

Les Oscillateurs RF SPINTRONIQUE: Une solution pour les télécoms du futur?



SPINTEC Lab URA CEA-CNRS Grenoble
D. Houssameddine, I. Firastrau, B. Rodmacq, Y. Dahmane, L.
Buda-Prejbeanu, U. Ebels, B. Dieny



THALES

UMP CNRS/Thales et Université Paris Sud 11
O. Boule, B. Georges, M. Darques, A. Khvalkovskiy, V. Cros,
J. Grollier, C. Deranlot, K. Bouzehouane, F. Petroff, A. Fert,
J.-C. Mage

leti

CEA-LETI, MINATEC, DRT/LETI/DIHS&DCIS, Grenoble
D. Gusakova, B. Delaet, M.-C. Cyrille, F. Ponthenier, J.-P. Michel,
B. Viala, P. Vincent



Phynano Team, LPN-CNRS
G. Faini

ANR PNANO MagICO, Carnot RF, OSEO/ANVAR

Communication sans fil Radiofréquences

Cellular access



Applications multiples grand public



Hot spot access



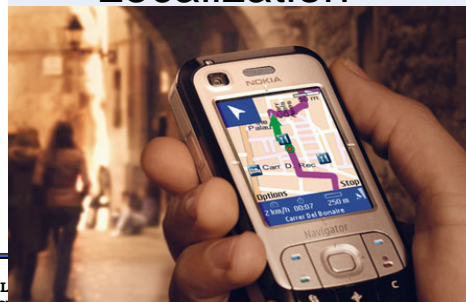
Broadcasting world



Proximity world

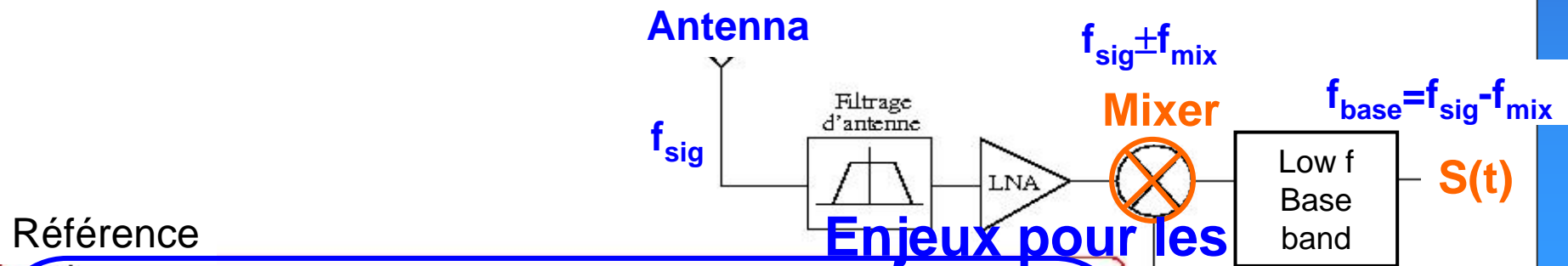


Localization



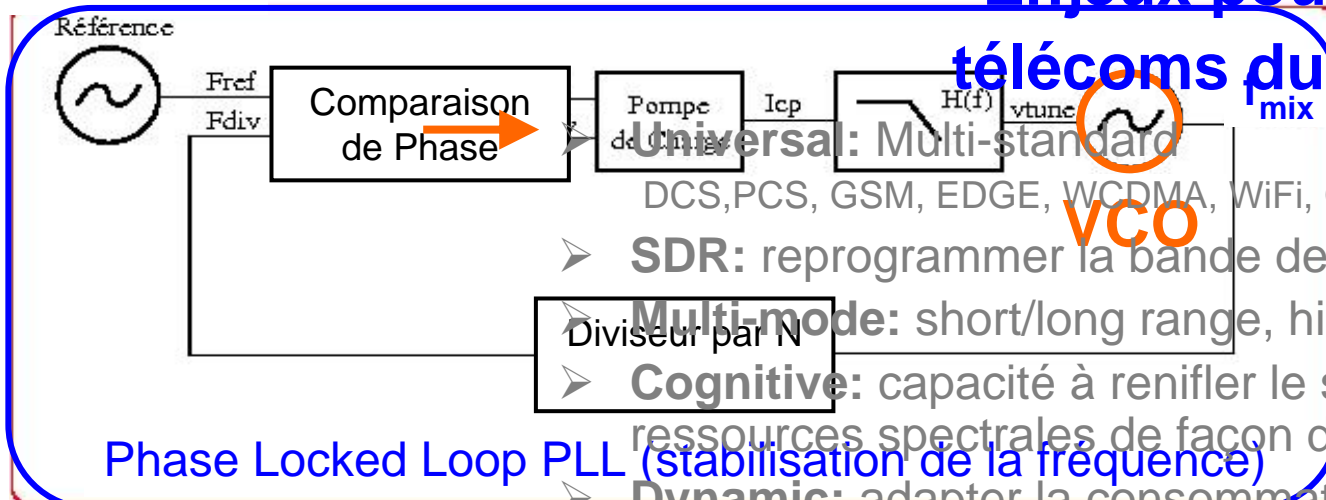
Synthèse de fréquence - Chaîne de réception

Transposition du signal vers les basses fréquences



Enjeux pour les télécoms du futur

Référence



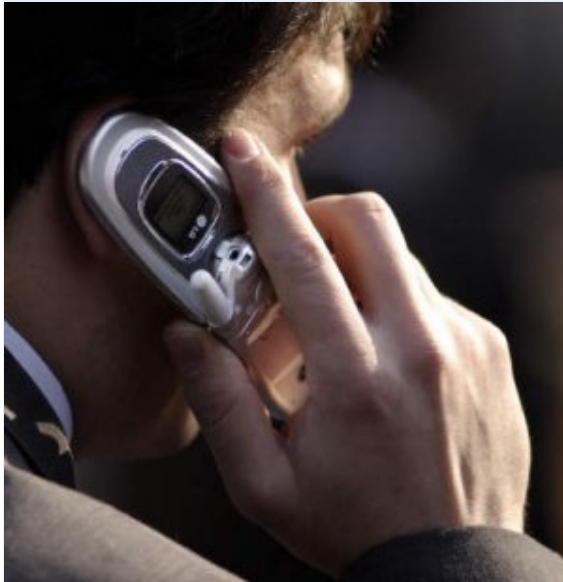
Phase Locked Loop PLL (stabilisation de la fréquence)

- **Universal:** Multi-standard
DCS, PCS, GSM, EDGE, WCDMA, WiFi, GPS, UWB, Bluetooth
- **SDR:** reprogrammer la bande de base Numérique
- **Multi-mode:** short/long range, high/low data
- **Cognitive:** capacité à renifler le spectre et à utiliser les ressources spectrales de façon dynamique
- **Dynamic:** adapter la consommation aux performances demandées.

VCO = Voltage Controlled Oscillator

Communication sans fil

Cellular access



Applications multiples grand public



Hot spot access



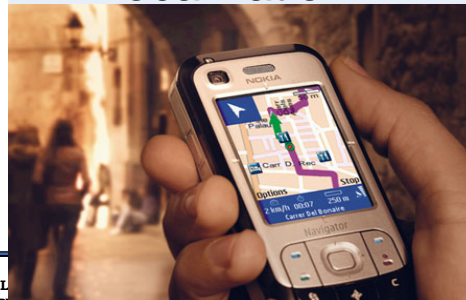
Broadcasting world



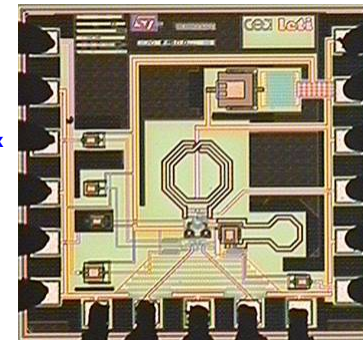
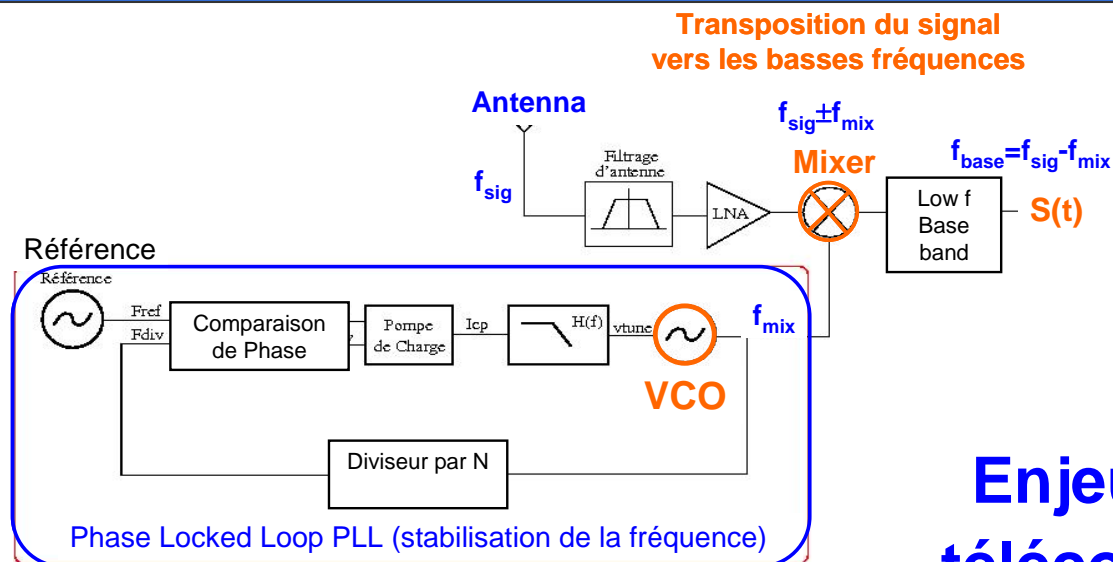
Proximity world



Localization



Synthèse de fréquence - Chaîne de réception



Taille mm²
Agilité 10% f_0
Temps μ s

Enjeux pour les télécoms du futur

- **Universal:** Multi-standard
DCS, PCS, GSM, EDGE, WCDMA, WiFi, GPS, UWB, Bluetooth
- **SDR:** reprogrammer la bande de base Numérique
- **Multi-mode:** short/long range, high/low data
- **Cognitive:** capacité à renifler le spectre et à utiliser les ressources spectrales de façon dynamique
- **Dynamic:** adapter la consommation aux performances demandées.

➔ **Point dur: La synthèse de fréquence (Multi VCO)**

VCO et Oscillateur Magnétique

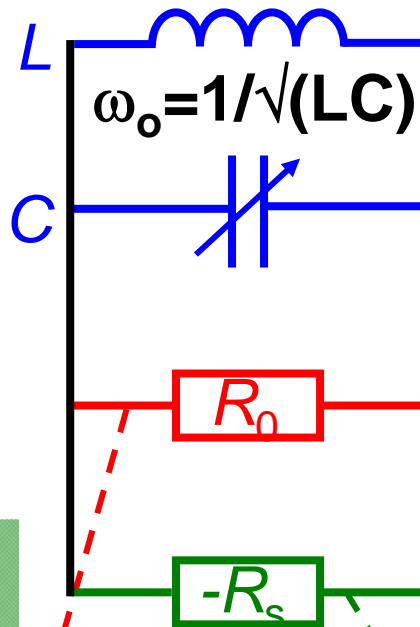
Résonateur

Résonateur Atténué

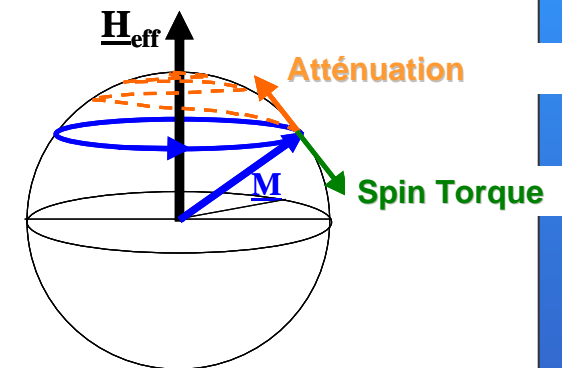
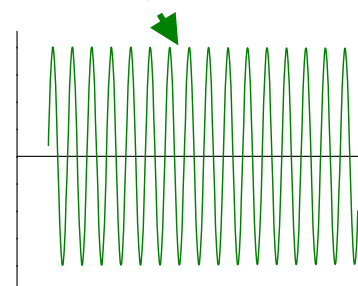
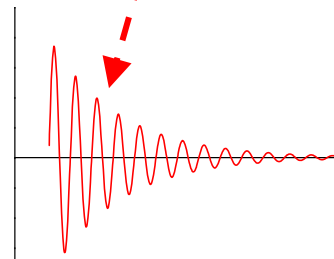
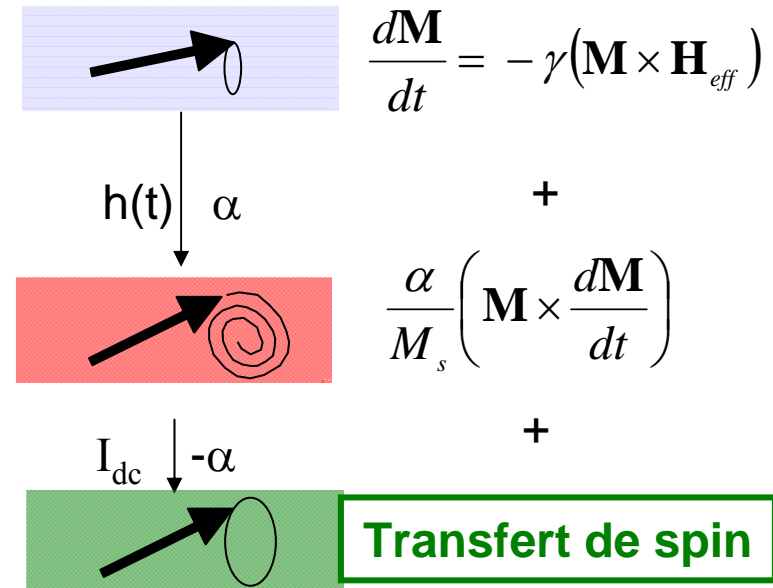
Auto-Oscillator
Résonateur Atténué
& Re-injection d'énergie

Active element to
supply external
energy and
compensate
energy losses

VCO



Oscillateur Magnétique

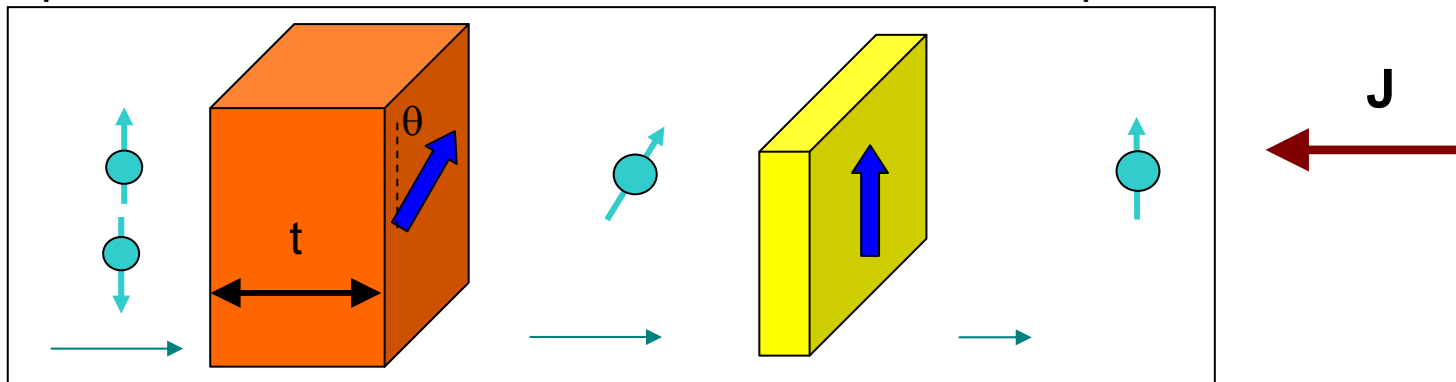


Transfert de spin

Electrons
non-
polarisés

Electrons
polarisés

Electrons
transmis et
repolisés



**Couche
Polariseur**

**Couche
Libre**

Longueur caractéristique pour établir un courant polarisé en spin

Longueur de diffusion de spin l_{sf}

$t > l_{sf}$: bon polariseur

$t < l_{sf}$: mauvais polariseur

Co $l_{sf} = 30$ nm

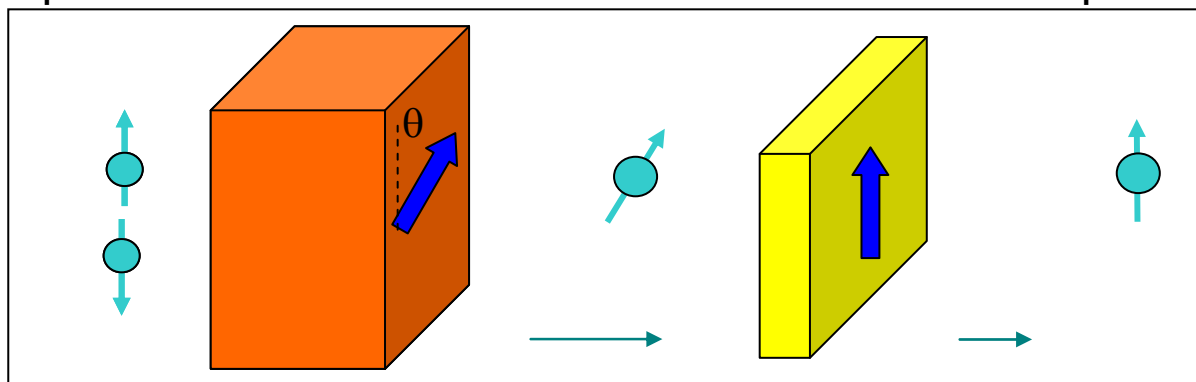
FeNi $l_{sf} = 4$ nm

Transfert de spin

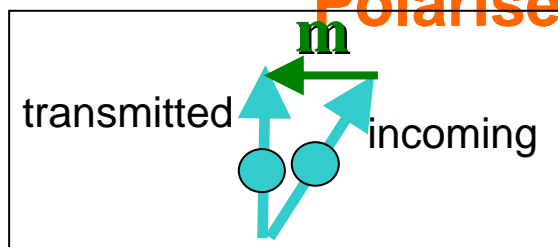
Electrons non-polarisés

Electrons polarisés

Electrons transmis et repolarisés



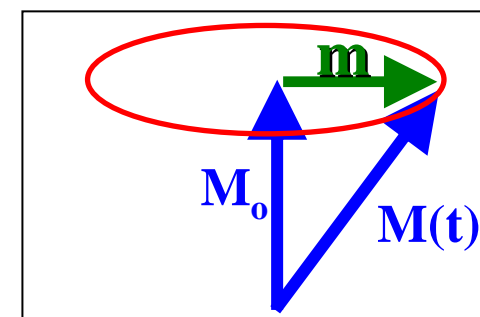
Électrons de conduction
Couche Polariseur



Couche Libre

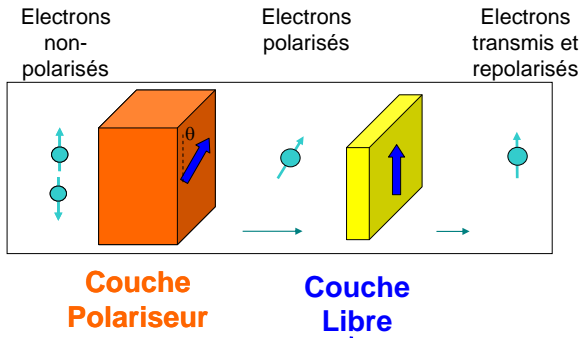
Transfert du moment transverse m
=
Couple (Spin Torque ST)

Aimantation Locale



ST tend d'aligner M (anti-)parallel à P

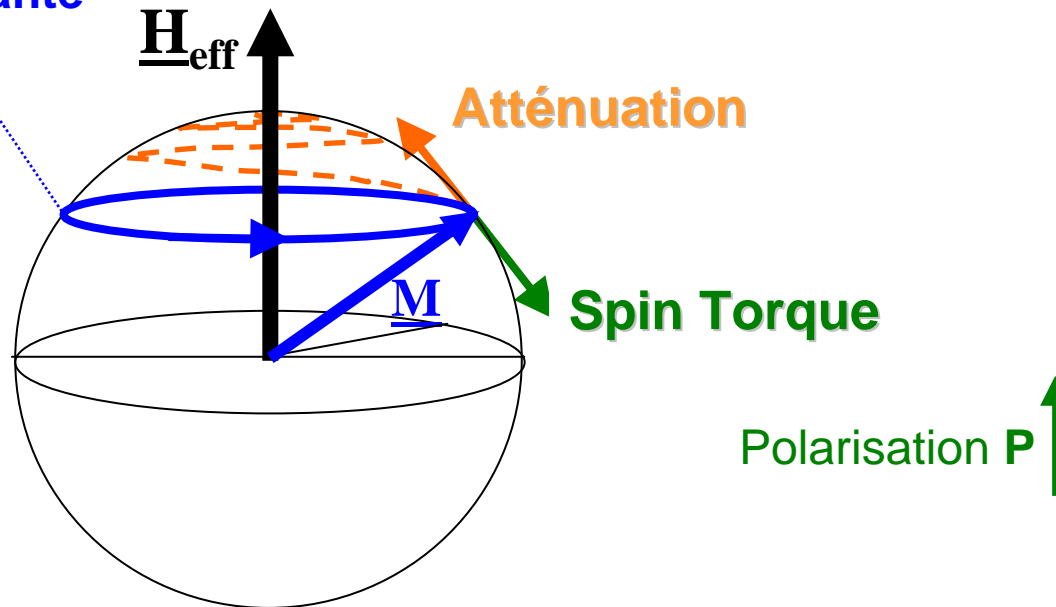
Oscillation de l'aimantation couche libre



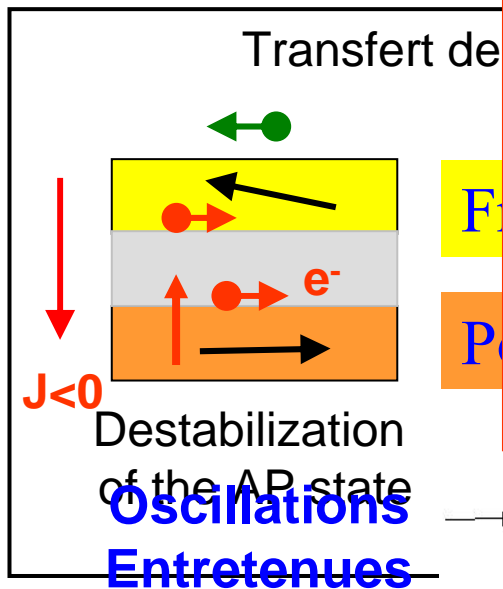
$$\mathbf{H}_{eff} = -\frac{\partial E}{\partial \mathbf{M}}$$

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

Trajectoire à énergie constante

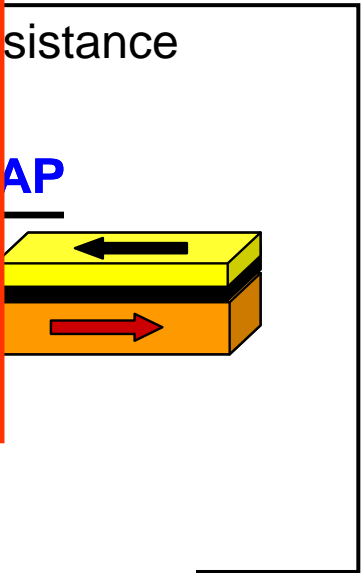


LES OSCILLATEURS RF SPINTRONIQUES (STO)



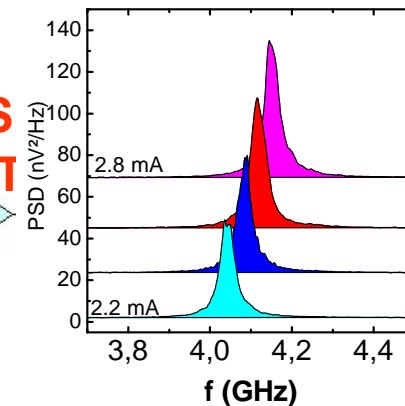
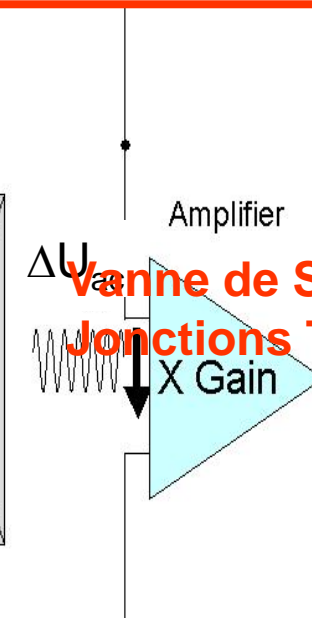
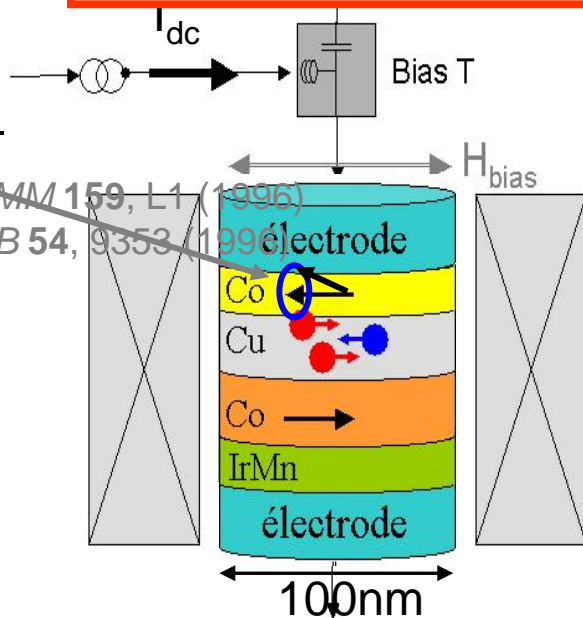
STO une alternative pour les VCO applications télécoms?

- Taille (μm^2 vs mm^2)
- Agilité en fréquence (GHz vs 100 MHz)
- Opération en champ nul ?
- Amplitude des Oscillations ?
- Largeur de raie ?
- Puissance de sortie ?



* J. C. Slonczewski, *JMMM* 159, L1 (1996)

* L. Berger, *Phys. Rev. B* 54, 9353 (1996)

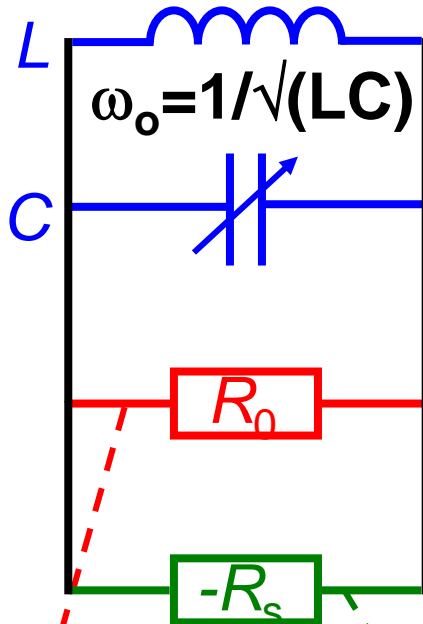


VCO et Oscillateur RF SPINTRONIQUE (STO)

VCO

Oscillateur Spintronique

Résonateur

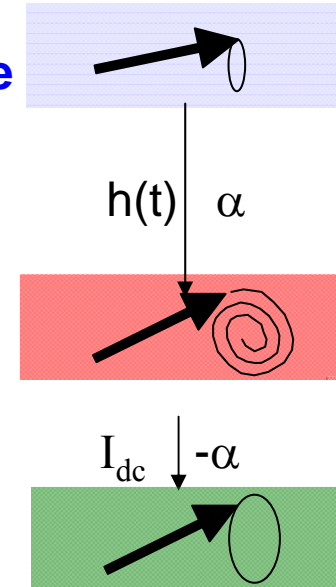
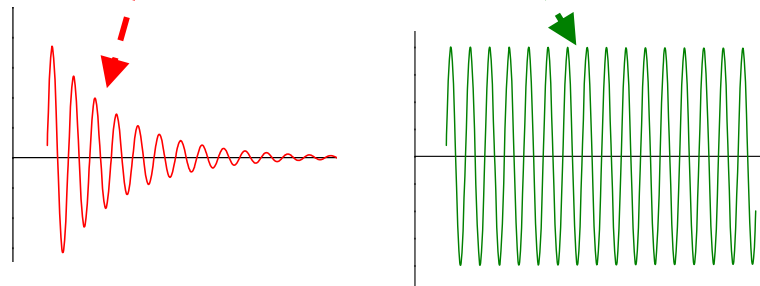


Linéaire

Non-linéaire

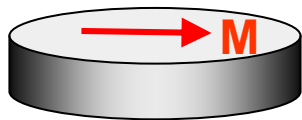
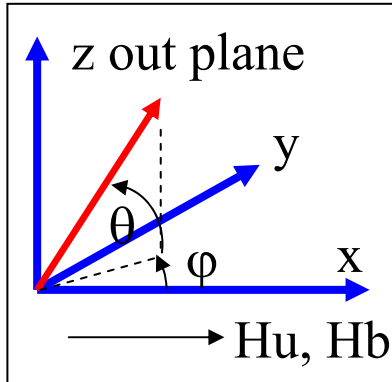
Résonateur Atténué

Auto-Oscillator



Agilité due à la non-linéarité de la fréquence avec l'amplitude d'oscillation

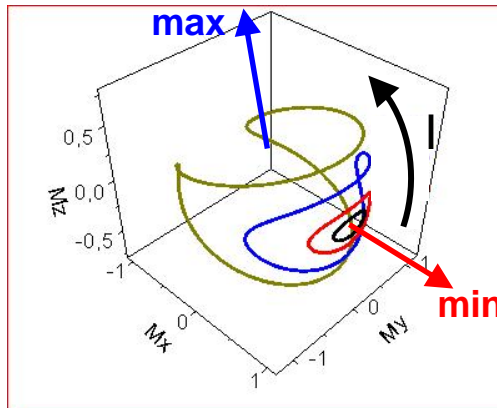
In-plane film



$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}(\mathbf{M})]$$

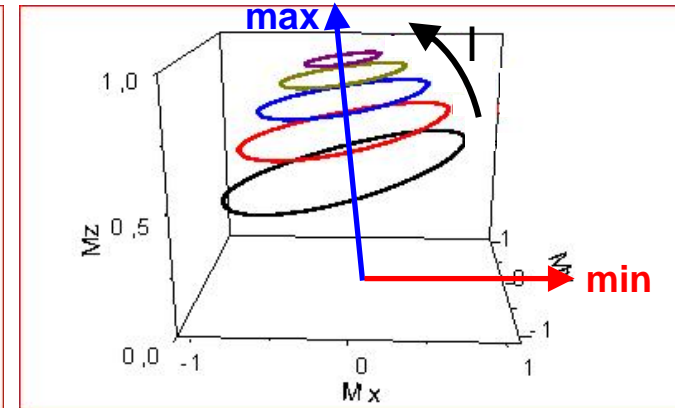
Non-linéaire

In-Plane Precession IPP

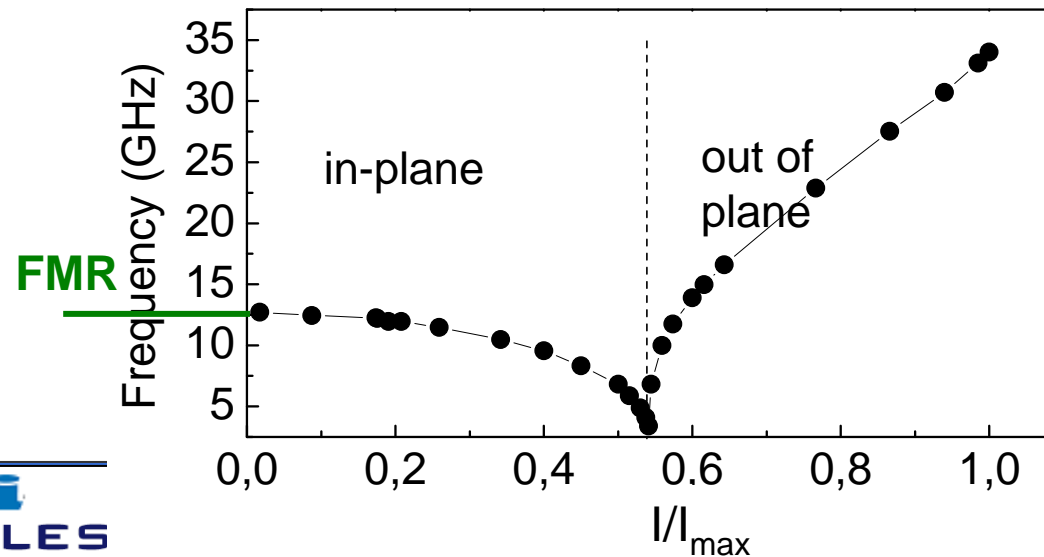


Oscillation around energy minimum

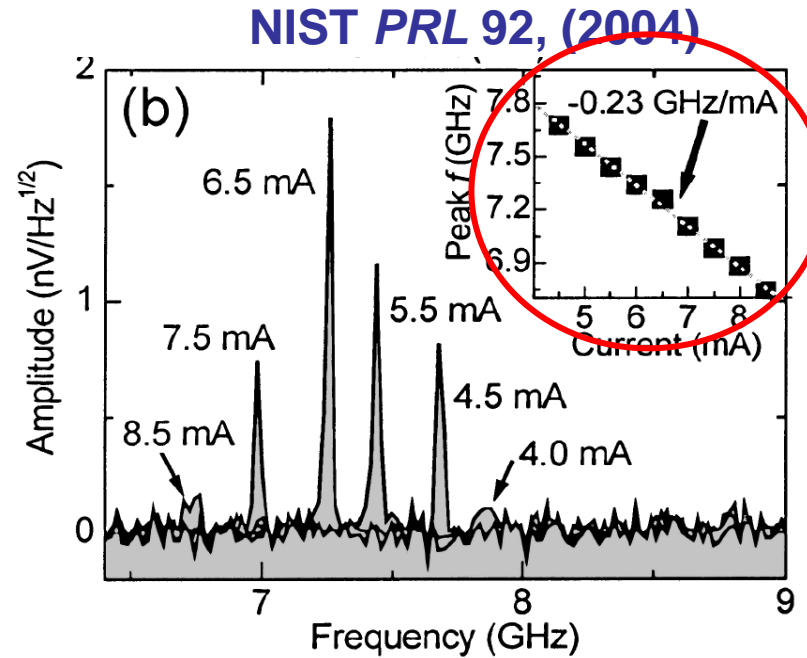
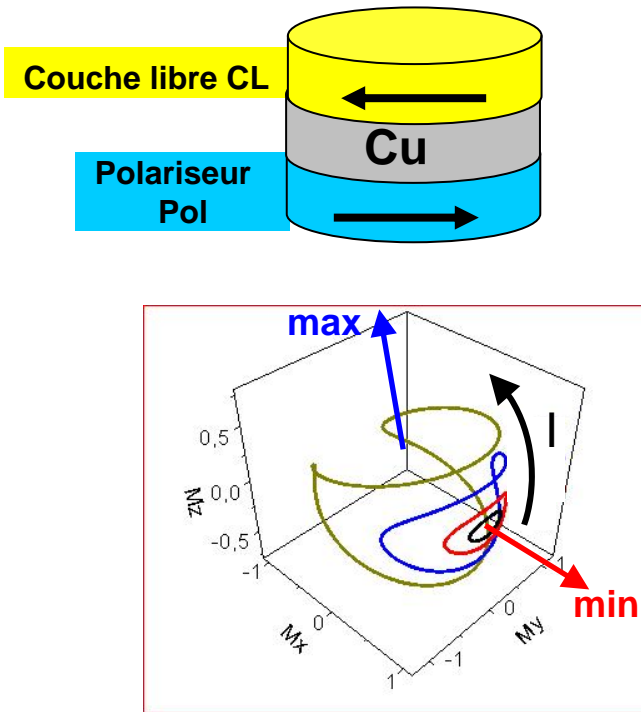
Out of Plane Precession OPP



Oscillation around energy maximum



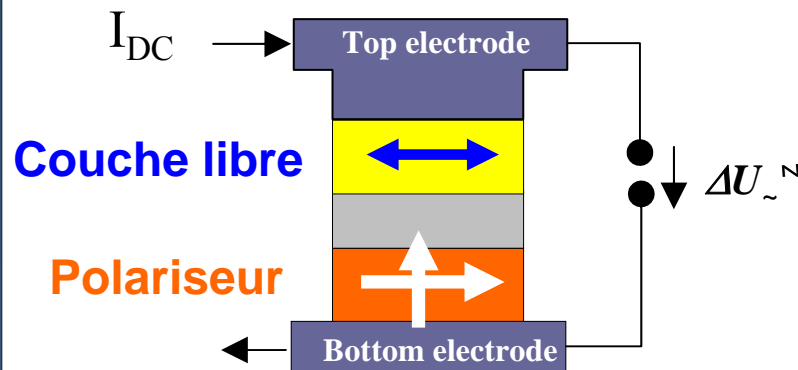
Vanne de Spin (VS) Planaire → Stabilisation des modes IPP



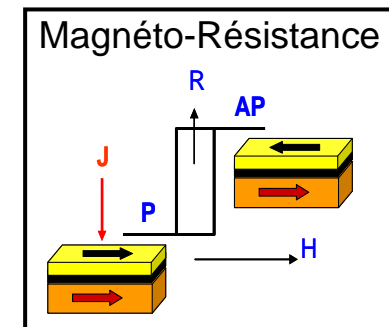
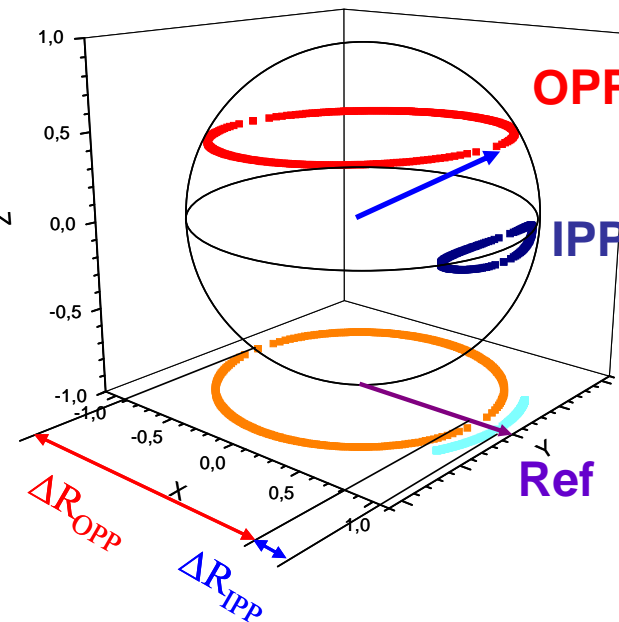
La fréquence baisse en augmentant le courant

OPP: Augmentation Amplitude d'oscillations

Signal de Sortie



$$\Delta U \propto \Delta R \cdot I_{DC}$$



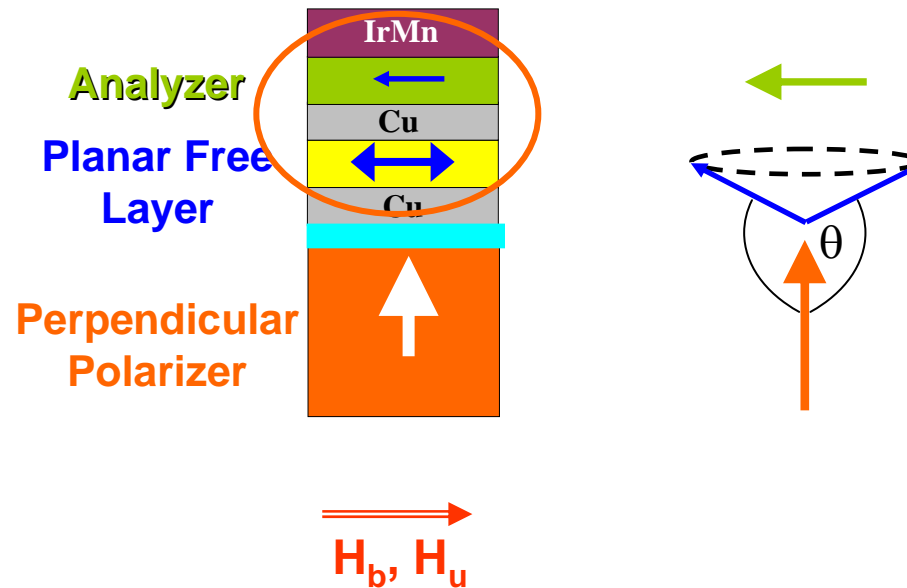
Deux stratégies:

Polariseur perpendiculaire et structures « wavy »

→ Oscillations de type OPP

→ Oscillations en champ nul

STO à Polariseur Perpendiculaire

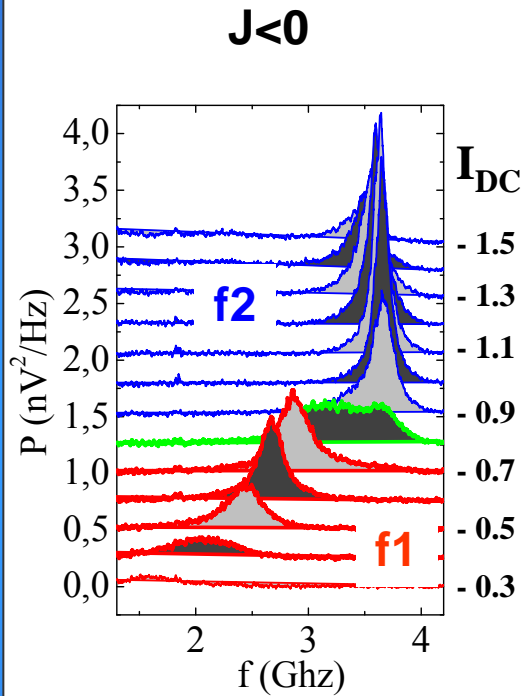


Pt / (Co/Pt)₅/Co_{laminated}1.6/Cu4/Py3/Cu3/Co3/IrMn5

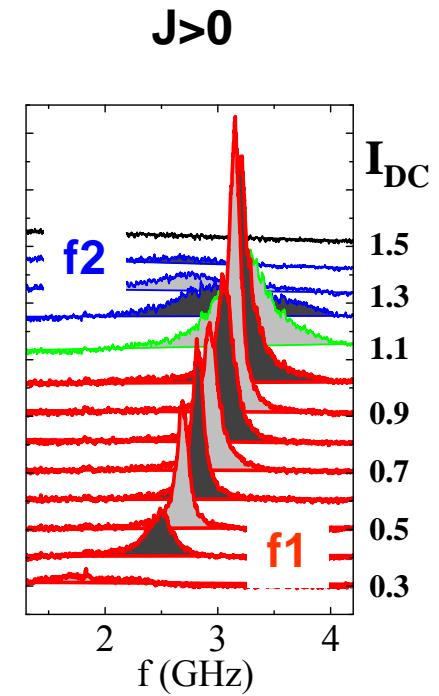
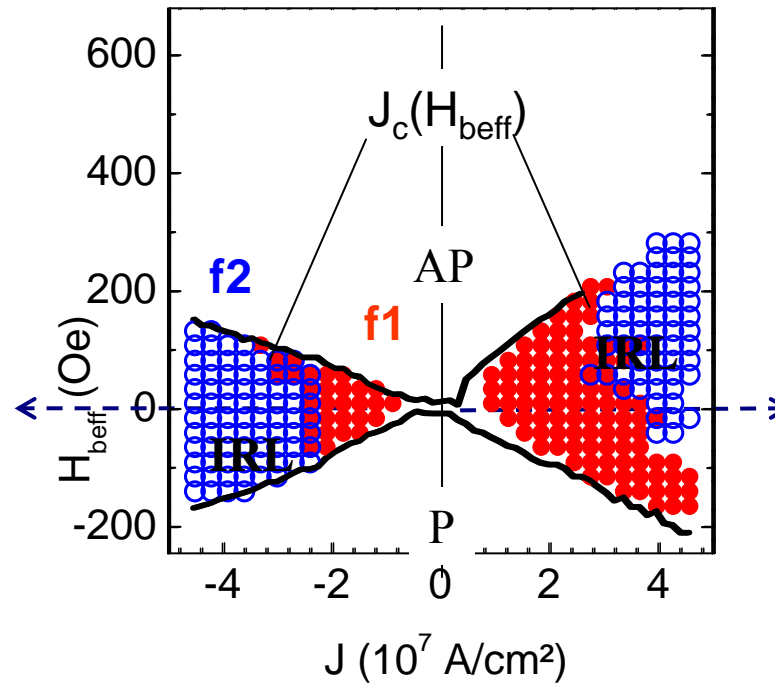
Co_{laminated} = Co0.8/Cu0.3/Co0.8*

*Delille, F. *et al.* JAP 100, 13912 (2006)

D. Houssameddine et al. Nature Materials 6, 447 (2007)



$H_{\text{beff}} = 9 \text{ Oe}$



$H_{\text{beff}} = 9 \text{ Oe}$

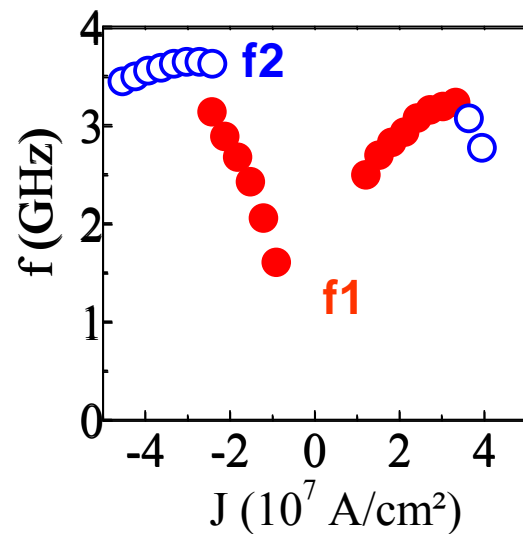
$df/dI = 3 \text{ GHz/mA}$

- Emission RF dans une certaine gamme de courants et champ
 - Emission en champ nul

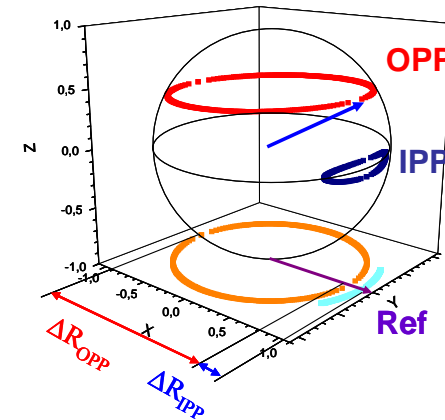
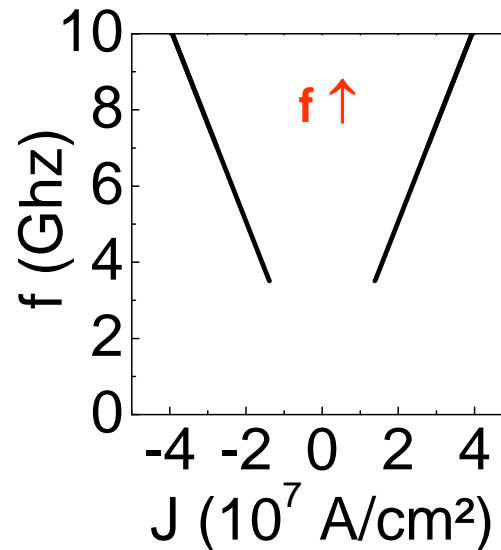
Fréquence vs. courant

*U. Ebels et al ,
PRB 78 024436 (2008)

Expérience



Simulation Macrospin*



- f1 en accord avec simulations macrospin et mode OPP

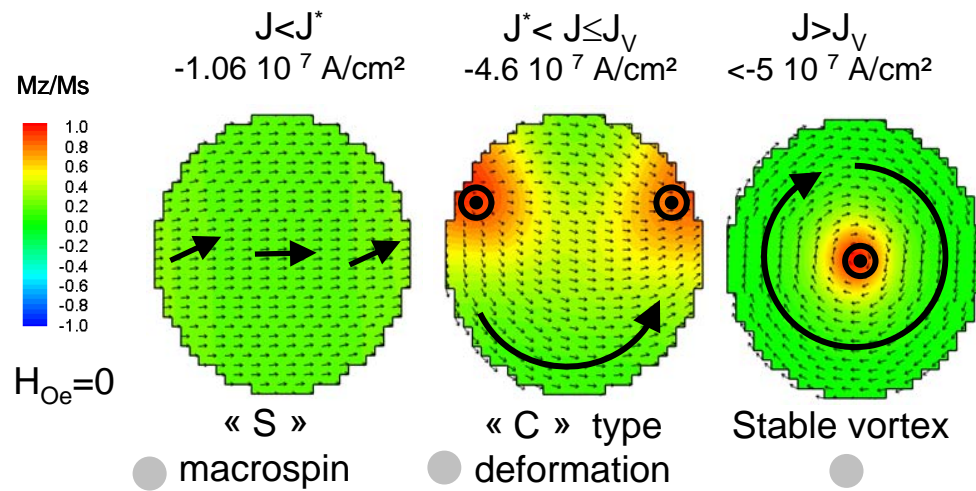
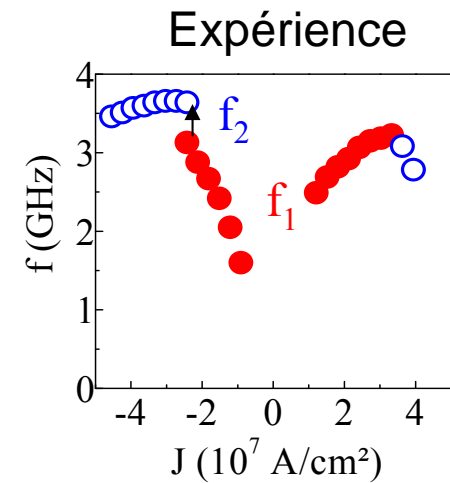
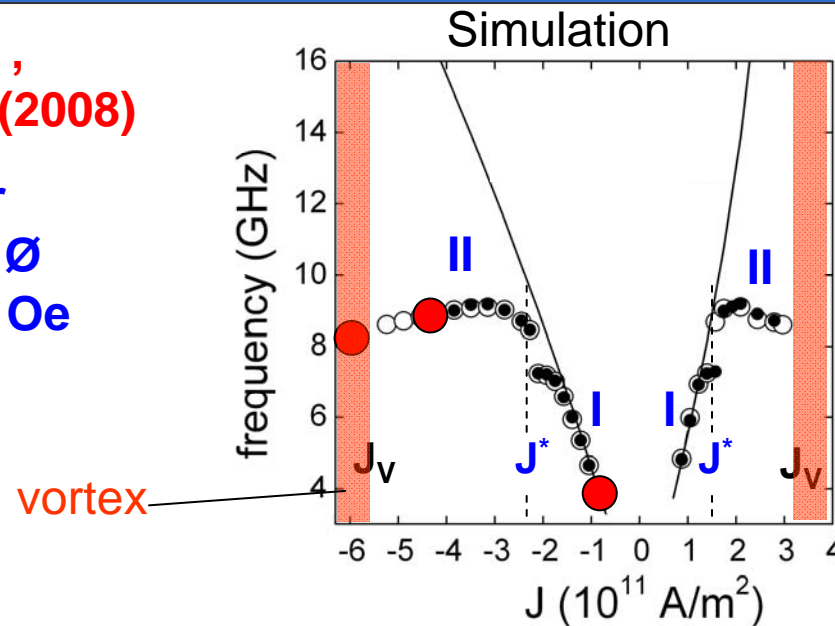
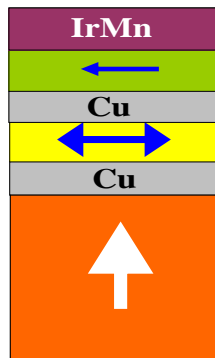
- f2 OPP non-macrospin

I. Firastrau et al ,
PRB 78 024437 (2008)

Simulations pour

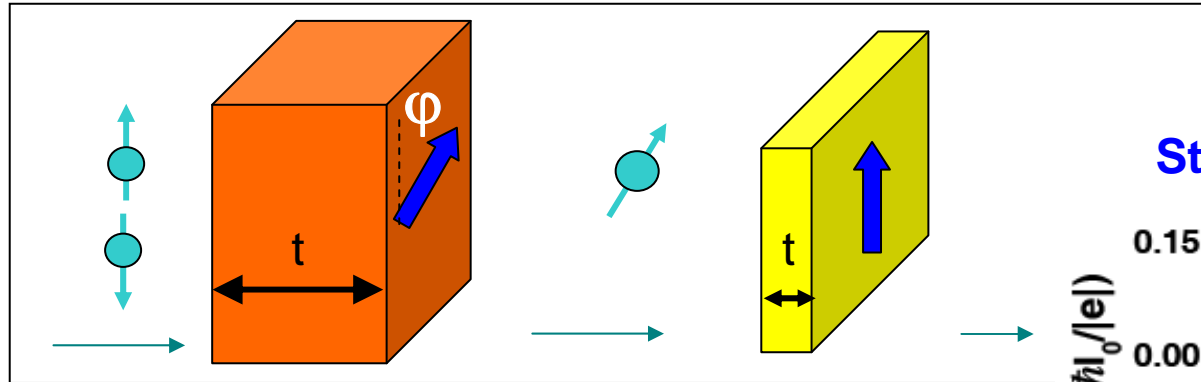
- cerceled 60 nm Ø
- $H_u=15$ Oe, $H_b=0$ Oe
- $\alpha=0.01$

- Macrospin
- no H_{Oe}
- with H_{Oe}



Couche Polariseur

Couche Libre



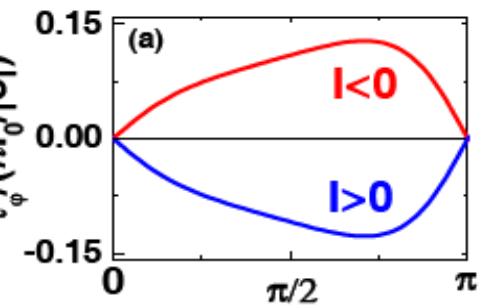
« Standard » $t > l_{sf}$
polarisation régie par polariseur

« Wavy » $t < l_{sf}$
excitation régie par couche libre

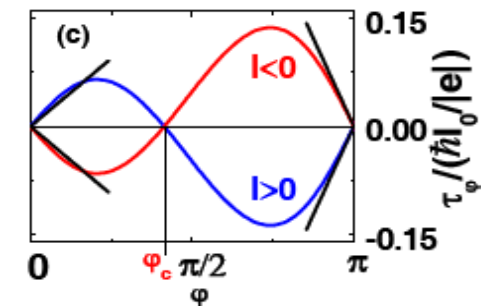
$t < l_{sf}$

$t > l_{sf}$

Structures standard



Structures « wavy »



Fert, A. et al. *J. Magn. Magn. Mater.* 272 (2004)
Barnas, Fert et al., *PRB* 72 (2005)

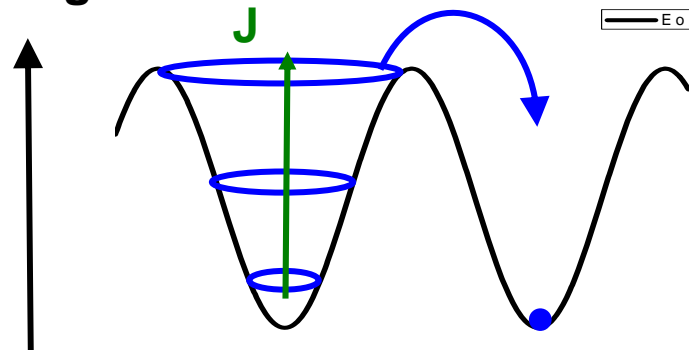
Structure wavy: oscillations OPP en champ nul

$H_{app}=0$

Standard

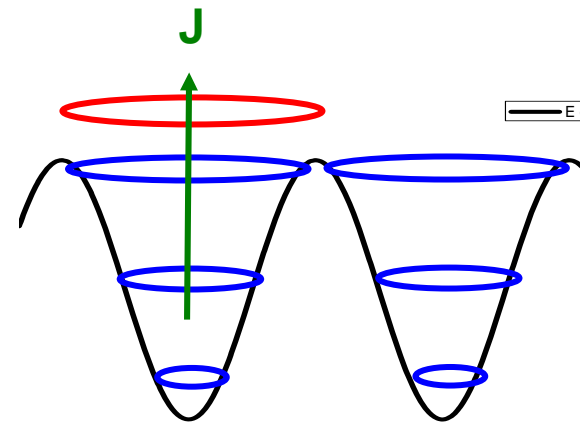
« Wavy »

Energie



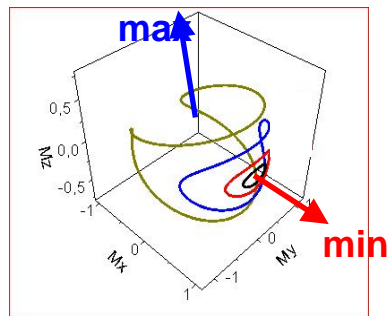
P nonstable stable AP

OPP

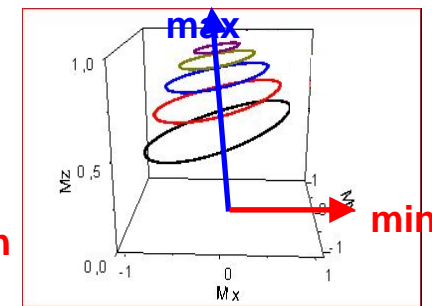
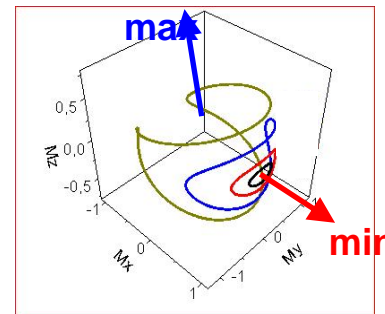


P nonstable nonstable AP

IPP → Renversement



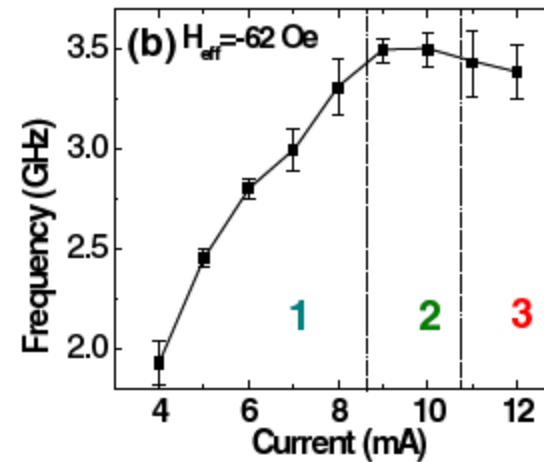
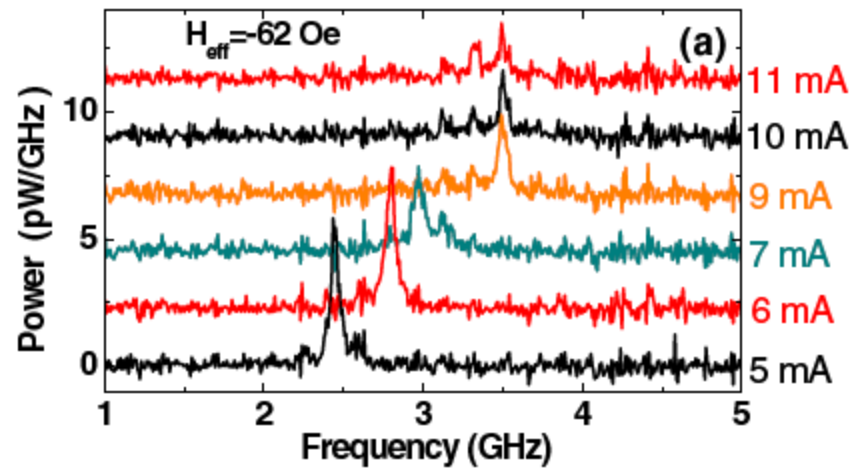
IPP → OPP



O. Boulle PRB 2008

Structure wavy: Validation expérimentale

O. Boule Nature Physics 2007

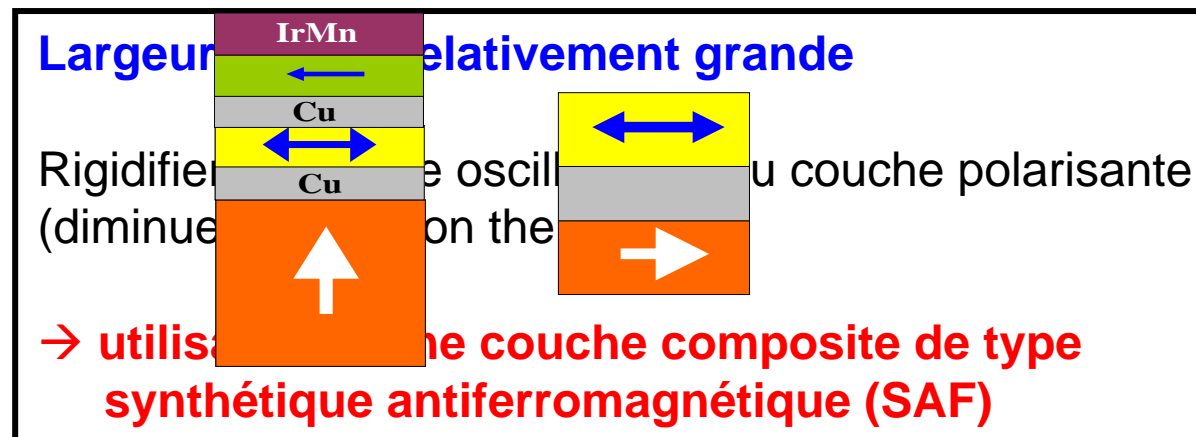


Fréquence augmente avec le courant → Modes OPP à amplitude maximale

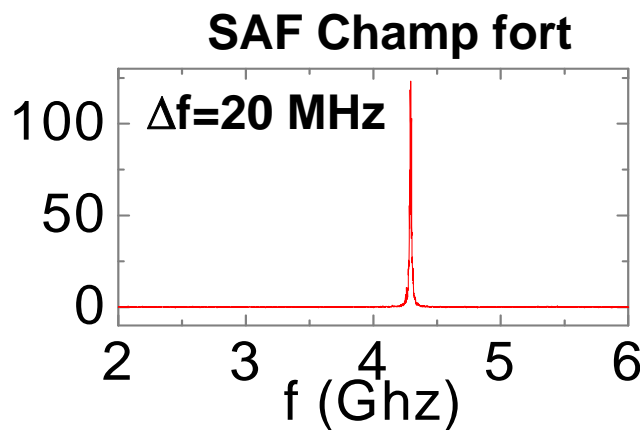
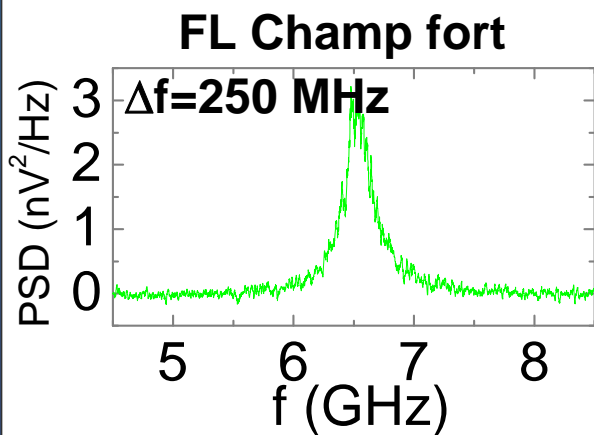
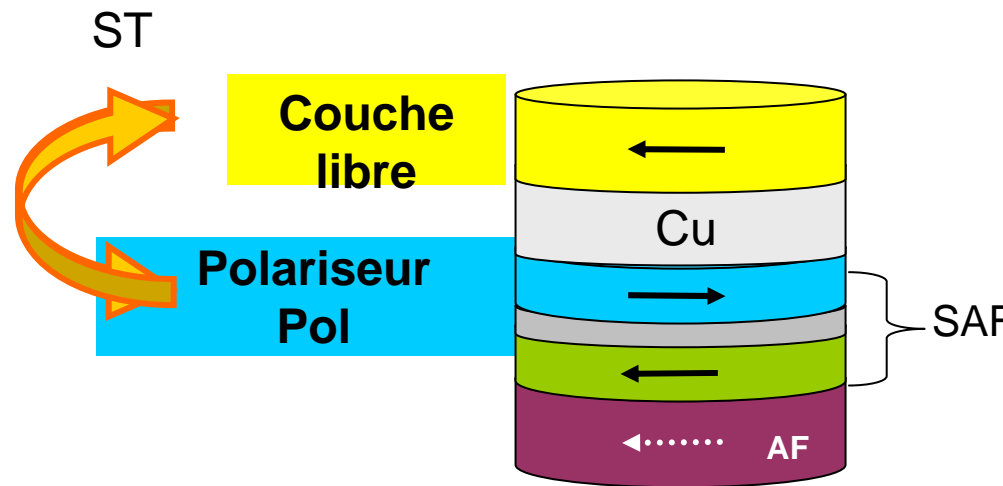
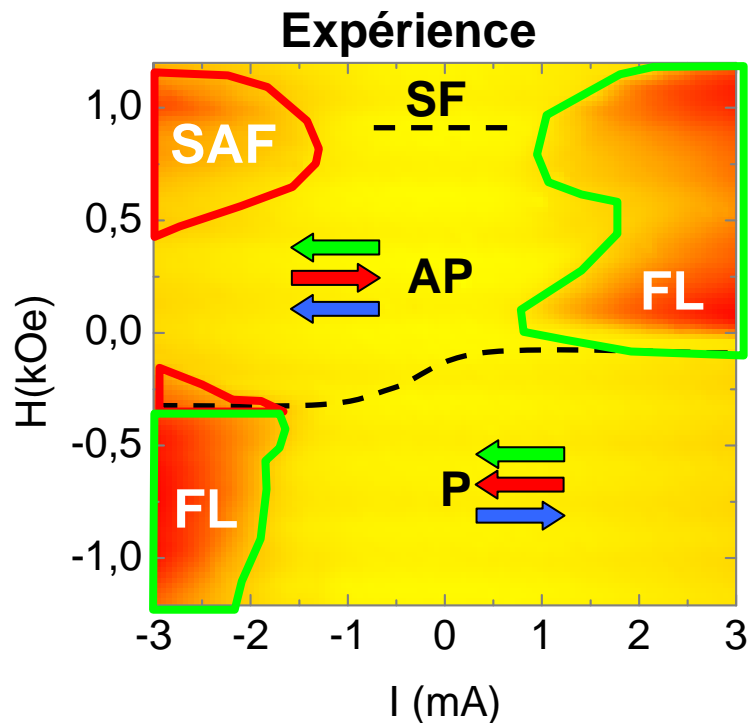
Résumé des Spécifications

Polariseur perpendiculaire et structure wavy = deux stratégies pour établir des oscillations en champ appliqué nul et de type OPP (optimisation de l'amplitude d'oscillations)

	Puissance (50Ω)	Δf	I _{PP} /O _{PP}	champ nul	df/dI
SV Wavy	-86dBm/2.7pW	100 MHz	I/O	oui	0.7GHz/mA
SV PolPerp	-80dBm/10pW	70 MHz	O	oui	3GHz/mA



Spin valves avec SAF



SAF:
Excitations à forte amplitude et à faible Δf

Résumé des Spécifications

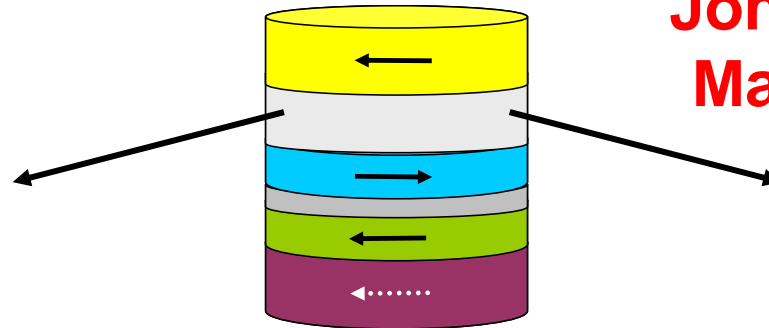
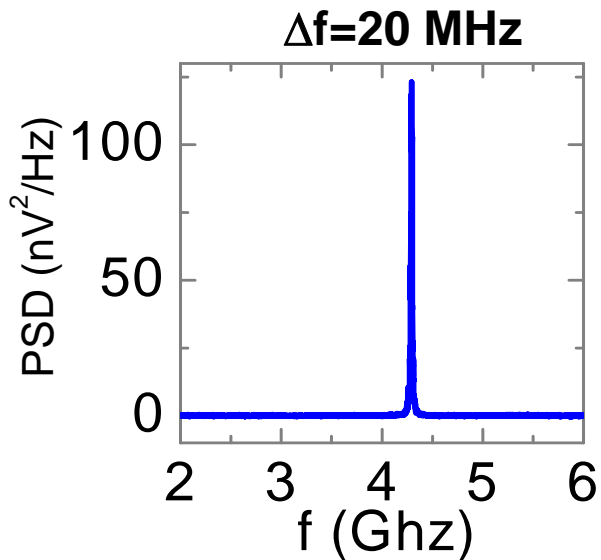
	Puissance (50Ω)	Δf	I/PP/O/PP	champ nul	df/dI
SV Wavy	-86dBm/2.7pW	100 MHz	I/O	oui	0.7GHz/mA
SV PolPerp	-80dBm/10pW	70 MHz	O	oui	3GHz/mA
SV SAF	-73 dBm/15pW	16 MHz	I/O	non	0.4GHz/mA

→ Largeur de raie à améliorer par une couche composite SAF

Vanne de spin

Cu

MR VS
1%

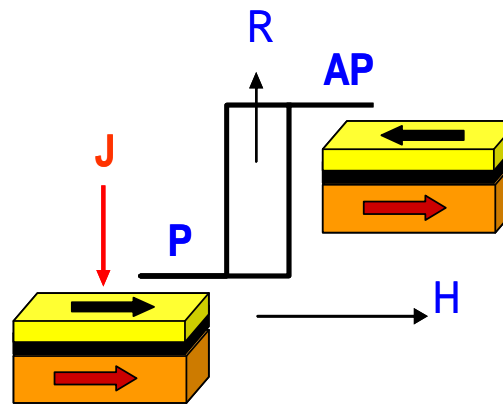


Jonctions Tunnel Magnétique MTJ

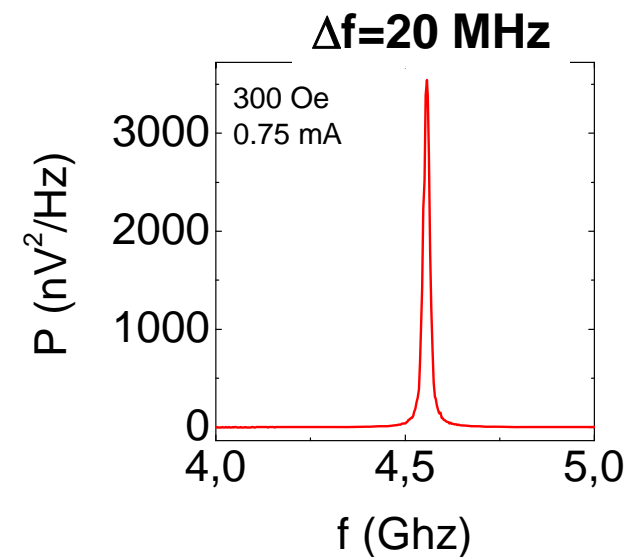
MgO

MR MTJ
30-100%

Magnéto-Résistance MR



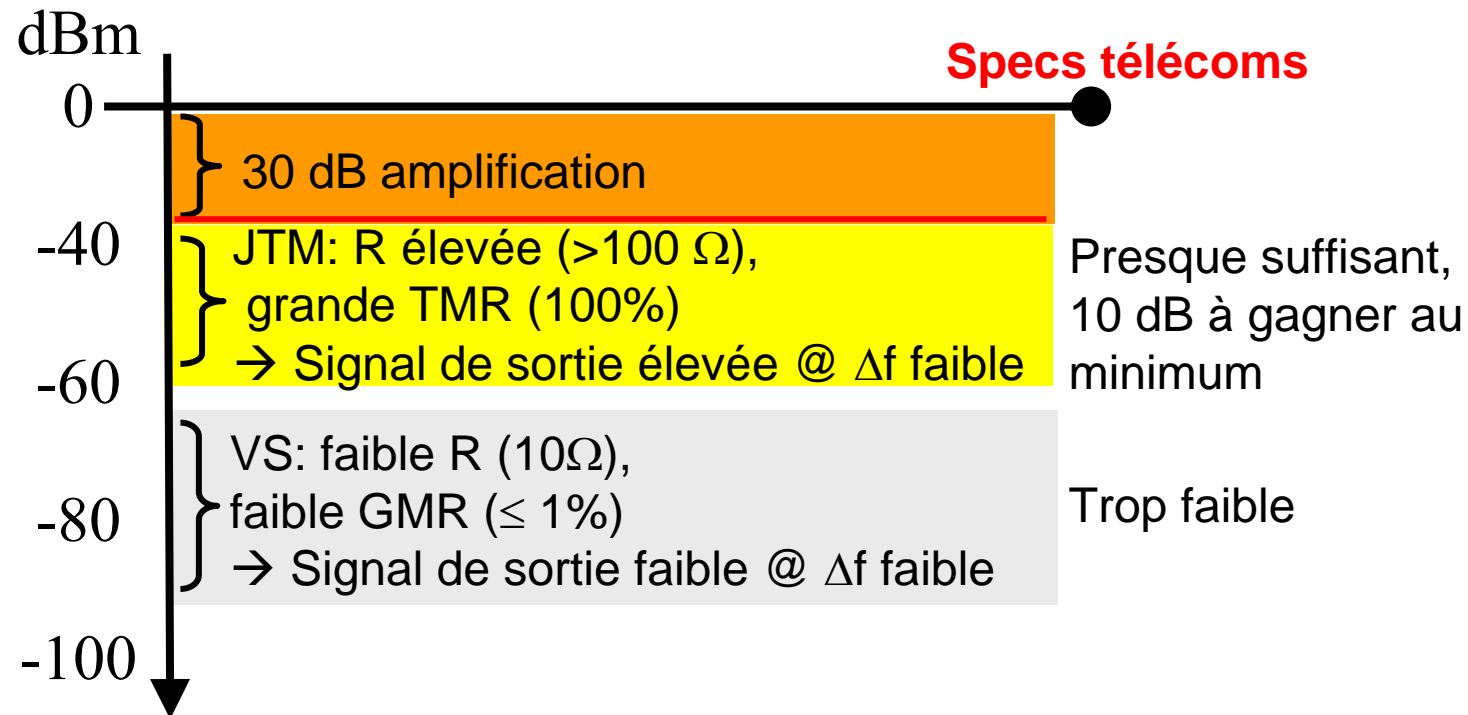
$$\Delta U \propto \Delta R \cdot I_{DC}$$



Puissance de sortie → Jonctions tunnels

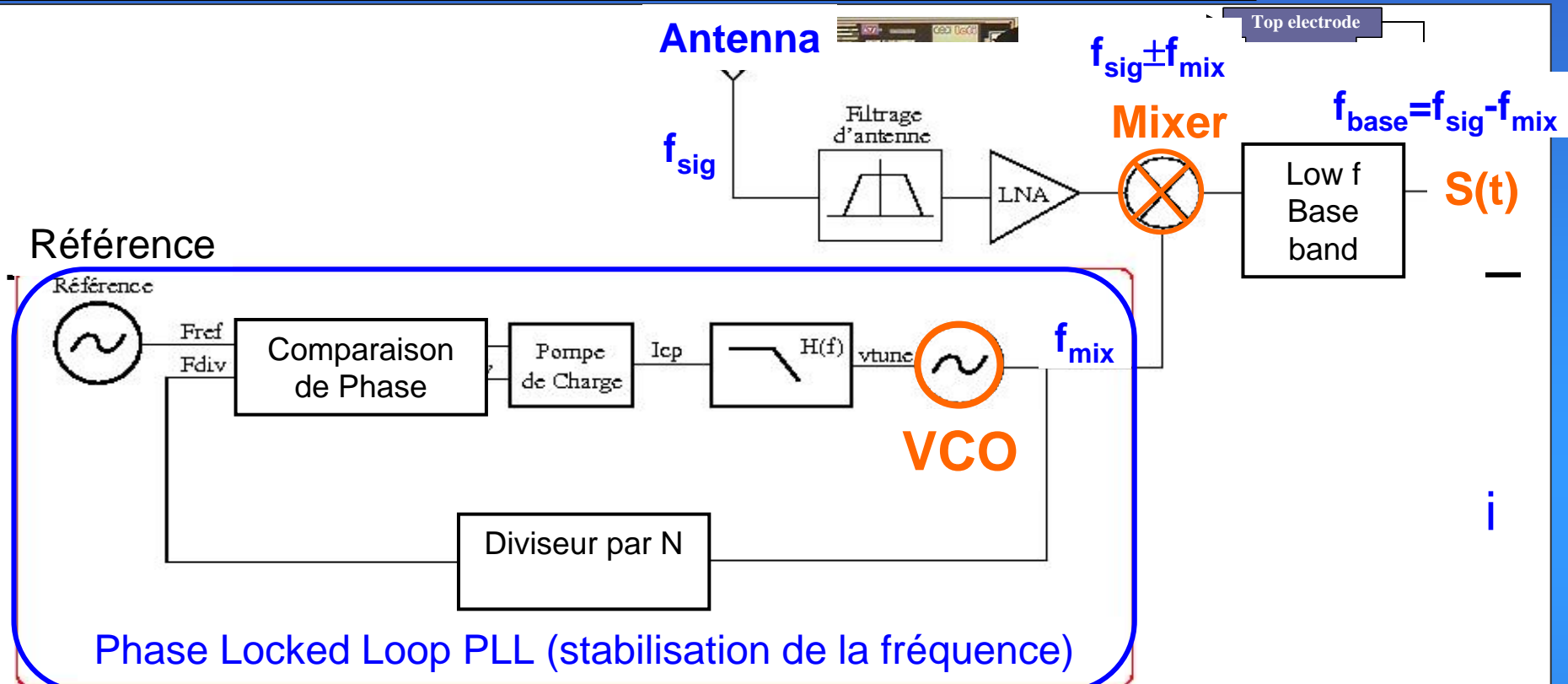
Résumé des Spécifications

	Puissance (50Ω)	Δf	I _{PP} /O _{PP}	champ nul	df/dI
SV Wavy	-86dBm/2.7pW	100MHz	I/O	oui	0.7GHz/mA
SV PolPerp	-80dBm/10pW	70 MHz	O	oui	3GHz/mA
SV SAF	-73 dBm/15pW	16 MHz	I/O	(non)	0.4GHz/mA
JT FL	-46dBm/16nW	10MHz	I	(non)	0.4 à 1.6GHz/mA



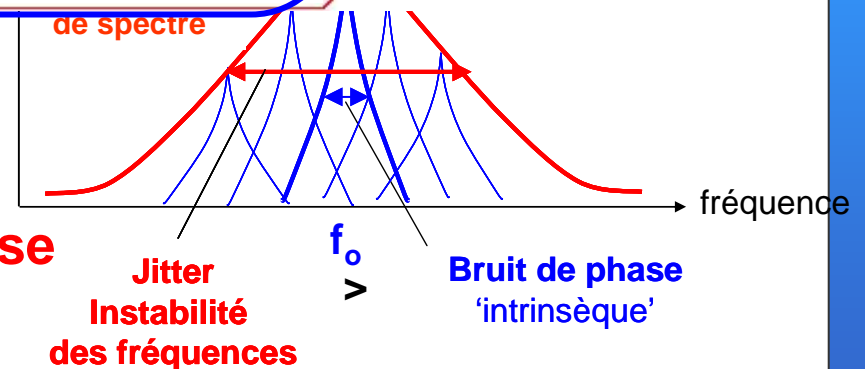
Augmentation de la puissance

- combinaison des différentes stratégies discutées
- couplage des oscillateurs
- adaptation de l'impédance de l'amplificateur à celui de l'oscillateur (R~100 – 500 Ω JT)



**STO: minimum valeur pour Δf ?
Le plus petit que possible?**

- À tester par mesures de bruit de phase
- Insertion de l'oscillateur en un PLL



Oscillateur spintronique

- * Combinaison de deux effets

- 1) Transfert de spin: compensation de pertes énergétiques du résonateur magnétique ce qui mène à des oscillations entretenues à grande amplitude
- 2) Magnéto-résistance : traduit les oscillations en un signal électrique

- * Oscillateur non-linéaire: fréquence dépend de l'amplitude et avec cela du courant → fréquence accordable par le courant

- * Deux stratégies en variant les empilements magnétiques afin de réaliser des oscillation en champ appliqué nul et à amplitude maximale (OPP)

- * Utilisation des couches composites (SAF) pour diminuer la largeur de raie

- * Utilisation de jonctions tunnel à grande TMR (et faible RA) → signal de sortie proche aux valeurs compatibles avec différents standards

- * A faire: caractérisation du bruit de phase afin de définir les applications potentielles → meilleure compréhension de la largeur de raie