

Commande optimale appliquée aux systèmes d'imagerie ultrasonore

Sébastien Ménigot

Université François Rabelais de Tours, UMR-S930 et CNRS ERL 3106
Inserm U 930 - *Imagerie et cerveau*

12 décembre 2011

Directeur de thèse : Jean-Marc Girault
Co-directeur de thèse : Abdeldjalil Ouahabi



Instituts
thématiques



Inserm

Institut national
de la santé et de la recherche médicale



Plan

- 1 Introduction
- 2 Commande optimale en imagerie harmonique ultrasonore
- 3 Commande optimale en imagerie codée d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné
- 4 Conclusions

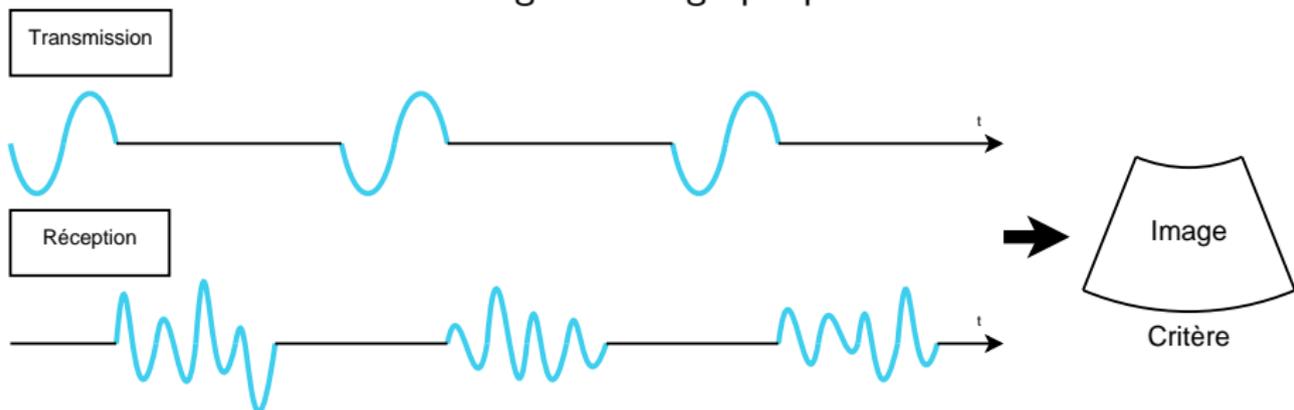
Introduction



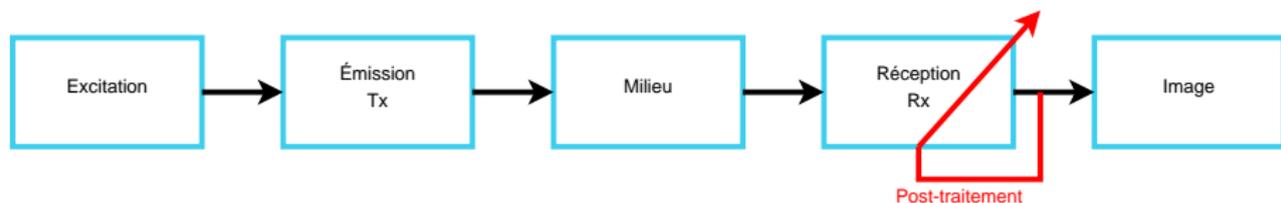
Système d'imagerie ultrasonore



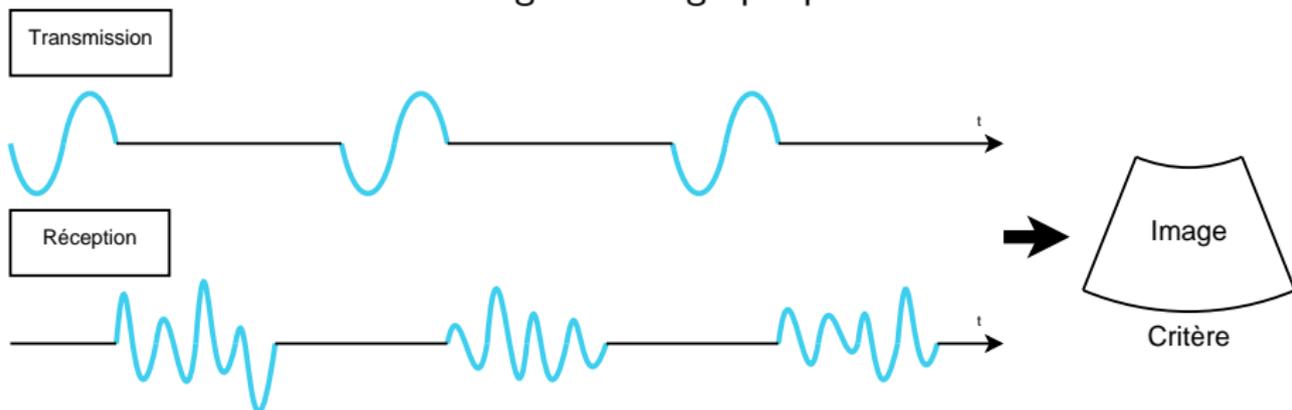
Imagerie échographique



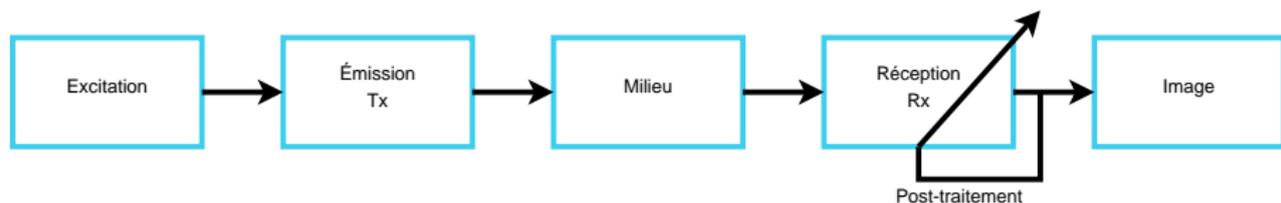
Optimisation de la sortie par post-traitement



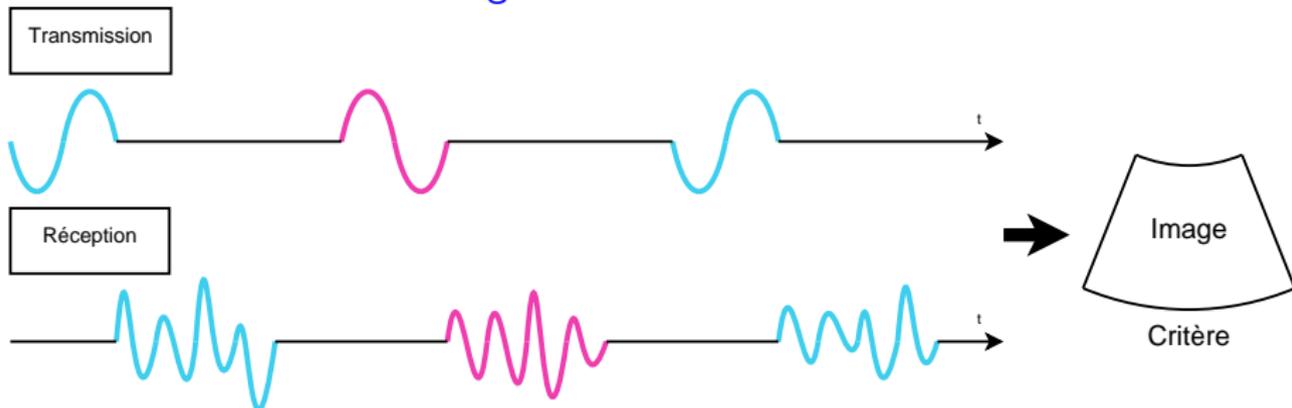
Imagerie échographique



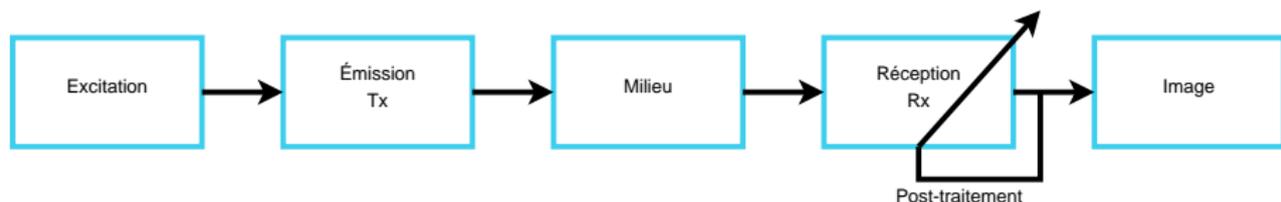
Optimisation de la sortie par post-traitement



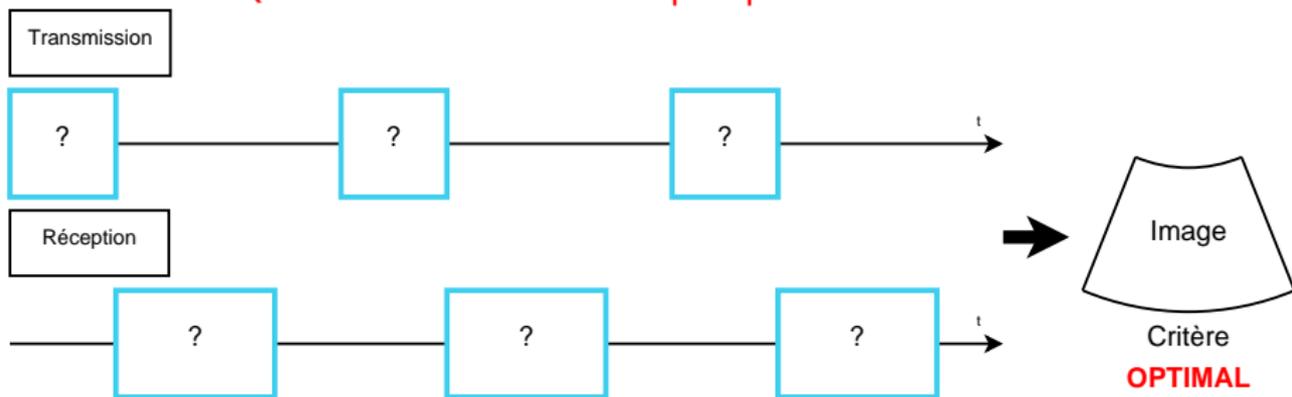
Imagerie ultrasonore codée



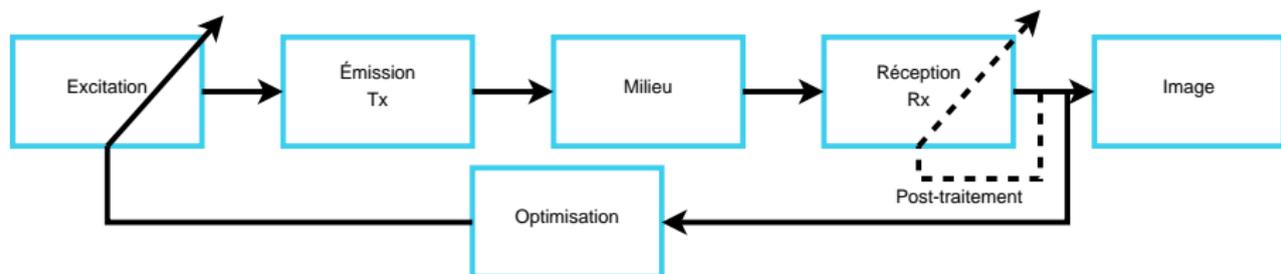
Optimisation de la sortie par post-traitement



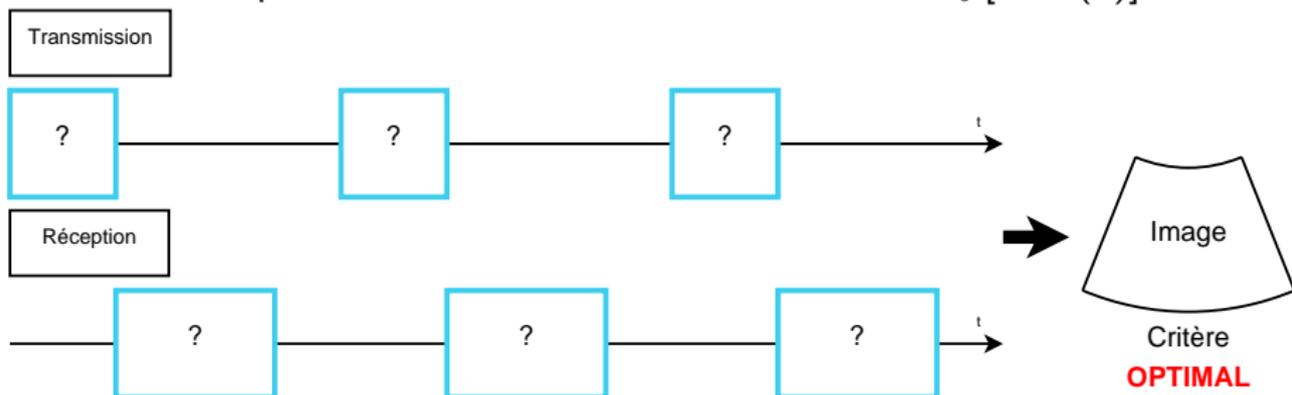
Quelle est la commande qui optimise un critère ?



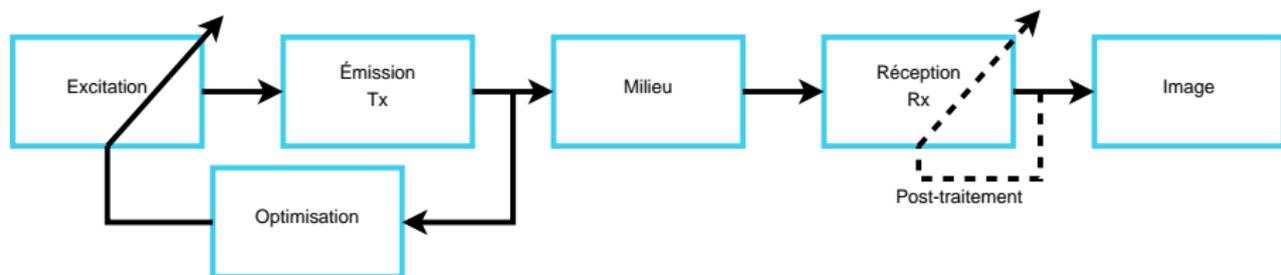
Commande optimale pour le système



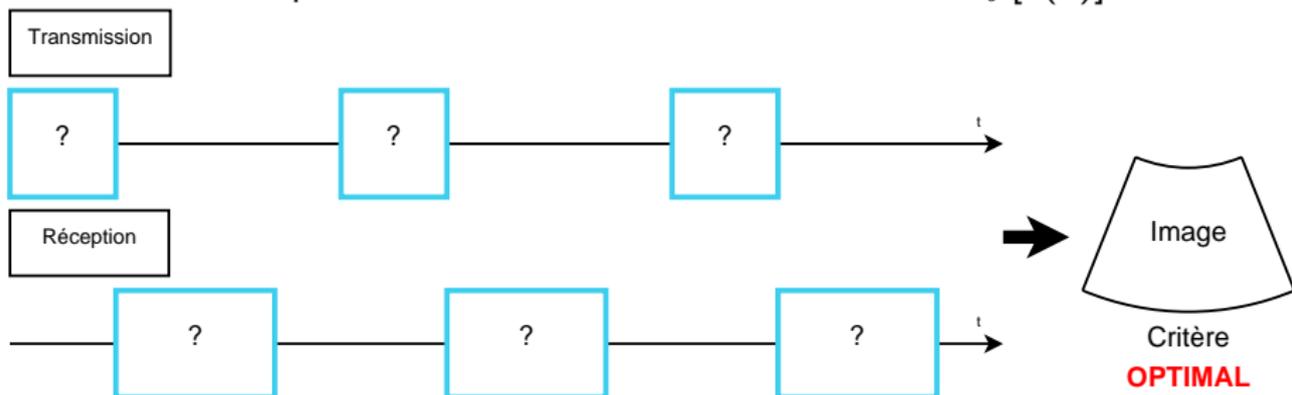
Exemple de choix de la fonction de coût : $\max_{\theta} [CTR(\theta)]$



Commande optimale pour le système



Exemple de choix de la fonction de coût : $\min_{\theta} [\varepsilon(\theta)]$



Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

→ Problème difficile

- 1 Excitations aléatoires
 - 2 1% des bruits → CTR élevé
 - 3 Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre
- ⇒ Solution pas entièrement satisfaisante

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

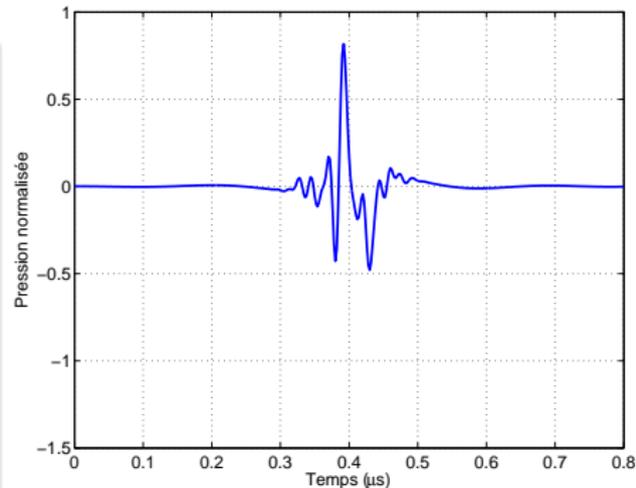
→ Problème difficile

① Excitations aléatoires

② 1% des bruits → CTR élevé

③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre

⇒ Solution pas entièrement satisfaisante



$CTR = 15,7 \text{ dB}$

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

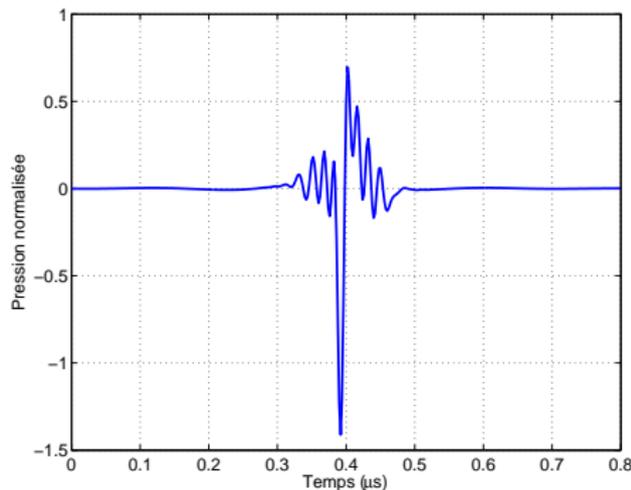
→ Problème difficile

① Excitations aléatoires

② 1% des bruits → CTR élevé

③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre

⇒ Solution pas entièrement satisfaisante



$CTR = 31$ dB

Solutions pour trouver la commande optimale

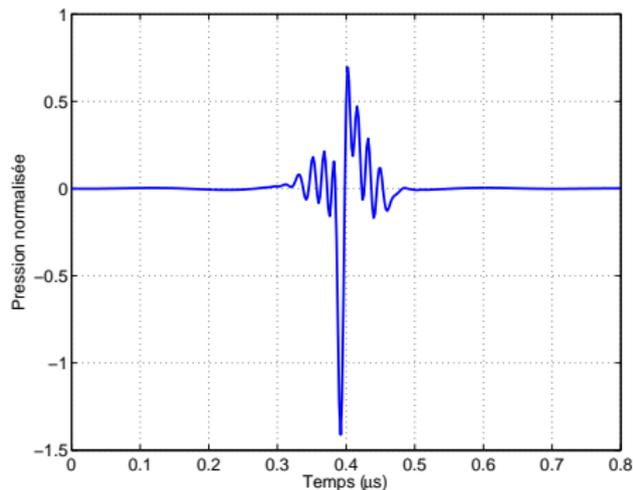
Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

→ Problème difficile

- 1 Excitations aléatoires
- 2 1% des bruits → CTR élevé
- 3 Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre

⇒ Solution pas entièrement satisfaisante



$CTR = 31$ dB

Solutions pour trouver la commande optimale

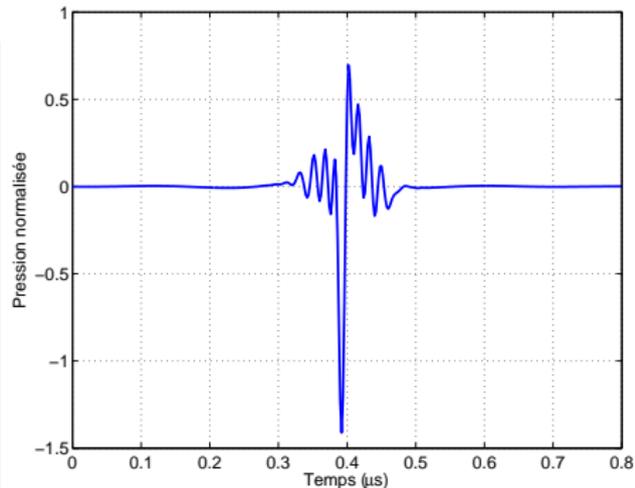
Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

→ Problème difficile

- 1 Excitations aléatoires
- 2 1% des bruits → CTR élevé
- 3 Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre

⇒ Solution pas entièrement satisfaisante



$CTR = 31$ dB

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

- Problème difficile
- ① Excitations aléatoires
- ② 1% des bruits → CTR élevé
- ③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre
- ⇒ Solution pas entièrement satisfaisante

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

- Problème difficile
- ① Excitations aléatoires
- ② 1% des bruits → CTR élevé
- ③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre
- ⇒ Solution pas entièrement satisfaisante

Hypothèse sur la forme

- Problème plus simple
- Optimisation paramétrique
- Paramètres : fréquence, amplitude, phase,...
- ⇒ Solution sous-optimale

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

- Problème difficile
- ① Excitations aléatoires
- ② 1% des bruits → CTR élevé
- ③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre
- ⇒ Solution pas entièrement satisfaisante

Hypothèse sur la forme

- Problème plus simple
- Optimisation paramétrique
- Paramètres : fréquence, amplitude, phase,...
- ⇒ Solution sous-optimale

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

Aucune hypothèse sur la forme

- Problème difficile
- ① Excitations aléatoires
- ② 1% des bruits → CTR élevé
- ③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre
- ⇒ Solution pas entièrement satisfaisante

Hypothèse sur la forme

- Problème plus simple
- Optimisation paramétrique
- Paramètres : fréquence, amplitude, phase,...
- ⇒ Solution sous-optimale

Solutions pour trouver la commande optimale

Quelle est la commande qui optimise une fonction de coût ?

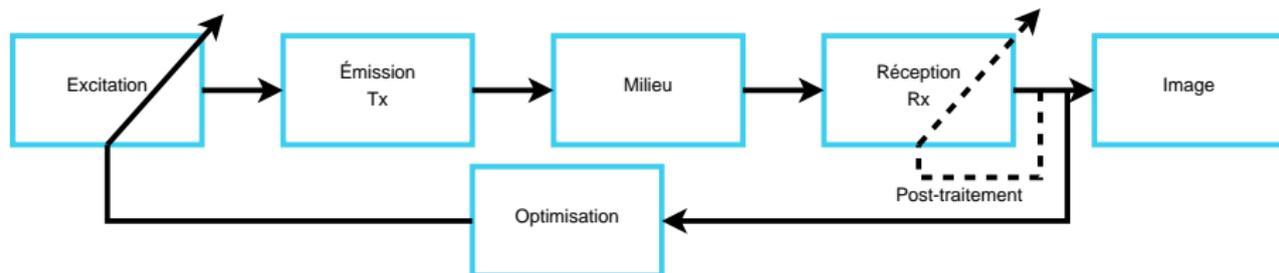
Aucune hypothèse sur la forme

- Problème difficile
- ① Excitations aléatoires
- ② 1% des bruits → CTR élevé
- ③ Optimiser avec ce bruit à l'aide de paramètres d'un filtre
- ⇒ Solution pas entièrement satisfaisante

Hypothèse sur la forme

- Problème plus simple
- Optimisation paramétrique
- Paramètres : fréquence, amplitude, phase,...
- ⇒ Solution sous-optimale

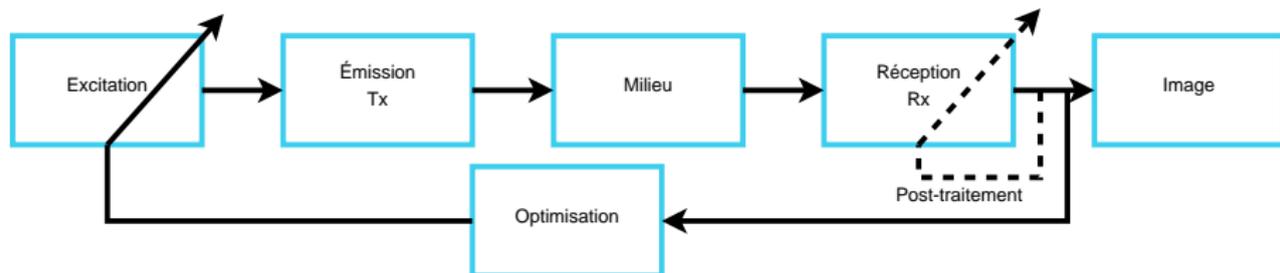
Commande optimale en imagerie harmonique ultrasonore



Quels sont les paramètres de la commande qui optimise un critère constituant l'image ?

- 1 Imagerie ultrasonore de contraste
- 2 Imagerie harmonique du tissu

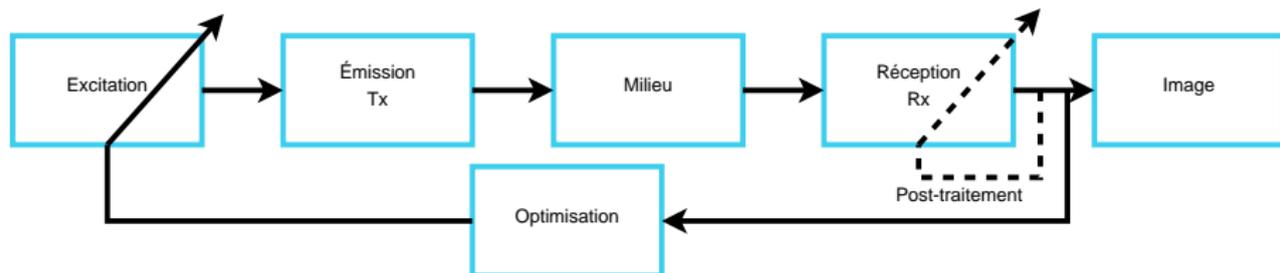
Commande optimale en imagerie harmonique ultrasonore



Quels sont les paramètres de la commande qui optimise un critère constituant l'image ?

- 1 Imagerie ultrasonore de contraste
- 2 Imagerie harmonique du tissu

Commande optimale en imagerie harmonique ultrasonore



Quels sont les paramètres de la commande qui optimise un critère constituant l'image ?

- 1 Imagerie ultrasonore de contraste
- 2 Imagerie harmonique du tissu

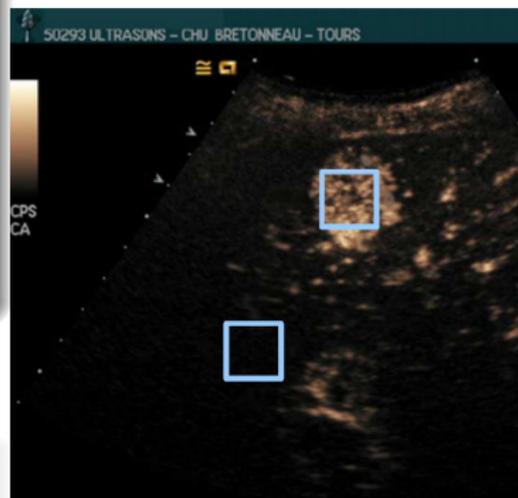
Imagerie ultrasonore de contraste

Produit de contraste

- Injection de produit de contraste \Rightarrow imagerie de perfusion
- Microbulles encapsulées : diamètre moyen de 1 à 10 μm
- Comportement fortement non-linéaire

Contrast to Tissue Ratio

$$CTR = \frac{E_{\text{microbulles}}}{E_{\text{tissu}}}$$



[F. Tranquart]

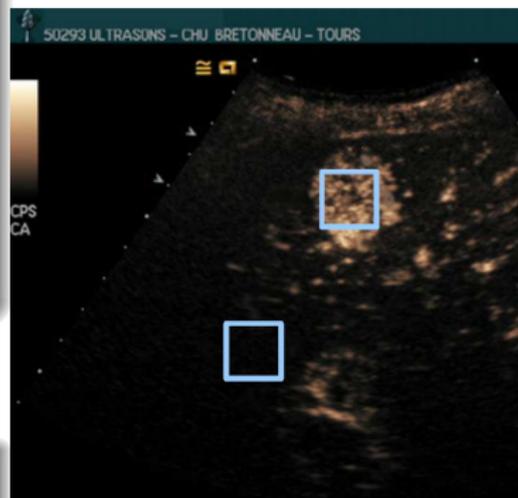
Imagerie ultrasonore de contraste

Produit de contraste

- Injection de produit de contraste \Rightarrow imagerie de perfusion
- Microbulles encapsulées : diamètre moyen de 1 à 10 μm
- Comportement fortement non-linéaire

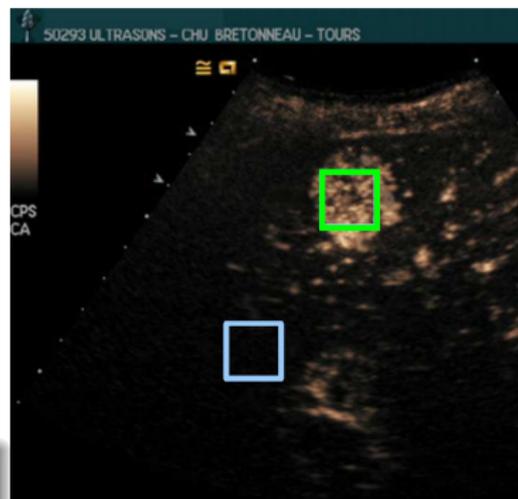
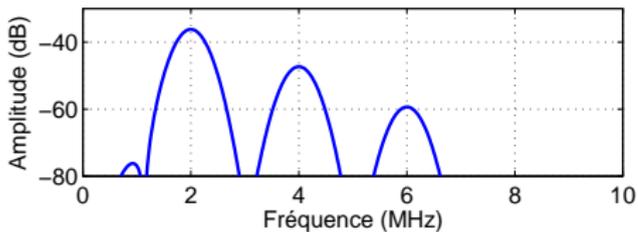
Contrast to Tissue Ratio

$$CTR = \frac{E_{\text{microbulles}}}{E_{\text{tissu}}}$$



[F. Tranquart]

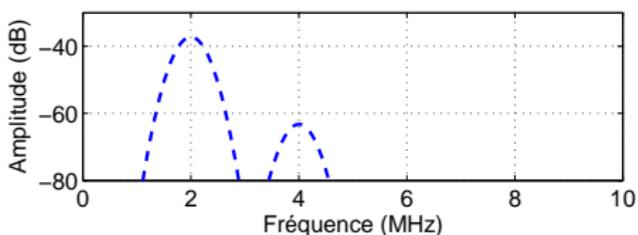
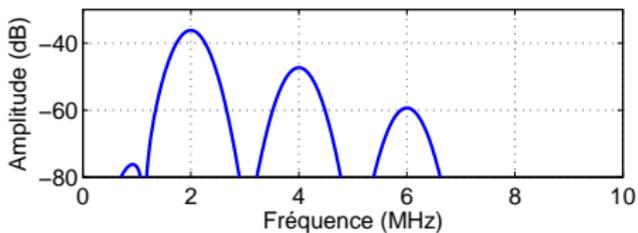
Imagerie ultrasonore de contraste



Contrast to Tissue Ratio

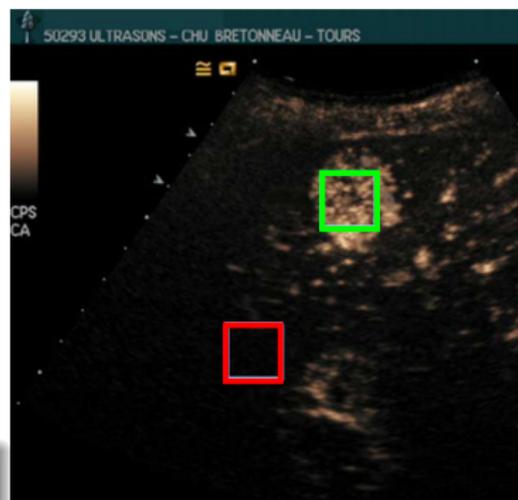
$$CTR = \frac{E_{microbulles}}{E_{tissu}}$$

Imagerie ultrasonore de contraste



Contrast to Tissue Ratio

$$CTR = \frac{E_{\text{microbulles}}}{E_{\text{tissu}}}$$



[F. Tranquart]

Réhausser le contraste

Méthode d'imagerie

- Méthodes non codées
 - Imagerie du second harmonique
 - Imagerie par filtrage autorégressif non-linéaire
 - Imagerie sous-harmonique
 - Imagerie super-harmonique
 - Correction de l'atténuation en imagerie de contraste
- Méthodes codées
 - Imagerie par inversion d'impulsions
 - Imagerie par modulation d'amplitude
 - Imagerie par modulation de phase et d'amplitude
 - Imagerie par soustraction d'impulsions
 - Imagerie harmonique par *chirp*
 - Imagerie par retournement de *chirp*

Réhausser le contraste

Méthode d'imagerie

- Méthodes non codées
 - Imagerie du second harmonique
 - Imagerie par filtrage autorégressif non-linéaire
 - Imagerie sous-harmonique
 - Imagerie super-harmonique
 - Correction de l'atténuation en imagerie de contraste
- Méthodes codées
 - Imagerie par inversion d'impulsions
 - Imagerie par modulation d'amplitude
 - Imagerie par modulation de phase et d'amplitude
 - Imagerie par soustraction d'impulsions
 - Imagerie harmonique par *chirp*
 - Imagerie par retournement de *chirp*

Réhausser le contraste

Méthode d'imagerie

- Méthodes non codées
 - Imagerie du second harmonique
 - Imagerie par filtrage autorégressif non-linéaire
 - Imagerie sous-harmonique
 - Imagerie super-harmonique
 - Correction de l'atténuation en imagerie de contraste
- Méthodes codées
 - Imagerie par inversion d'impulsions
 - Imagerie par modulation d'amplitude
 - Imagerie par modulation de phase et d'amplitude
 - Imagerie par soustraction d'impulsions
 - Imagerie harmonique par *chirp*
 - Imagerie par retournement de *chirp*

Réhausser le contraste

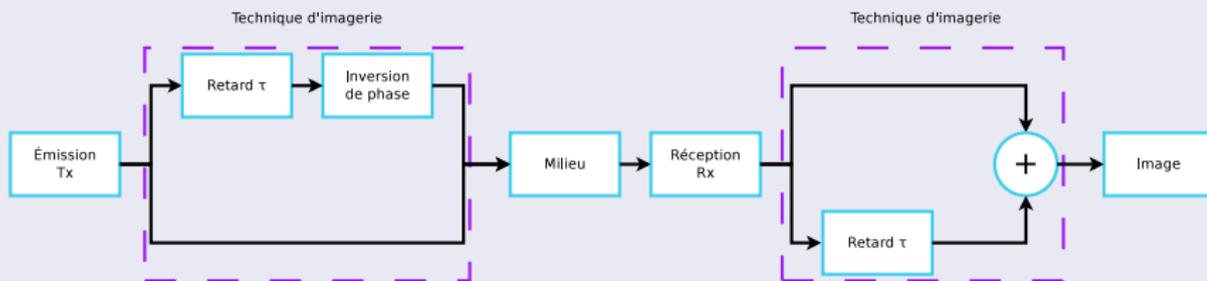
Méthode d'imagerie

- Méthodes non codées
 - Imagerie du second harmonique
 - Imagerie par filtrage autorégressif non-linéaire
 - Imagerie sous-harmonique
 - Imagerie super-harmonique
 - Correction de l'atténuation en imagerie de contraste
- Méthodes codées
 - Imagerie par inversion d'impulsions
 - Imagerie par modulation d'amplitude
 - Imagerie par modulation de phase et d'amplitude
 - Imagerie par soustraction d'impulsions
 - Imagerie harmonique par *chirp*
 - Imagerie par retournement de *chirp*

Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°



- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 x(t) + w_2 x^2(t) + \dots + w_1 [-x(t)] + w_2 [-x(t)]^2 + \dots$$

où w_i sont des paramètres d'amplitude



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 x(t) + w_2 x^2(t) + \dots + w_1 [-x(t)] + w_2 [-x(t)]^2 + \dots$$

où w_i sont des paramètres d'amplitude



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 x(t) + w_2 x^2(t) + \dots + w_1 [-x(t)] + w_2 [-x(t)]^2 + \dots$$

où w_i sont des paramètres d'amplitude



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 x(t) + w_2 x^2(t) + \dots + w_1 [-x(t)] + w_2 [-x(t)]^2 + \dots$$

où w_i sont des paramètres d'amplitude



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = 2w_2x(t)^2 + \dots$$

où w_i sont des paramètres d'amplitude



Imagerie par inversion d'impulsions

Principe

- 2 ondes successives déphasées de 180°
- Extraction des composantes paires par la somme $S(t)$ de deux échos ou impaires par la différence $D(t)$

Démonstration : Soit x une commande du système

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = 2w_2x(t)^2 + \dots$$

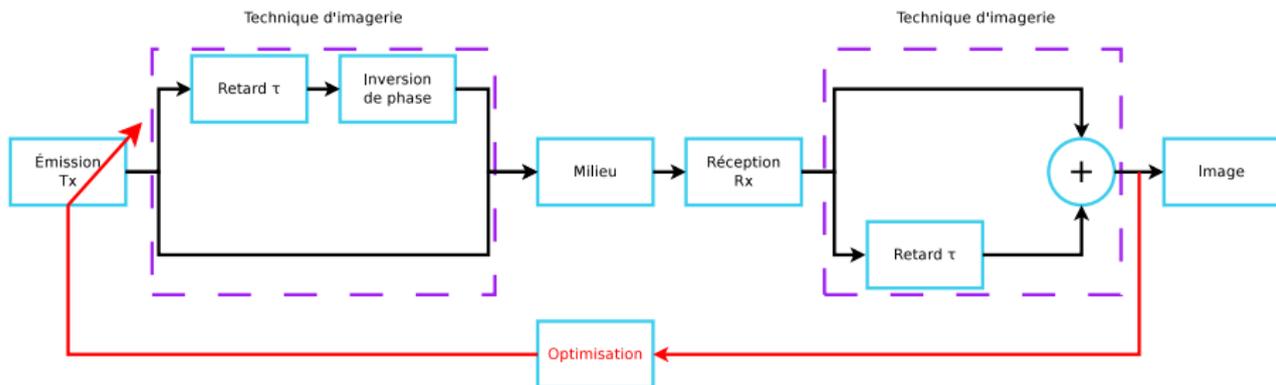
$$D(t) = 2w_1x(t) + \dots$$



Mise en œuvre de l'approche : optimisation des paramètres θ

Réglage de l'optimisation itérative

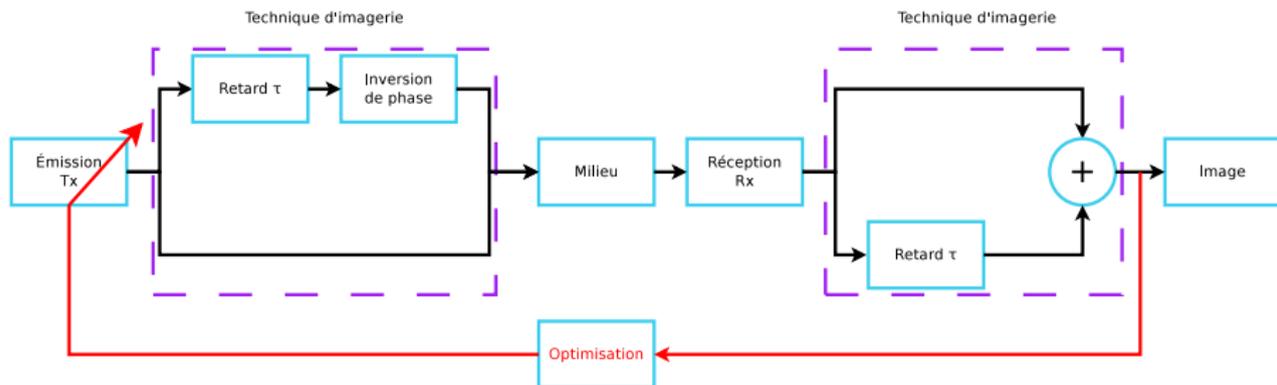
- 1 Choix de la fonction de coût $J(\theta)$
- 2 Choix des variables θ d'entrée
- 3 Choix de l'algorithme d'optimisation



Mise en œuvre de l'approche : optimisation des paramètres θ

Réglage de l'optimisation itérative

- 1 Choix de la fonction de coût $J(\theta)$
- 2 Choix des variables θ d'entrée
- 3 Choix de l'algorithme d'optimisation

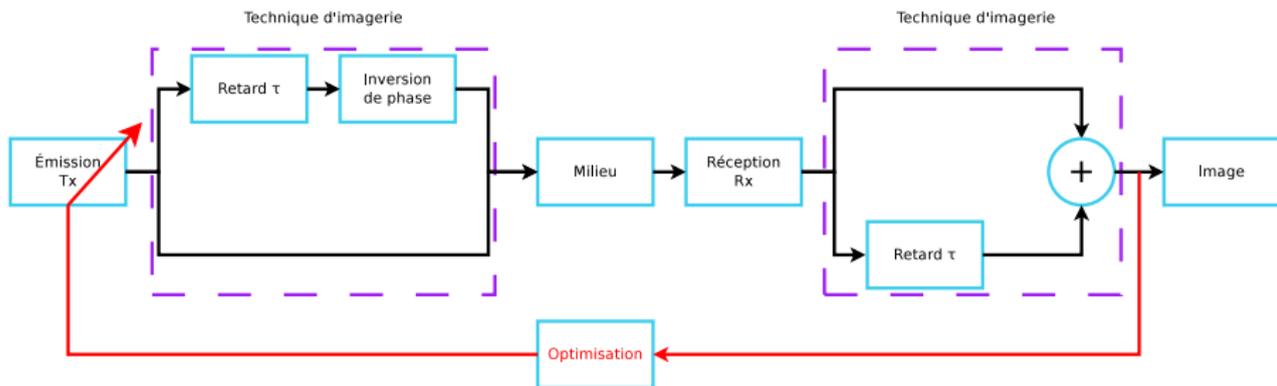


Commande optimale itérative

Mise en œuvre de l'approche : optimisation des paramètres θ

Réglage de l'optimisation itérative

- 1 Choix de la fonction de coût $J(\theta)$
- 2 Choix des variables θ d'entrée
- 3 Choix de l'algorithme d'optimisation



Trouver la fonction de coût associée à l'objectif

Objectif

Maximiser le CTR dans l'image à l'aide de paramètre θ

① Choix de l'expression de la fonction de coût

- Maximisation du CTR →

$$J(\theta) = CTR(\theta) = \frac{\sum_t \text{echo}_{\text{bulle}}^2(t, x(t, \theta))}{\sum_t \text{echo}_{\text{tissu}}^2(t, x(t, \theta))}$$

- Contrainte : énergie de la commande constante

Trouver la fonction de coût associée à l'objectif

Objectif

Maximiser le CTR dans l'image à l'aide de paramètre θ

① Choix de l'expression de la fonction de coût

- Maximisation du CTR →

$$J(\theta) = CTR(\theta) = \frac{\sum_t echo_{bulle}^2(t, x(t, \theta))}{\sum_t echo_{tissu}^2(t, x(t, \theta))}$$

- Contrainte : énergie de la commande constante

Trouver la fonction de coût associée à l'objectif

Objectif

Maximiser le CTR dans l'image à l'aide de paramètre θ

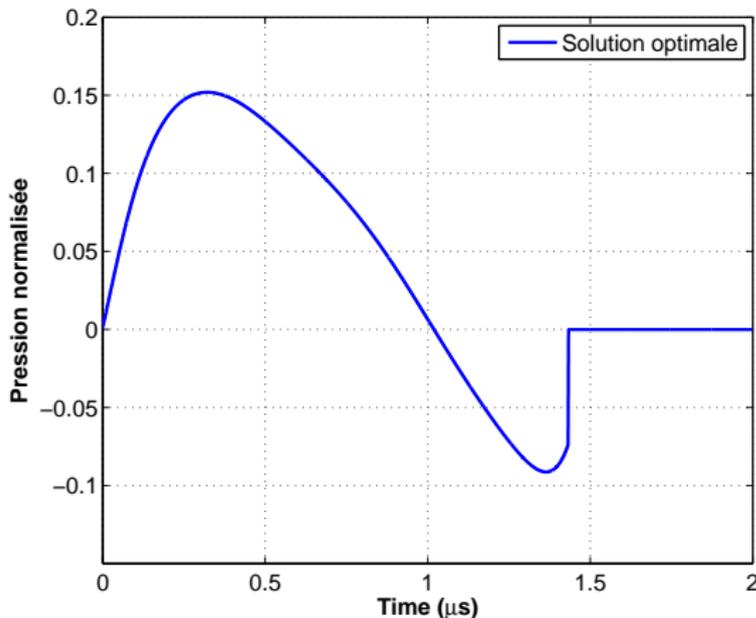
① Choix de l'expression de la fonction de coût

- Maximisation du CTR →

$$J(\theta) = CTR(\theta) = \frac{\sum_t echo_{bulle}^2(t, x(t, \theta))}{\sum_t echo_{tissu}^2(t, x(t, \theta))}$$

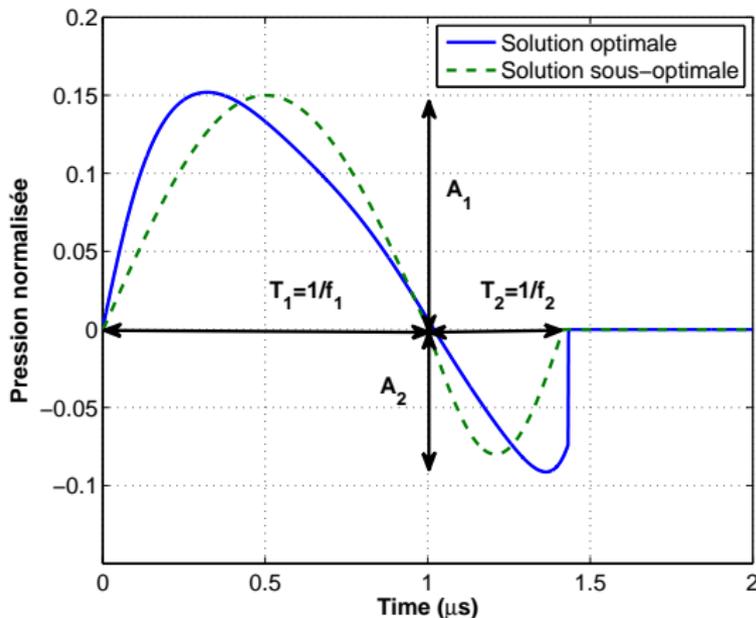
- Contrainte : énergie de la commande constante

Définition de la commande



Solution analytique [Reddy and Szeri, 2002]

Définition de la commande



Exemple d'un cycle d'une commande sous-optimale avec $\alpha = A_1/A_2$

Définition de la commande

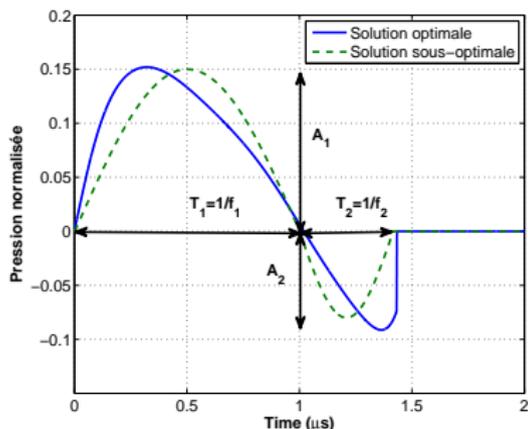
② Choix des variables θ d'entrée

- Fréquence : $\theta = f_0$ avec $f_1 = f_2$ et $\alpha = 1$
- $\theta = [f_1, f_2, \alpha]$

③ Choix de l'algorithme : méthode itérative

→ Algorithme du gradient

→ Algorithme de Nelder-Mead



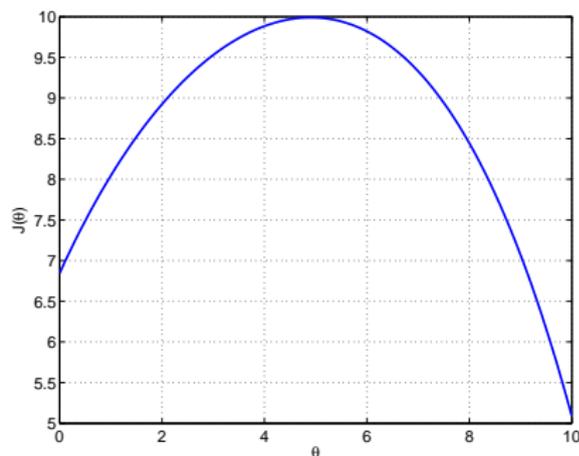
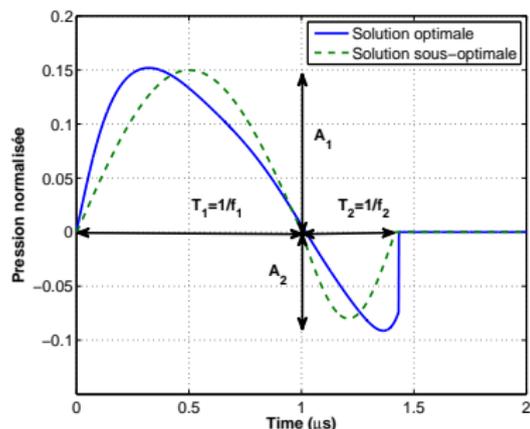
Définition de la commande

② Choix des variables θ d'entrée

- Fréquence : $\theta = f_0$ avec $f_1 = f_2$ et $\alpha = 1$
- $\theta = [f_1, f_2, \alpha]$

③ Choix de l'algorithme : méthode itérative

- Algorithme du gradient
- Algorithme de Nelder-Mead



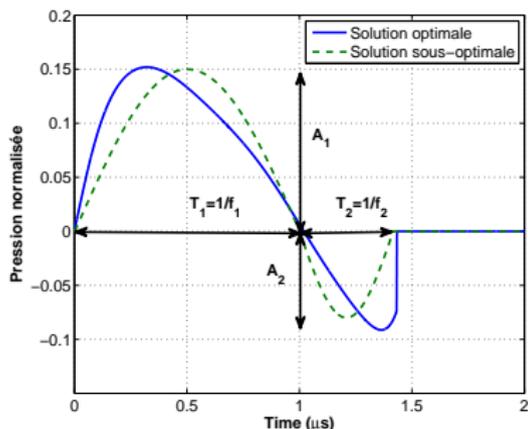
Définition de la commande

② Choix des variables θ d'entrée

- Fréquence : $\theta = f_0$ avec $f_1 = f_2$ et $\alpha = 1$
- $\theta = [f_1, f_2, \alpha]$

③ Choix de l'algorithme : méthode itérative

- Algorithme du gradient
- Algorithme de Nelder-Mead



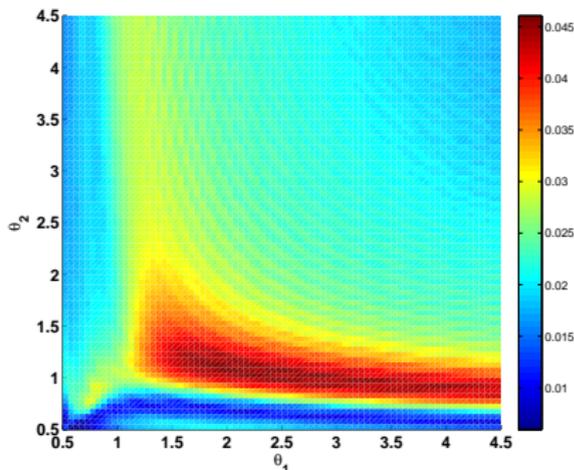
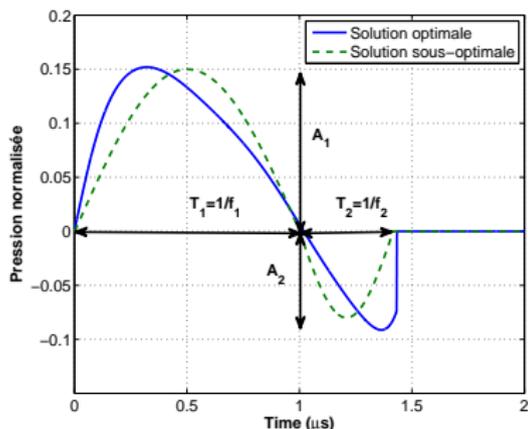
Définition de la commande

② Choix des variables θ d'entrée

- Fréquence : $\theta = f_0$ avec $f_1 = f_2$ et $\alpha = 1$
- $\theta = [f_1, f_2, \alpha]$

③ Choix de l'algorithme : méthode itérative

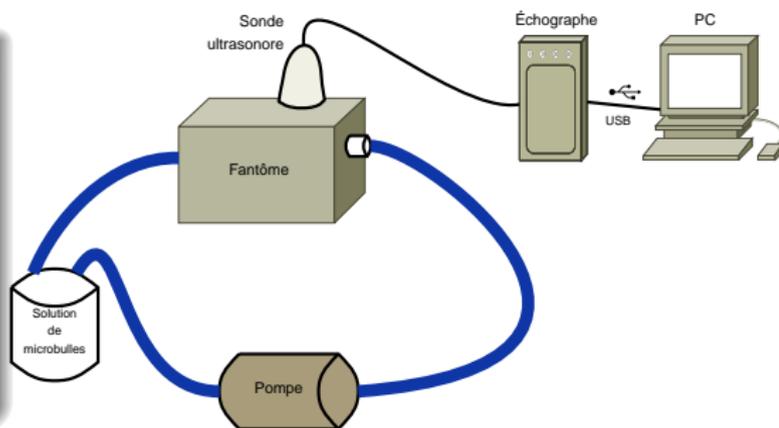
- Algorithme du gradient
- Algorithme de Nelder-Mead



Simulation et dispositif expérimental

Expérience

- Échographe
« ouvert » (MultiX WM, M2M)
- Sonde centrée à $f_c = 4$ MHz
- Microbulles : SonoVue™



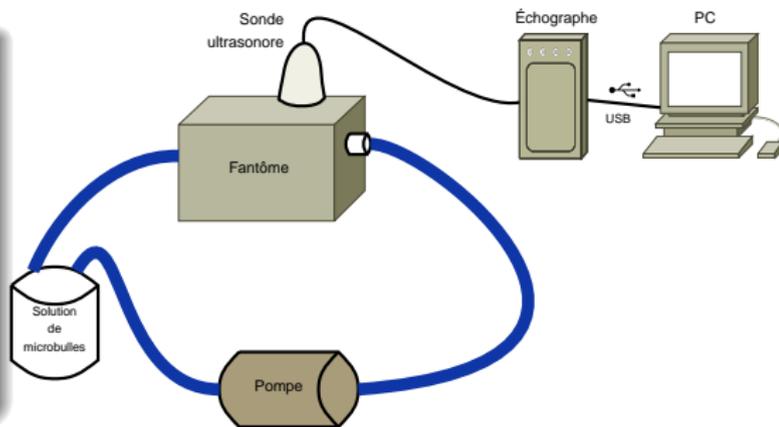
Simulation

- Transducteur centré à $f_c = 3,5$ MHz
- Propagation non-linéaire : méthode pseudo-spectrale [Anderson, 2000]
- Microbulles : modèle de Marmottant (2005)

Simulation et dispositif expérimental

Expérience

- Échographe
« ouvert » (MultiX WM, M2M)
- Sonde centrée à $f_c = 4$ MHz
- Microbulles : SonoVue™



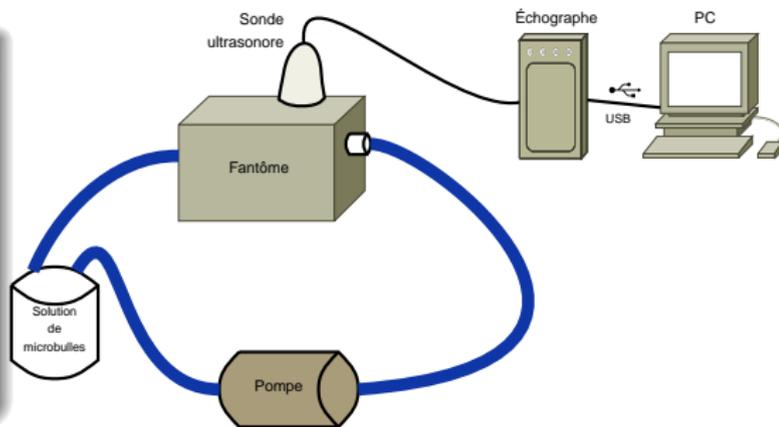
Simulation

- Transducteur centré à $f_c = 3.5$ MHz
- Propagation non-linéaire : méthode pseudo-spectrale [Anderson, 2000]
- Microbulles : modèle de Marmottant (2005)

Simulation et dispositif expérimental

Expérience

- Échographe
« ouvert » (MultiX WM, M2M)
- Sonde centrée à $f_c = 4$ MHz
- Microbulles : SonoVue™



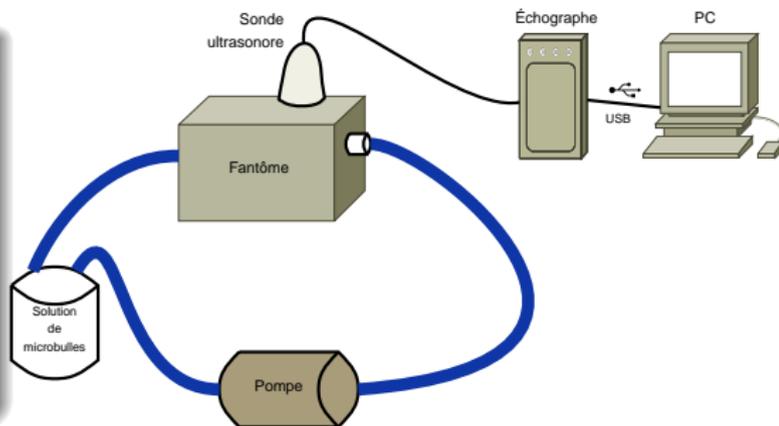
Simulation

- Transducteur centré à $f_c = 3.5$ MHz
- Propagation non-linéaire : méthode pseudo-spectrale [Anderson, 2000]
- Microbulles : modèle de Marmottant (2005)

Simulation et dispositif expérimental

Expérience

- Échographe
« ouvert » (MultiX WM, M2M)
- Sonde centrée à $f_c = 4$ MHz
- Microbulles : SonoVue™



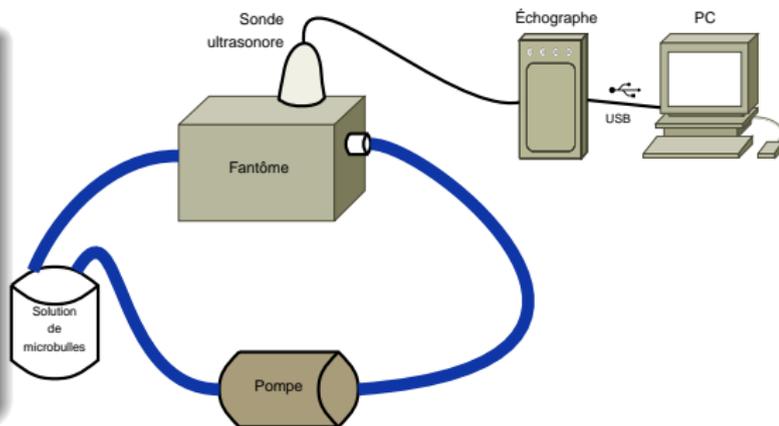
Simulation

- Transducteur centré à $f_c = 3,5$ MHz
- Propagation non-linéaire : méthode pseudo-spectrale [Anderson, 2000]
- Microbulles : modèle de Marmottant (2005)

Simulation et dispositif expérimental

Expérience

- Échographe
« ouvert » (MultiX WM, M2M)
- Sonde centrée à $f_c = 4$ MHz
- Microbulles : SonoVue™



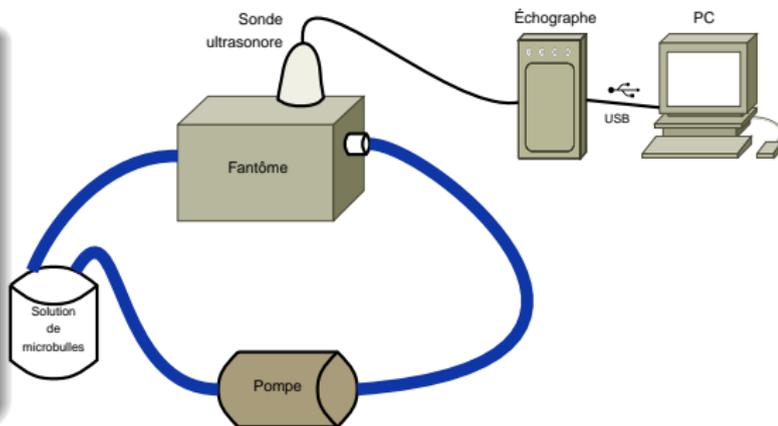
Simulation

- Transducteur centré à $f_c = 3,5$ MHz
- Propagation non-linéaire : méthode pseudo-spectrale [Anderson, 2000]
- Microbulles : modèle de Marmottant (2005)

Simulation et dispositif expérimental

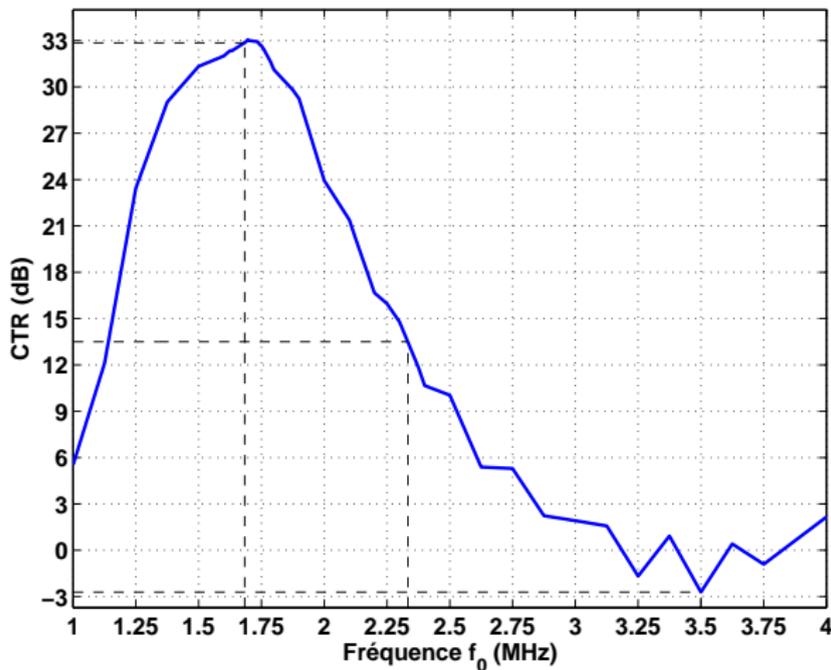
Expérience

- Échographe
« ouvert » (MultiX WM, M2M)
- Sonde centrée à $f_c = 4$ MHz
- Microbulles : SonoVue™

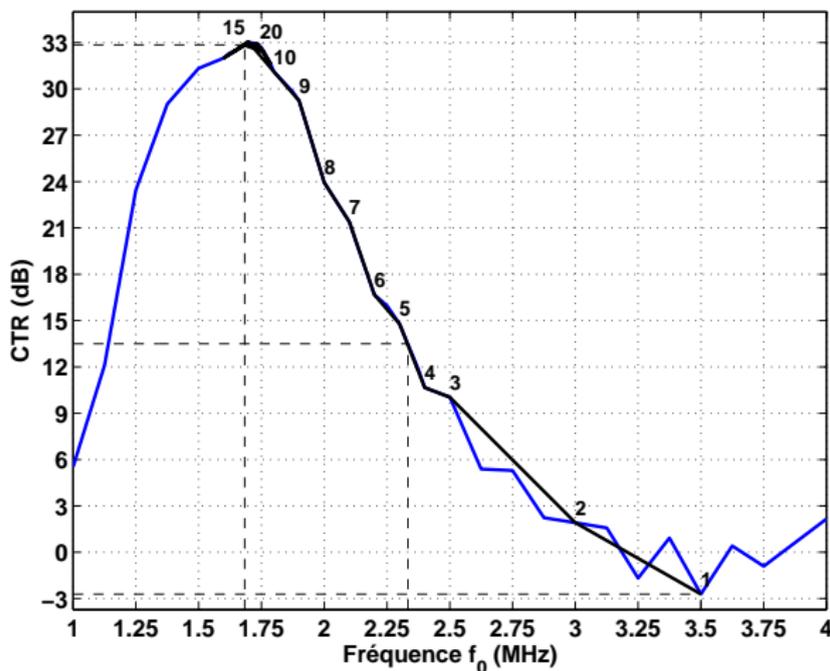


Simulation

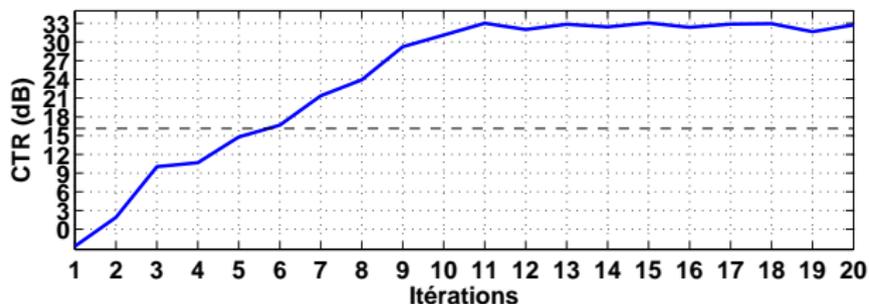
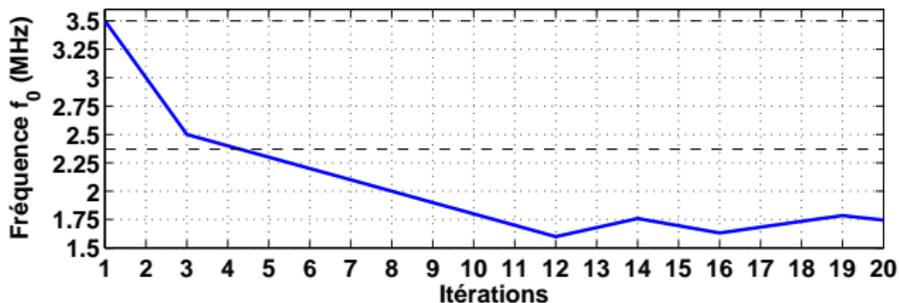
- Transducteur centré à $f_c = 3,5$ MHz
- Propagation non-linéaire : méthode pseudo-spectrale [Anderson, 2000]
- Microbulles : modèle de Marmottant (2005)

Simulation : optimisation par la fréquence f_0 

$$\theta = f_0 \text{ avec } f_1 = f_2 \text{ et } \alpha = 1$$

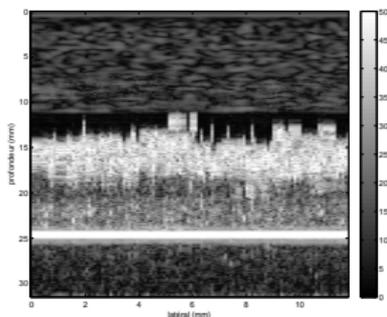
Simulation : optimisation par la fréquence f_0 

$$\theta = f_0 \text{ avec } f_1 = f_2 \text{ et } \alpha = 1$$

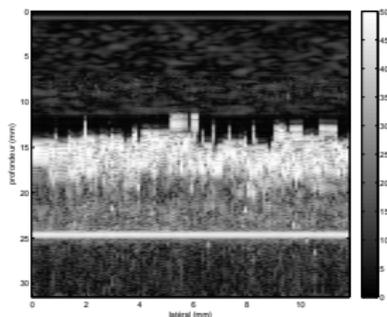
Simulation : optimisation par la fréquence f_0 

$$\theta = f_0 \text{ avec } f_1 = f_2 \text{ et } \alpha = 1$$

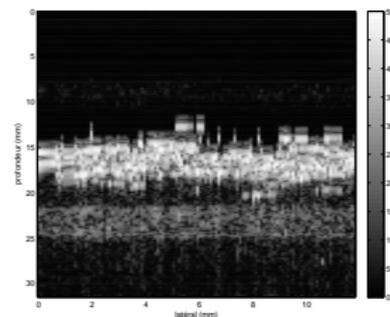
Résultats

Simulation : optimisation par la fréquence f_0 

$$f_0 = f_c = 3,5 \text{ MHz}$$

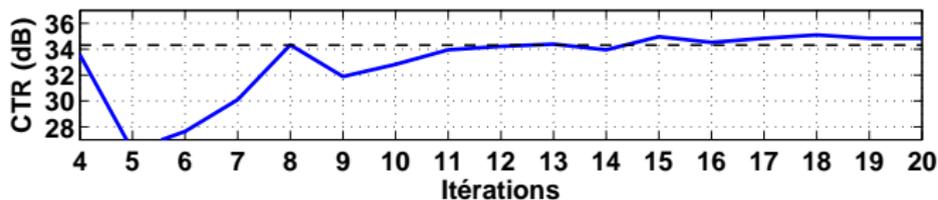
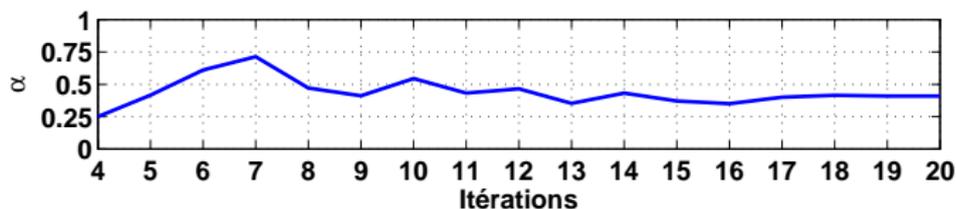
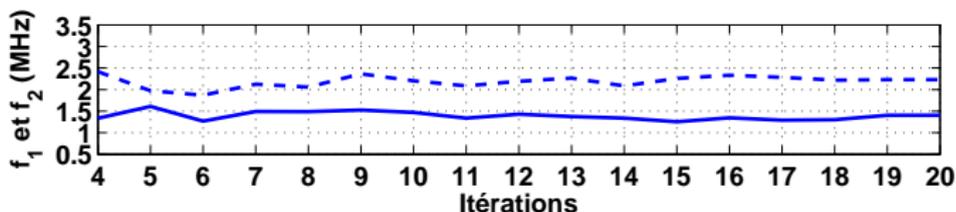


$$f_0 = 2/3 f_c = 2,3 \text{ MHz}$$



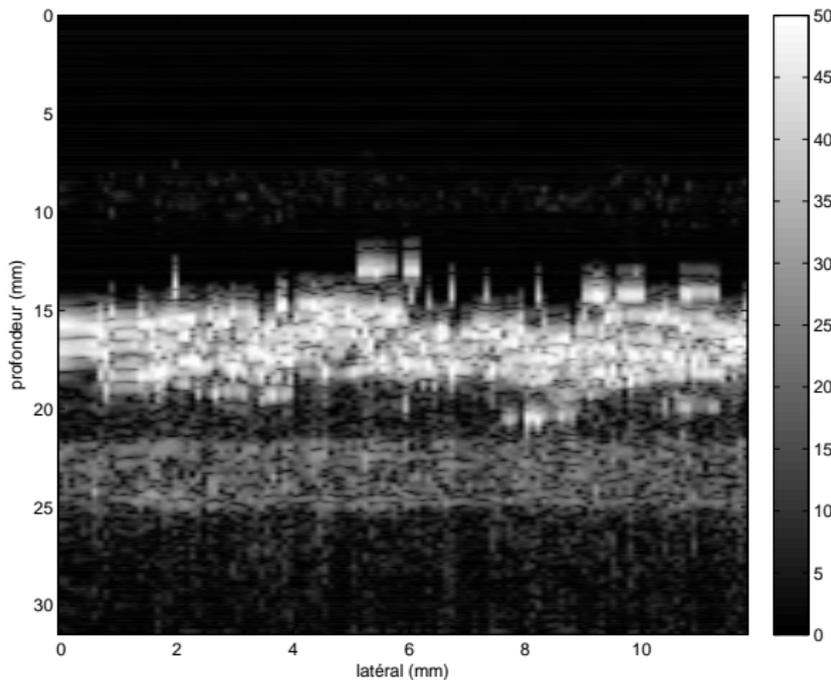
$$f_0 = f_{0,opt} = 1,7 \text{ MHz}$$

Simulation : optimisation par des paramètres de l'onde

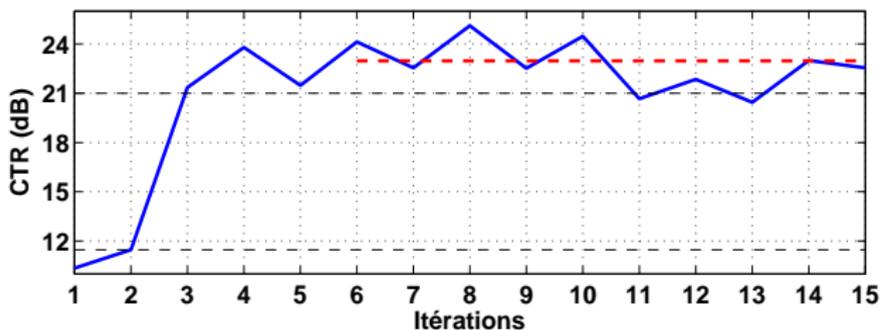
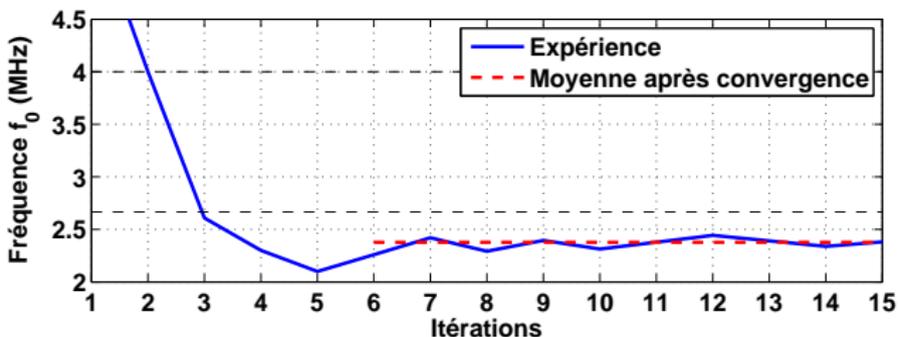


$$\theta = [f_1, f_2, \alpha]$$

Simulation : optimisation par des paramètres de l'onde

 $f_{1,opt}$, $f_{2,opt}$ et α_{opt}

Expérience : optimisation de la fréquence



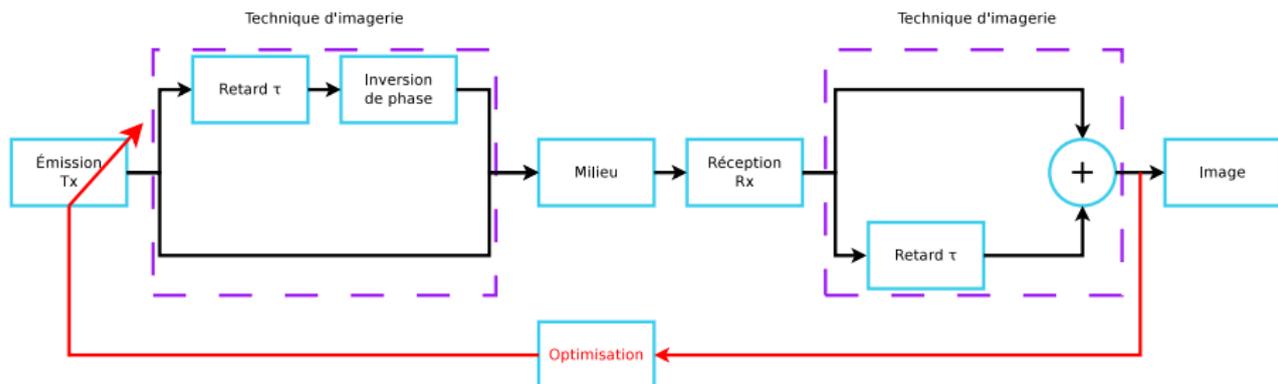
$$\theta = f_0 \text{ avec } f_1 = f_2 \text{ et } \alpha = 1$$

Application à l'imagerie harmonique du tissu

Application à l'imagerie harmonique du tissu

Imagerie harmonique du tissu

- Inclusion hyper-échogène dans le fantôme tissulaire
- Imagerie par inversion d'impulsions

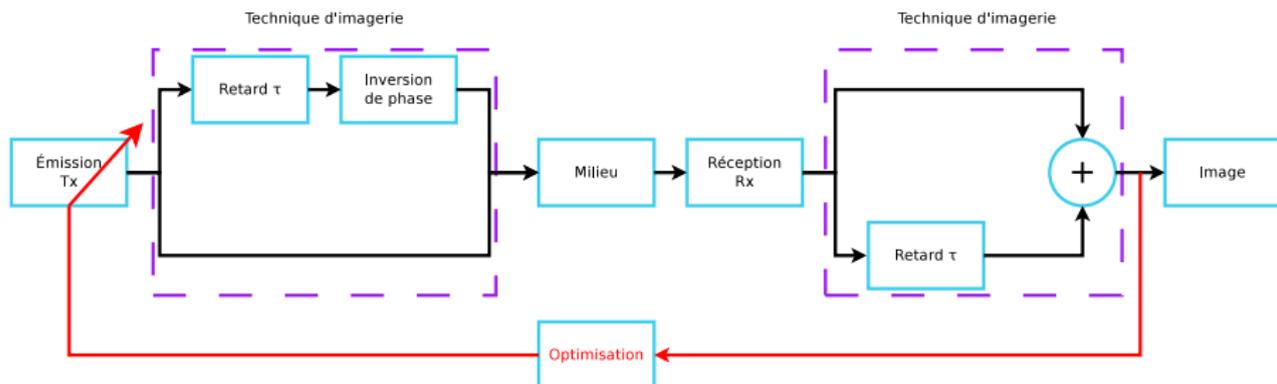


Application à l'imagerie harmonique du tissu

Application à l'imagerie harmonique du tissu

Imagerie harmonique du tissu

- Inclusion hyper-échogène dans le fantôme tissulaire
- Imagerie par inversion d'impulsions



Application à l'imagerie harmonique du tissu

Imagerie harmonique du tissu

- Inclusion hyper-échogène dans le fantôme tissulaire
- Imagerie par inversion d'impulsions

Réglage de l'optimisation

- 1 Fonction de coût « *Contrast to Tissue Harmonic and Fundamental* » :

$$CTHF(\theta) = \frac{\text{Somme des échos}}{\text{Différence des échos}} = \frac{S(t, \theta)}{D(t, \theta)}$$

- 2 Variables :

$$\theta = [f_1, f_2, \alpha]$$

- 3 Algorithme de Nelder-Mead

Application à l'imagerie harmonique du tissu

Imagerie harmonique du tissu

- Inclusion hyper-échogène dans le fantôme tissulaire
- Imagerie par inversion d'impulsions

Réglage de l'optimisation

- 1 Fonction de coût « *Contrast to Tissue Harmonic and Fundamental* » :

$$CTHF(\theta) = \frac{\text{Somme des échos}}{\text{Différence des échos}} = \frac{S(t, \theta)}{D(t, \theta)}$$

- 2 Variables :

$$\theta = [f_1, f_2, \alpha]$$

- 3 Algorithme de Nelder-Mead

Application à l'imagerie harmonique du tissu

Imagerie harmonique du tissu

- Inclusion hyper-échogène dans le fantôme tissulaire
- Imagerie par inversion d'impulsions

Réglage de l'optimisation

- 1 Fonction de coût « *Contrast to Tissue Harmonic and Fundamental* » :

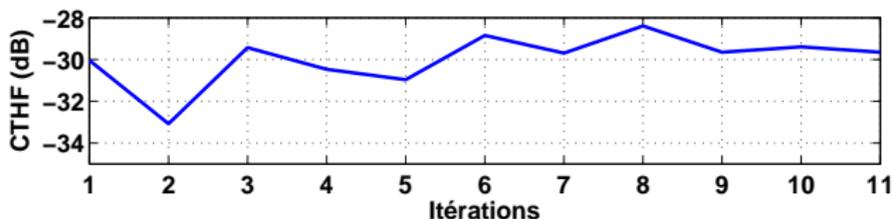
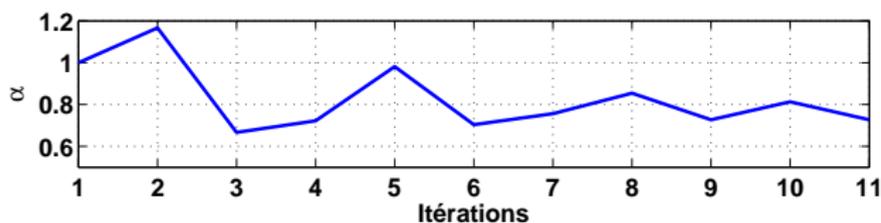
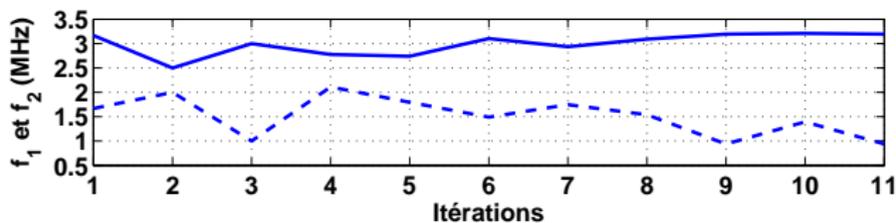
$$CTHF(\theta) = \frac{\text{Somme des échos}}{\text{Différence des échos}} = \frac{S(t, \theta)}{D(t, \theta)}$$

- 2 Variables :

$$\theta = [f_1, f_2, \alpha]$$

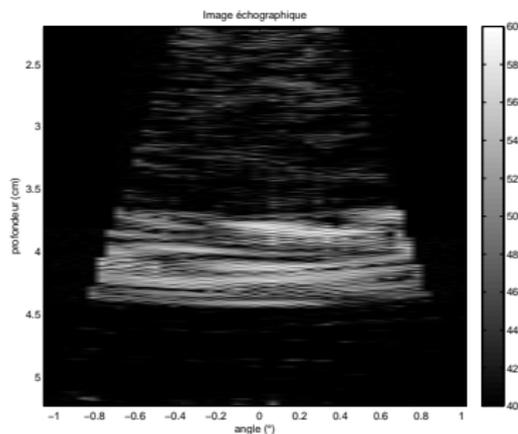
- 3 Algorithme de Nelder-Mead

Expérience : application à l'imagerie harmonique du tissu

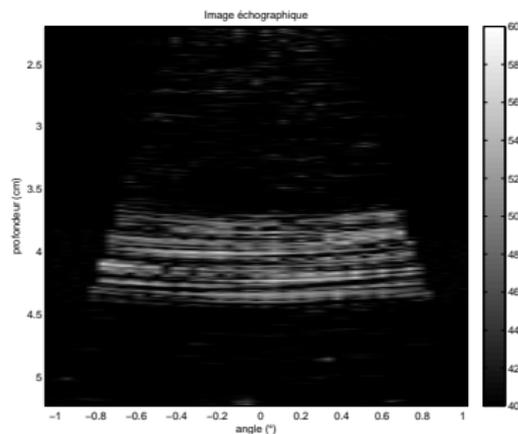


$$\theta = [f_1, f_2, \alpha]$$

Expérience : application à l'imagerie harmonique du tissu



$$f_0 = 2/3f_c = 2,7 \text{ MHz}$$



$$f_{1,opt}, f_{2,opt} \text{ et } \alpha_{opt}$$

Conclusions

- Optimisation automatique d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

Conclusions

- Optimisation **automatique** d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

Conclusions

- Optimisation **automatique** d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

Conclusions

- Optimisation **automatique** d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

Conclusions

- Optimisation **automatique** d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

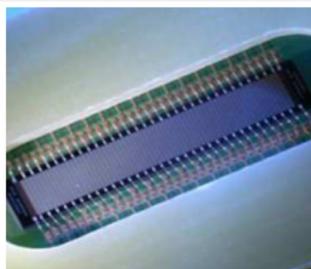
Conclusions

- Optimisation **automatique** d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

Conclusions

- Optimisation **automatique** d'un critère en sortie
- Application à l'imagerie tissulaire et de contraste
- Applicable à toutes les méthodes d'imagerie codée ou non codée
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Différents types de codage (exemple : *chirp*)
 - Différentes fonctions de coût

Commande optimale en imagerie codée d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné



cMUT

[Sénégon, 2010]



Échographie

Collaboration avec D. Certon, N. Sénégon et A. Boulmé

Commande optimale en imagerie codée d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné



Collaboration avec D. Certon, N. Sénépond et A. Boulmé

Commande optimale en imagerie codée d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné



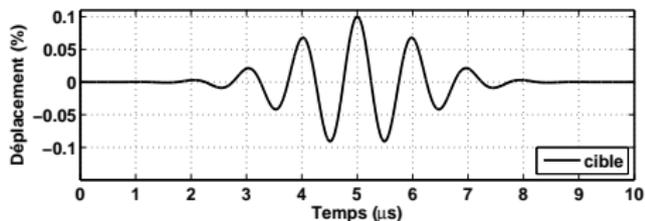
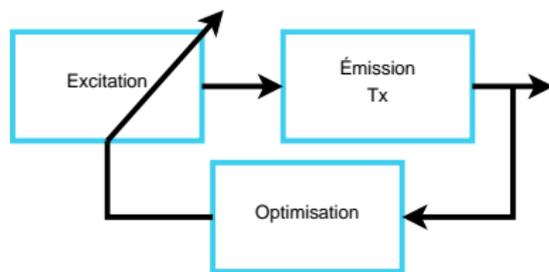
Collaboration avec D. Certon, N. Sénégond et A. Boulmé

Commande optimale en imagerie codée d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné



Collaboration avec D. Certon, N. Sénégond et A. Boulmé

Commande optimale en imagerie codée d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné



Collaboration avec D. Certon, N. Sénégond et A. Boulmé

Qu'est-ce qu'un cMUT ?

Définition

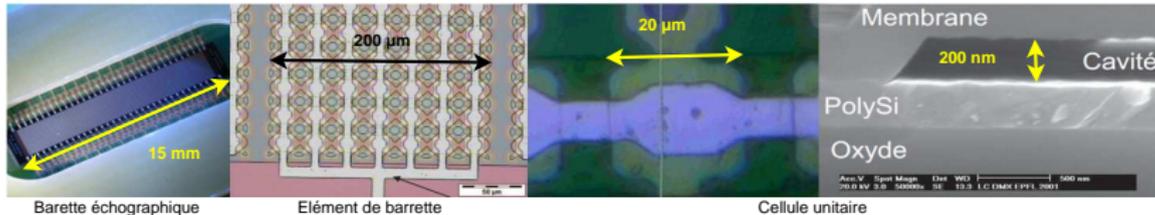
- Transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné
- Acronyme : *capacitive Micromachined Ultrasound Transducers*
- Micromembranes suspendues au-dessus de cavités sous vide

Transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné

Qu'est-ce qu'un cMUT ?

Définition

- Transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné
- Acronyme : *capacitive Micromachined Ultrasound Transducers*
- Micromembranes suspendues au-dessus de cavités sous vide

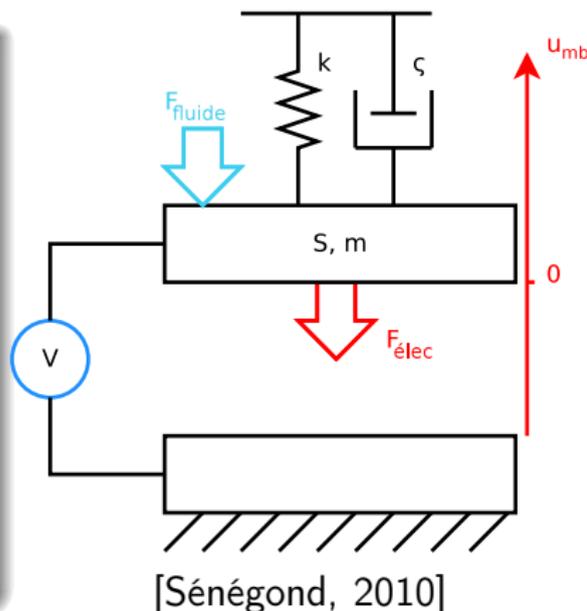


[Sénépond, 2010]

Fonctionnement non-linéaire du cMUT

Simulation (modèle de Sénégond)

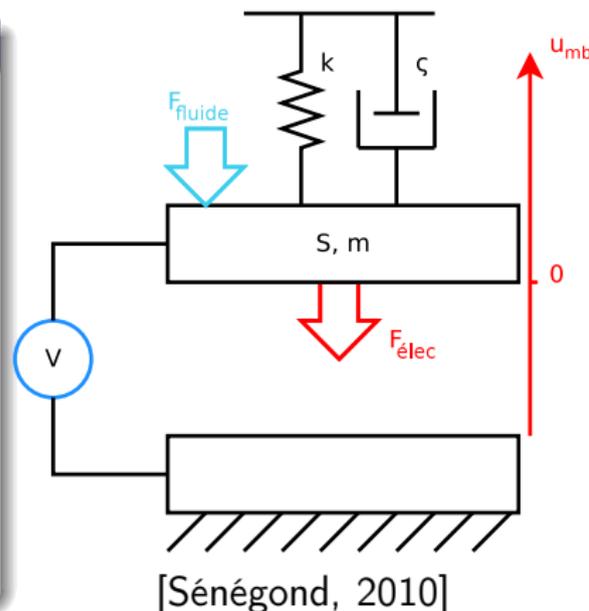
- Cellule : condensateur plan à espace inter-électrode variable
- Comportement non-linéaire
Force électrostatique proportionnelle à :
 - le carré de la tension
 - le carré du déplacement de la membrane
- Fréquence de résonance dans l'eau de 5,6 MHz



Fonctionnement non-linéaire du cMUT

Simulation (modèle de Sénégond)

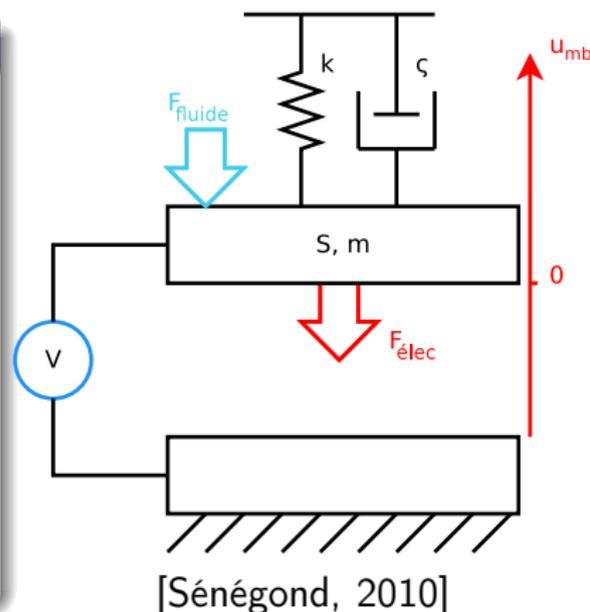
- Cellule : condensateur plan à espace inter-électrode variable
- Comportement non-linéaire
Force électrostatique proportionnelle à :
 - le carré de la tension
 - le carré du déplacement de la membrane
- Fréquence de résonance dans l'eau de 5,6 MHz



Fonctionnement non-linéaire du cMUT

Simulation (modèle de Sénégond)

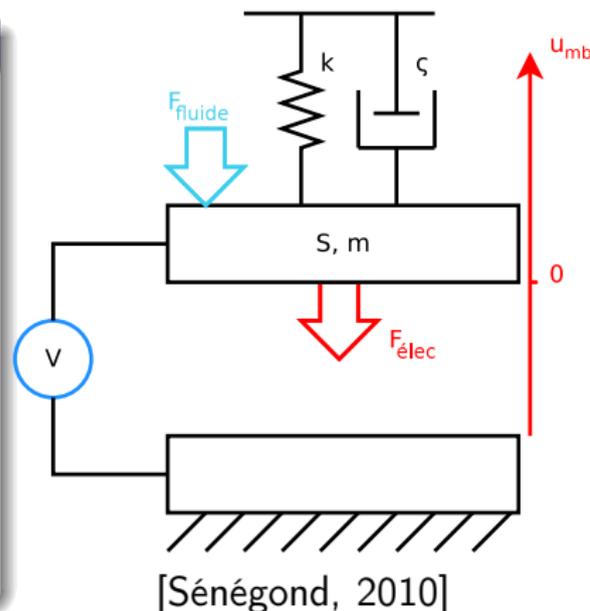
- Cellule : condensateur plan à espace inter-électrode variable
- Comportement non-linéaire
Force électrostatique proportionnelle à :
 - le carré de la tension
 - le carré du déplacement de la membrane
- Fréquence de résonance dans l'eau de 5,6 MHz



Fonctionnement non-linéaire du cMUT

Simulation (modèle de Sénégond)

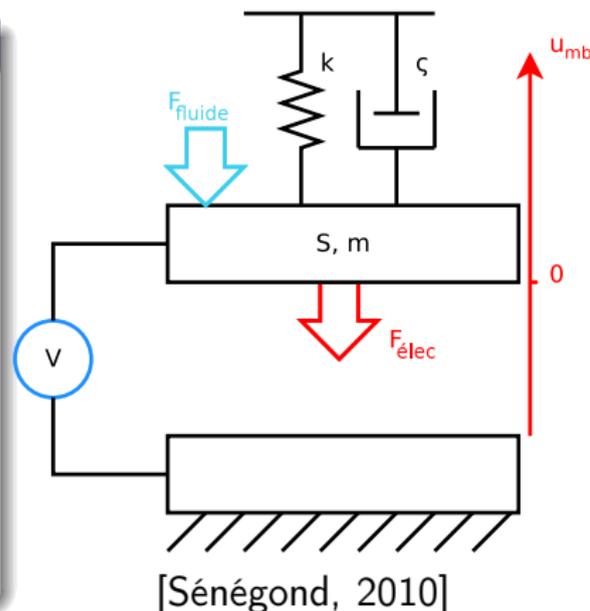
- Cellule : condensateur plan à espace inter-électrode variable
- Comportement non-linéaire
Force électrostatique proportionnelle à :
 - le carré de la tension
 - le carré du déplacement de la membrane
- Fréquence de résonance dans l'eau de 5,6 MHz



Fonctionnement non-linéaire du cMUT

Simulation (modèle de Sénégond)

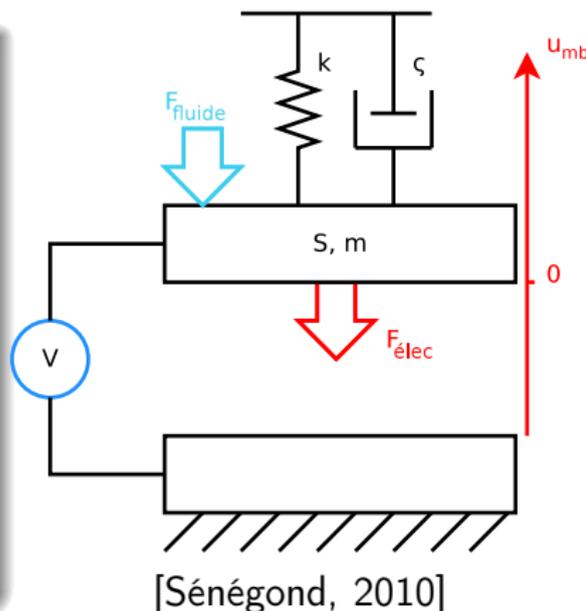
- Cellule : condensateur plan à espace inter-électrode variable
- **Comportement non-linéaire**
Force électrostatique proportionnelle à :
 - le carré de la tension
 - le carré du déplacement de la membrane
- Fréquence de résonance dans l'eau de 5,6 MHz



Fonctionnement non-linéaire du cMUT

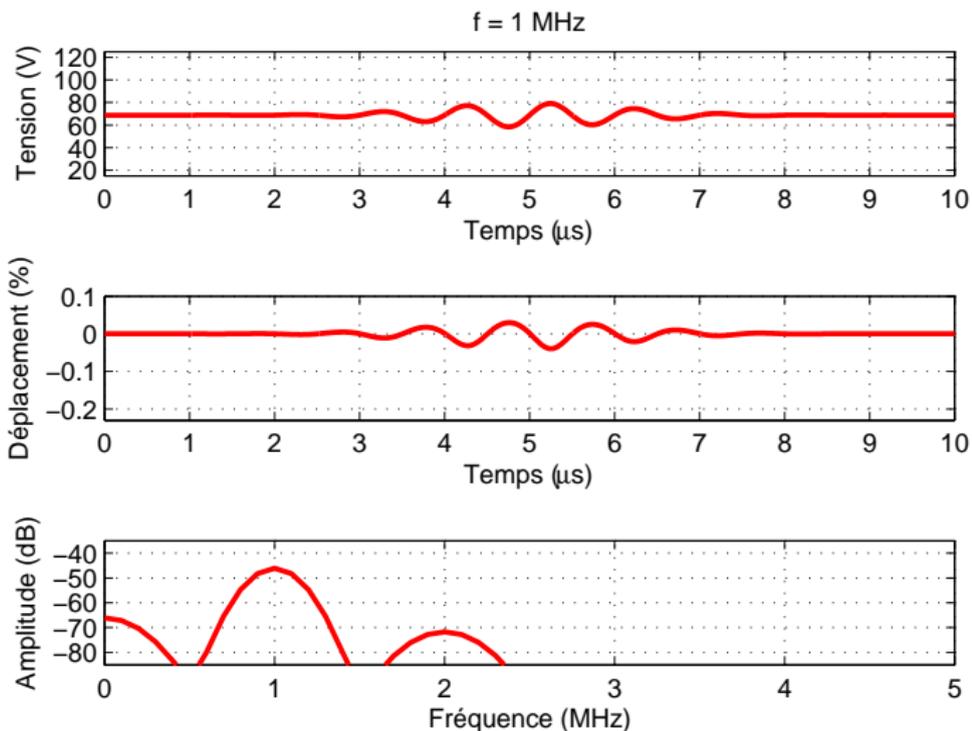
Simulation (modèle de Sénégond)

- Cellule : condensateur plan à espace inter-électrode variable
- **Comportement non-linéaire**
Force électrostatique proportionnelle à :
 - le carré de la tension
 - le carré du déplacement de la membrane
- Fréquence de résonance dans l'eau de 5,6 MHz



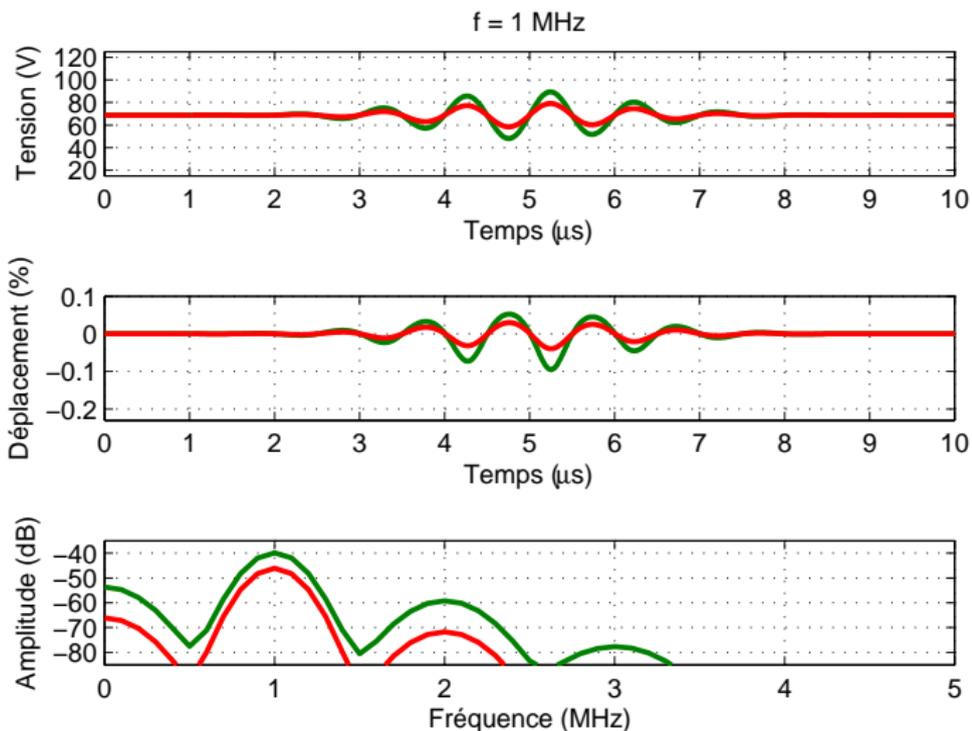
Transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné

Fonctionnement non-linéaire du cMUT



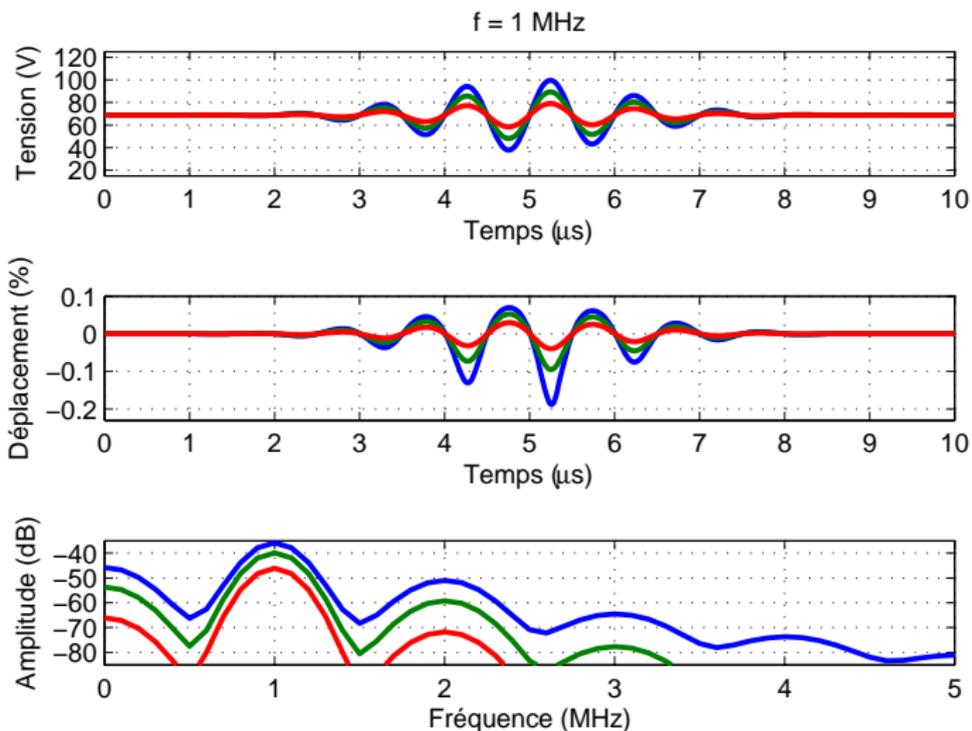
Transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné

Fonctionnement non-linéaire du cMUT



Transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné

Fonctionnement non-linéaire du cMUT



Objectif

Problématique et objectif

Problématique

- Contexte : imagerie harmonique
- Distinguer les non-linéarités du milieu de celles du capteur



Objectif

Trouver la commande qui réduit les non-linéarités à la sortie du cMUT

Objectif

Problématique et objectif

Problématique

- Contexte : imagerie harmonique
- Distinguer les non-linéarités du milieu de celles du capteur



Objectif

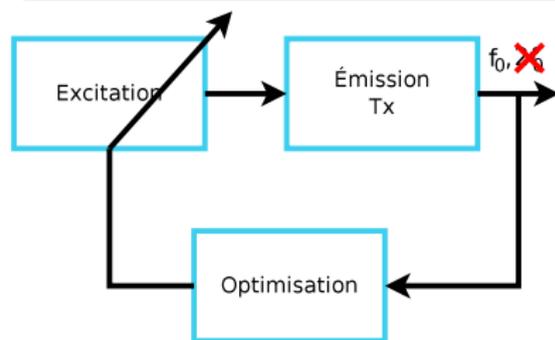
Trouver la commande qui réduit les non-linéarités à la sortie du cMUT

Objectif

Problématique et objectif

Problématique

- Contexte : imagerie harmonique
- Distinguer les non-linéarités du milieu de celles du capteur



Objectif

Trouver la commande qui réduit les non-linéarités à la sortie du cMUT

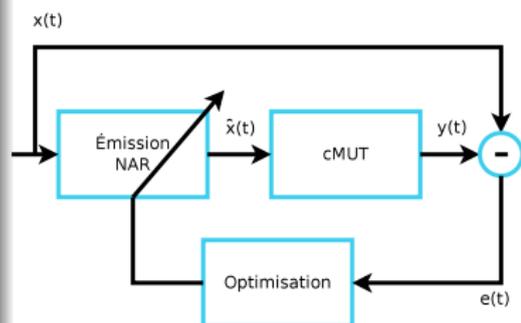
Commande optimale itérative

Réglage de la commande

- 1 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne

$$MSE = \mathbb{E} \left((x - y)^2 \right)$$

- 2 Description de la commande par un modèle autorégressif
- 3 Algorithme de Nelder-Mead



Commande optimale itérative

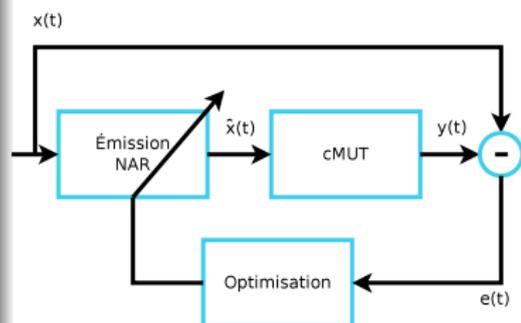
Réglage de la commande

- 1 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne
- 2 Description de la commande par un modèle autorégressif

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=0}^{M-1} h_1(i)x(t-i)$$

→ ~~annihiler les harmoniques~~

- 3 Algorithme de Nelder-Mead



Commande optimale itérative

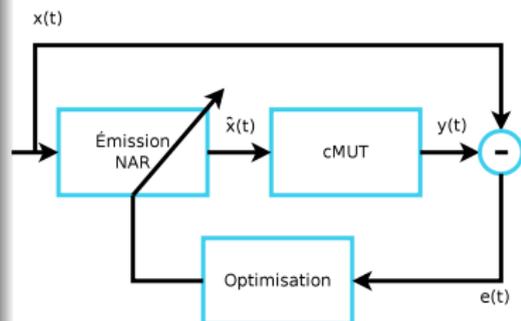
Réglage de la commande

- 1 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne
- 2 Description de la commande par un modèle autorégressif non-linéaire (NAR)

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=0}^{M-1} h_1(i)x(t-i) + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=i}^M h_2(i,j)x(t-i)x(t-j) + \dots$$

→ annihiler les harmoniques

- 3 Algorithme de Nelder-Mead



Commande optimale itérative

Réglage de la commande

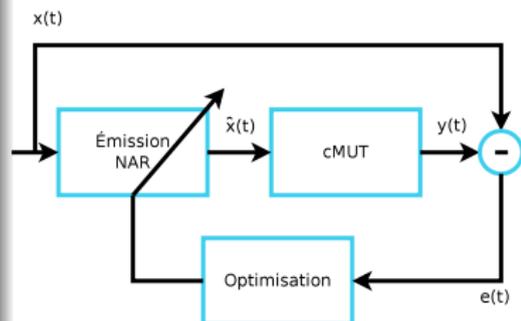
- 1 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne
- 2 Description de la commande par un modèle autorégressif non-linéaire (NAR)

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=0}^{M-1} h_1(i)x(t-i) + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=i}^M h_2(i,j)x(t-i)x(t-j) + \dots$$

→ annihiler les harmoniques

Ordre $K = 3$ et mémoire $M = 3 \Rightarrow 19$ paramètres

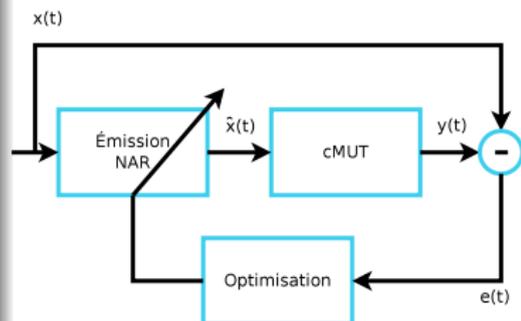
- 3 Algorithme de Nelder-Mead



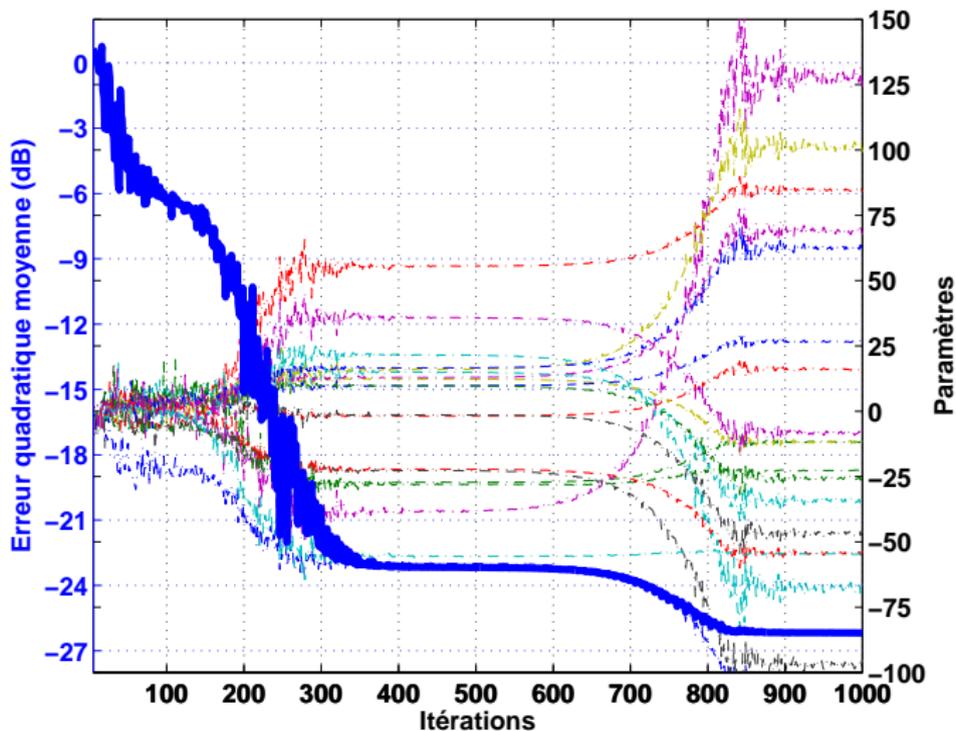
Commande optimale itérative

Réglage de la commande

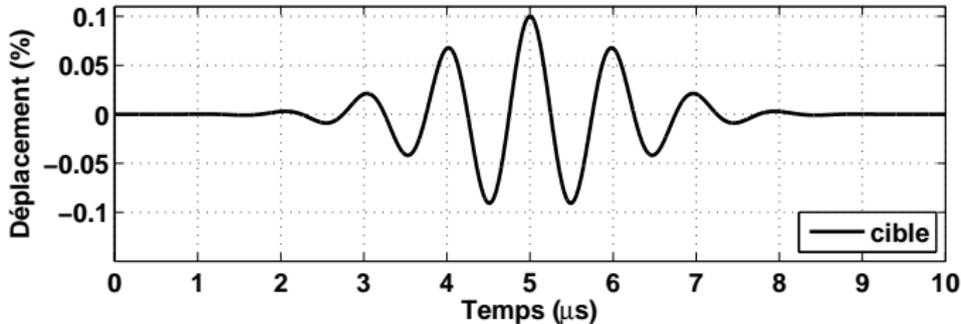
- 1 Minimisation de l'erreur quadratique moyenne
- 2 Description de la commande par un modèle autorégressif non-linéaire (NAR)
- 3 Algorithme de Nelder-Mead



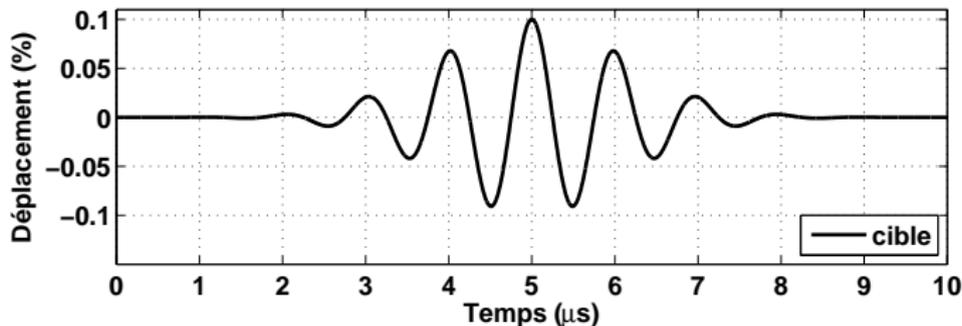
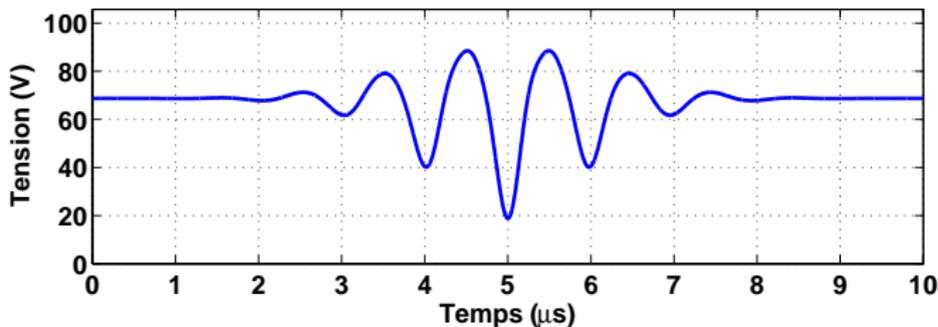
Minimisation de l'erreur quadratique moyenne



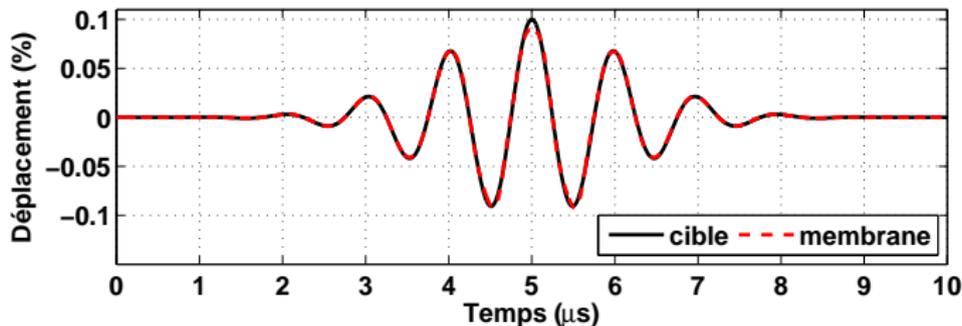
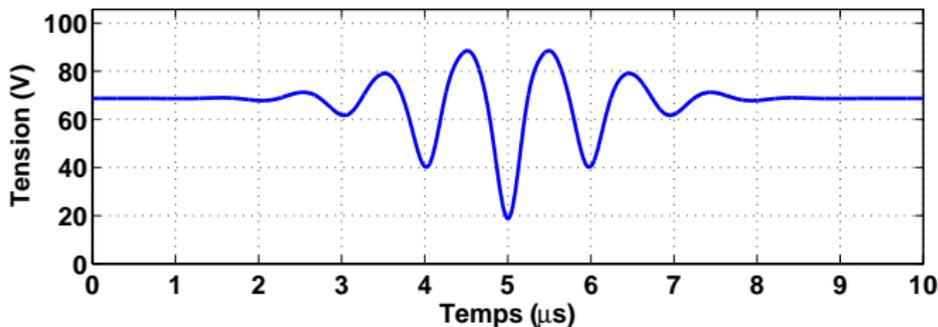
Commande et déplacement : simulation



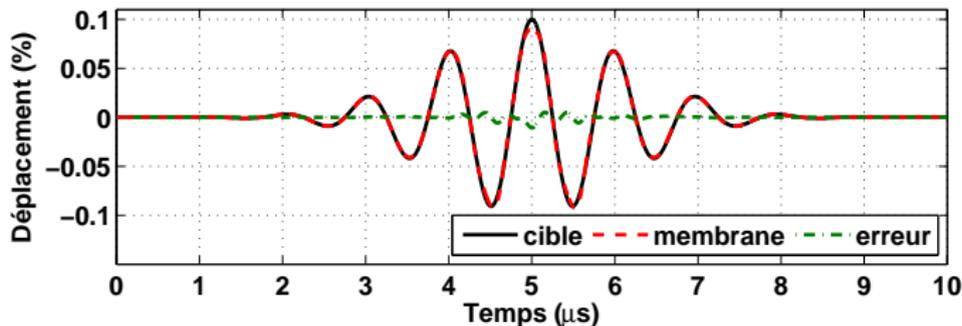
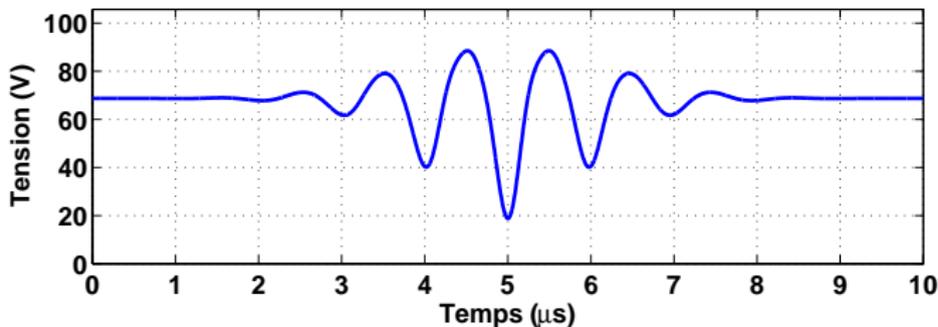
Commande et déplacement : simulation



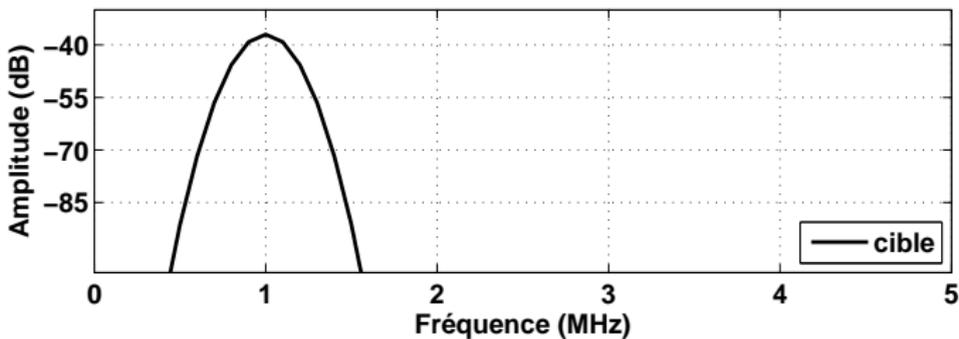
Commande et déplacement : simulation



Commande et déplacement : simulation

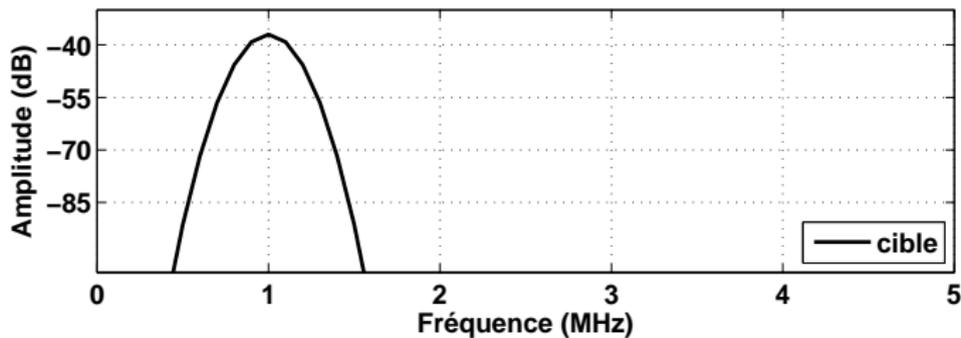
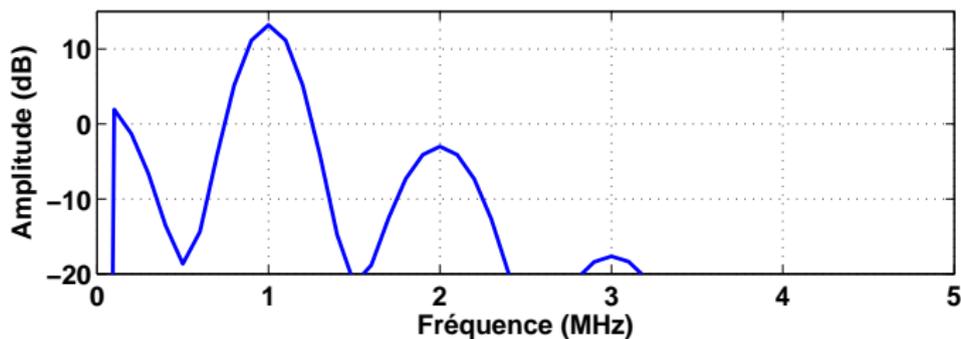


Spectre de la commande et du déplacement : simulation



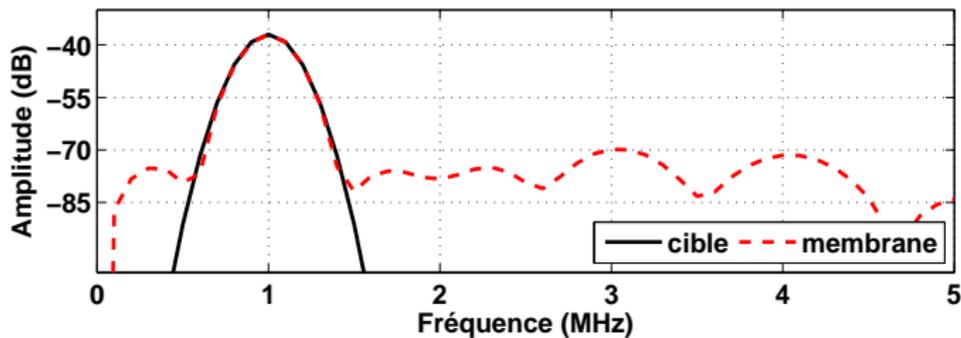
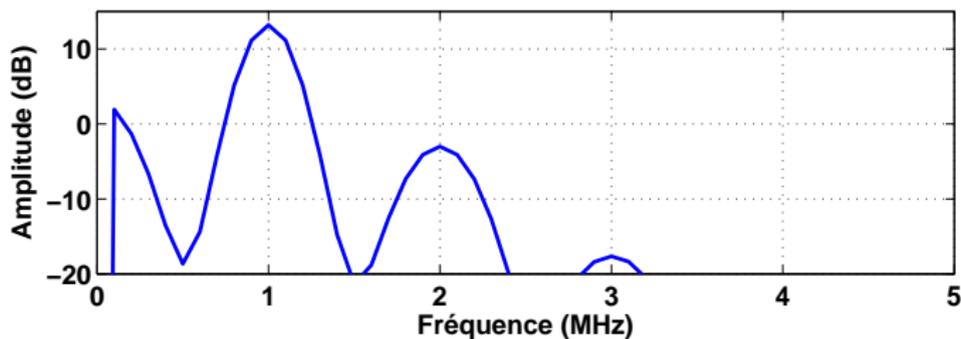
Résultats de simulations

Spectre de la commande et du déplacement : simulation



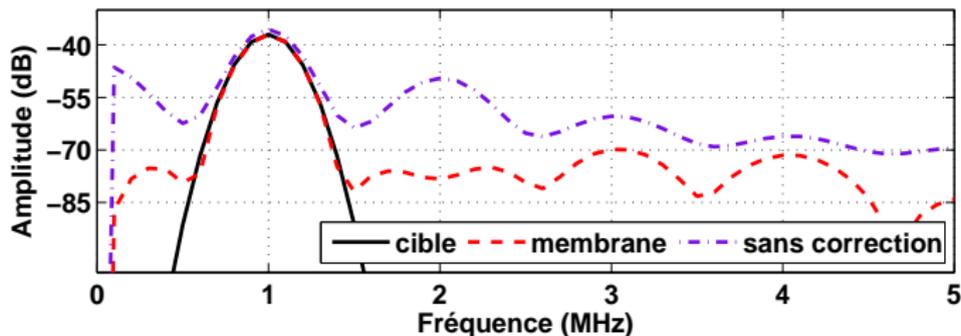
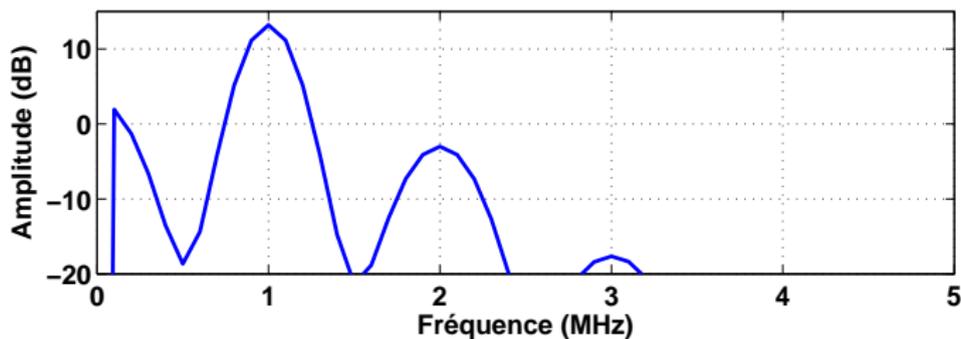
Résultats de simulations

Spectre de la commande et du déplacement : simulation



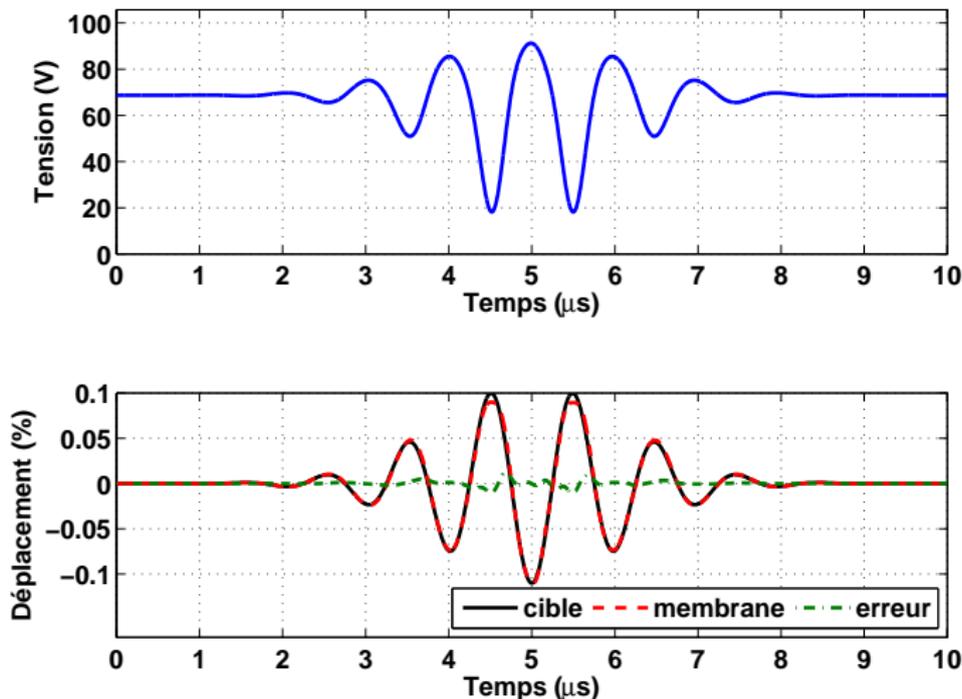
Résultats de simulations

Spectre de la commande et du déplacement : simulation



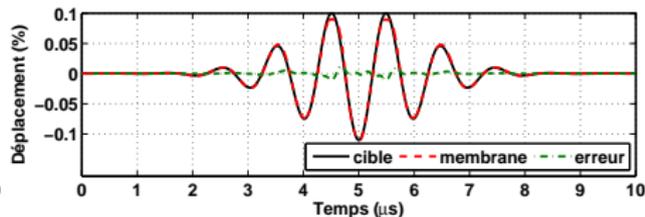
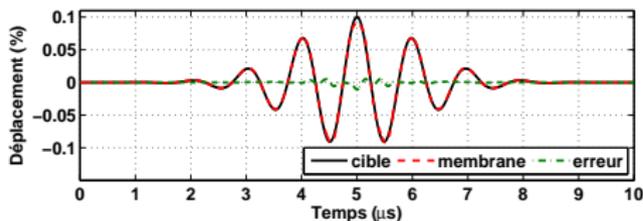
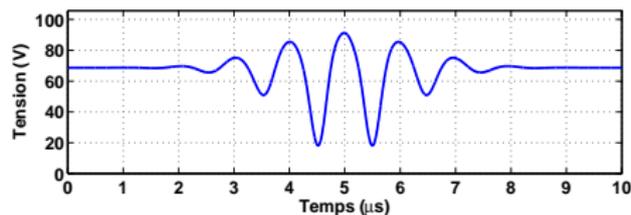
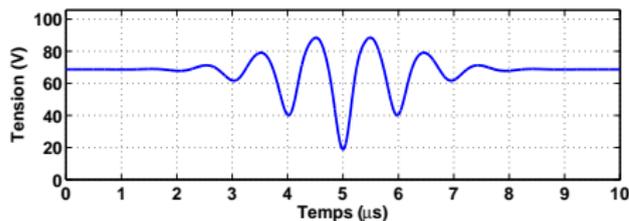
Commande optimale pour imagerie codée

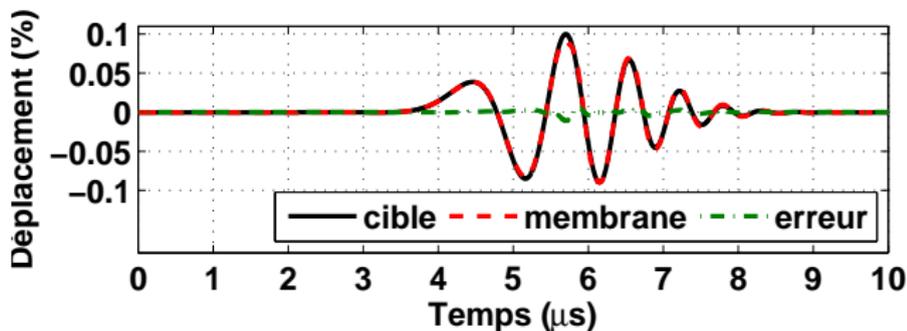
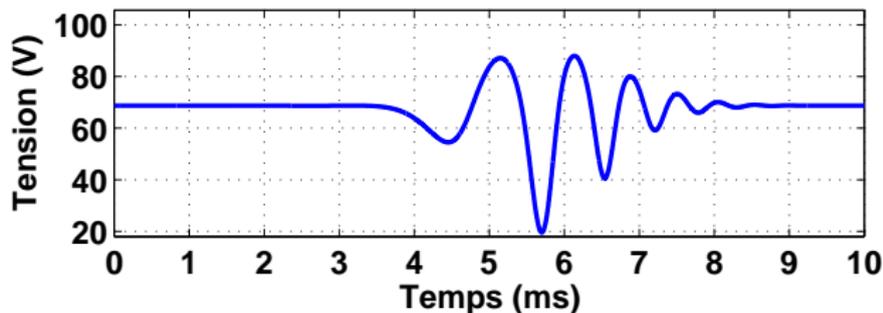
Inversion d'impulsions



Commande optimale pour imagerie codée

Inversion d'impulsions



Commande optimale pour imagerie codée par *chirp*

Conclusion

- Trouver automatiquement la commande optimale quelle que soit la forme de la cible
- Imagerie codée (exemple : inversion d'impulsions, *chirp*,...)
- Perspectives :
 - Valider le concept sur un transducteur complet (plusieurs cellules)
 - Valider expérimentalement

Conclusion

- Trouver **automatiquement** la commande optimale quelle que soit la forme de la cible
- Imagerie codée (exemple : inversion d'impulsions, *chirp*,...)
- Perspectives :
 - Valider le concept sur un transducteur complet (plusieurs cellules)
 - Valider expérimentalement

Conclusion

- Trouver **automatiquement** la commande optimale quelle que soit la forme de la cible
- Imagerie codée (exemple : inversion d'impulsions, *chirp*,...)
- Perspectives :
 - Valider le concept sur un transducteur complet (plusieurs cellules)
 - Valider expérimentalement

Conclusion

- Trouver **automatiquement** la commande optimale quelle que soit la forme de la cible
- Imagerie codée (exemple : inversion d'impulsions, *chirp*,...)
- Perspectives :
 - Valider le concept sur un transducteur complet (plusieurs cellules)
 - Valider expérimentalement

Conclusion

- Trouver **automatiquement** la commande optimale quelle que soit la forme de la cible
- Imagerie codée (exemple : inversion d'impulsions, *chirp*,...)
- Perspectives :
 - Valider le concept sur un transducteur complet (plusieurs cellules)
 - Valider expérimentalement

Conclusions & Perspectives

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

- Recherche automatique de la commande qui optimise un critère
- Résolution sans information *a priori*
- Implémentation simple
- Application à toutes les méthodes d'imagerie
- Difficultés
 - Choisir la fonction de coût
 - Choisir la définition de la commande : paramètres
 - Choisir l'initialisation
- Inconvénient : émetteur analogique programmable
- Perspectives :
 - Validation expérimentale
 - Augmenter la vitesse de convergence
 - Réduction du nombre de paramètres

Conclusions & Perspectives

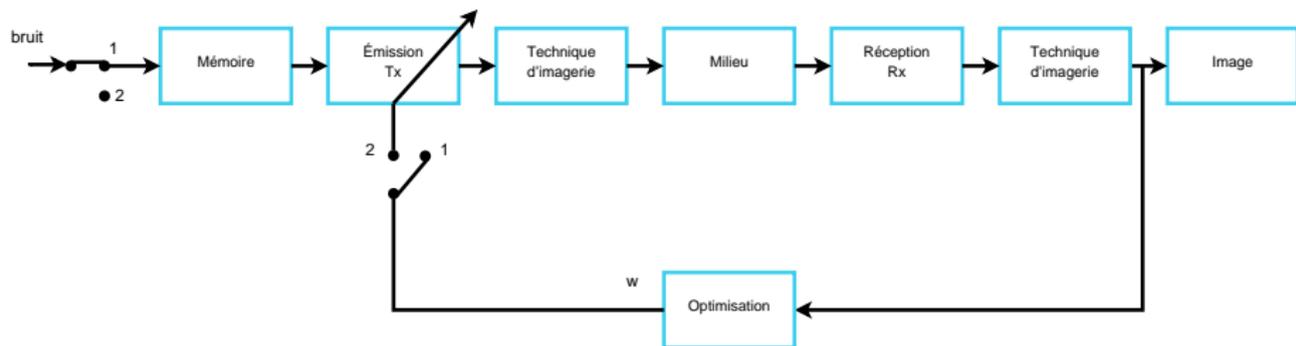
Merci de votre attention !

Thèse soutenue par l'ANR :
ANR-07-TECSAN-015
ANR-07-TECSAN-023

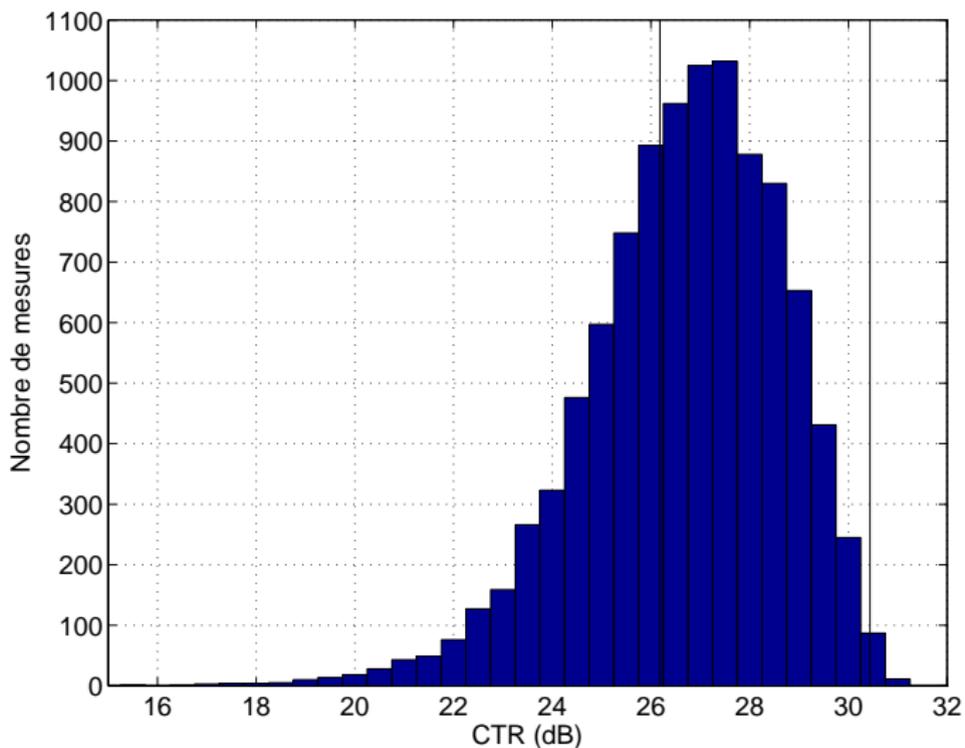


Principe de la commande optimale de forme d'excitation

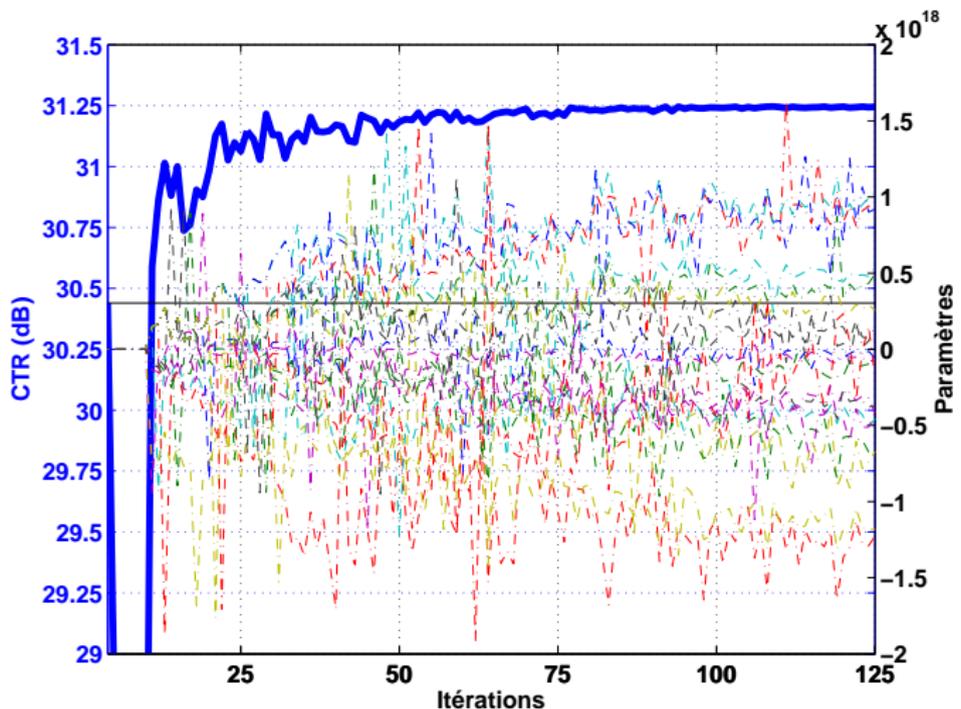
$$y(t) = \sum_{i=1}^M w_1(i)x(t-i) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=i}^M w_2(i,j)x(t-i)x(t-j) + \dots$$



Résultats de la commande optimale de forme d'excitation



Résultats de la commande optimale de forme d'excitation



Démonstration : Soit x une commande qui peut être décomposée sous la forme $x = a_1x_1 + a_2x_1^2$

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 (a_1x_1 + a_2x_1^2) + w_2 (a_1x_1 + a_2x_1^2)^2 + \dots$$

$$+ w_1 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)] + w_2 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)]^2 + \dots$$

Démonstration : Soit x une commande qui peut être décomposée sous la forme $x = a_1x_1 + a_2x_1^2$

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 (a_1x_1 + a_2x_1^2) + w_2 (a_1x_1 + a_2x_1^2)^2 + \dots$$

$$+ w_1 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)] + w_2 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)]^2 + \dots$$

Démonstration : Soit x une commande qui peut être décomposée sous la forme $x = a_1x_1 + a_2x_1^2$

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = w_1 (a_1x_1 + a_2x_1^2) + w_2 (a_1x_1 + a_2x_1^2)^2 + \dots$$

$$+ w_1 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)] + w_2 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)]^2 + \dots$$

Démonstration : Soit x une commande qui peut être décomposée sous la forme $x = a_1x_1 + a_2x_1^2$

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = \cancel{w_1 (a_1x_1 + a_2x_1^2)} + w_2 (a_1x_1 + a_2x_1^2)^2 + \dots$$

$$+ \cancel{w_1 [-(a_1x_1 + a_2x_1^2)]} + w_2 [\cancel{-(a_1x_1 + a_2x_1^2)}]^2 + \dots$$

Démonstration : Soit x une commande qui peut être décomposée sous la forme $x = a_1x_1 + a_2x_1^2$

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = 2w_2 (a_1x + a_2x^2)^2 + \dots$$

Démonstration : Soit x une commande qui peut être décomposée sous la forme $x = a_1x_1 + a_2x_1^2$

$$S(t) = \text{echo}(x(t)) + \text{echo}(-x(t))$$

$$S(t) = 2w_2a_1^2x^2 + 4w_2a_1a_2x^3 + 2w_2a_2^2x^4 + \dots$$