



HAL
open science

Mesure des résonances du conduit vocal en cours de phonation : simulation et expérimentation sur maquettes

Alice Launet, Timothée Maison, Philippe Guillemain, Nathalie Henrich
Bernardoni, Fabrice Silva

► **To cite this version:**

Alice Launet, Timothée Maison, Philippe Guillemain, Nathalie Henrich Bernardoni, Fabrice Silva. Mesure des résonances du conduit vocal en cours de phonation : simulation et expérimentation sur maquettes. CFA 2025 - 17e Congrès Français d'Acoustique, Société Française d'Acoustique (SFA), Apr 2025, Paris, France. ⟨hal-05363680⟩

HAL Id: hal-05363680

<https://inria.hal.science/hal-05363680v1>

Submitted on 24 Mar 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Mesure des résonances du conduit vocal en cours de phonation : simulation et expérimentation sur maquettes

Alice LAUNET¹, Timothée MAISON², Philippe GUILLEMAIN¹,
Nathalie HENRICH BERNARDONI³, Fabrice SILVA¹

¹ Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

² SHOM

³ GIPSA-lab

Congrès Français d'Acoustique
Avril 2025

Projet ANR RayoVox (2021-2026, collab LMA - IJLRDA)



Plan de la présentation

Contexte et motivations

Méthode de mesure et post-traitement

Simulations numériques

Validation expérimentale sur maquettes

Conclusion et perspectives

Contexte : mesure des résonances du conduit vocal

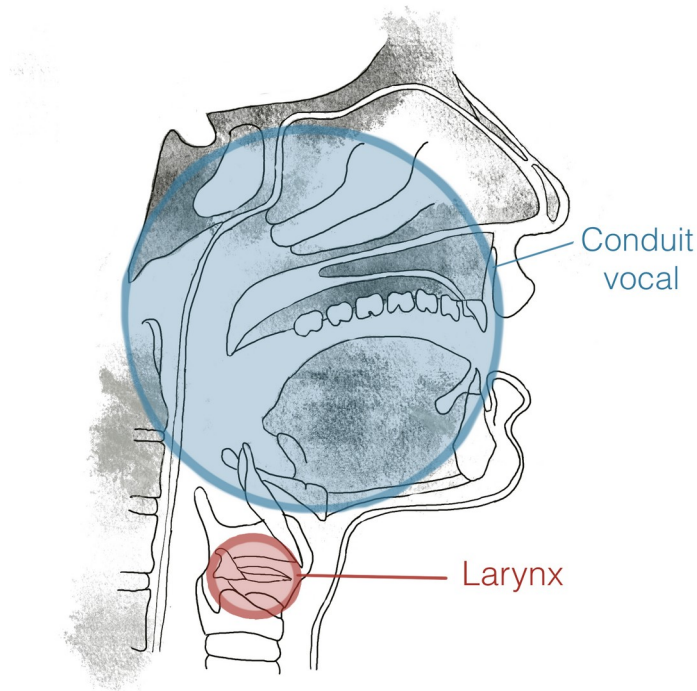
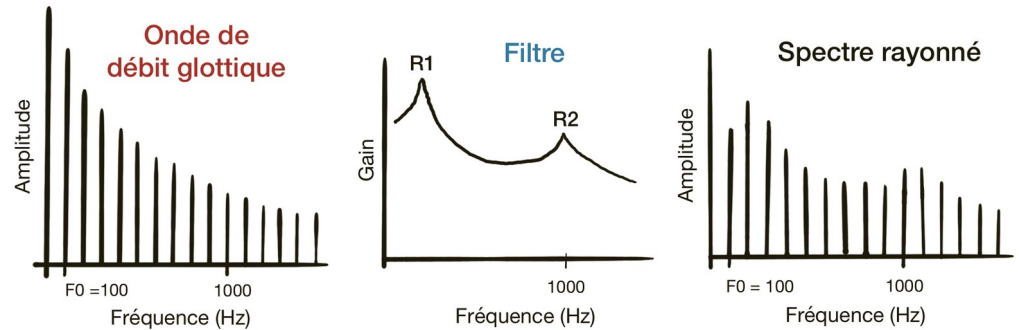


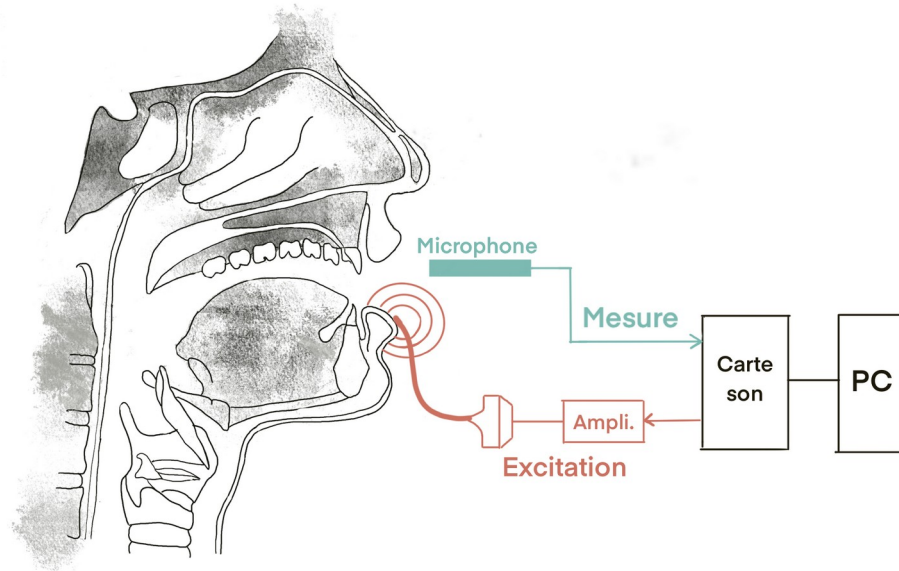
Schéma de l'appareil vocal
(d'après Sundberg et Miller)



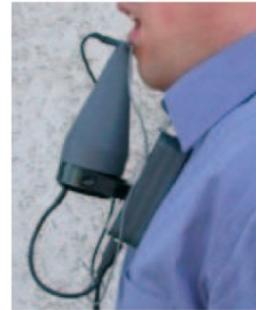
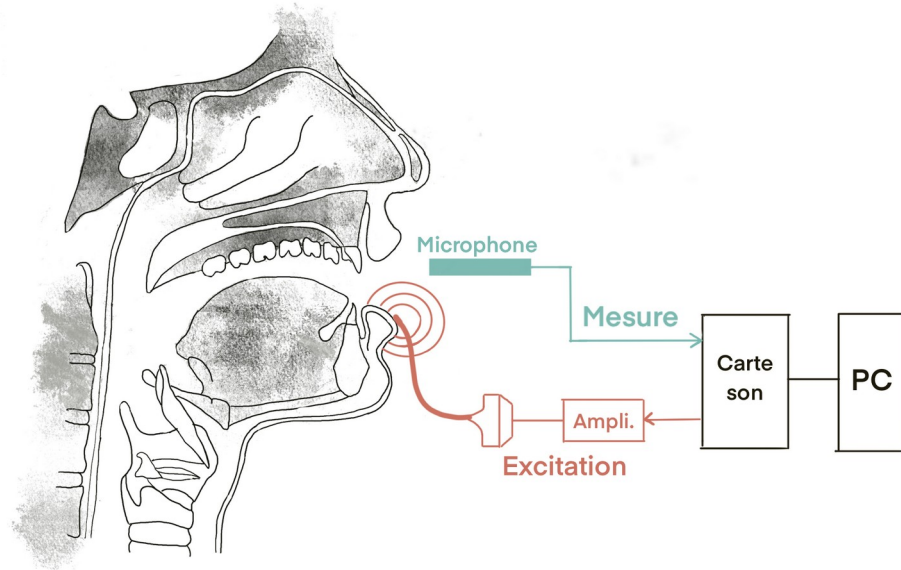
Conduit vocal : **géométrie variable**

Détection des **résonances** du conduit vocal

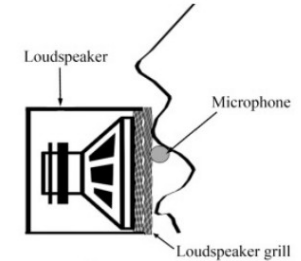
Contexte : dispositif de mesure des résonances



Contexte : dispositif de mesure des résonances



VTMI devices
[Kob et al.,2023]

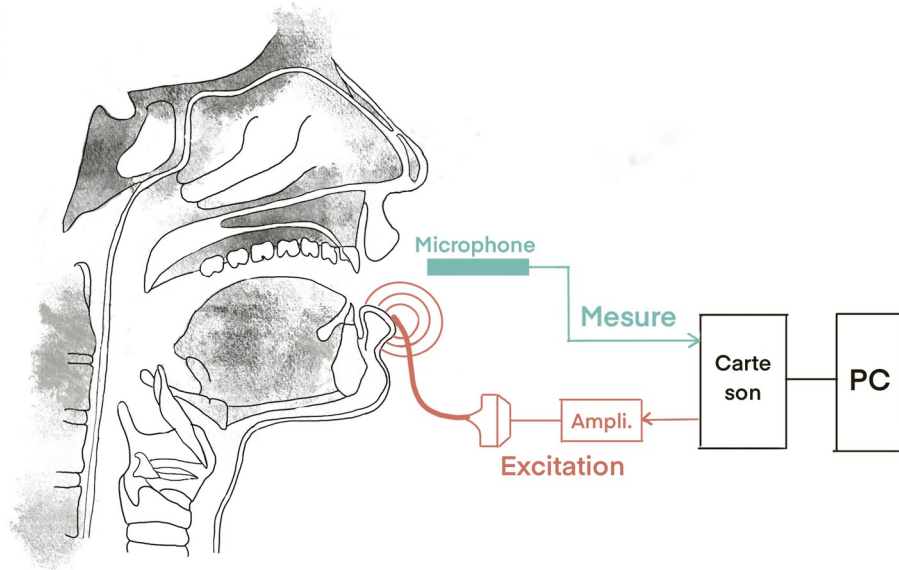


ACUZ-lite device
[Thilakan et al.,2018]



Dispositif de thèse
de T. Maison
[Maison et al.,2023]

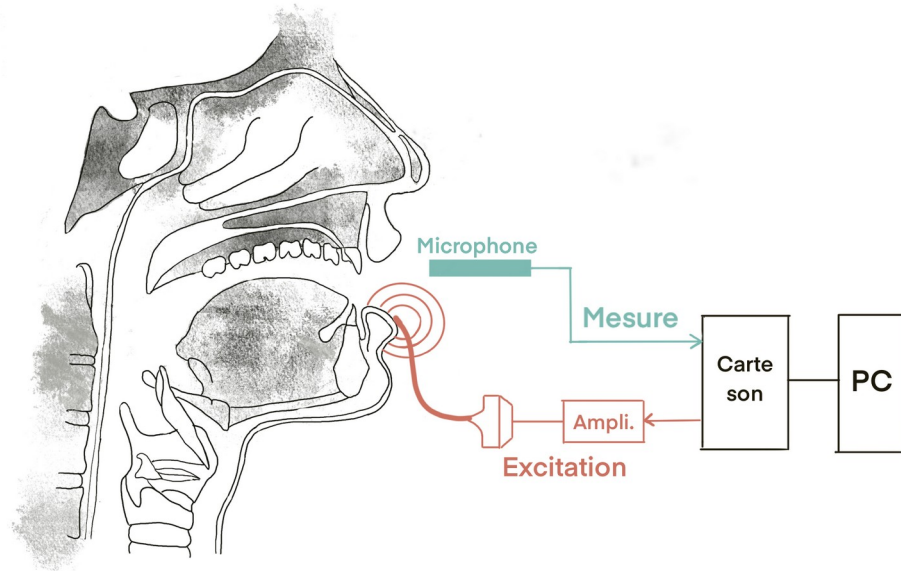
Contexte : dispositif de mesure des résonances



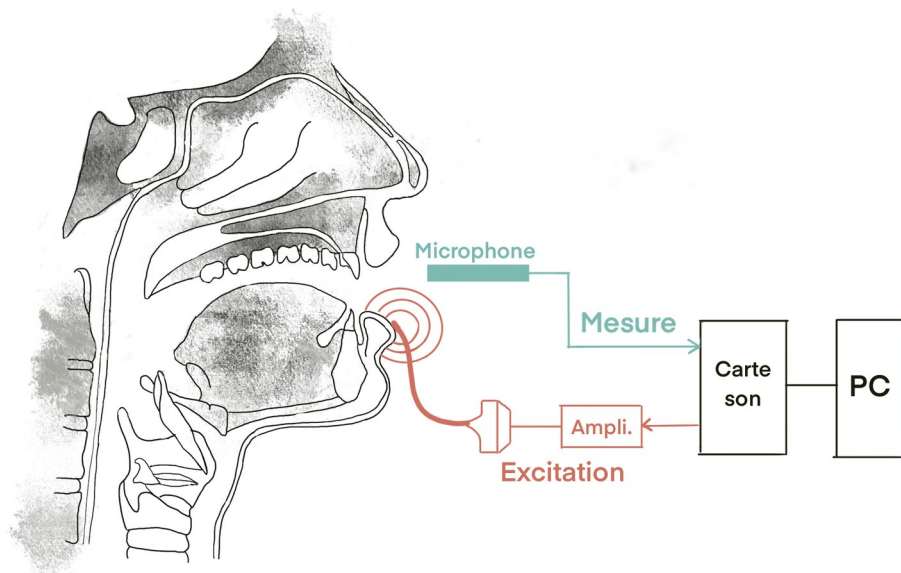
Excitation

Microphone

Contexte : dispositif de mesure des résonances



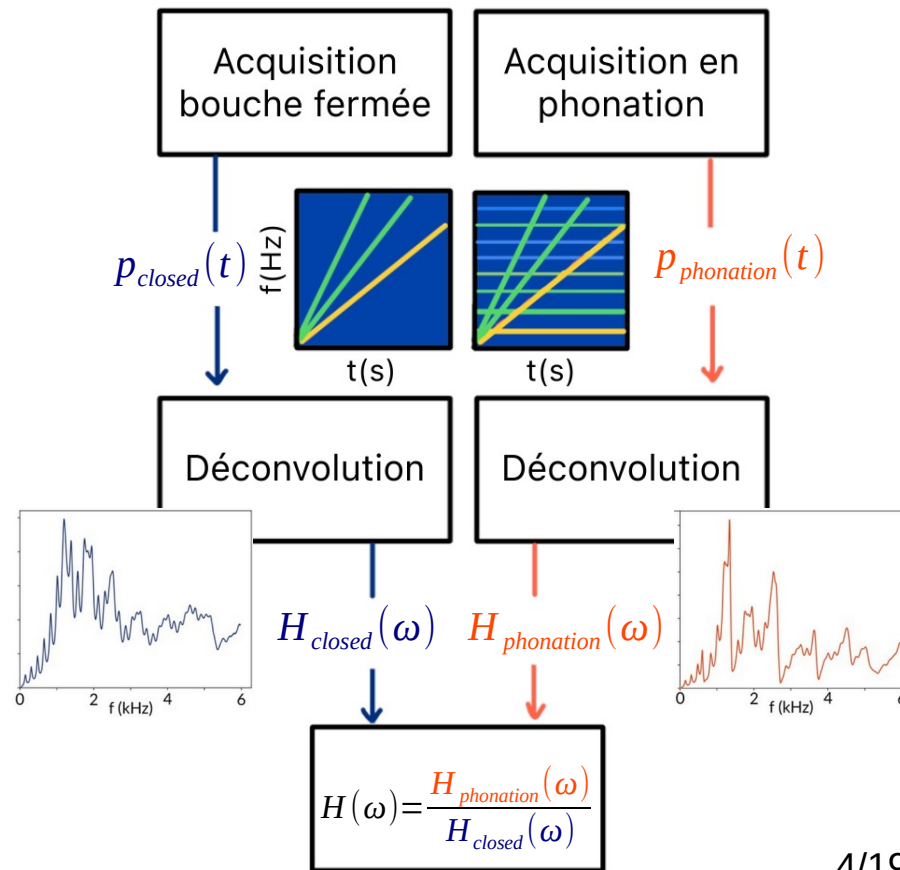
Contexte : dispositif de mesure des résonances



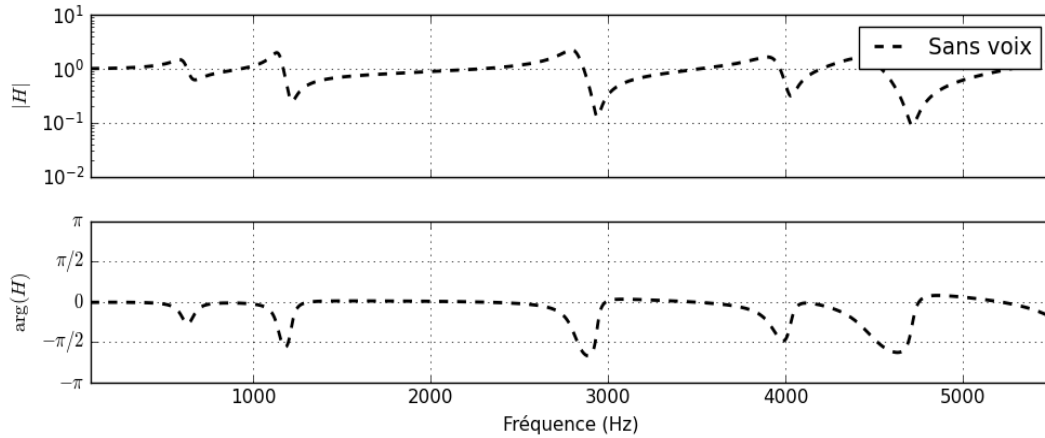
Excitation et mesure **simultanées**

Chirp large bande
([80 ; 5500]Hz, 1s, **linéaire pour le moment**)

Mesure **d'étalonnage** bouche fermée

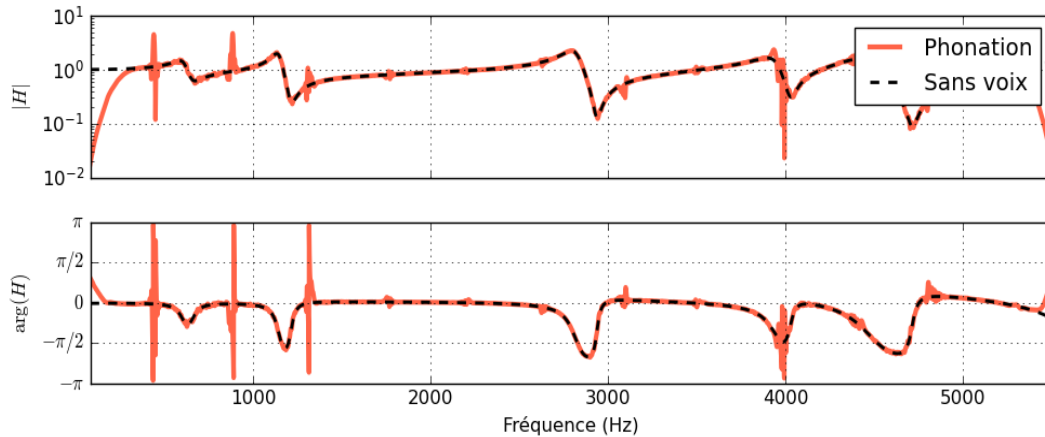


Contexte : dispositif de mesure des résonances



Simulations - /a/ - $f_0 = 440\text{Hz}$

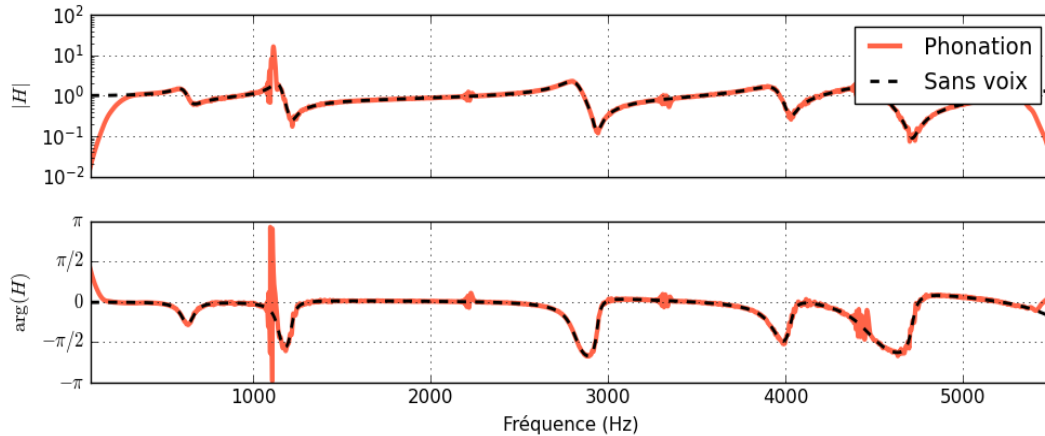
Contexte : dispositif de mesure des résonances



Simulations - /a/ - $f_0 = 440\text{Hz}$

Réponse en fréquence **bruitée** par la voix

Contexte : dispositif de mesure des résonances



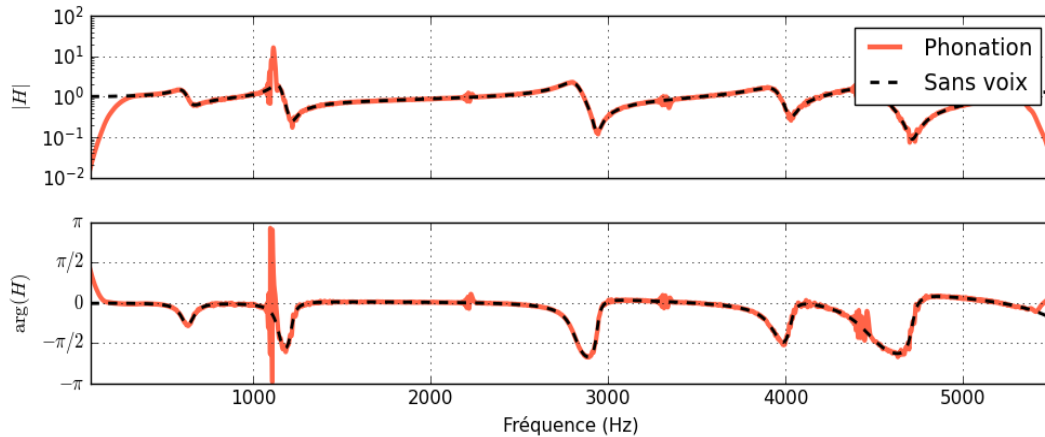
Simulations - /a/ - $f_0 = 1108\text{Hz}$

Réponse en fréquence **bruitée** par la voix

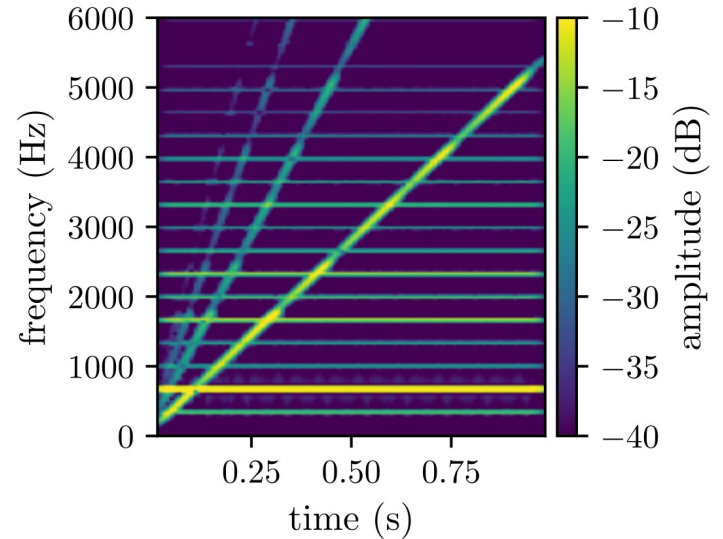
→ Séparation voix / chirp

(Thèse Maison 2023)

Contexte : séparation voix / chirp



Simulations - /a/ - $f_0 = 440\text{Hz}$



Phonation - /a/

Réponse en fréquence **bruitée** par la voix

→ Séparation voix / chirp

(Thèse Maison 2023)

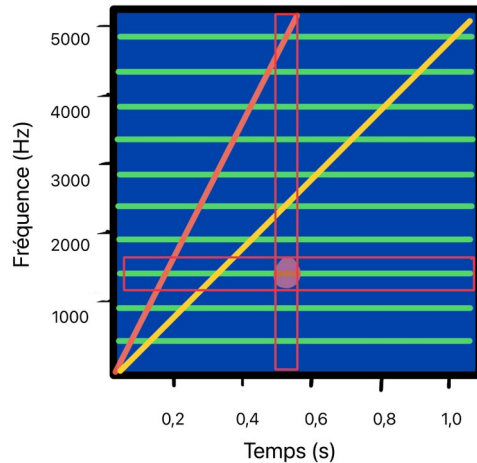
Voix : **harmonique et quasi-stationnaire**

Chirp : **fréquence instantanée connue**

Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", Signal Processing 231 (2025).

Transformée de **Fourier à court terme**

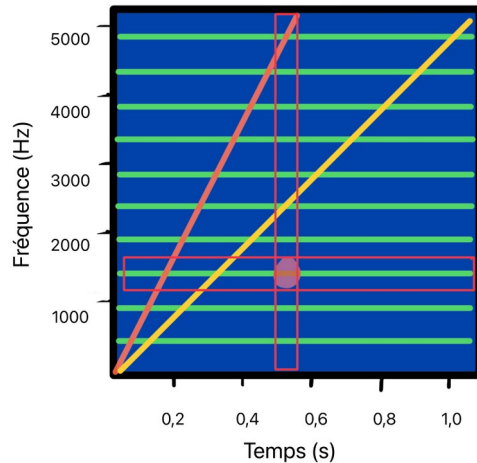


$$S(\tau, \omega) = \langle s(t - \tau), g(t) \cdot e^{j\omega t} \rangle$$

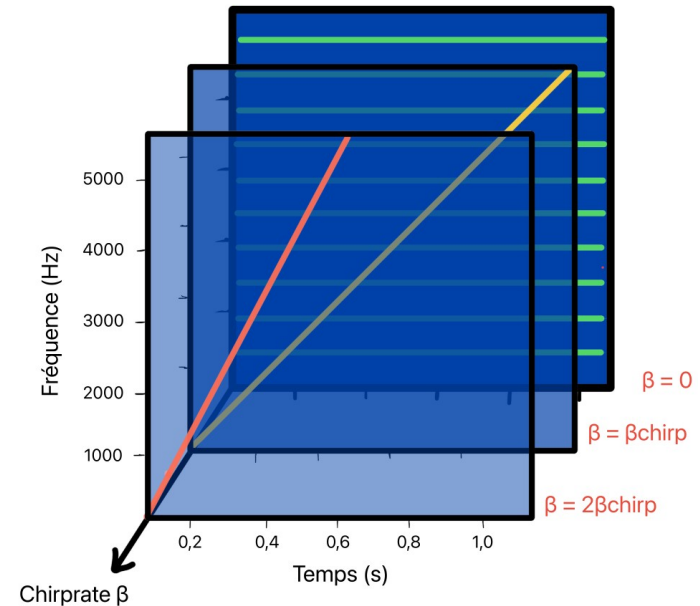
Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", Signal Processing 231 (2025).

Transformée de **Fourier à court terme**



Transformée en **chirplet (CT)**



$$S(\tau, \omega) = \langle s(t - \tau), g(t) \cdot e^{j\omega t} \rangle$$

$$L(\tau, \omega, \beta) = \langle s(t - \tau), g(t) e^{j(\omega t + \beta \frac{t^2}{2})} \rangle$$

Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

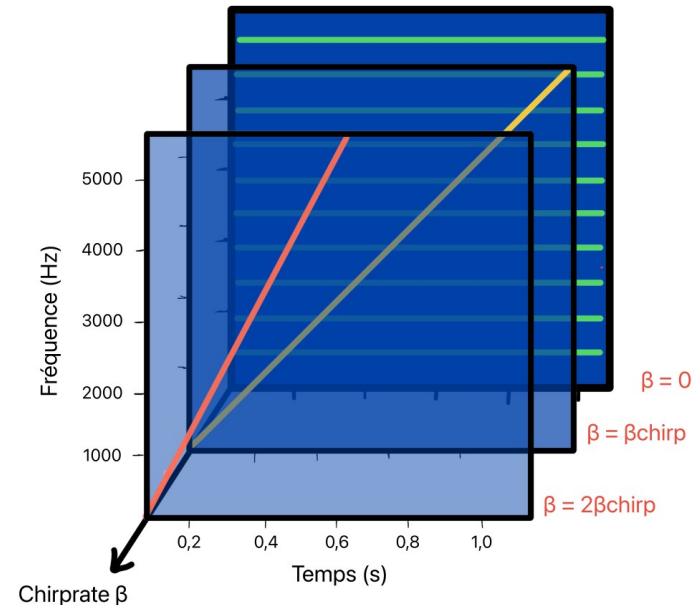
D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", Signal Processing 231 (2025).

Calcul le long du chirp :

$$L[\tau, \omega = \varphi'(\tau), \beta = \varphi''(\tau)]$$

Présence autre arête (voix) : perturbation sur $L(\tau, \varphi', \varphi'')$ → estimation conjointe de $A(\tau)$ et $A_v(\tau)$

Transformée en **chirplet** (CT)



$$L(\tau, \alpha, \beta) = \left\langle s(t - \tau), g(t) e^{j(\omega t + \beta \frac{t^2}{2})} \right\rangle$$

Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", Signal Processing 231 (2025).

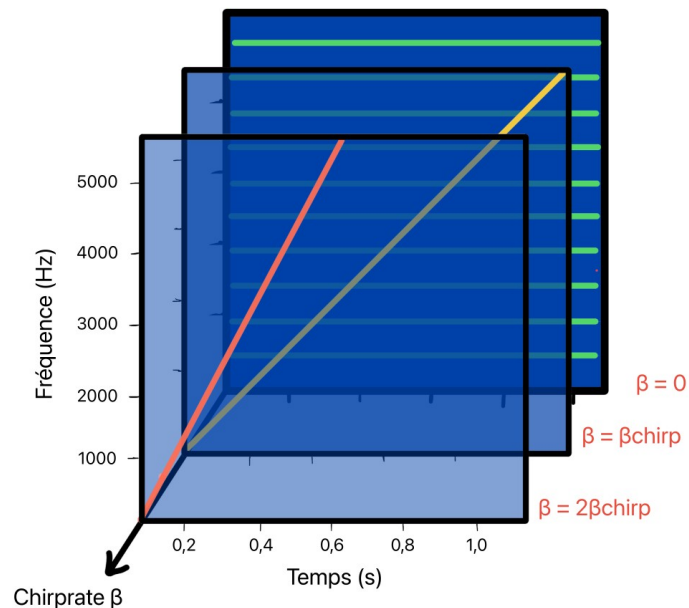
Calcul le long du chirp :

$$L[\tau, \omega = \varphi'(\tau), \beta = \varphi''(\tau)]$$

Présence autre arête (voix) : perturbation sur $L(\tau, \varphi', \varphi'')$ → estimation conjointe de $A(\tau)$ et $A_v(\tau)$

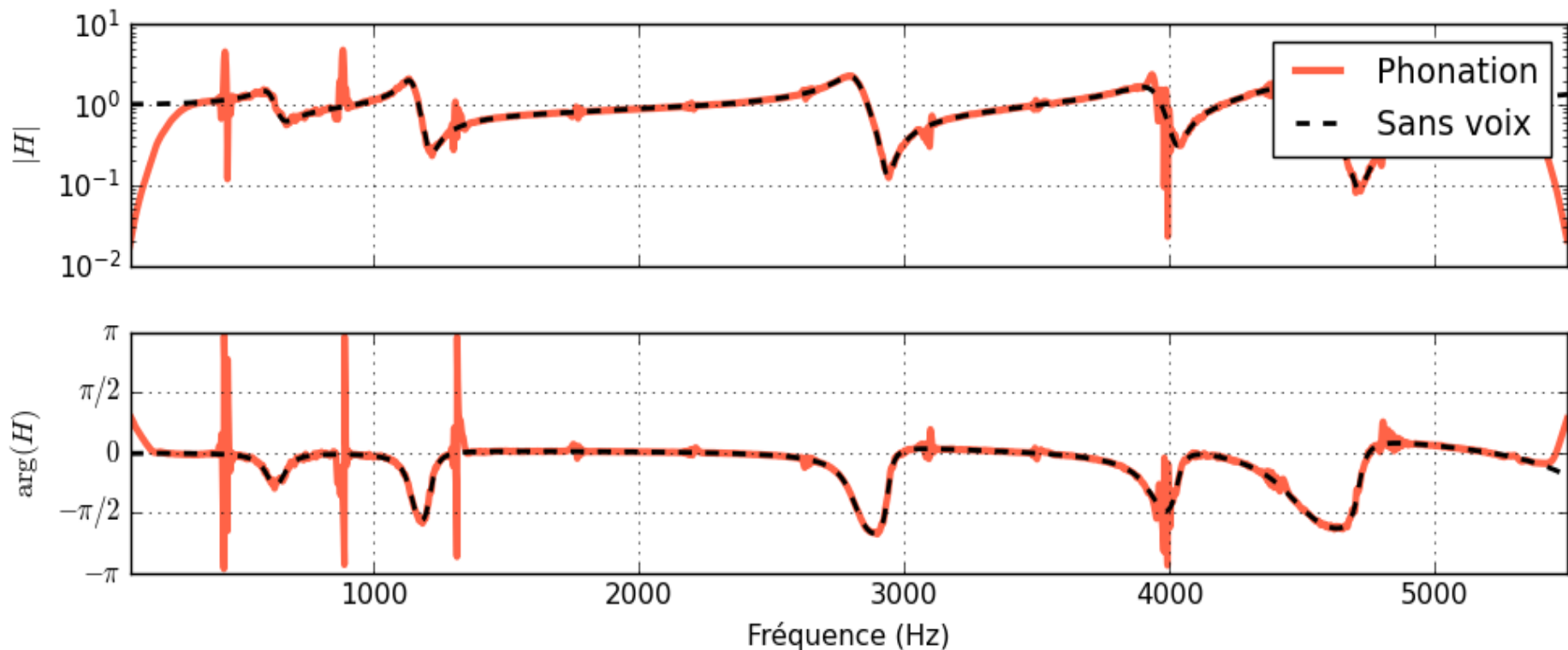
Voix et chirp séparés

Transformée en **chirplet** (CT)



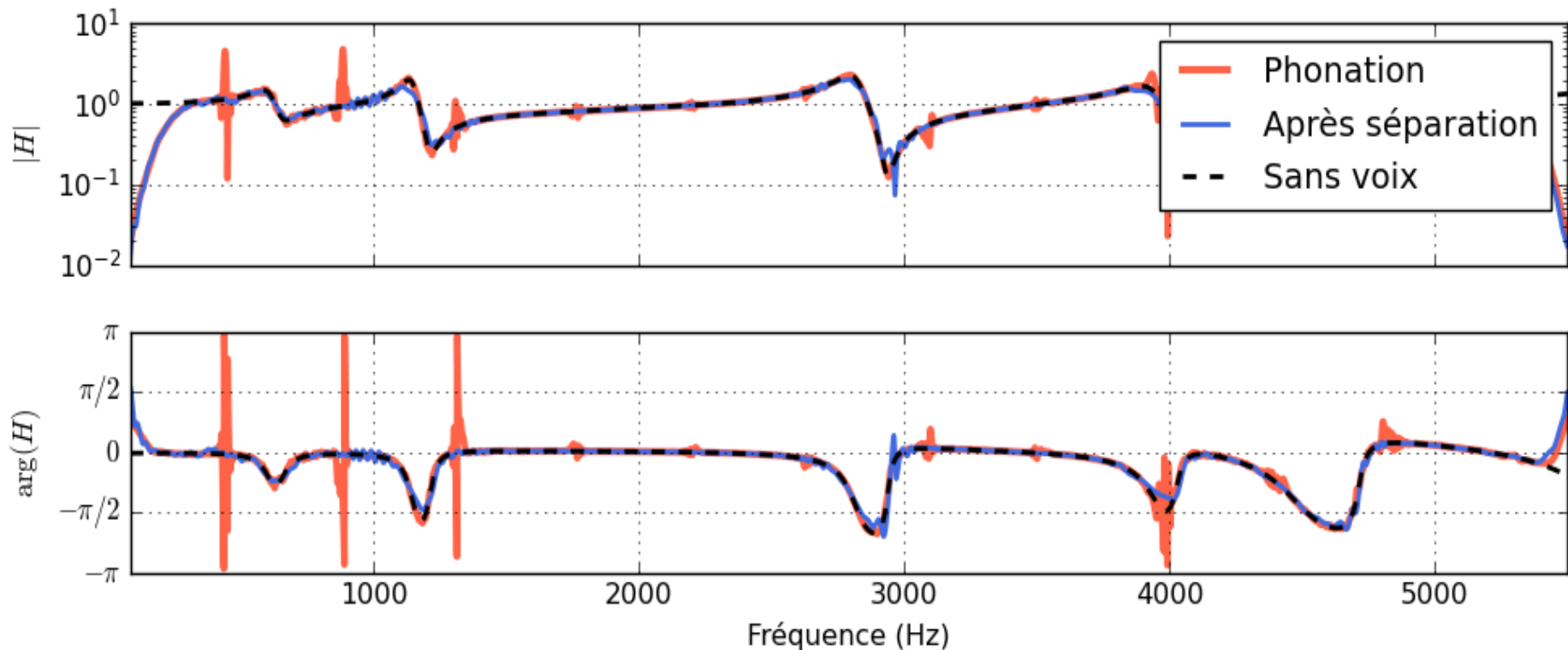
$$L(\tau, \alpha, \beta) = \left\langle s(t - \tau), g(t) e^{j(\omega t + \beta \frac{t^2}{2})} \right\rangle$$

Des Chirplets pour la séparation voix/chirp



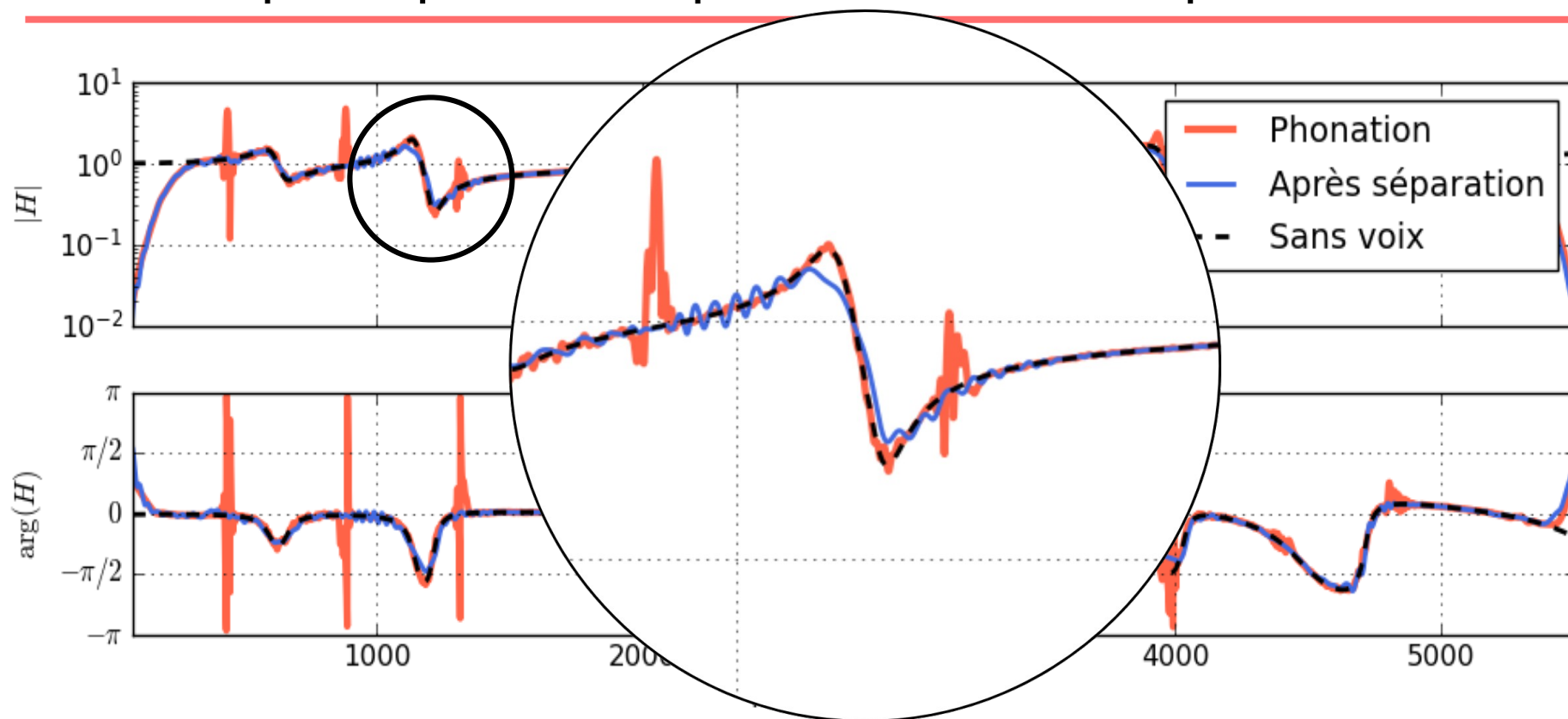
Simulations - /a/ - $f_0 = 440\text{Hz}$

Des Chirplets pour la séparation voix/chirp



Simulations - /a/ - $f_0 = 440\text{Hz}$

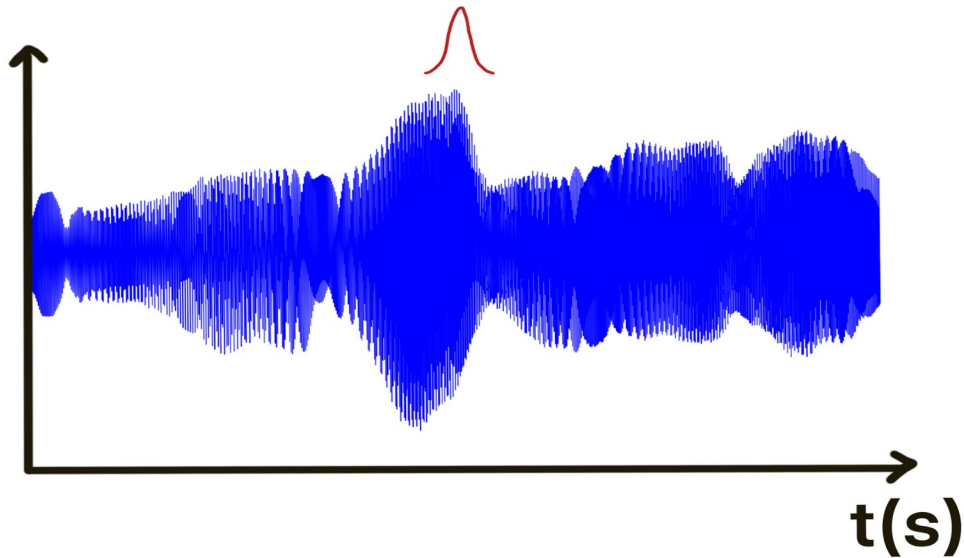
Des Chirplets pour la séparation voix/chirp



Simulations - /a/ - fo = 440Hz

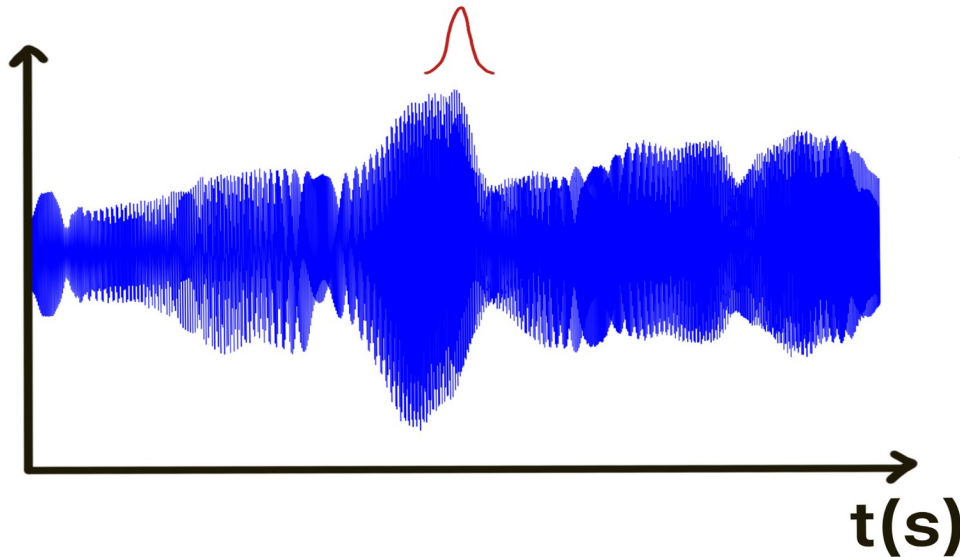
Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", *Signal Processing* 231 (2025).



Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", *Signal Processing* 231 (2025).

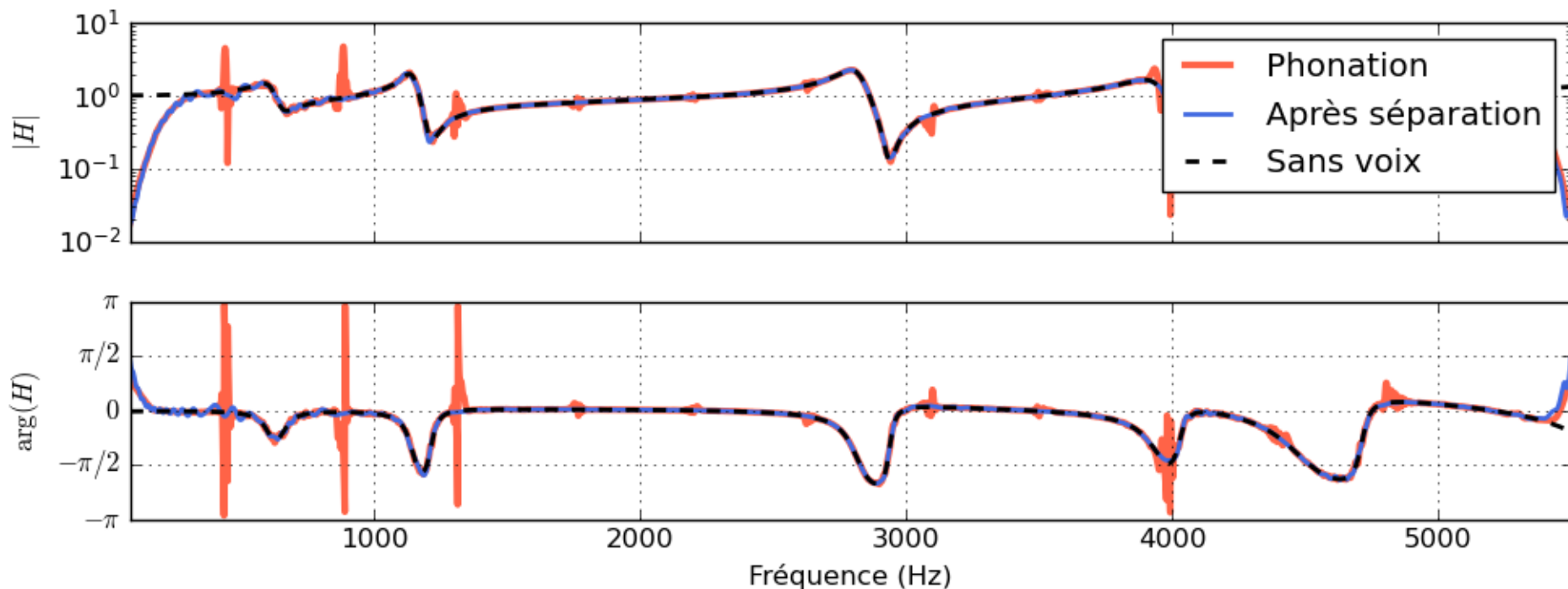


Approcher les modulations d'amplitudes du chirp par un **polynôme**, jusqu'à un certain degré

Utilisation de **différentes fenêtres d'analyse en chirplet**

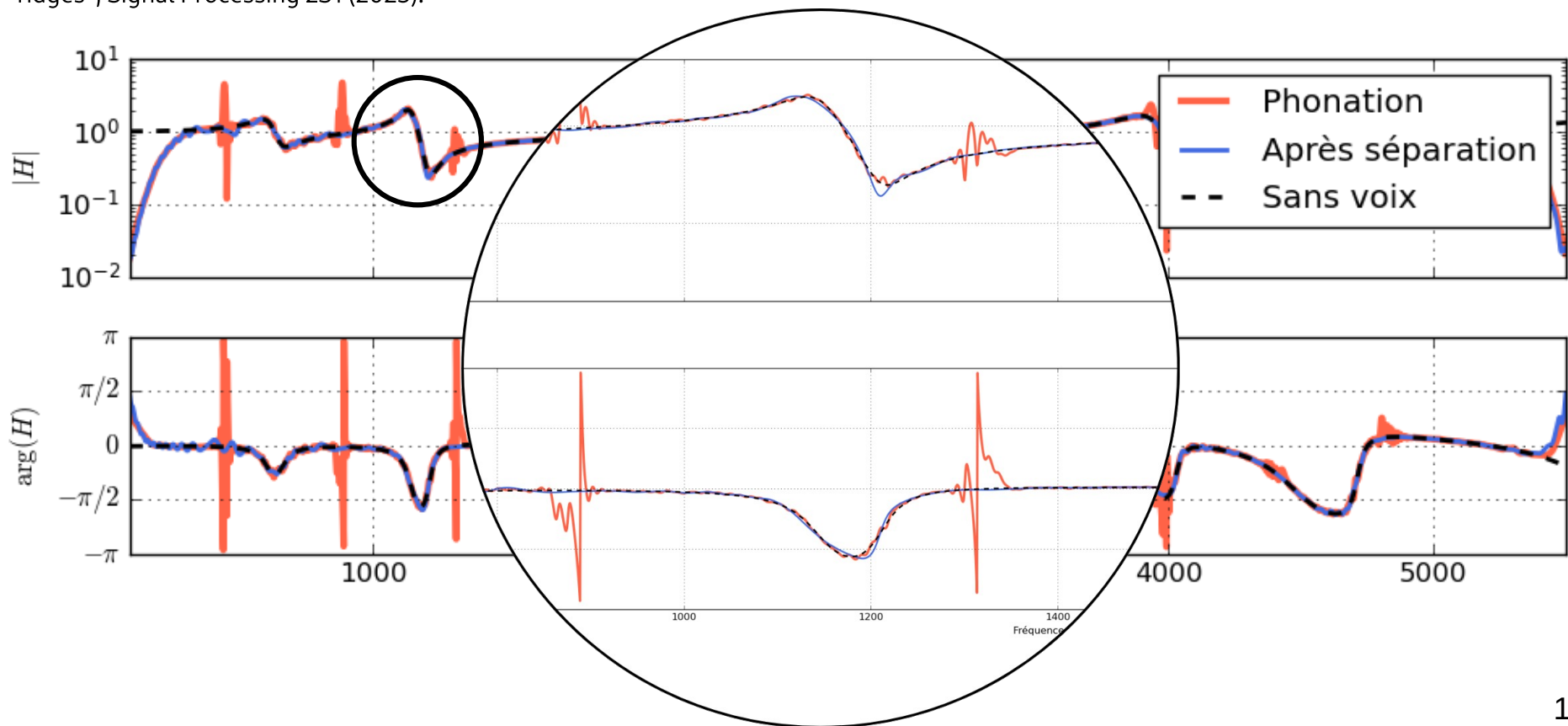
Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", Signal Processing 231 (2025).



Des Chirplets pour la séparation voix/chirp

D'après : Maison *et al.*, "High-order chirplet transform for efficient reconstruction of multicomponent signals with amplitude modulated crossing ridges", Signal Processing 231 (2025).



Robustesse de la méthode : simulations numériques

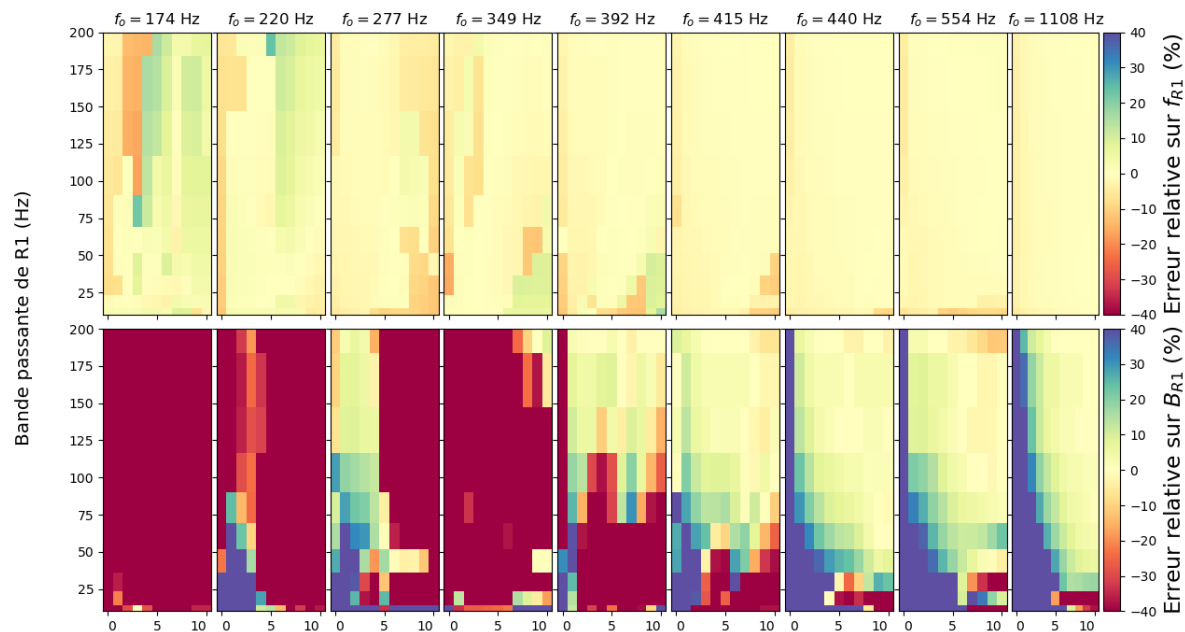
Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

La méthode fonctionne-t-elle pour n'importe quelle fréquence fondamentale de voix ?

Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

La méthode fonctionne-t-elle pour n'importe quelle fréquence fondamentale de voix ?



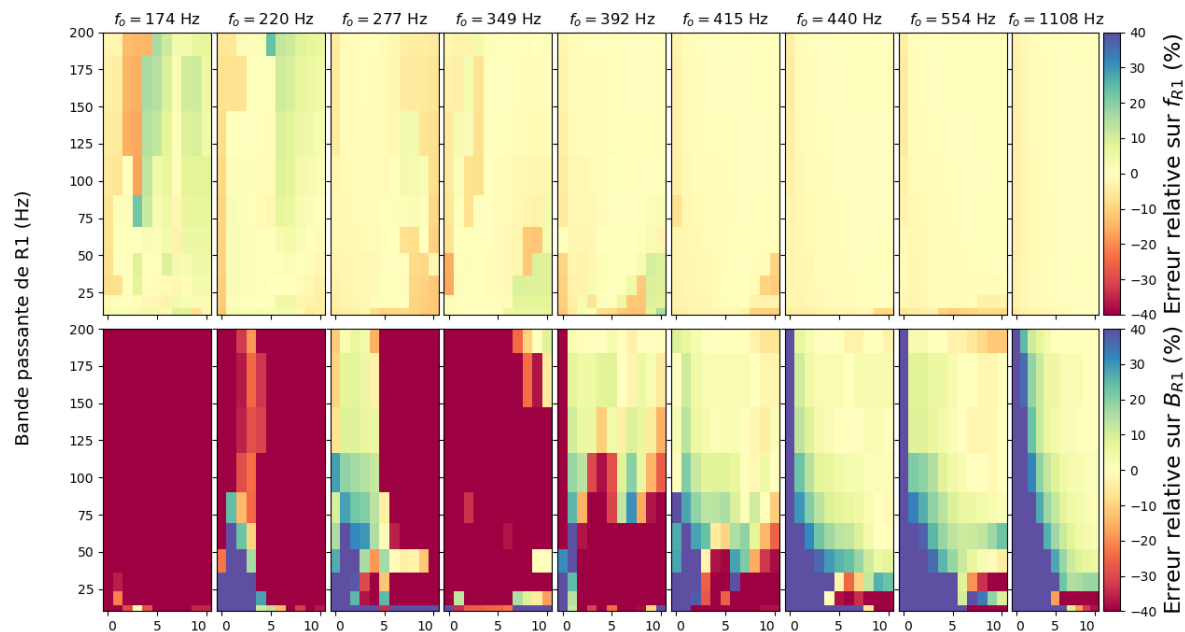
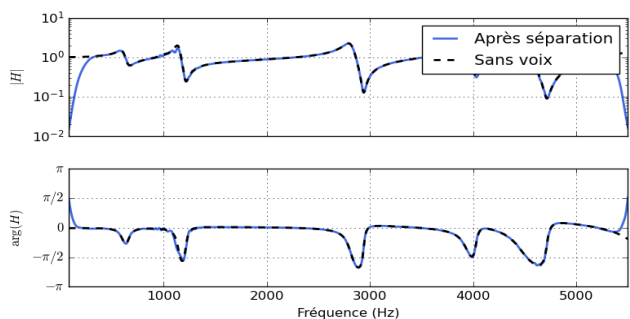
Degrés du polynôme N pour la décomposition de l'amplitude

Erreur sur l'estimation des caractéristiques acoustiques de R1, en fonction de la bande passante du pic et du degré du polynôme

Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

La méthode fonctionne-t-elle pour n'importe quelle fréquence fondamentale de voix ?



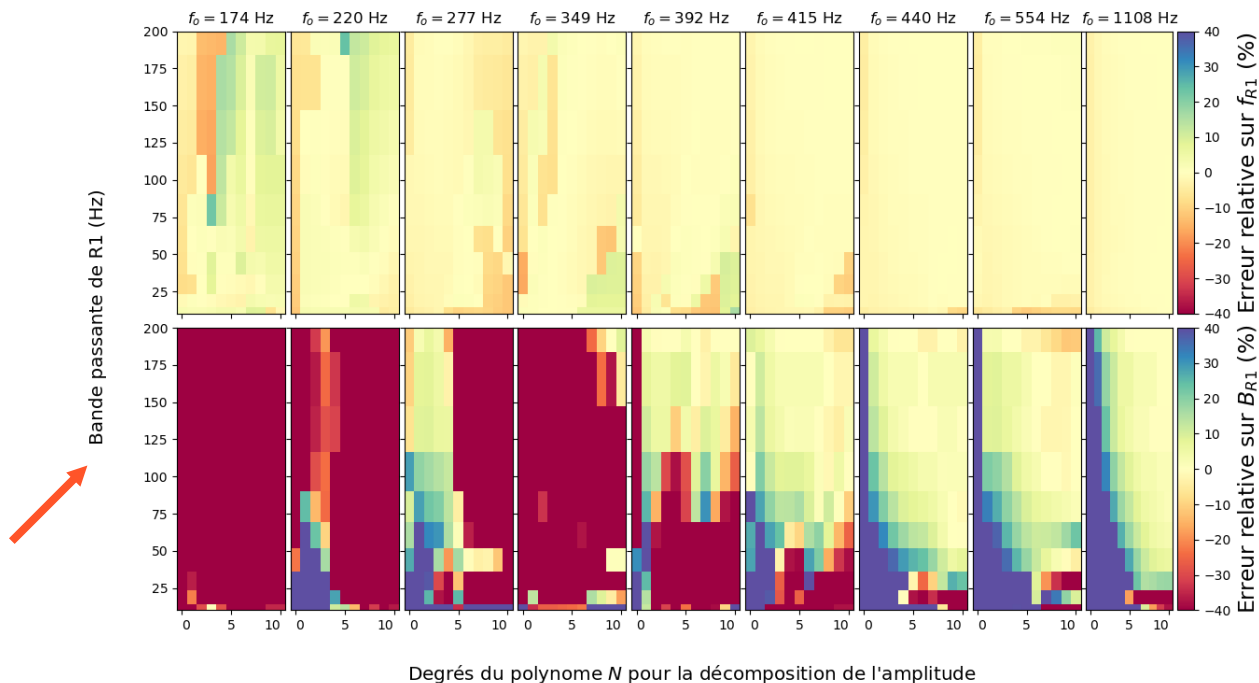
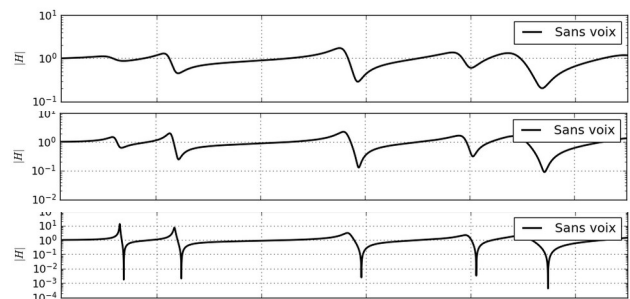
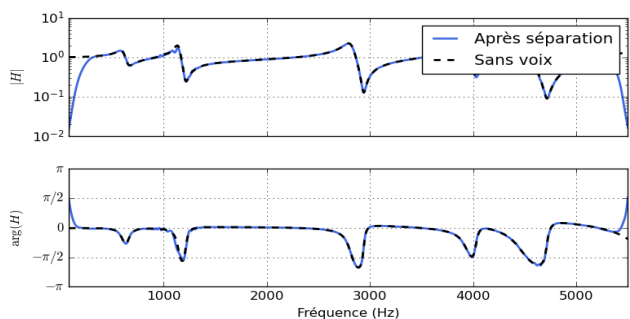
Degrés du polynôme N pour la décomposition de l'amplitude

Erreur sur l'estimation des caractéristiques acoustiques de R1, en fonction de la bande passante du pic et du degré du polynôme

Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

La méthode fonctionne-t-elle pour n'importe quelle fréquence fondamentale de voix ?



Degrés du polynôme N pour la décomposition de l'amplitude
Erreur sur l'estimation des caractéristiques acoustiques de R1, en fonction de la bande passante du pic et du degré du polynôme

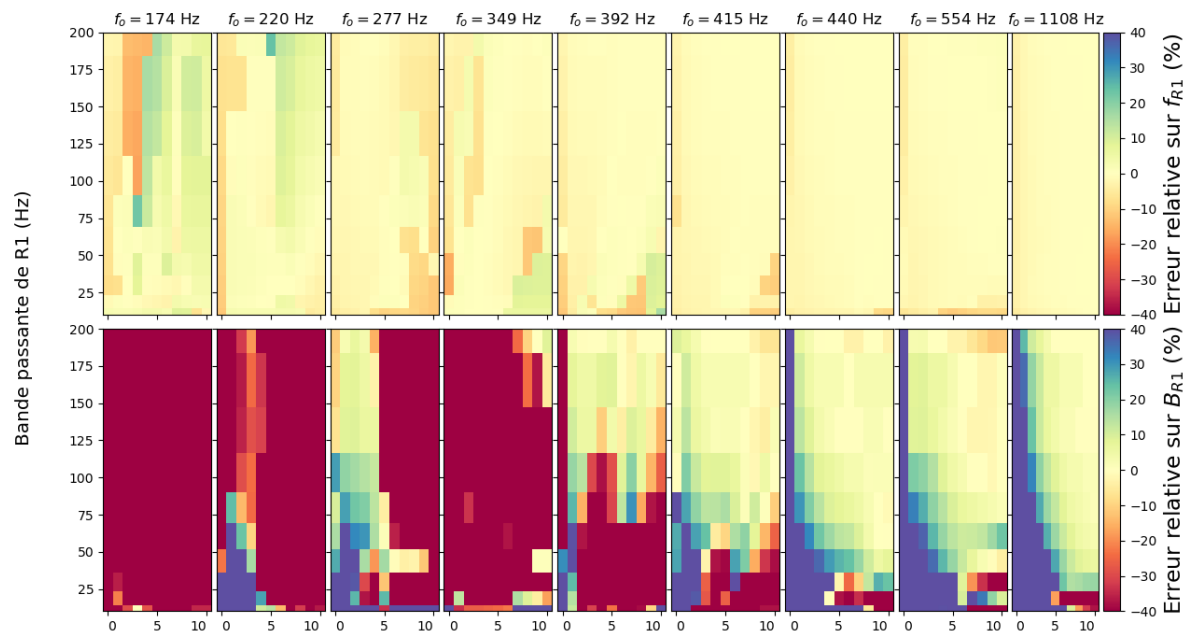
Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

La méthode fonctionne-t-elle pour n'importe quelle fréquence fondamentale de voix ?

f_{R1} estimées précisément partout

Possibilité d'estimer précisément B_{R1} ,
sauf pour les voix les plus graves



Degrés du polynôme N pour la décomposition de l'amplitude

Erreur sur l'estimation des caractéristiques acoustiques de R1, en fonction de la bande passante du pic et du degré du polynôme

Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

Voix : Klatt&Klatt avec vibrato

Robustesse de la méthode : simulations numériques

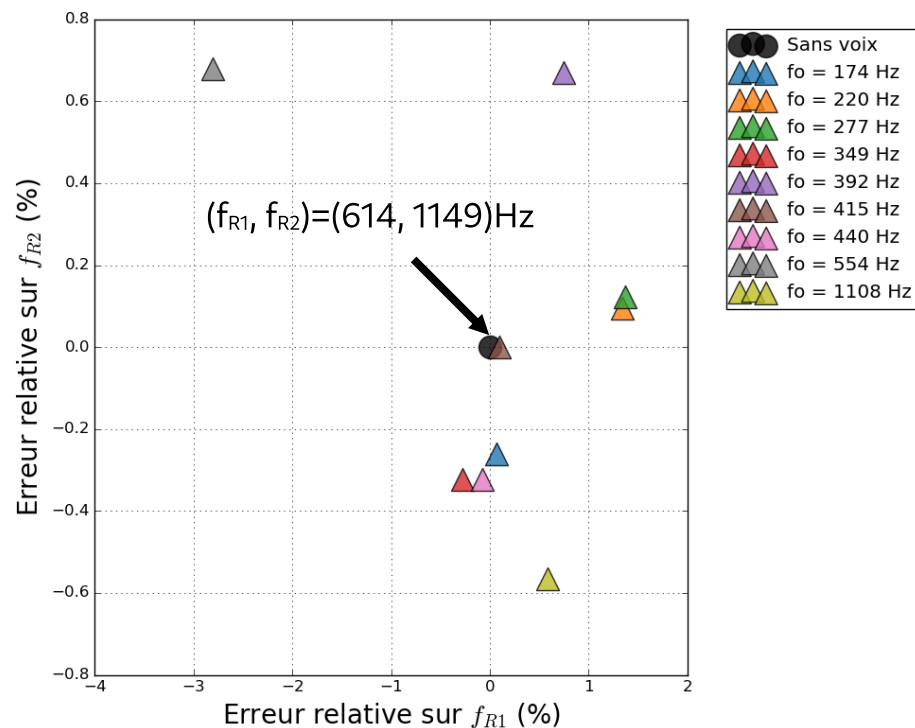
Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

Voix : Klatt&Klatt avec vibrato

Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

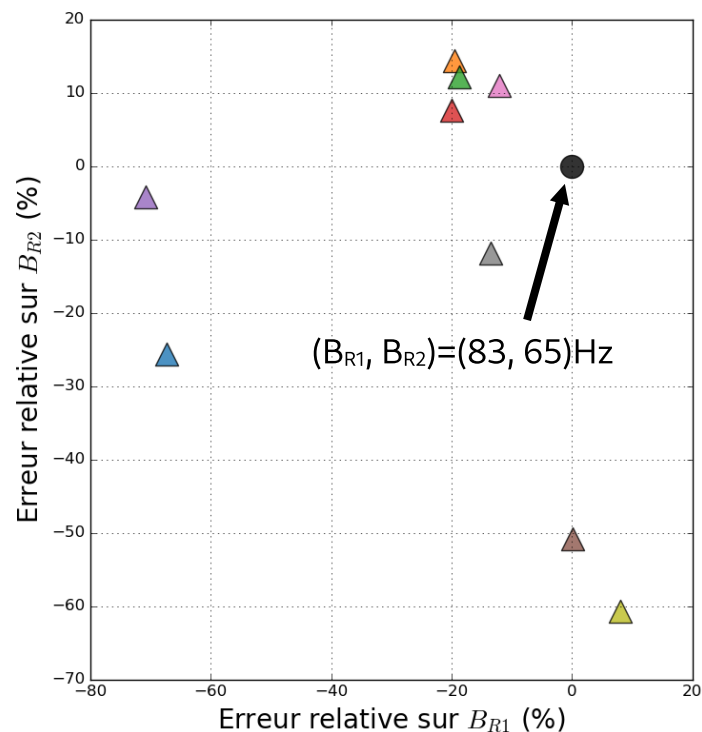
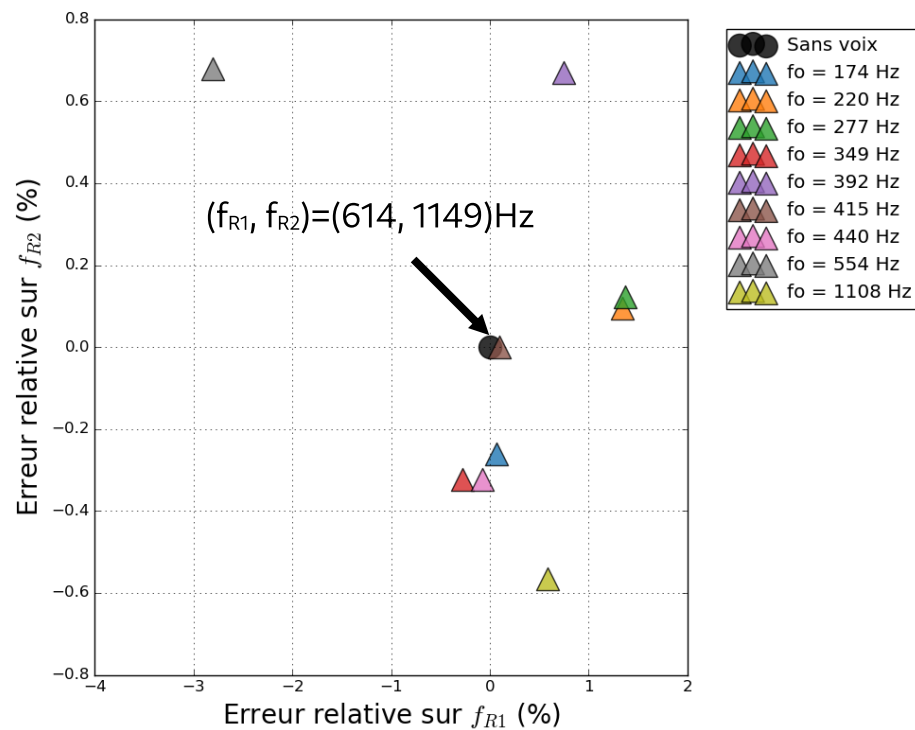
Voix : Klatt&Klatt avec vibrato



Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

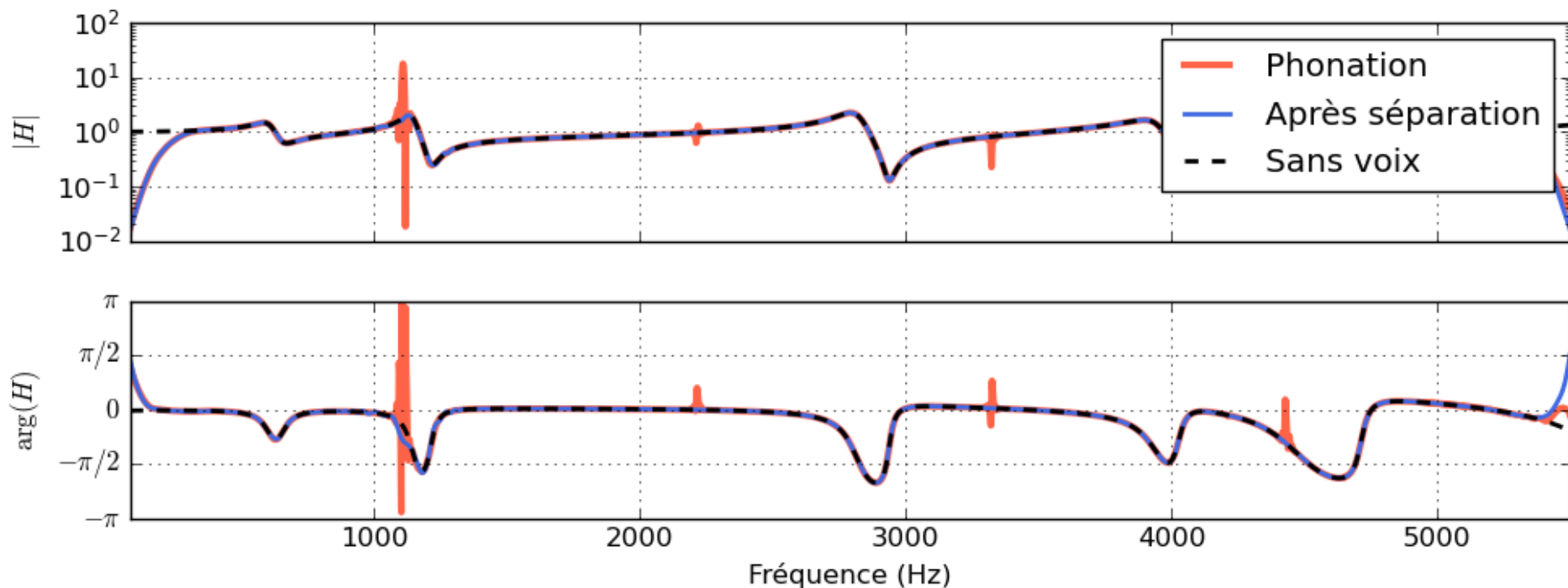
Voix : Klatt&Klatt avec vibrato



Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

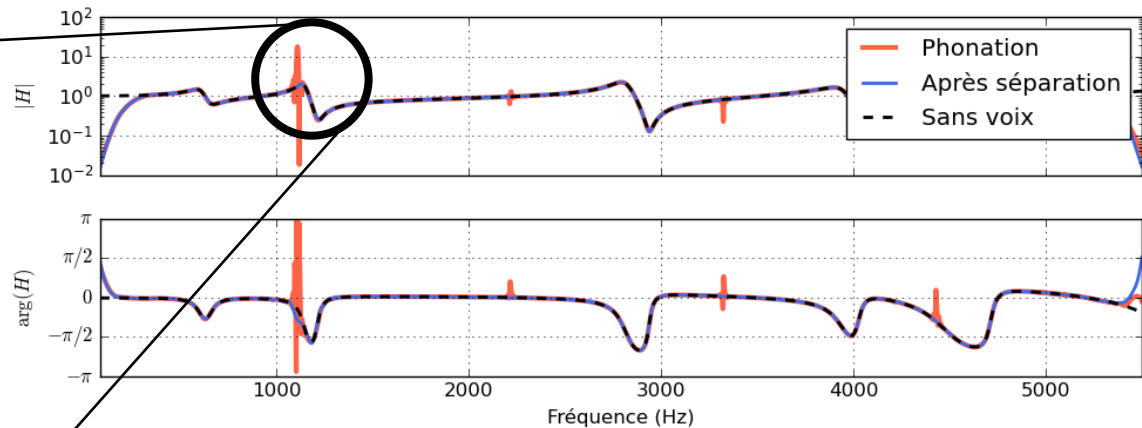
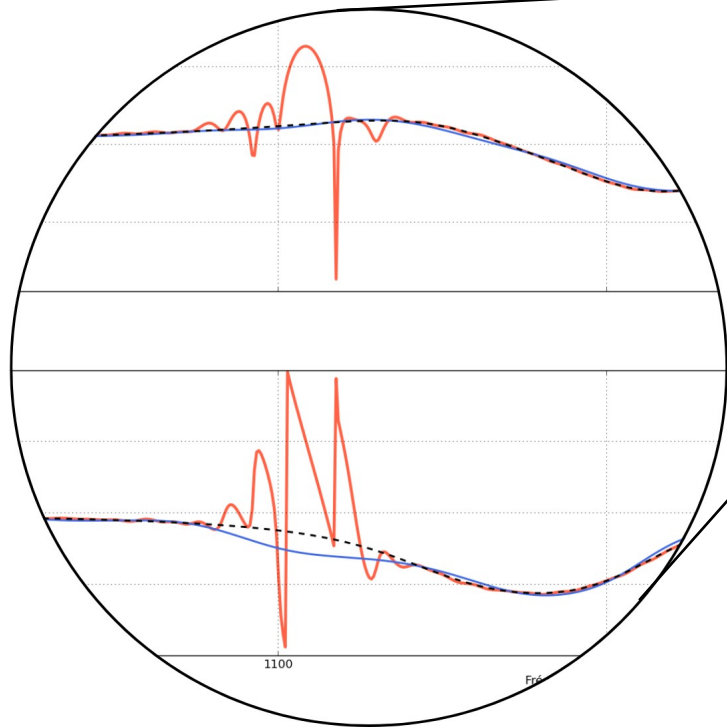
Voix : $f_0 = 1108\text{Hz}$, avec vibrato, accord résonantiel R2: f_0



Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

Voix : $f_0 = 1108\text{Hz}$, avec vibrato, accord résonantiel R2: f_0



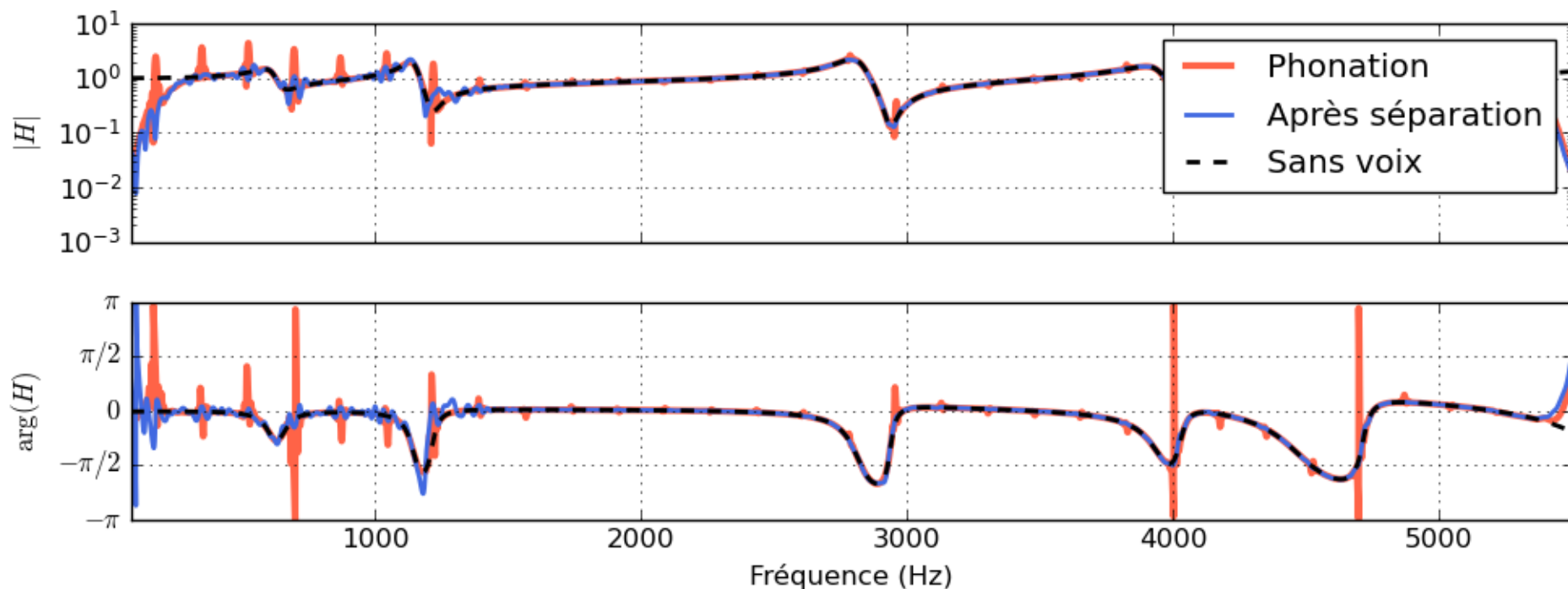
L'accord résonantiel R2: f_0 :

- n'est pas un obstacle à la détection de f_{R2}
- mais mauvaise estimation de B_{R2} .

Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

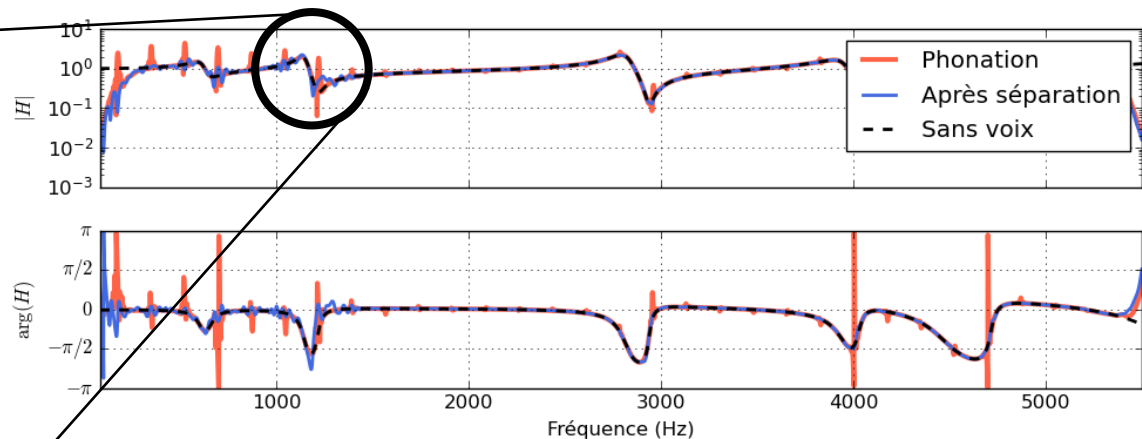
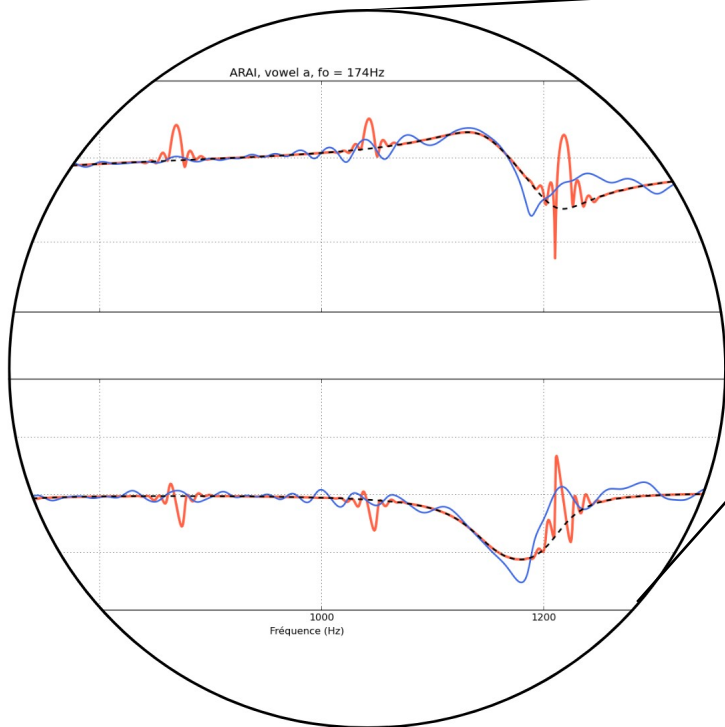
Voix : $f_0 = 174\text{Hz}$, avec vibrato



Robustesse de la méthode : simulations numériques

Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

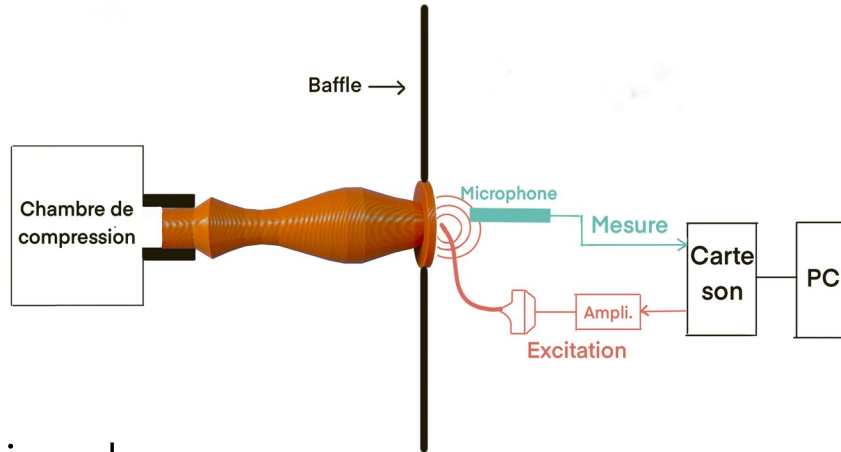
Voix : $f_0 = 174\text{Hz}$, avec vibrato



Reconstruction des FRF:

- moins robuste pour des voix à basse fréquence
- permet la détection de f_{R2}

Robustesse de la méthode : mesures sur maquettes



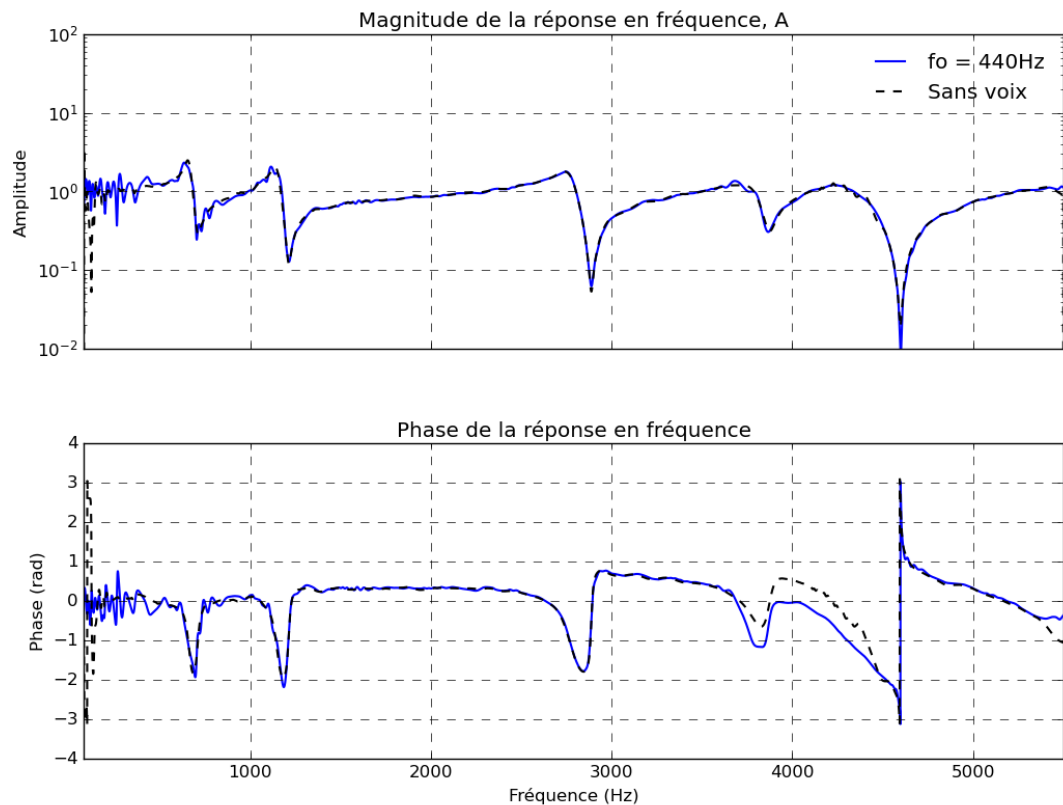
Conditions de mesures :
En salle **semi-anéchoïque**

Conduit vocal : **maquettes** (Arai, 2007)

Chirp **linéaire** large bande ($[80 ; 5500]$ Hz, 1s)

Voix : **Klatt&Klatt avec vibrato**, $f_0 = [174, 220, 277, 349, 392, 415, 440, 554, 1108]$ Hz

Robustesse de la méthode : mesures sur maquettes

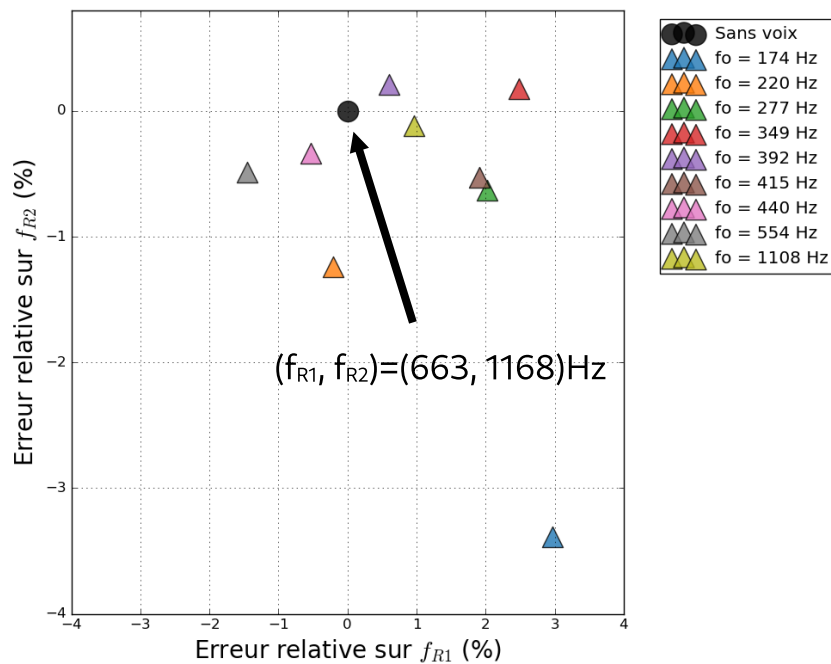


Robustesse de la méthode : mesures sur maquettes

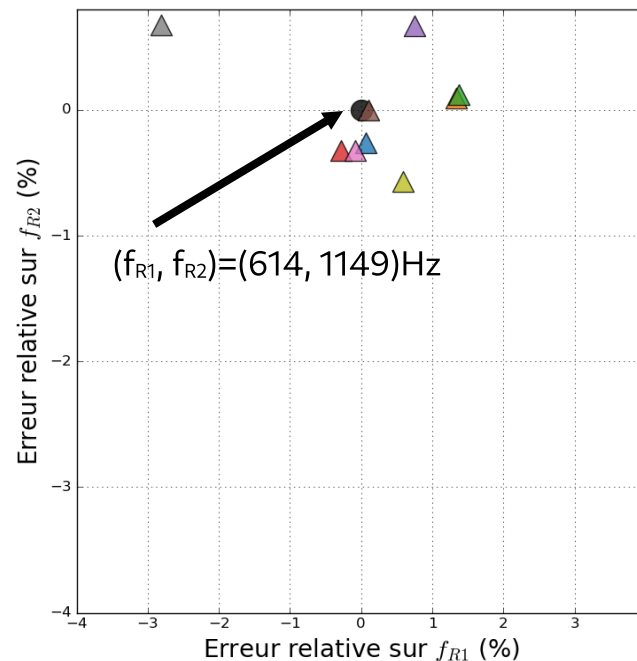
Excitation : Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

Voix : avec vibrato

Mesures



Simulations

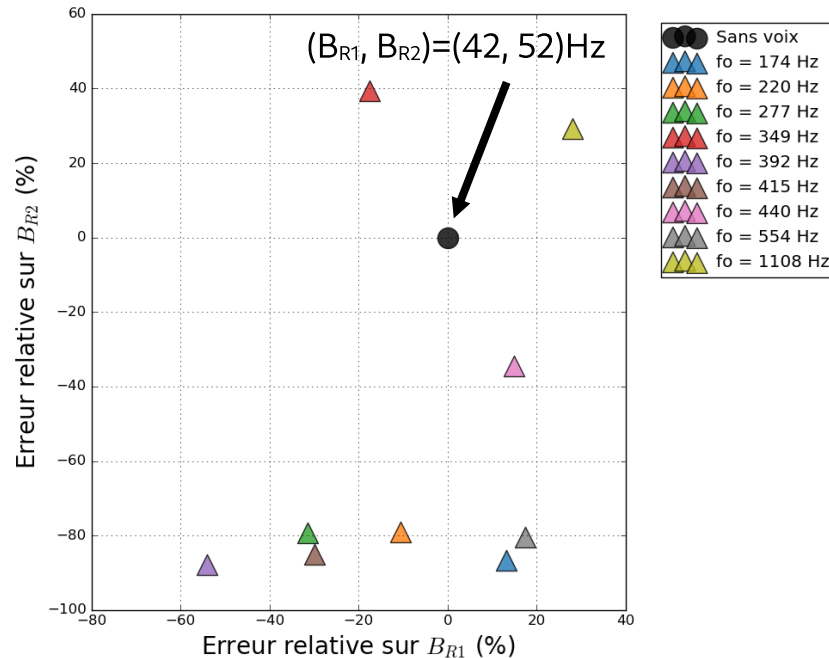


Robustesse de la méthode : mesures sur maquettes

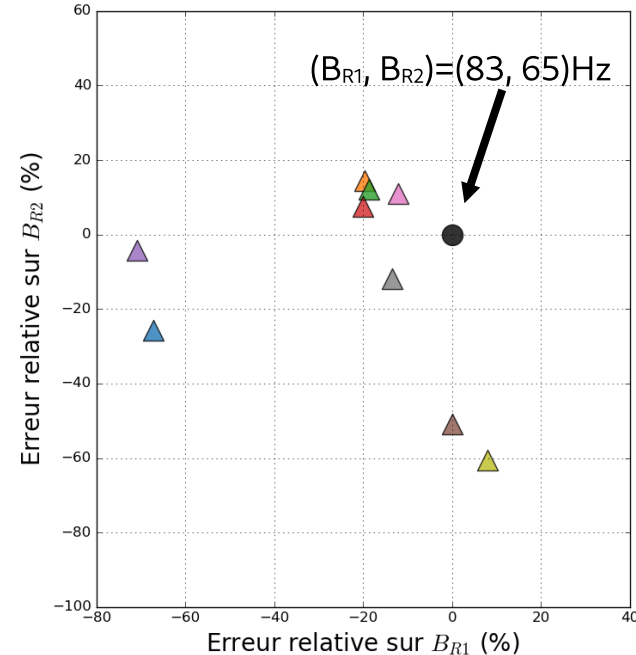
Excitation : Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /a/

Voix : avec vibrato

Mesures



Simulations



Robustesse de la méthode : conclusion & perspectives

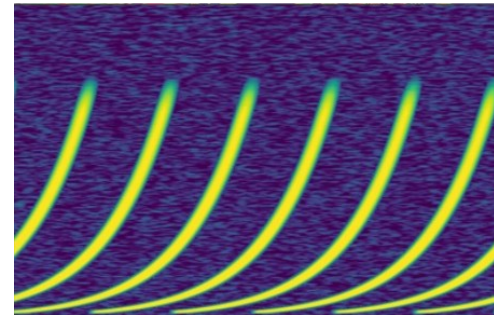
Méthode de séparation : peu coûteuse en ressource et temps de calcul :
environ 5 évaluations ponctuelles de transformées en chirplet par trame

Méthode de mesure globale, avec séparation :

- Robuste pour l'estimation des fréquences de résonance du conduit vocal
- Erreur sur l'estimation des bandes passantes des pics, mais résultats comparables à ceux des autres méthodes actuellement connues
- Permet d'étudier des techniques vocales telles que l'accord résonantiel, dans l'ambitus fréquentiel de la voix

Perspectives : utilisation de la méthode en dynamique :

- envoi de **chirps successifs courts** et à **intervalle réduit**
- adaptation au **chirp exponentiel**
- **étude de techniques vocales**



Merci pour votre attention !

Contexte : mesure des résonances du conduit vocal

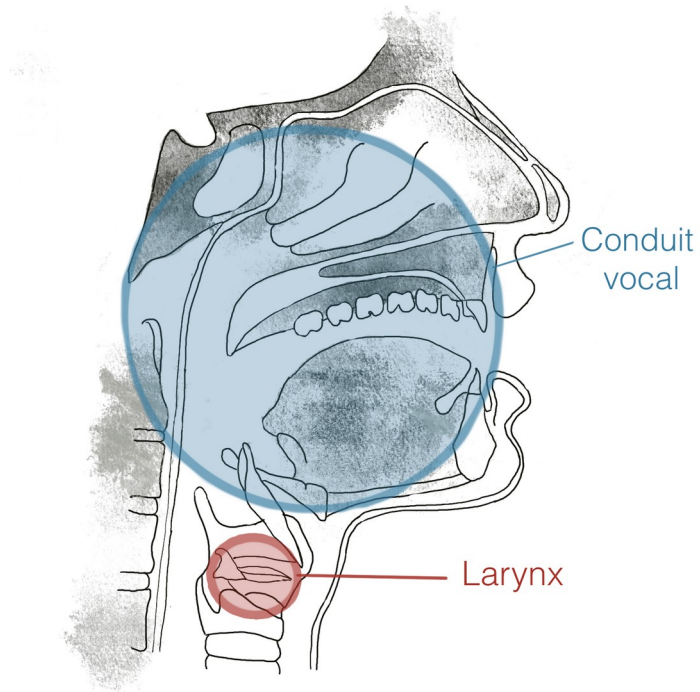
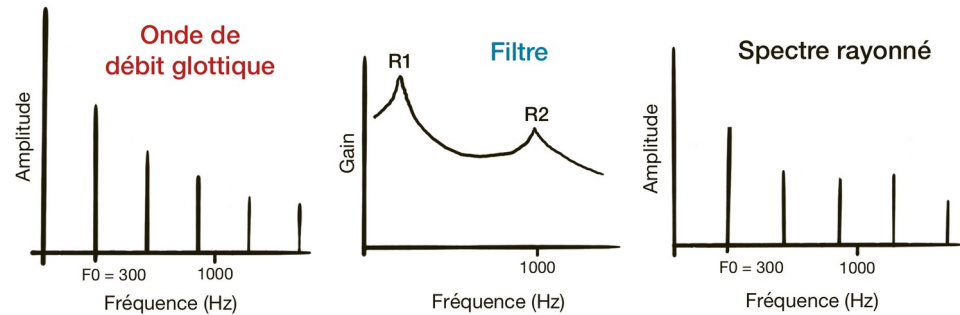


Schéma de l'appareil vocal
(d'après Sundberg et Miller)



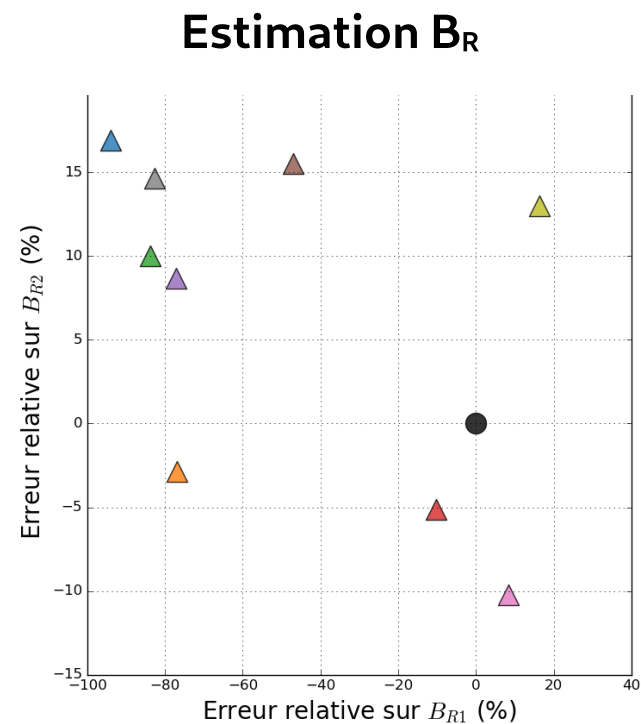
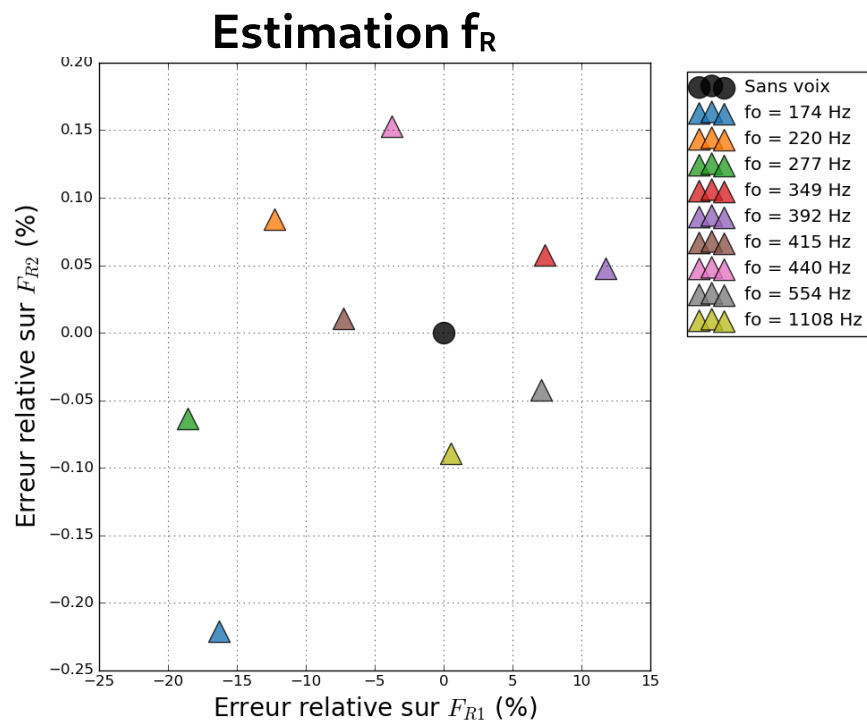
Conduit vocal : **géométrie variable**

Détection des **résonances** du conduit vocal

Robustesse de la méthode : mesures sur maquettes

Excitation : Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /e/

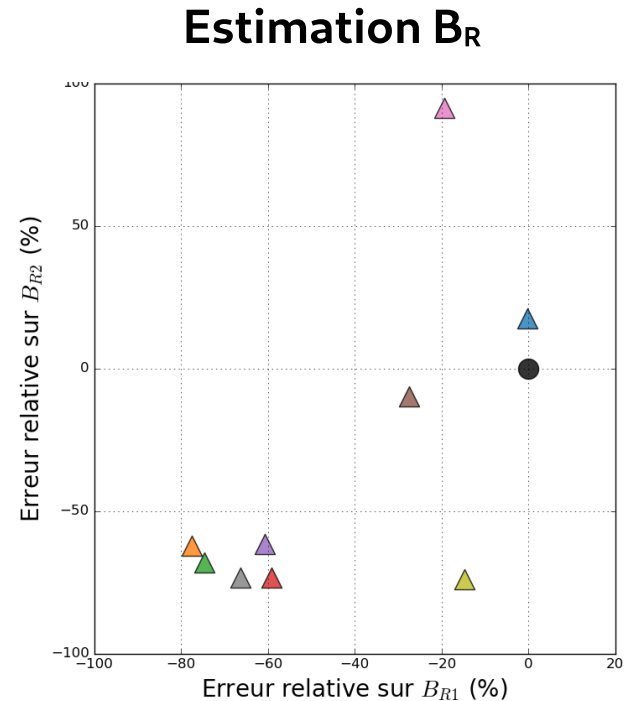
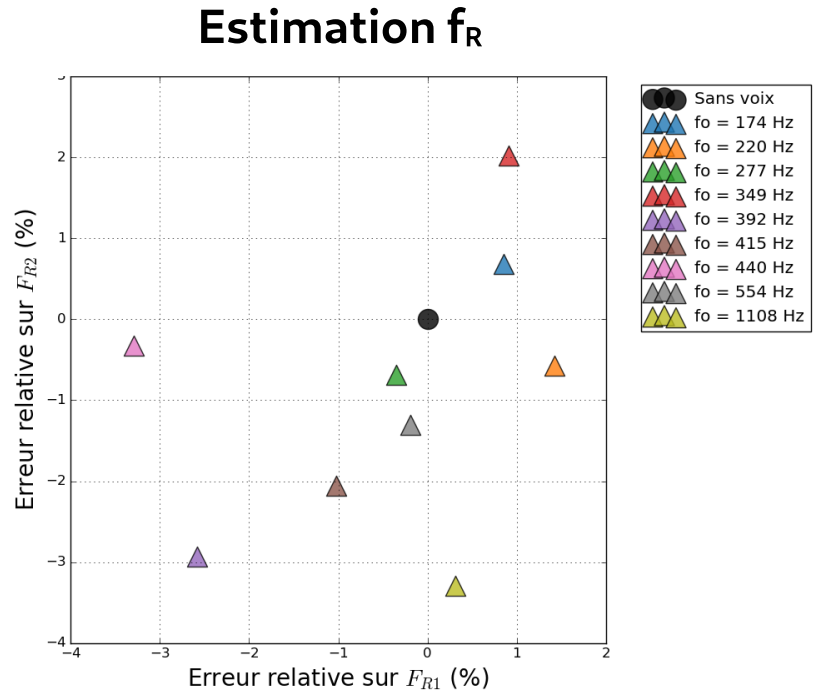
Voix : avec vibrato



Robustesse de la méthode : mesures sur maquettes

Excitation : Chirp linéaire ([80, 5500]Hz, 1s), voyelle /o/

Voix : avec vibrato



Analyse modale : méthode des cercles de Kennelly

Objectif : déterminer les paramètres G_0 et G_1 pour obtenir f_R et Q_R

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}\right)$$

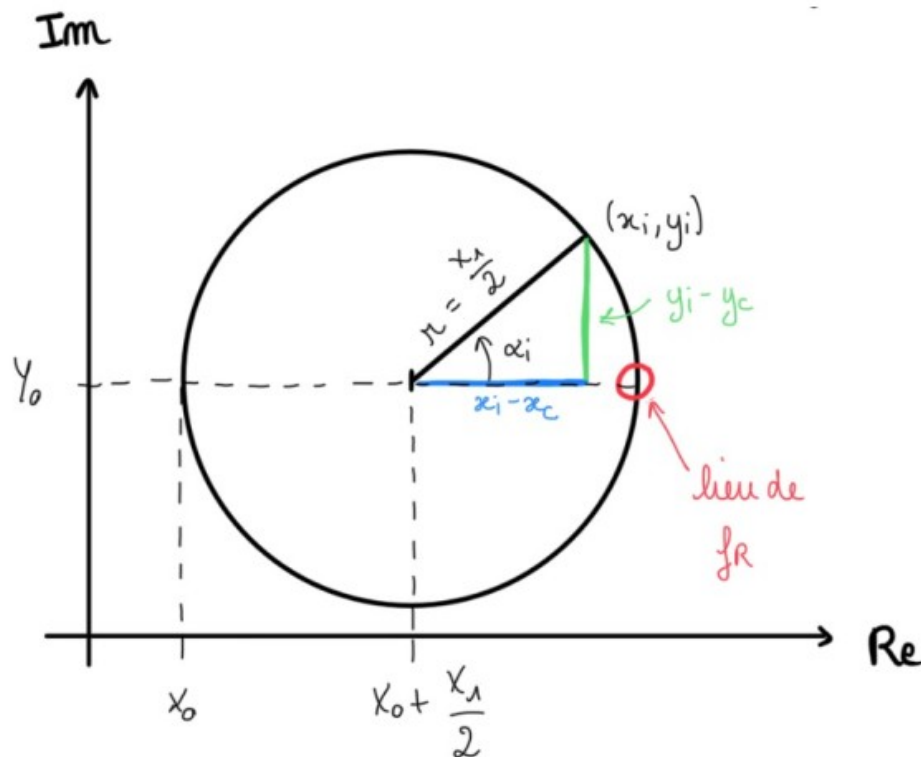
$$\tan\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) = Q_R \left(\frac{f_i}{f_R} - \frac{f_R}{f_i}\right)$$

f_R

Extrémité droite du
cercle ($\alpha_i = 0$)

Q_R

Distance angulaire entre
2 points successifs



Bonus : les derniers résultats

A quel point peut-on diminuer la durée du chirp ?

