tridimensionnel : bilan

- Modèle articulatoire à 2 paramètres:
  - VL : Voile du palais (83 %) + Paroi du nasopharynx
  - VS : Voile du palais (6 %)
  - Précision < 1 mm
- Cohérence enregistrements EMA + Modèle
- Corrélation 2D / 3D : erreur RMS de reconstruction du 3D à partir du 2D < 1 mm

# Modèle acoustique

Hypothèse:  $F < 5000 \text{ Hz} \Leftrightarrow$  Propagation plane

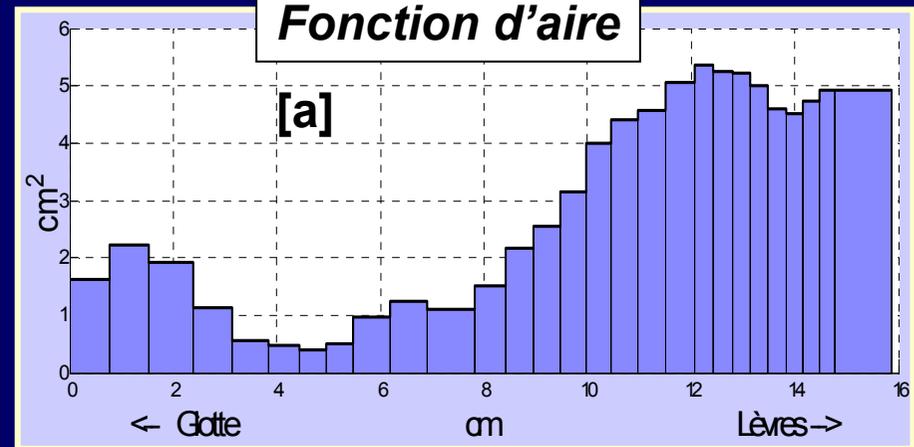
**Aires transverses**



Propagation le long  
de la ligne médiane

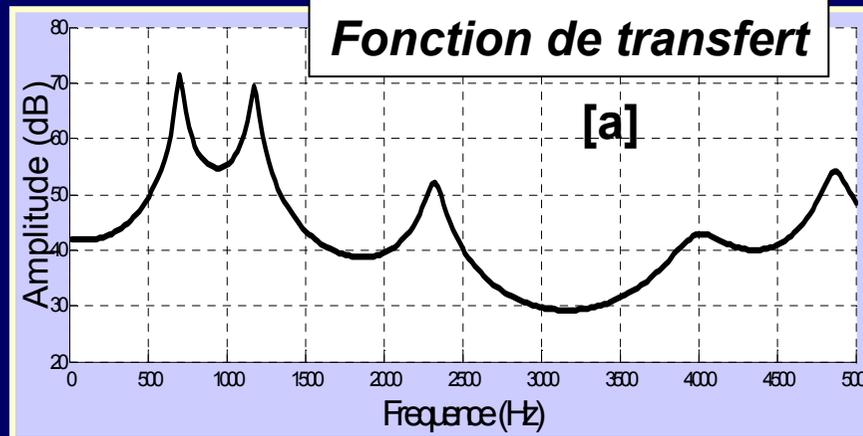


**Fonction d'aire**

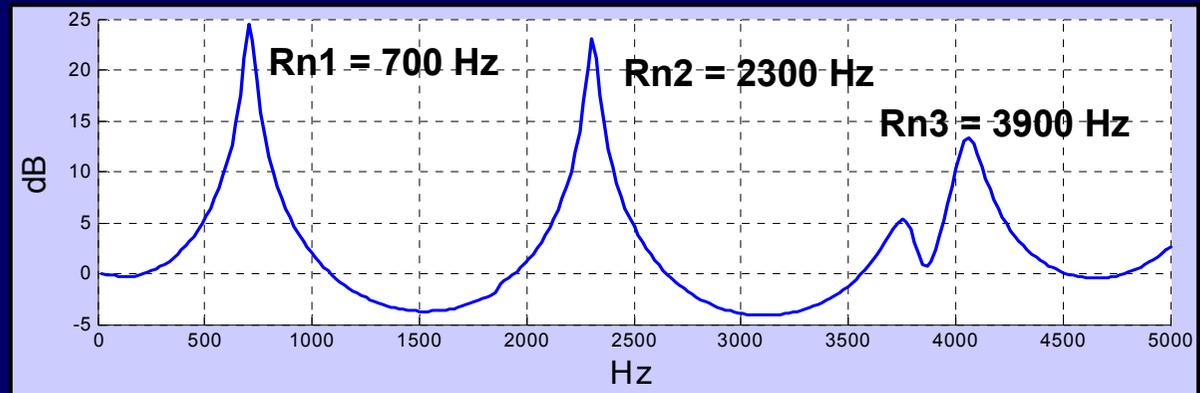
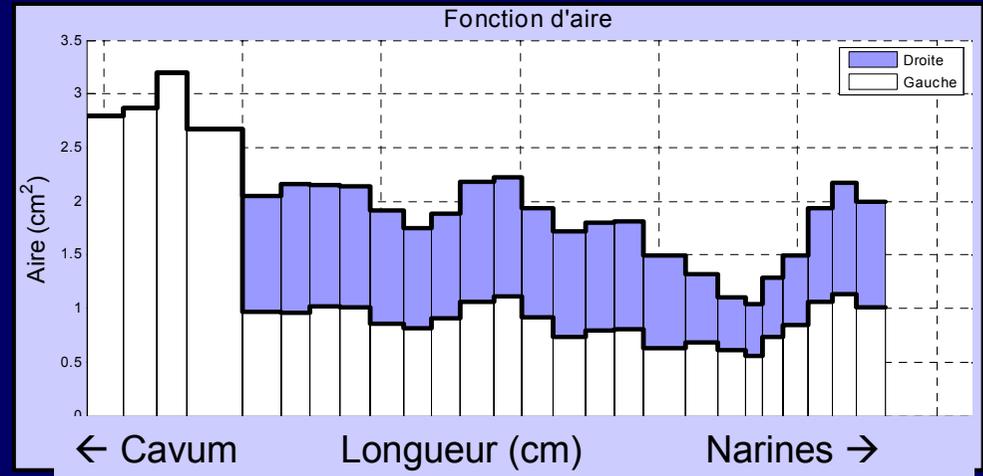
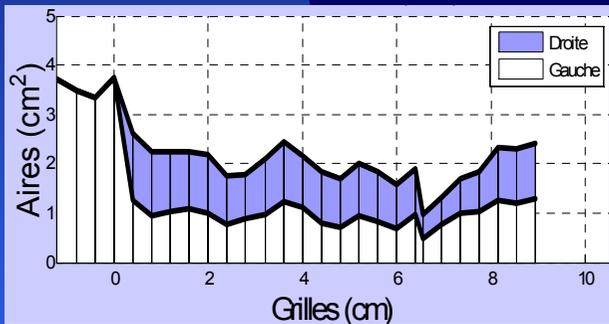
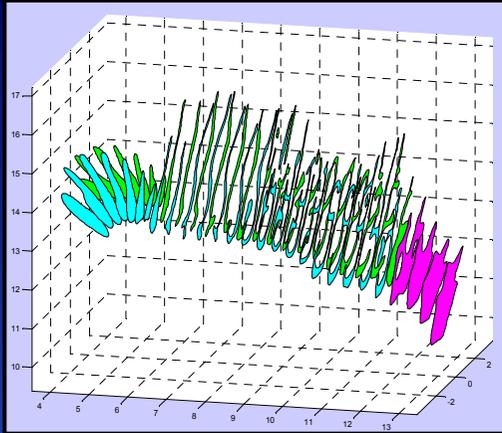


Analogie électrique

**Fonction de transfert**



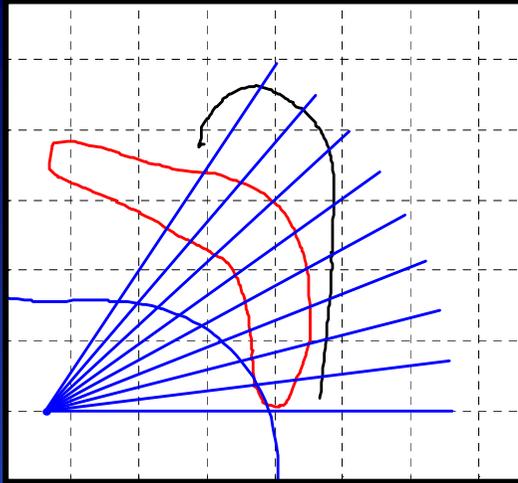
# Les cavités nasales



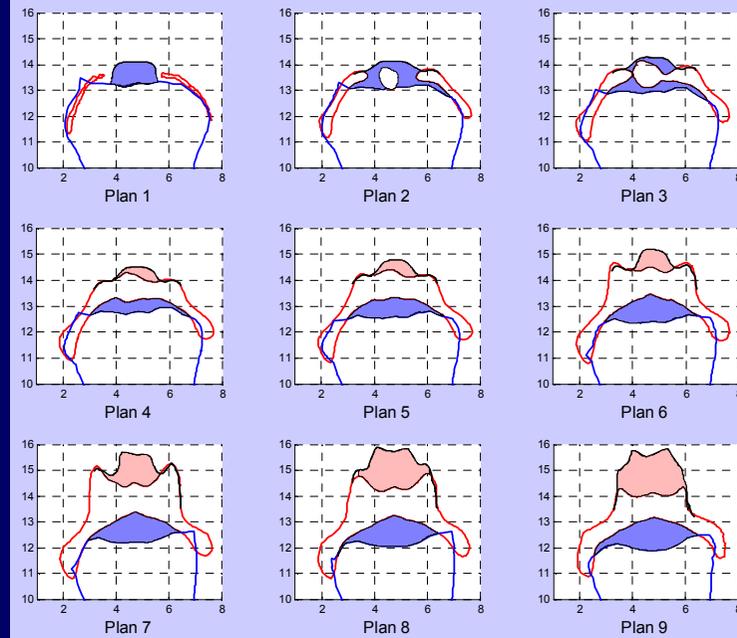
- Seuil narinaire  $\approx 1 \text{ cm}^2$
- Résonance approximativement  $\frac{1}{4}$  d'onde
- Faible dissymétrie (R3)

**Hypothèse de constriction  
narinaire non vérifiée**

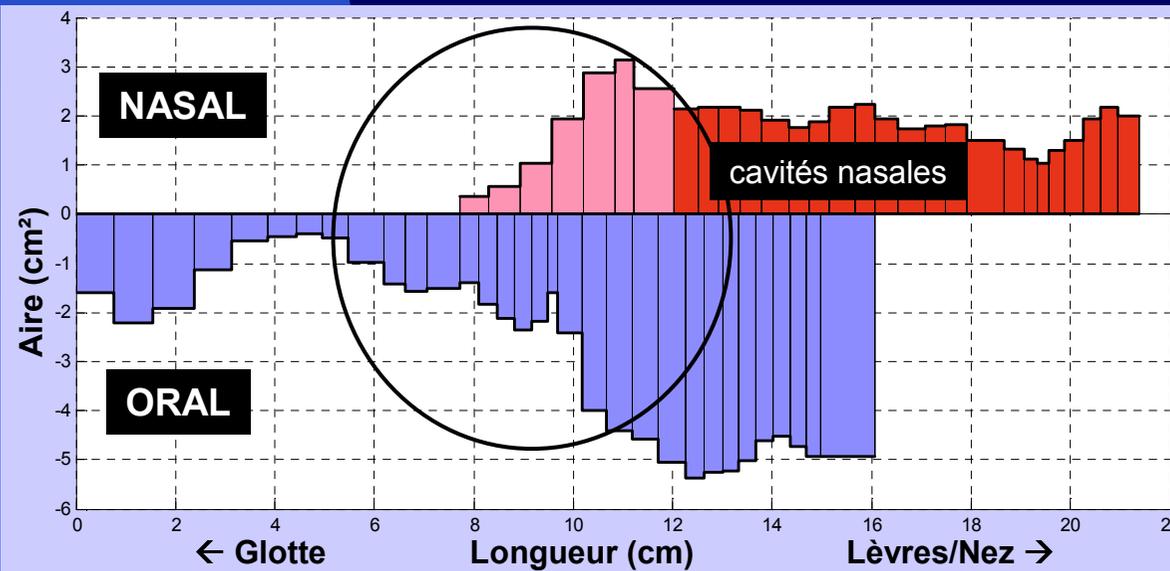
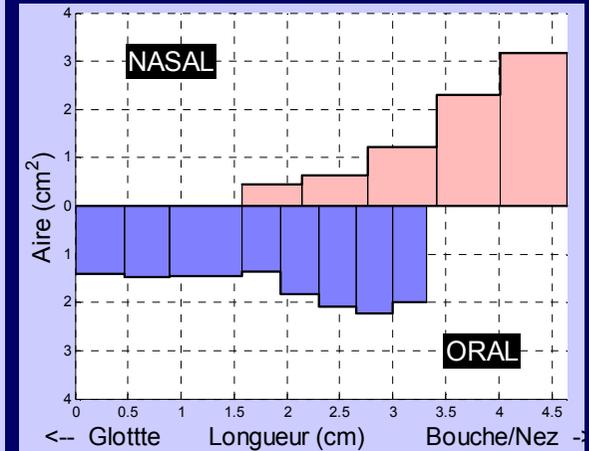
# Région vélaire : fonction d'aire



voile du palais (modèle)  
paroi du nasopharynx (modèle)  
langue (fixe)



nasal  
oral



Intégration dans un  
conduit oral fixe :

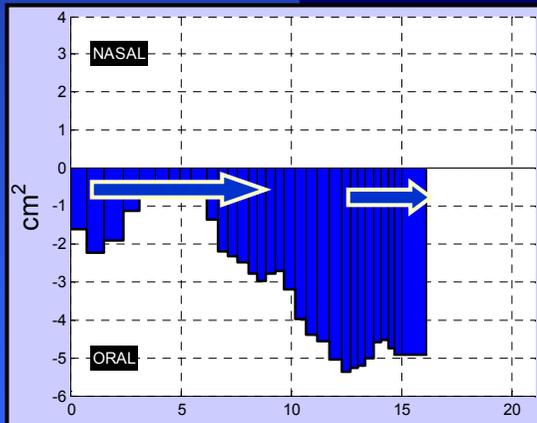
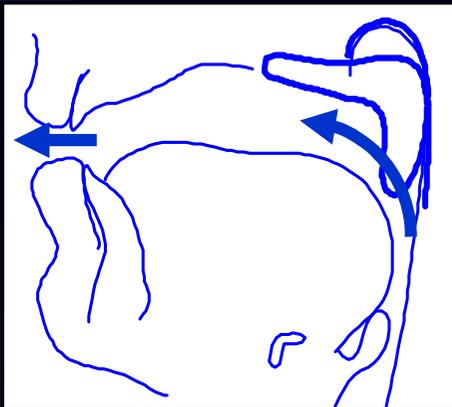
[a, i, u, ã, ẽ, œ, õ]

voyelles  
cardinales

voyelles  
nasales

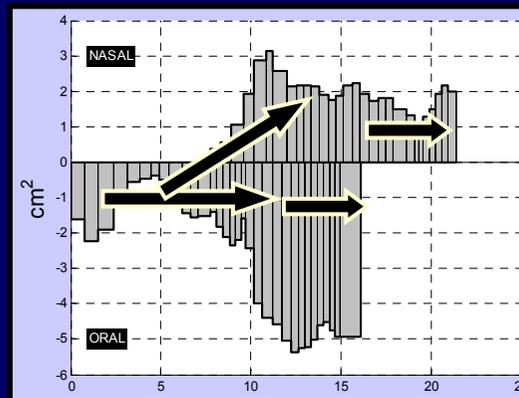
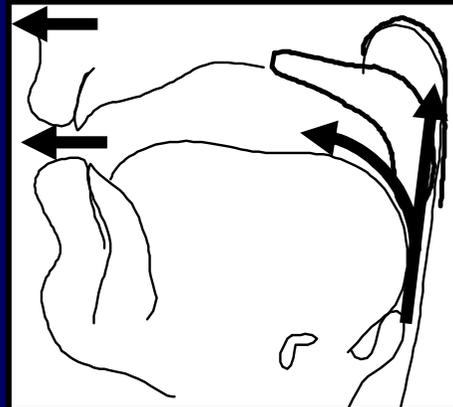
# Bornes articulatoires de la nasalité

Configuration orale



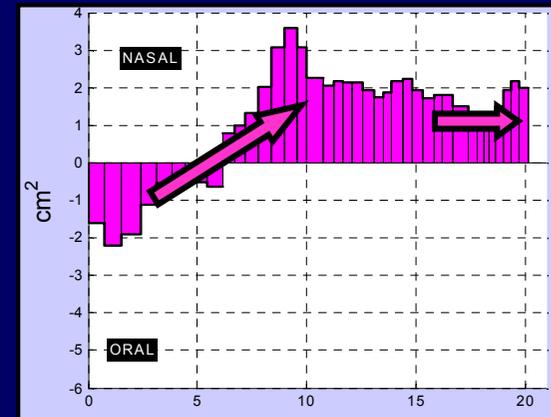
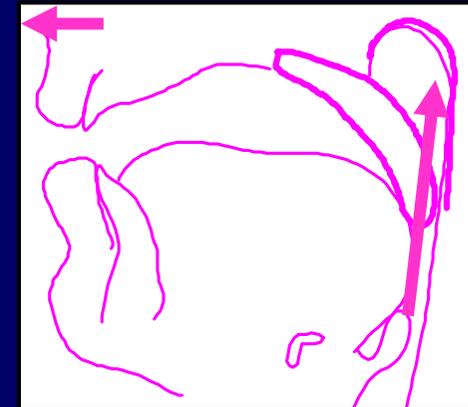
$$FCTR = \frac{D_L}{D_G}$$

Configuration nasale



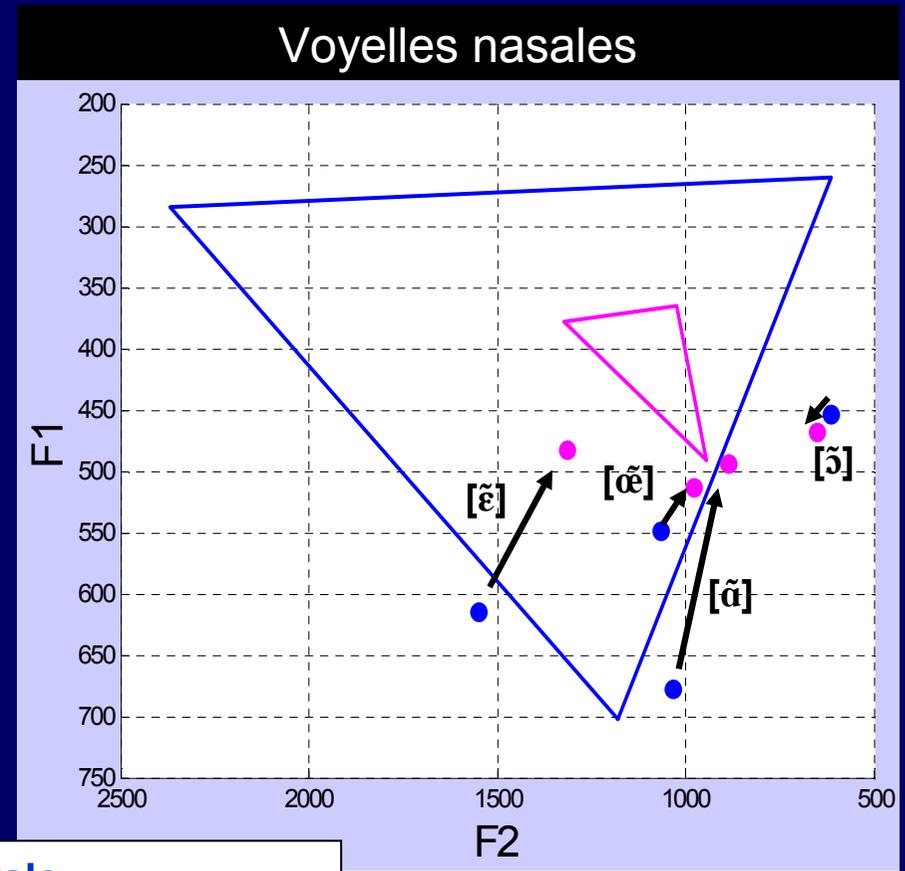
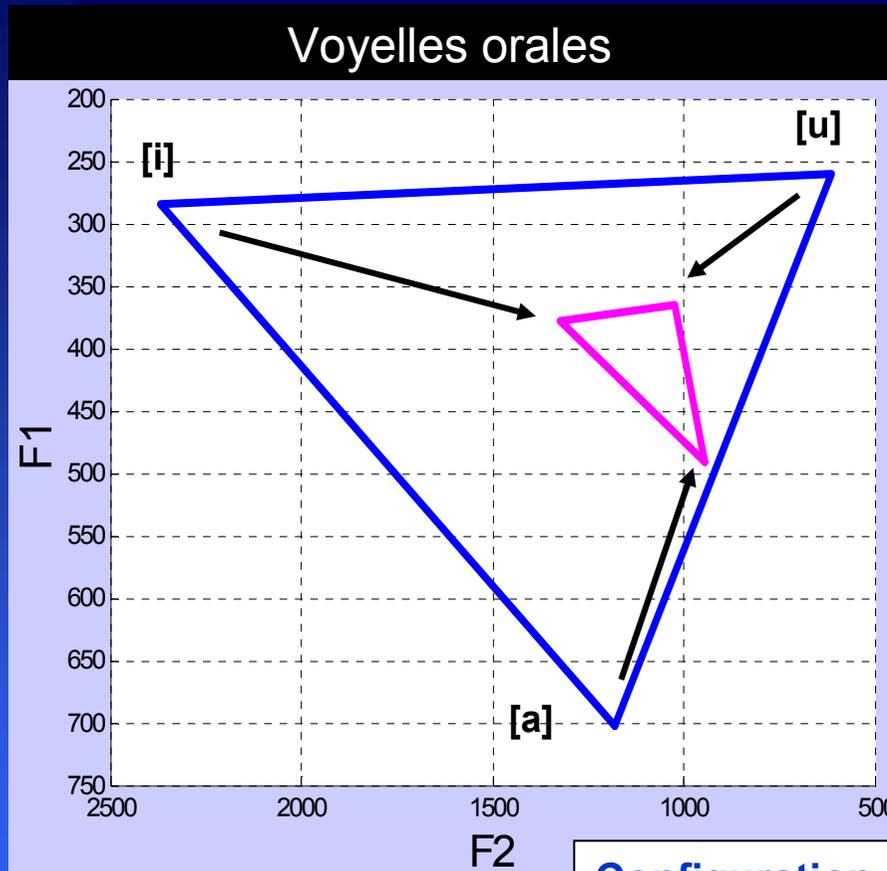
$$FCTR = \frac{D_L + D_N}{D_G}$$

Configuration nasopharyngée



$$FCTR = \frac{D_N}{D_G}$$

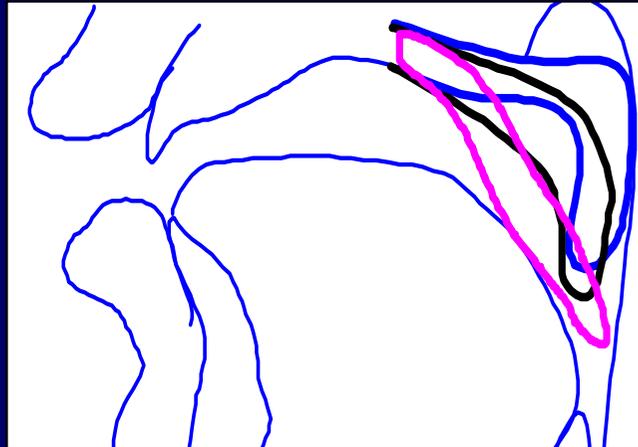
# Articulations extrêmes : basses fréquences



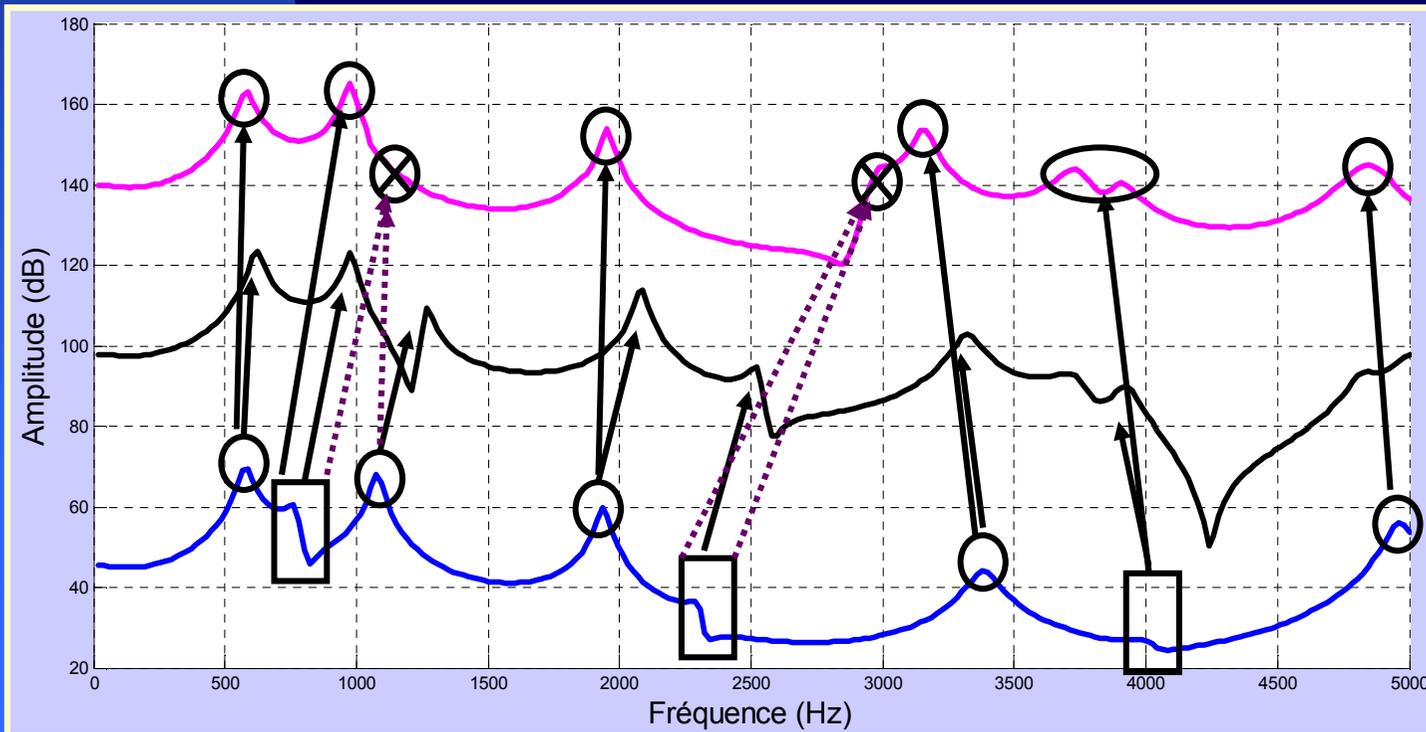
Configuration orale  
Configuration nasopharyngée

⇒ **Zone nasale** autour de 450 Hz – 1100 Hz

# Couplage acoustique

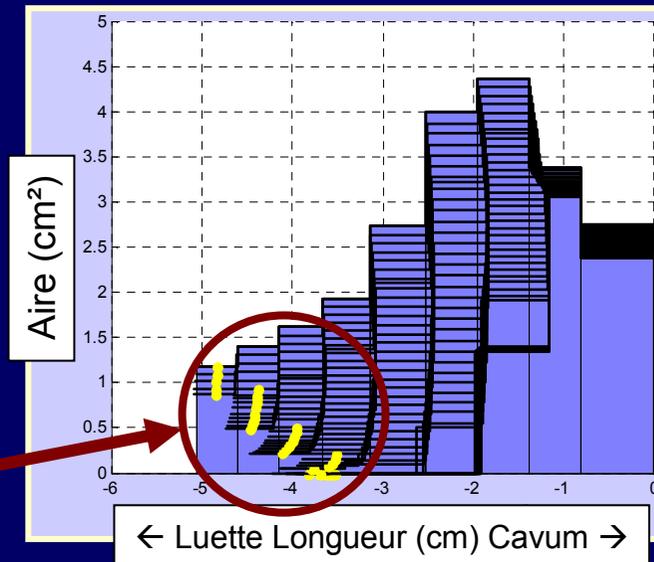


- ⇒ Résonances issues du couplage
- ⇒ Résonances issues des formants oraux



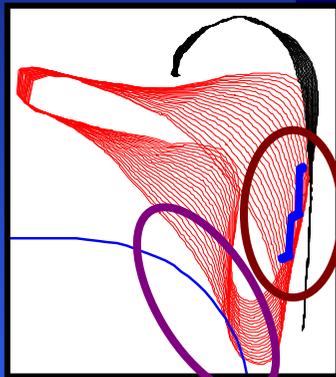
# VL : fonction d'aire

## Fortes variations du port vélopharyngé

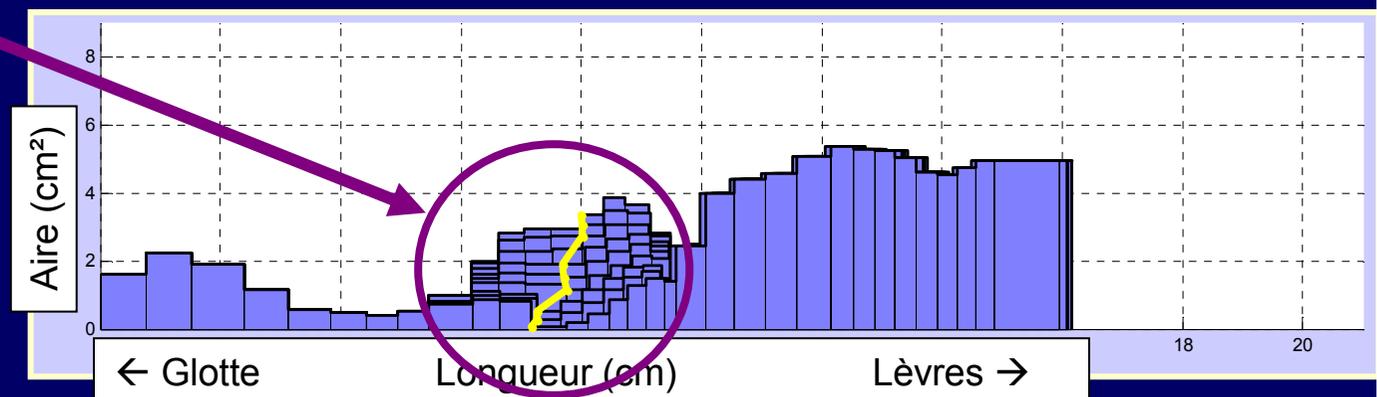


$\Delta \text{aire} = 0 \text{ cm}^2 \rightarrow 0.8 \text{ cm}^2$

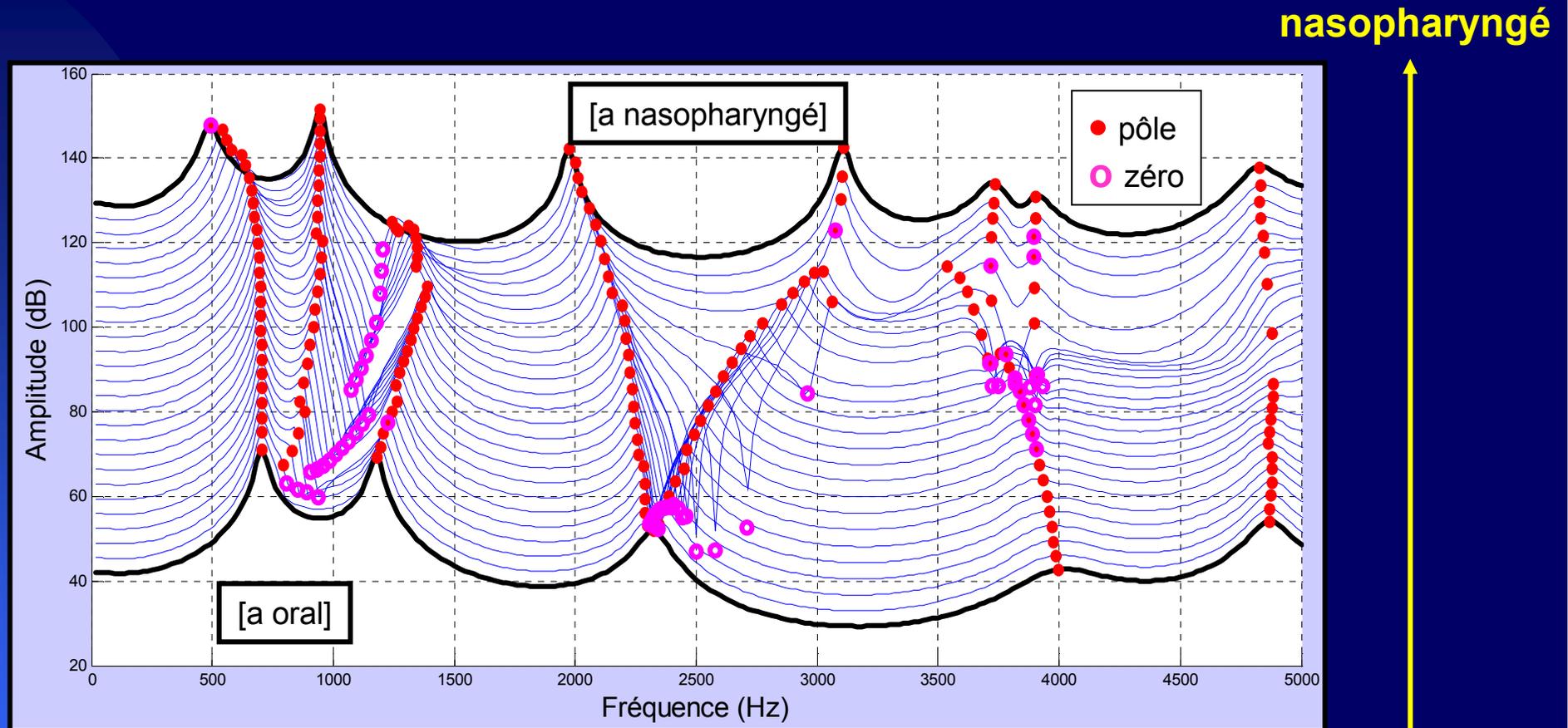
$\Delta \text{position} > 1 \text{ cm}$



## Fortes variations orales



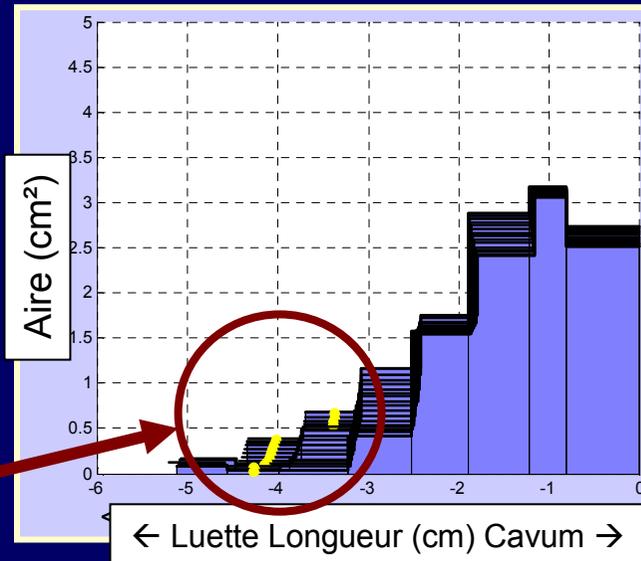
# VL : acoustique



⇒ Variations des résonances issues des formants oraux jusqu'à 30 % suivant la voyelle

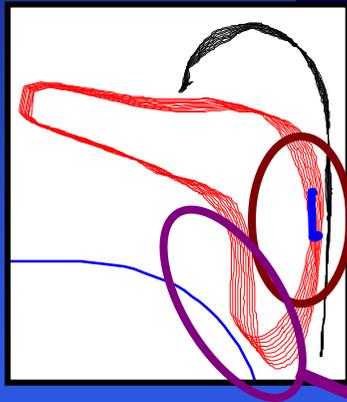
# VS : fonction d'aire

**Fortes variations de l'aire de couplage nasal**

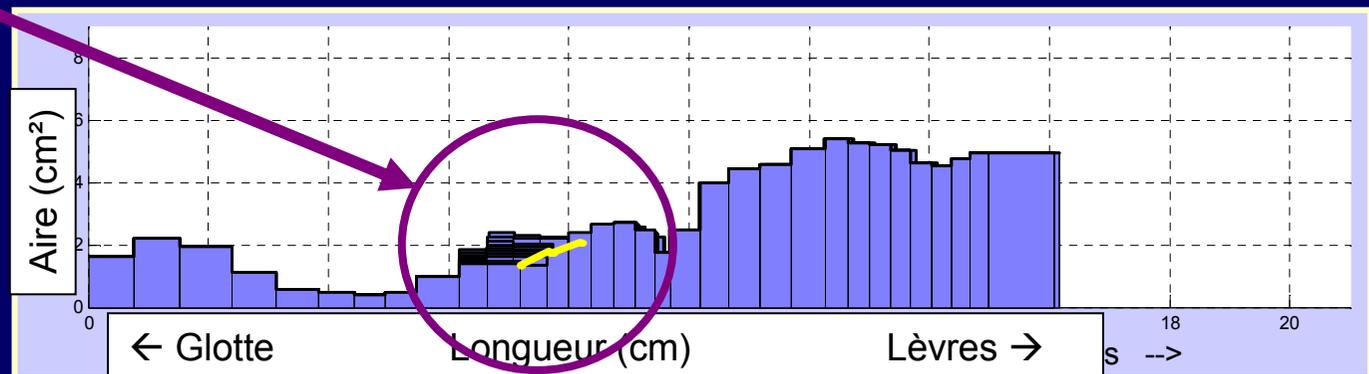


$\Delta \text{aire} = 0.1 \text{ cm}^2 \rightarrow 0.6 \text{ cm}^2$

$\Delta \text{position} = 0.9 \text{ cm}$



**Plus faibles variations orales**

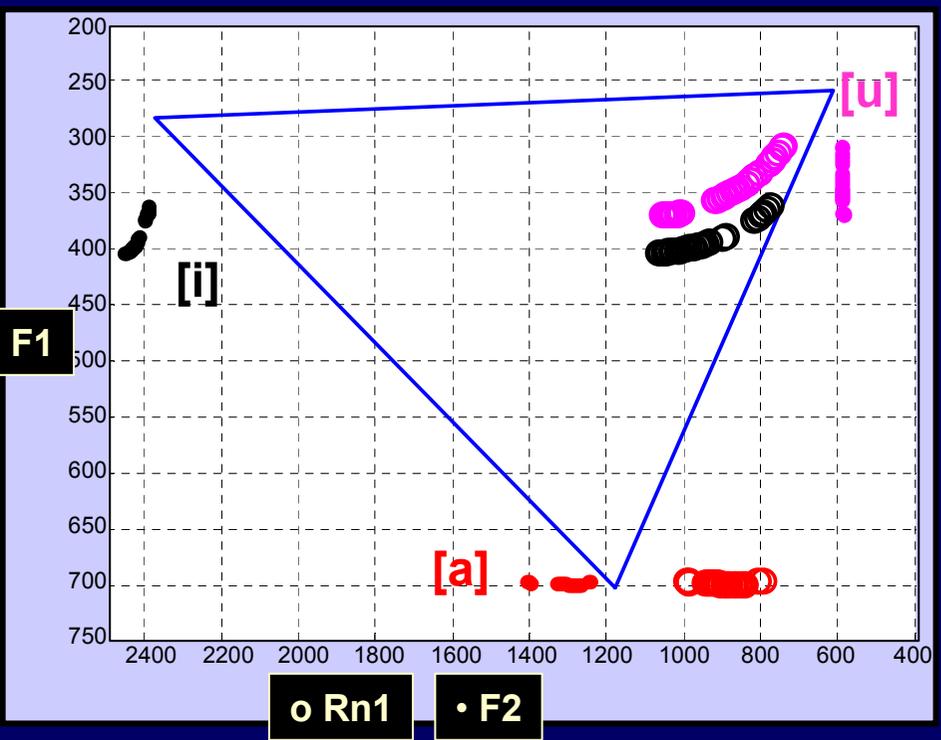
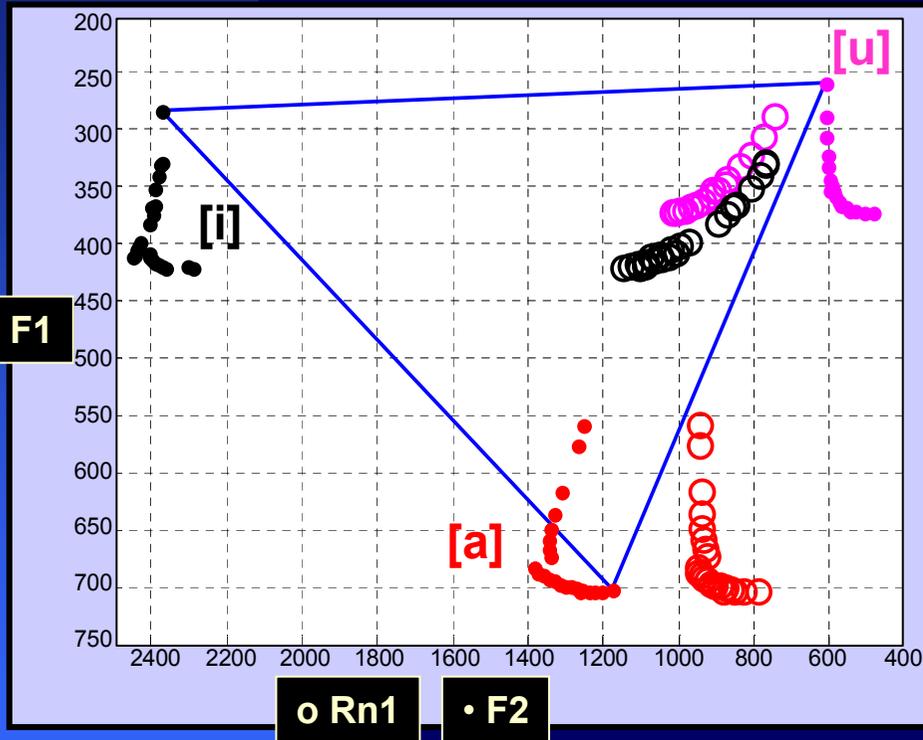


# Nomogrammes basse fréquence de VL et VS

Variation de VL et VS dans la gamme des données autour de [a] [i] [u]

VL

VS



Variations de la fonction d'aire nasale

Variations de la fonction d'aire orale

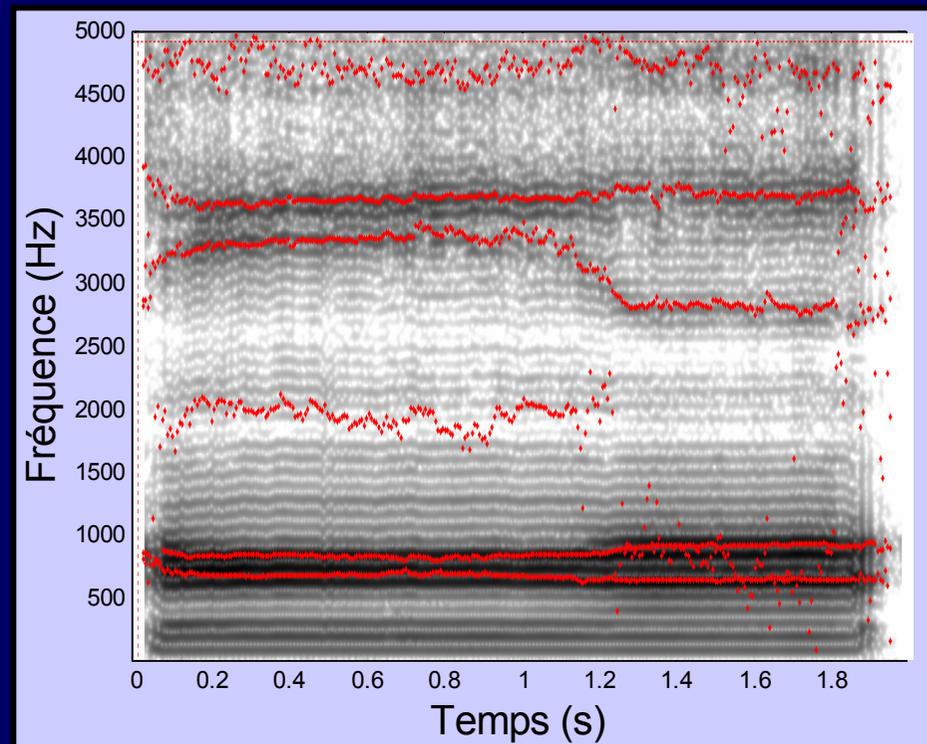
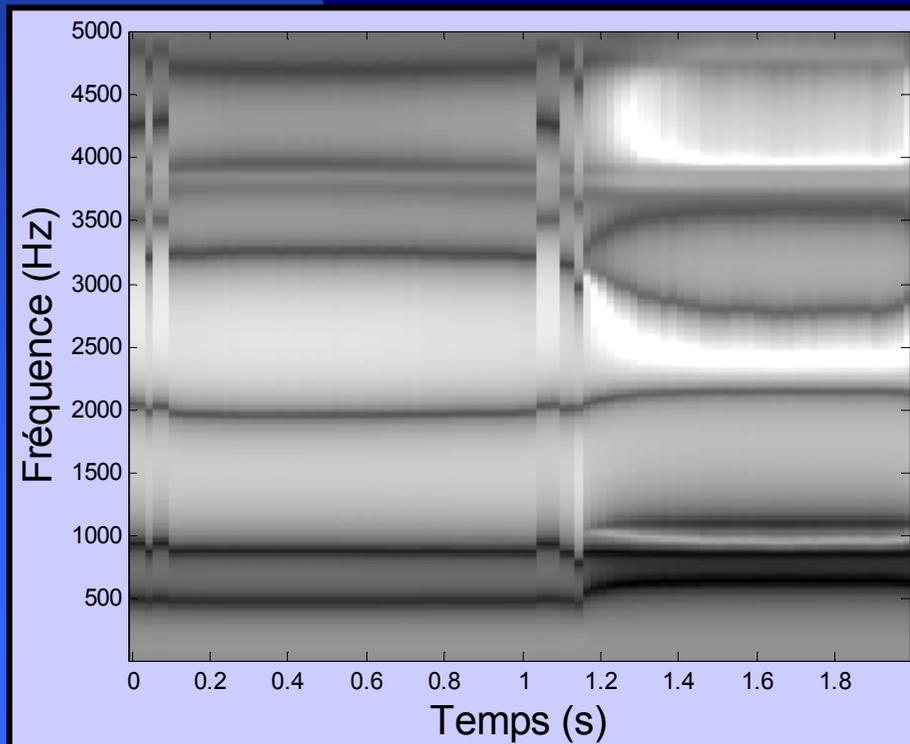
# Comparaisons simulations - enregistrements

Enregistrements EMA + Acoustique synchrones

Contrôle du modèle articulatoire  
Nomogrammes simulés

Nomogrammes enregistrés

[ã] → [a]



# Modélisation articulatoire-acoustique : bilan

- Fonctions d'aires réalistes du conduit nasal
  - Cavités nasales: résonances en  $\frac{1}{4}$  d'onde
  - Port vélopharyngé: VL ( $\pm 0.8 \text{ cm}^2$ ) + VS ( $\pm 0.5 \text{ cm}^2$ )
  - Région vélaire du conduit oral: VL
- Influence du couplage sur les basses fréquences
  - Concentration dans une zone nasale autour de 450 Hz – 1100 Hz
  - Variation des pôles sensibles à VL et VS
- Cohérence du modèle et des enregistrements dans les hautes fréquences
- *1<sup>er</sup> formant nasal* non obtenu dans les simulations

# Conclusion

## Données articulatoires

- Utilisation croisée de données de nature différente
- Géométrie 3D des cavités nasales et du port vélopharyngé

## Modèle articulatoire 3D du port vélopharyngé: 2 paramètres

- VL : paramètre dominant (*Velum Levator*)
- VS : paramètre de plus faible amplitude
- Corrélation forte entre les mouvements 2D et les formes 3D

## Caractérisation acoustique du geste articulatoire

- Fonctions d'aire réalistes du conduit nasal
- Cavités nasales: hypothèse de constriction narinaire non vérifiée
- Influence de VL et VS sur les pôles bas

# Perspectives

---

## Acoustique

- Propagation acoustique en 3D
- Origine du F1 nasal ? Sinus ?
- Comparaisons avec des enregistrements acoustiques + EMA
- Prise en compte d'un éventuel couplage externe

## Synthèse articulatoire

- Intégration dans un modèle articulatoire complet
- Étude de la coordination voile du palais / langue / lèvres
- Contrôle du modèle à partir d'IRM temps-réel
- Synthèse articulatoire et tests perceptifs

- Extension à d'autres sujets
- Synthèse articulatoire à partir du texte

---

**Merci!**

---