

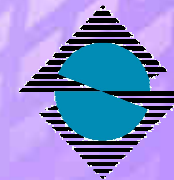


Antennes refroidies en IRM: Principes généraux et applications biomédicales.

Jean-Christophe Ginefri

Imagerie par **R**ésonance **M**agnétique **M**édicale et **M**ulti **M**odalités

UMR 8081, CNRS/Université Paris XI, Orsay FRANCE



L'IRM :

- ◆ Outil clinique

 - Fonctionnelle, anatomique, physiologique
 - Non-invasive
 - Etudes longitudinales

- ◆ Performances de l'IRM

 - Rapport signal sur bruit (RSB) } Qualité de l'image
 - Résolution spatiale, Voxel (V_0) }
 - Temps d'acquisition (t_{acq})

- ◆ IRM clinique

 - V_0 : quelques mm^3
 - T_{acq} : quelques minutes
 - RSB : quelques dizaines



De l'IRM clinique à la microscopie RMN :

- ◆ Chez l'Homme:

Dermatologie, oncologie, rhumatologie
angiographie, neuroscience

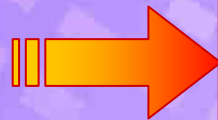
- ◆ Petit animal

Homme → Souris : Structure / 1000

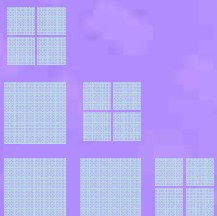
➤➤ Microscopie

Voxel $< (100\mu\text{m})^3$

Conserver un RSB élevé et un temps d'examen court



Limite de sensibilité
de la détection RMN



Le Rapport Signal sur Bruit :

$$\frac{RSB}{V_0 \sqrt{t_{acq}}} \propto \frac{(B_1/I) M_T}{\sqrt{R_{eq} T_{eq}}} \frac{1}{\sqrt{b_w}} \sqrt{\frac{1}{t_R}}$$

→ Améliorer les séquences d'acquisition

→ Augmenter le champ statique B_0

→ Augmenter l'aimantation détectée

→ Améliorer la sensibilité de l'antenne RF

Le facteur de sensibilité :

$$S_{RF} \propto \frac{(B_1/I)\omega}{\sqrt{R_i T_i + R_a T_a}}$$

Signal RMN

- ◆ Fréquence : ω
- ◆ Taille : a^{-1} (surface)

Bruit induit par l'échantillon

- ◆ Fréquence : ω^2
- ◆ Taille : a^3 (surface)
 a^5 (volume)
- ◆ Conductivité : σ
- ◆ Température : T_i

Bruit interne à l'antenne

- ◆ Fréquence : $\omega^{1/2}$ (Cuivre)
 ω^2 (Supra)
- ◆ Taille : a^0
- ◆ Résistivité : ρ
- ◆ Température : T_a

➤➤➤➤ Dimension, température, matériaux

Gain en RSB, principe général:

➤ Réduire la taille de l'antenne

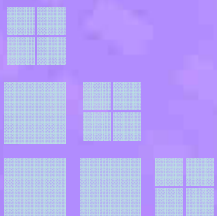
Si les pertes de l'échantillon sont dominantes

➤➤ Refroidir l'antenne

Si les pertes de l'antenne sont dominantes

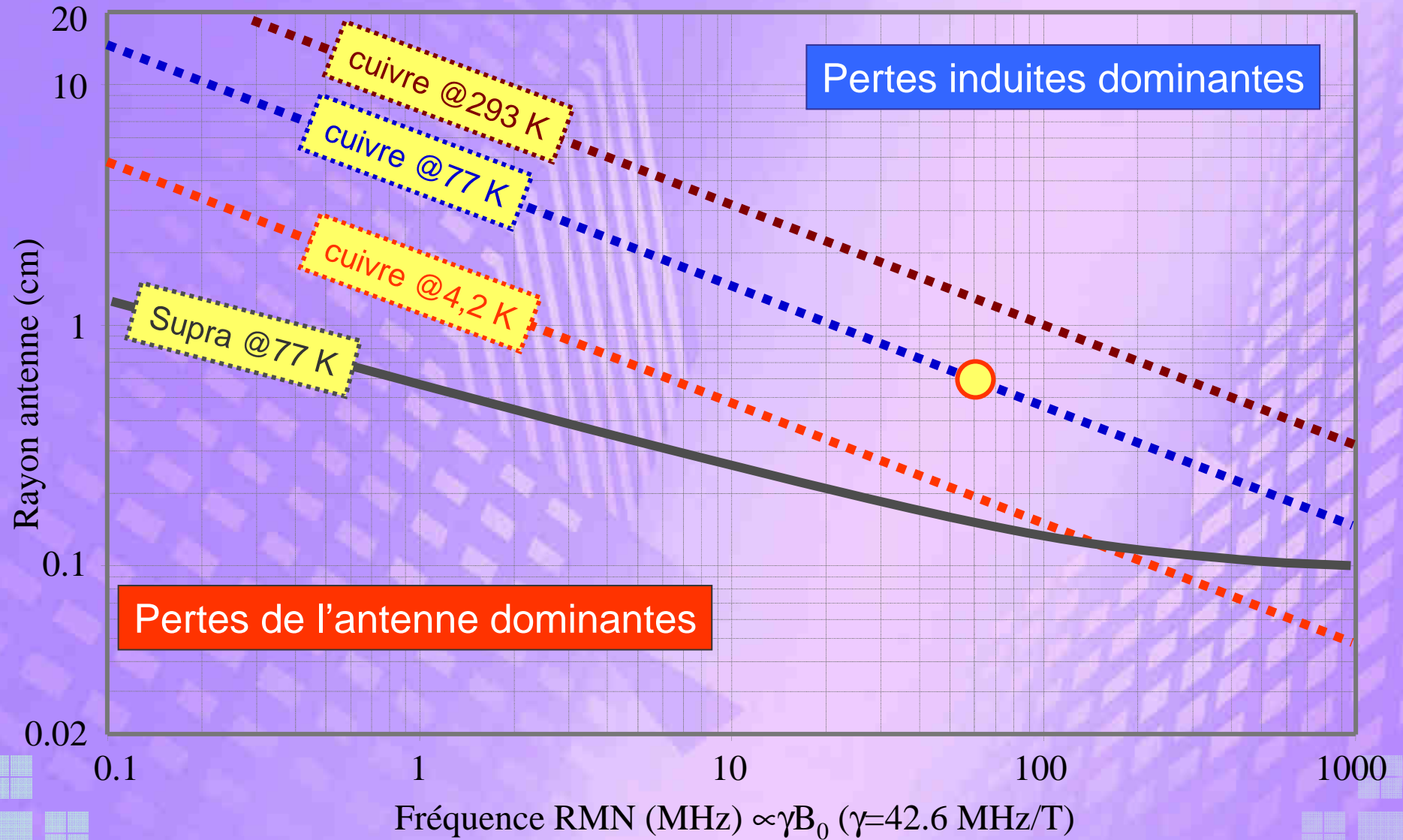
➤➤➤ Utiliser des supraconducteurs

Si les pertes d'une antenne cuivre à l'azote liquide sont dominantes.



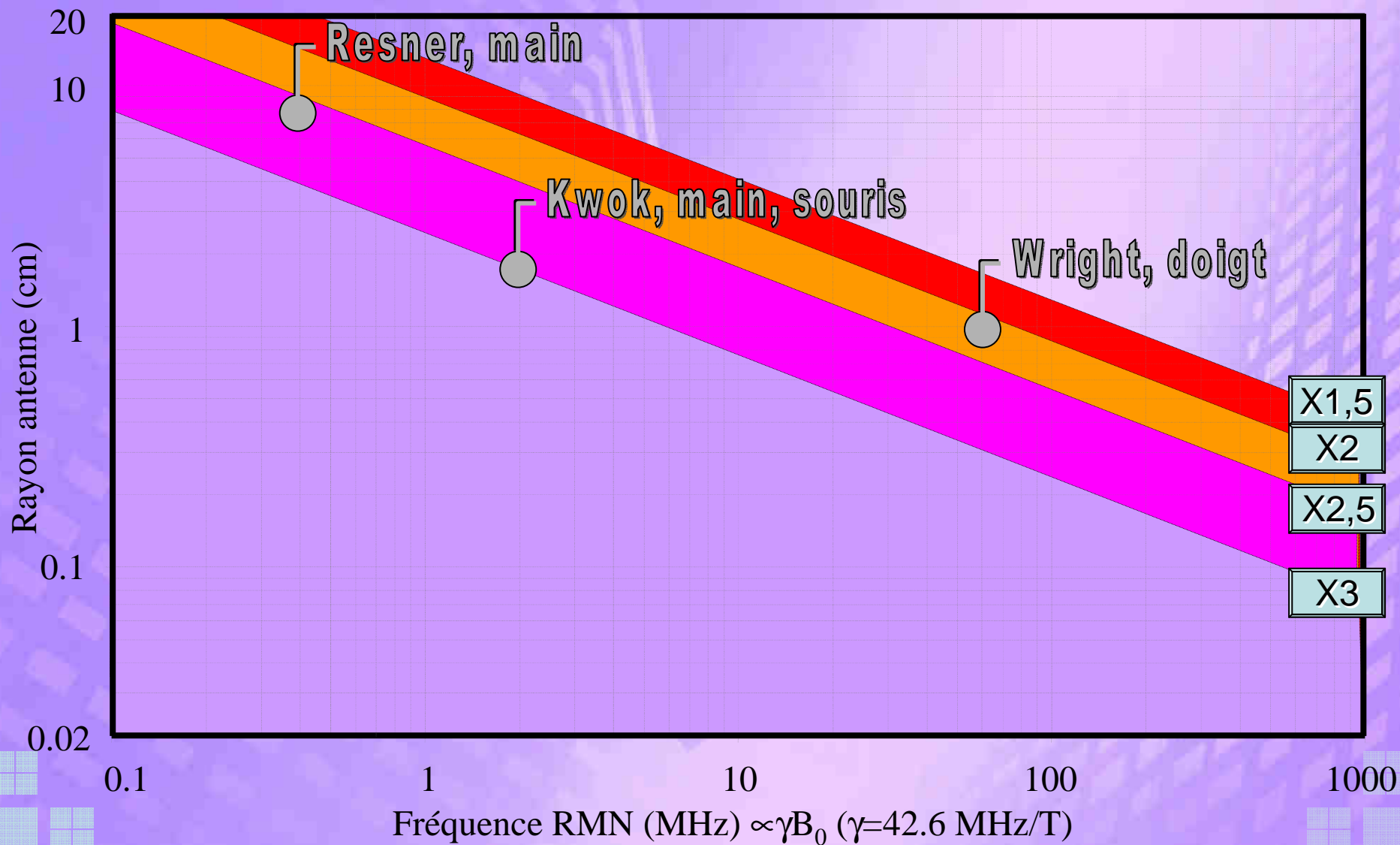
Domaines de bruit : Miniaturisation et refroidissement

Antenne de surface



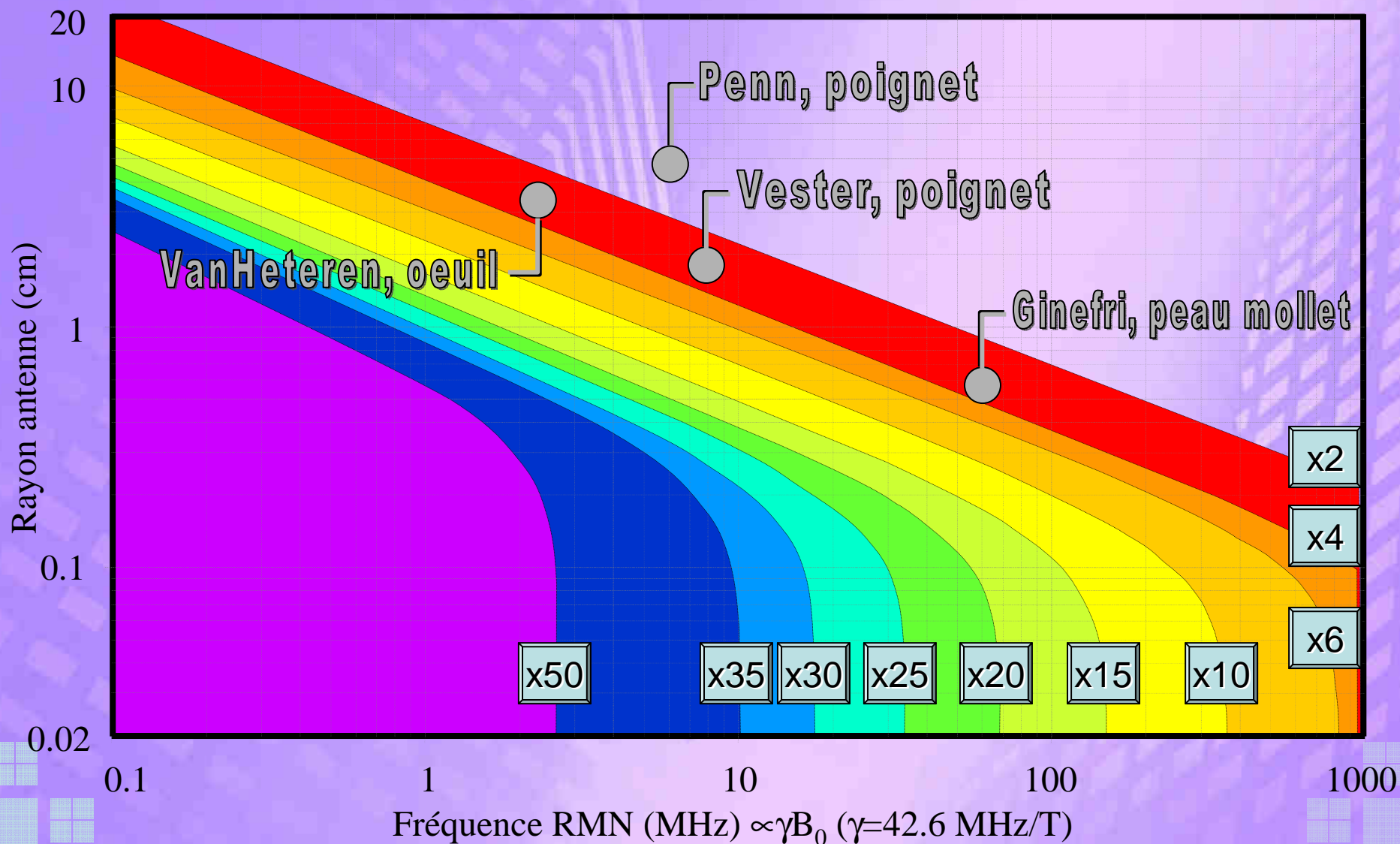
Gain en RSB, Cu(77K)/Cu(300K)

◇ Echantillon : même taille que l'antenne



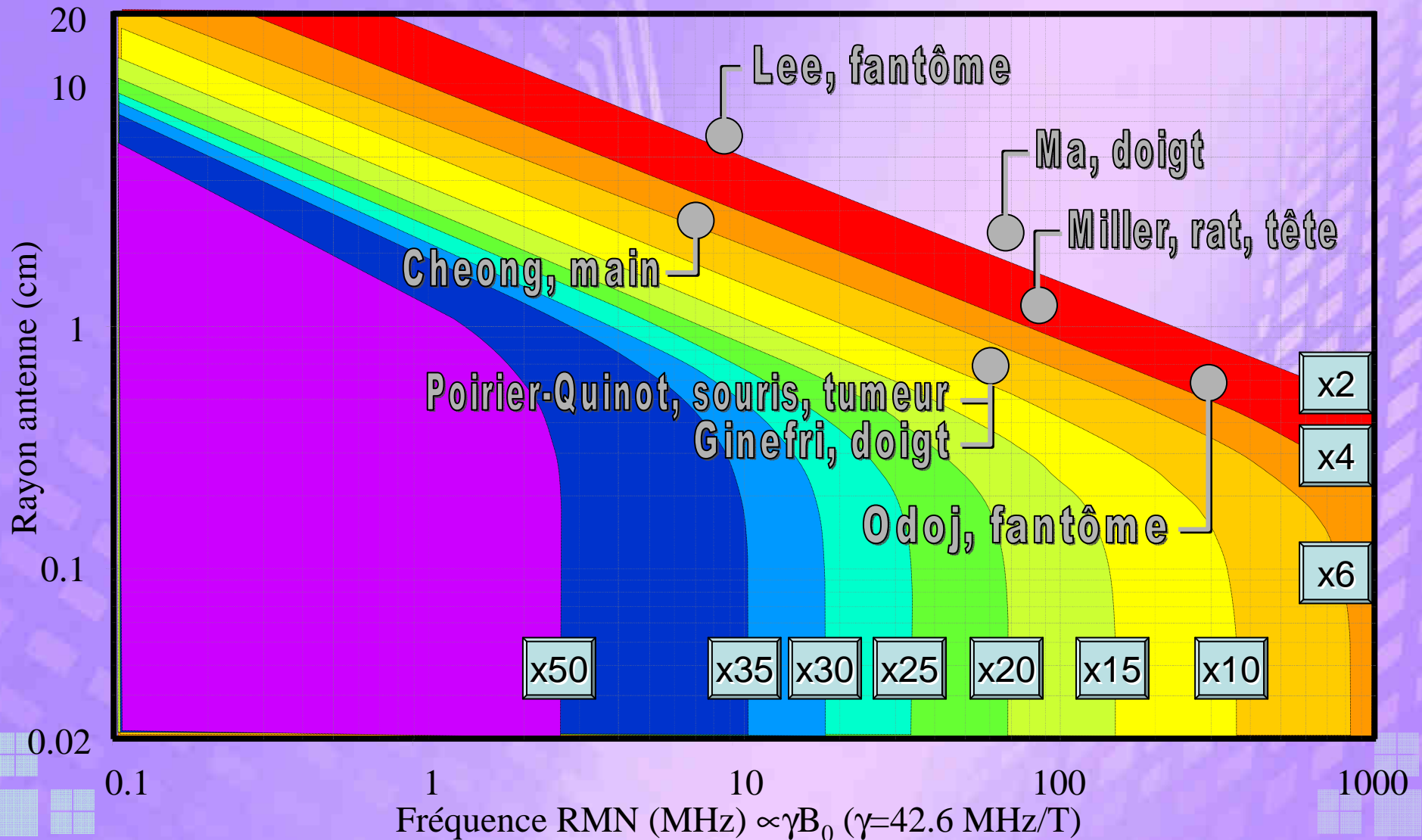
Gain en RSB, HTS(77K)/Cu(300K)

◇ Echantillon : semi-infini



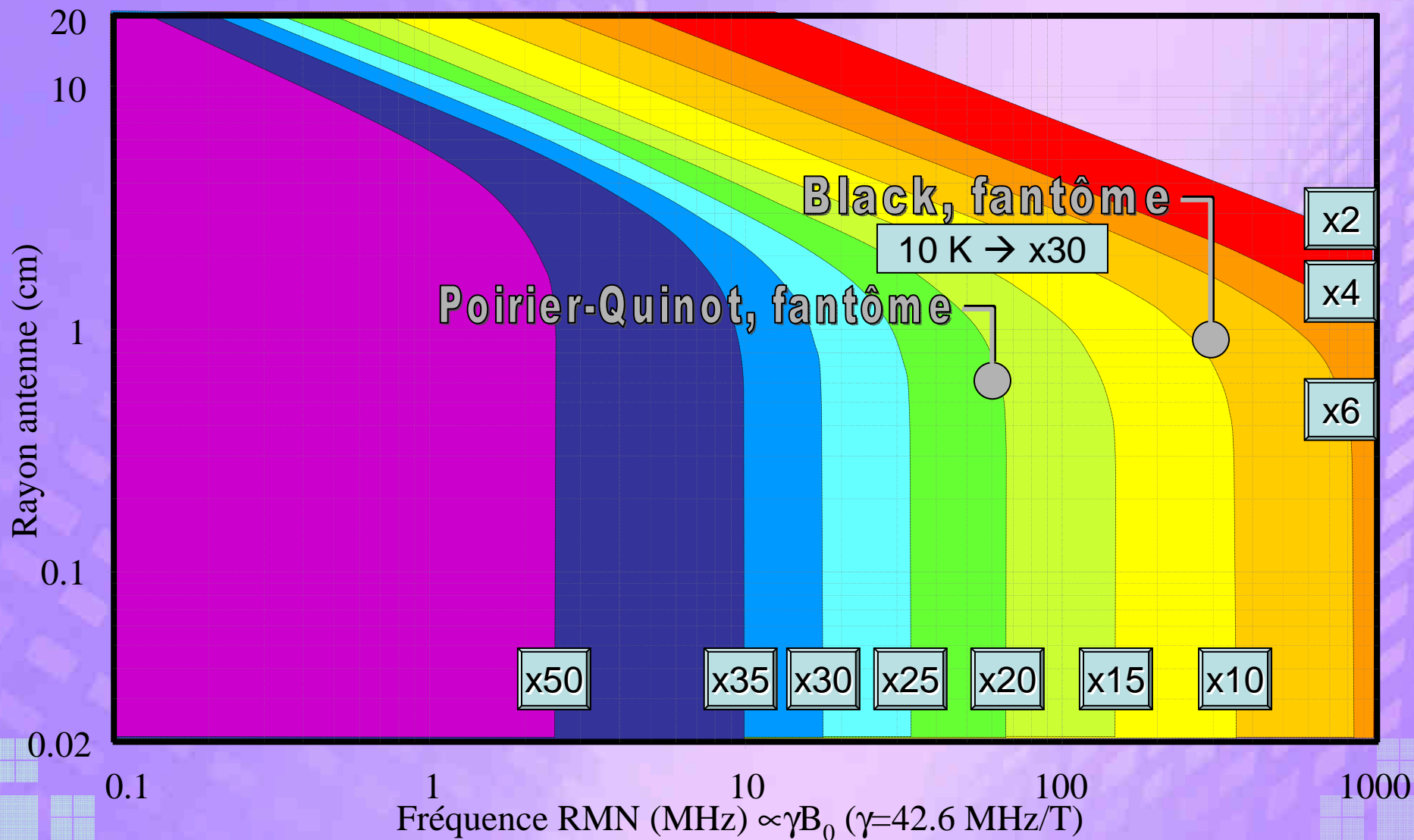
Gain en RSB, HTS(77K)/Cu(300K)

◆ Echantillon : même taille que l'antenne



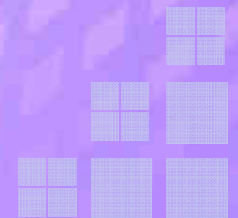
Gain en RSB, HTS(77K)/Cu(300K)

◇ Echantillon : non conducteur



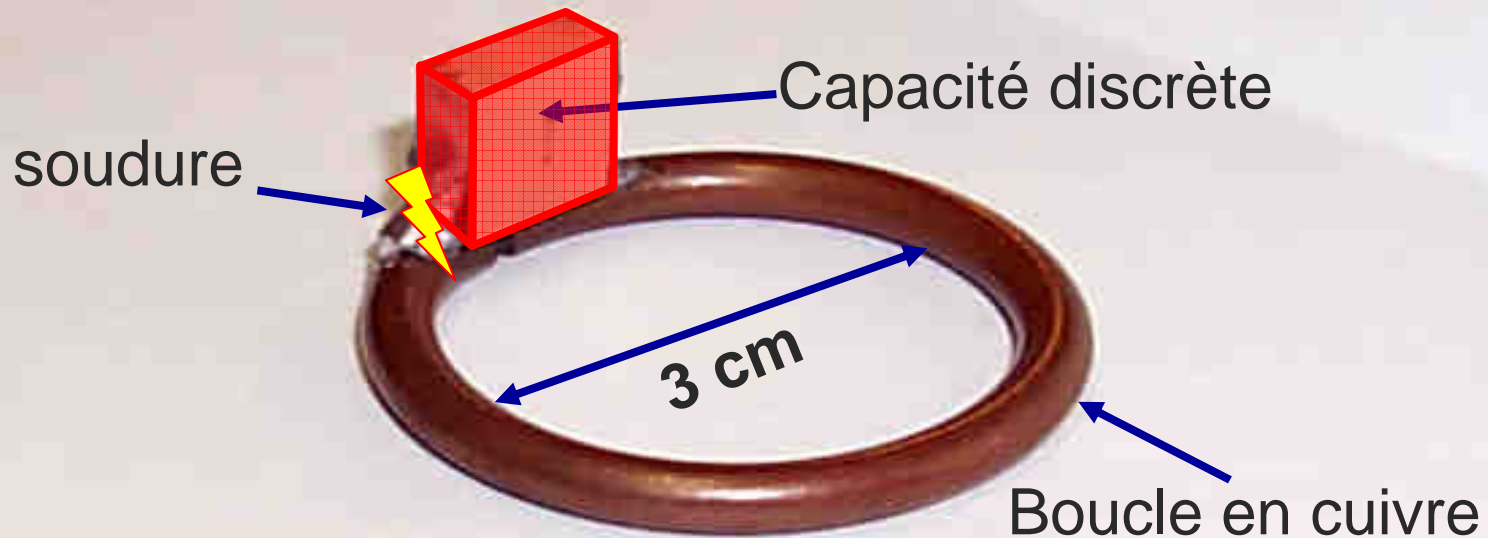
Les problèmes...

- Réduire la taille
- Refroidir
- Utiliser des supraconducteurs
- . . .



Miniaturisation : limites technologiques

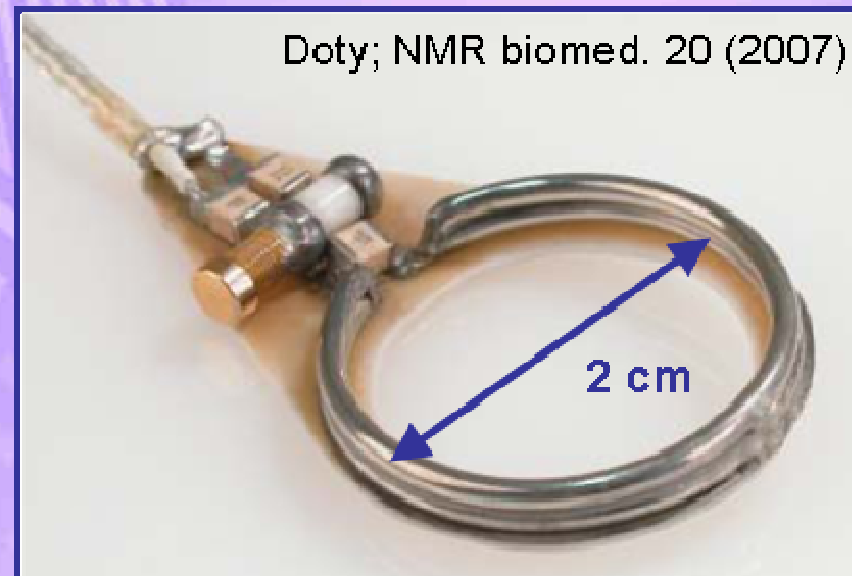
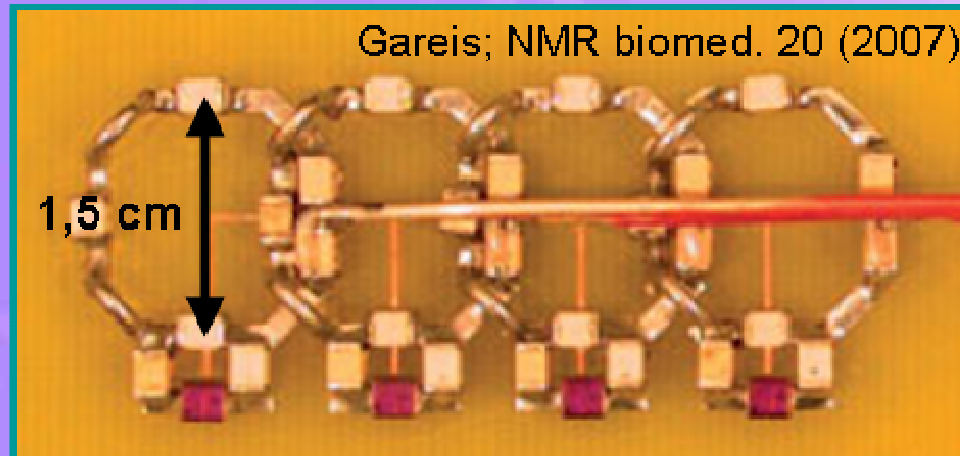
Antenne de surface standard pour l'IRM à 1.5 T



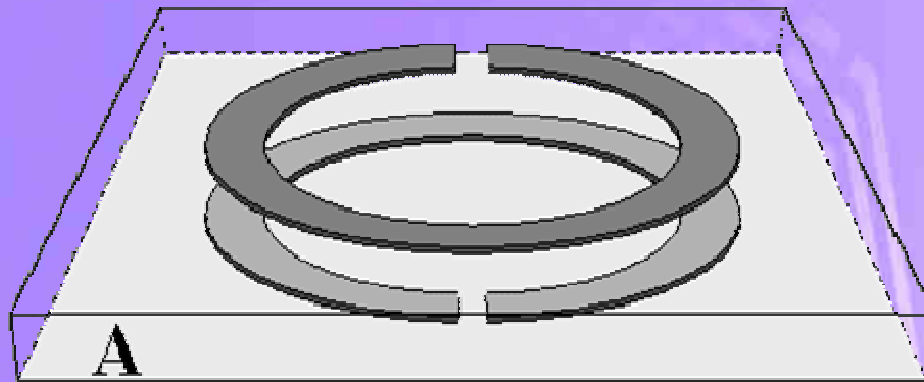
Miniaturisation

Capacité élevée: Encombrement
Lignes de champ électrique

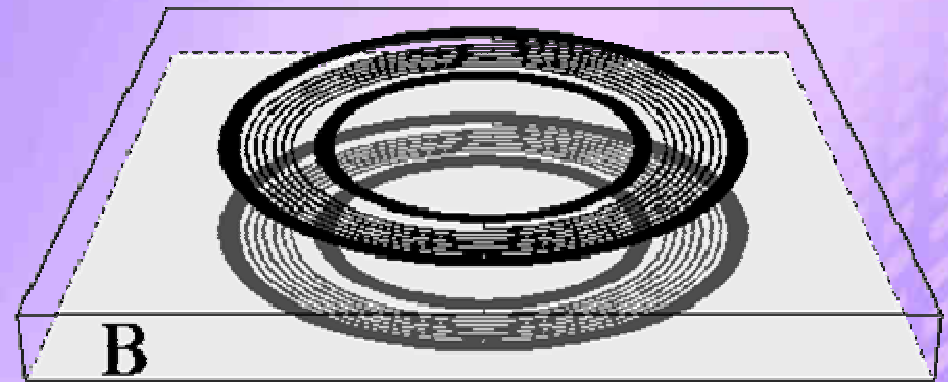
Miniaturisation : Antennes classiques



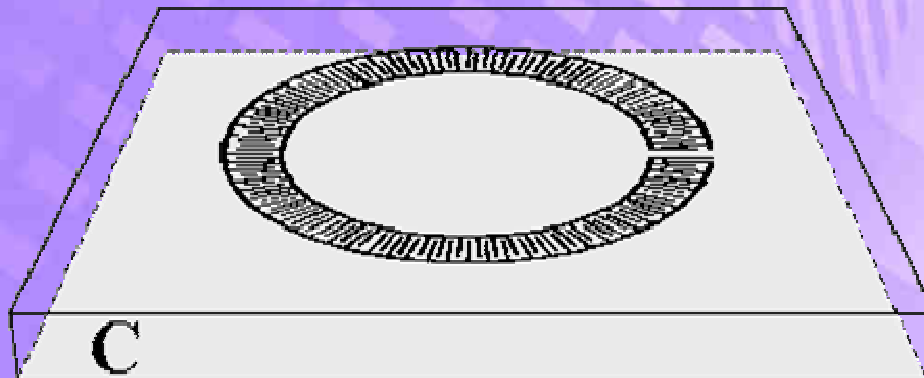
Miniaturisation : Designs monolithiques



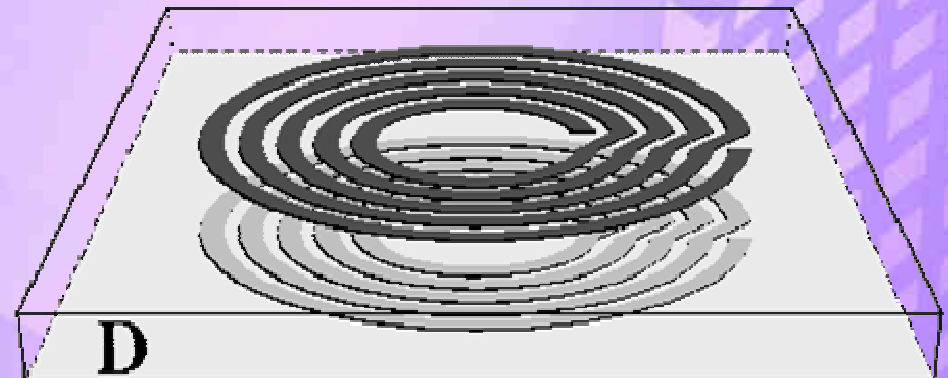
Ligne transmission



Anneaux capacitifs
+ Micro-inductance

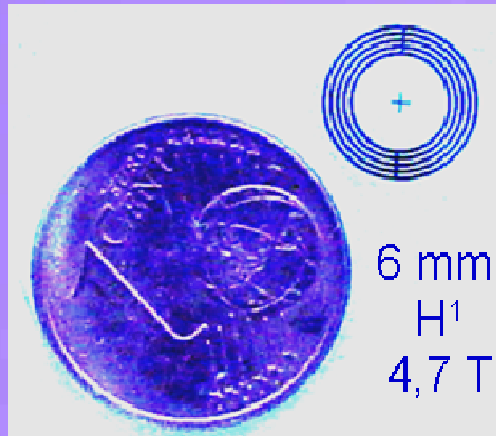


Anneaux inductifs
+ Capacités interdigitées

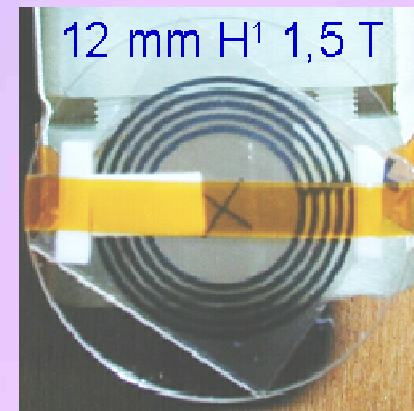
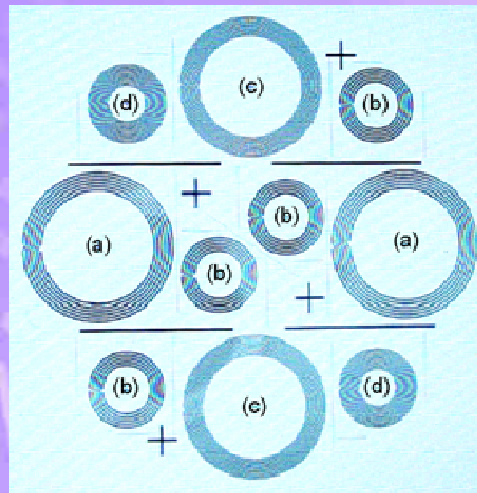


Ligne de transmission Multi-tour

Miniaturisation : Exemple, MTLR



THEVA, GmbH, Munich



Marion Woytasik; I.E.F., CTU Minerve, Orsay



Cryogénie : Contraintes et difficultés

Environnement RMN

- ◆ parties magnétiques
- ◆ parties métalliques mobiles

Applications biomédicales

- ◆ transparence RF
- ◆ isolation thermique

Antennes supraconductrices

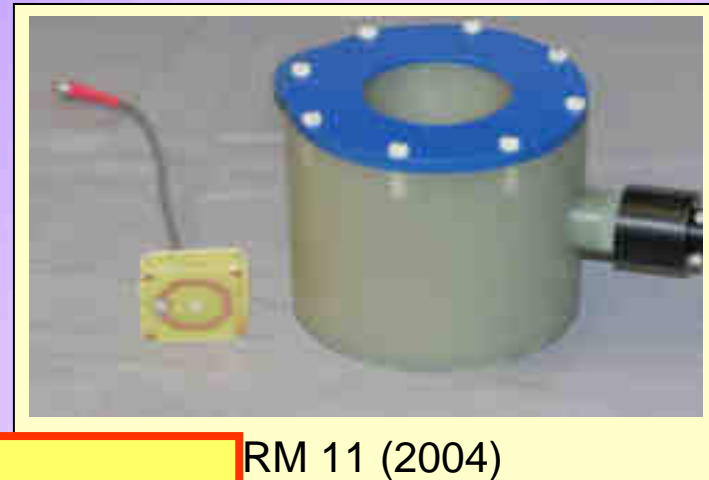
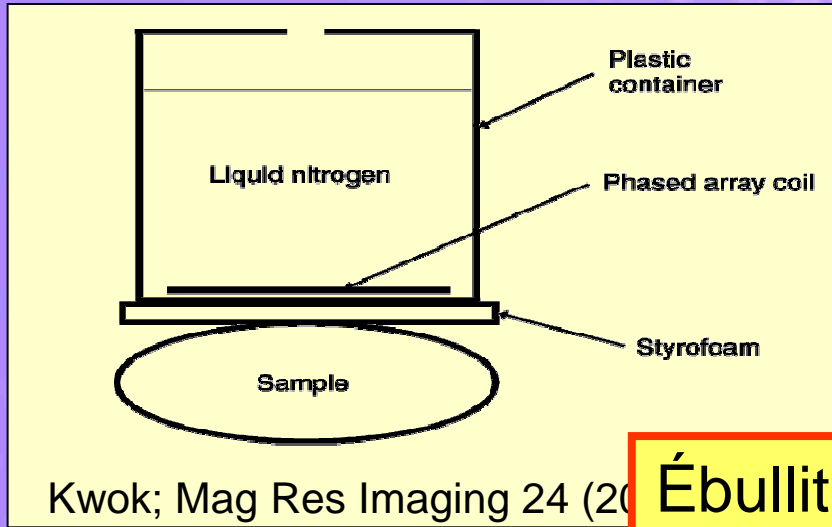
- ◆ stabilité thermique
- ◆ environnement sans pertes

Milieu hospitalier

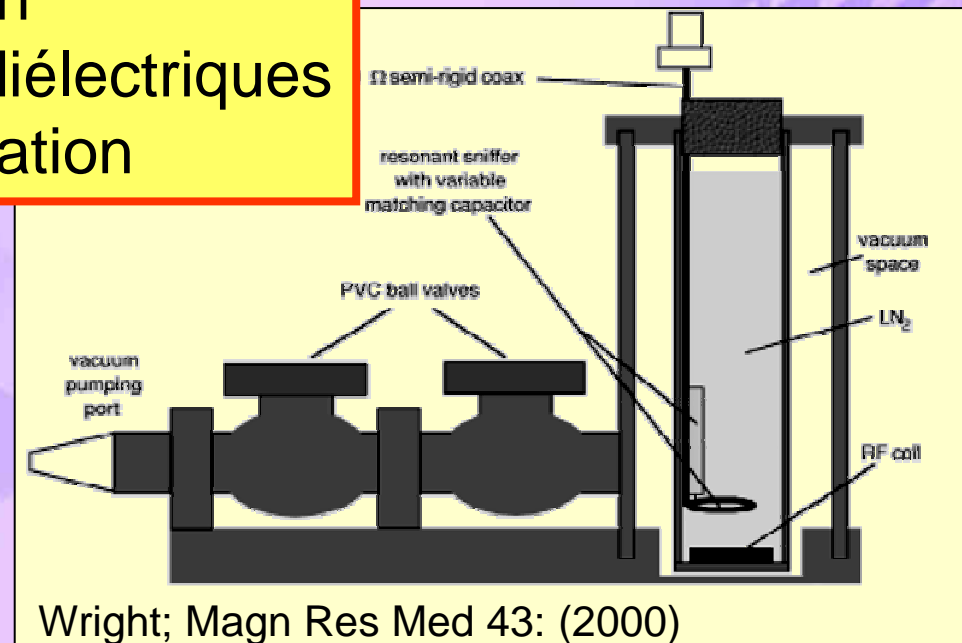
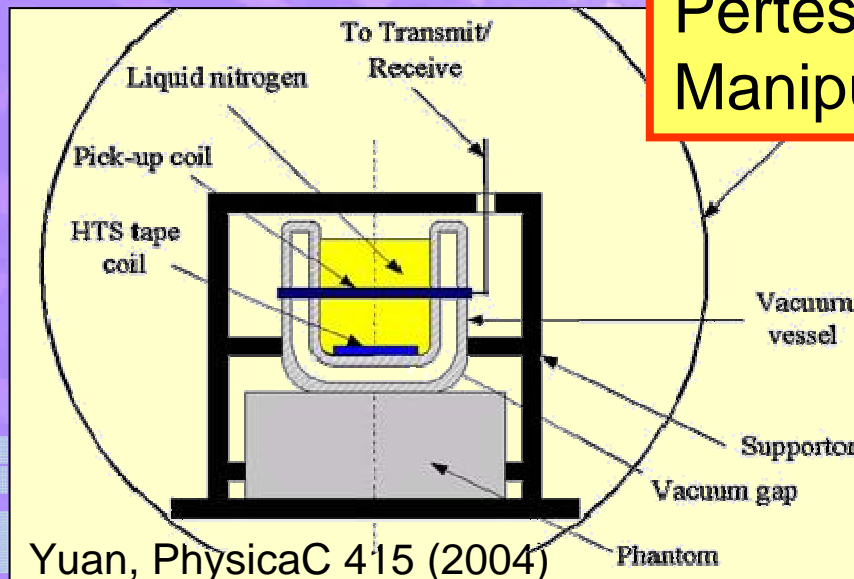
- ◆ fluides cryogéniques
- ◆ facilité d'emploi

Cryogénie : Doigt froid liquide

Immersion dans un liquide cryogénique

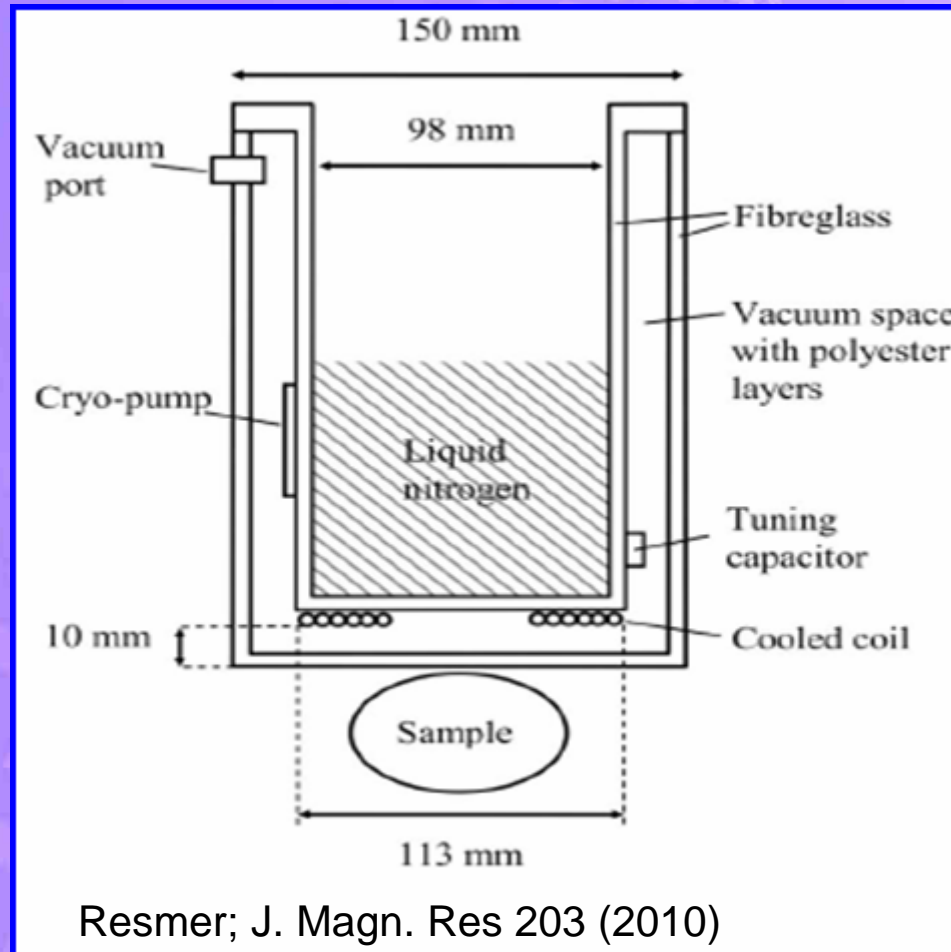


Ébullition
Pertes diélectriques
Manipulation



Cryogénie : Doigt froid solide

➤➤➤ Refroidissement par contact



Antenne cuivre multi- brin

Azote liquide

Système simple et efficace

Cryogénie : Doigt froid solide

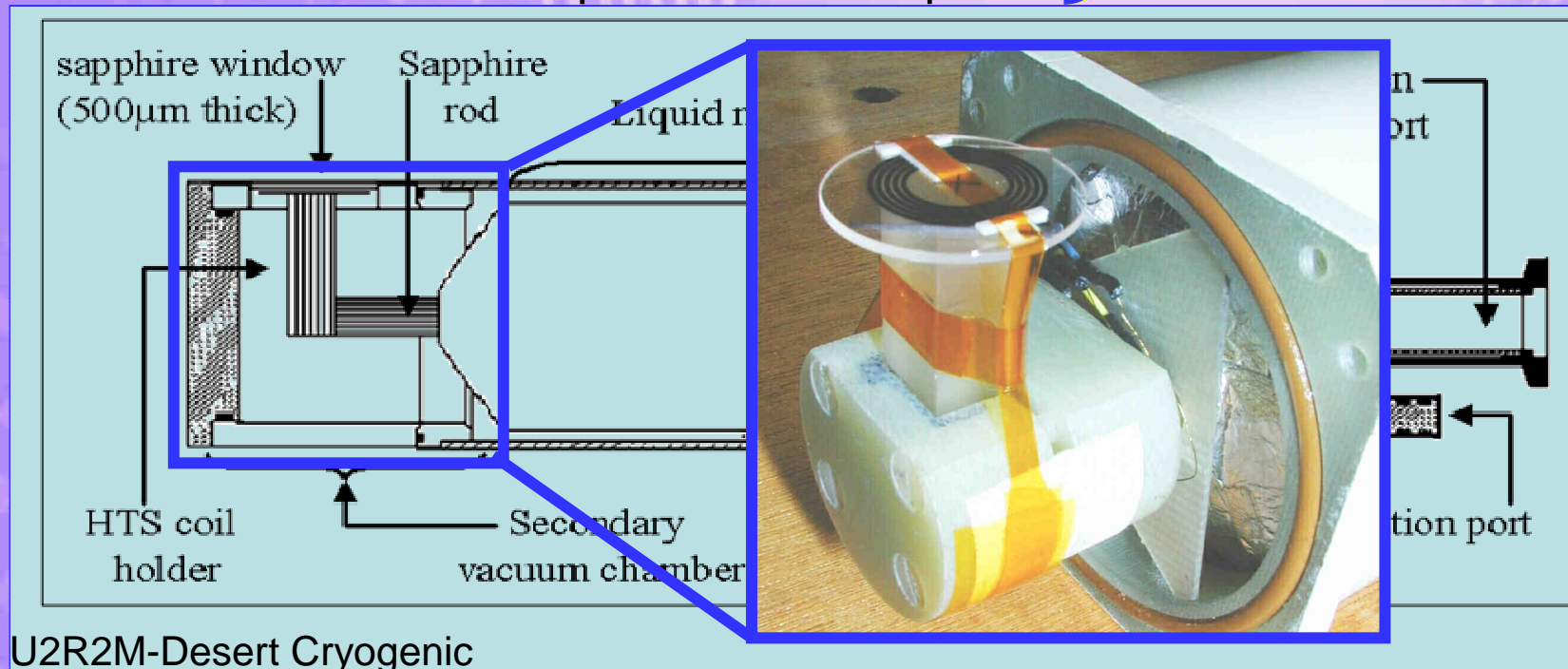
➤➤➤ Refroidissement par contact

Antenne supraconductrice : système plus complexe.

Matériaux :

- ♦ Haute conductivité thermique
- ♦ Faibles pertes diélectriques

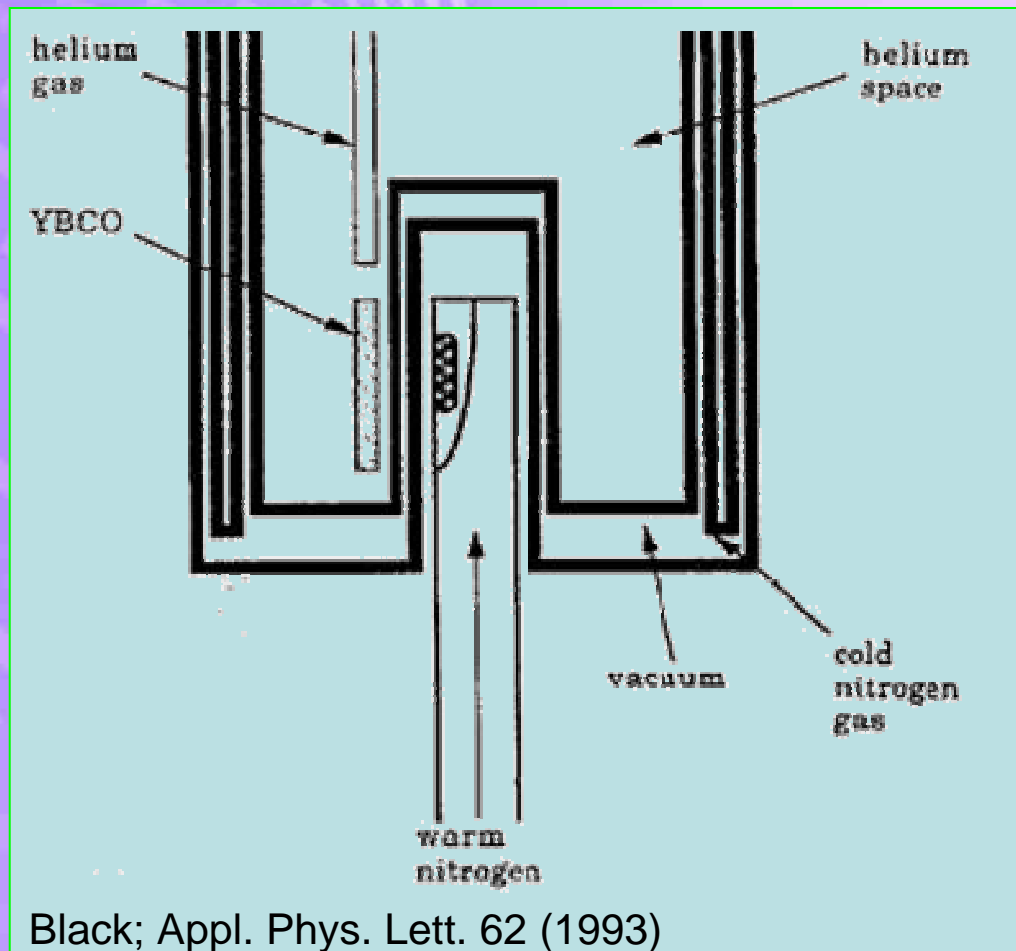
 } Saphir



Cryogénie : Doigt froid gazeux

➤➤➤ Refroidissement par convection

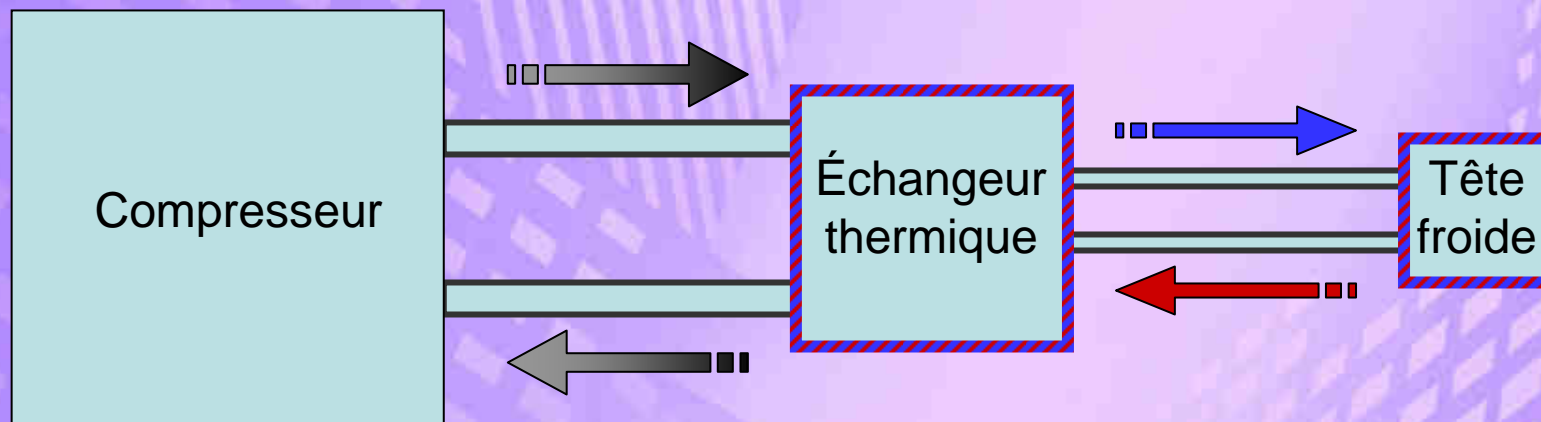
- ◆ Température suffisamment basse, He



Cryogénie : Cryo-réfrigérateur

➤➤➤ Cycle thermodynamique

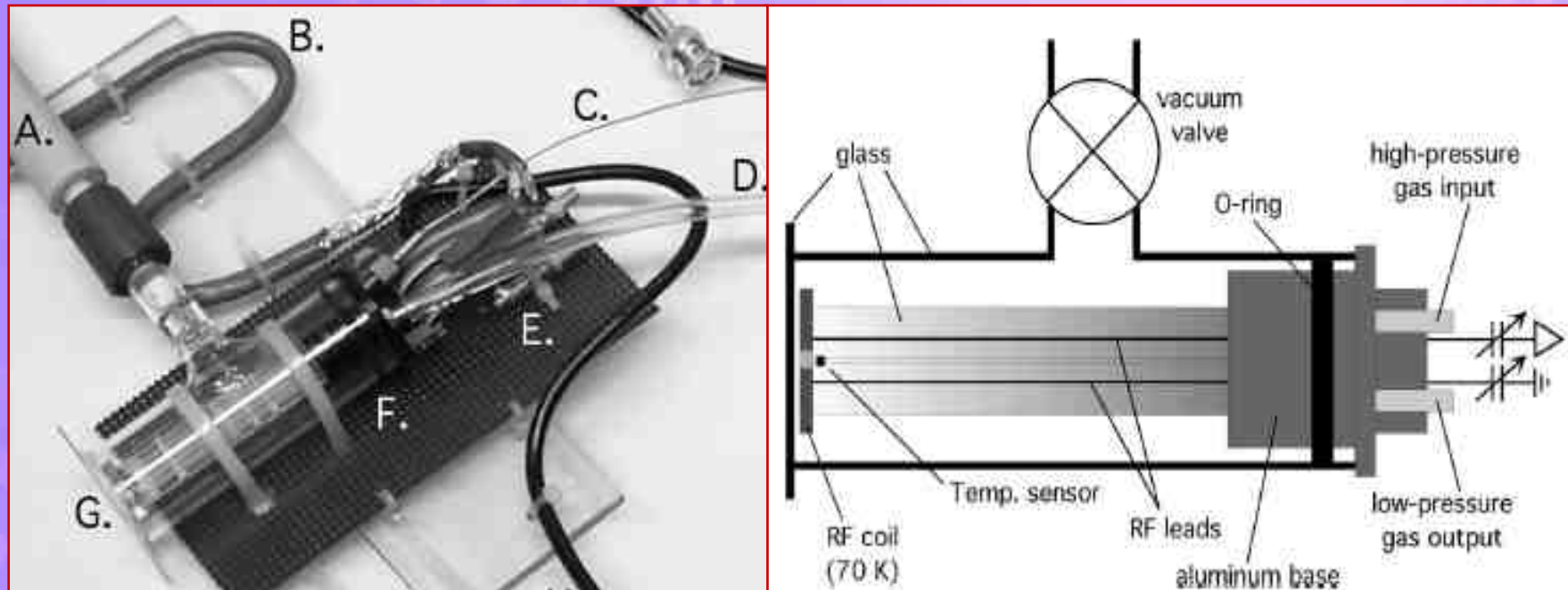
- ♦ Autonomie
- ♦ Cycle fermé
- ♦ Gaz
- ♦ Manipulation
- ♦ Précision (0,05K)



Cryogénie : Cryo-réfrigérateur

➤ Joule-Thomson

Isenthalpique, peu bruyant, simple, sans vibration...

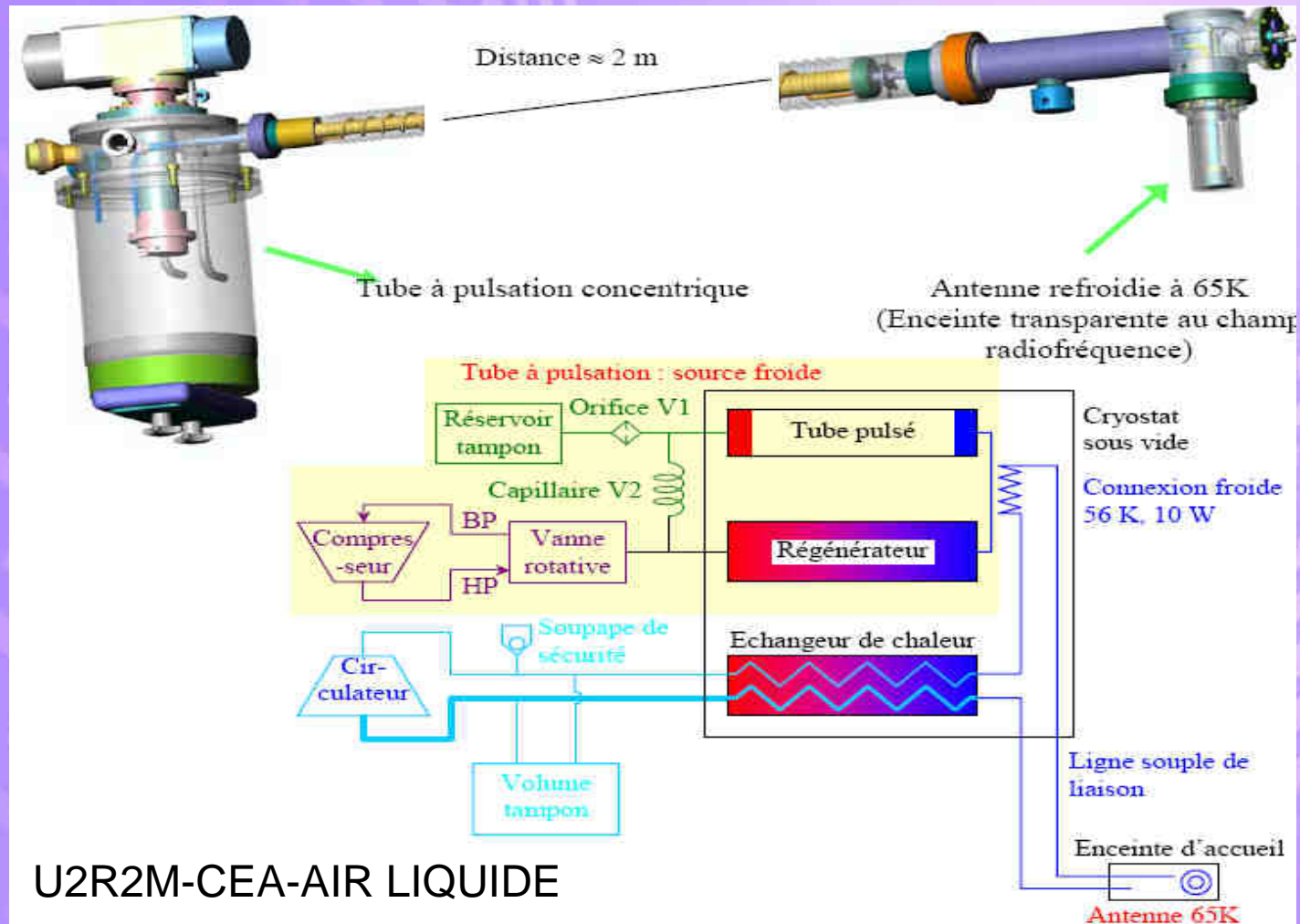


Wright, Rev. Sci. Instrum. 76, (2005)

Cryogénie : Cryo-réfrigérateur

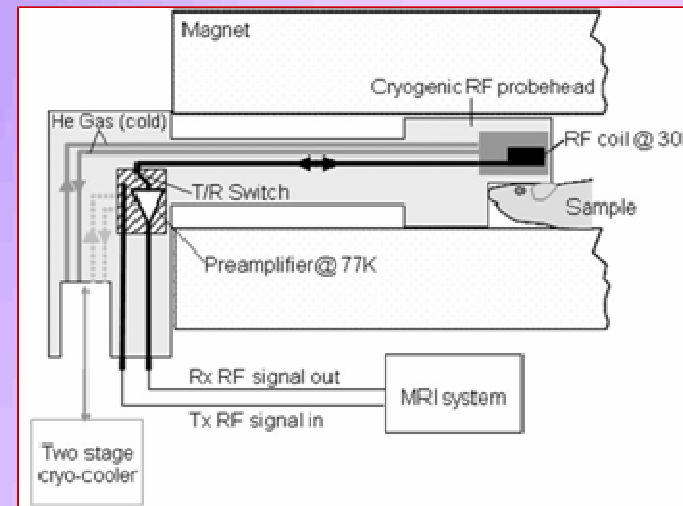
➤ Pulse-tube

Ericson, efficace, peu bruyant, sans vibration,... complexe

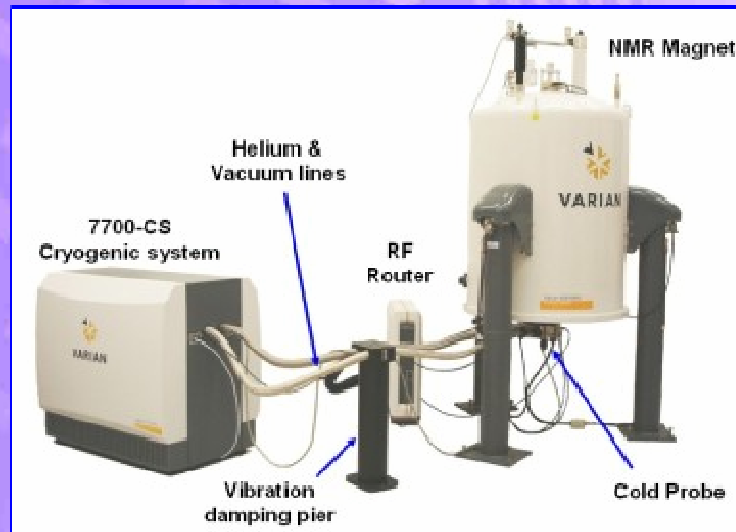


Cryogénie : Cryo-réfrigérateur commerciaux

➤➤➤ Cryoprobe Brüker



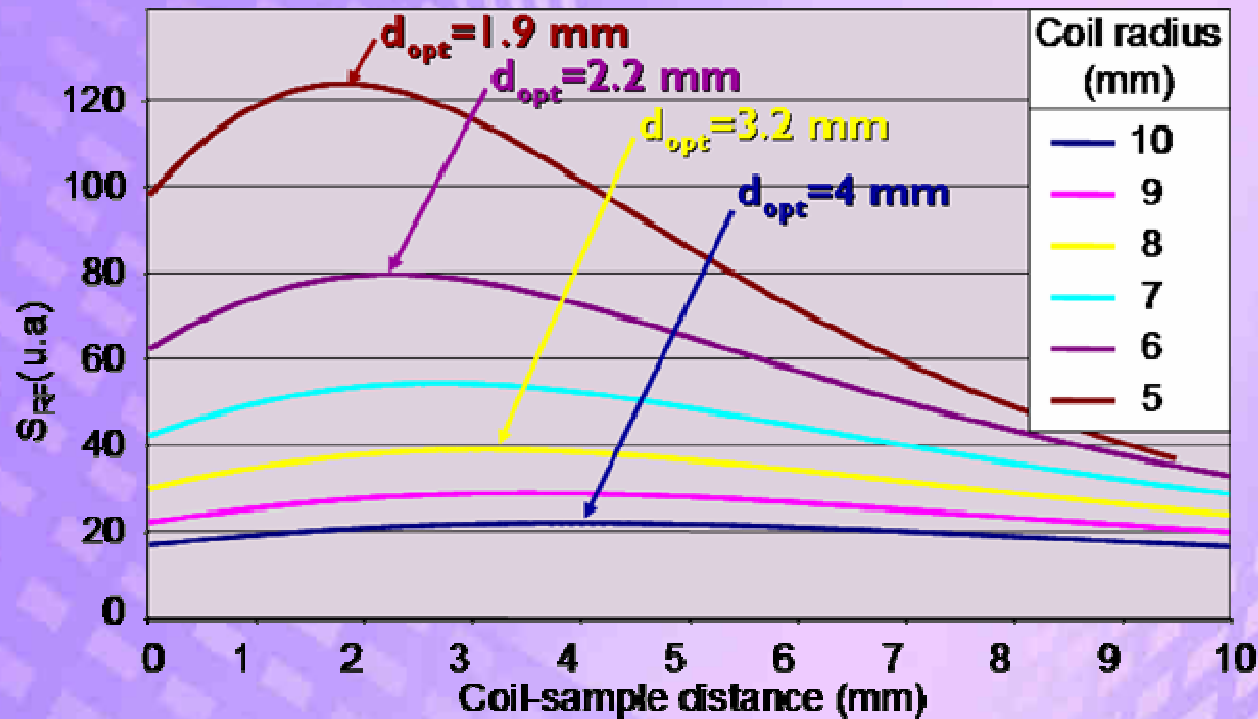
➤➤➤ Coldprobe Varian (RMN)



Distance antenne échantillon : The lift-off effect

- ◆ SRF en fonction de la distance antenne échantillon.

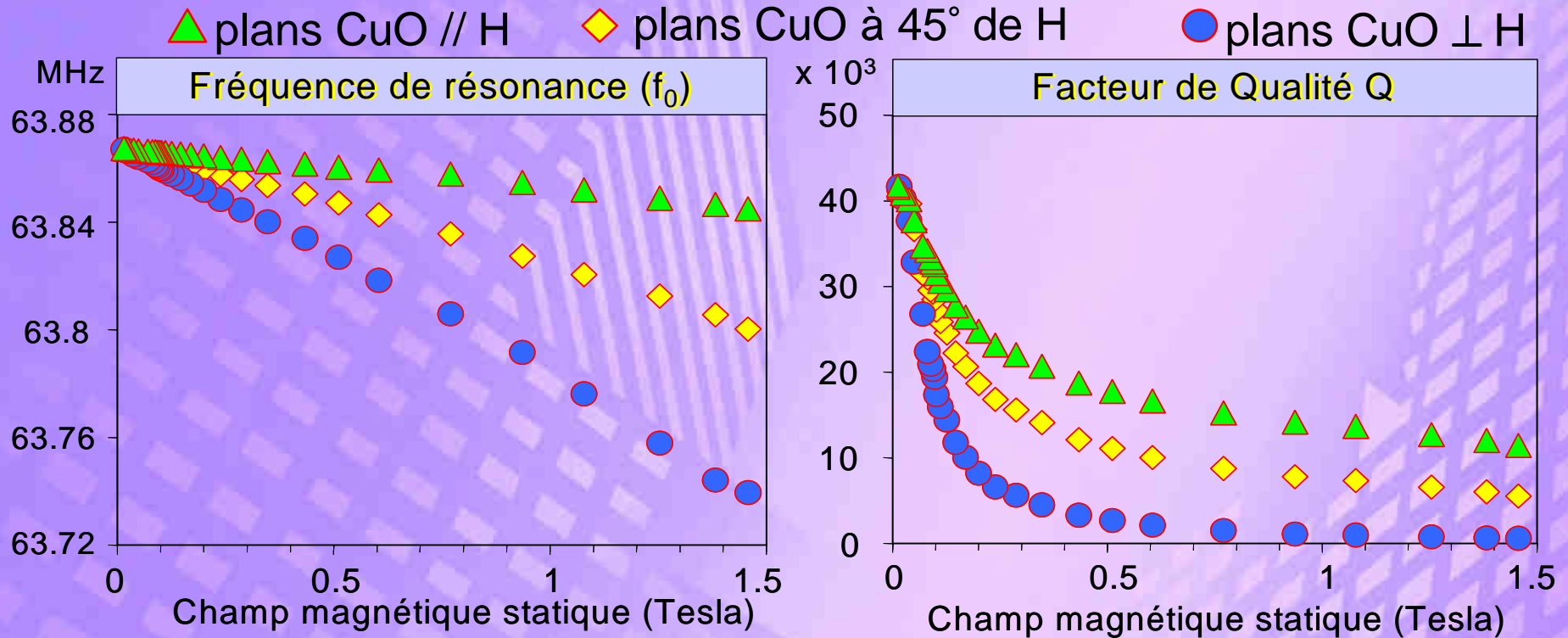
fantôme cylindrique : hauteur et rayon : 3x le rayon de l'antenne
($s = 0.66 S$, $F_0 = 64\text{MHz}$)



➤➤➤ Distance imposée par l'isolation : pas forcément pénalisante

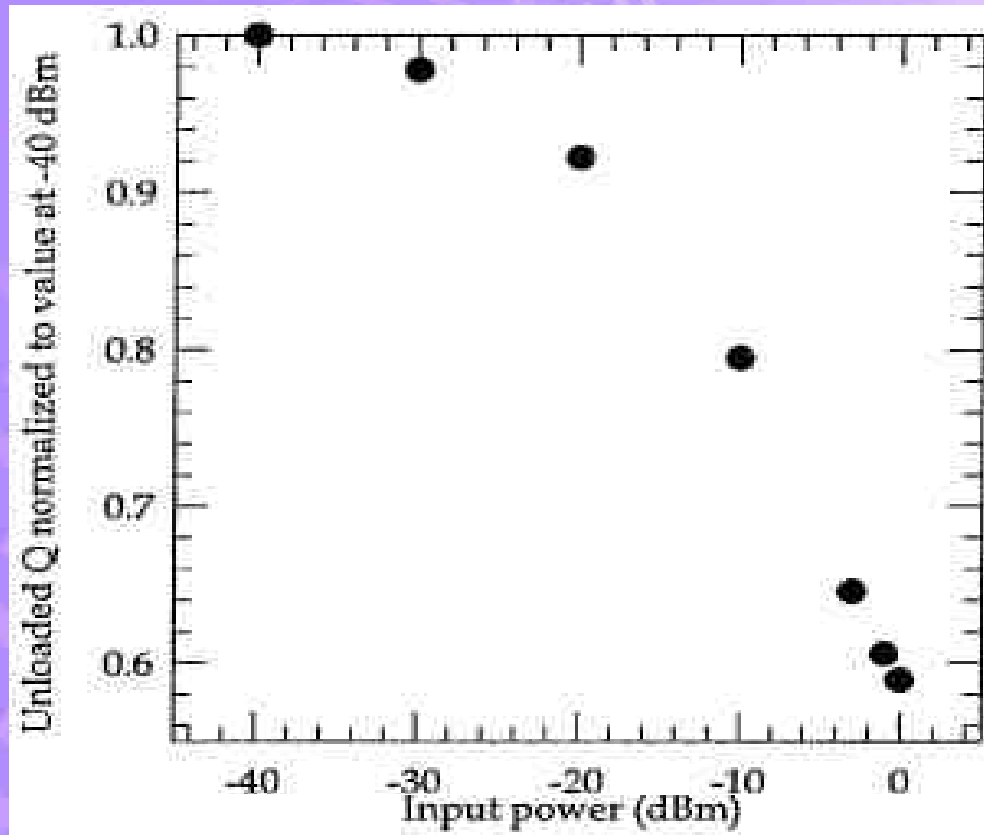
Matériaux supraconducteurs

➤ Diamagnétisme



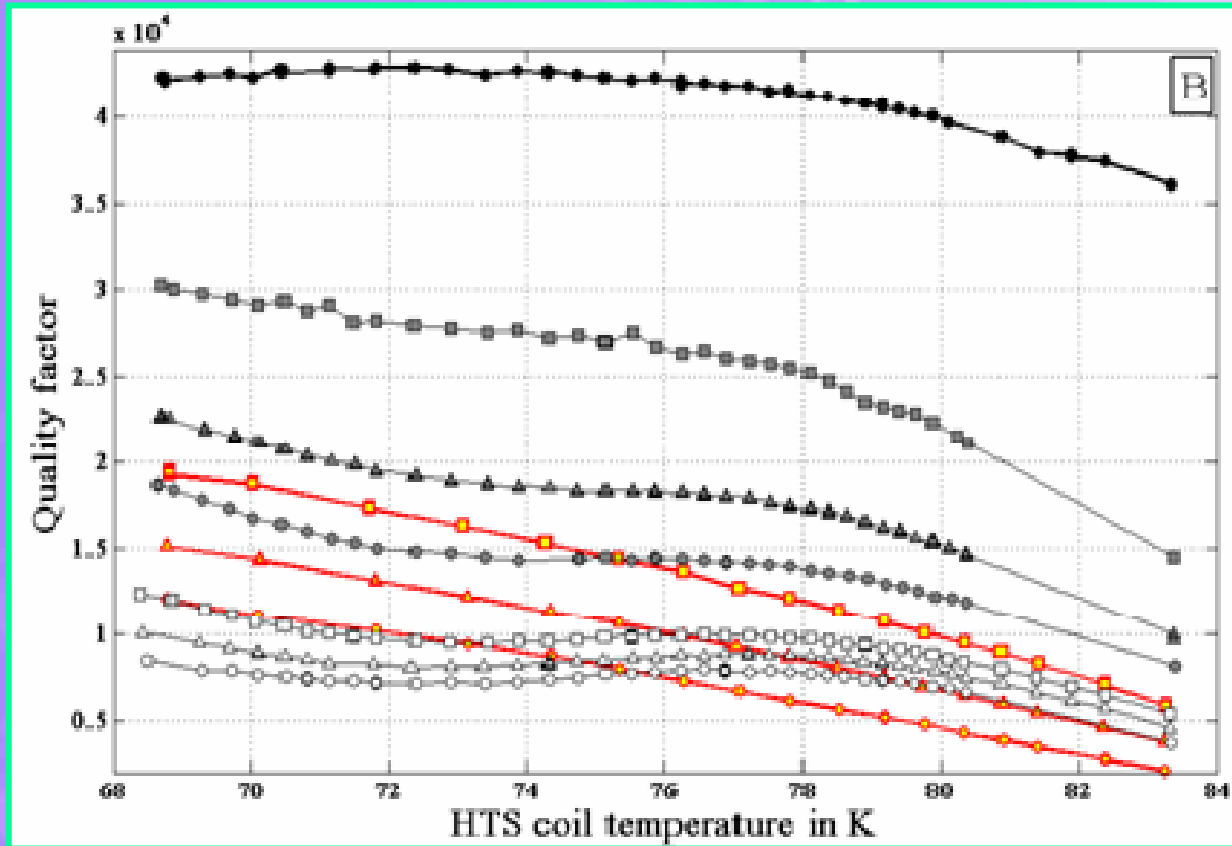
Matériaux supraconducteurs

➤ Non linéarité



Matériaux supraconducteurs

➤ Température de fonctionnement



Parallel		Orthogonal	Zero Field				
2.35 T	□	0.5 T	■	0.5 T	□	0 T	●
3 T	△	1 T	▲	1 T	△		
4.7 T	○	1.5 T	●	1.5 T	○		

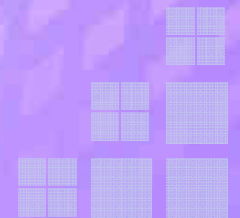
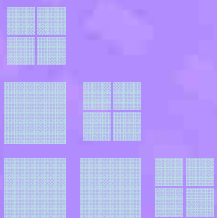
Température plus basse



Compense l'effet du champ

Thèse de Simon Lambert, IR4M.

**Les antennes froides en IRM :
Applications et performances**



Chez l'homme

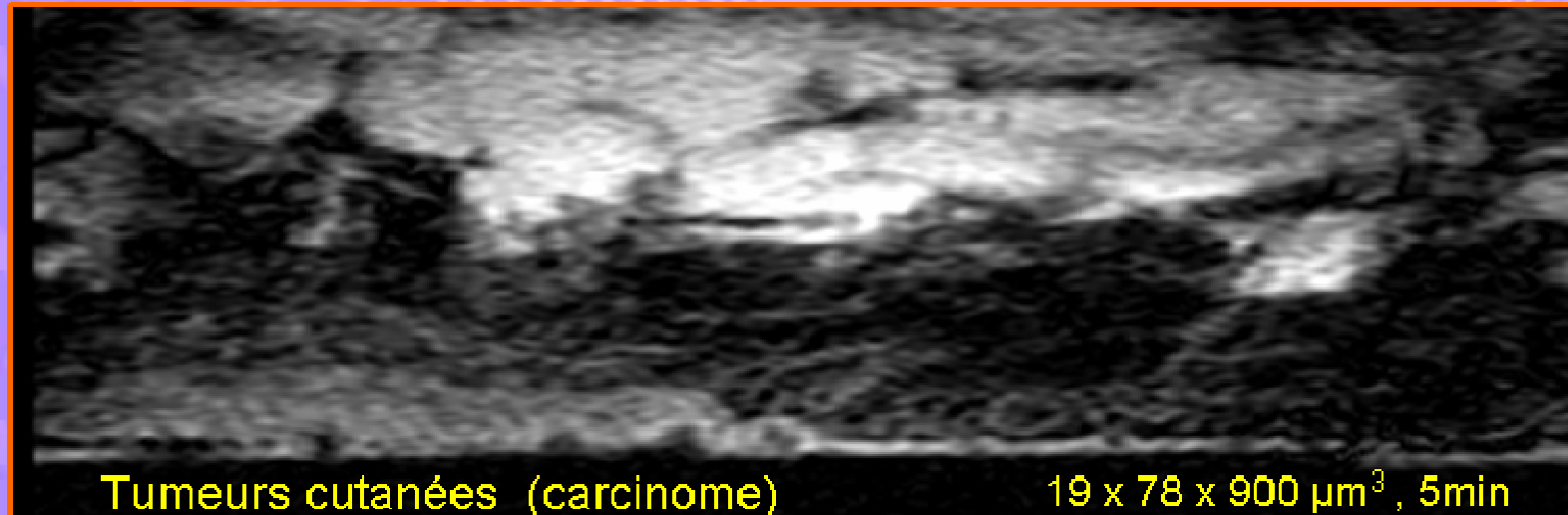
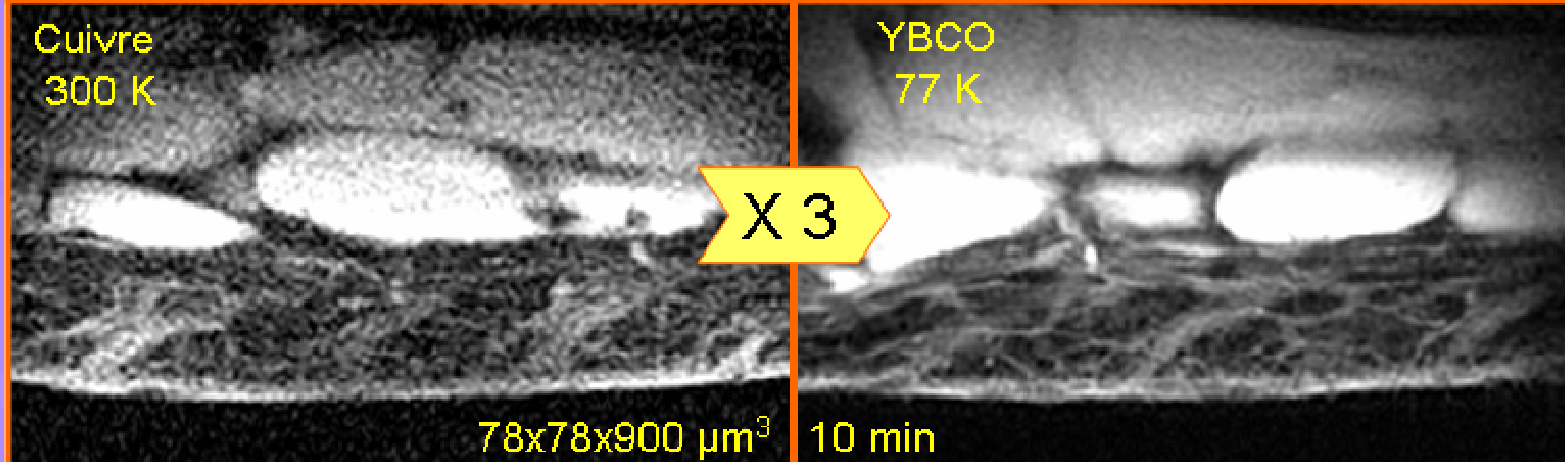
➤➤➤➤ Champ de vue réduit

- ◆ Imagerie de surface
- ◆ Zones anatomiques de petite taille



Chez l'homme, la peau

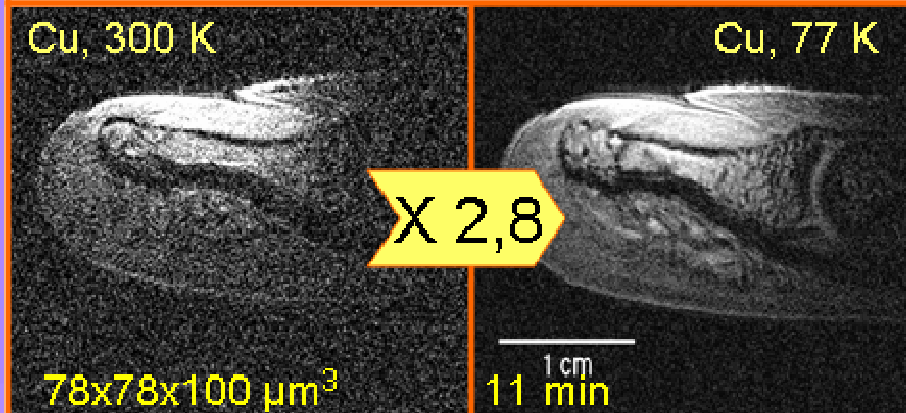
Ginefri, Magn. Res. Med. 32 (2001), 1,5 T, Ø 1,2 cm, 77 K



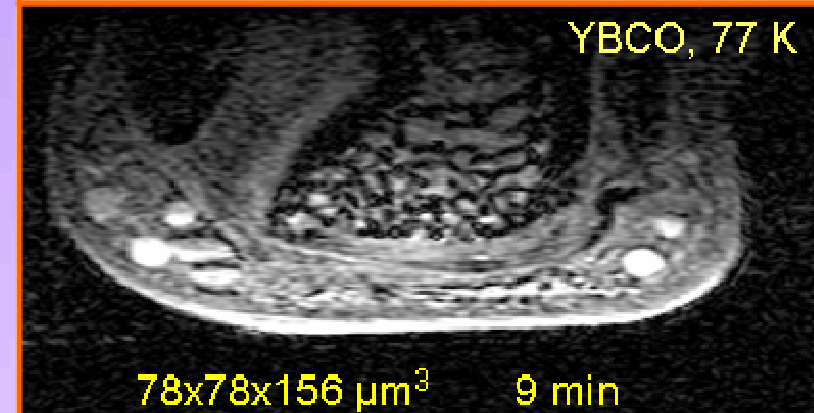
U2R2M-Institut Gustave Roussy (Villejuif)

Chez l'homme, les extrémités

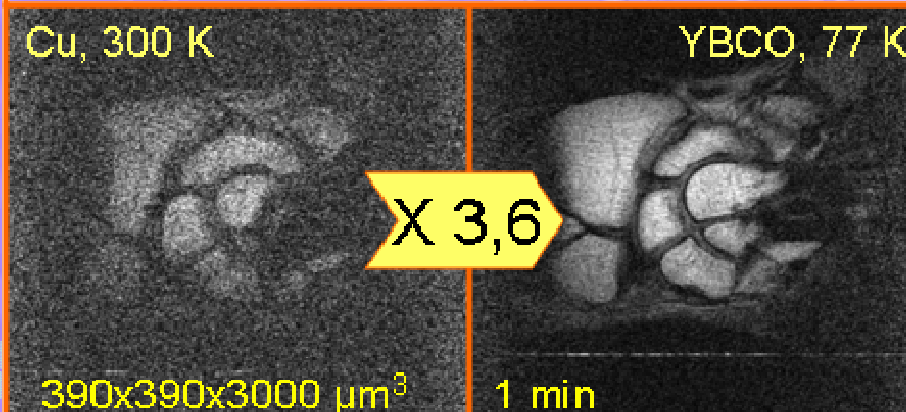
Wright, Rev. Sci. Instrum. 76, (2005)
1,5 T, Ø 2 cm, 70 K



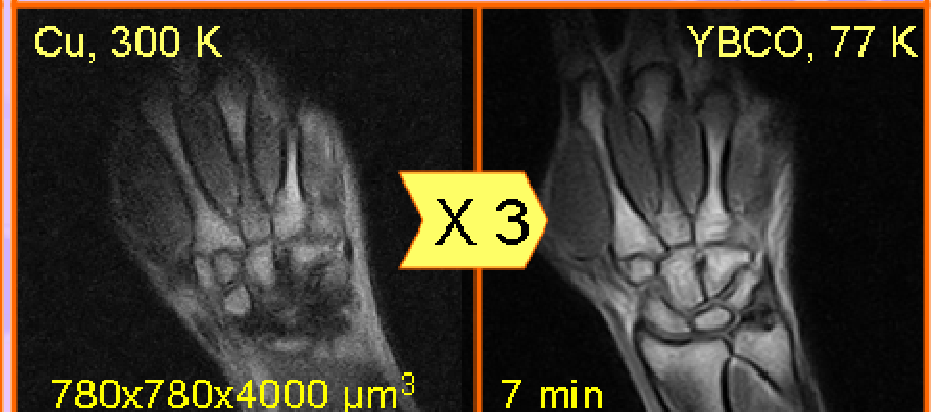
Darrasse, Biochimie, 85 (2003)
1,5T, Ø 1,2 cm, 77 K



Vester, Interven. MRI Conf. (1997)
0,2T, Ø 1,7 cm, 77 K



Penn, IEEE Trans Appl Supercond 9 (1999)
0,15T, Ø 10 cm, 77 K



Le petit animal

➤➤➤ Modèle de pathologie humaine

- ◆ Arthrite, ostéoporose
- ◆ Athérosclérose
- ◆ Neuro-dégénérescence

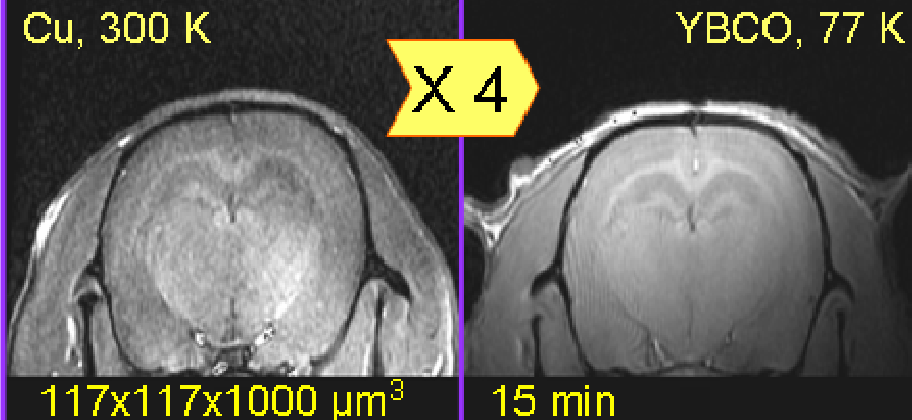
➤ Évaluation thérapeutique

➤➤➤ Souris

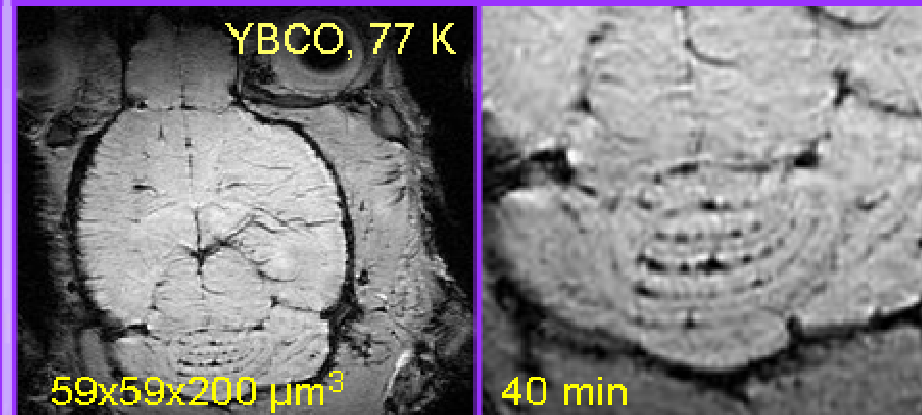
- ◆ Petit
- ◆ Transgénique

Le petit animal

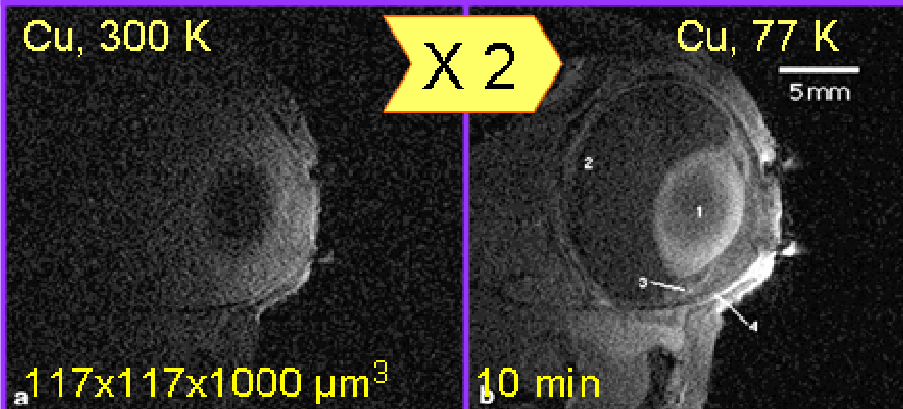
Miller, Magn. Res. Med. 41 (1999)
0,2T, Ø 1,7 cm, 77 K



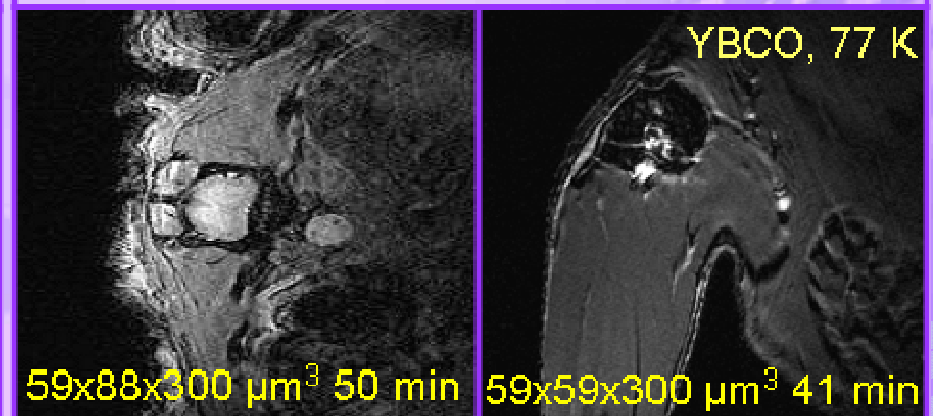
Poirier-Quinot, Mag. Res. Med. 60 (2008)
1,5T, Ø 1,2 cm, 77 K



Wright, Magn. Res. Med. 43 (2000)
1,5 T, Ø 2 cm, 77K



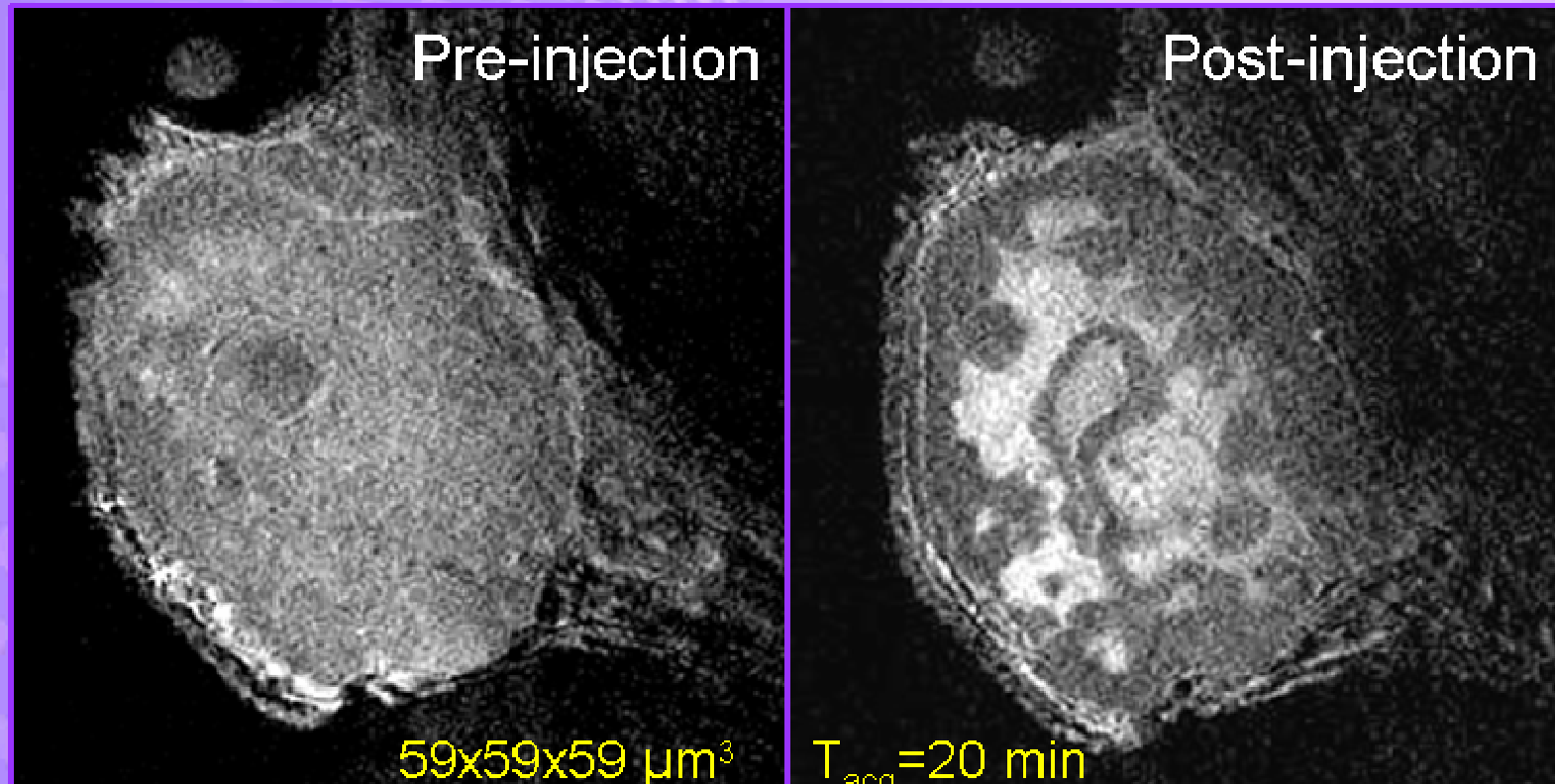
Poirier-Quinot, Mag. Res. Med. 60 (2008)
1,5T, Ø 1,2 cm, 77 K



Le petit animal

- Tumeur mammaire chez la souris
- Haute résolution spatiale

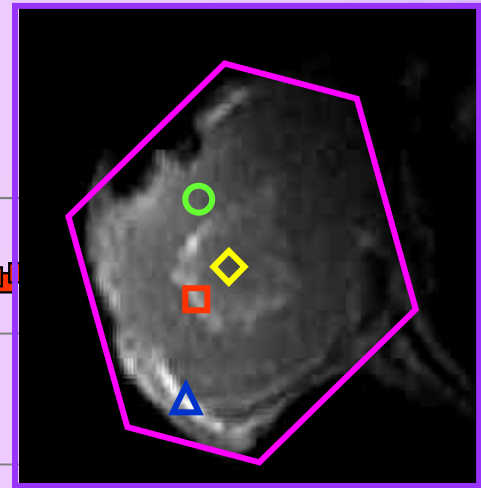
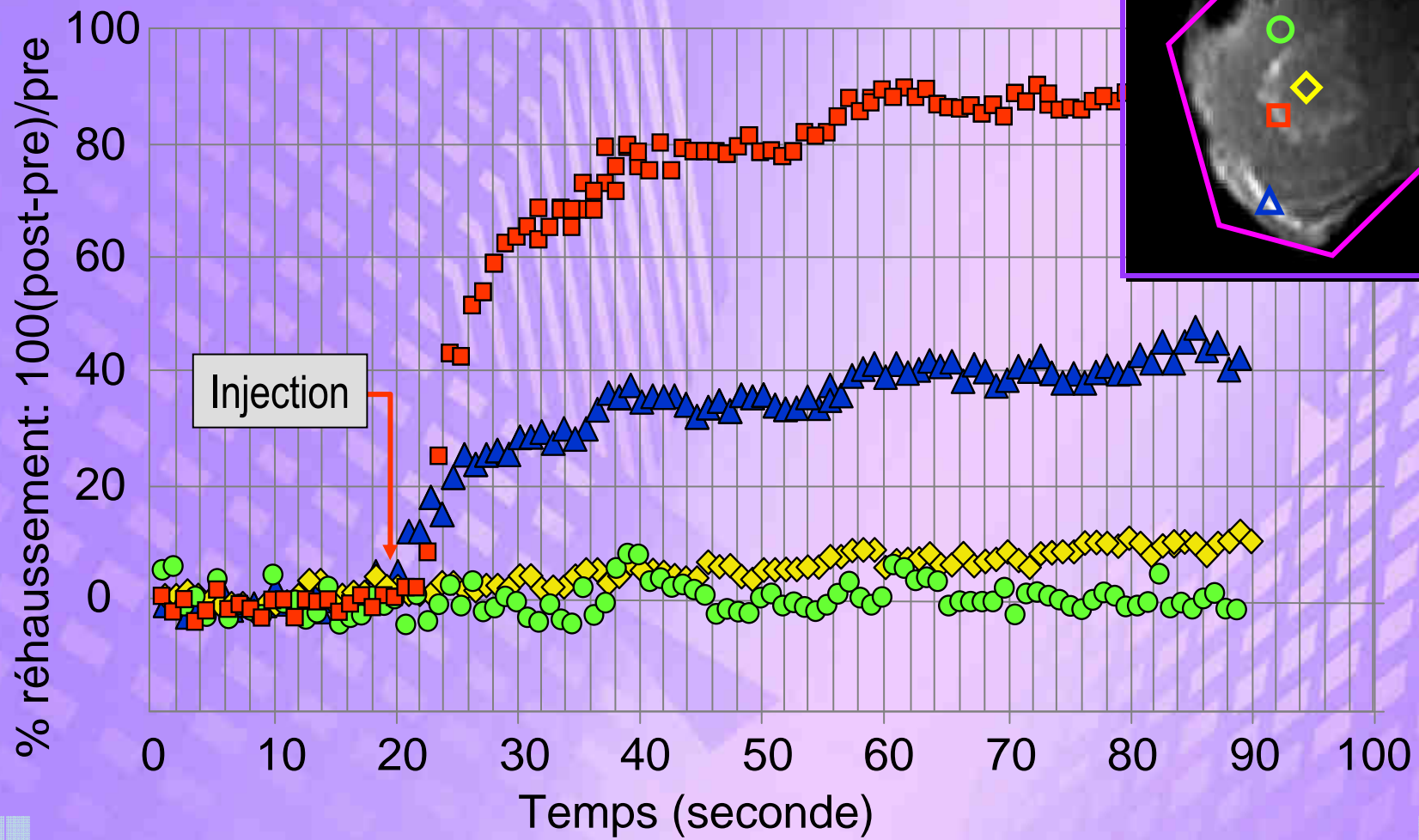
(Vistarem®, Guerbet Research, Aulnay-Sous-Bois, France) 0.04 mmolGd/kg.



Ginefri, Magn. Res. Imaging. 23 (2005) 1,5 T, Ø 1,2 cm, YBCO@77 K

Le petit animal

- Tumeur mammaire chez la souris
- Cinétique de prise de contraste rapide

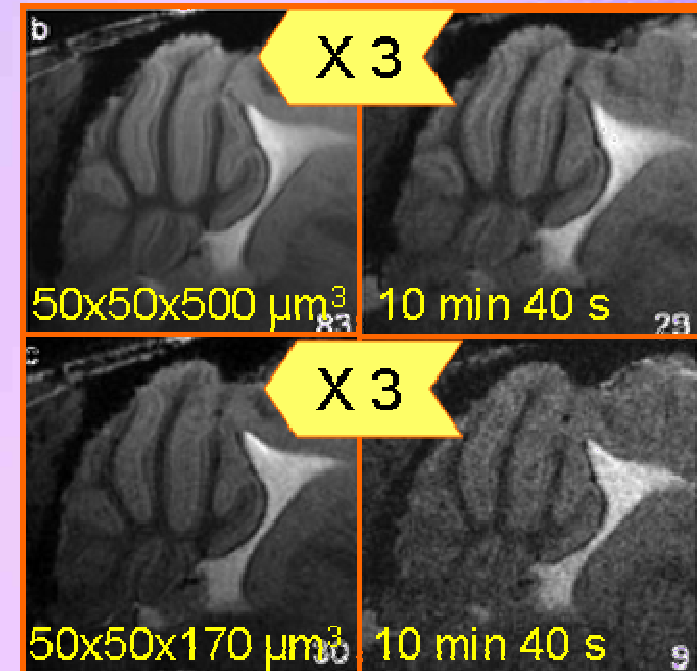
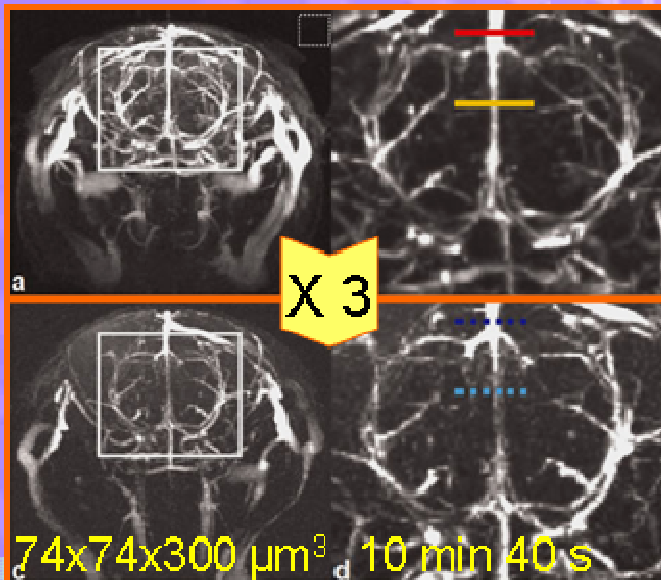
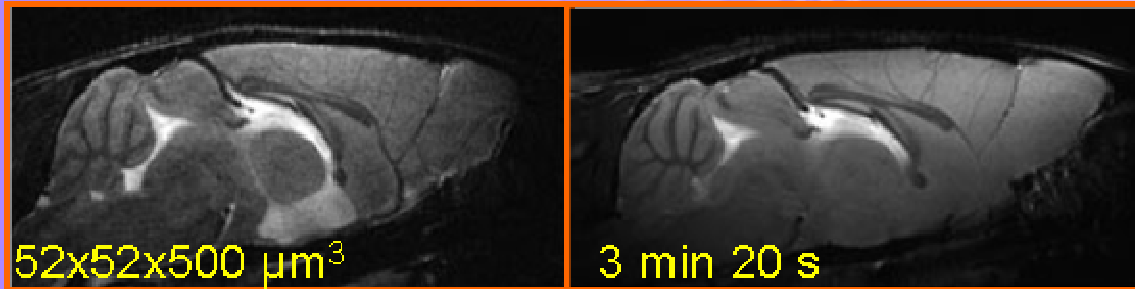


Sonde froides commerciales

➤➤➤ Cryoprobe Brüker

Baltes, NMR in Biomed 22 (2009)

9,4T, Ø 2,4cm (quadrature), 30K



Développements actuels

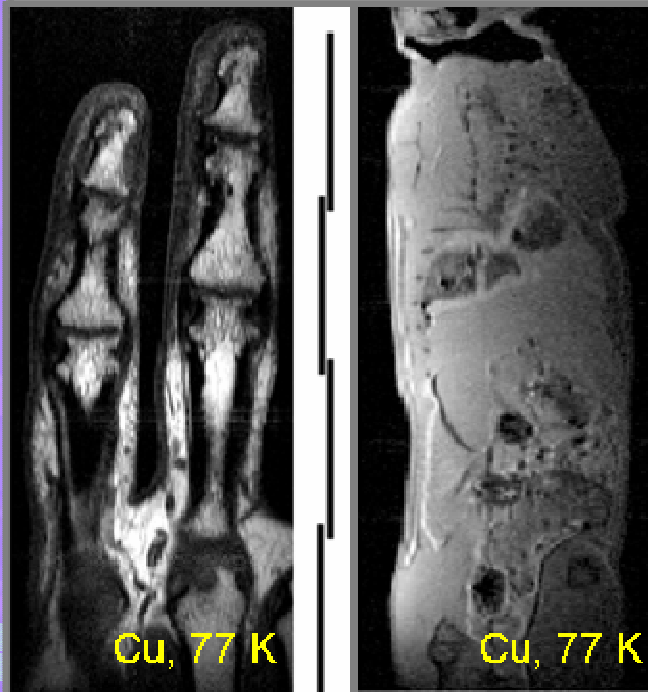
➤ Réseau d'antennes miniatures refroidies

- ◆ Grand champ de vue
- ◆ Haute sensibilité de détection

Kwok, ISMRM (2003)

Cuivre, 77 K

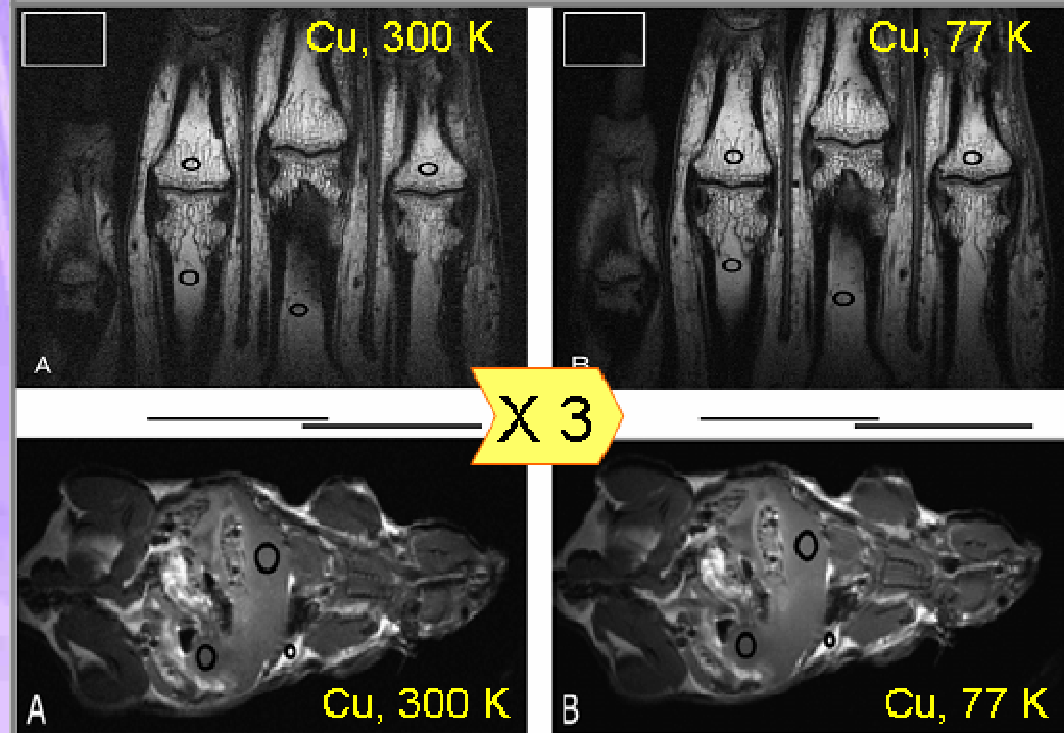
1,5 T, Ø 3,3 cm, 4 éléments



312x312x1000 μm^3 , 4,3 min

Kwok, Magn. Res. Imaging. 24 (2006)

Cuivre, 2 T, Ø 3,5 cm, 2 éléments, 77 K



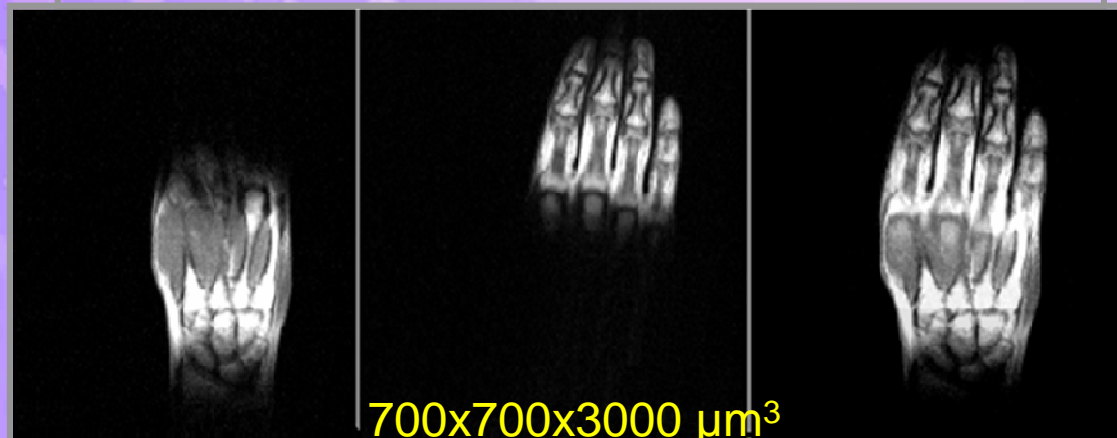
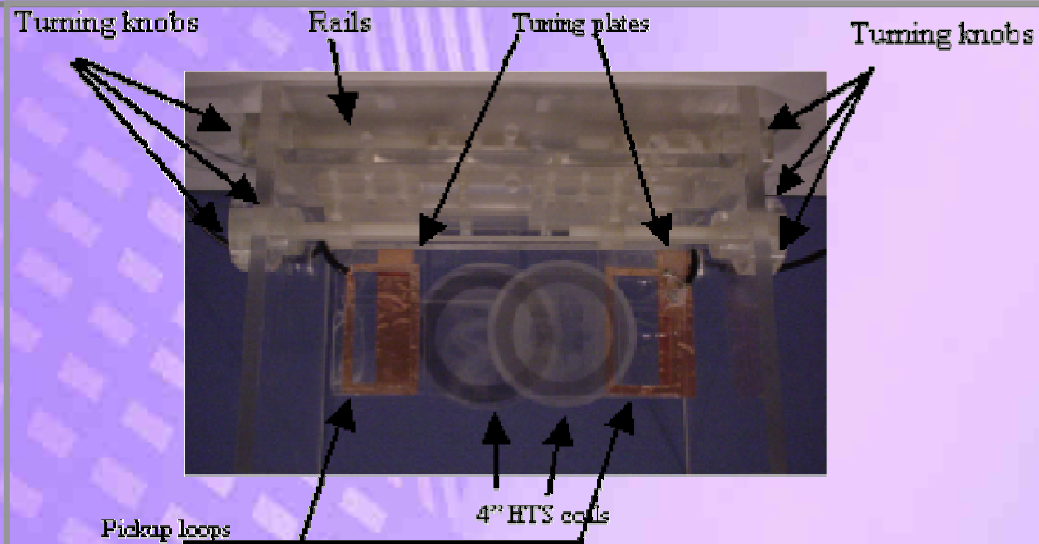
390x390x1000 μm^3 , 2,8 min

Développements actuels

➤ Réseau d'antennes miniatures refroidies

Chow, ISMRM (2003)

YBCO, 77 K, 0,2 T, Ø 9 cm, 2 éléments

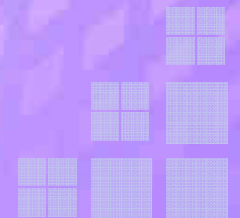
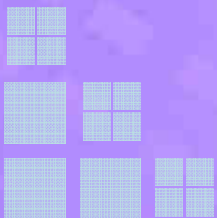


Les voies de d'amélioration...

➤ Développer les outils

- ◆ Cryogénie
- ◆ Matériaux
- ◆ Électronique

➤ Développer les applications



Merci...

