



tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

Micro-capteurs résonants et électroniques associées : modélisation conjointe et optimisation

Mélanie Descharles

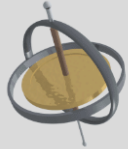
Directeur de thèse
H. Kokabi (UPMC)



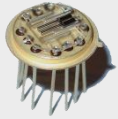
Encadrant ONERA
J. Guérard



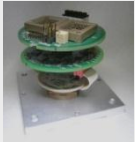
retour sur innovation



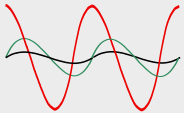
1. INTRODUCTION



2. MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE



3. MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE



4. ANALYSE ET AMELIORATION

INTRODUCTION

Les gyromètres

GYROMETRE : mesure de **vitesse de rotation**

REPERES

Petite aiguille d'une horloge 30 °/h
Rotation de la Terre 15 °/h

- Performances → Stabilité de biais: stabilité du signal
- Résolution: plus petit signal mesurable
- Facteur d'échelle: sensibilité

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

Classes de performances (stabilité)

BASSE

360 °/h

MOYENNE

1 °/h

HAUTE

0.001 °/h

Gyromètre à effet Coriolis

Gyromètre à toupie , effet Sagnac

Automobile
Jeux vidéos
Vidéo/photographie



Robotique
Contrôle actif de véhicules



Centrale inertielle
(aviation civile, militaire, sous-marin)



INTRODUCTION

Effet Coriolis et gyromètre

Accélération de Coriolis

Présente dans un référentiel tournant par rapport à un référentiel galiléen

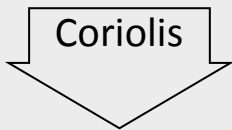
Météorologie (cyclones), tir balistique

$$\vec{F}_{ic} = -2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

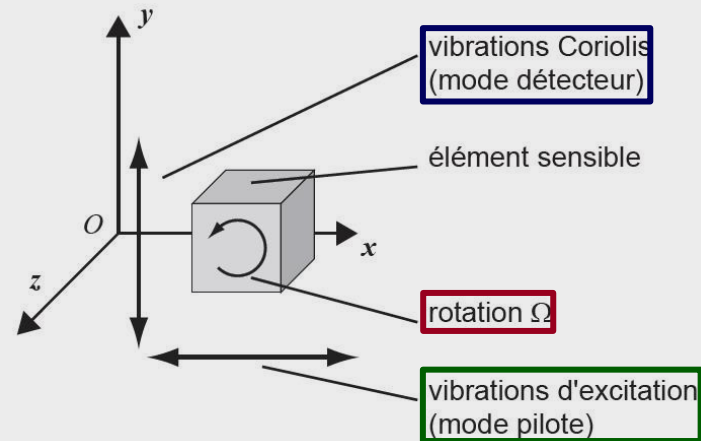


Application aux gyromètres

Vibration d'un mode primaire (pilote) + Vitesse de rotation



Vibration d'un mode secondaire (détecteur)



Mesure de l'amplitude de la vibration induite = mesure de la vitesse de rotation

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2014

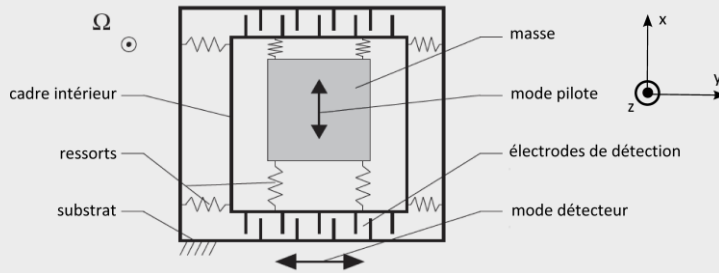
INTRODUCTION

Gyromètres MEMS

Excitation électrostatique *Silicium*

Attraction de deux armatures d'un condensateur.

Détection capacitive

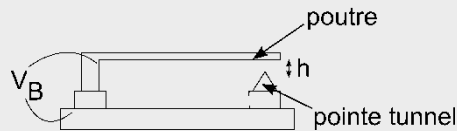


Mesure d'une capacité variable entre deux parties mobiles

Détection tunnel

Effet tunnel

Mesure de l'amplitude du courant tunnel



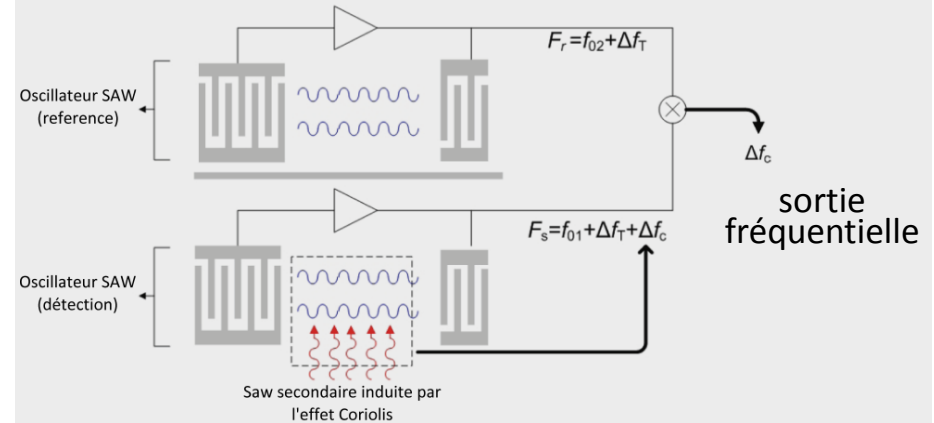
Détection optique

Détection piézorésistive

Excitation-détection piézoélectrique

Piézoélectricité: conversion énergie mécanique - électrique *Quartz*

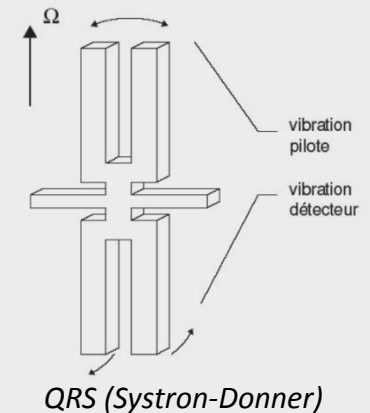
Ondes de surface



Onde de volume

Démodulation synchrone

Electrodes de détection sur un seul diapason

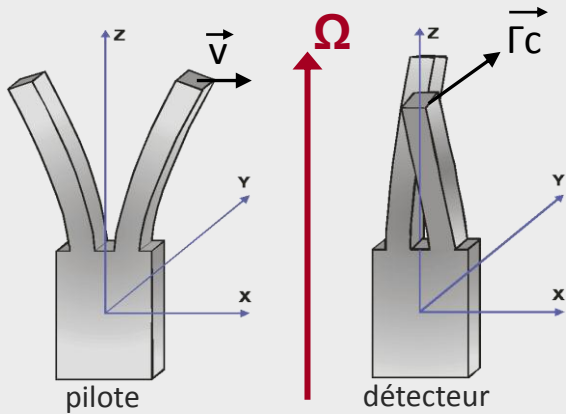


tel-00682582 version 1 - 26 Mar 2012

INTRODUCTION

Le VIG de l'ONERA (1/2)

1. Principe



Vibration dans le plan (mode pilote)



Vibration hors plan (mode détecteur)
proportionnelle à la vitesse de rotation Ω

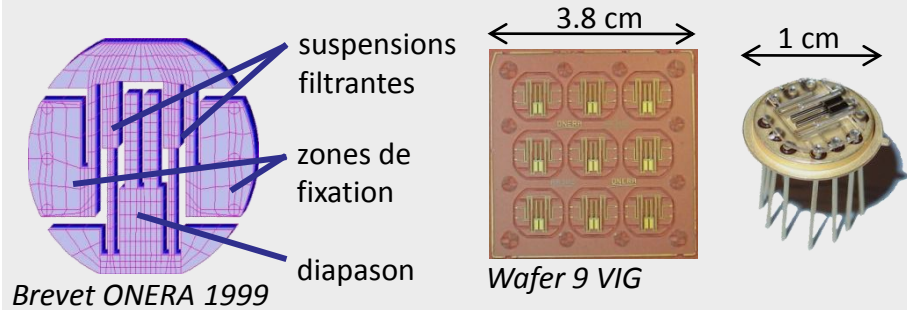
$$\frac{Y}{\Omega} = \frac{X}{\Delta f}$$

X amplitude pilote (10 μ m)
Y amplitude détection
 Δf écart de fréquence des deux modes (500 Hz)

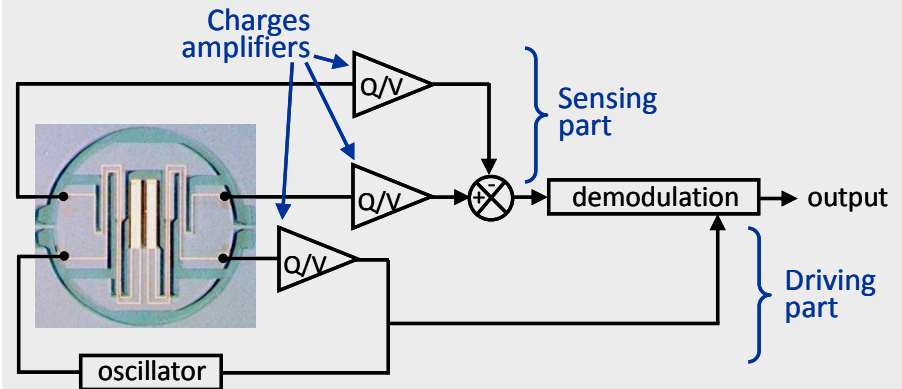
Pour $\Omega=1$ °/s, $X \approx 10^{-5}$ m et $Y \approx 10^{-11}$ m

2. Structure en quartz

Excitation et détection piézoélectrique
Structure monolithique
Usinage chimique par gravure du quartz
Cadre de découplage breveté



3. Fonctionnement



INTRODUCTION

Le VIG de l'ONERA (2/2)

Performances limitées à cause des couplages

Deux types: mécanique et électrique

Couplage électrique (capacitif)

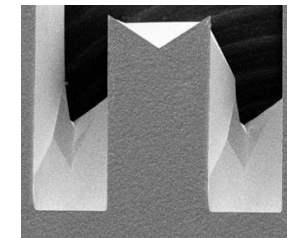
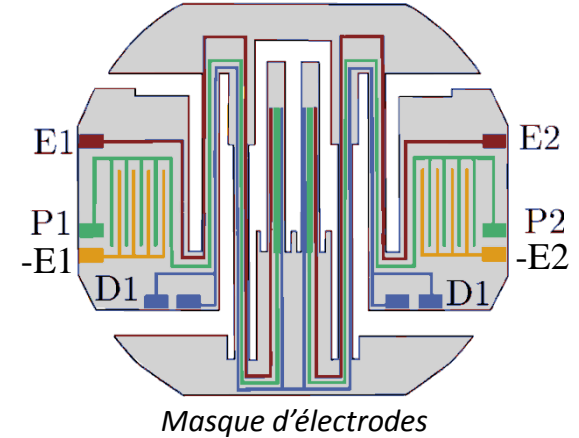
Capacité inter-électrodes

Couplage en phase avec le signal utile

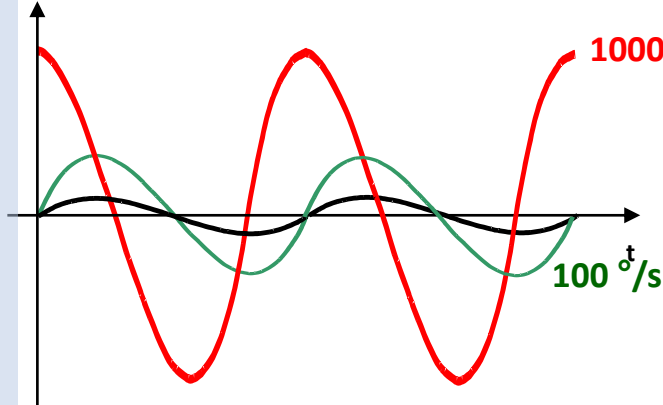
Couplage mécanique

Figures d'attaques dues à la gravure chimique

Couplage en quadrature avec le signal utile



Charges détectées



10000 °/s

100 °/s

- Charges Coriolis
- Charges dues au couplage mécanique
- Charges dues au couplage capacitif

Gamme de mesure du VIG ± 500 °/s

INTRODUCTION

Problématique de la thèse

- Système complexe
- Différentes physiques couplées: piézoélectricité, mécanique, électronique, thermique
- Impact sur les performances
- Absence d'outil de simulation de comportement global du VIG

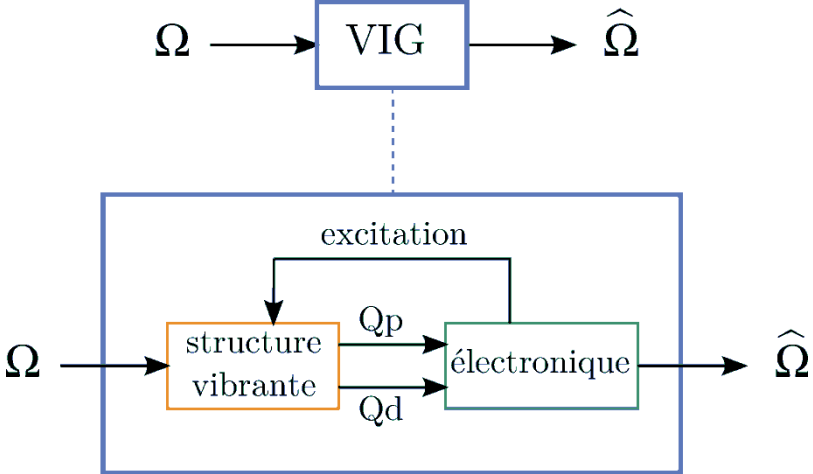


Objectif de la thèse

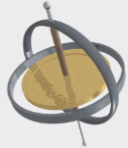
DEVELOPPER UN MODELE DU SYSTEME (VIG) COMPLET POUR

- **Comprendre les différents phénomènes physiques en jeu**
 - **Prédire son comportement**
- **Développer et évaluer des nouvelles solutions d'amélioration**

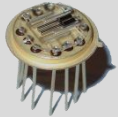
Découpage du VIG en différents sous-systèmes



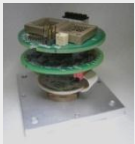
Modélisation de chaque sous-système à l'aide de Scicos / Scilab



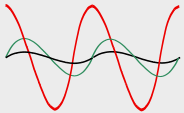
1. INTRODUCTION



2. MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE



3. MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE



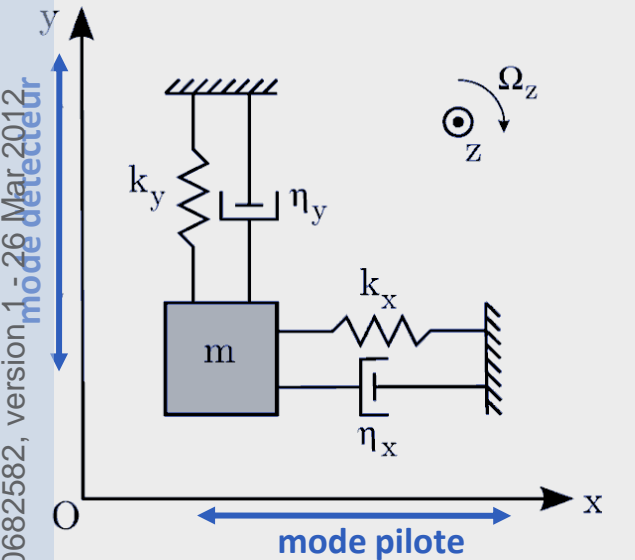
4. ANALYSE ET AMELIORATION

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Modélisation du résonateur

OBJECTIF: modéliser et simuler le comportement de l'élément vibrant sensible du VIG

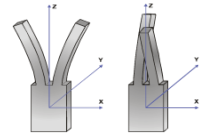
1. Modèle masse-ressort



Paramètres du modèle

- k_x et m : formule analytique de la poutre
- ω_{0x} Calculé. Vérification avec expérimentation et éléments finis
- ω_{0y} Loi expérimentale
- Q_x } Loi de comportement expérimentale.
- Q_y }

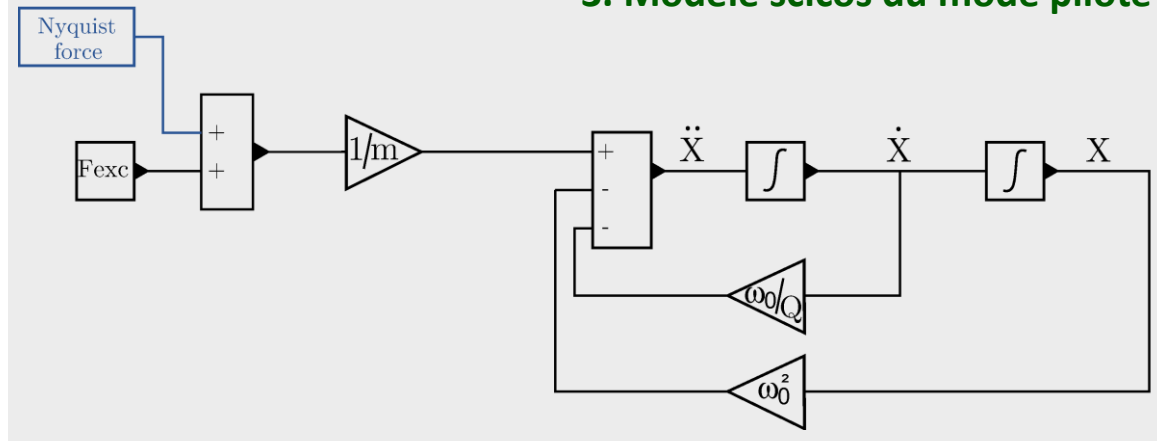
Résonateur du VIG: diapason dont deux modes de vibration couplés par Coriolis



2. Equations du mouvement

$$\begin{cases} \frac{F_x}{m} = \ddot{x} + \frac{\omega_{0x}}{Q_x} \dot{x} + \omega_{0x}^2 x \\ 2\Omega_z \dot{x} = \ddot{y} + \frac{\omega_{0y}}{Q_y} \dot{y} + \omega_{0y}^2 y \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \omega_{x/y}^2 = \frac{k_{x/y}}{m} \\ Q_{x/y} = \frac{m}{\eta_{x/y}} \omega_{x/y} \end{cases}$$

3. Modèle scicos du mode pilote

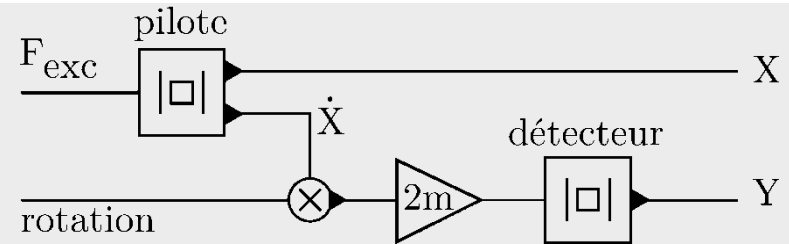


tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012 mode détecteur

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

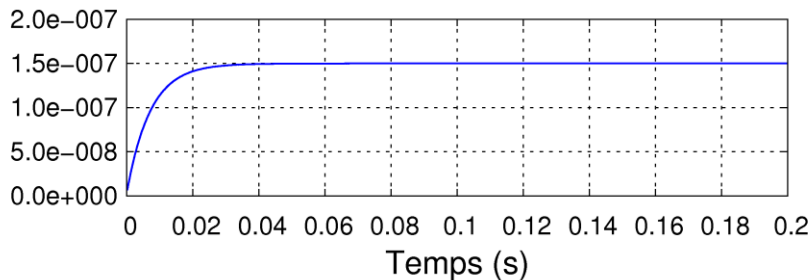
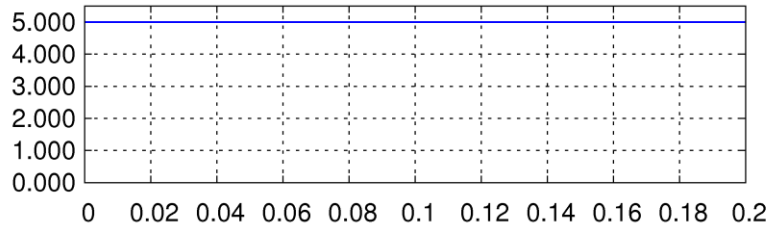
Simulation du résonateur – Validation fonctionnelle

Couplage des deux modes par Coriolis.
Simulation temporelle en excitant le mode pilote à la résonance.

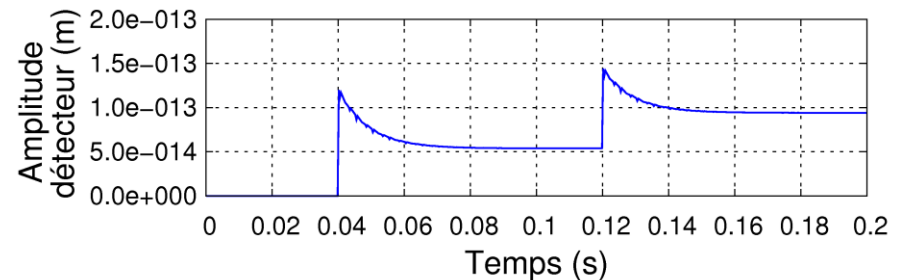
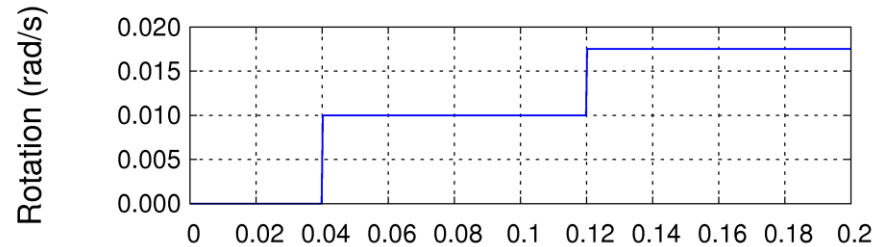


$Q=1000$ (représentation des enveloppes)

Excitation du mode pilote



Détection d'une rotation



Pas de rotation → pas de mouvement détecteur (Y)

Rotation → amplitude du mouvement détecteur proportionnel à la vitesse de rotation

Amplitude de pilote (m) - Excitation 1 - 26 Mar 2012

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Piézoélectricité (1/3) – Principe

Piézoélectricité: actionnement et détection

Excitation : piézoélectricité indirecte
 champ électrique \Rightarrow contraintes

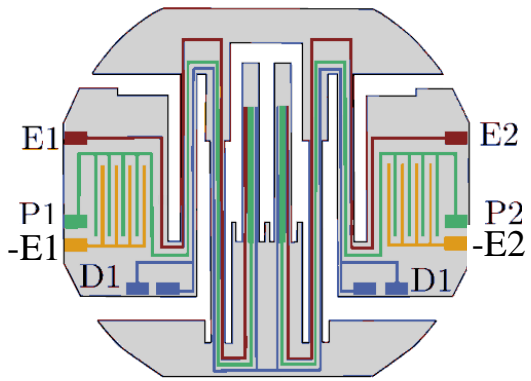
N/V

Détection : piézoélectricité directe
 déformations \Rightarrow charges électriques

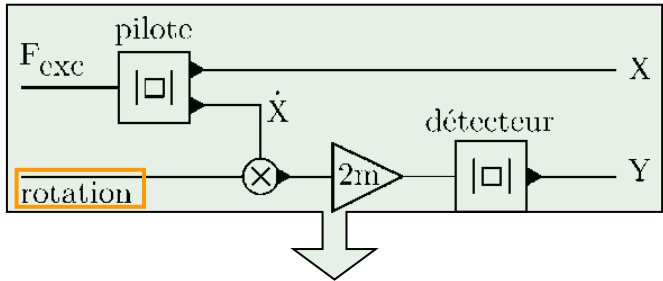
C/m

Modélisation par un coefficient de conversion nx

Formalisation du modèle du diapason sans rotation excité à la fréquence
 résonance du mode pilote



tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



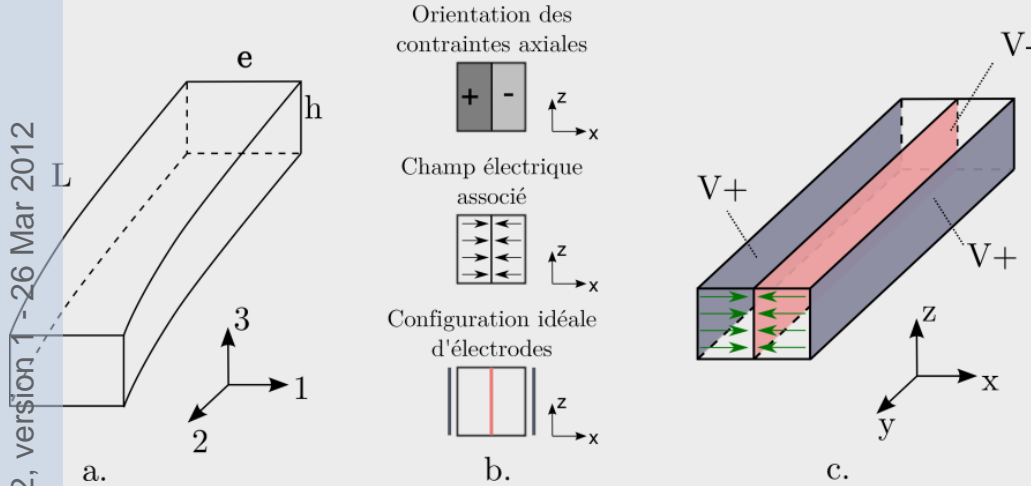
$$\begin{bmatrix} Q_{P1} \\ Q_{P2} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \end{bmatrix} \underset{\text{Charges}}{=} \underset{\text{piézo direct}}{\underbrace{\begin{bmatrix} nx_{P1} & 0 \\ nx_{P2} & 0 \\ 0 & nx_{D1} \\ 0 & nx_{D2} \end{bmatrix}}_{\text{C/m}}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} |G_x(j\omega)| & 0 \\ 0 & |j\omega G_x(j\omega)| * 2m\Omega * |G_y(j\omega)| \end{bmatrix}}_{\text{Résonance m/N}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} nx_{E1} & nx_{E2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{piézo indirect N/V}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} E1 \\ E2 \end{bmatrix}}_{\text{excitation V}}$$

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Piézoélectricité (2/3) – Excitation du mode pilote

OBJECTIF: modéliser la conversion piézoélectrique en fonction du matériau et de la géométrie

1. Calcul analytique pour une poutre de section rectangulaire (électrodes idéales)

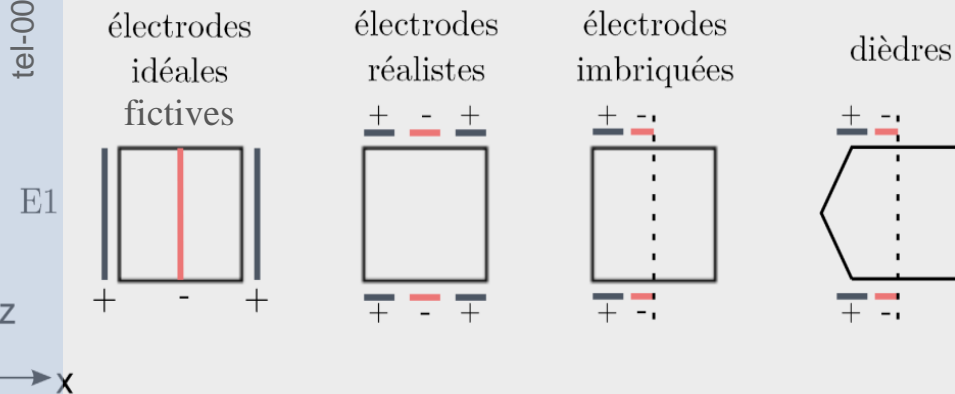


$$nx|_{\text{analytique}} = 0,65 \times \frac{2e_{12}he}{3L}$$

coefficient piézo du quartz

$$nx|_{\text{analytique}} = 78,0 \cdot 10^{-7} N/V$$

Evaluation du coefficient d'efficacité



Eléments finis : $nx|_{\text{simulé}} = 3,1 \cdot 10^{-7} N/V$

Efficacité des électrodes d'excitation du mode pilote de 3 % k_{E1}

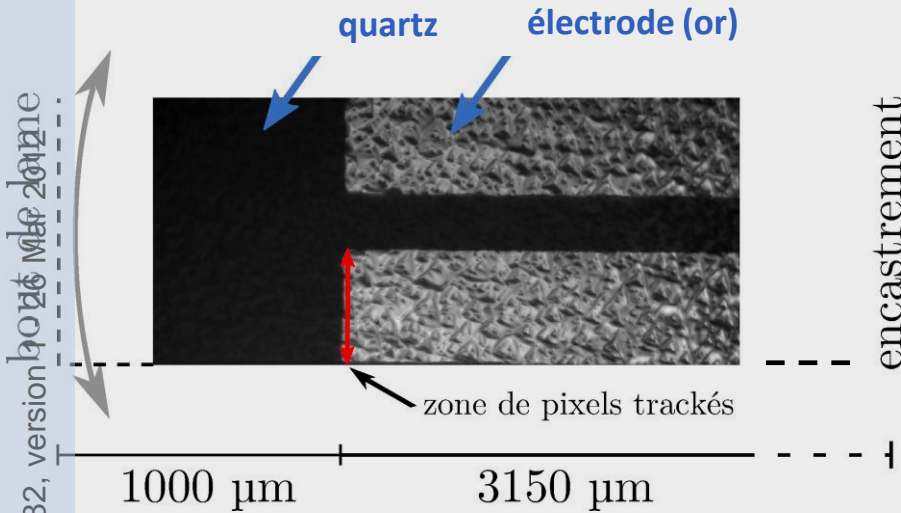
Pertes:

- électrodes réalistes
- électrodes imbriquées
- dièdres
- couplage modal

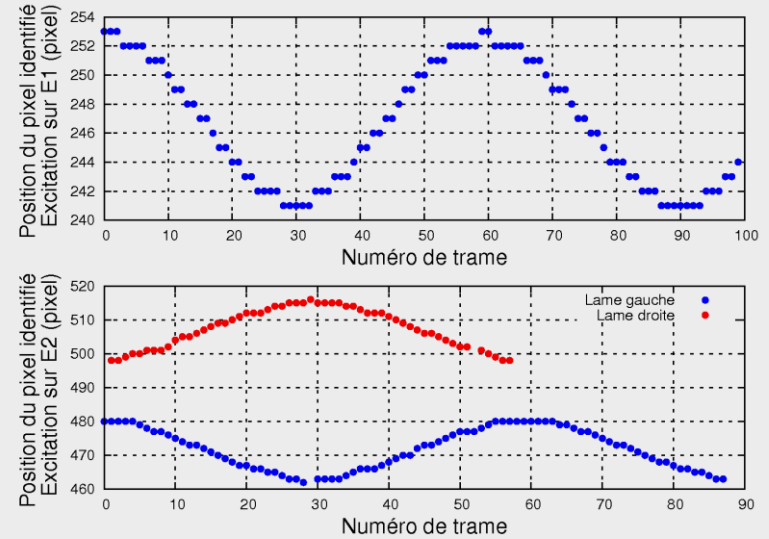
MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Piézoélectricité (3/3) – Excitation du mode pilote

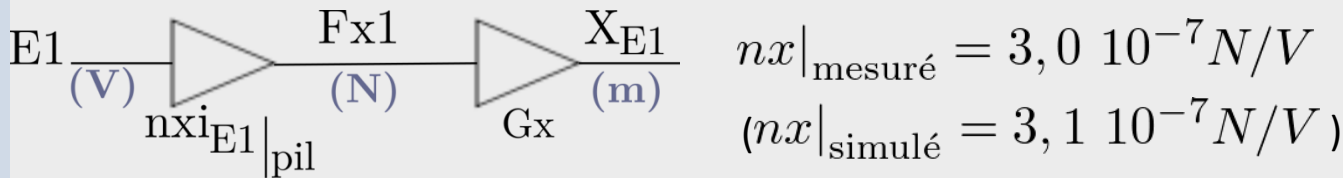
3. Mesures optiques par stroboscopie sur profilomètre FOGALE



Amplitude de vibration lame gauche 6.1 pixels = 3μm (excitation par E1) – Traitement d'images



4. Détermination du coefficient de conversion à l'aide de la chaîne de gain



$$nx|_{modèle} = k_{E1} \times nx_{E1}|_{analytique \text{ excitation}} \quad nx|_{modèle} = k_{E1} \times \frac{4e_{12}he}{3L}$$

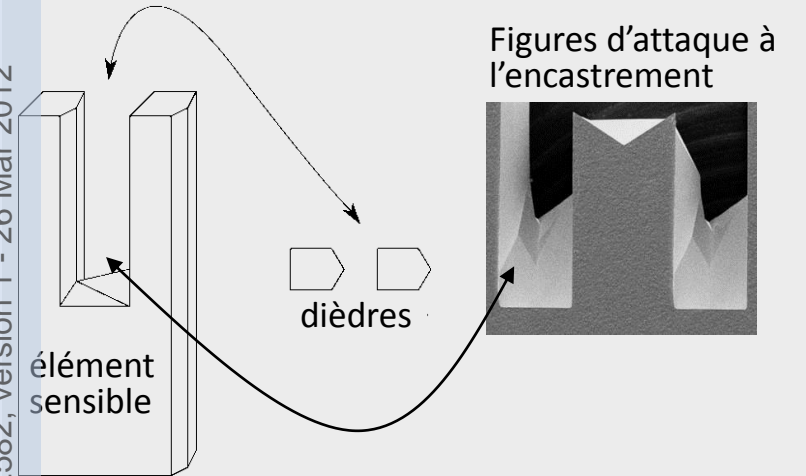
Coefficient piézoélectrique calculé en fonction de la géométrie et de la température

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

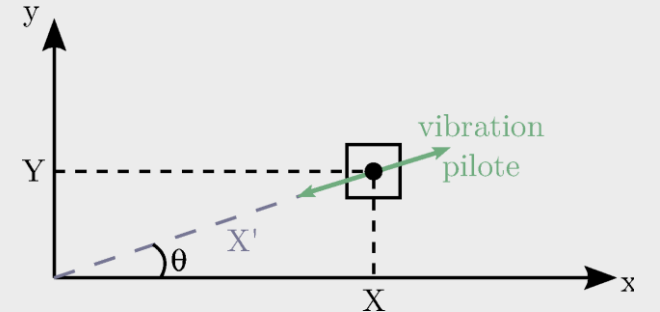
Couplage mécanique (1/3)

OBJECTIF 1: modéliser le couplage mécanique entre les modes

Imperfections de la structure mécanique (anisotropie du quartz)



Inclinaison du plan d'oscillation du mode pilote et détecteur



Mouvement vu par les électrodes:

$$\begin{cases} X = \cos(\theta)X' \\ Y = \sin(\theta)X' \end{cases}$$

➡ Charges sur le détecteur sans rotation (**biais**)

Mesures optiques (banc FOGALE)

Déplacement hors-plan	1.3 μm
Déplacement plan	3.7 μm
Inclinaison ($^\circ$)	19 \pm 3$^\circ$

Mesures électriques

Charges sur P1	1.89 pC
Charges sur D1	0.50 pC
Inclinaison ($^\circ$)	16 \pm 1$^\circ$

Mesures électriques et optiques cohérentes

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Couplage mécanique (2/3)

OBJECTIF 2: obtenir un comportement thermique du couplage mécanique

Système masse-ressort

K1 et K2 raideur des deux modes de vibration
défaut introduit avec un angle α

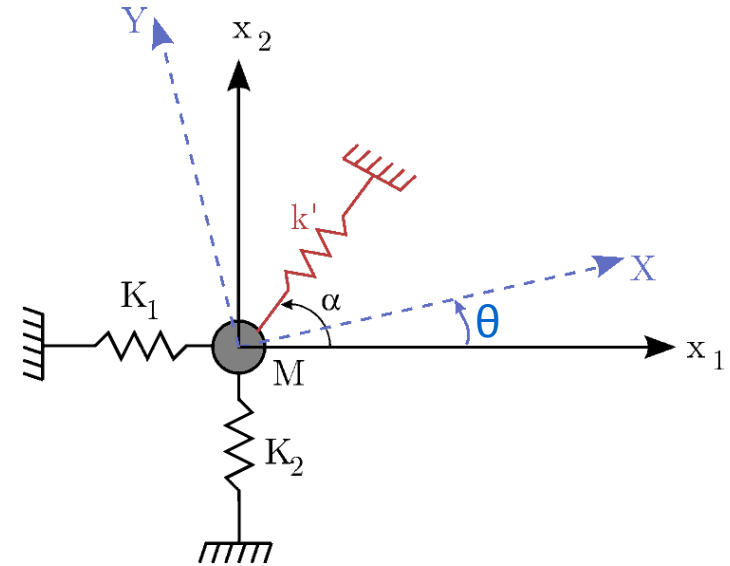
→ Changement des axes de vibration d'origine
Nouveaux axes de vibration X et Y inclinés d'un angle θ

$$\sin 2\theta = \frac{k' \sin 2\alpha}{M(\omega_X^2 - \omega_Y^2)} \Rightarrow \theta \approx \frac{k' \sin 2\alpha}{2M(\omega_X^2 - \omega_Y^2)}$$

Dérivée logarithmique

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{dk'}{k'} + \frac{d \sin 2\alpha}{\sin 2\alpha} - \frac{dM}{M} - \frac{d(\omega_X + \omega_Y)}{\omega_X + \omega_Y} - \boxed{\frac{d(\omega_X - \omega_Y)}{\omega_X - \omega_Y}}$$

→ **Modèle:** $\theta_T = \theta_{T0} \times \frac{\Delta\omega_T}{\Delta\omega_{T0}}$

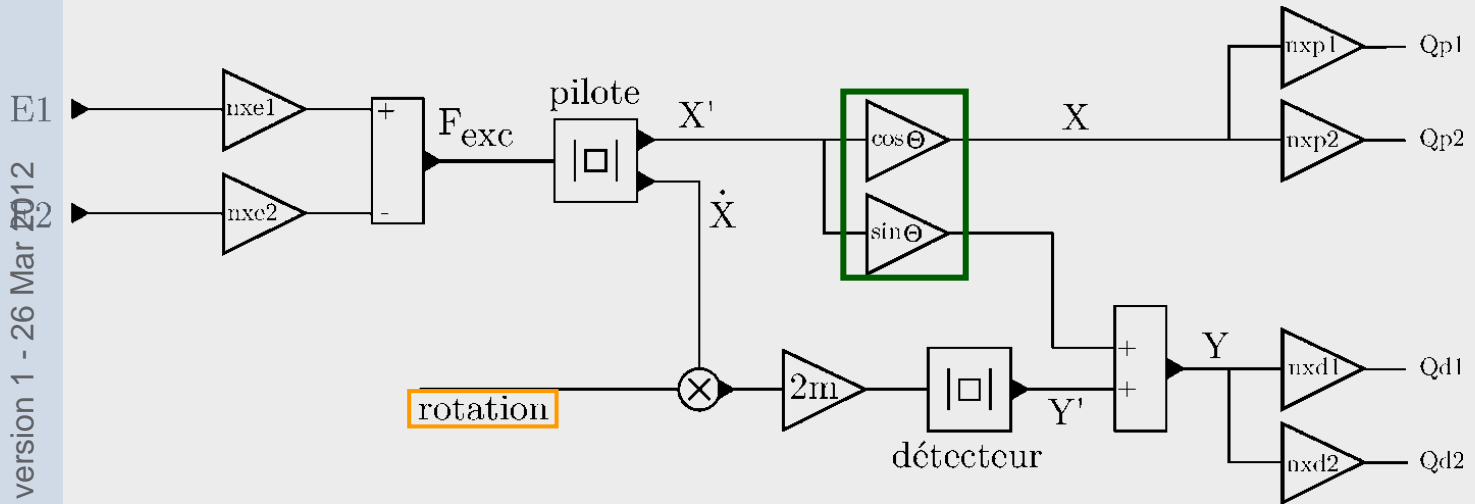


iter 00002582, version 1 - 26 Mar 2012

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Couplage mécanique (3/3)

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



$$\underbrace{\begin{bmatrix} Q_{P1} \\ Q_{P2} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \end{bmatrix}}_{\text{Charges}} = \underbrace{\begin{bmatrix} nx_{P1} & 0 \\ nx_{P2} & 0 \\ 0 & nx_{D1} \\ 0 & nx_{D2} \end{bmatrix}}_{\text{piézo direct}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}}_{\text{Couplage mécanique}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} |G_x(j\omega)| & 0 \\ 0 & \square \end{bmatrix}}_{\text{Résonance}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} nx_{E1} & nx_{E2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{piézo indirect}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} E1 \\ E2 \end{bmatrix}}_{\text{excitation}}$$

$$|j\omega G_x(j\omega)| \times 2m\Omega \times |G_y(j\omega)|$$

Couplage mécanique = matrice de rotation

MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Couplage capacitif

Dû à la proximité des électrodes.

Apparition de charges en phase avec le signal utile sur les électrodes de détection.

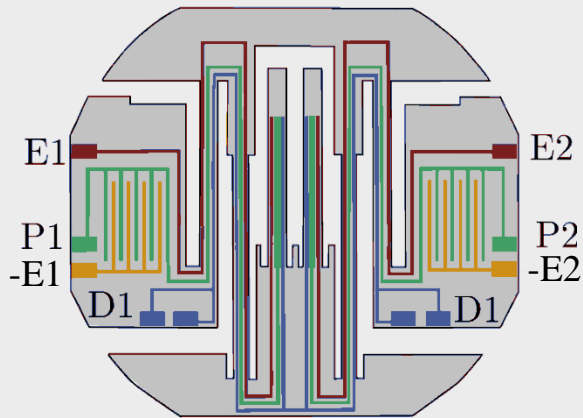
SYSTEME ACTUEL

Électrodes imbriquées (brevet ONERA 2010)

(couplage excitation \rightarrow détecteur)

Fignes interdigités

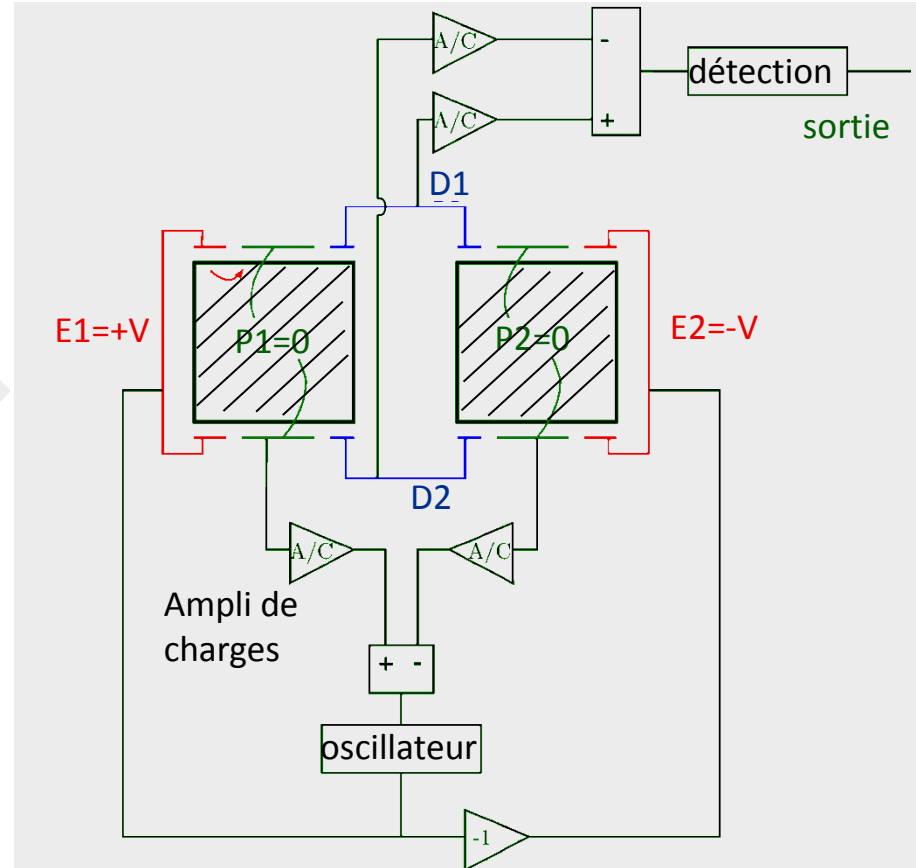
(couplage excitation \rightarrow pilote)



DANS LE MODELE

Calcul des capacités (lignes coplanaires)

Vérification expérimentale (quelques centaines de fF)



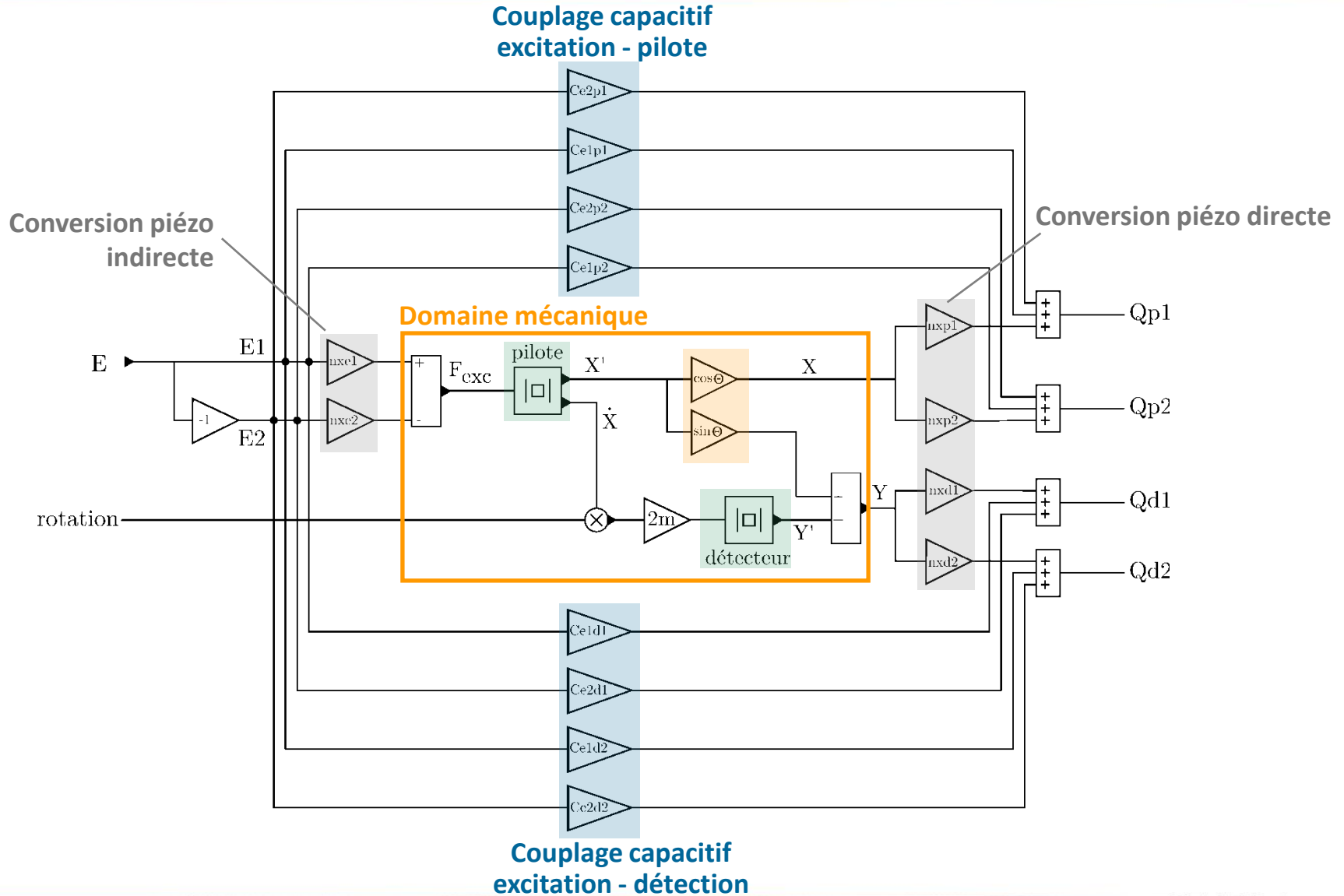
Intérêt des électrodes imbriquées

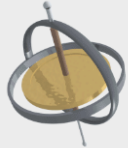
Électrodes P1/P2 = écran de masse

\Rightarrow Réduction considérable des charges pilote sur les électrodes de détection

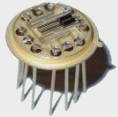
MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE

Modèle complet

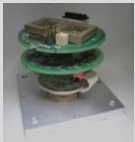




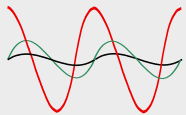
1. INTRODUCTION



2. MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE



3. MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE



4. ANALYSE ET AMELIORATION

MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE

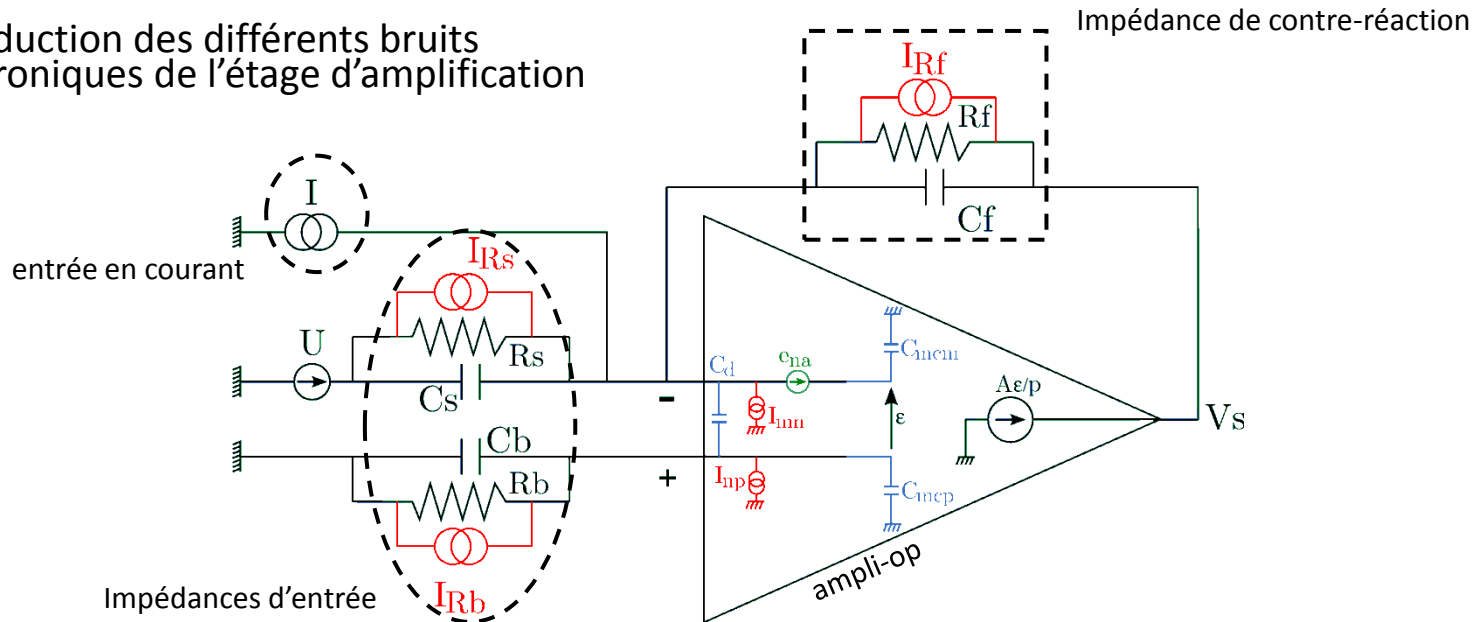
Amplificateur de charges (1/2)

OBJECTIF: modéliser finement l'amplificateur de charges pour introduire les sources de bruits

Rôle: convertir les charges collectées sur les électrodes en tension

Sources de bruit dominantes (premier étage d'amplification)

Introduction des différents bruits électroniques de l'étage d'amplification

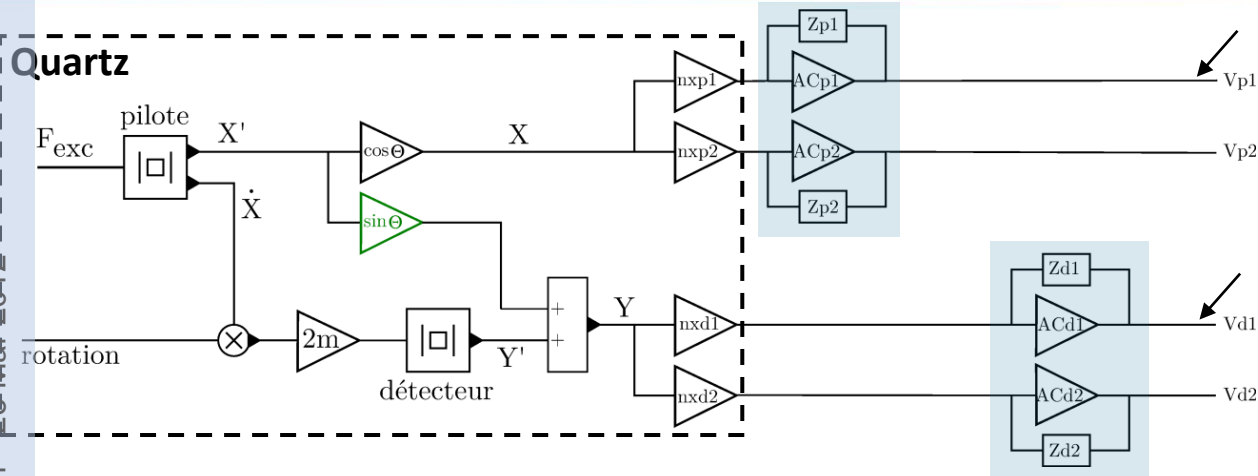


- C_{mcm} / C_{mp} Capacités d'entrée de mode commun
- C_d Capacité d'entrée différentielle
- I_{nm} / I_{np} Sources de bruit en courant
- e_{na} Source de bruit en tension
- $I_{Rs} / I_{Rb} / I_{Rf}$ Source de bruit Johnson des résistances

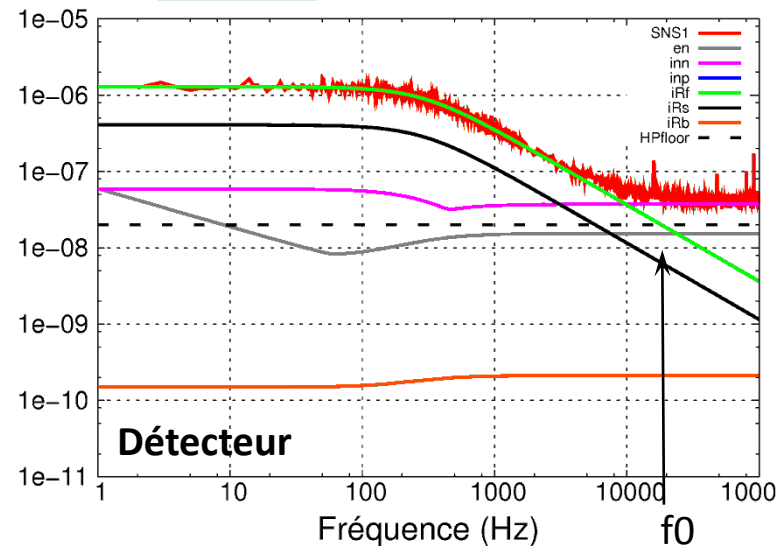
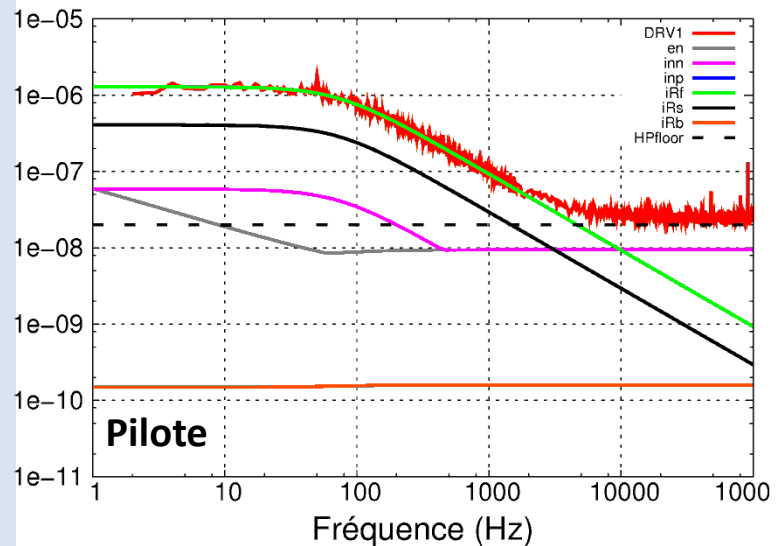
MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE

Amplificateur de charges (2/2)

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



Simulation fréquentielle
 Contribution de chaque source de bruit
 Comparaison avec la maquette



Détecteur
 50 nV/√Hz @ 20 kHz
 ↓
 7 °/h /√Hz

Mesures limitées par le seuil de l'analyseur
 Contributeur principal: bruit en courant de l'AOP

Cohérence simulation / expérimentation

MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE

Oscillateur (1/2)

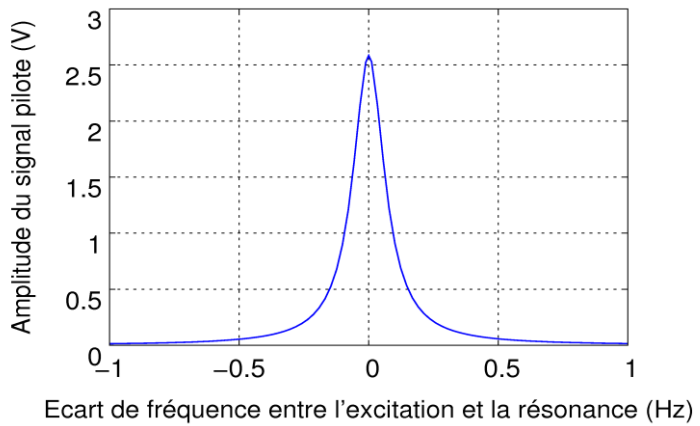
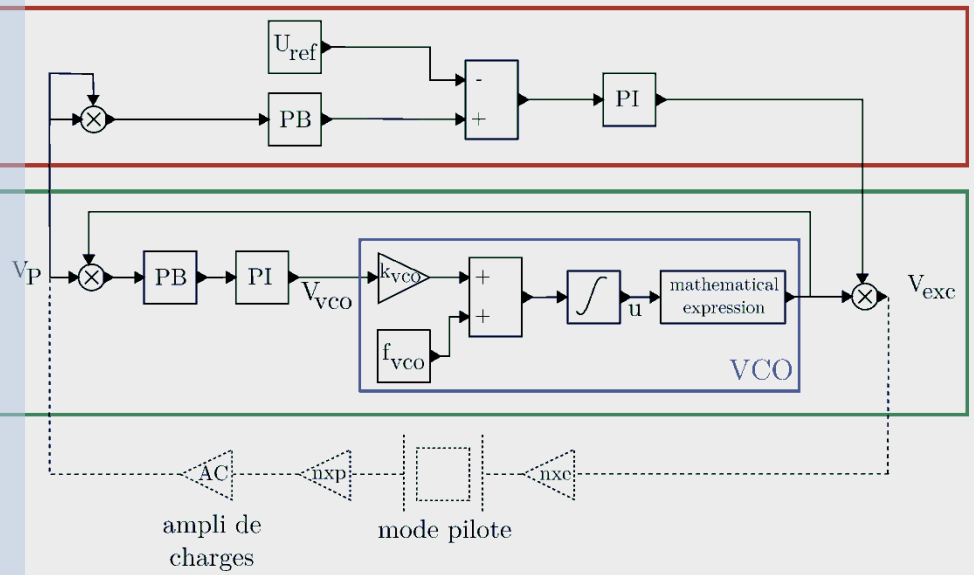
OBJECTIF: calculer le régime permanent du VIG en fonction de tous les paramètres d'entrée

Facteur de qualité élevé ≈ 150000

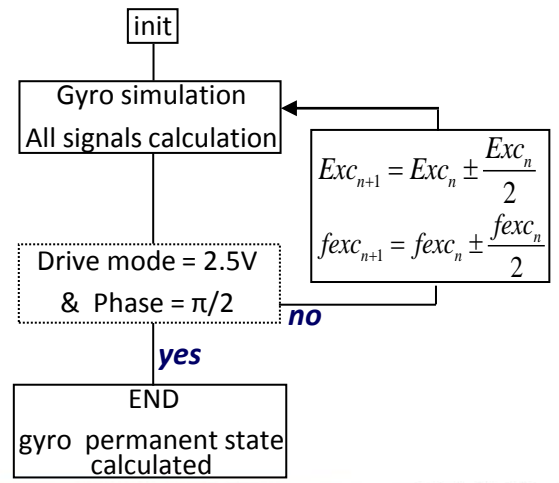
Asservissement de la fréquence d'excitation (PLL)

Asservissement de l'amplitude pilote

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



Comment trouver le régime permanent ?



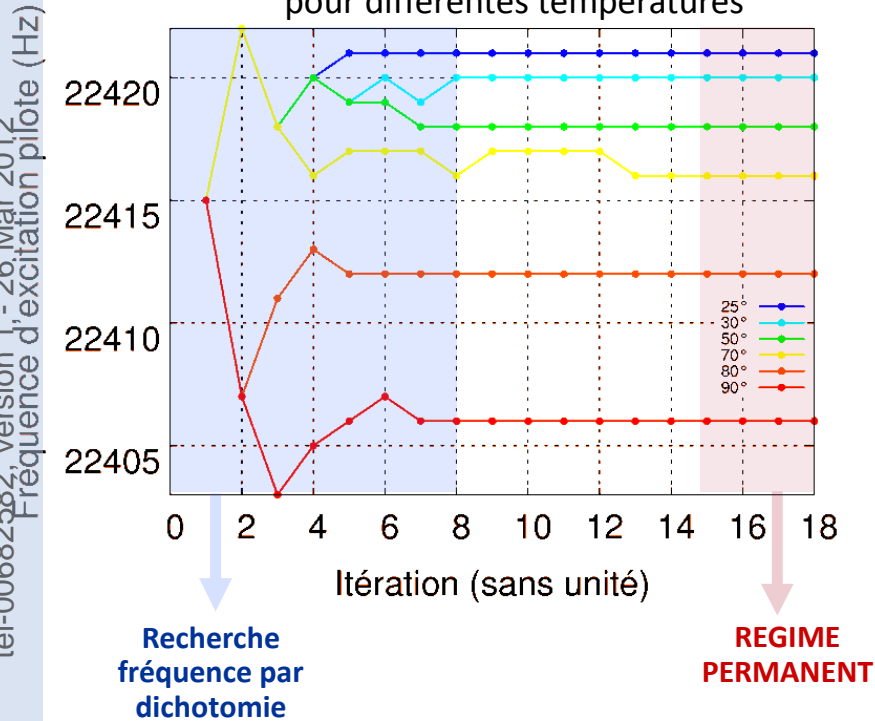
Simulation temporelle abandonnée pour simulation fréquentielle.
 Algorithme de convergence du système vers son régime permanent.

MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE

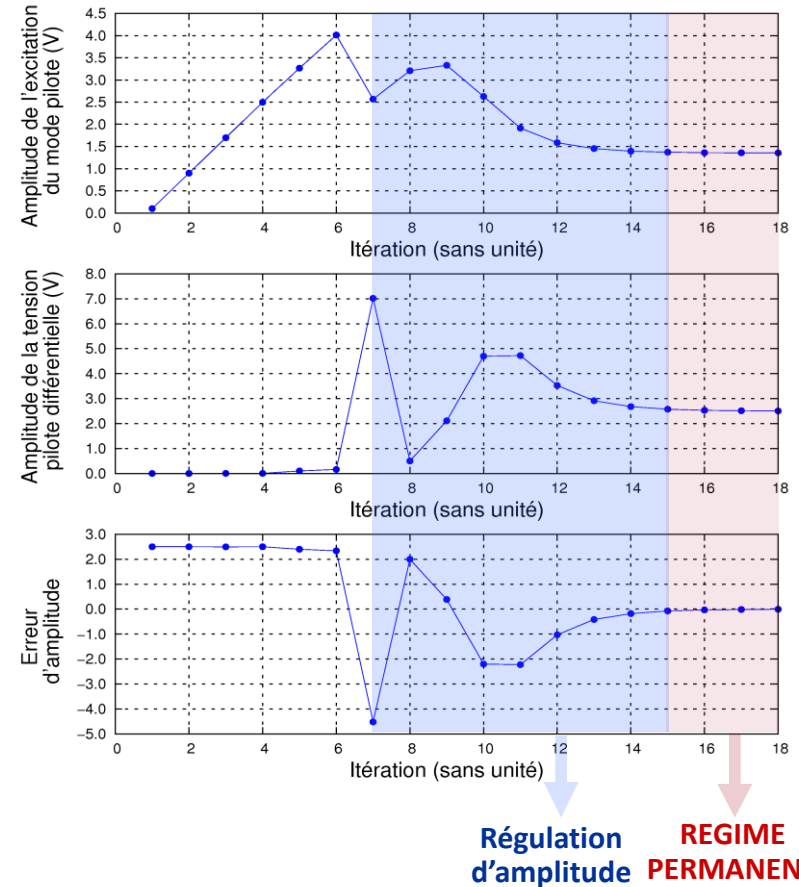
Oscillateur (2/2)

Convergence en fréquence

Recherche de la fréquence de résonance pour différentes températures



Convergence en amplitude



tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

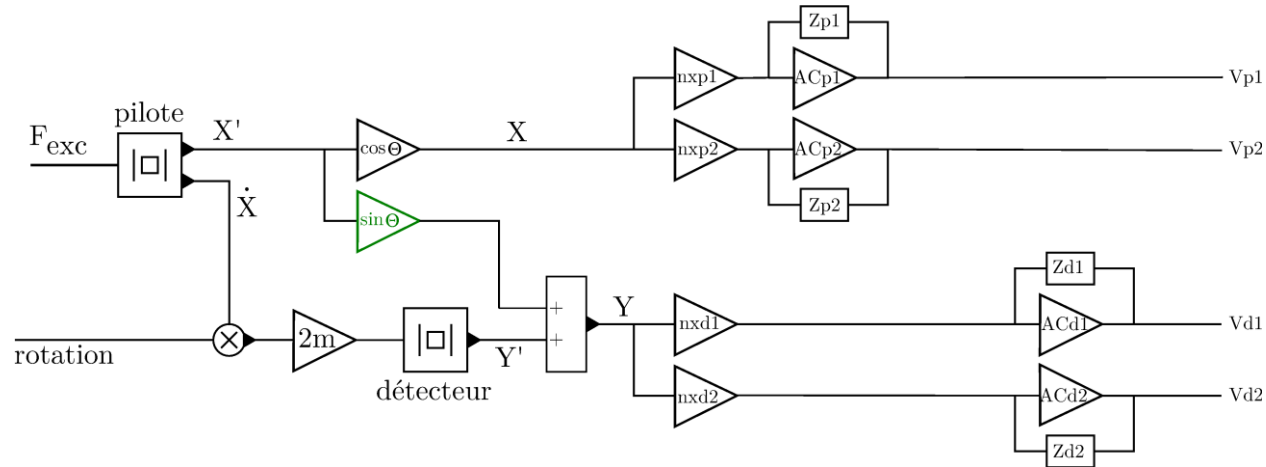
Pseudo-temporel -> convergence

Simulation de l'excitation de la structure vibrante complète
Calcul du régime permanent pour n'importe quelle température

MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE Réinjection (1/2)

Simulation du modèle complet – Observation de la sortie du gyromètre simulé

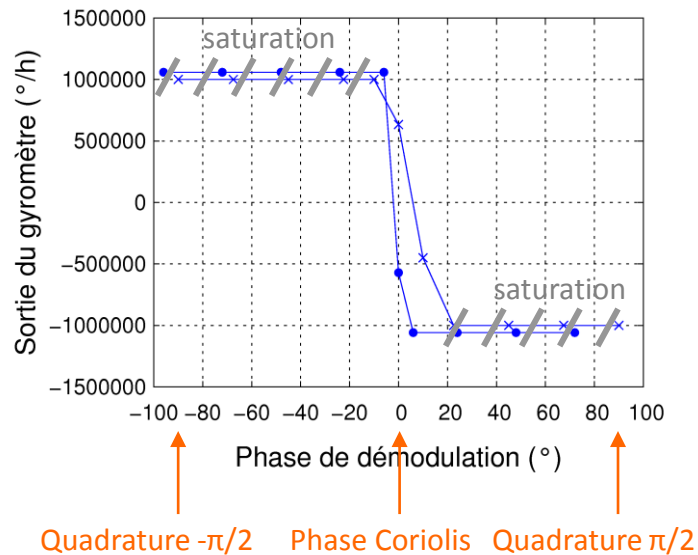
Démodulation synchrone avec phase de démodulation paramétrable



tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

$$\begin{cases} V_{D1} = Z_{D1} * j\omega * [Q_{C1} + Q_{CC1} + Q_{cm1}] \\ V_{D2} = Z_{D2} * j\omega * [Q_{C2} + Q_{CC2} + Q_{cm2}] \end{cases}$$

phase
phase
quadrature



PROBLEME

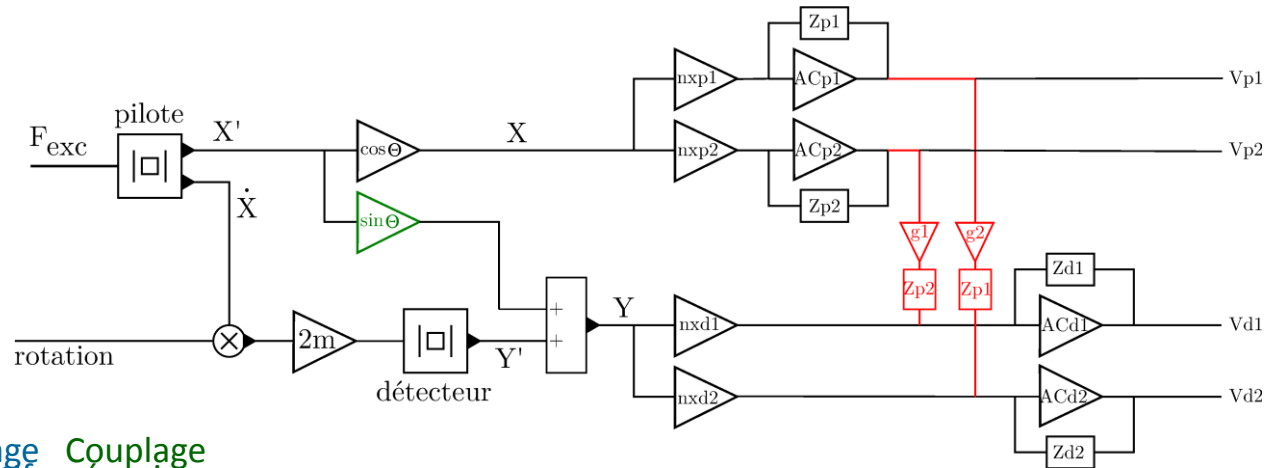
Saturation des amplis en dehors de la phase de démodulation

MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE Réinjection (2/2)

OBJECTIF: éviter la saturation des amplificateurs (compensation du couplage mécanique)

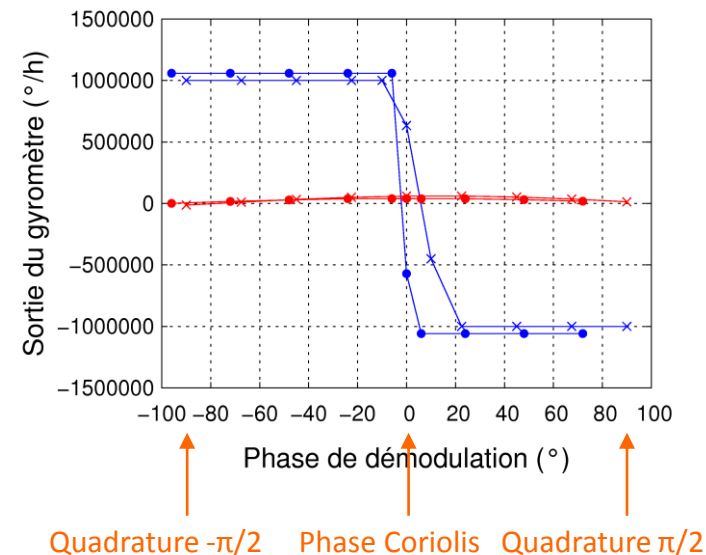
Solution

Utilisation des charges pilotes pour compenser les charges dues au couplage mécanique
Réinjection à travers un gain et l'impédance pilote



$$\begin{aligned}
 V_{D1} &= Z_{D1} * j\omega * \left[\begin{array}{c} \text{Coriolis} \\ \text{Couplage} \\ \text{capacitif} \end{array} \begin{array}{c} \text{Couplage} \\ \text{mécanique} \end{array} \right. \\
 &\quad \left. \begin{array}{c} Q_{C1} + Q_{CC1} + Q_{CM1} \\ Q_{C2} + Q_{CC2} + Q_{CM2} \end{array} \right] \\
 V_{D2} &= Z_{D2} * j\omega * \left[\begin{array}{c} \text{phase} \\ \text{phase} \\ \text{quadrature} \end{array} \right. \\
 &\quad \left. \begin{array}{c} Q_{C1} + Q_{CC1} + Q_{CM1} \\ Q_{C2} + Q_{CC2} + Q_{CM2} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Compensation du couplage mécanique en quadrature
Apparition du couplage en phase
Plus de saturation



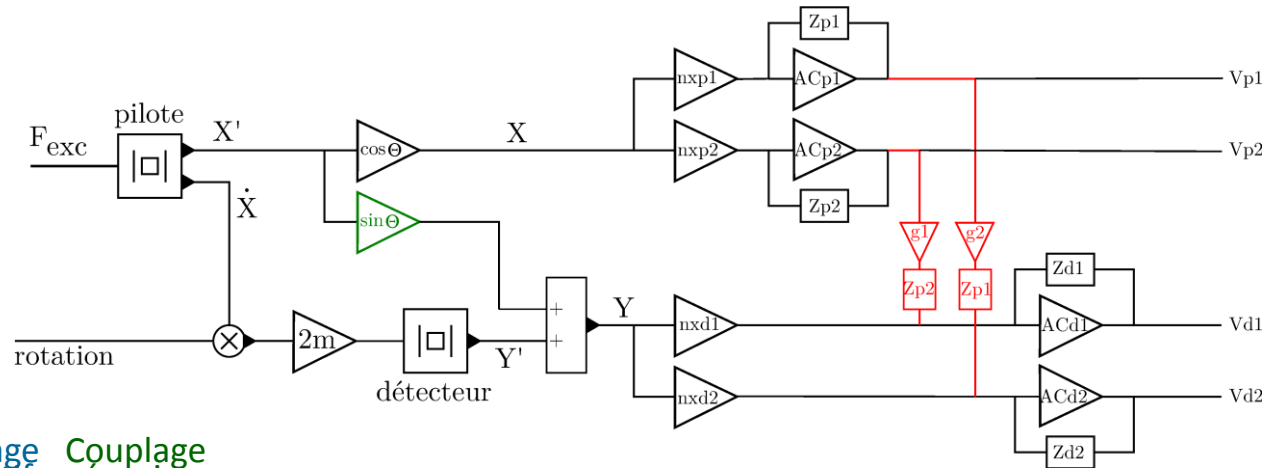
tel:006882582, version 1 - 26/02/2012

MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE Réinjection (2/2)

OBJECTIF: éviter la saturation des amplificateurs (compensation du couplage mécanique)

Solution

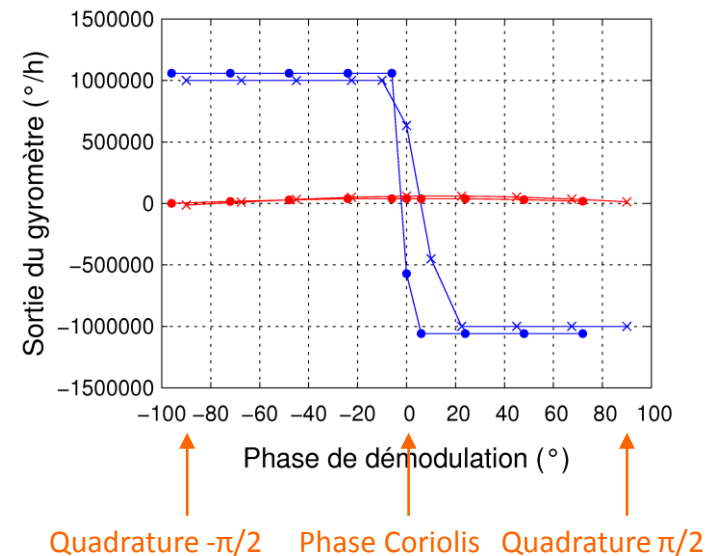
Utilisation des charges pilotes pour compenser les charges dues au couplage mécanique
 Réinjection à travers un gain et l'impédance pilote



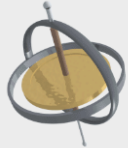
$$V_{D1} = Z_{D1} * j\omega * \left[\begin{array}{l} \text{Coriolis} \\ \text{Couplage} \\ \text{capacitif} \\ Q_{C1} + Q_{CC1} + Q_{CM1} + g_1 V_{P2} * \frac{1}{Z_{P2}} \end{array} \right]$$

$$V_{D2} = Z_{D2} * j\omega * \left[\begin{array}{l} \text{Couplage} \\ \text{mécanique} \\ Q_{C2} + Q_{CC2} + Q_{CM2} + g_2 V_{P1} * \frac{1}{Z_{P1}} \end{array} \right]$$

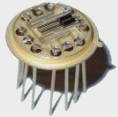
phase phase quadrature réinjection



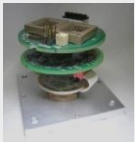
Compensation du couplage mécanique en quadrature
Apparition du couplage en phase
Plus de saturation



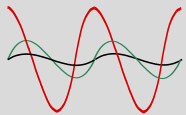
1. INTRODUCTION



2. MODELISATION DE LA STRUCTURE VIBRANTE



3. MODELISATION DE L'ELECTRONIQUE



4. ANALYSE ET AMELIORATION

ANALYSE ET AMELIORATION

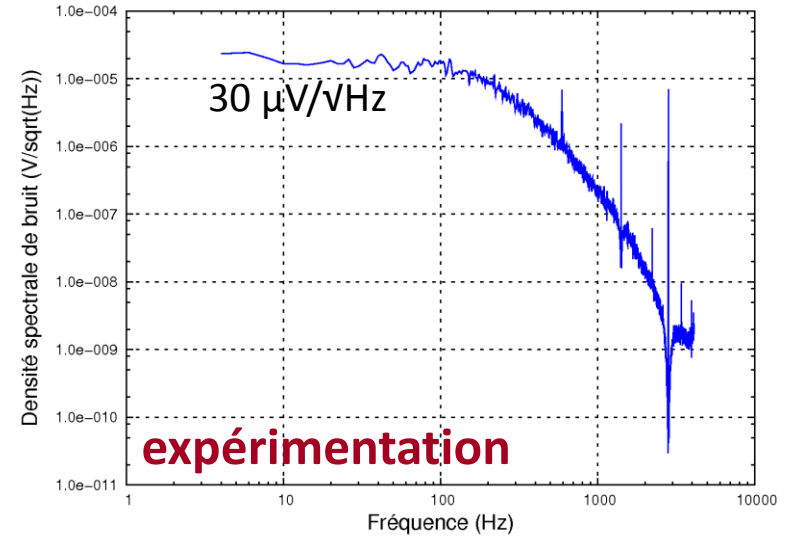
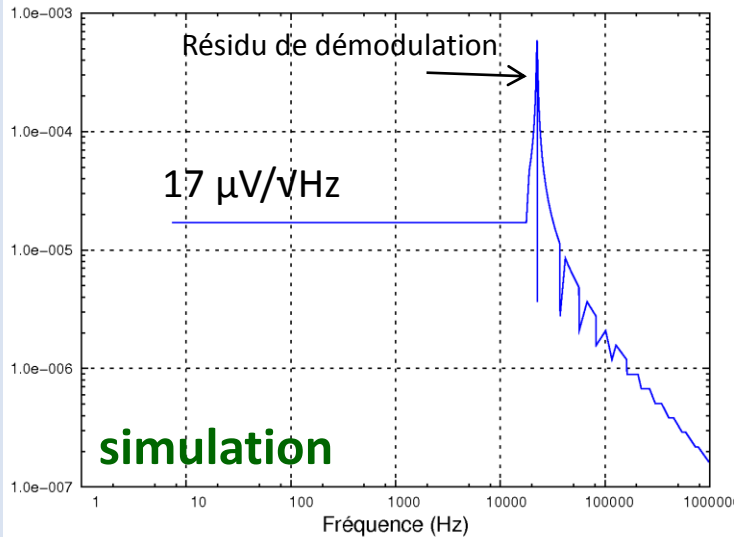
Analyse des performances – Résolution

OBJECTIF: comparer la résolution du capteur entre simulation et maquette

Résolution: plus petit signal mesurable
 Dépend des sources de bruit du système

facteur d'échelle = 9 mV/(°/s)

$$\text{Résolution}(\text{°/s}/\sqrt{\text{Hz}}) = \frac{\text{Bruit mesuré}(V/\sqrt{\text{Hz}})}{\text{Facteur d'échelle}(V/\text{°/s})}$$



Résolution simulée: **7 °/h/ √ Hz**

Résolution mesurée: **12 °/h/ √ Hz**

Bruit au niveau des amplificateurs de charges bien modélisé

Ecart: bruit dans le système de démodulation

Avec la structure actuelle: résolution ultime de 7 °/h/ √ Hz

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

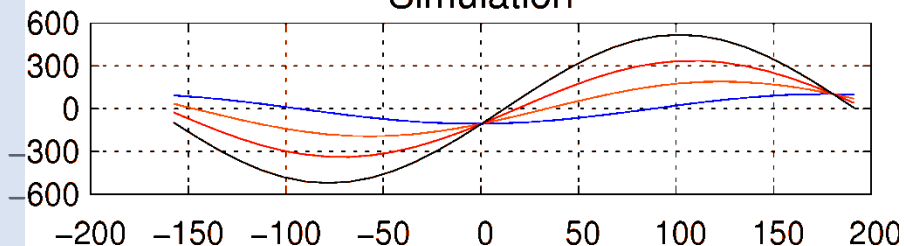
ANALYSE ET AMELIORATION

Analyse des performances – Biais

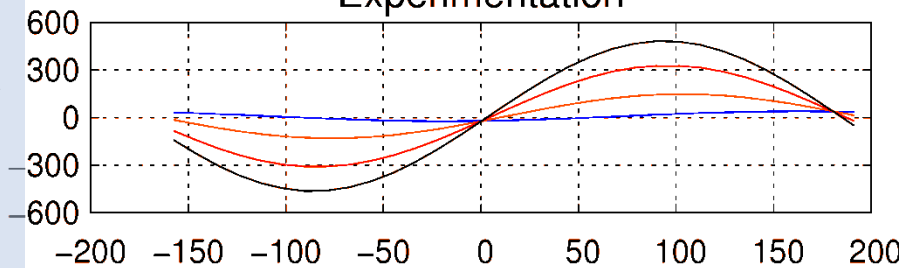
OBJECTIF: étudier la stabilité du biais en fonction de la température (comportement de la réinjection)

Sortie en fonction de la phase de démodulation pour différentes températures

Simulation



Expérimentation

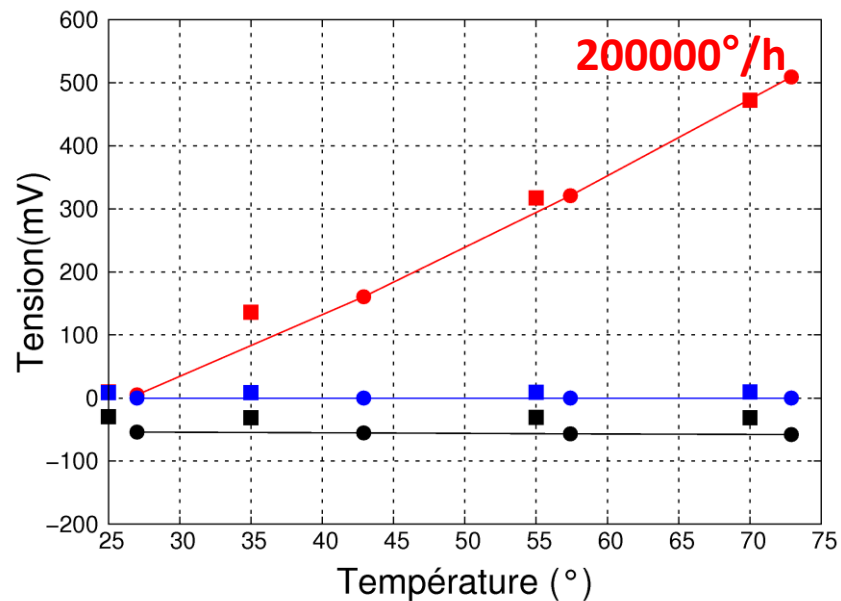


Phase de démodulation (deg)

25°
35°
55°
70°

Décomposition du signal en sin, cos et biais

$$\text{Signal} = \boxed{B} + \boxed{P} \cos(\theta) + \boxed{Q} \sin(\theta)$$



200000°/h

Tension(mV)

Température (°)

Variation du résidu de couplage Q en fonction de la température. Comportement en simulation vérifié par l'expérimentation Confirmation du modèle du couplage mécanique

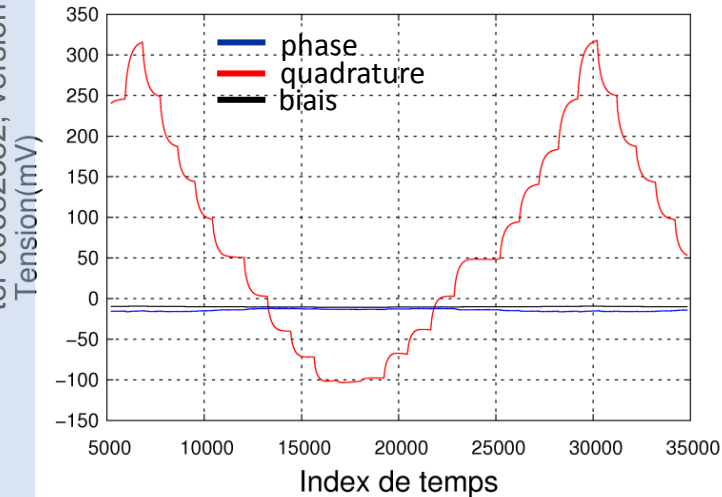
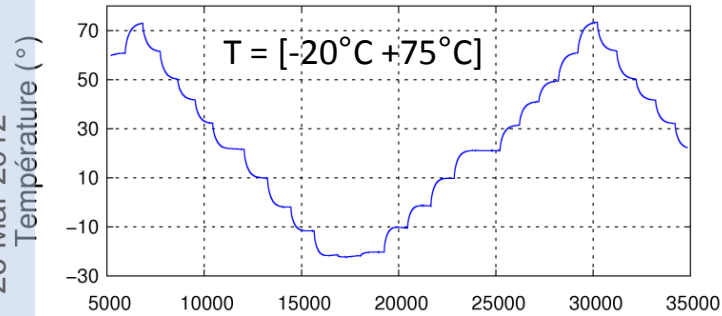
$$\theta_T = \theta_{T0} \times \frac{\Delta\omega_T}{\Delta\omega_{T0}}$$

AMELIORATION

Analyse des performances – Biais

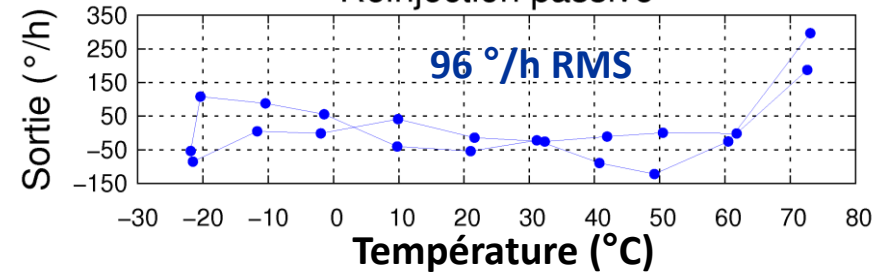
Cycle thermique chaud-froid-chaud

Expérimentation – Réinjection passive



Résidu de biais après modélisation

Réinjection passive



- Résidu: 96 °/h RMS
- Trop forte variation de la composante en quadrature
 - Variation de la composante en phase (signal utile) au moindre écart de phase
 - Instabilité du biais

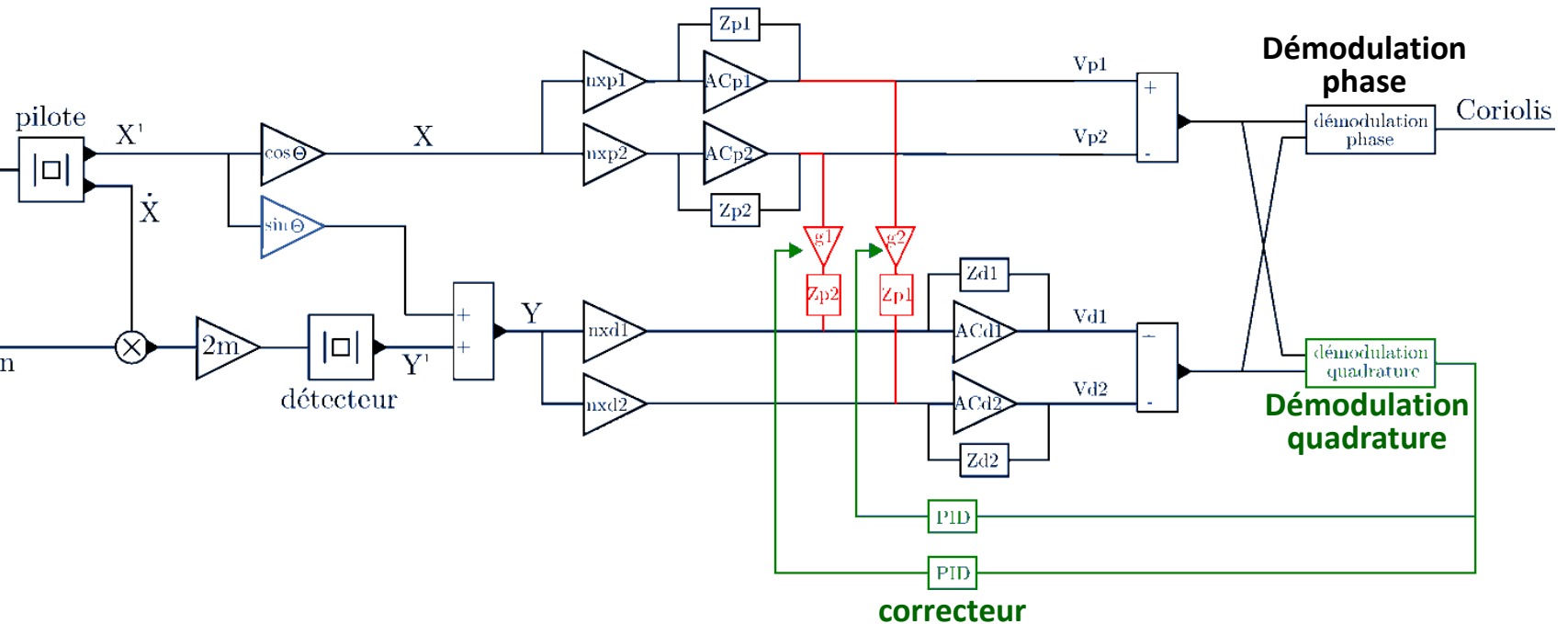
Développement d'un système actif

AMELIORATION

Réinjection active

OBJECTIF: développer un système ACTIF de compensation du couplage mécanique

Principe



tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

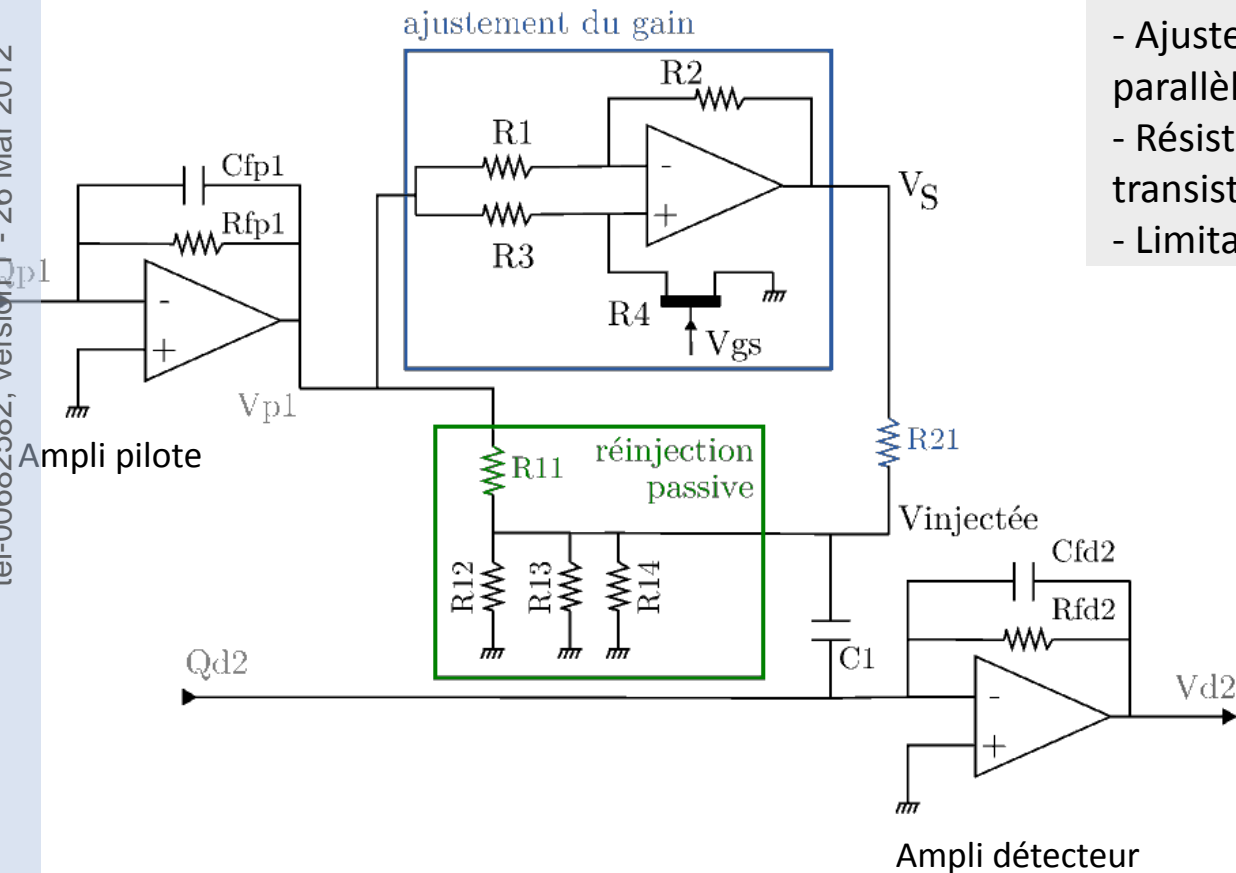
AMELIORATION

Réinjection active

OBJECTIF: développer un système ACTIF de compensation du couplage mécanique

Mise en oeuvre

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012

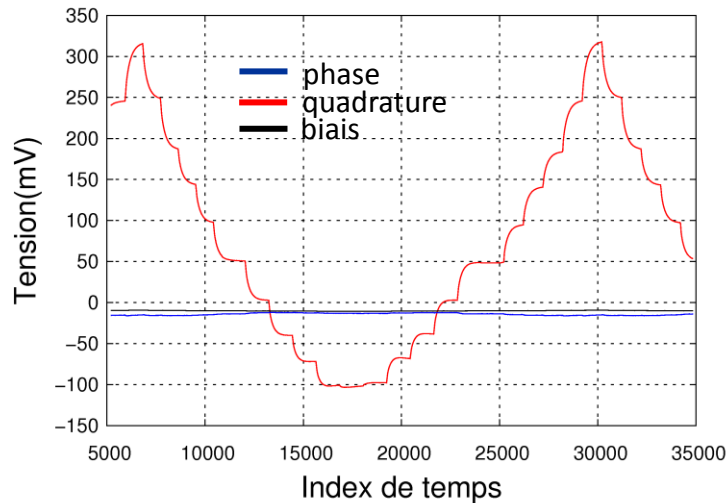
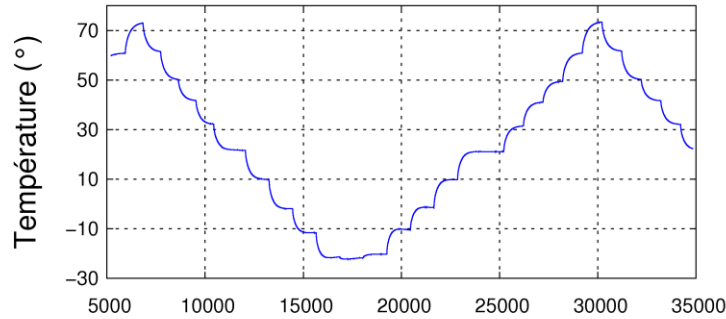


- Ajustement du gain de réinjection en parallèle du gain passif
- Résistance commandée en tension: transistor FET
- Limitation des effets de déphasages

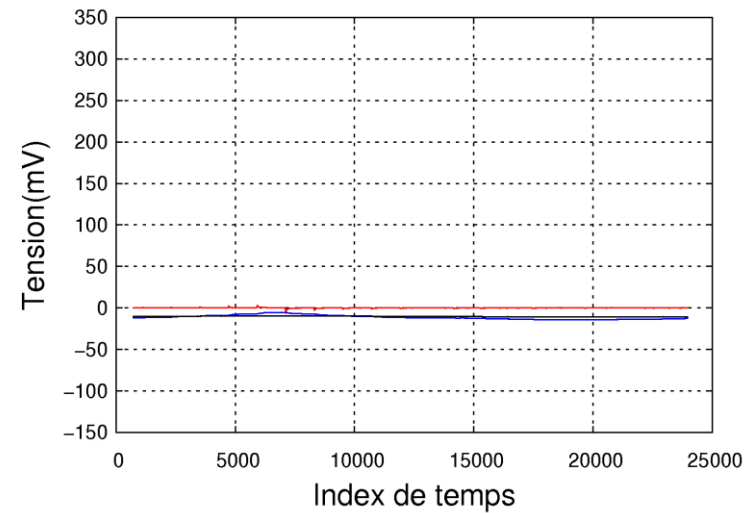
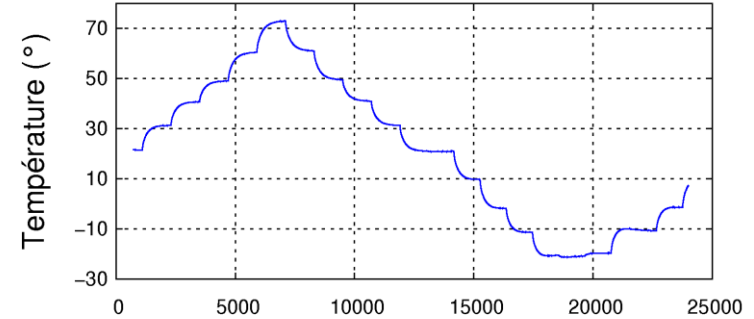
AMELIORATION

Réinjection active – Cycle thermique

Expérimentation – Réinjection passive



Expérimentation – Réinjection Active

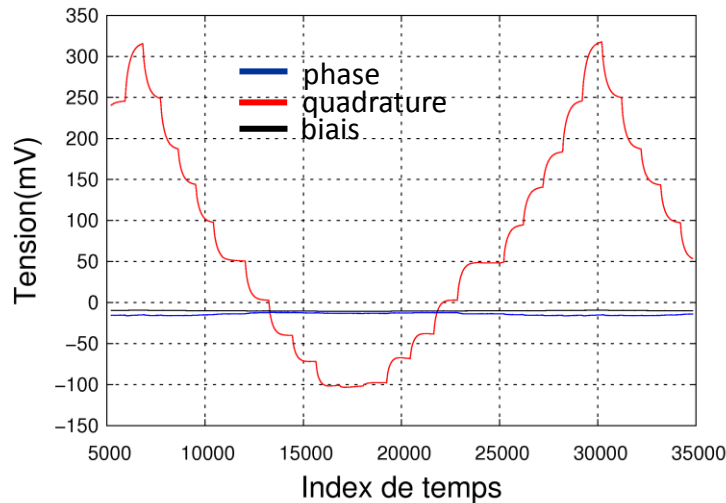
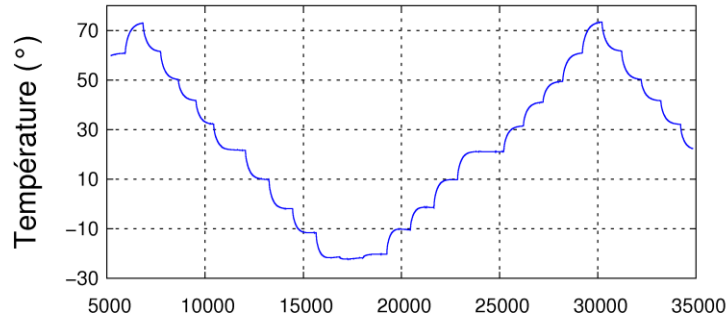


Composante en quadrature maintenue à zéro – Système efficace
Composante en phase qui varie (déphasages introduits par la réinjection)

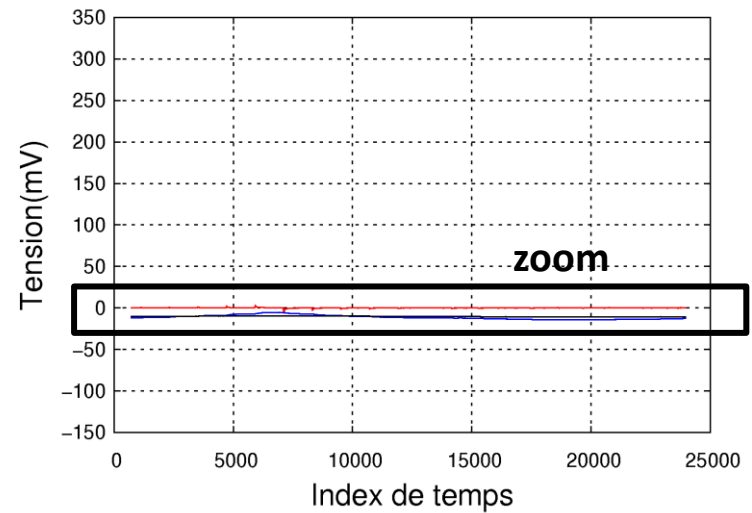
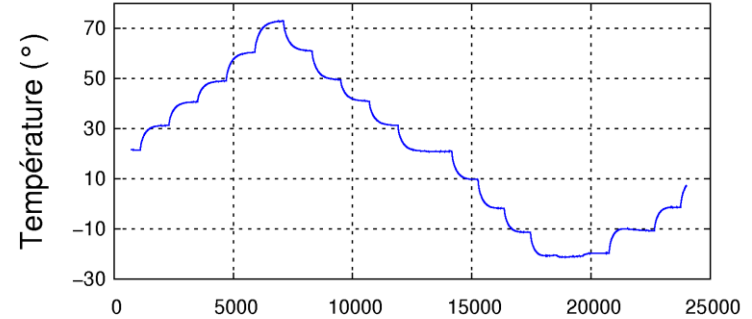
AMELIORATION

Réinjection active – Cycle thermique

Expérimentation – Réinjection passive



Expérimentation – Réinjection Active

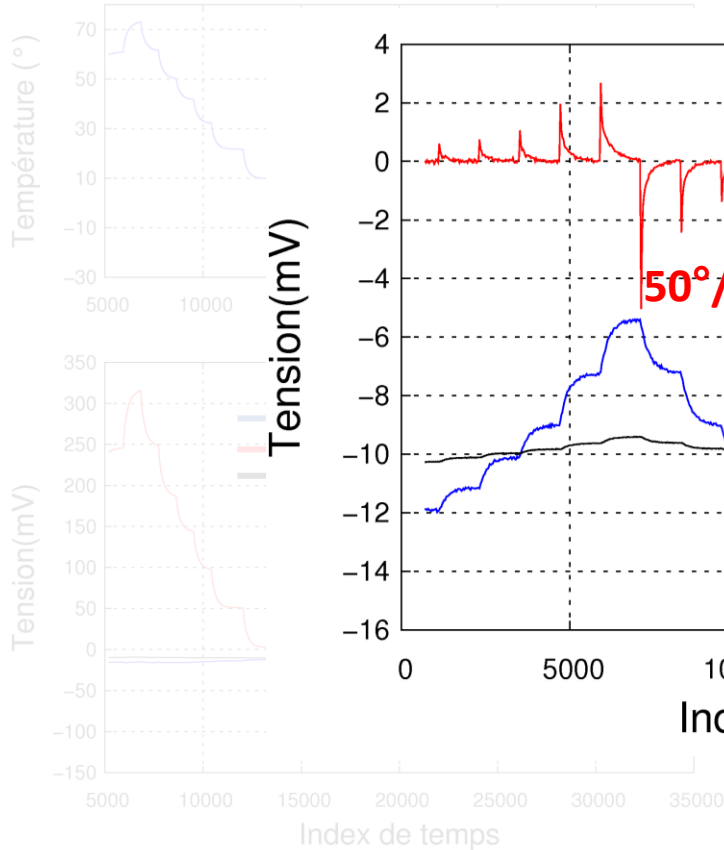


Composante en quadrature maintenue à zéro – Système efficace
Composante en phase qui varie (déphasages introduits par la réinjection)

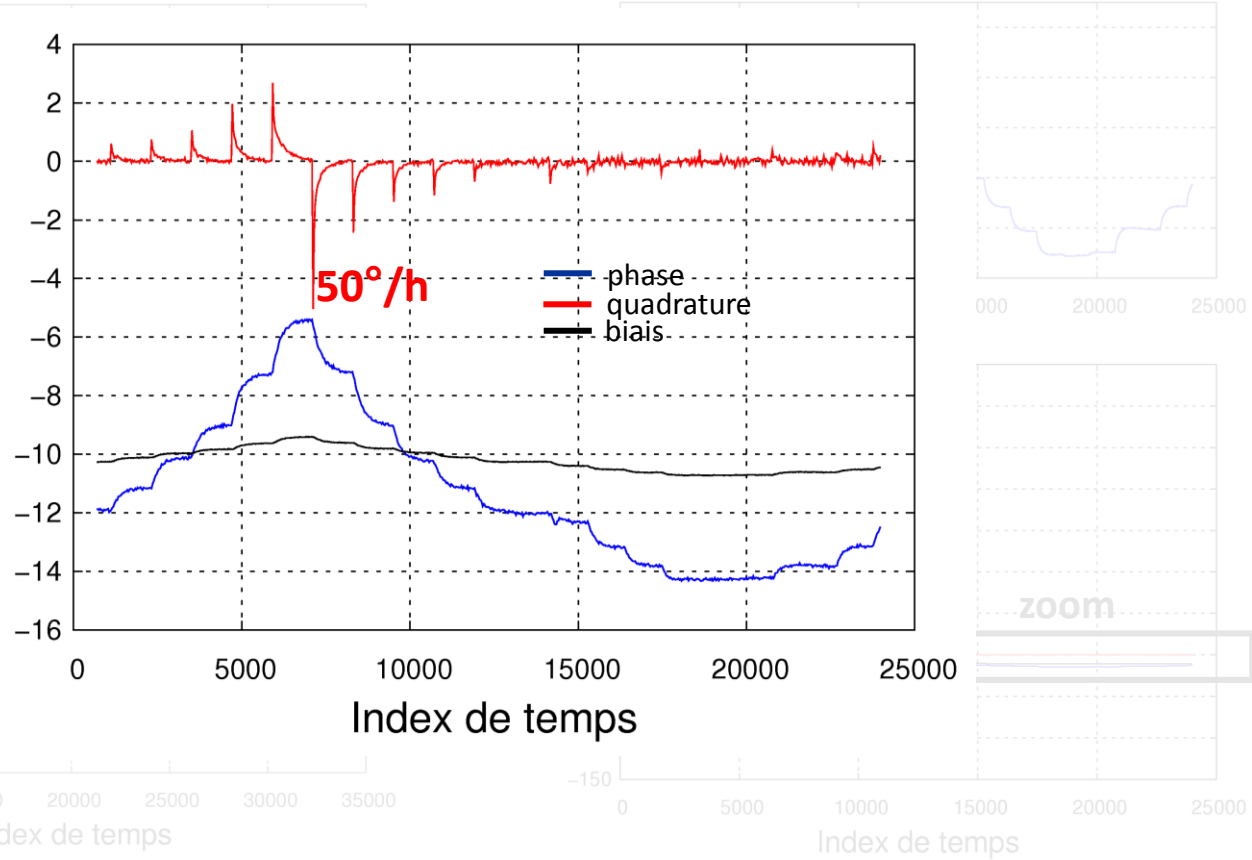
AMELIORATION

Réinjection active – Cycle thermique

Expérimentation – Réinjection passive



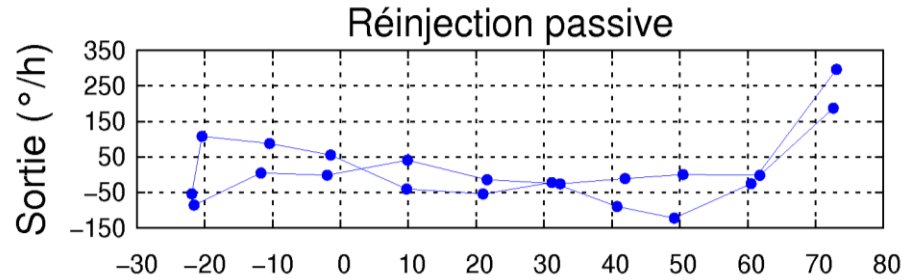
Expérimentation – Réinjection Active



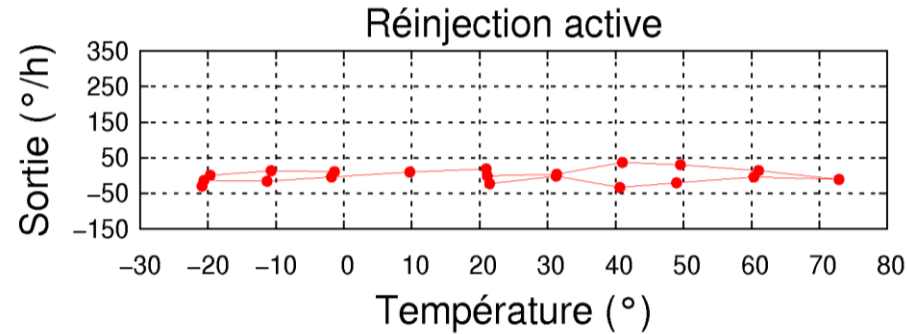
Composante en quadrature maintenue à zéro – Système efficace
Composante en phase qui varie (déphasages introduits par la réinjection)

Résidu après modélisation de la stabilité du biais

96 °/h RMS



20 °/h RMS



Amélioration de la stabilité de biais d'un facteur 5

AMELIORATION Analyse

PASSIF

ACTIF

Résidu de couplage diminué d'un facteur

Stabilité de biais

96°/h



20°/h

4000 MAIS gain sur la stabilité de 5

Résidu de couplage

200000°/h



50°/h

→ Autre contributeur



Cycle hors-résonance: pas de couplage mécanique

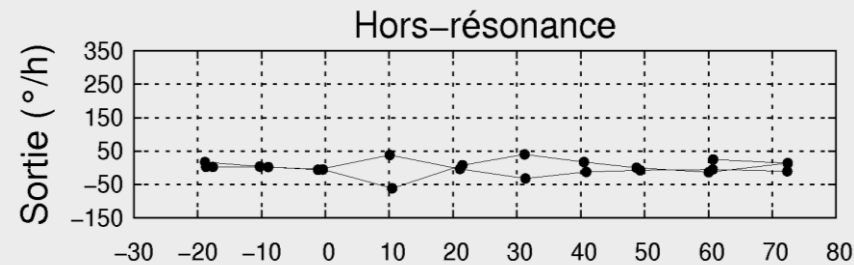
Stabilité de biais = 20 °/h RMS

OR 20 °/h avec réinjection passive

→ Couplage capacitif = contributeur majoritaire

°/h = quelques af (10^{-18} F) = 1/1000 capacité au niveau du quartz

Sensibilité extrême à l'environnement



Amélioration de la **stabilité de biais** et de la **résolution** à court terme:

- nouvelle génération de routage
- augmentation du gain (Δf et échelle de la cellule)

→ VIG à 1 °/h en stabilité de biais et 1 °/h/ $\sqrt{\text{Hz}}$ pour le couplage mécanique observé aujourd'hui (2000°/s) (tri).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions

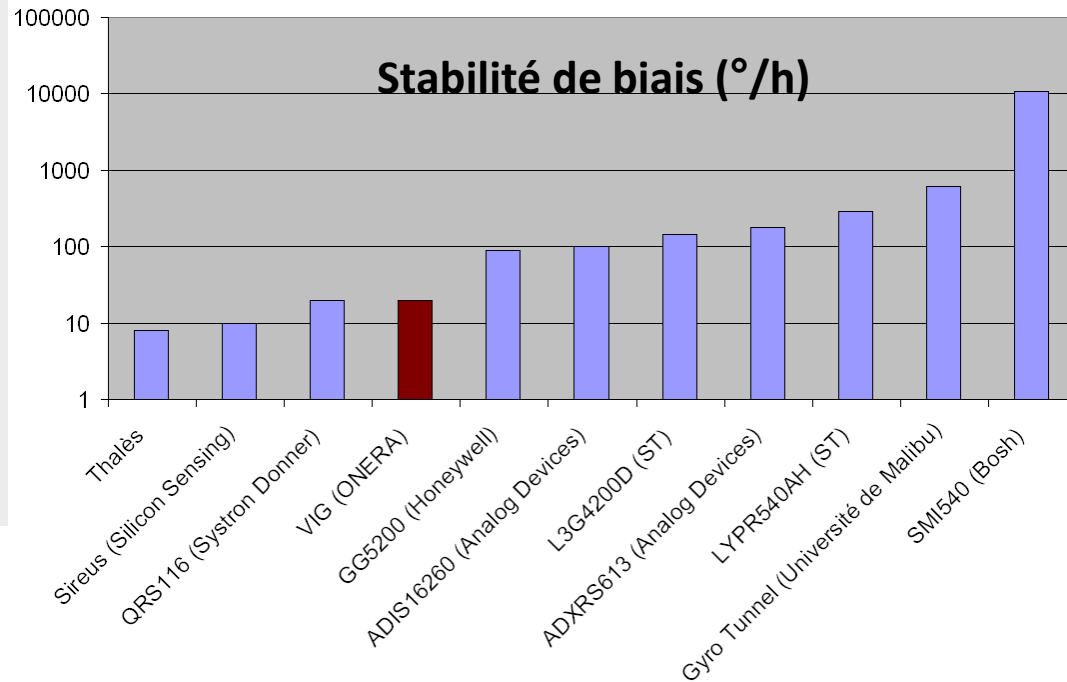
Développement d'un modèle complet du gyromètre (structure vibrante + électronique).
Représentation fidèle du comportement du gyromètre.
Compréhension du couplage mécanique.
Dimensionnement des gains de réinjection (passive et active).

Bilan des performances: résolution et **stabilité de biais**

Mise en évidence du problème de la stabilité du biais (simulation et expérimentation)

Développement d'un **système actif** pour améliorer la stabilité de biais

Amélioration de la stabilité d'un **facteur 5** (de **96 °/h** à **20 °/h**)



GYROMETRE ASSERVI

Fpil = Fdet **mais** rapprochement limité par le couplage mécanique

➔ Innovation sur la structure vibrante pour réduire fortement le couplage mécanique (VIG-TOR)

ELECTRONIQUE NUMERIQUE

Performance limitée par le bruit de l'électronique (amplificateurs de charges et démodulateur)

➔ Synthèse de l'ensemble des fonctions de traitement du signal dans un FPGA (Thèse Baptiste Maréchal)

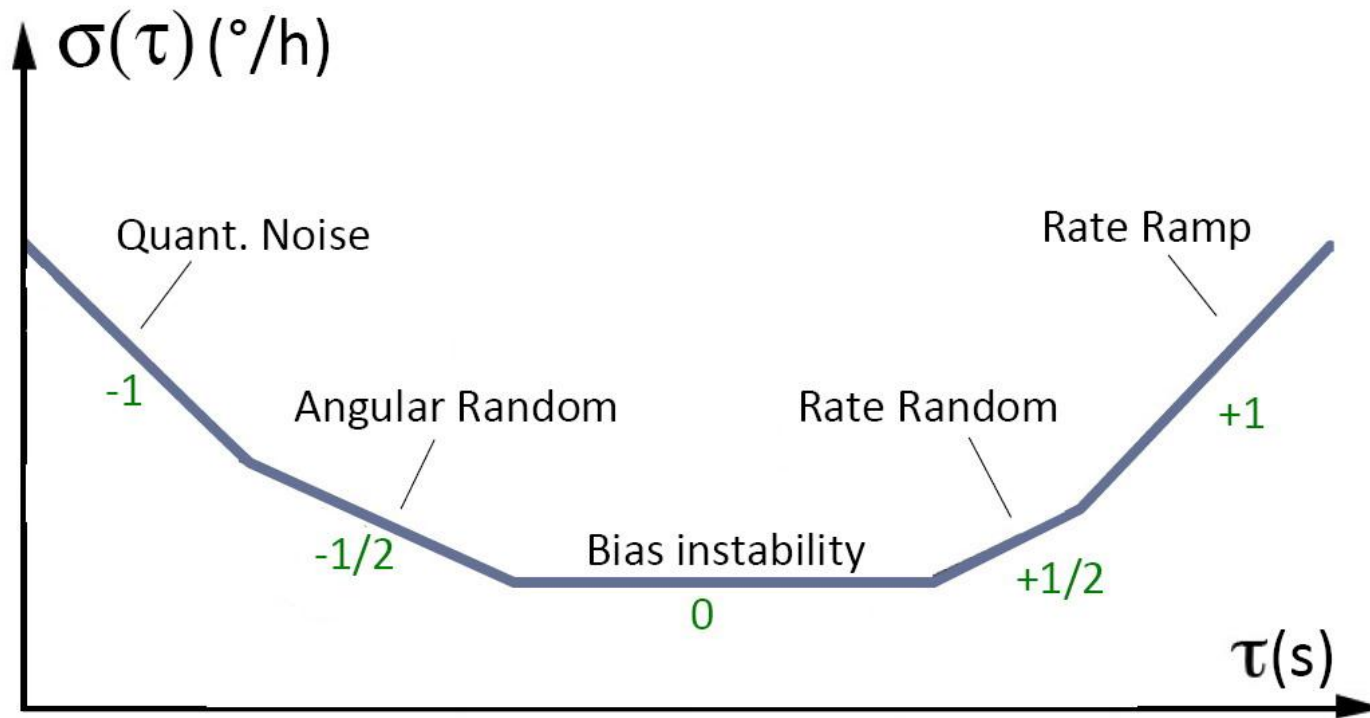
A terme: développement d'un ASIC

NOUVEAUX MATERIAUX

Amélioration de la résolution → Augmentation du gain

➔ Etude des nouveaux matériaux piézoélectriques (dans la continuité de la thèse d'Arnaud Parent)

Merci



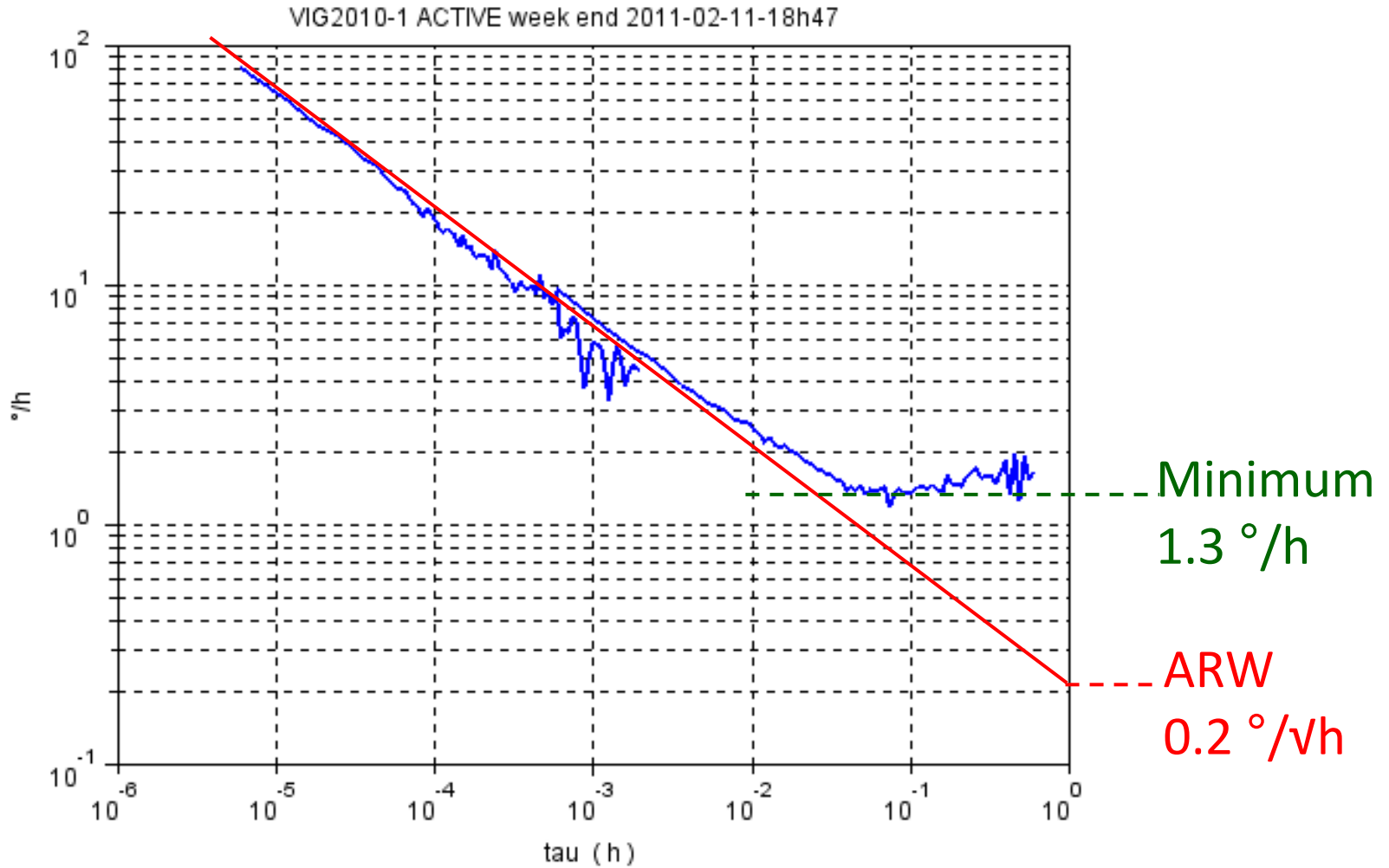
```
// OP amp : AD8066 -----  
AD8066.name      = 'AD8066';  
AD8066.vendor    = 'Analog Devices';  
AD8066.eb        = 0.4e-3; // typical  
AD8066.ebmaxT    = 1.5e-3; // max over T  
AD8066.en.Corner = 2000;  
AD8066.en.Level  = 7e-9;  
AD8066.ib        = 2e-12; // typical  
AD8066.ibmaxT    = 25e-12; // max over T  
AD8066.io        = 1e-12; // typical  
AD8066.iomaxT    = 25e-12; // max over T  
AD8066.in.Corner = 10000;  
AD8066.in.Level  = 0.6e-15;  
AD8066.Cm        = 2.1e-12;  
AD8066.Cp        = 2.1e-12;  
AD8066.Cd        = 4.5e-12;
```

```
//disp(" From displacement to Vps1")
QP1      = vibstruc.nxp1      *      X;
Celp1    = vibstruc.celp1     *      Uexc1;
Ce2p1    = vibstruc.ce2p1     *      Uexc2;
QP1_sp   = vibstruc.Csp1      *      Uexc2;
QP1all   = QP1 + Celp1 + Ce2p1 + QP1_sp;
IP1all   = filters.com.deriv * QP1all;
Vps1all  = filters.pil.Hip1   *      IP1all;
Vps1all  = filters.pil.Hip1_K *      Vps1all ;
Vps1     = enap1_V + inap1_V + inrp1_V + inrsp1_V + inrbp1_V + Vps1all;

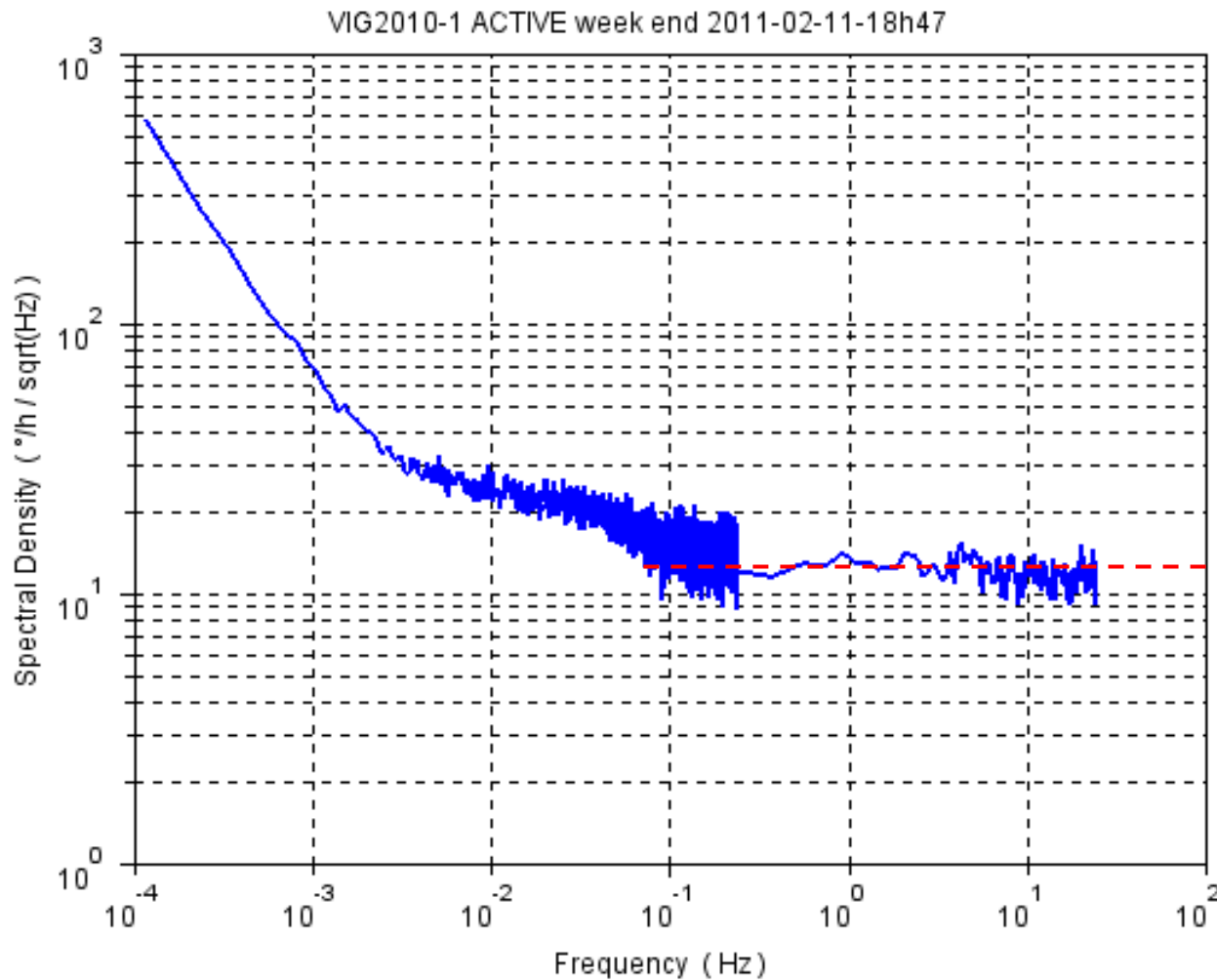
//disp(" From displacement to Vps2")
QP2      = (-vibstruc.nxp2)   *      X;
Celp2    =      vibstruc.celp2 *      Uexc1;
Ce2p2    =      vibstruc.ce2p2 *      Uexc2;
QP2_sp   =      vibstruc.Csp2 *      Uexc1;
QP2all   = QP2 + Celp2 + Ce2p2 + QP2_sp;
IP2all   = filters.com.deriv * QP2all;
Vps2all  = filters.pil.Hip2   *      IP2all;
Vps2all  = filters.pil.Hip2_K *      Vps2all ;
Vps2     = enap2_V + inap2_V + inrp2_V + inrsp2_V + inrbp2_V + Vps2all;
```

VIG 2010 Variance d'Allan

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



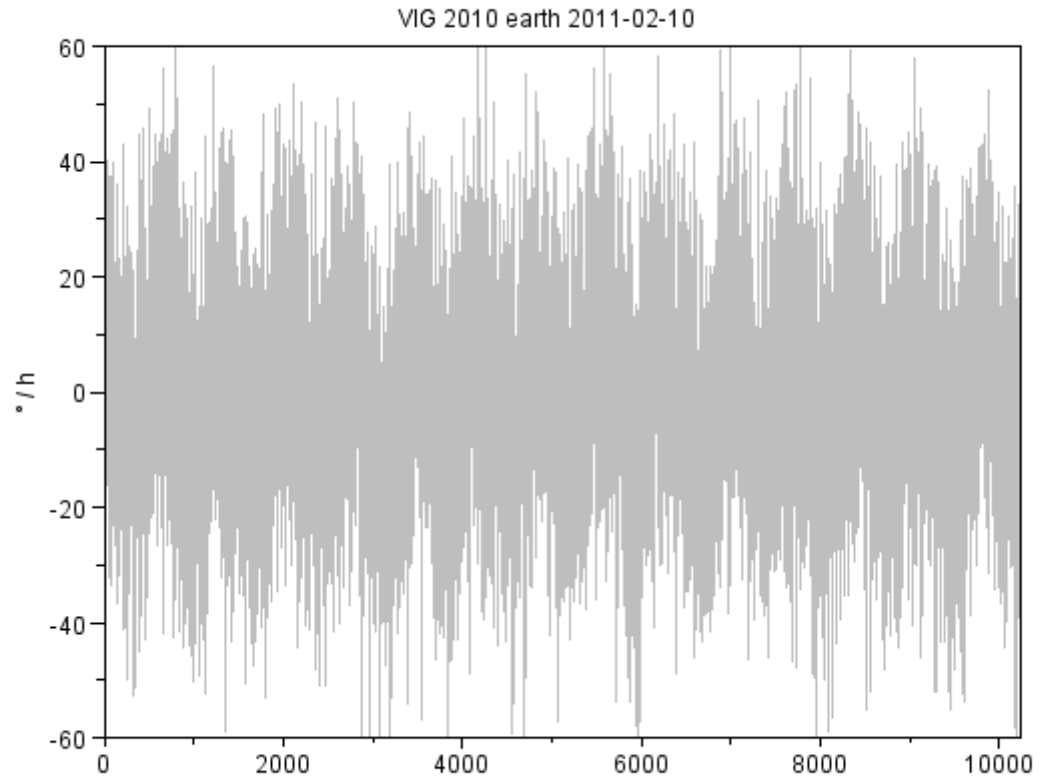
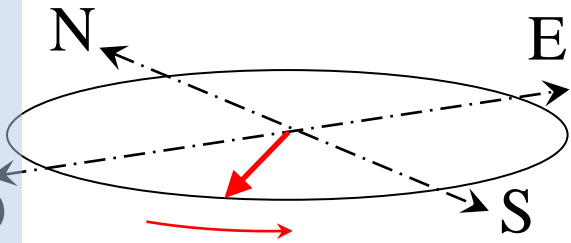
VIG 2010 Densité spectrale de bruit



12 °/h / sqrt(Hz)
≡
0.2 °/sqrt(h)

VIG 2010 Rotation de la Terre

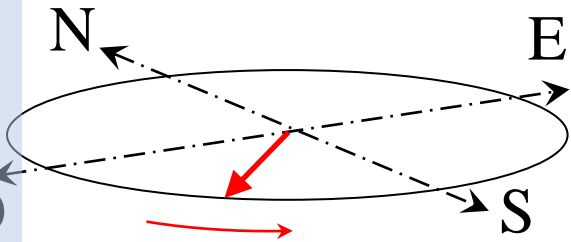
tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



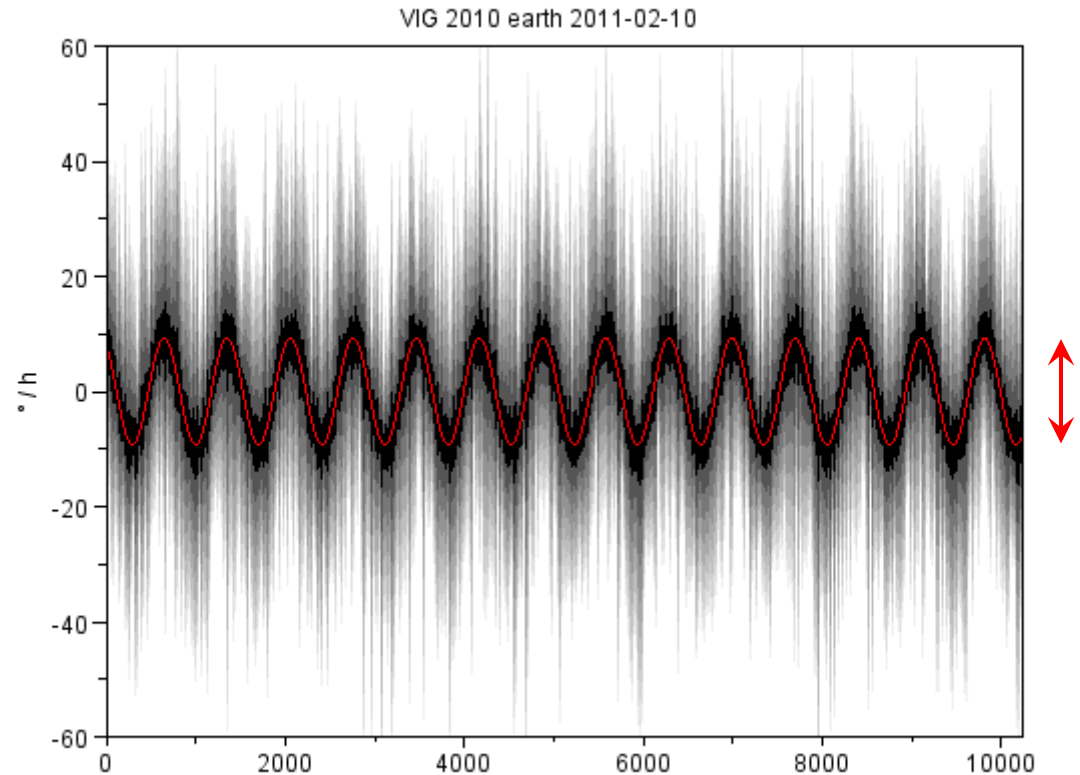
Sortie brute

VIG 2010 Rotation de la Terre

tel-00682582, version 1 - 26 Mar 2012



Mesure : $9.3 \text{ }^\circ/\text{h}$
(attendu : $10.4 \text{ }^\circ/\text{h}$)



Sortie filtrée
Identification de la sinusoïde

