

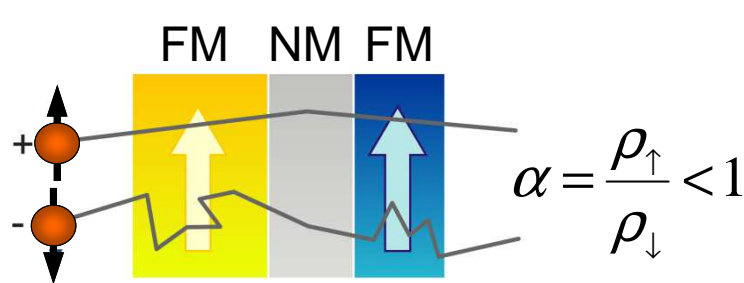
De la dynamique  
induite par courant polarisé  
vers des applications microondes

Ursula Ebels, SPINTEC UMR 8191

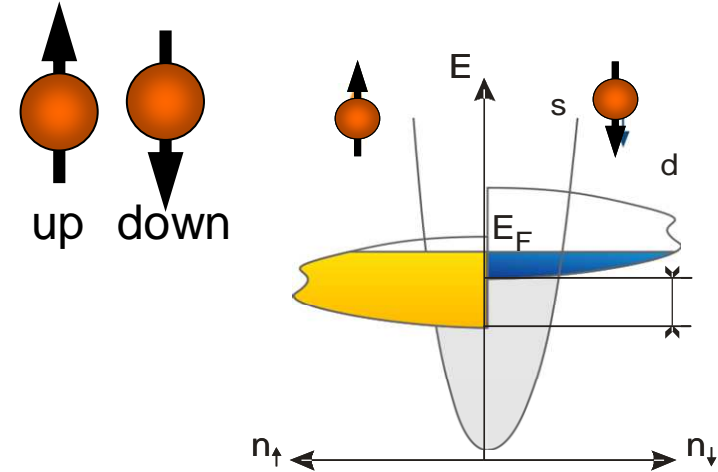
Journées Nationales Nanosciences et  
Nanotechnologies 2012

# Transport Polarisé en Spin

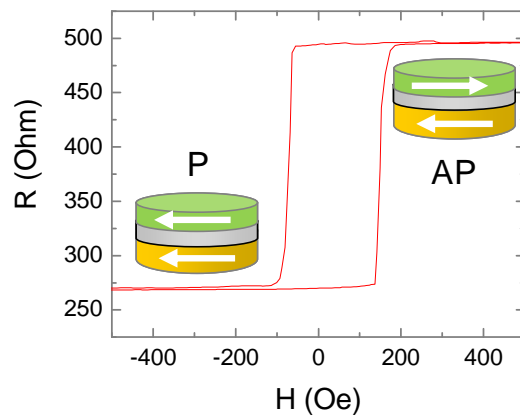
- Heterostructures magnétiques
- Diffusion dépendant du spin



Modèle à deux courants

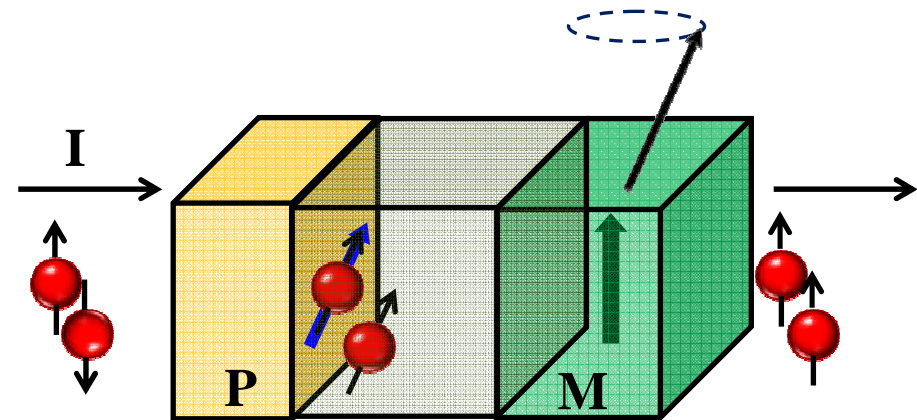


- Magnéto-Resistance MR



→ Contrôle d'un signal de sortie  
Capteur de champ, MRAM

- Transfert de Spin

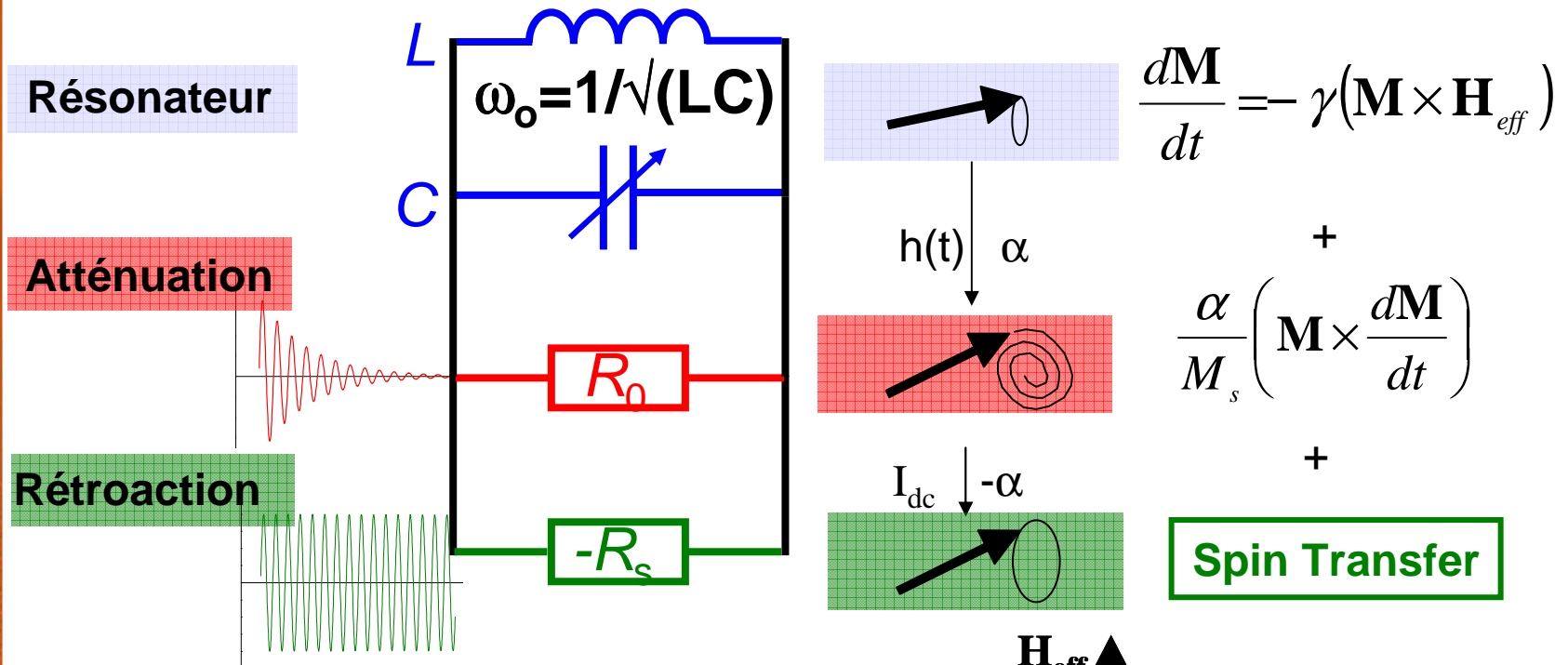


→ Contrôle de l'aimantation par un courant  
Mode d'écriture MRAM, **Oscillateurs RF**

# VCO et Oscillateurs spintroniques

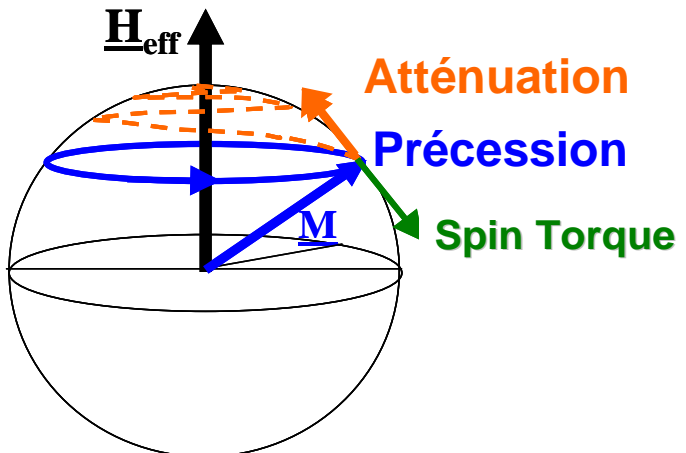
VCO

STNO



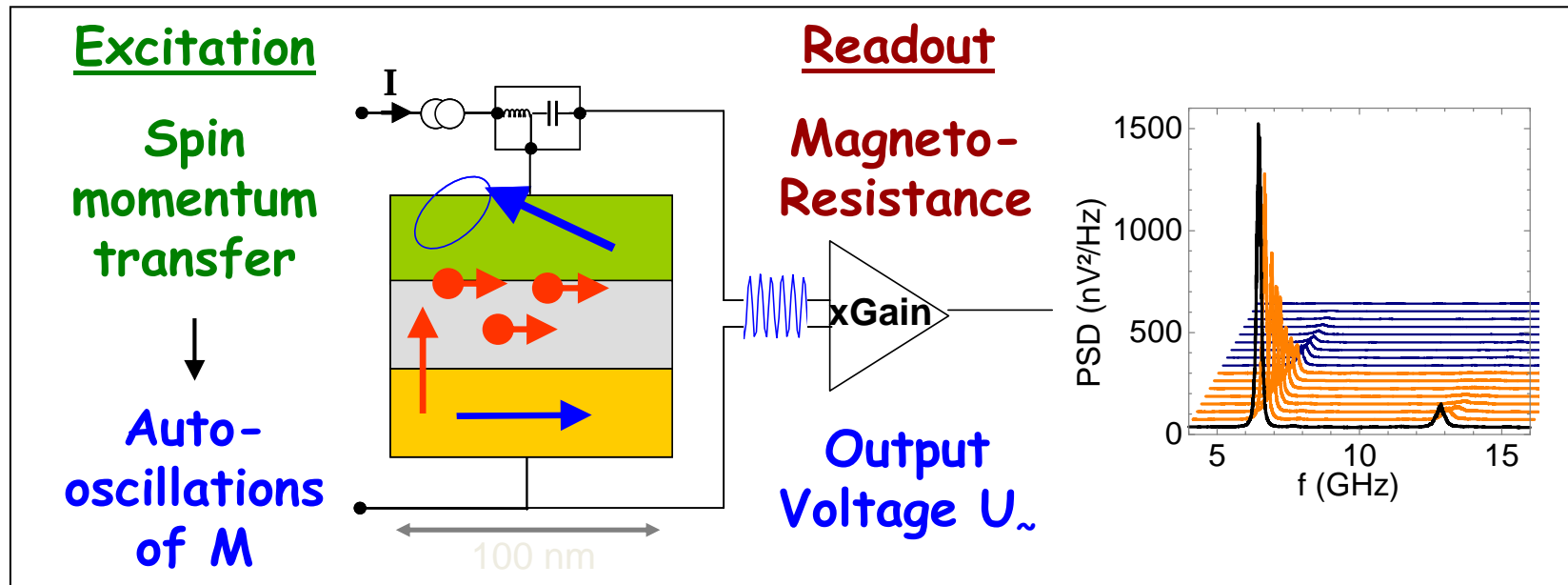
**STNO**

$H_{eff}(M) \rightarrow$  Fréquence dépend de l'amplitude  
 $\rightarrow$  accordabilité par courant  
 $\rightarrow$  oscillateur non-isochrone



Modèles théoriques: J.V. Kim CNRS/IEF + Slavin, Oakland US

# Oscillateur à Transfert de SPIN

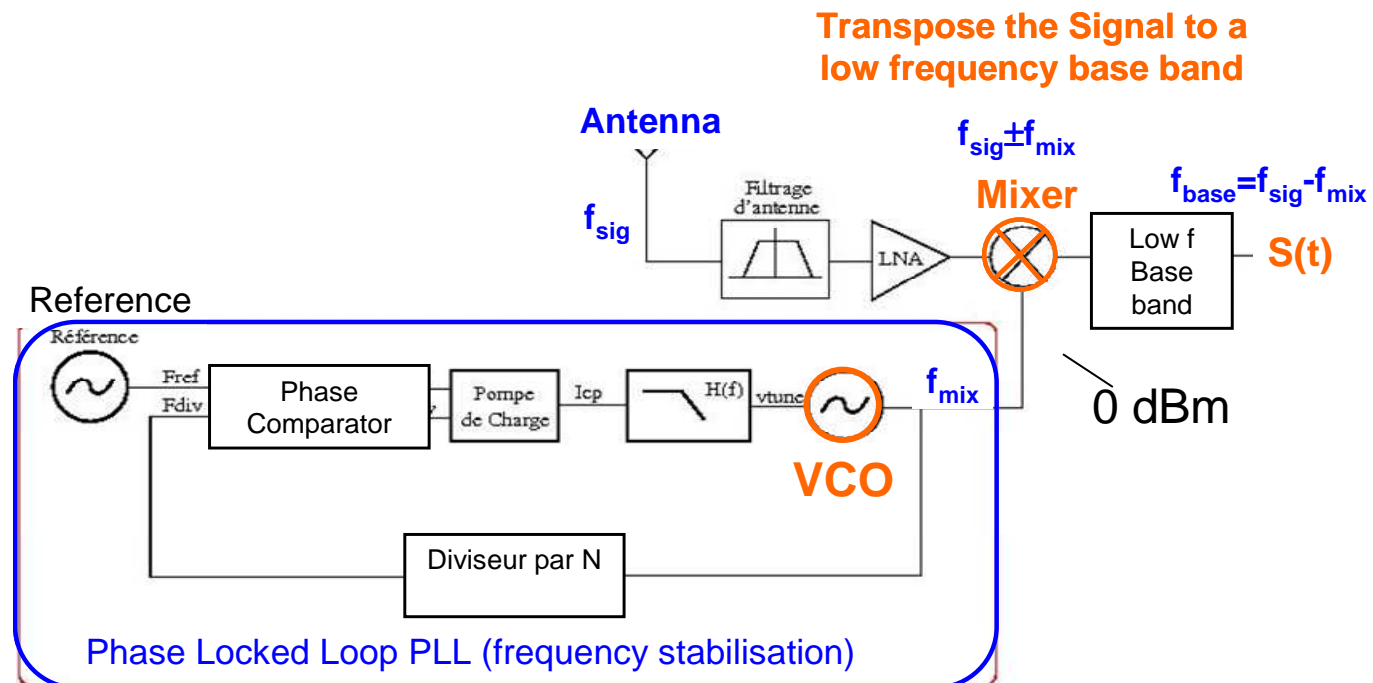


**Applications telecommunications  
(e.g. Synthèse de fréquence)**

- Taille (100nm)
- Accordabilité en fréquences (~GHz)
- Agilité : temps de commutation  $f_1$  à  $f_2$  ns
- Durcissement contre les irradiations
- Compatibilité CMOS

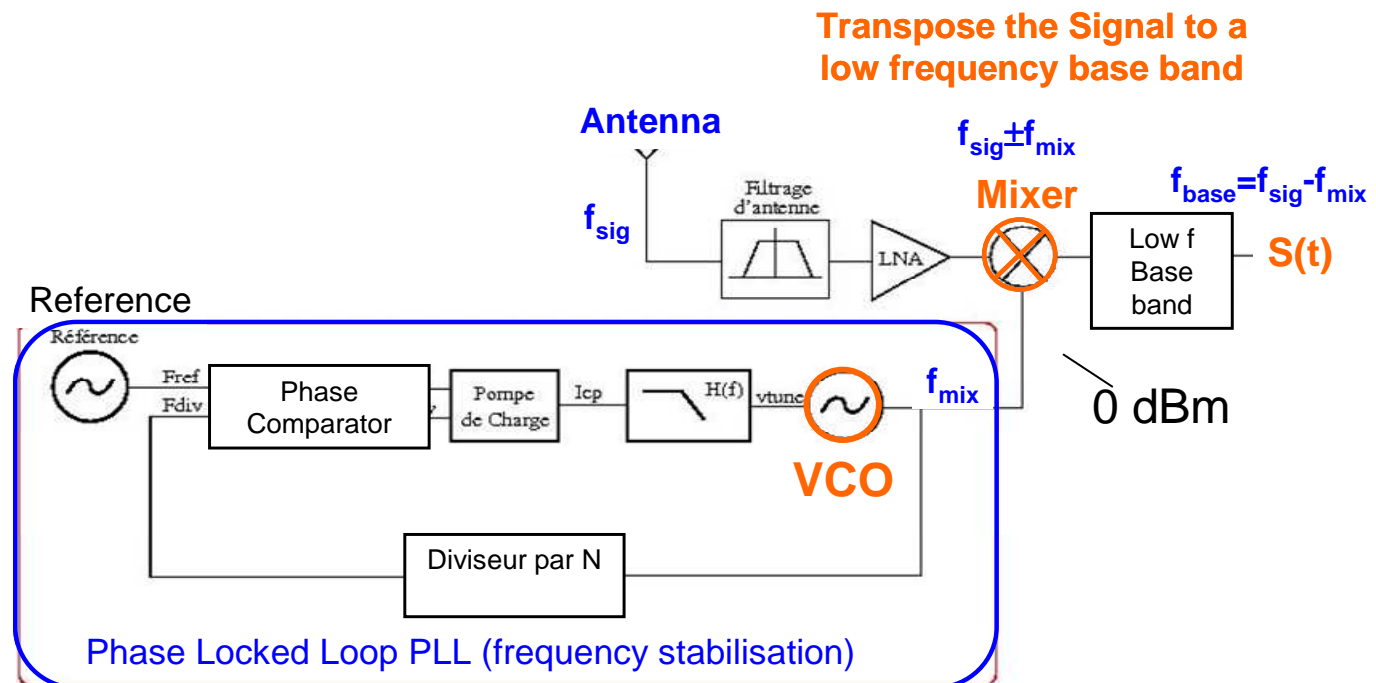
# Enjeux

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



# Enjeux

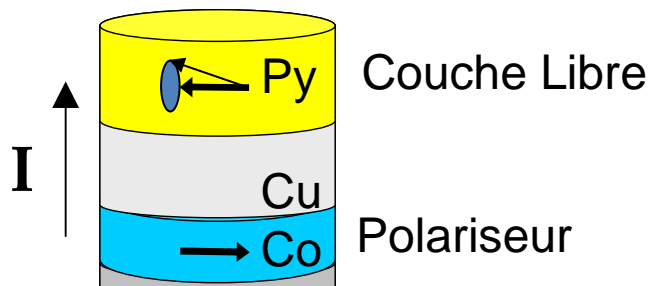
- Spectres d'excitations vs configurations
- Puissance de sortie  $\rightarrow$  0dBm
- Bruit de Phase et Largeur de Raie
- PLL
- Fonctions traitement signal



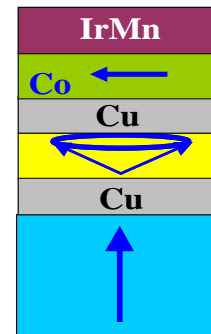
# Spectres d'Excitations vs. Configurations

- Fréquence interne déterminé par champ interne (anisotropie, dipolaire,....)
- Gamme de fréquence (MHz, GHz, 10s GHz), accordabilité  $df/dI$ ,  $df/dH$

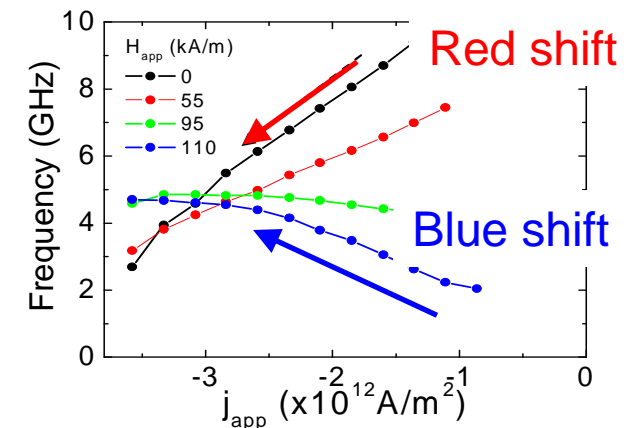
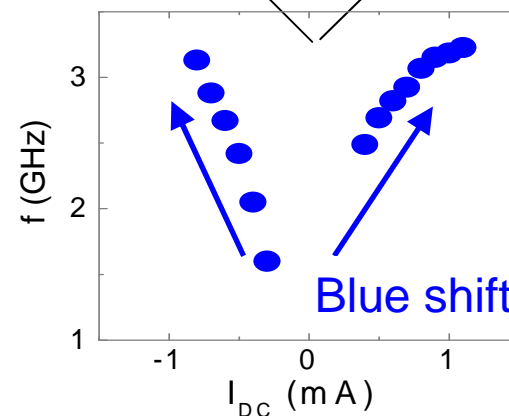
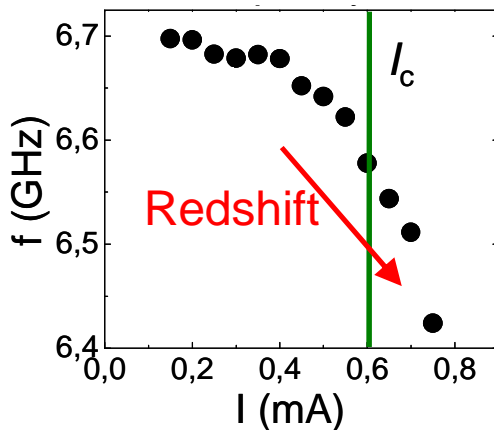
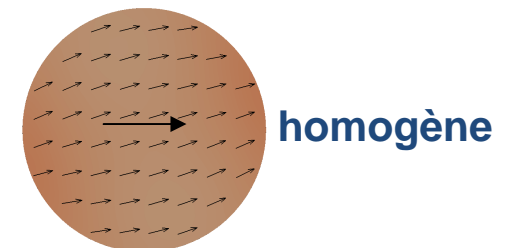
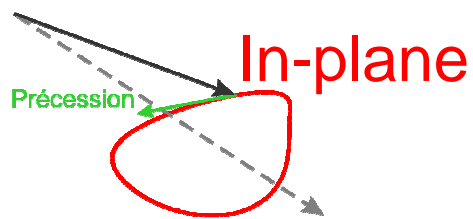
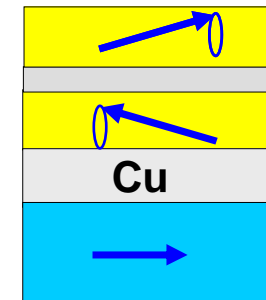
## Vanne de spin



## Polariseur Perpendicular

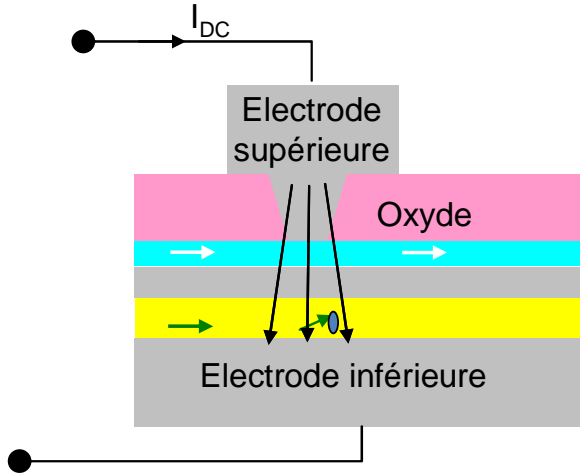


## SAF Couche Oscillante



# Spectres d'Excitations vs. Configurations

- Fréquence interne déterminé par champ interne (anisotropie, dipolaire,.....)
- Gamme de fréquence (MHz, GHz, 10s GHz), accordabilité  $df/dI$ ,  $df/dH$

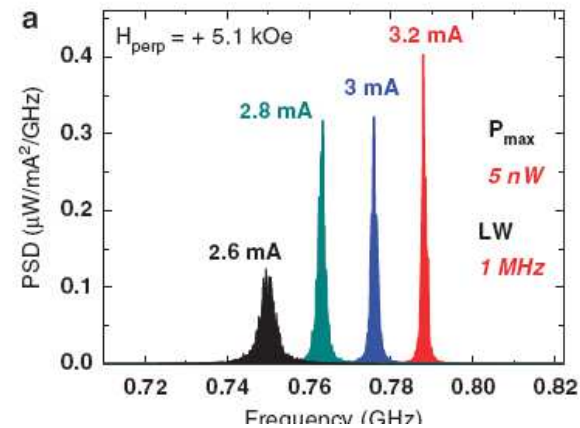
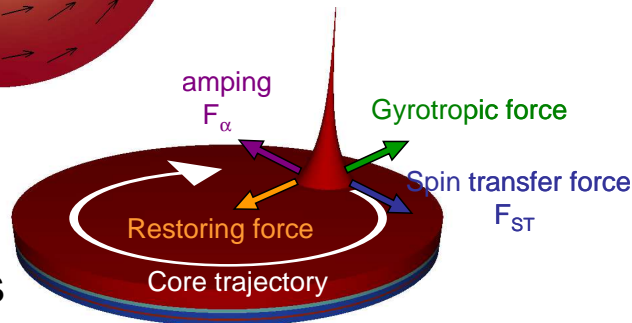
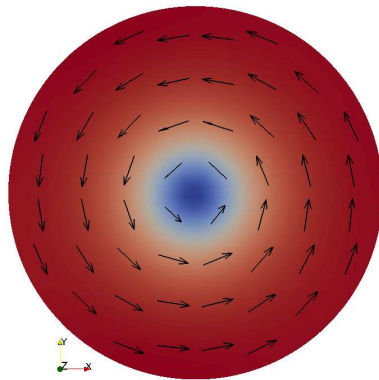


- Couche magnétique continue
- Excitation localisé ou propageant

Nano contact

Vortex

0.1...  
2 GHz



Système Modèle  
Faible fréquence ANR Voice

CNRS/Thales  
CNRS/IEF

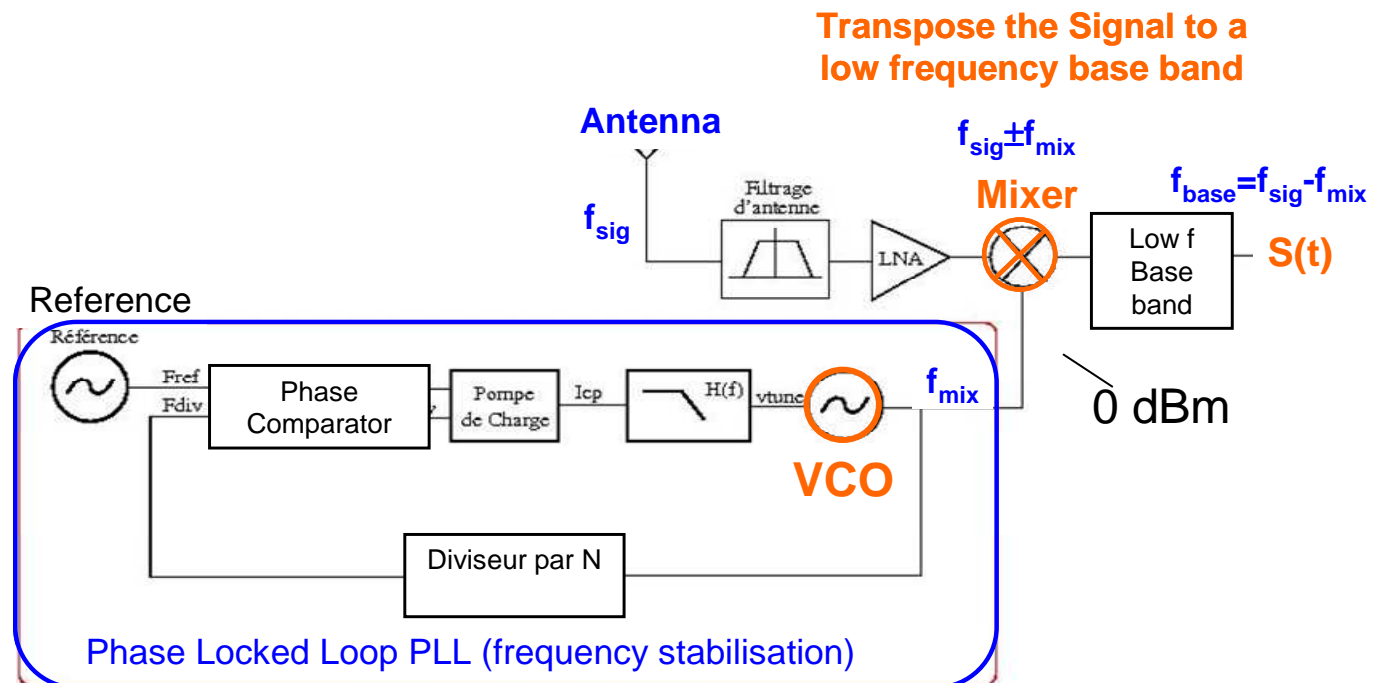
# Spectres d'Excitations vs. Configurations

- Fréquence interne déterminé par champ interne (anisotropie, dipolaire,....)
- Gamme de fréquence (MHz, GHz, 10s GHz), accordabilité  $df/dI$ ,  $df/dH$

- Maîtrise d'un nombre de configurations
- Compréhension par simulations
- Caractéristiques
  - gamme de fréquences,
  - f vs I, H,
  - oscillations en champ nul,
- Important pour applications

# Enjeux

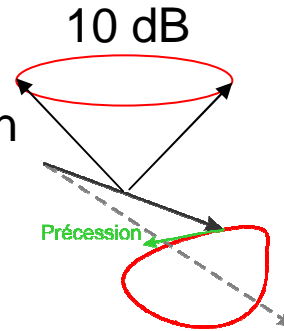
- Spectres d'excitations vs configurations
- **Puissance de sortie → 0dBm**
- Bruit de Phase et Largeur de Raie
- PLL
- Fonctions traitement signal



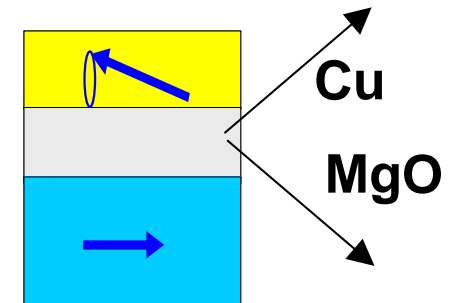
# Puissance de Sortie

Output power → 0dBm

1. Grande Amplitude precession  
Polariseur Perpendiculaire  
Vortex
2. Magnéto-Résistance
3. Adaptation Impédance
4. Amplification



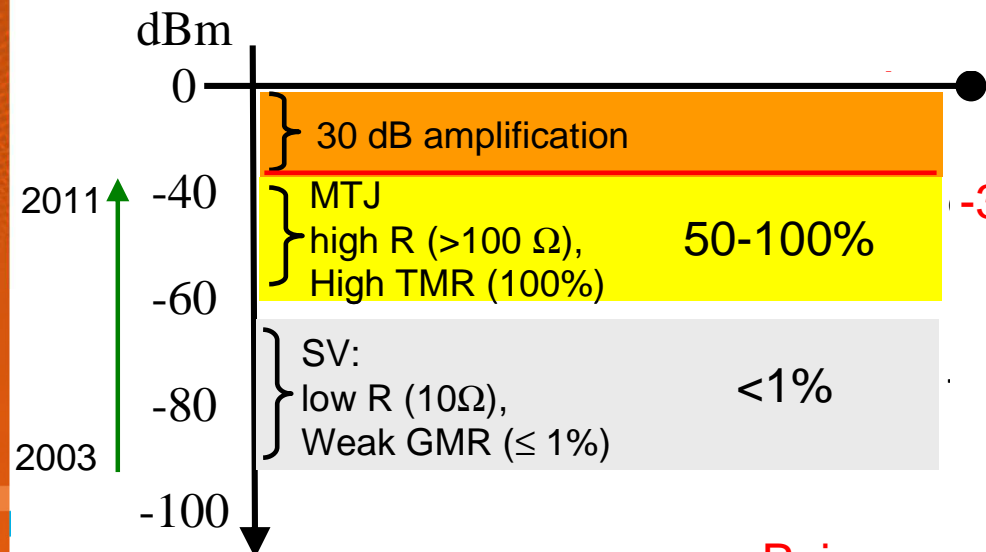
Vanne de spin MR ~1%



Jonctions tunnel ~10-100%

$$P_{out} = MR^2 \cdot I_{DC}^2 \cdot R \cdot \frac{f}{(1+f)^2}$$

Impédance 10 dB  
CEA/LETI



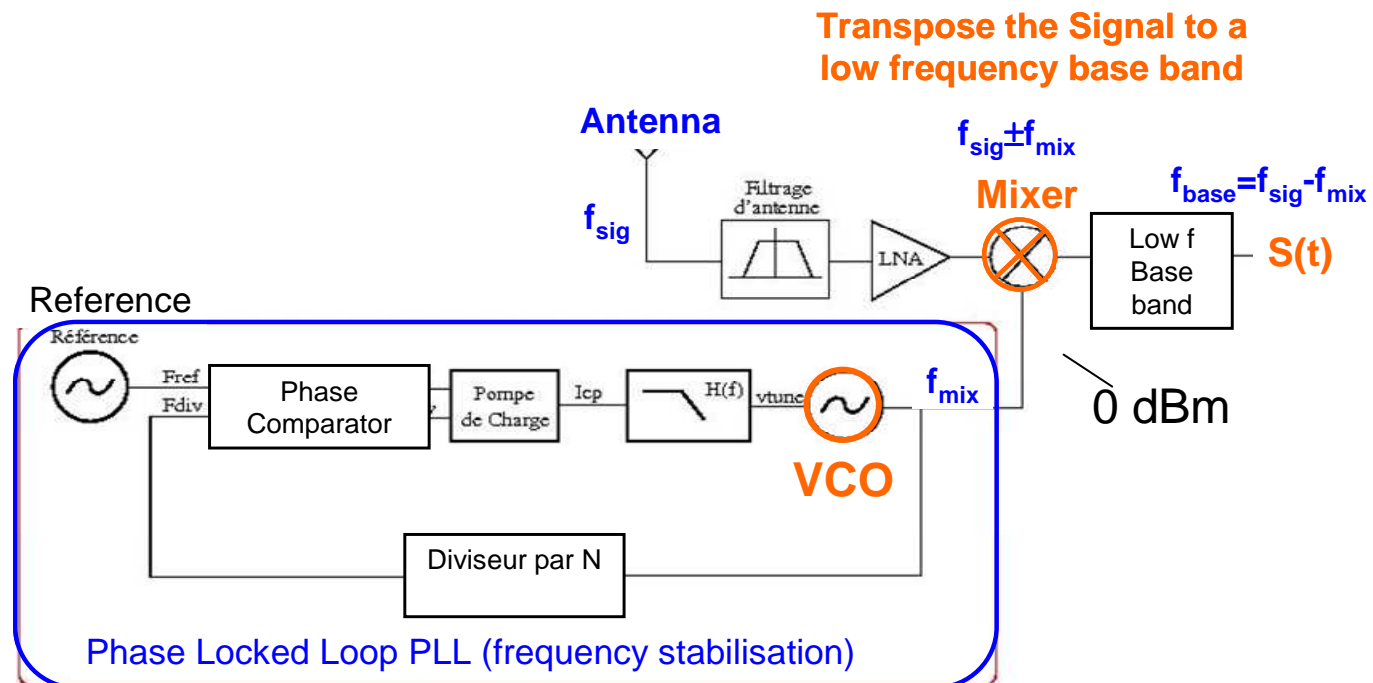
-32dBm

MTJ + Pol Perp + Vortex  
CNRS/Thales 2011

- Puissance pas un défis majeur,
- Il ne reste que de réaliser un dispo à 0 dBm

# Enjeux

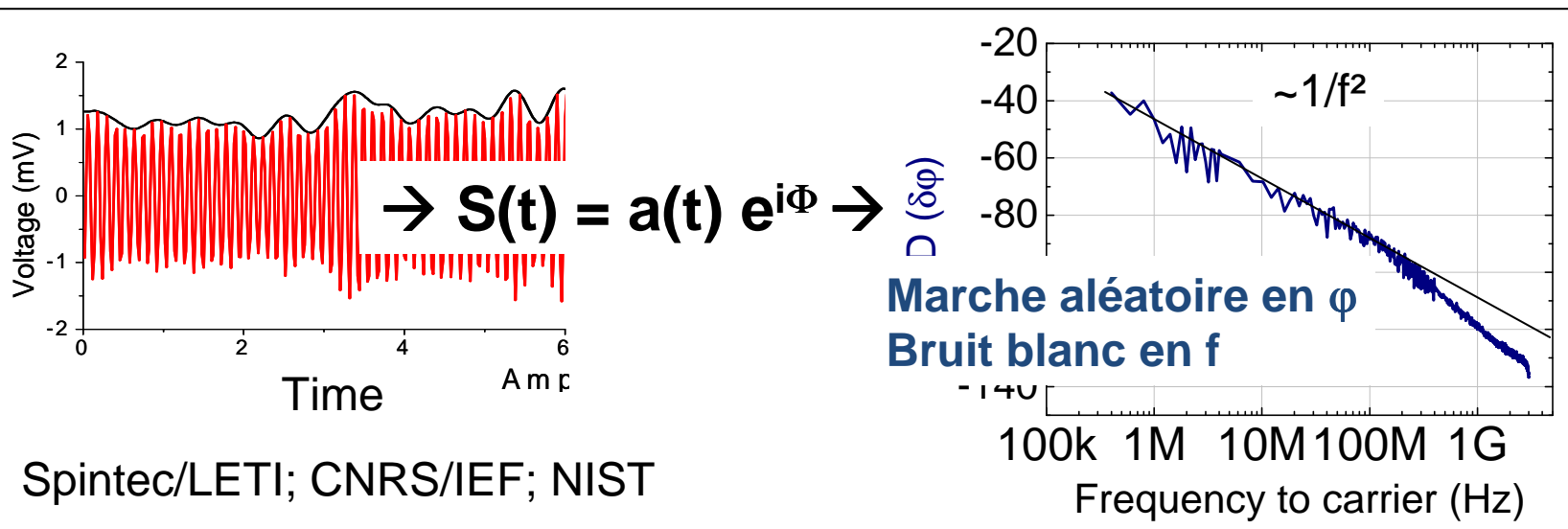
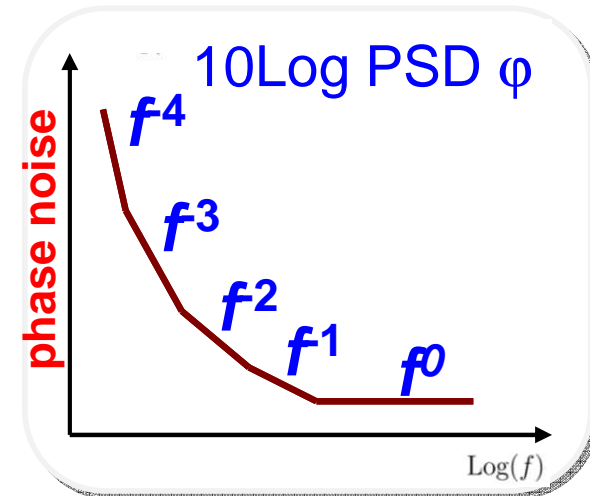
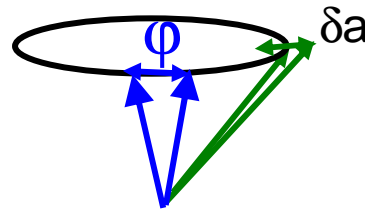
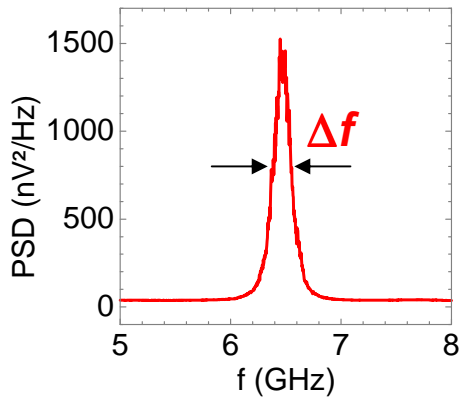
- Spectres d'excitations vs configurations
- Puissance de sortie  $\rightarrow$  0dBm
- **Bruit de Phase et Largeur de Raie**
- Fonctions traitement signal
- PLL



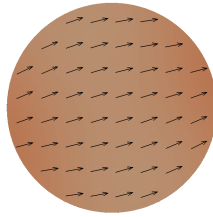
# Largeur de raie et Bruit de Phase

$$V(t) = V_0 [ 1 + \delta a(t) ] \sin [ \omega t + \delta \phi(t) ]$$

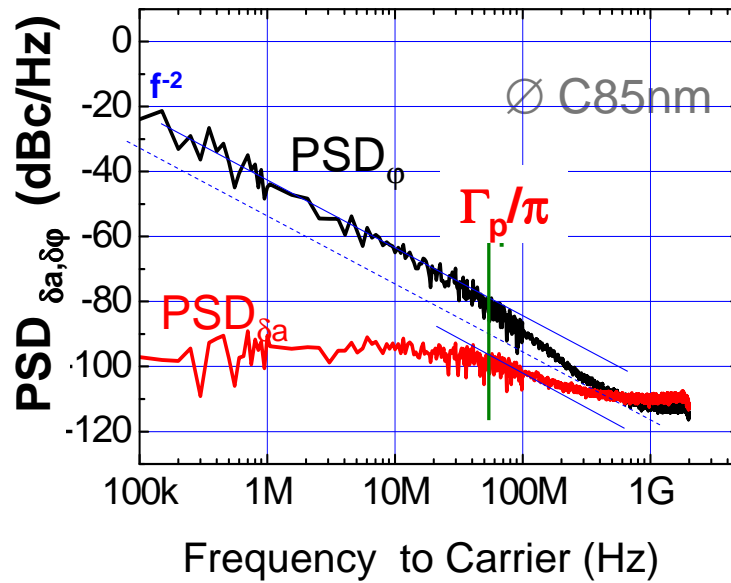
FFT



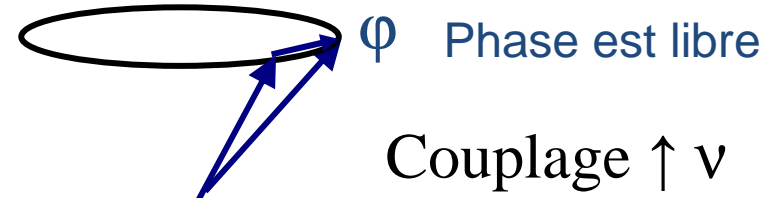
# Bruit de phase expérimentale



homogène  
Spintec/  
Leti  
ANR  
Milestone



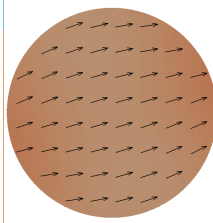
$$\frac{d\varphi}{dt} = h_n^\varphi(t) - N\delta p$$



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

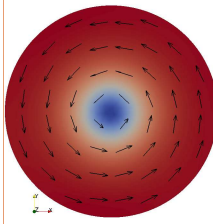
- Signature du bruit de phase  $1/f^2$
- Bruit de phase dominant
- Augmenté par bruit d'amplitude
- Extraction paramètres non-linéaires

# Bruit de phase expérimentale

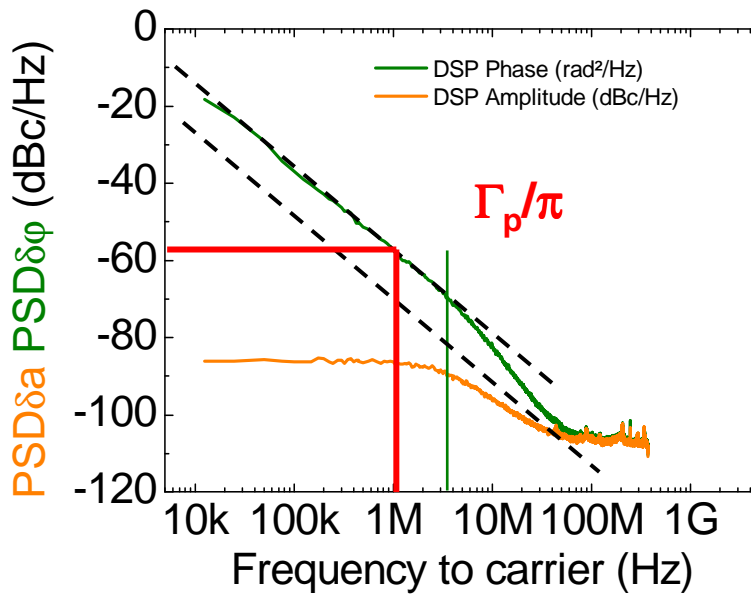
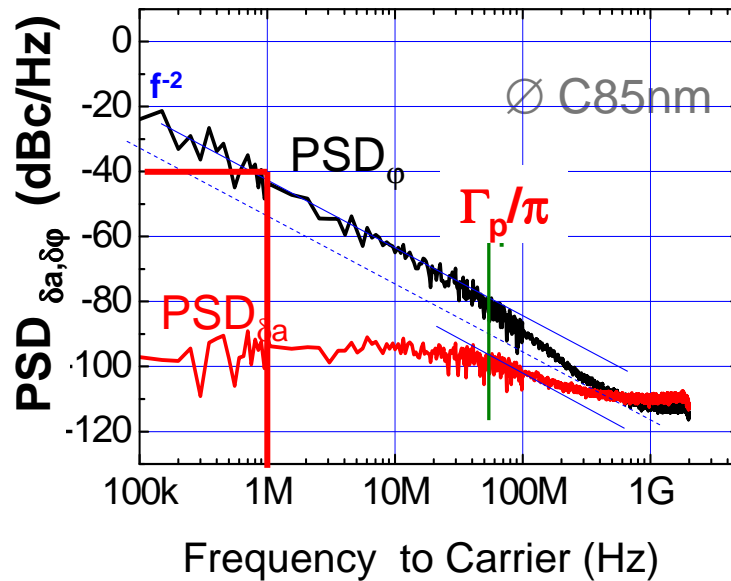


homogène  
Spintec/  
Leti

Vortex



CNRS/  
Thales



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



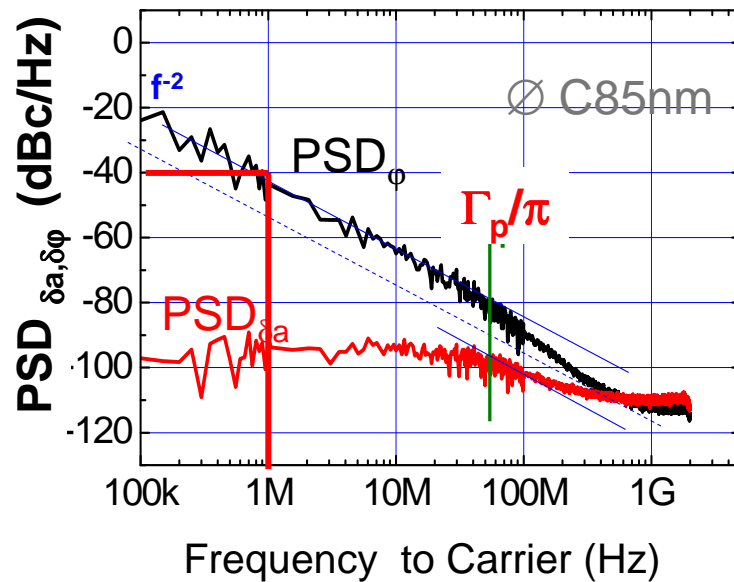
$$\frac{d\delta p}{dt} + 2\Gamma_p \delta p = h_n^{\delta p}(t)$$

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

Vortex  
 $f_0 = 456\text{ MHz}$   
 $\Delta f = 1.8\text{ MHz}$   
 $f_p \sim 2.5\text{ MHz}$   
 $\Delta > 10\text{ dB}$   
 $v > 3$

Réduction bruit de phase  
 $\sim 1.8\text{MHz}/180\text{ MHz}$

# Origine Amplitude du Bruit de phase

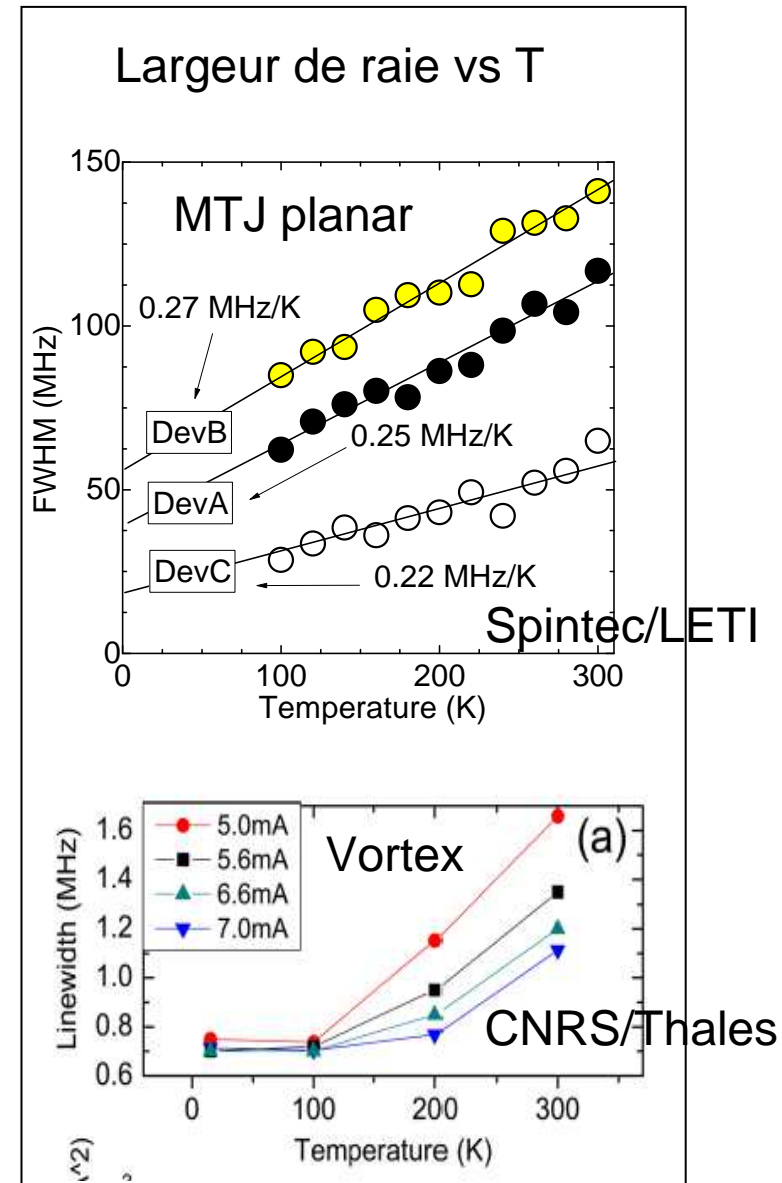


## • Origine du bruit

Niveau  $\sim \Delta f_o$

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

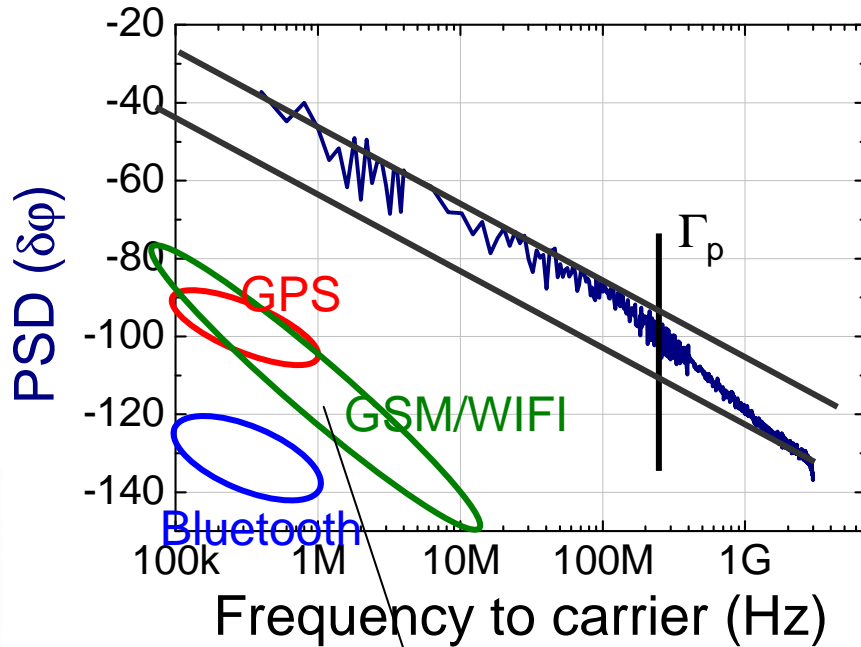
- Réduction  $\Delta f$  par un facteur  $\sim 2$  (3dB)
- Activation thermique important
- Autres contributions existent



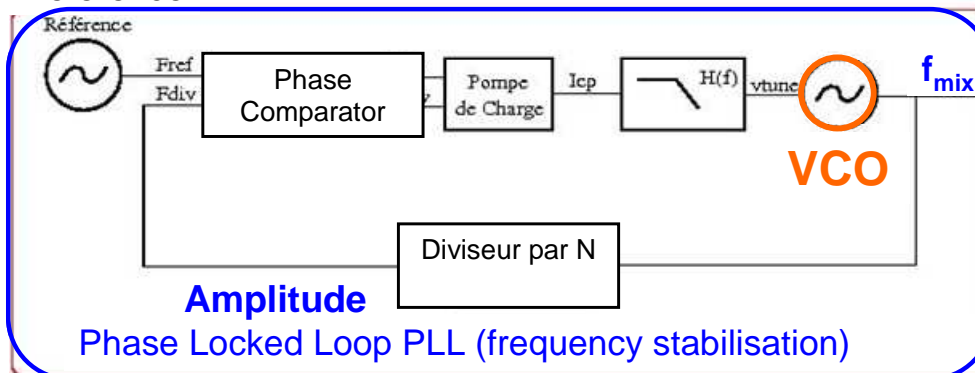
Spintec/LETI

CNRS/Thales

# Bruit de Phase Comparaison



## Phase locked loop

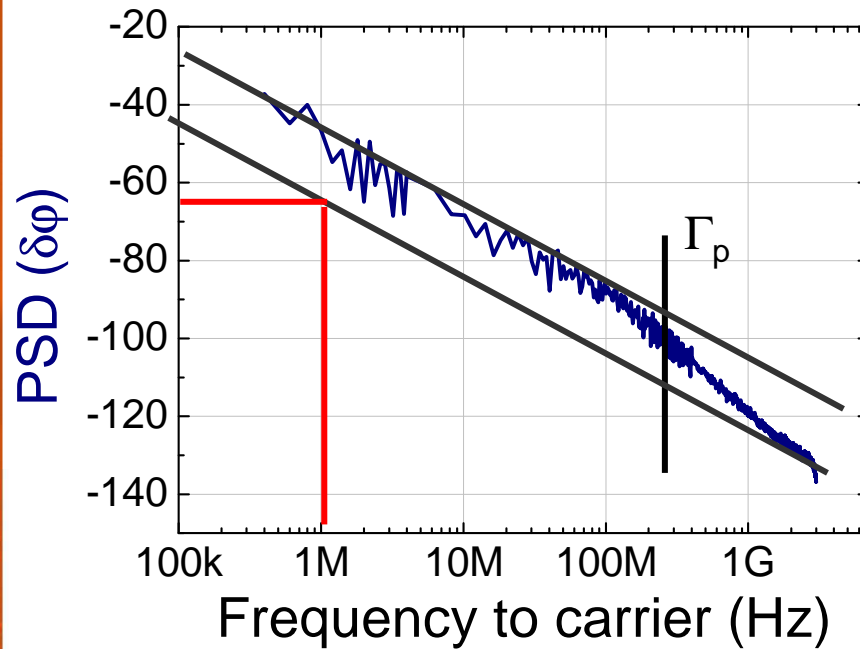


## Perspectives PLL adaptés aux STNOs

Collaboration TUD,  
SPINTEC/LETI  
CNRS/Thales  
pour design PLL CMOS

Brevet LETI/Spintec

# Bruit de Phase - Volume

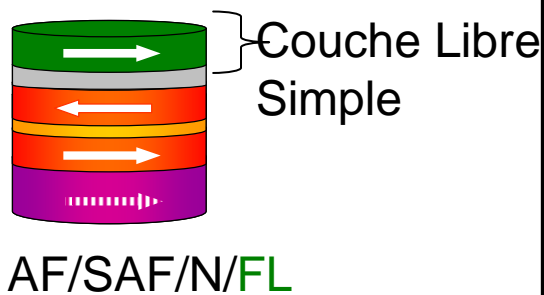


## • Origine du bruit

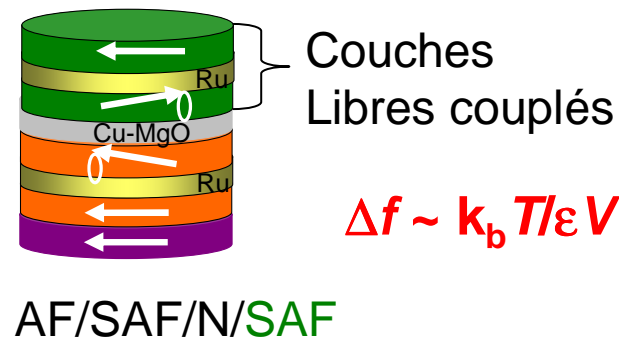
Niveau bruit  $\sim \Delta f_o$

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

### Couches Simples « non-couplé »

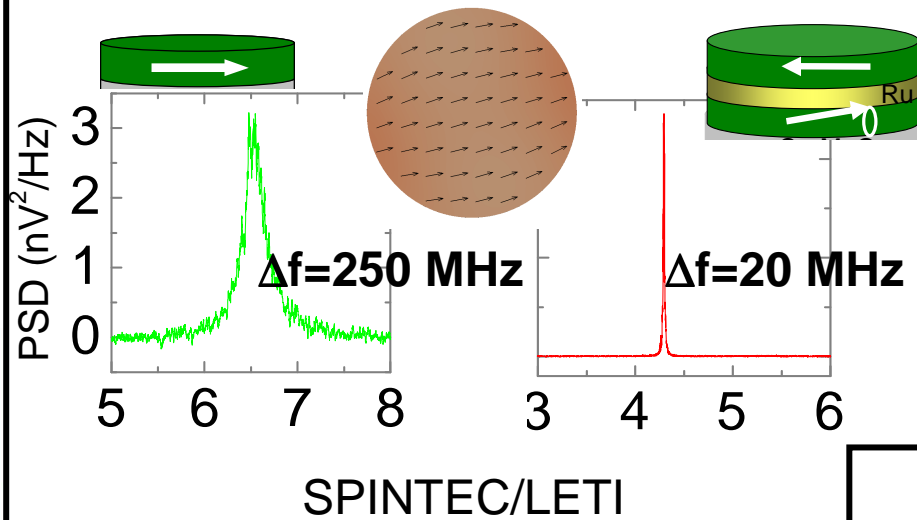


### Couches Couplées

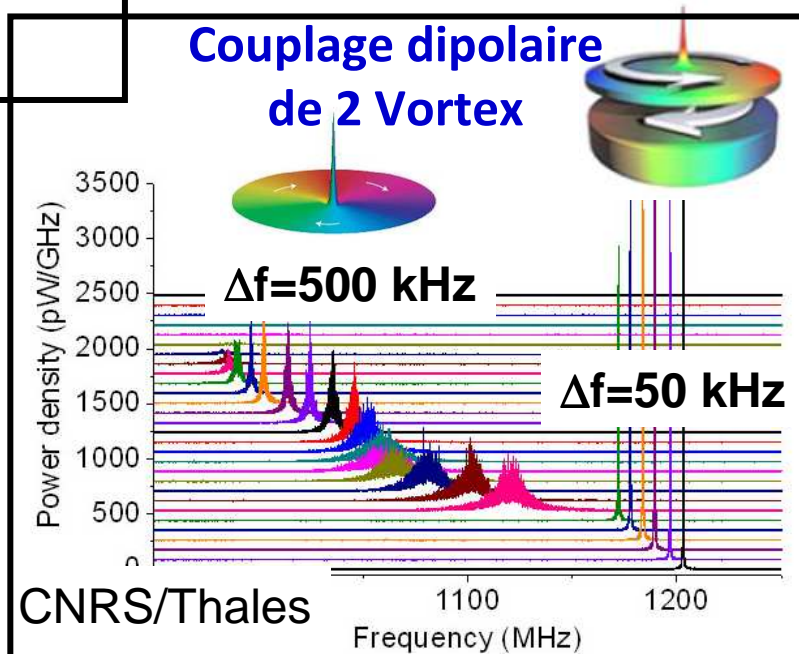


# Augmentation du volume

## Couplage SAF homogène

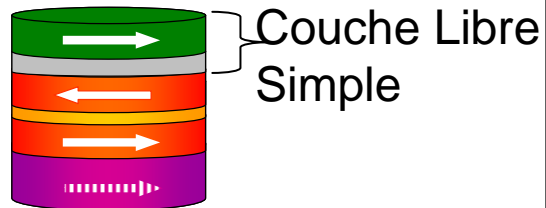


## Couplage dipolaire de 2 Vortex



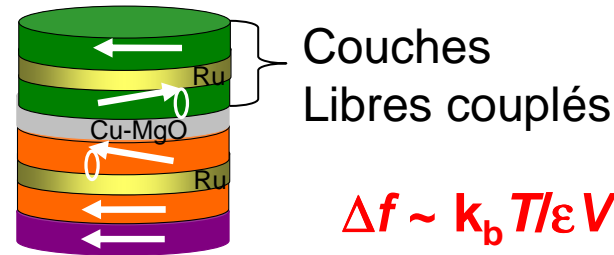
# Etude des Couches Couplées

## Couches Simples « non-couplé »



AF/SAF/N/FL

## Couches Couplées



$$\Delta f \sim k_b T / \varepsilon V$$

AF/SAF/N/SAF

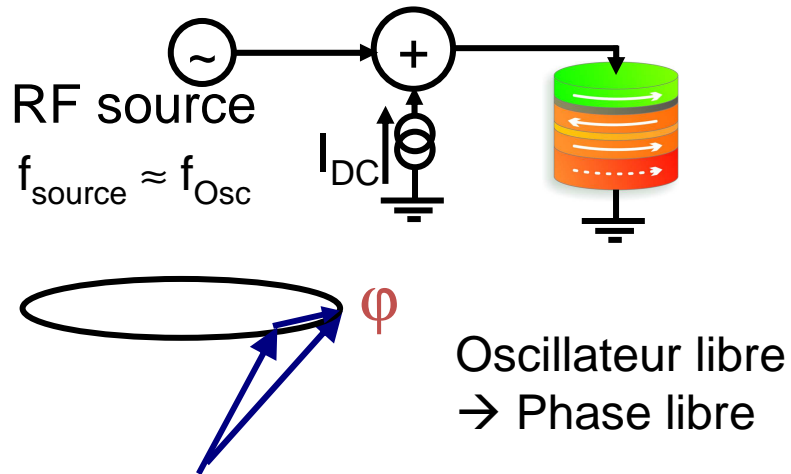
## Perspectives

→ Modes couplés connus pour régime linéaire,  
mais pas pour régime non-linéaire

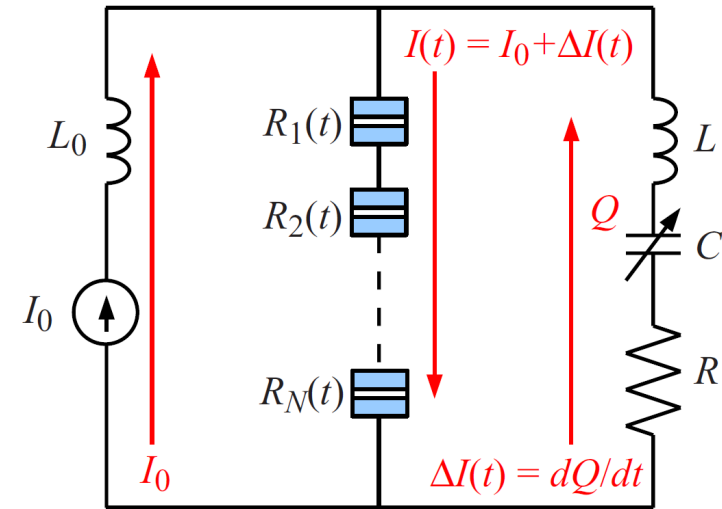
→ Rôle du couplage sur les spectres + les performances

# Couplage électriques des oscillateurs

Synchronisation sur source externe



Couplage en série



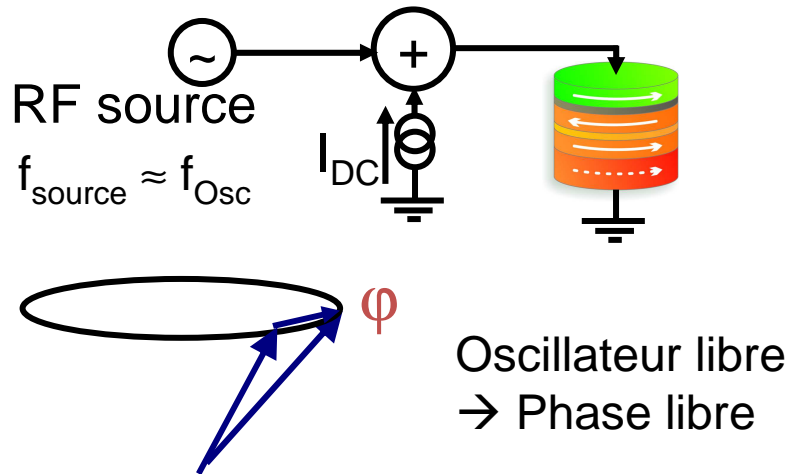
Simulation/Théorie  
CNRS/Thales 2006  
Slavin/Tiberkevich 2011

Enjeux:

- compétition bruit – source
- rôle des non-linéarités:  
gamme de locking + shift de phase
- Symétrie entre couplage et trajectoires

# Couplage électriques des oscillateurs

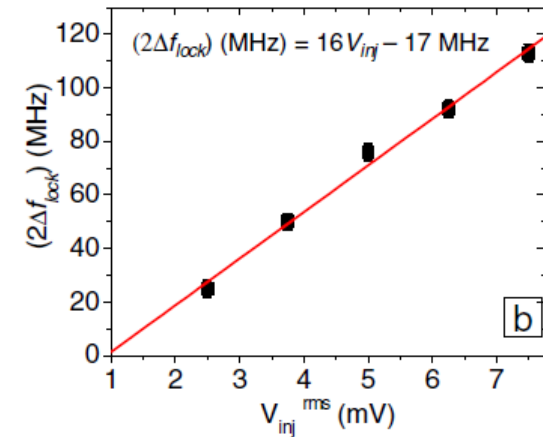
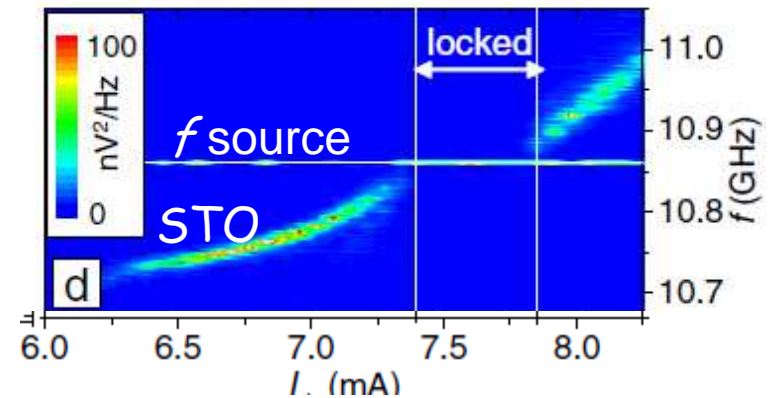
Synchronisation sur source externe



Enjeux:

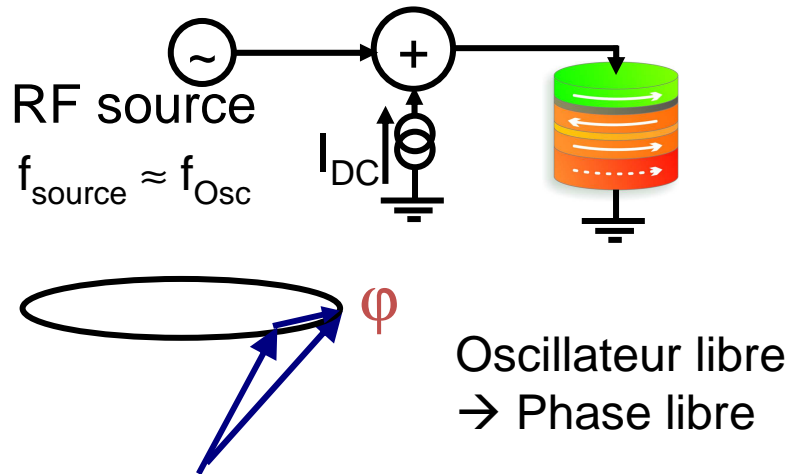
- **compétition bruit – source**
- **role des non-linéarités:**  
gamme de locking + shift de phase
- **Symmetrie entre couplage et trajectoires**

NIST 2005



# Couplage électriques des oscillateurs

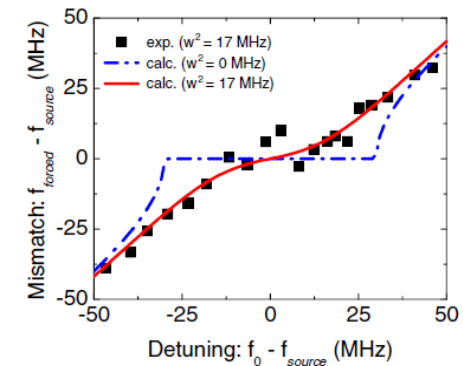
Synchronisation sur source externe



Enjeux:

- compétition bruit – source
- **Rôle des non-linéarités:**  
 gamme de locking + shift de phase
- Symétrie entre couplage et trajectoires

CNRS/Thales 2008



$$\Delta = \sqrt{1 + \nu^2} \Delta_0$$

**Injection Locking @  $f_e \approx f_0$**

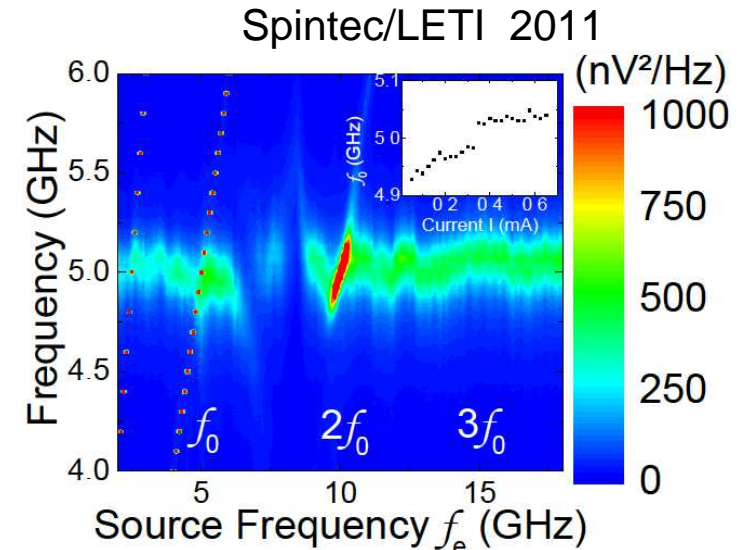
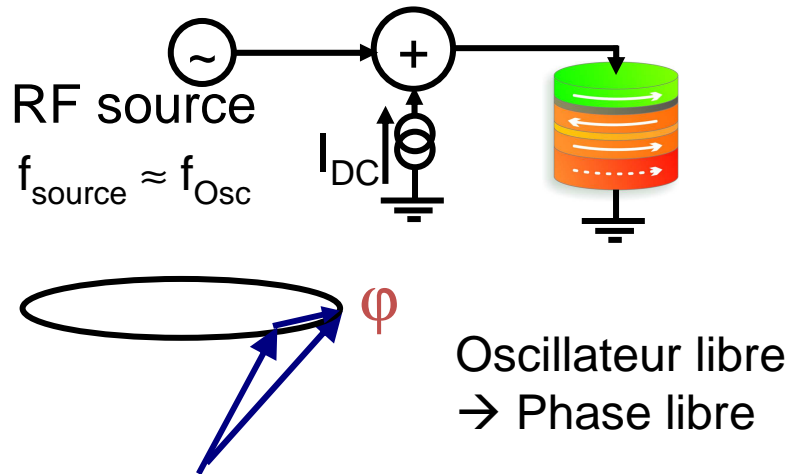
Théorie

$$\Phi_0 = \arcsin\left(\frac{\delta}{\Delta}\right) - \arctan(\nu)$$

**A. Slavin 2009**

# Couplage électriques des oscillateurs

Synchronisation sur source externe



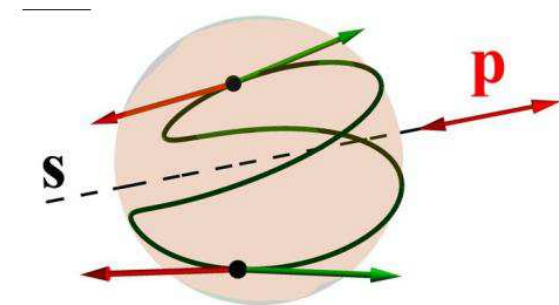
Enjeux:

- compétition bruit – source
- rôle des non-linéarités:  
gamme de locking + shift de phase
- **Symmetrie entre couplage et trajectoires**

Champ: S. Urazhdin, Slavin (2010)

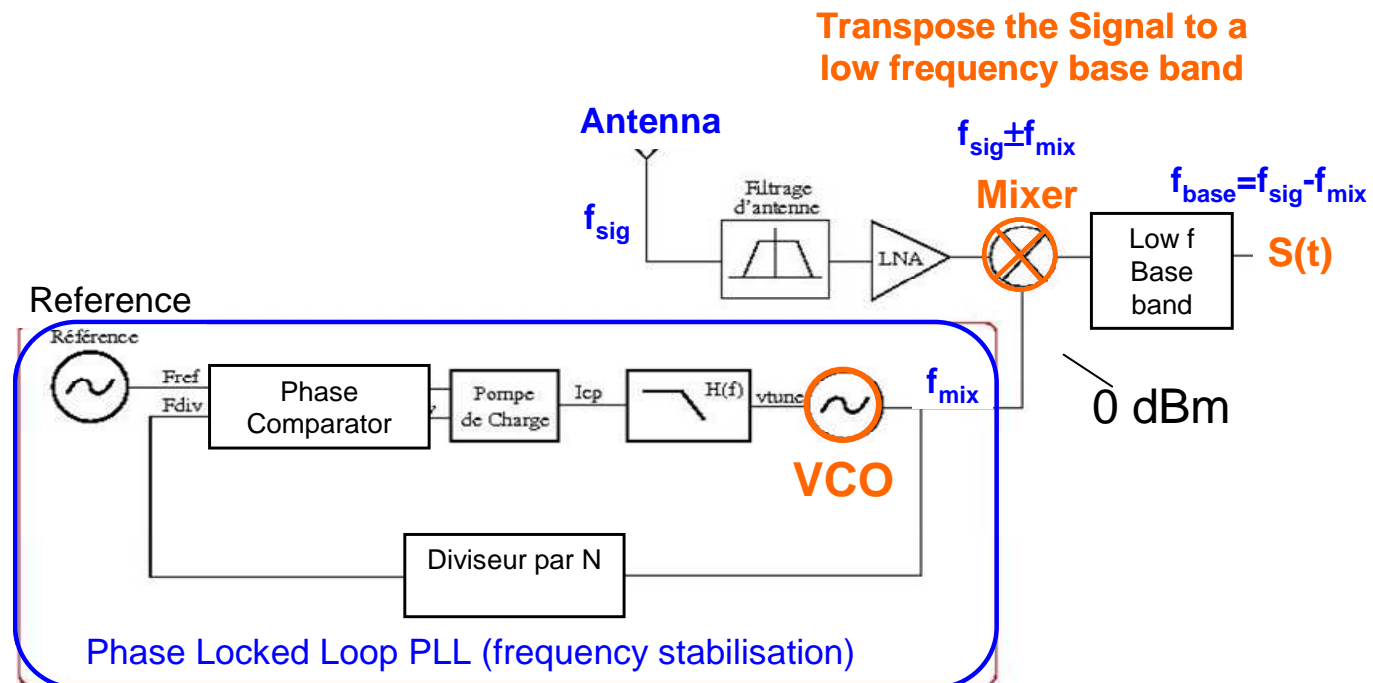
- Urazhdin: synchronisation fractionnel
- CNRS/Thales: locking de 2 oscillateurs à 1 source

**Injection Locking @  $f_e \approx 2f_0$**

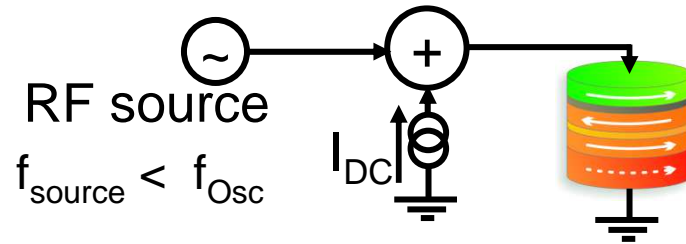


# Enjeux

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



# Modulation



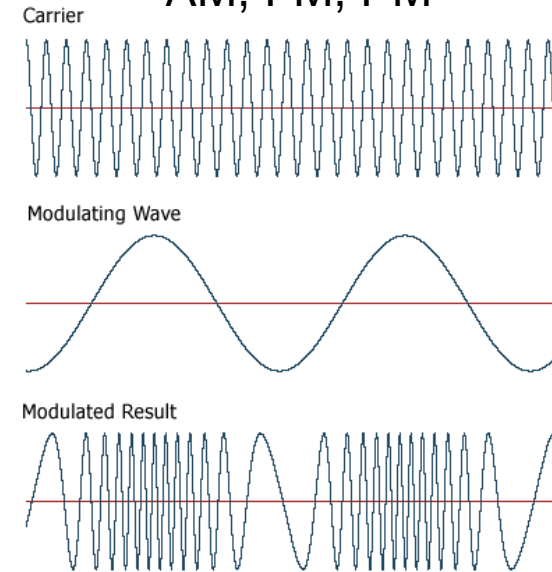
## Enjeux

- Possibilité de Modulation
- Création des sidebands
- Multiple sidebands
- Auto-Modulation
- Modulation bandwidth

Modulation courant

- modulation amplitude
- via v modulation de fréquence
- sideband d'ordre n

## AM, FM, PM

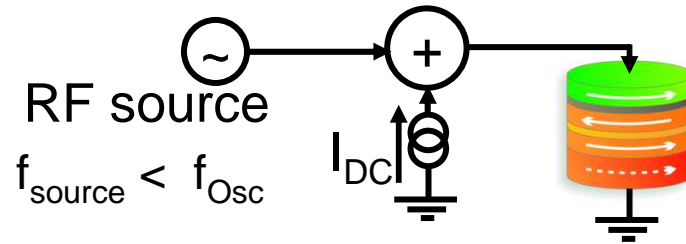


Coder de l'information

$$V = V_o \sin[\omega_o t + m_f \sin(\omega_m t)]$$

$$V = \sum_n J_n(m_f) \sin(\omega_o \pm n\omega_m t)$$

# Modulation



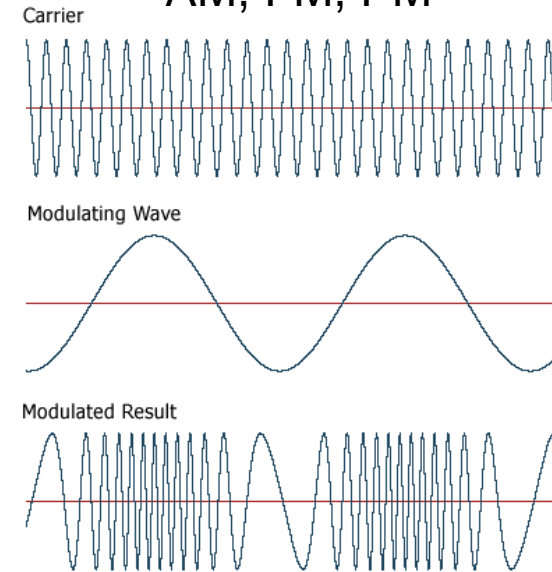
## Enjeux

- Possibilité de Modulation
- Création des sidebands
- Multiple sidebands
- Auto-Modulation
- Modulation bandwidth

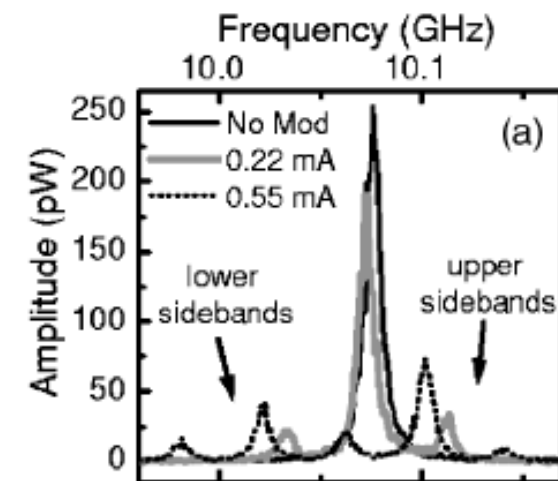
$$V = V_o \sin[\omega_o t + m_f \sin(\omega_m t)]$$

$$V = \sum_n J_n(m_f) \sin(\omega_o \pm n\omega_m t)$$

## AM, FM, PM

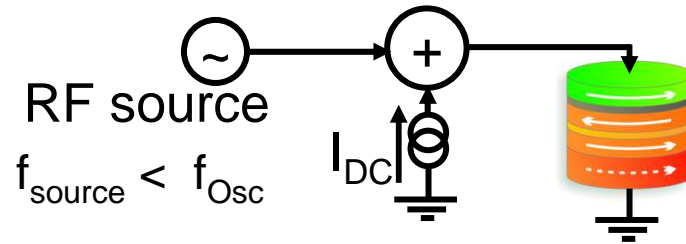


Coder de l'information



NIST 2005

# Modulation



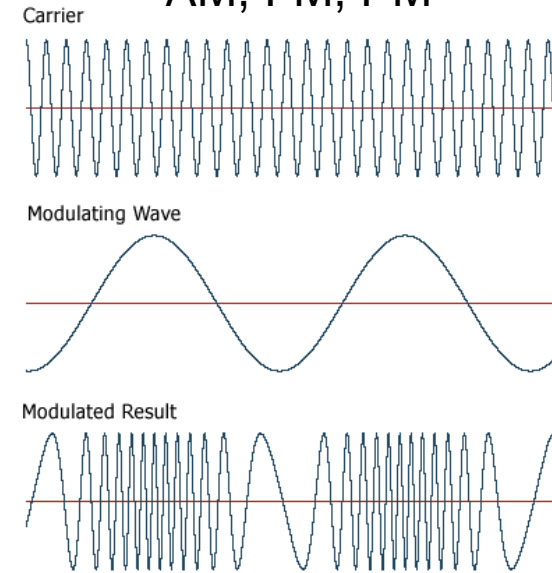
## Enjeux

- Possibilité de Modulation
- Création des sidebands
- **Multiple sidebands**
- Auto-Modulation
- Modulation bandwidth

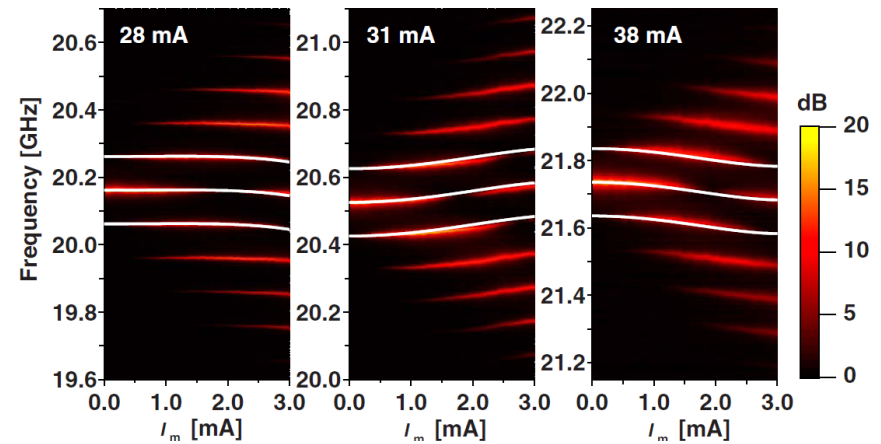
$$V = V_o \sin[\omega_o t + m_f \sin(\omega_m t)]$$

$$V = \sum_n J_n(m_f) \sin(\omega_o \pm n\omega_m t)$$

## AM, FM, PM

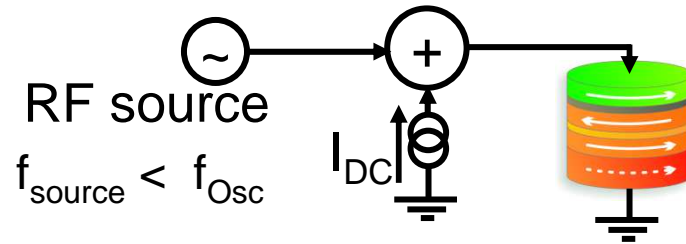


Coder de l'information



Akerman, Goteburg 2010

# Modulation



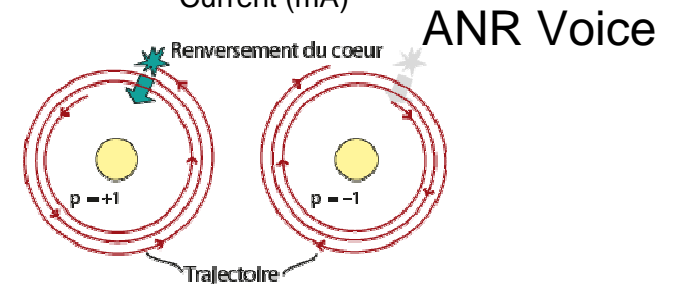
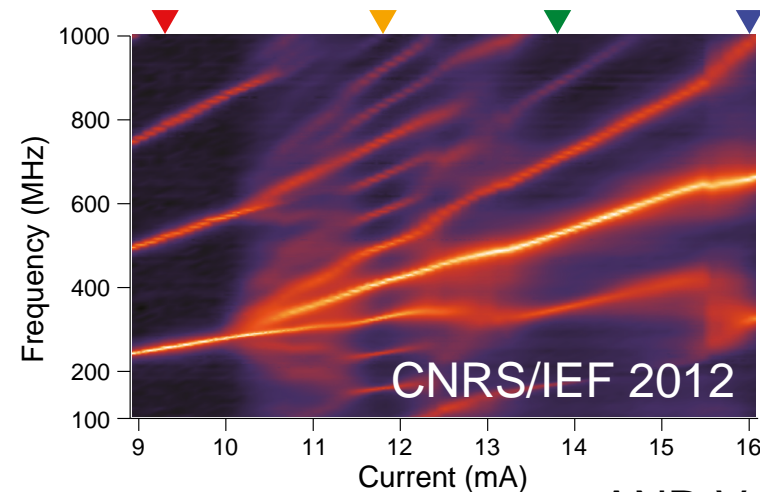
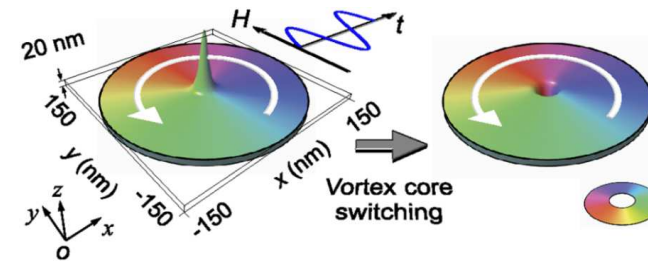
## Enjeux

- Possibilité de Modulation
- Création des sidebands
- Multiple sidebands
- **Auto-Modulation**
- Modulation bandwidth

$$V = V_o \sin[\omega_o t + m_f \sin(\omega_m t)]$$

$$V = \sum_n J_n(m_f) \sin(\omega_o \pm n\omega_m t)$$

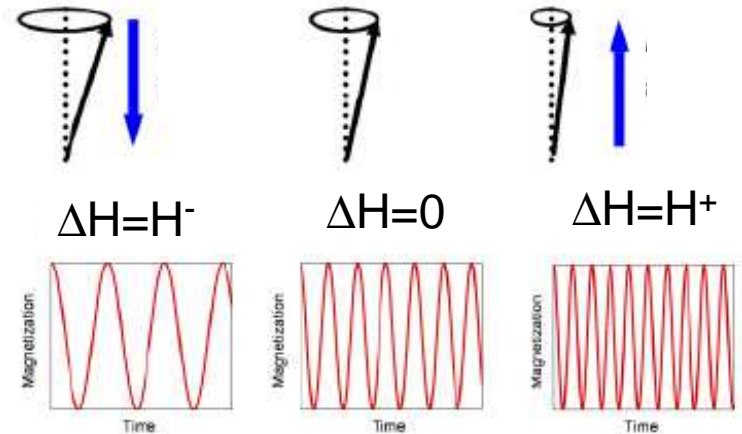
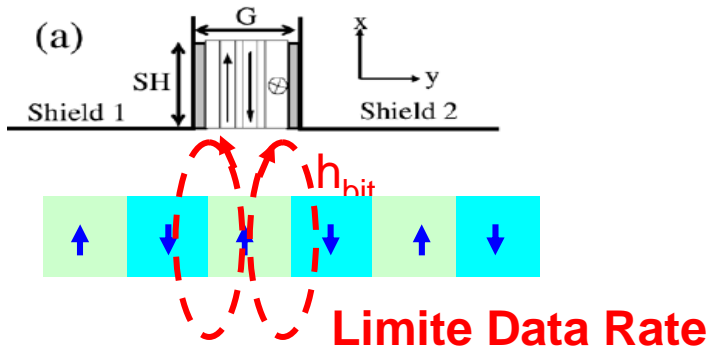
## Renversement périodique du cœur



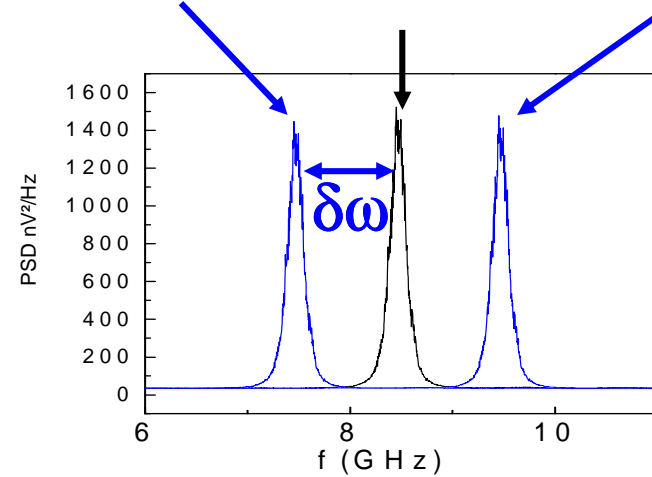
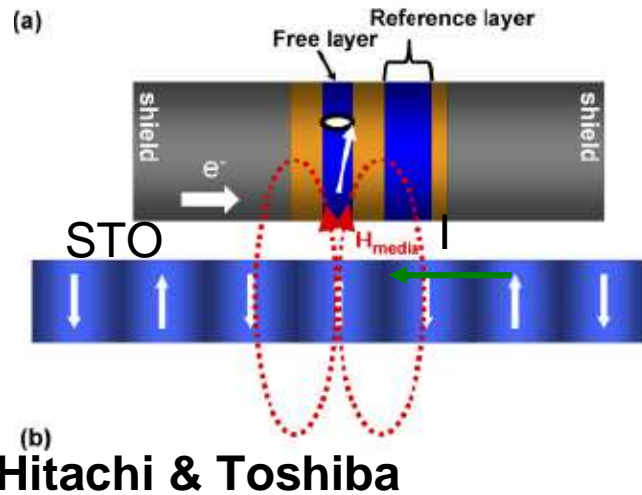
Auto-modulation et verrouillage de phase entre la giration et l'oscillation de relaxation

# Tête de Lecture Dynamique

## Tête de Lecture statique



## Nouveau Concept

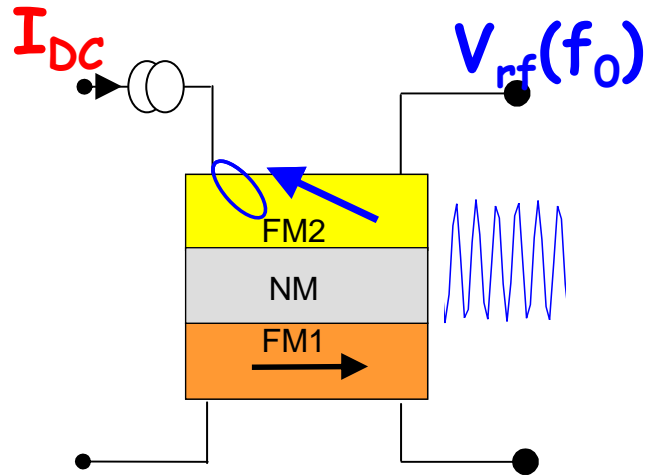


## Enjeux

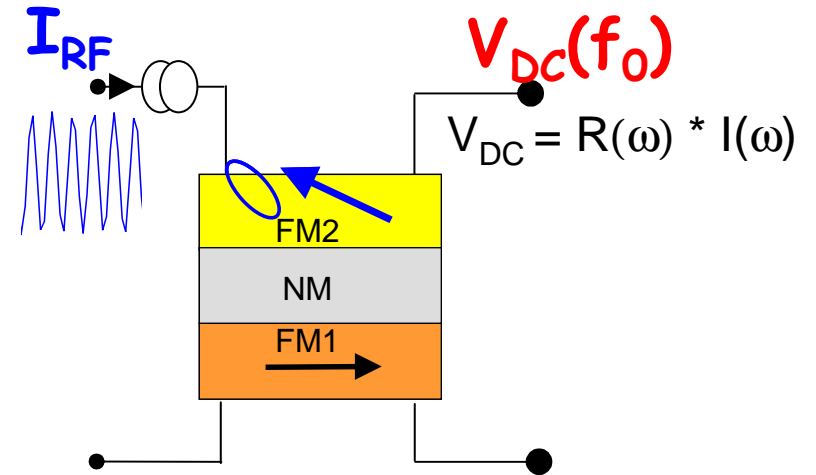
- Définir les conditions pour large data rate
- Conversion  $\delta\omega$  - tension

# Détection de Fréquence

Génération de Fréquence

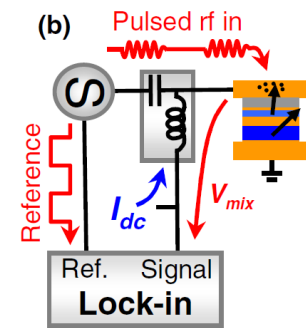
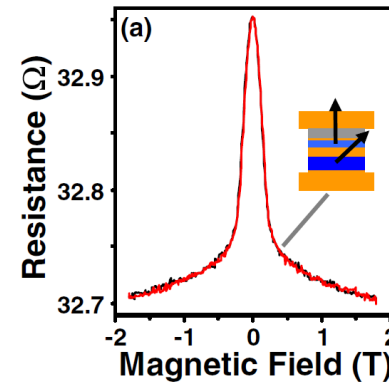


Rectification



**Perspectives**

- Détection de fréquences

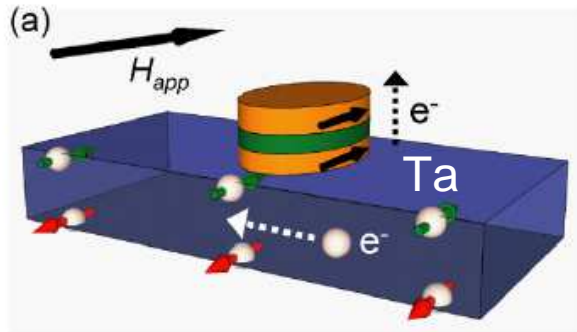


Cornell PRL 2006

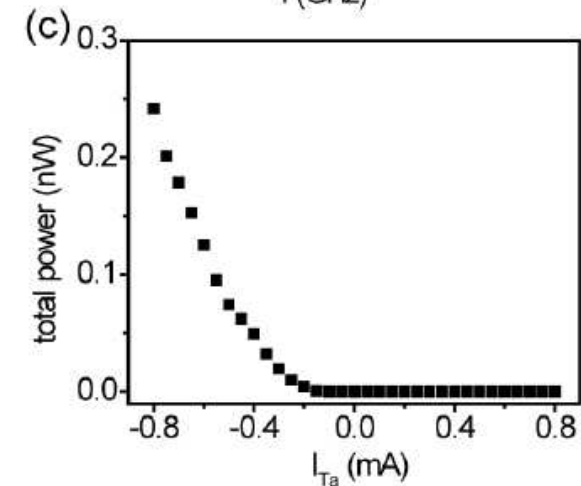
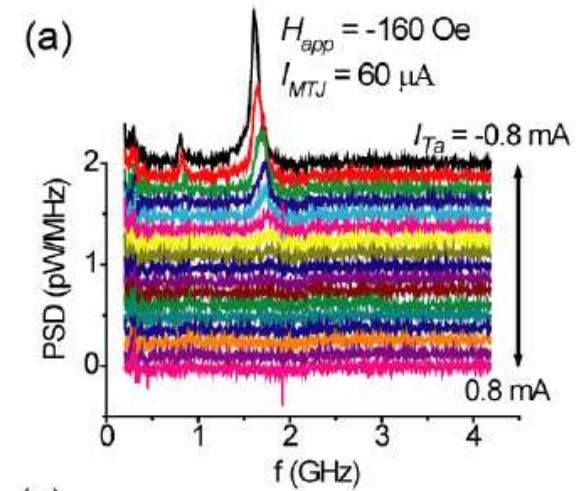
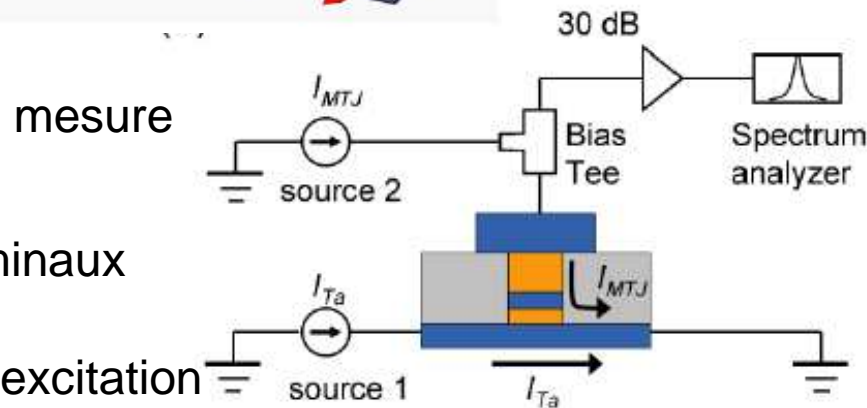
ANR Spinnova

# Effet Spin Hall: nouveau concept pour l'excitation

Courant de spin sans courant de charge



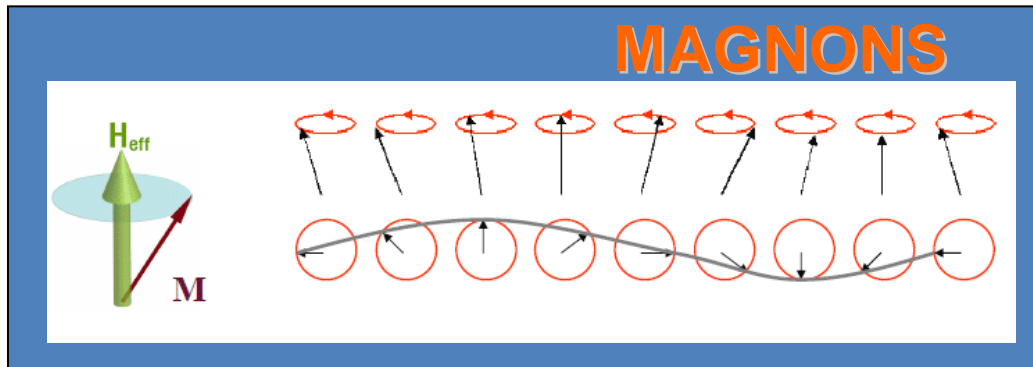
Cornell,  
Cond-mat  
2012



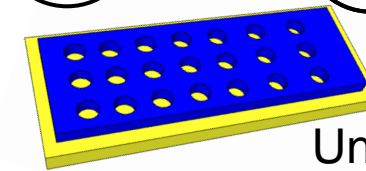
## Avantages

- Découpler le courant d'excitation et de mesures
- grande surface
- Possibilité injection de spin dans des semiconductors et oxides  
exemple YIG – connu pour sa largeur de raie la plus faible

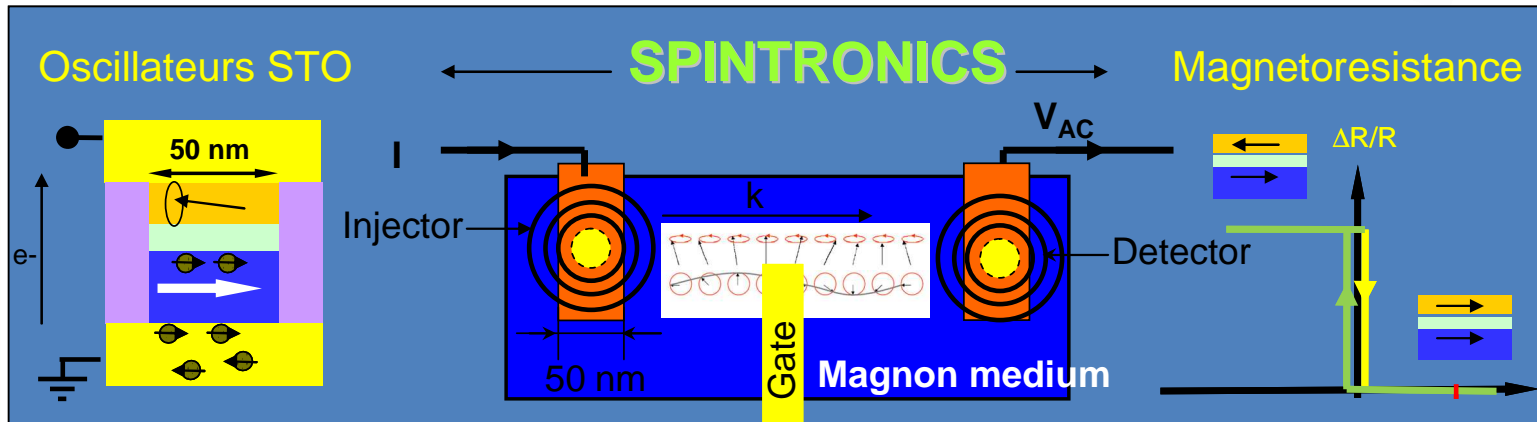
# Magnonics et Spintronics



phase  $\Phi$  Amplitude  $a$



Univ Exeter  
TUM



## ANR NanoSWITI (M. Bailleul)

- détection et de manipulation électriques des ondes échelle nm
- exploration propagation des ondes de spin de très courte longueur

## Perspectives

- Déphaseurs
- Ligne de retard
- Mélangeur de fréquences
- Fonctions logiques

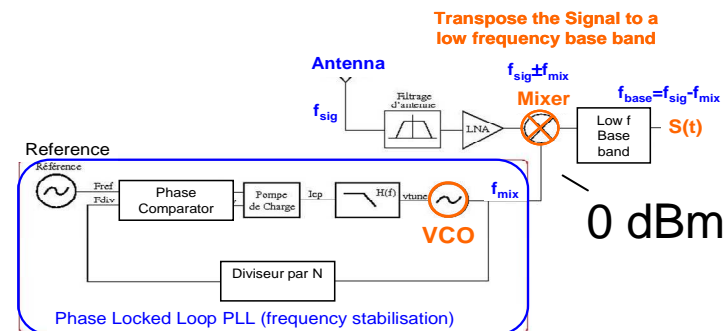
# Résumé

## Enjeux

- Spectres d'excitations vs configurations → oscillations couplées
- Puissance de sortie → 0dBm → combiner stratégies
- Bruit de Phase et Largeur de Raie → couplage, PLL
- PLL → concepts adaptés aux STOs
- Fonctions traitement signal → conditions de fonctionnement

## Télécoms

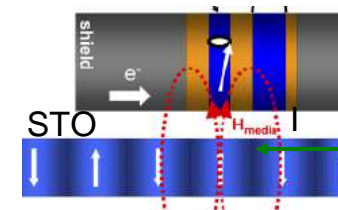
- Génération f
- Modulation
- Détection de fréquence



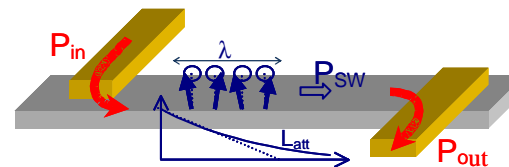
0 dBm

## Stockage d'information

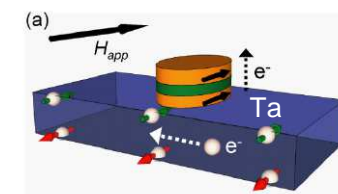
- tête de lecture dynamique



## Magnon Spintronics



## Effet Spin Hall



## Equipes & Financements

- **Spintec UMR 8191** Ursula Ebels  
**CEA/Leti** Marie Claire Cyrille  
ANR: MagICO, Milestone, Spinnova; FP7: Spinswitch, Mosaic
- **CNRS UMPHy** Vincent Cros, Julie Grollier  
**Thales** Jean Claude Mage, Julien Kermorvant, Paolo Bortoletti  
ANR: MagICO, NanoMaser, Voice, Spinnova, Nanoswitti, Trinidad;  
FP7: Spinswitch, Master, Mosaic
- **CNRS/IEF** Joo Von Kim, Thibaut Devolder  
ANR: Voice, Nanoswitti; FP7: Spinswitch
- **CEA/Saclay SPEC** Olivier Klein, Grégoire DeLoubens  
ANR: NanoMaser, Voice, Spinnova, Trinidad; FP7: Master, Mosaic
- **IPCMS** Matthieu Bailleul  
ANR: Nanoswitti;

### Financement ANR

MagICO (2005-2008); Milestone (2010-2013); Spinnova (2011-2015);  
Nano-Maser (2007-2010); Voice (2009-2012); Nanoswitti (2011-2014)

### Financement FP7

Spinswitch (2007-2010); Master (2008-2012); Mosaic (2013-2016)