

ANR-09-NANO-037

MILESTONE
Microwave Emission Linewidth
of Spin Transfer Oscillators
and Associated Phase Noise

Ursula Ebels, SPINTEC UMR8191
Marie Claire Cyrille, LETI/DCOS

Journées Nationales Nanosciences et
Nanotechnologies 2012

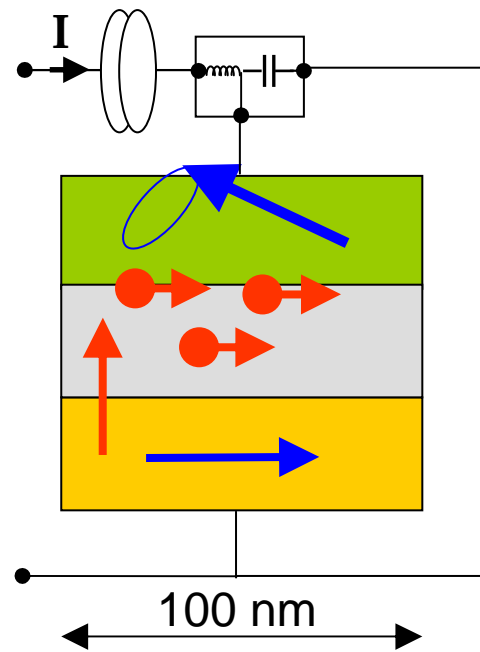
AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR



Oscillateurs à Transfert de Spin

Excitation

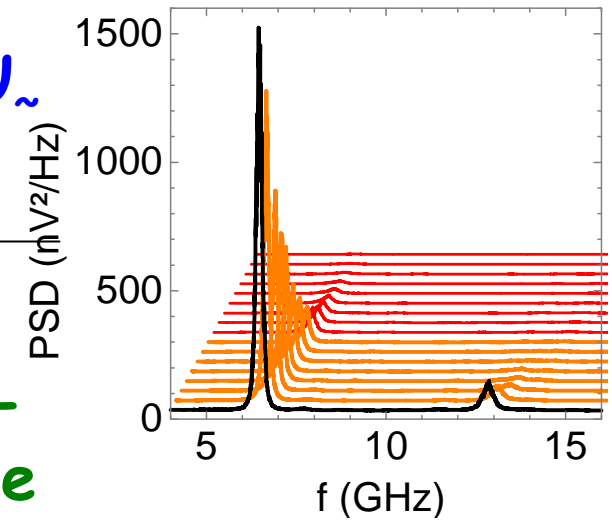
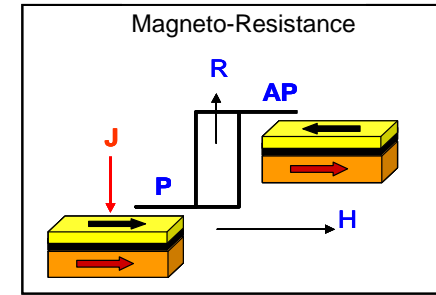
Auto-oscillations of M
↑
Spin momentum transfer



Readout

Output Voltage U_{\sim}

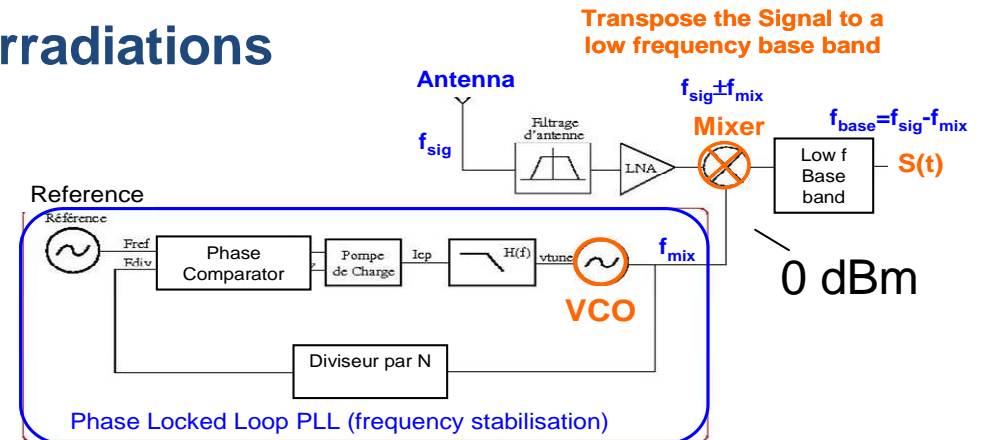
Magneto-Resistance



Intérêt

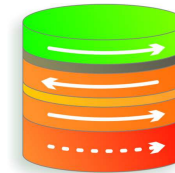
Applications télécommunications e.g. synthèse de fréquence

- Petite taille (100nm)
- Accordabilité en fréquence
- Agilité en fréquences (ns)
- Durcissement contre les irradiations
- Compatible CMOS



Enjeux

- Spectres d'excitations vs configurations
- Puissance de sortie \rightarrow 0dBm
- Fonctions traitement signal
- PLL
- **Bruit de Phase et Largeur de Raie**



\rightarrow ANR MILESTONE 3/2010 – 3/2013

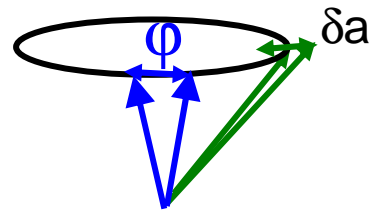
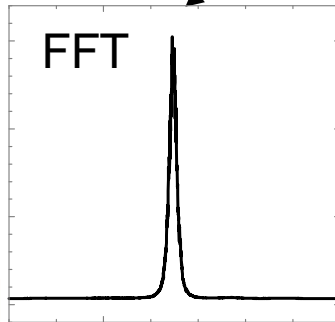
Largeur de raie et bruit de phase

idéal

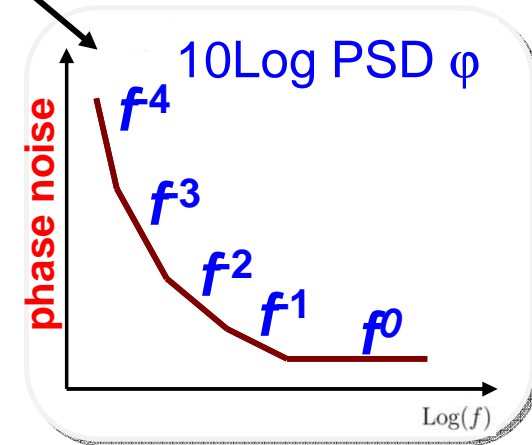
$$V(t) = V_0 \cos [\omega^* t]$$

réel

$$V(t) = V_0 [1 + \delta p(t)] \cos [\omega^* t + \Phi(t)]$$



$\Delta f \leftrightarrow \text{PSD } \phi$



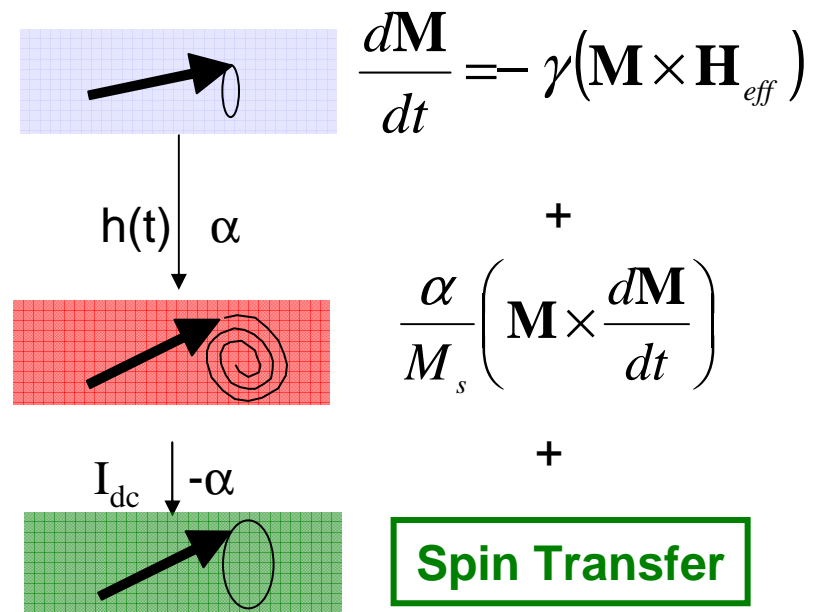
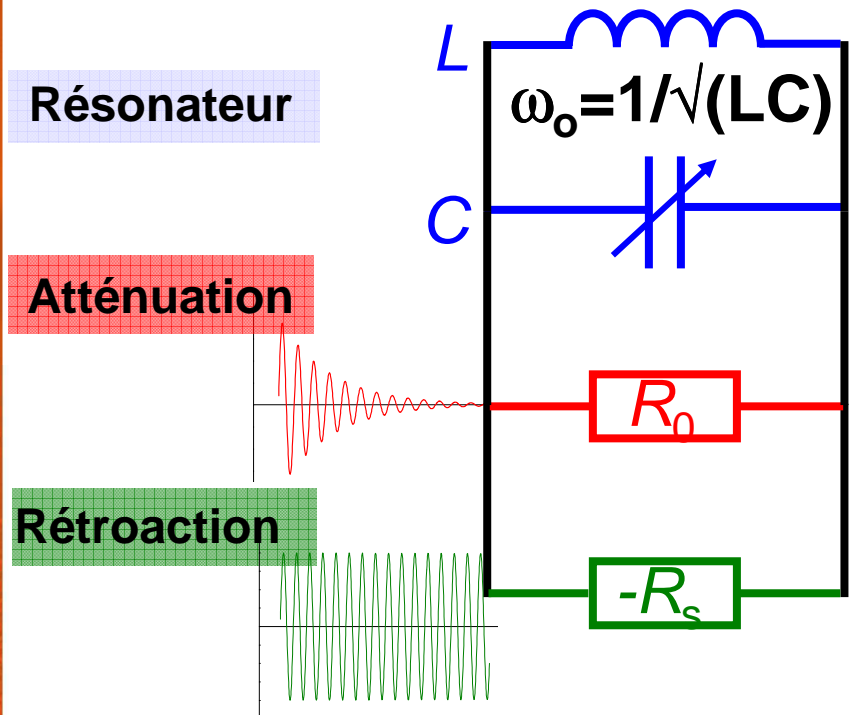
Objectives

- Déterminer signature de bruit, échelle de temps et l'ordre de grandeur
- Comprendre l'origine physique
- Déterminer les paramètres non-linéaires

VCO et Oscillateurs spintroniques

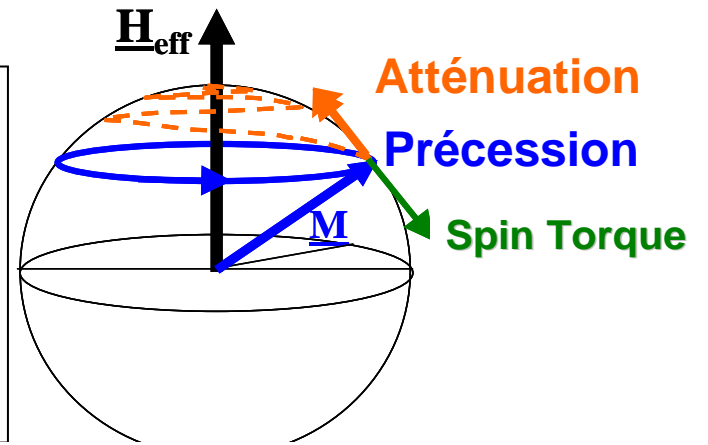
VCO

STNO



$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{i(\omega_o + N/c^2)}_{\text{conservative}} c + \underbrace{\Gamma_o(1 + Q_o/c^2)}_{\text{dissipative}} c - \underbrace{\Gamma_s(1 - Q_s/c^2)}_{\text{dissipative}} c$$

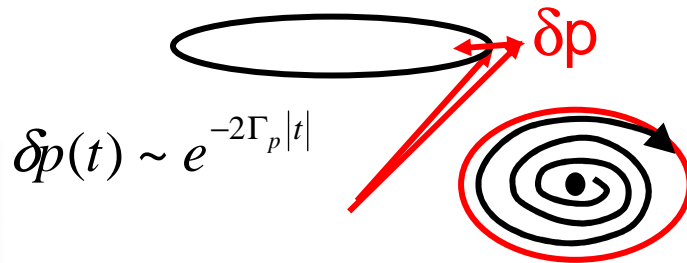
Résonateur **Atténuation** **Rétroaction**
 STNO = oscillateur non-isochrone



Paramètres Non-Linéaires

Amplitude

$$\frac{d\delta p}{dt} + 2\Gamma_p \delta p = h_n^{\delta p}(t)$$



$$\Gamma_p = (\Gamma_s Q_s + \Gamma_o Q_o) p_o$$

- Stabilise l'amplitude
- Relaxation de l'amplitude
- Modulation bandwidth

Phase

$$\frac{d\varphi}{dt} = +h_n^{\varphi}(t) - N\delta p$$



$$v = \frac{N}{\Gamma_p} p_o \quad N = \frac{\partial \omega}{\partial p}$$

Décalage de Fréquence non-linéaire

$$N = d\omega/dp \sim df/dl$$

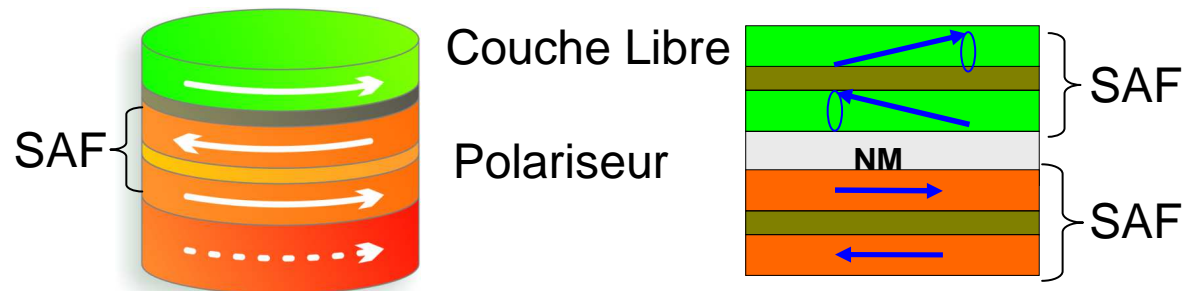
- Accordabilité en f
- Synchronisation
- Largeur de raie

Stratégies

- Développement des techniques fiable pour extraire
 - (i) le bruit de phase et
 - (ii) les paramètres non-linéaires
- Applications aux simulations et mesures expérimentale
- Validation modèle théorique

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \underbrace{-\gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff})}_{\text{Precession}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}}_{\text{Damping}} + \underbrace{\frac{\gamma a_J(\theta)}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{P})}_{\text{Spin torque (ST)}}$$

- Développer un système 'modèle' afin d'explorer les origines physique du bruit



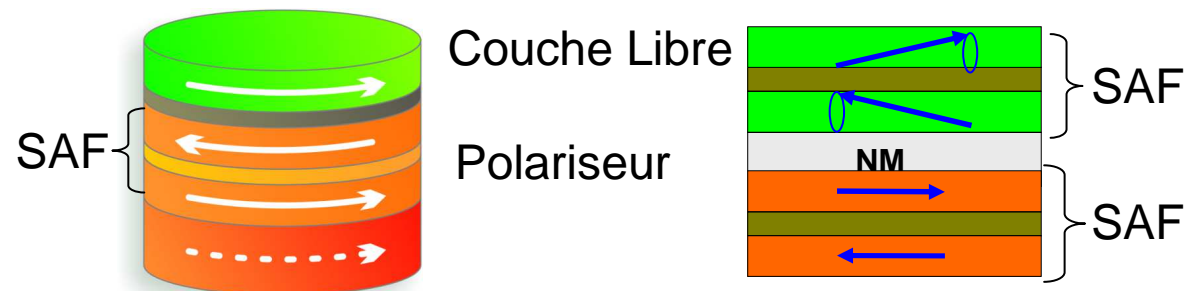
Stratégies

- Développement des techniques fiable pour extraire
 - (i) le bruit de phase et
 - (ii) les paramètres non-linéaires

Deux méthodes indépendantes
- Applications aux simulations et mesures expérimentale
- Validation modèle théorique

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \underbrace{-\gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff})}_{\text{Precession}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}}_{\text{Damping}} + \underbrace{\frac{\gamma a_J(\theta)}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{P})}_{\text{Spin torque (ST)}}$$

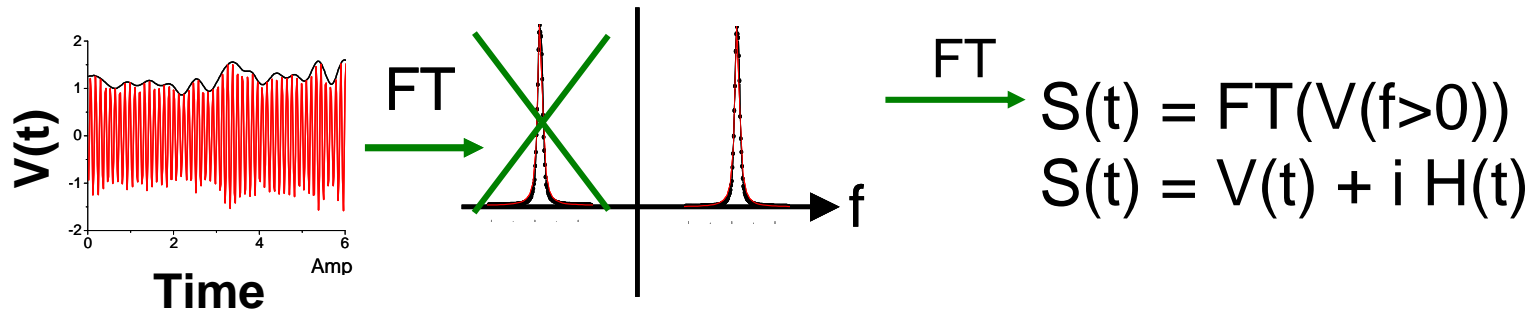
- Développer un système 'modèle' afin d'explorer les origines physique du bruit



Méthodes d'analyse temporelle (sim. & exp.)

$$V(t) = V_0 [1 + \delta a(t)] \cos [\omega \cdot t + \varphi(t)]$$

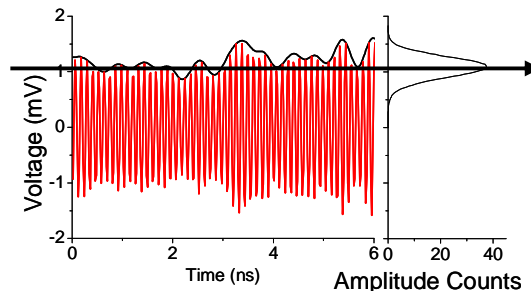
Hilbert Transform



$$S(t) = a(t) e^{i\Phi}$$

Amplitude Noise

Phase Noise



$$a(t) = V_0 [1 + \delta a(t)]$$

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t)$$

$$\delta p \approx 2\delta a$$

Théorie - Simulation

$$\frac{d\delta p}{dt} + 2\Gamma_p \delta p = h_n^{\delta p}(t)$$

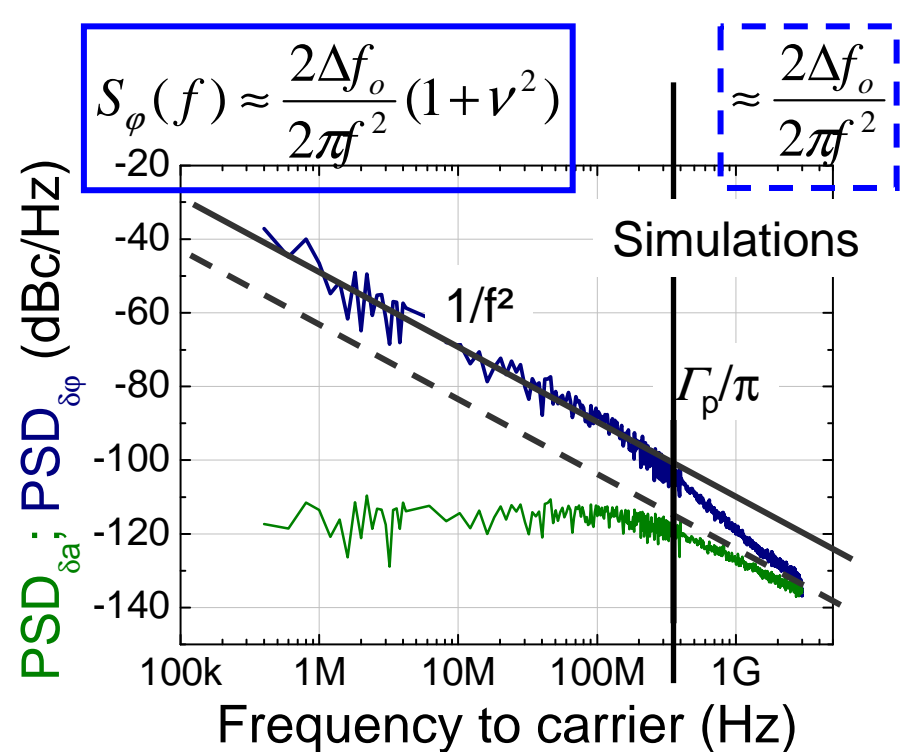
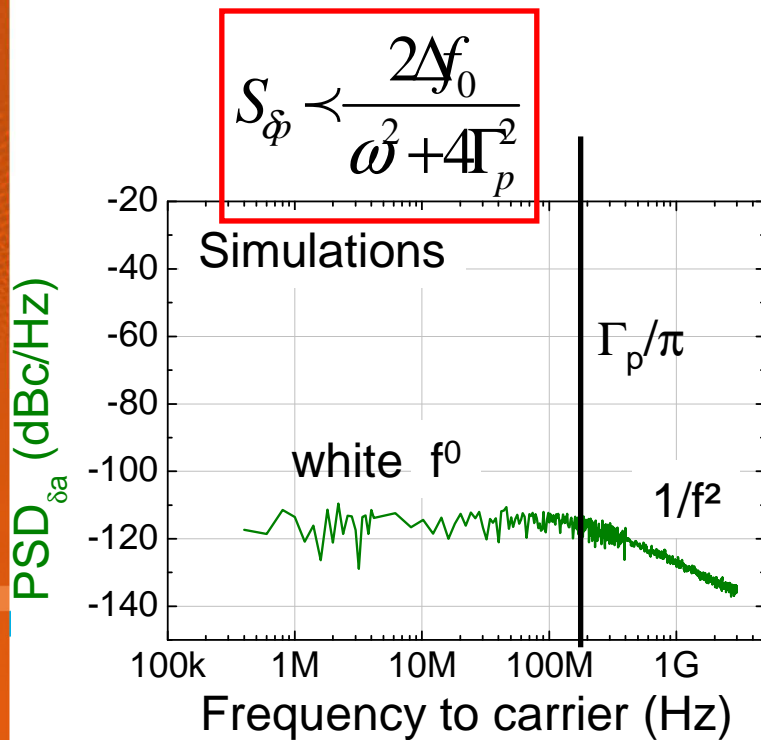
**KTS
Theorie**

$$\frac{d\varphi}{dt} = h_n^\varphi(t) - N\delta p$$

$\delta p(t) \sim e^{-2\Gamma_p|t|}$

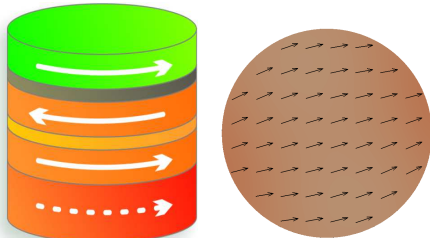
φ

- Phase libre
- Marche aléatoire

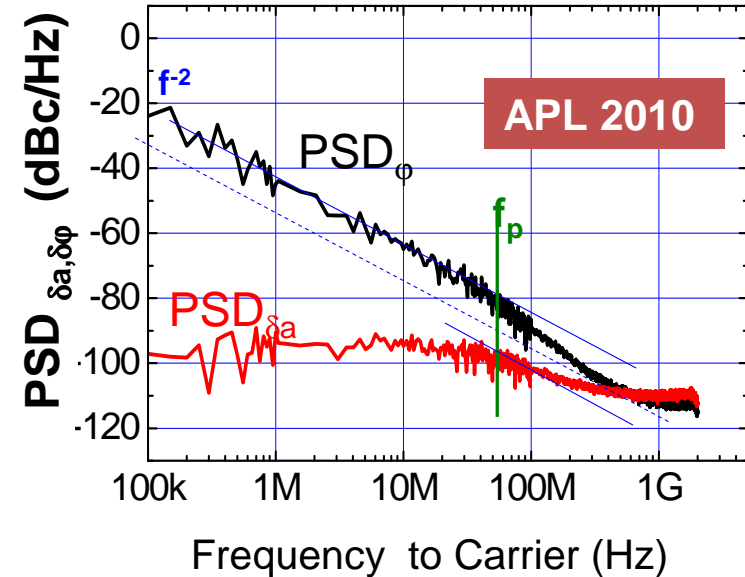


Expériences pour Jonctions tunnel

Hitachi MTJs

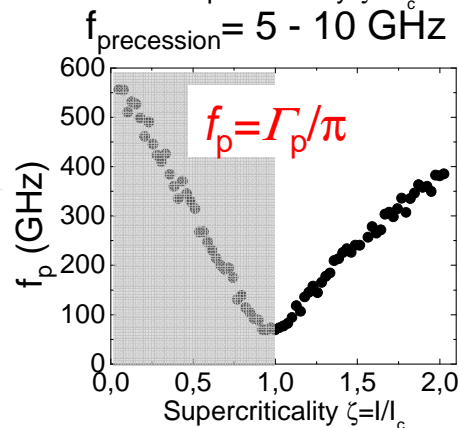
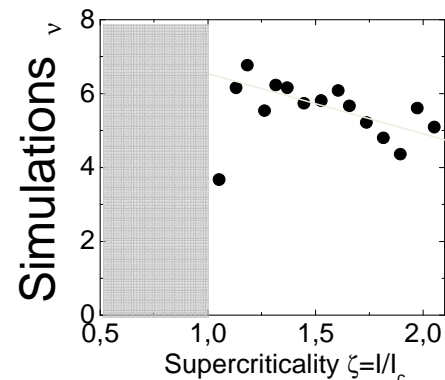
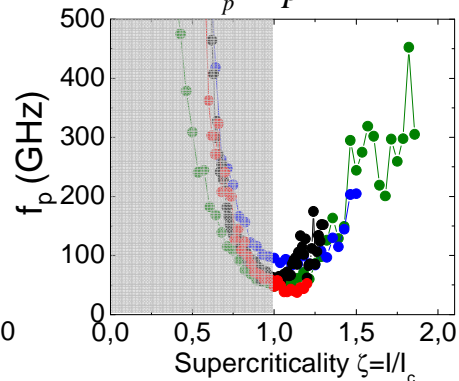
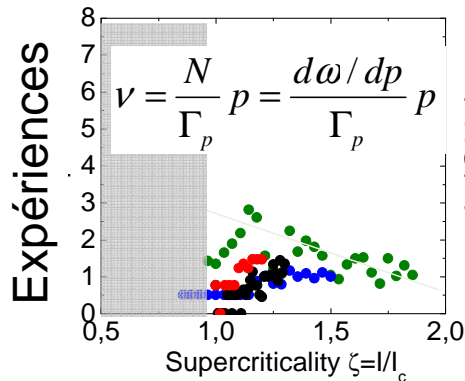


$f_0 = 5 \text{ GHz}$
 $\Delta f = 180 \text{ MHz}$
 $f_p = 40 \text{ MHz}$
 $\Delta = 11 \text{ dB}$
 $\nu = 3.4$



Non-linear coupling ν

Relaxation f_p
 $\Gamma_p \sim p \sim I$

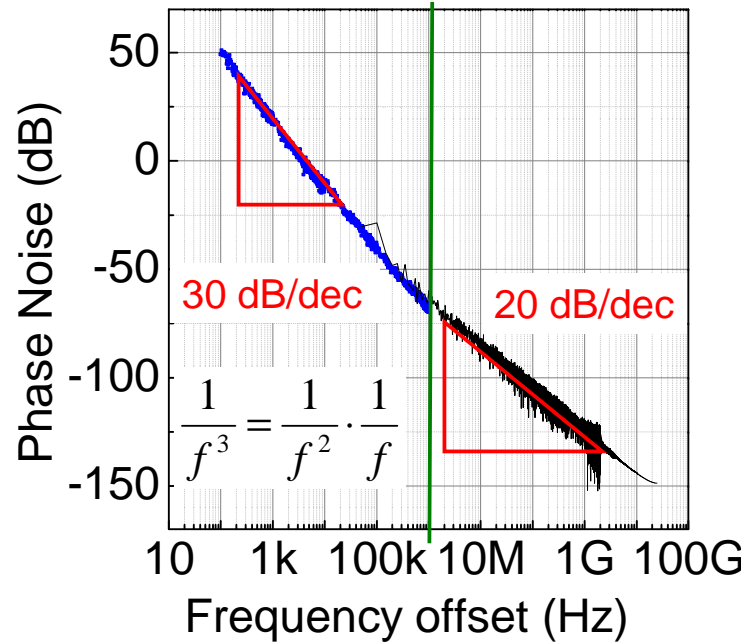


- Phase dominant
- Echelle de temps : $\mu\text{s} - \text{ns}$
- Augmentation par couplage amplitude - phase

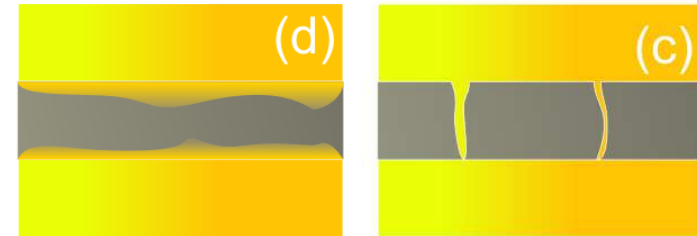
- Validation méthode, pour extraire NL
- Applicable à différents systèmes,
- Limité pour ν pas trop grand

Expériences: contributions 1/f

Collaboration M. Prigent CNRS/XLim)



Non Homogenous barrier



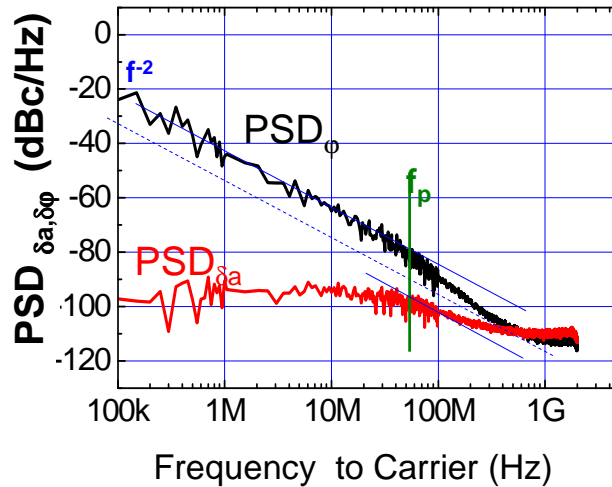
$$S_{\varphi}(f_f) = \frac{1}{4\pi^2 f_f^2} \left[\underbrace{\left| h_n^{\varphi}(f_f) \right|^2}_{\text{Bruit non blanc}} + N^2 p_o^2 S_{\delta\varphi}^{rel} \right]$$

Bruit non blanc

APL 2010

Niveau de bruit

Determiné par la source de bruit



$$\frac{d\phi}{dt} = \underbrace{h_n^\phi(t)}_n - N\delta p$$

$$h_n(t) \leftrightarrow \Delta f_0$$

$$S_\phi(f) \approx \frac{2\Delta f_o}{2\pi f^2} (1 + \nu^2)$$

$$\Delta f_0 \propto k_B T$$

Variance de Phase oscillateur non-isochrone

$$\Delta\phi^2(\tau) = \underbrace{2\pi\Delta f_o}_{\text{green}} \left[(1 + \underbrace{\nu^2}_{\text{red}})|\tau| - \underbrace{\nu^2}_{\text{red}} \frac{1 - e^{-2\Gamma_p|\tau|}}{\underbrace{2\Gamma_p}_{\text{blue}}} \right]$$

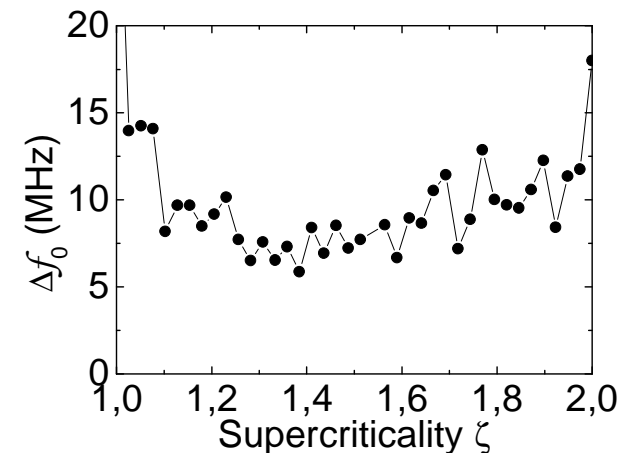
KTS Theory

Evaluation pour $\tau = 1/\Delta f$

$$\Delta\phi^2\left(\frac{1}{\Delta f}\right) \approx 2\pi$$



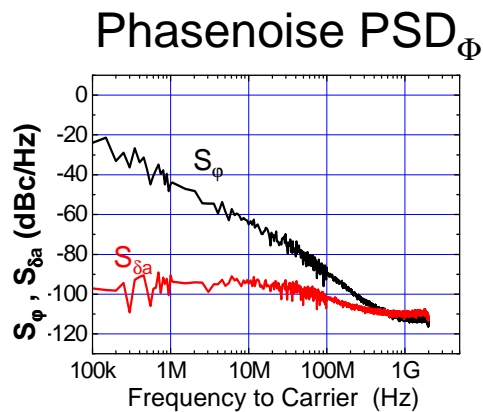
- Extraction de tous les paramètres



Harmoniques supérieures et Paramètres NL

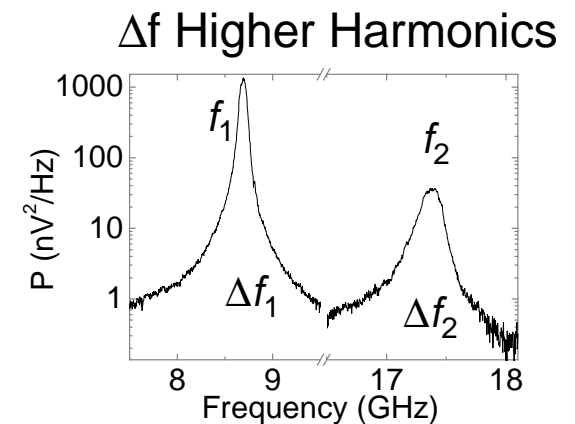
Variance de phase $\Delta\Phi^2$ oscillateur non-isochrone

$$\Delta\phi^2(\tau) = 2\pi\Delta f_0 \left[(1 + v^2)|\tau| - v^2 \frac{1 - e^{-2\Gamma_p|\tau|}}{2\Gamma_p} \right]$$



Analyse temporelle

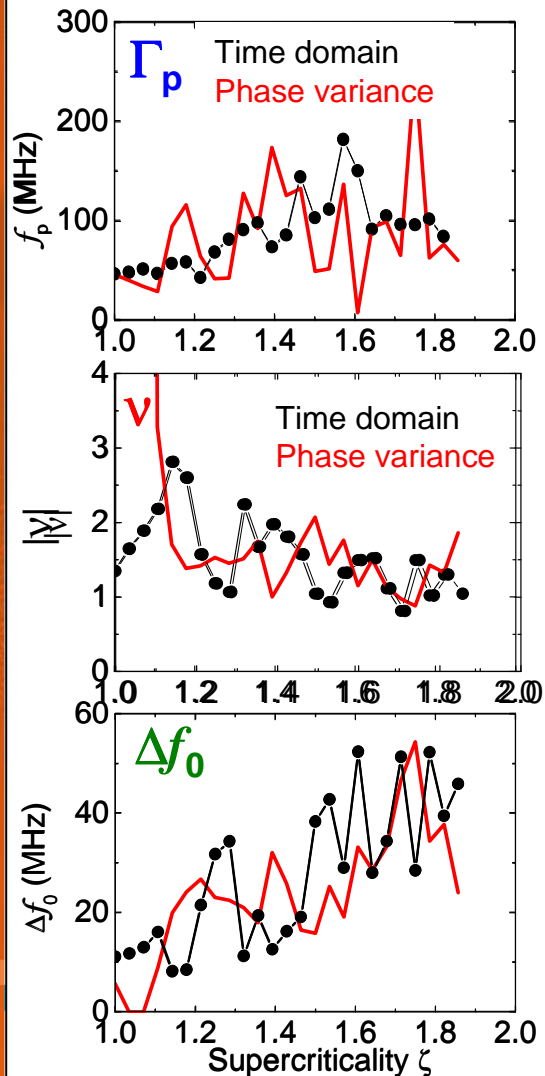
$$\Delta\phi^2(1/\Delta f_n) = \frac{2\pi}{n^2}$$



Analyse en fréquence

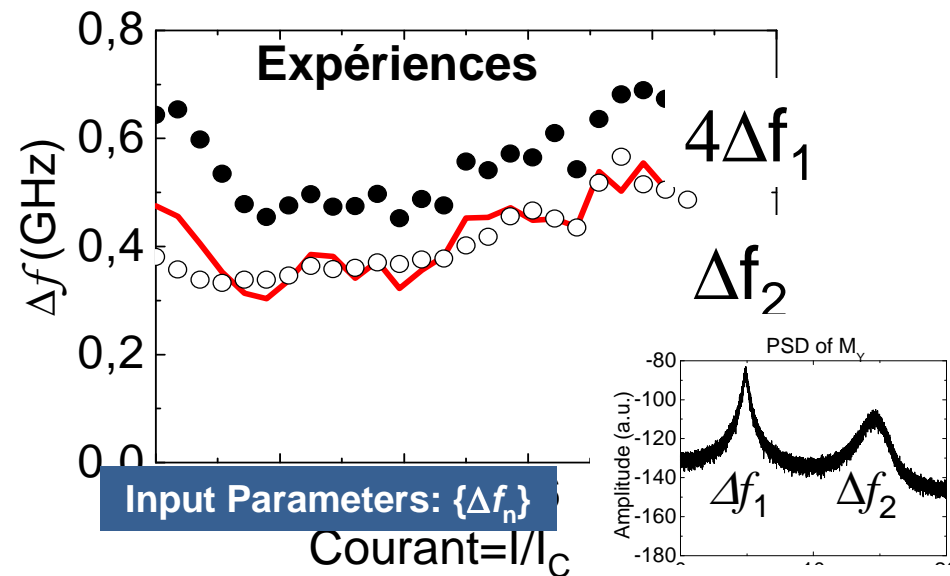
Harmoniques supérieures et Paramètres NL

Input Parameters from Δf_1



$$\Delta \varphi^2(\tau) = 2\pi \Delta f_0 \left[(1 - v^2) |\tau| - v^2 \frac{1 - e^{-2\Gamma_p |\tau|}}{2\Gamma_p} \right]$$

$$\Delta \varphi^2(1 / \Delta f_n) = \frac{2\pi}{n^2}$$

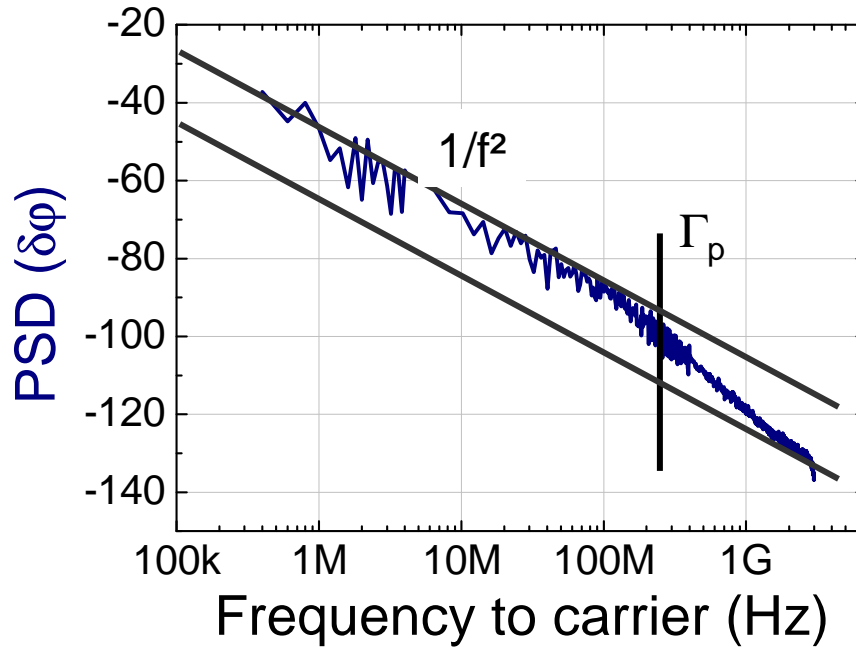


Input Parameters: $\{\Delta f_n\}$

PRB 2012

Validation de deux méthodes indépendantes pour extraire tous les paramètres

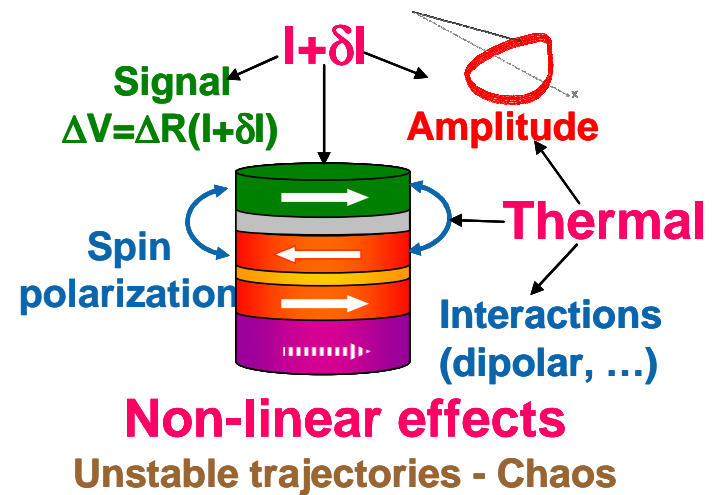
Origine Bruit de Phase



$$\Delta f_o = \Gamma_{Gilbert} \frac{k_B T}{\epsilon} \sim \Gamma_{Gilbert} \frac{k_B T}{V}$$

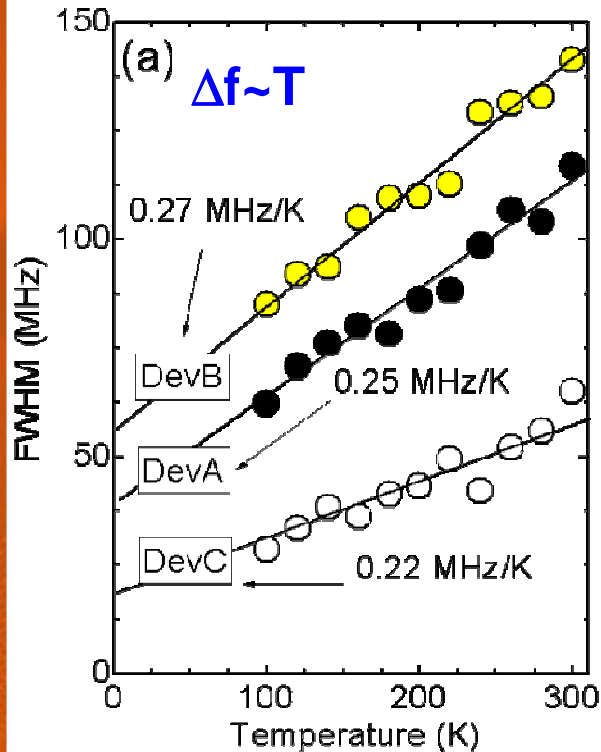
Objectives

- Déterminer signature de bruit, échelle de temps et l'ordre de grandeur
- Déterminer les paramètres non-linéaires
- **Comprendre l'origine Physique**



Largeur de Raie vs Température

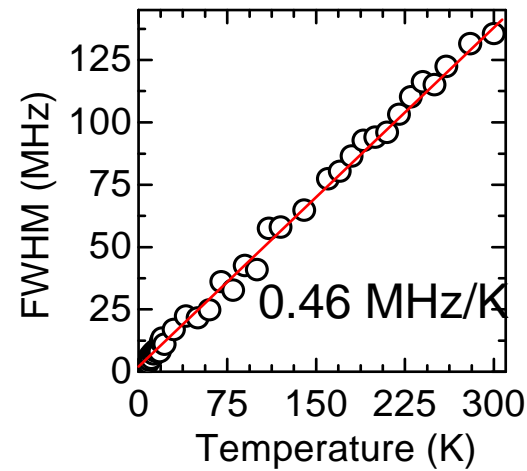
Experiment



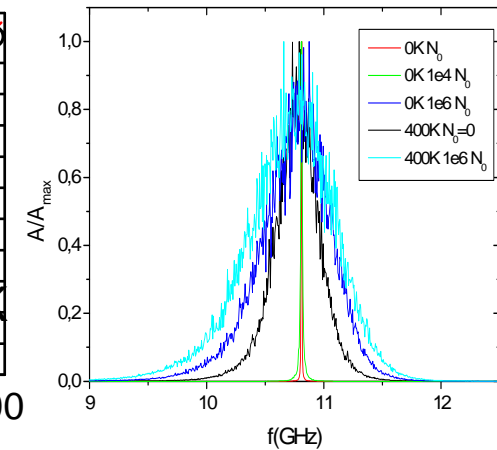
APL 2012

Macrospin simulations

Bruit thermique



Bruit courant



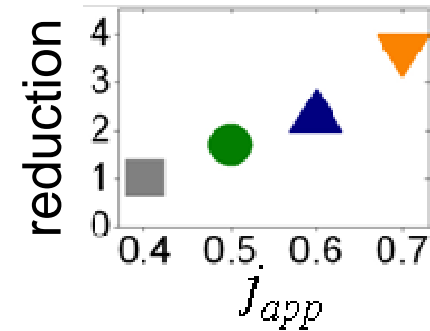
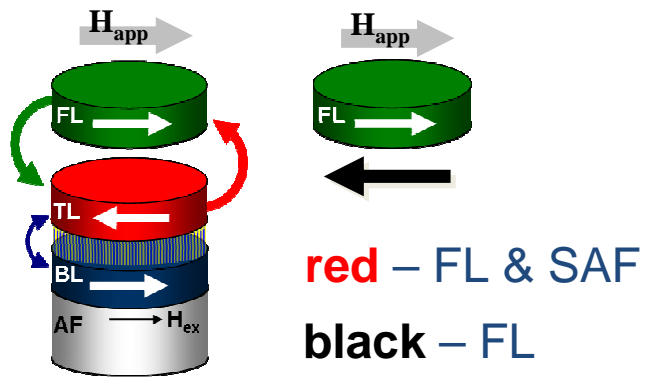
Qualcomm

$N_0 = 2 \cdot 10^{-23} \text{ A}^2/\text{Hz}$

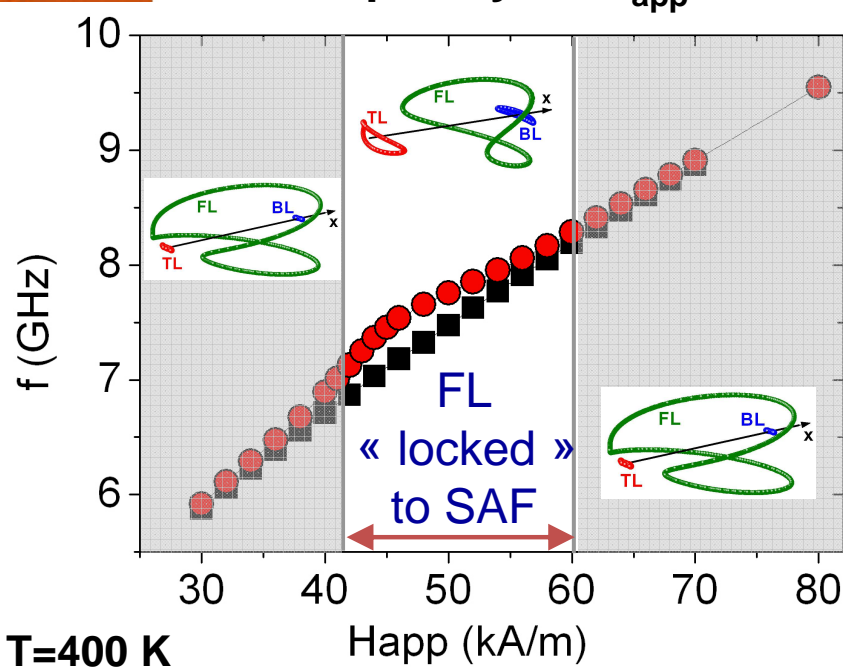
- Bruit thermique important et large
- Offset et saturation
- Autres contributions au bruits?

$$\Delta f_o = \Gamma_{\text{Gilbert}} \frac{k_B T}{\varepsilon} \sim \Gamma_{\text{Gilbert}} \frac{k_B T}{V}$$

Simulation: Réduction de la largeur par couplage

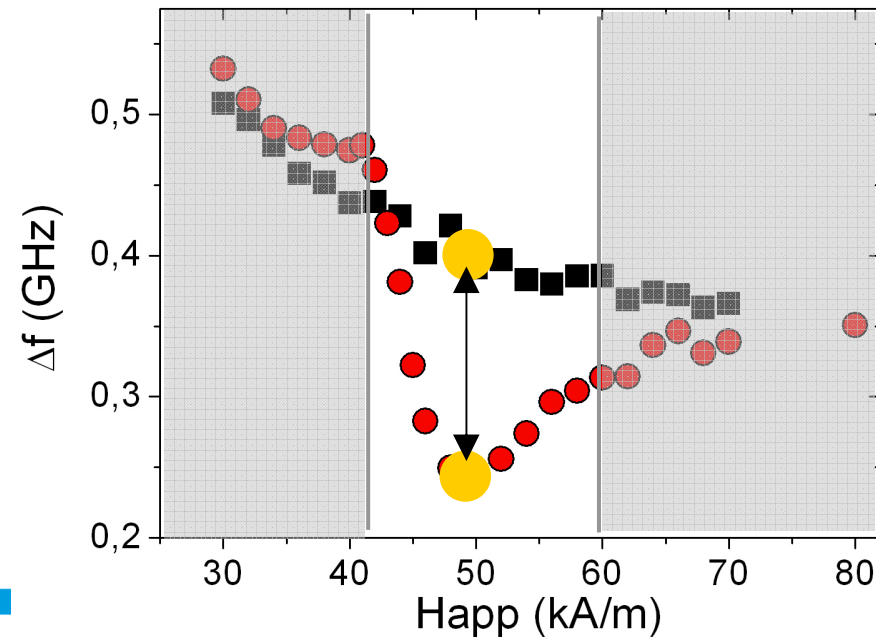


Frequency vs H_{app}



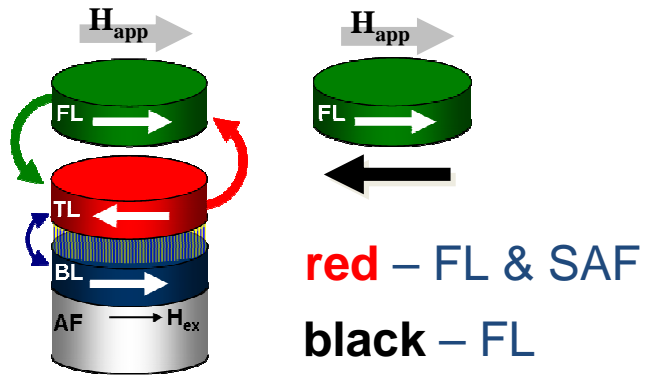
T=400 K

Linewidth vs H_{app}



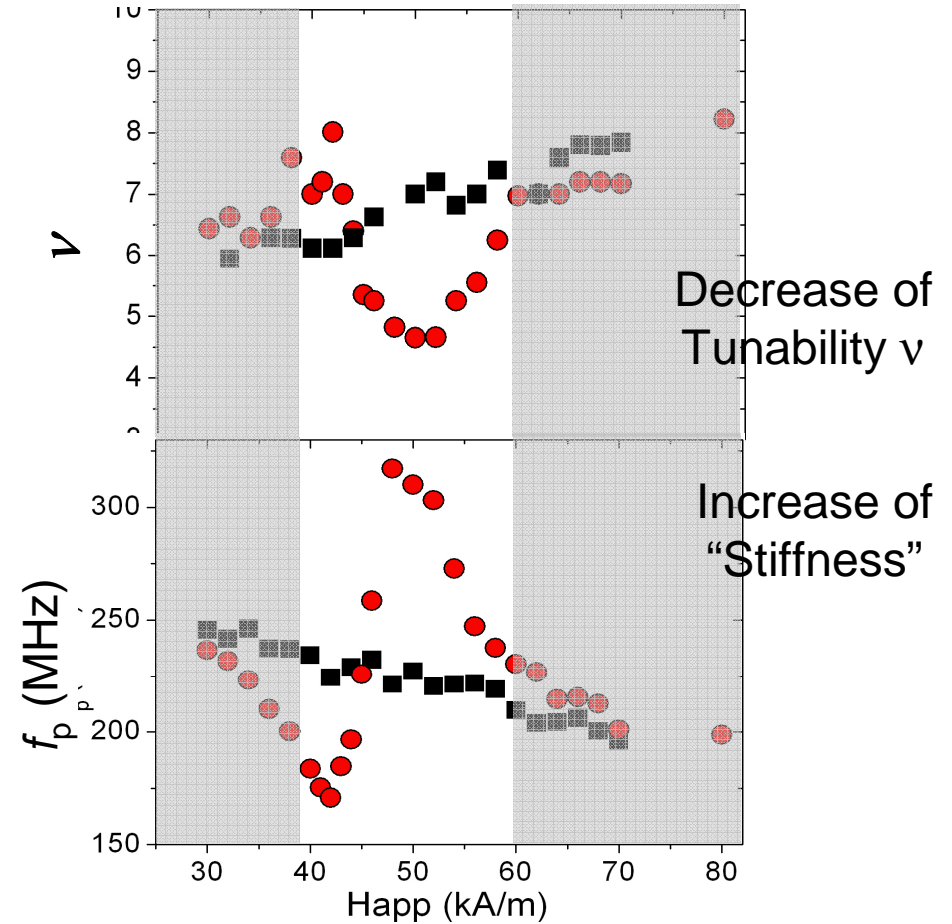
$J_{app} = 50 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$

Simulation: Réduction de la largeur par couplage



$$FWHM = 2\Delta f_o (1 + \nu^2)$$

$$\nu \sim \frac{df/dI}{\Gamma_p}$$



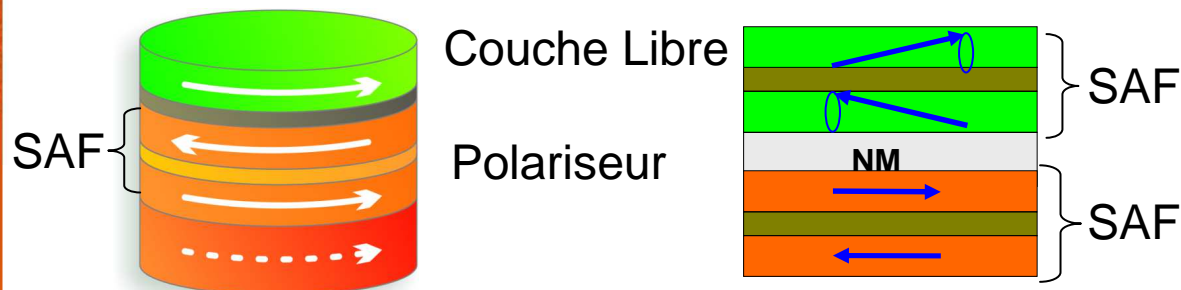
- Réduction de Δf via réduction de ν
- Réduction de ν via réduction de df/dI et/ou augmentation de Γ_p

Stratégies

- Développement des techniques fiable pour extraire
 - (i) le bruit de phase et
 - (ii) les paramètres non-linéaires
- Applications aux simulations et mesures expérimentale
- Validation modèle théorique

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \underbrace{-\gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff})}_{\text{Precession}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}}_{\text{Damping}} + \underbrace{\frac{\gamma a_J(\theta)}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{P})}_{\text{Spin torque (ST)}}$$

- Développer un système 'modèle' afin d'explorer les origines physique du bruit

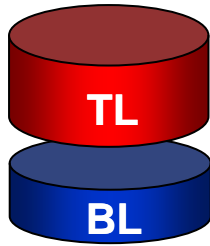


- Établir les modes d'un SAF en fonction du couplage exp & sim
- Déterminer les paramètres non-linéaire exp & sim
- Déterminer la largeur raie et bruit de phase exp & sim

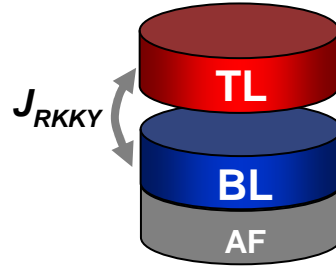
SAF Free layer

Simulation

Système Asymétrique

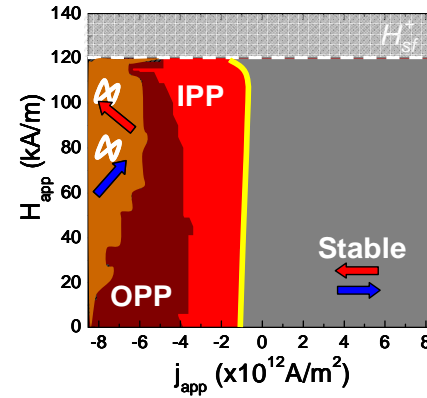
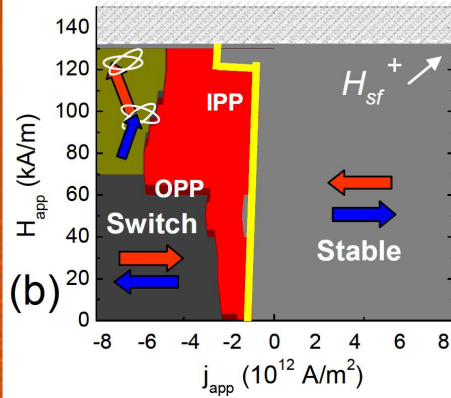


$$M_{s,TL}d_{TL} \neq M_{s,BL}d_{BL}$$

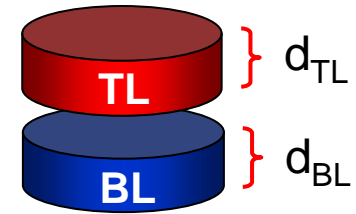


$$M_{s,TL}d_{TL} = M_{s,BL}d_{BL}$$

$H_{ex}=40\text{kA/m}$

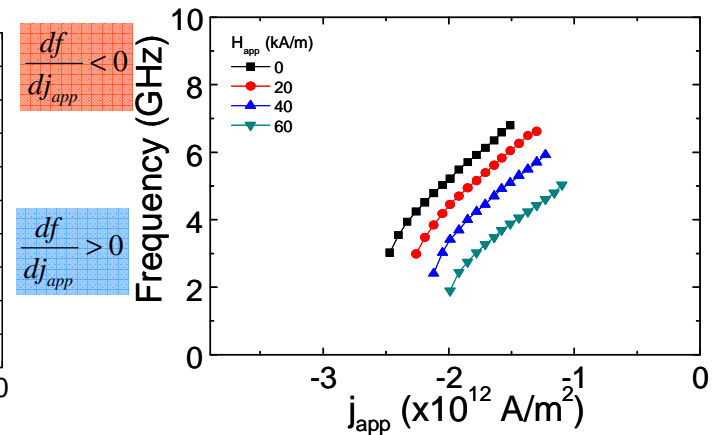
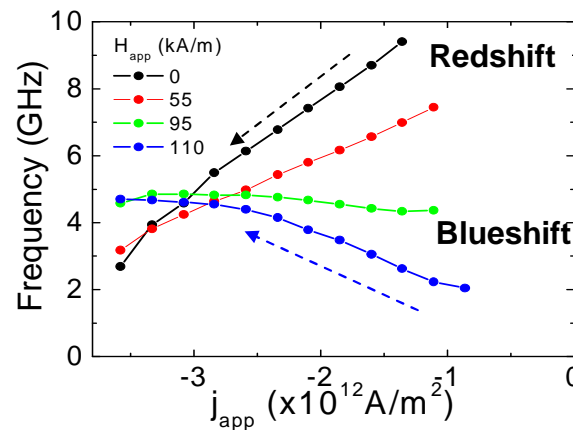
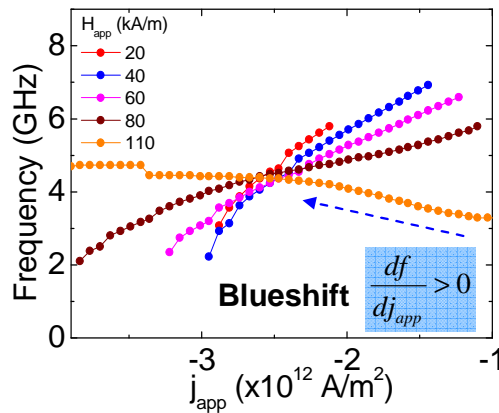
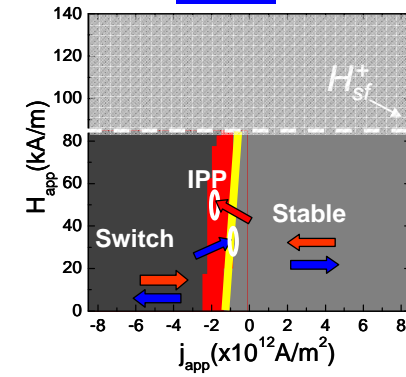


Système Symétrique



$$M_{s,TL}d_{TL} = M_{s,BL}d_{BL}$$

$H_{ex}=0$



Impacte

Publications	Revue à comité de lecture	5 + 3-4 en cours
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	1 prévus
	Articles vulgarisation	2 (Feuille Rouge CEA, 1 OMNT)
Présentations	Communications (conférence) International	9 invitées, 11 orales, 15 posters
	Communications (conférence) France	1 orale, 5 poster
	Ecole d'été Séminaires	2 (ESM, Magnonics) 9 (dont Hitachi, Qualcomm, TUD)

- Prix de Thèse APS GMAG + Invitation APS 2013 Baltimore
- Brevets 2 brevets acceptés, 2 brevets déposés
- Projet ANR Spinnova
- Projet Européen, accepté
- Collaboration XLIM, TUD
- Collaboration Seagate
- Prof Invité UJF 6 mois: Prof Slavin