

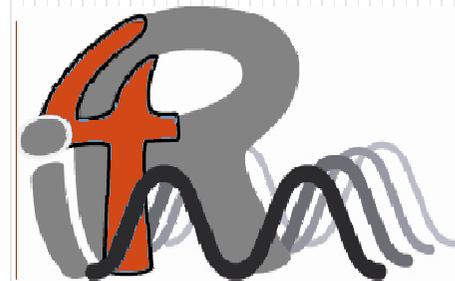
Les antennes Radio Fréquence dans la chaîne d'acquisition RMN, question de bruit

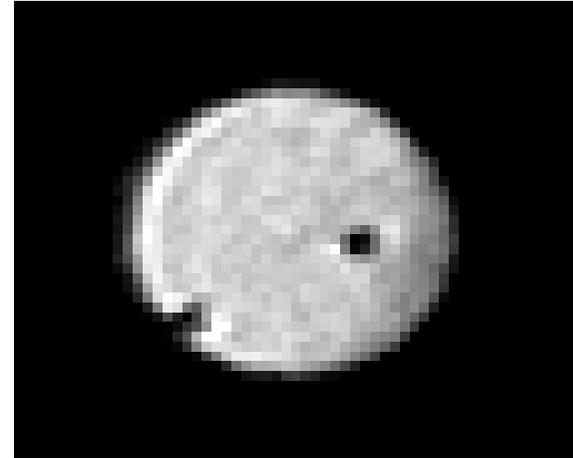
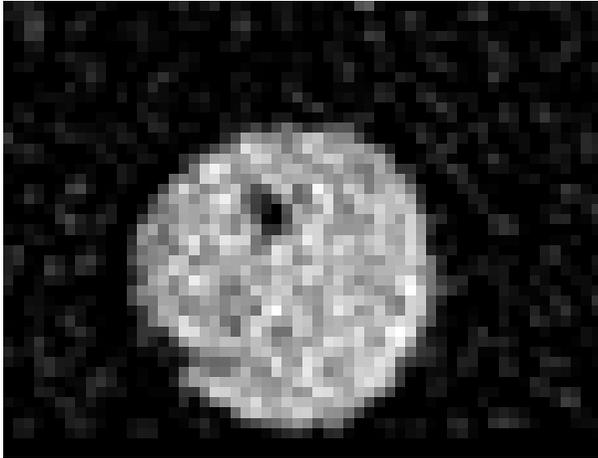
Marie POIRIER-QUINOT

IR4M

Laboratoire d'Imagerie par Résonance Magnétique
Médicale et multi modalités.

UMR 8081CNRS-Université Paris XI. France





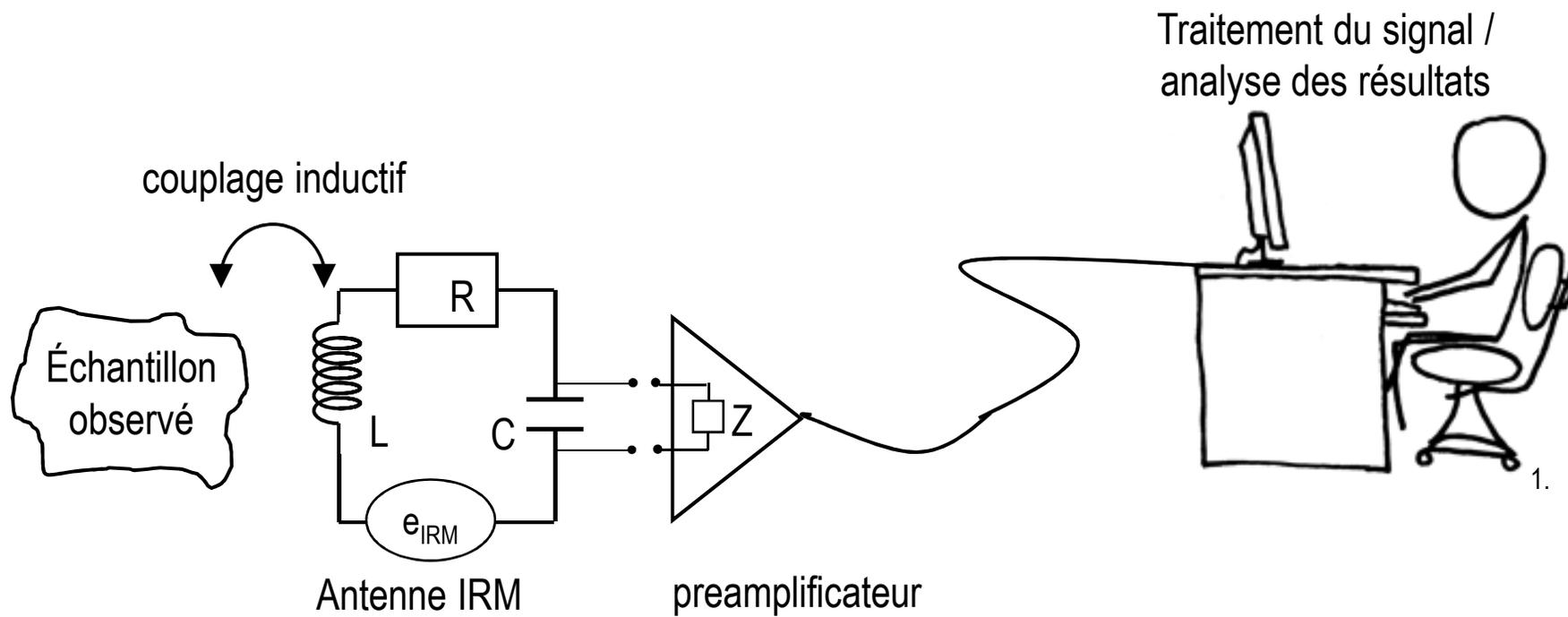
Tube d'eau avec un cheveu @1.5 T (20 μ m)³

Non optimisé en bruit

Optimisé en bruit

Cerveau de souris @1.5 T (117 μ m)³



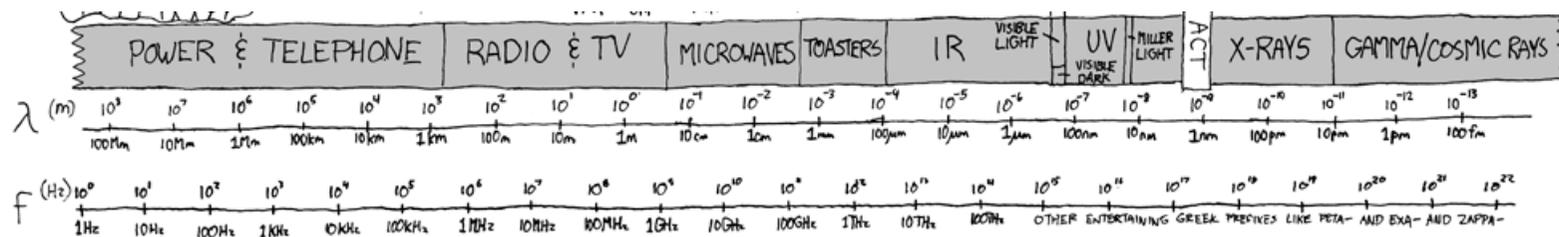


Les dimensions ne sont pas respectées

1. Personnage tiré du site xkcd

Définition d'une antenne

- Classiquement:
Antenne sert à émettre et recevoir un **champ électromagnétique (E+B)** en champ lointain (distance $> \lambda$)
- En RMN ou IRM
Antenne ou sonde RMN sert à émettre et recevoir un **champ magnétique (B)** en champ proche (distance $< \lambda$)

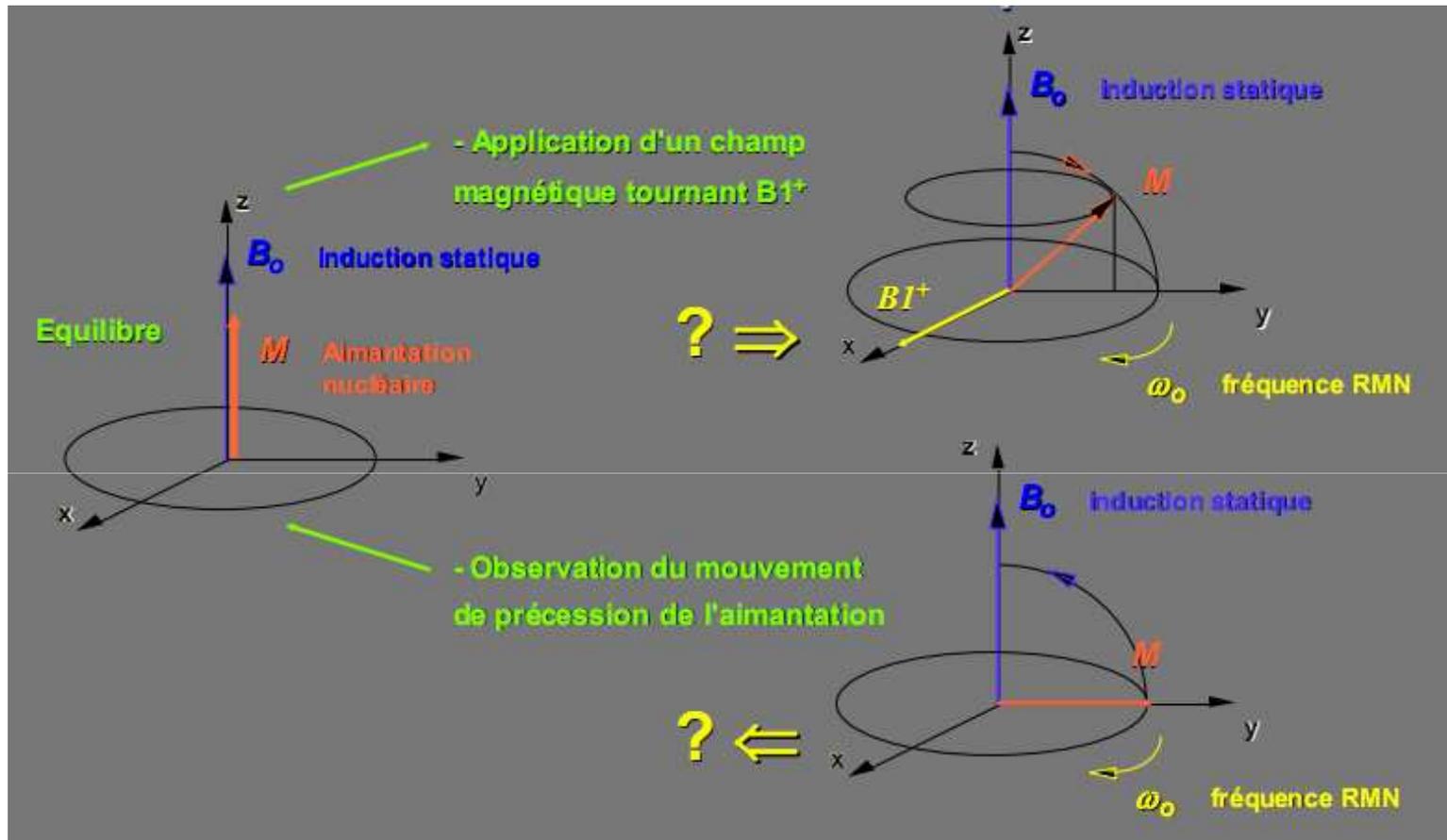


1. <http://xkcd.com/>

Plan de l'exposé

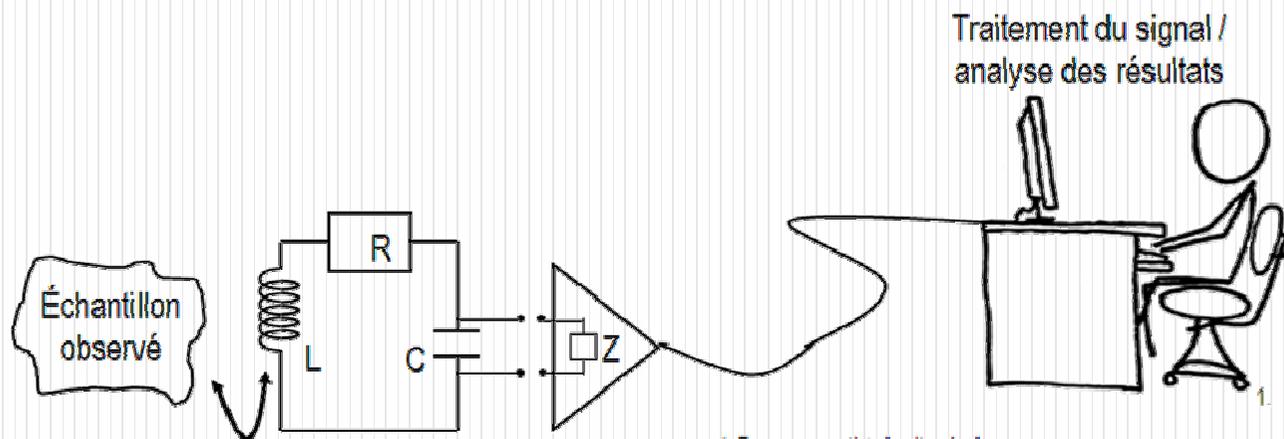
- Antenne Radio Fréquence
- Notion de bruit dans la chaîne d'acquisition
- Géométrie d'antenne

Interaction antenne RF avec les spins



Antenne Radio Fréquence

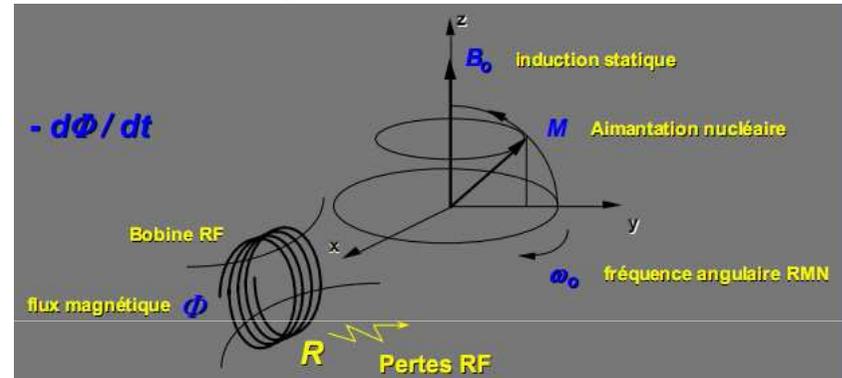
- But de l'antenne RF
- Éléments de base
- Antenne RF – circuit résonant
- Antenne RF - adaptation



1. Personnage tiré du site xkcd

But de l'antenne Radio Fréquence

- Émission: création d'un champ B_1 tournant à ω_0 à l'aide d'antenne RF
 - dans le volume utile de l'échantillon
 - Homogène
 - Avec une puissance dissipée minimale



- Réception : du voltage induit par l'aimantation tournante **M**
 - signal maximal à la fréquence de Larmor
 - bruit de l'antenne et de l'échantillon minimum (pertes électriques et magnétiques)

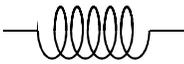
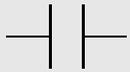
$$\text{Signal RMN : } e = - \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{Densité spectrale de bruit : } n^2 = R \cdot k \cdot B \cdot T$$

Antenne RF – éléments de base

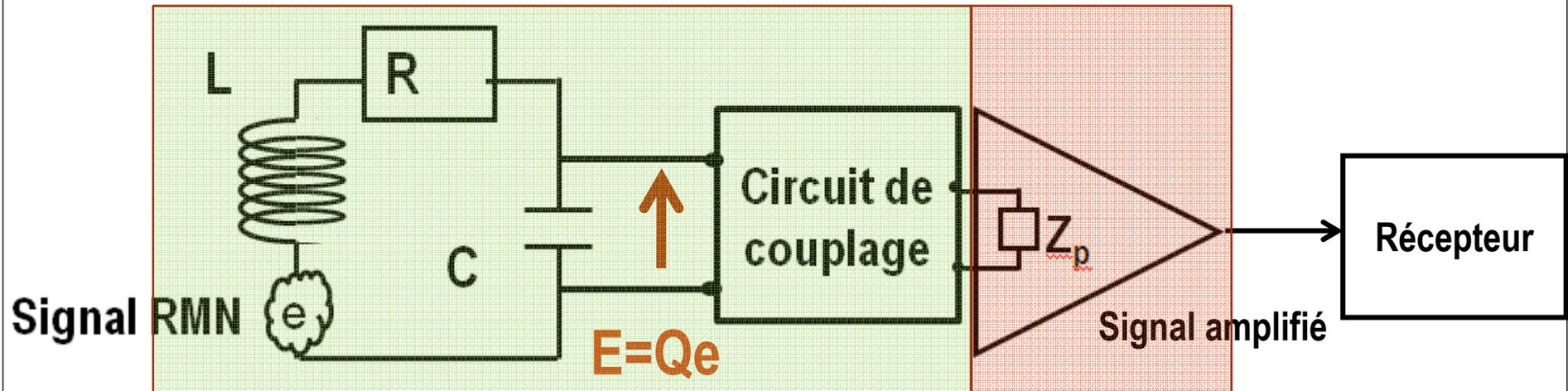
- Conducteur dont la géométrie détermine la distribution spatiale du champ magnétique induit
- Impédance de la forme
$$Z=R+jX(\omega)$$
- B1 le plus élevé possible pour une puissance RF donnée (B1 proportionnel au courant dans l'antenne RMN)
 - Toute la puissance transmise doit être dissipée dans la résistance de l'antenne*
 - Toute la puissance reçue doit être transmise à la chaîne d'acquisition*
 - R doit être la plus petite possible pour maximiser le courant I (donc B1),
 $P=RI^2$*

Antenne RF – éléments de base

Éléments de base		Symbole et unité	Comportement en fréquence
Résistance		R en ohm	$Z=R$
Inductance		L en Henry $L=10\text{nH}$	$Z=jL\omega$ en Ohms
capacité		C en Farad $C=10\text{pF}$	$Z=1/jC\omega$ en Ohms

Circuit résonant

C : capacité d'accord



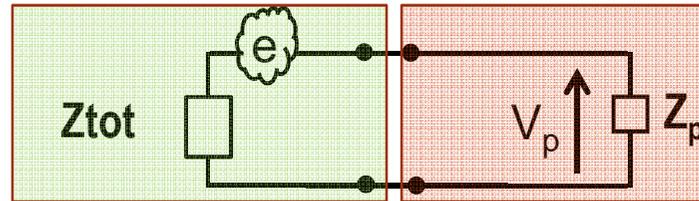
Pulsation de résonance ω_0 $LC\omega_0^2 = 1$

Facteur de qualité de l'antenne $Q = \frac{L\omega}{R}$

La tension du signal RMN e induit est amplifiée par le facteur de surtension du bobinage

Ordre de grandeur de Q : 100 @ 64 MHz

Adaptation



Adaptation en tension

But: transmettre le maximum de tension au préamplificateur

$$V_p = \frac{Z_p}{Z_{tot} + Z_p} e$$

$$Z_{tot} \ll Z_p$$

Adaptation en puissance

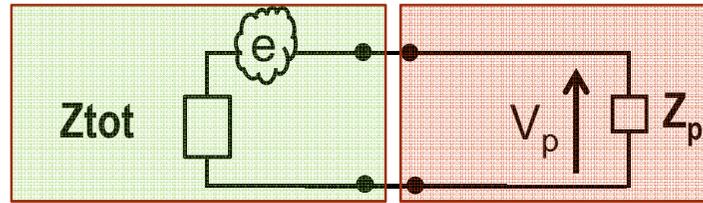
But: transférer le maximum de puissance au préamplificateur

$$P_p = \frac{Z_p}{(Z_{tot} + Z_p)^2} e^2$$

$$Z_{tot} = Z_p$$

But: fournir le maximum de puissance au récepteur à partir de la source RMN e

Adaptation



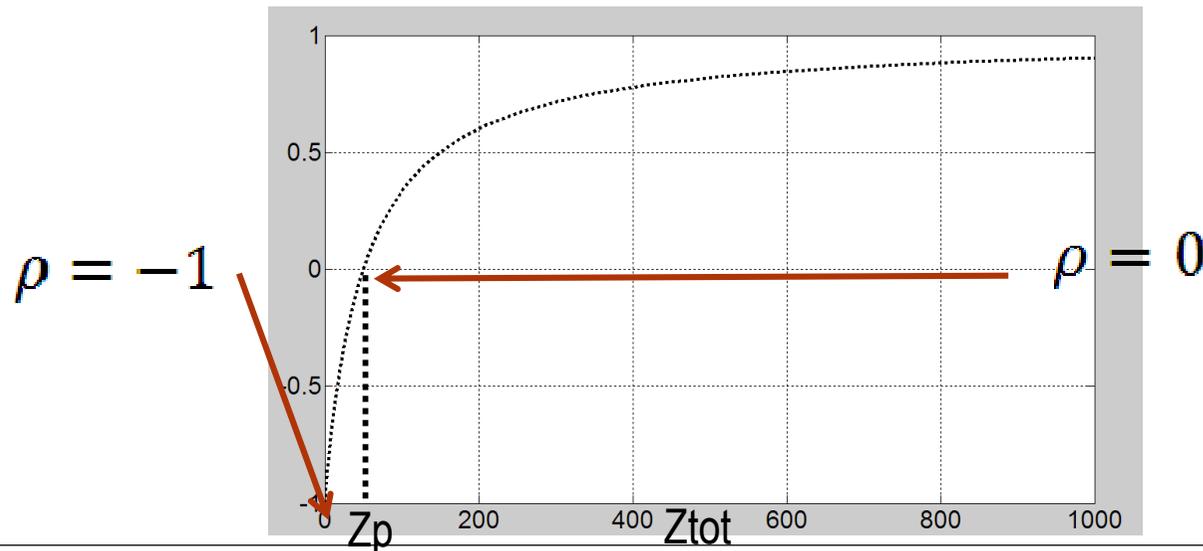
Adaptation en tension

Adaptation en puissance

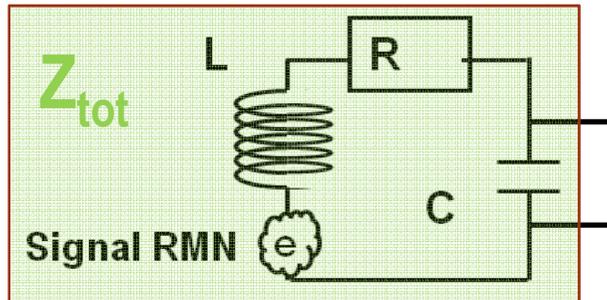
But: fournir le maximum de puissance au récepteur à partir de la source RMN e

Coefficient de réflexion

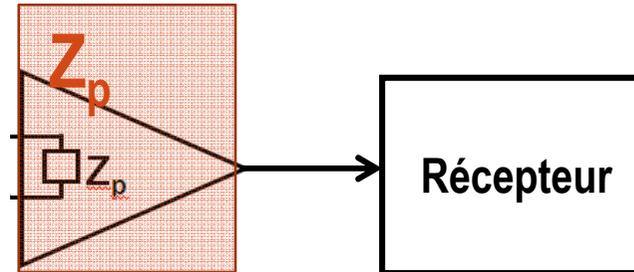
$$\rho = \frac{\text{onde réfléchie}}{\text{onde transmise}} = \frac{Z_{tot} - Z_p}{Z_{tot} + Z_p}$$



Adaptation



Classiquement $Z_p = \text{réelle}$

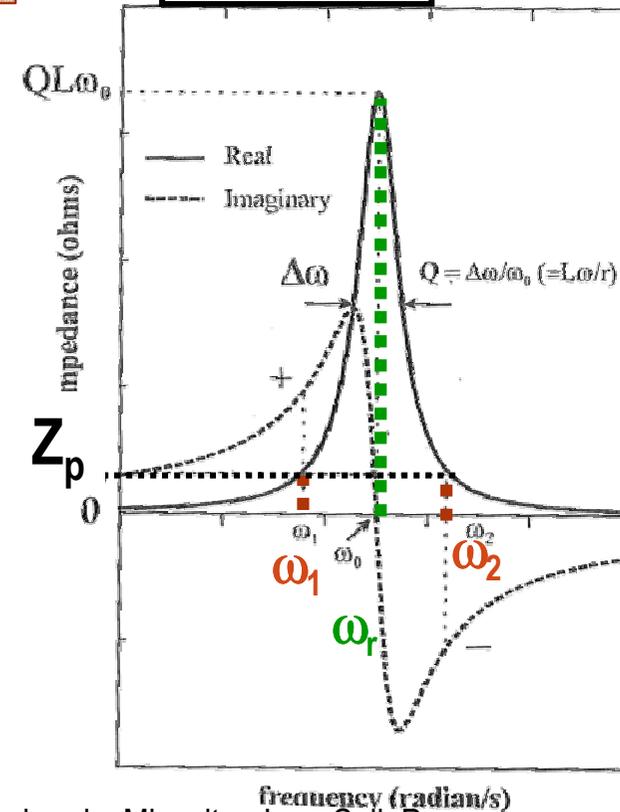


ω_r : Fréquence de résonance du circuit

ω_1, ω_2 : Fréquences pour lesquelles $\text{re}(Z_{\text{tot}}) = Z_p$

- Couplage capacitif
- Couplage inductif

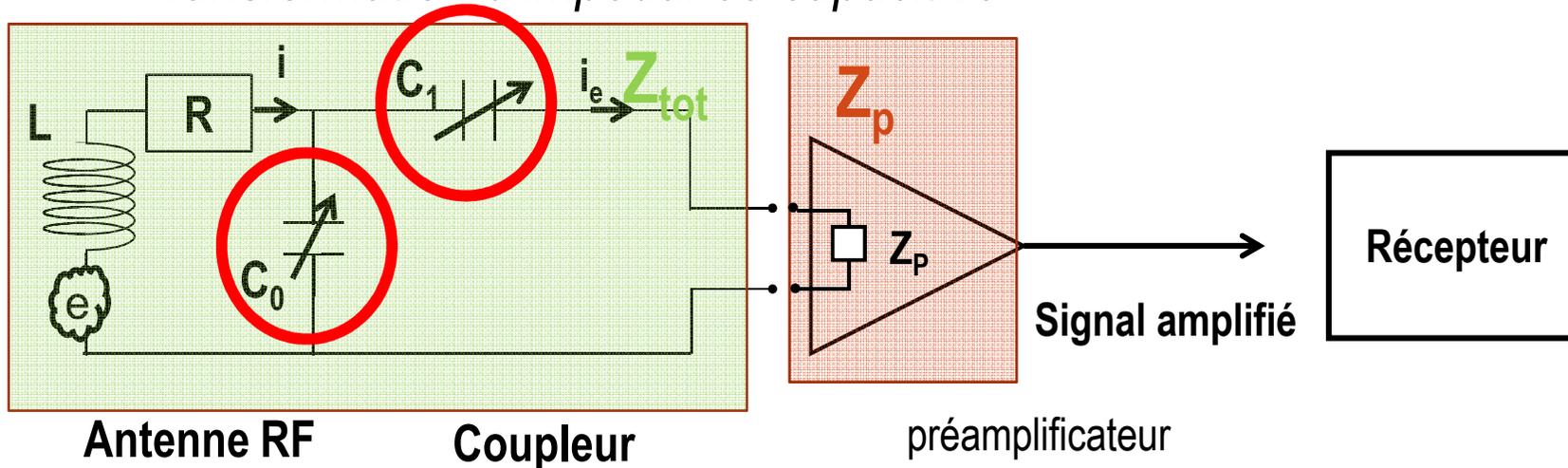
fréquence de résonance de l'antenne
 ω_r un peu supérieur à la fréquence de Larmor ω_0



NMR probeheads, Mispelter, Imp. Coll. Press

Circuit adaptation – par couplage capacitif

- Transformation d'impédance capacitive



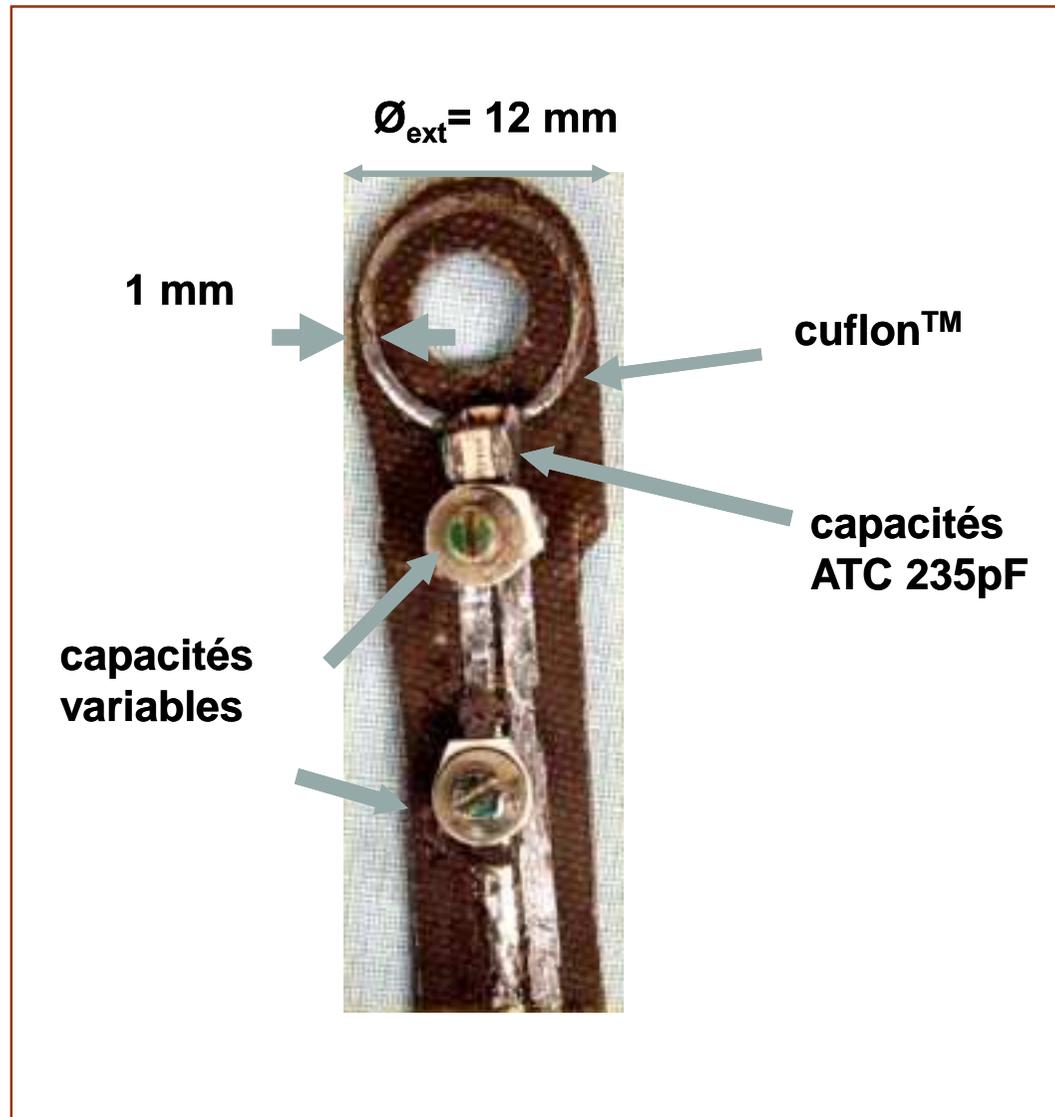
Maximum de puissance transmise: $Ri^2 = \text{Re}(Z_p) \cdot I_e^2$

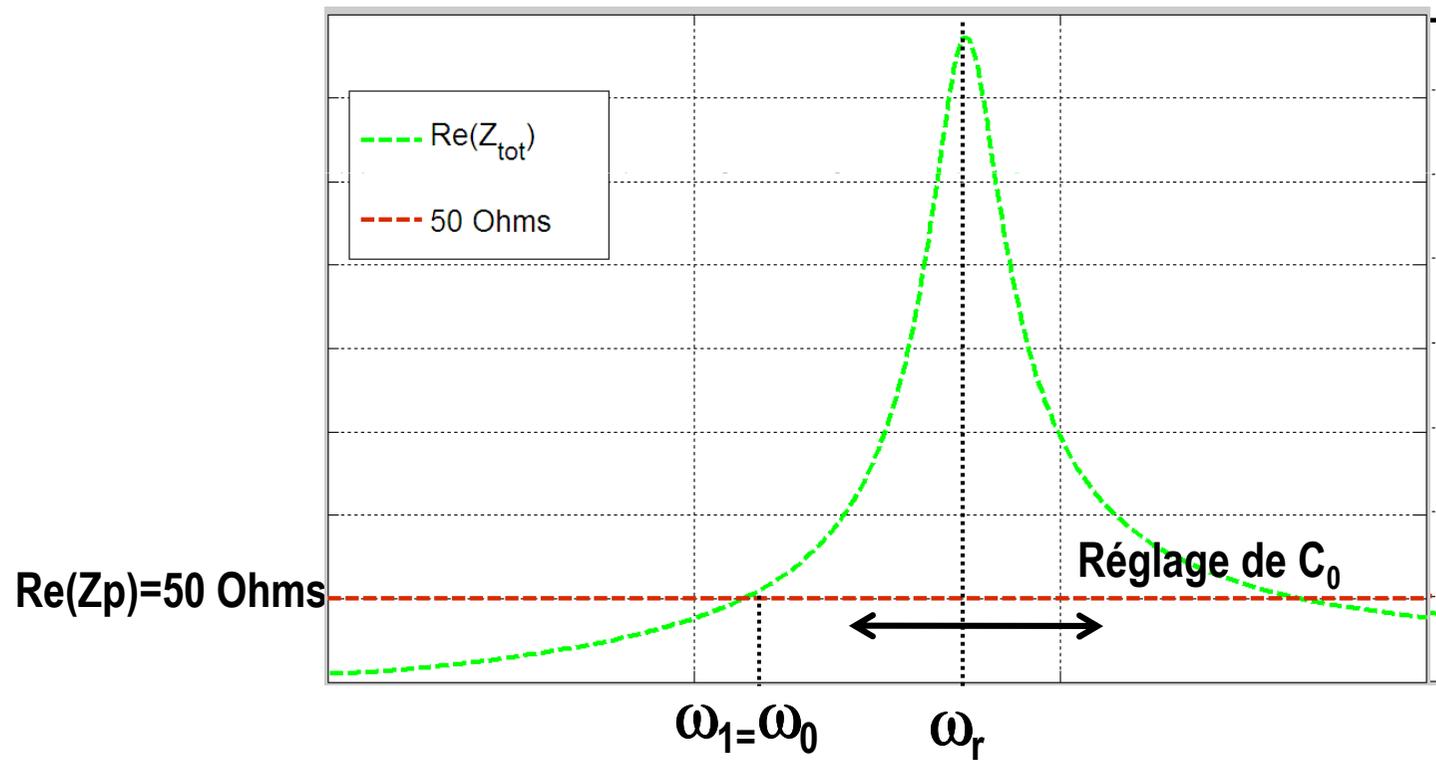
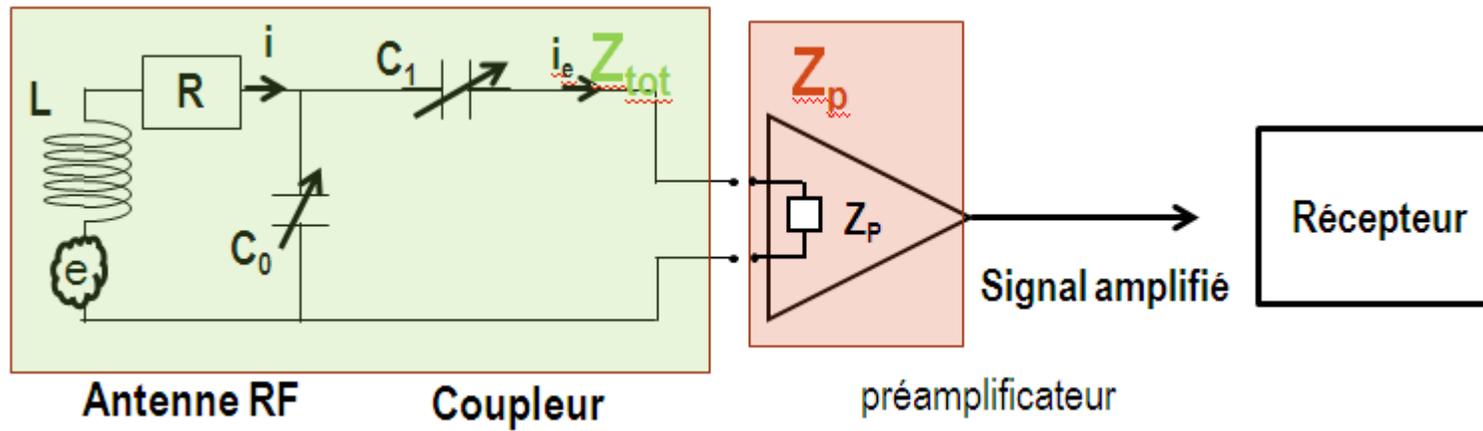
C_0 : capacité d'accord $LC_0\omega_r^2 = 1$

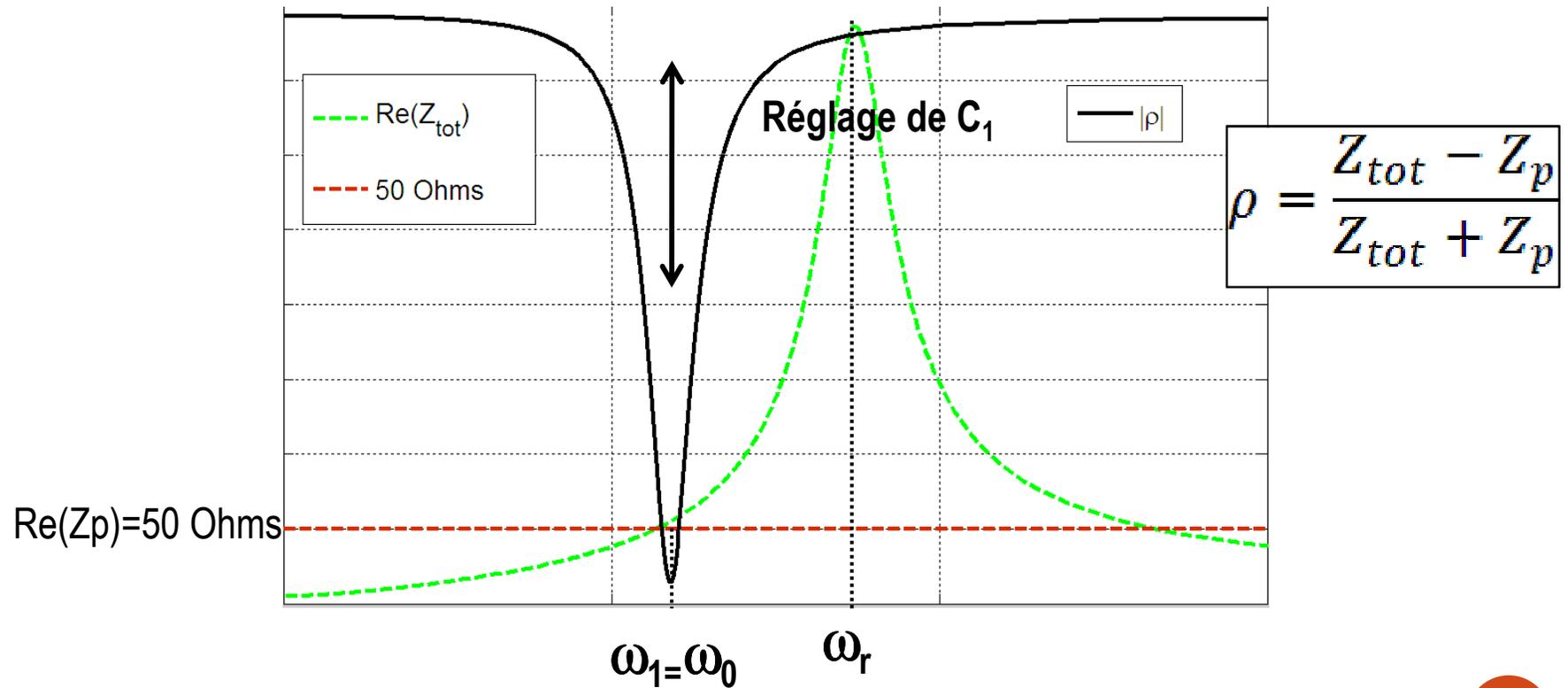
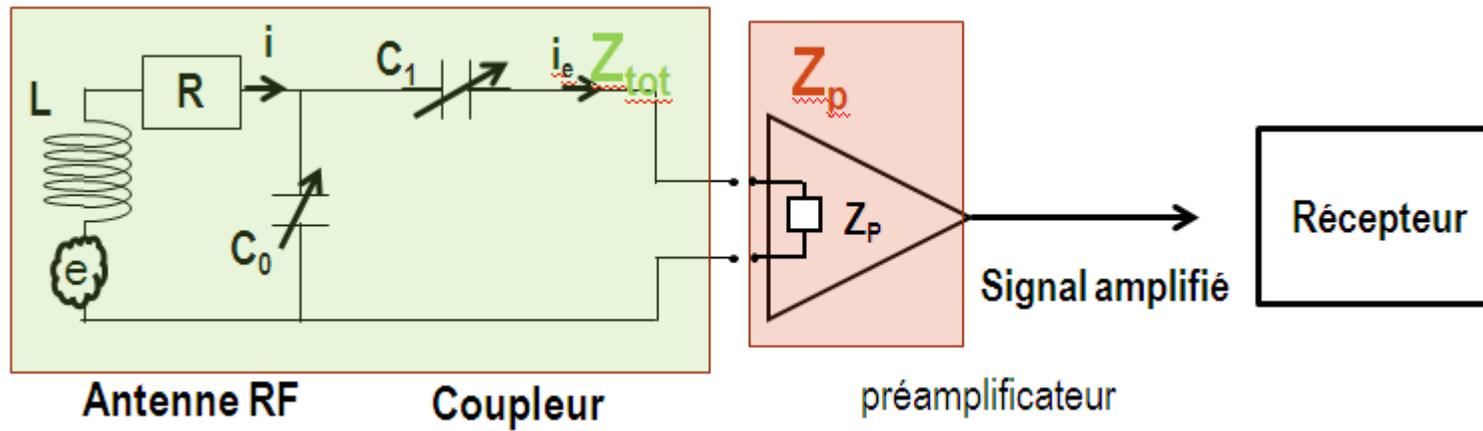
C_1 : capacité d'adaptation $C_1 \approx C_0\sqrt{R/Z_p}$

Circuit adaptation – par couplage capacitif

- *Transformation d'impédance capacitive*

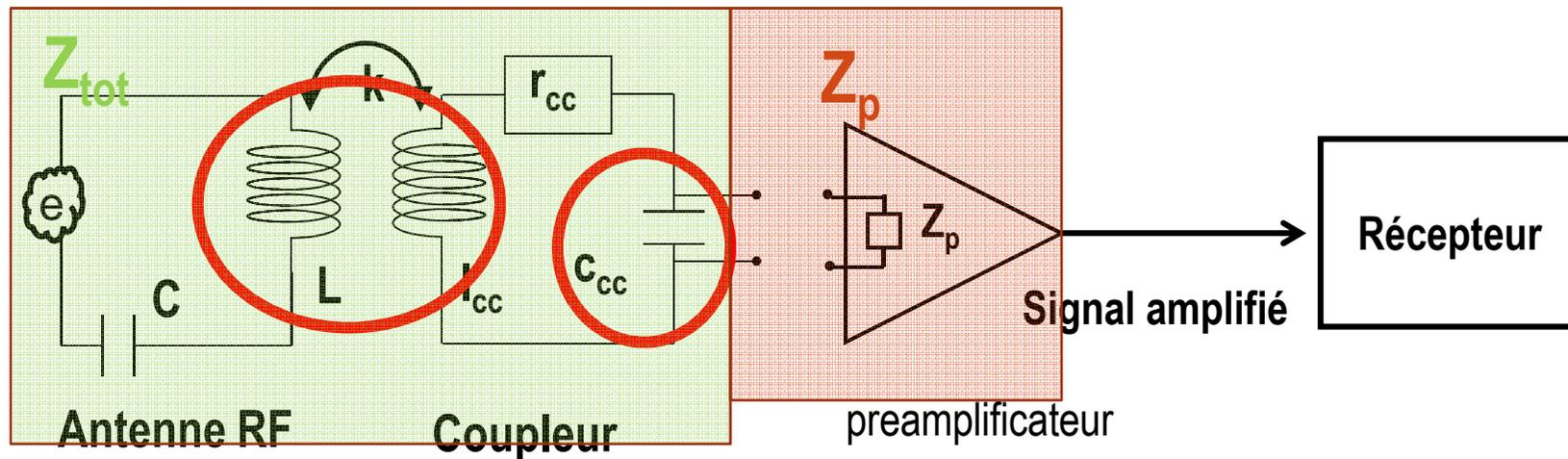






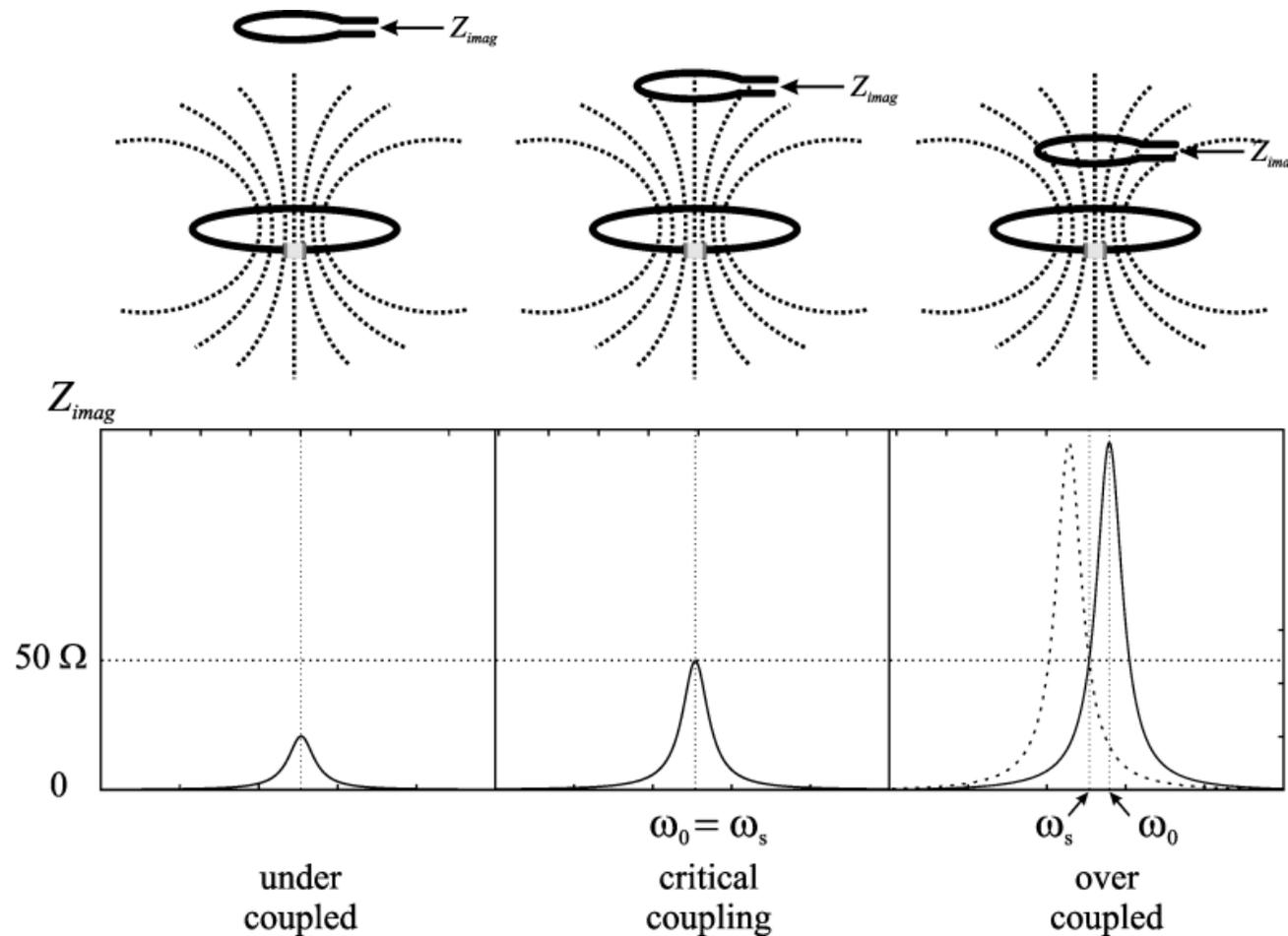
Circuit adaptation – par couplage inductif

- *Transformation d'impédance inductive*



Circuit adaptation – par couplage inductif

- Transformation d'impédance inductive

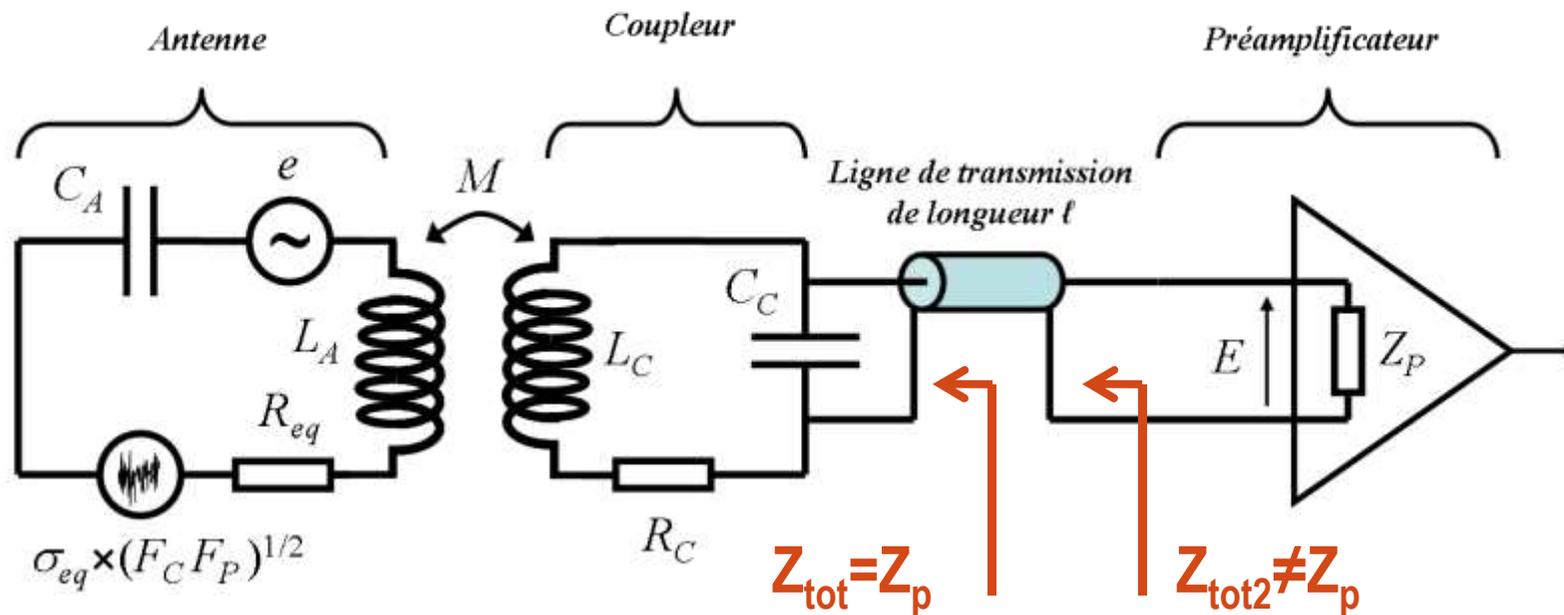


Circuit adaptation – câble coaxe

- *Attention à la transformation d'impédance au travers d'un câble coaxe*

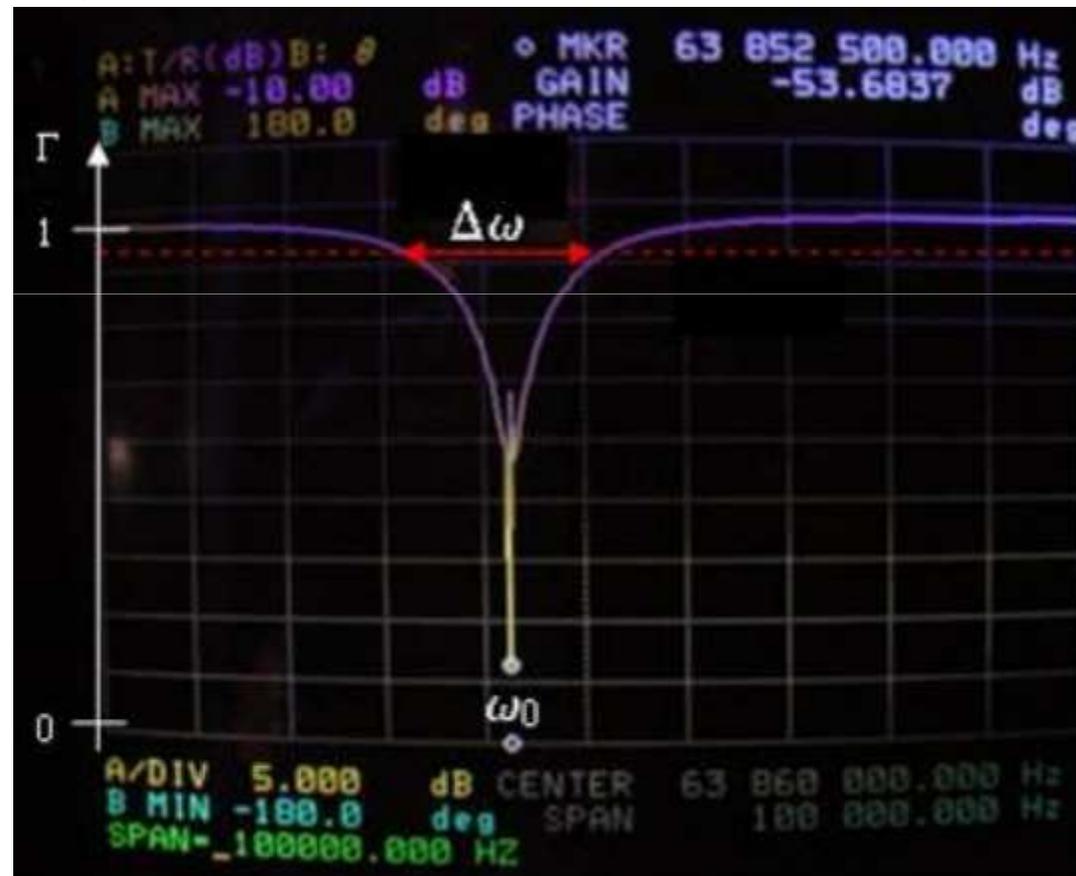
Transformation dans la ligne dépend:

- de la fréquence
- de la longueur de la ligne
- de son impédance caractéristique



Mesure du facteur de qualité par couplage inductif

- sonde de mesure
- mesure : coefficient de réflexion¹
- extraction : B_1 / \sqrt{P} , Q et F_0



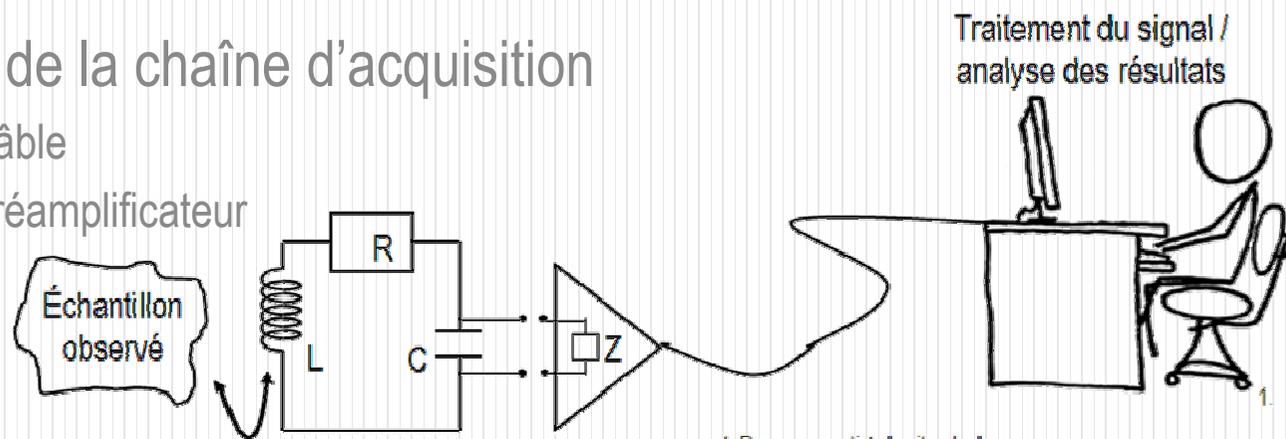
³Ginefri J.C. et al.[1999] Rev. Sci. Instrum.70:4730-4731

conclusion

- Accord: fréquence d'émission ou de réception différente de celle de Larmor, pas de couplage magnétique possible avec l'aimantation
- Adaptation: transmission ou réception du maximum de puissance

Notion de bruit dans la chaîne d'acquisition

- Bruit de l'échantillon - bruit magnétique dans les tissus
- Bruit de l'antenne
 - Evaluation de l'efficacité
 - Efficacité d'une antenne RF
 - SAR
- Bruit de la chaîne d'acquisition
 - Câble
 - Préamplificateur



1. Personnage tiré du site xkcd

Bruit magnétique dans les tissus

- Dans les tissus - charges électrique mobiles (ions, électrons)
($\epsilon \approx \epsilon_r \epsilon_0$, $\mu \approx \mu_0$)

Champ $E \rightarrow$ courant de conduction J

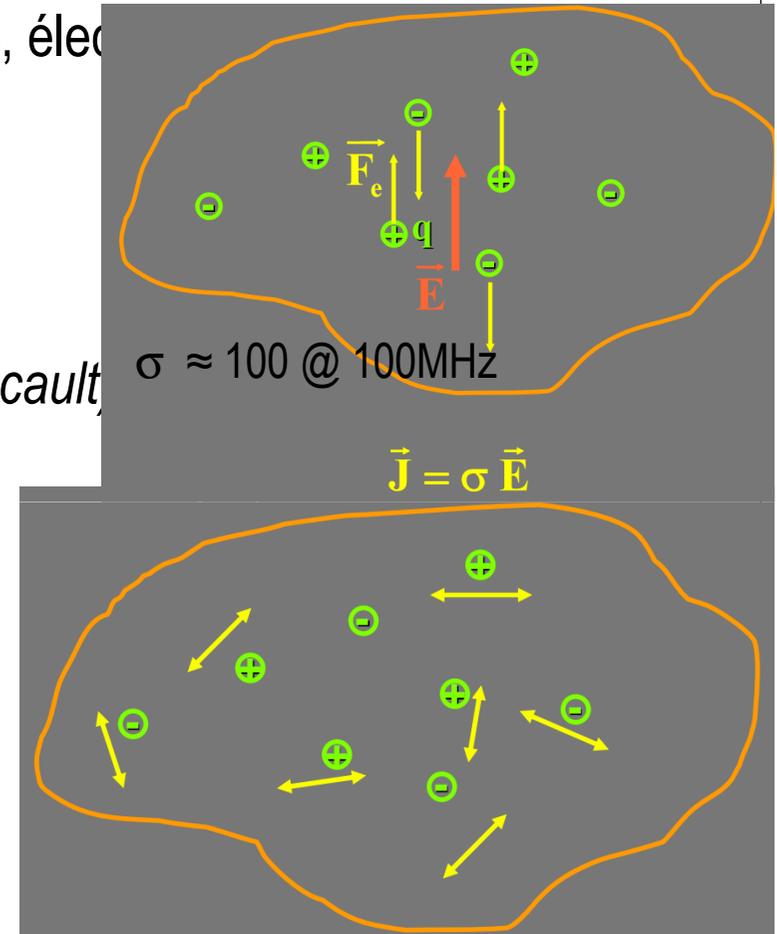
Champ B alternatif \rightarrow boucle de champ E

\rightarrow boucle de courant induit (Foucault)

- Agitation thermique des charges
 \rightarrow Mouvement aléatoire des porteurs des charges
- Composantes circulaires des courants aléatoires
 \rightarrow dipôles magnétiques fluctuants.

Même chemin que le signal RMN (fluctuation de champ B et fluctuations induites par les spins nucléaires)

\rightarrow Source de bruit intrinsèque en IRM ou RMN



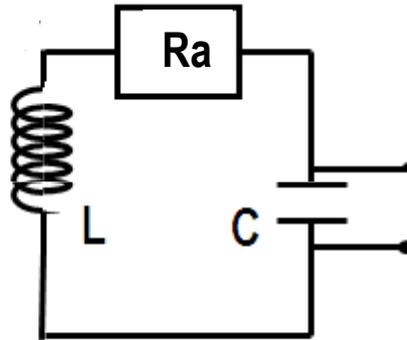
Antenne RF – bruit

Mesure de Q à vide $\rightarrow R_a$

R_a : résistance propre de l'antenne

T_a : température de l'antenne

BP: bande passante



Antenne IRM

$$\text{Bruit} = 4 \cdot k_B \cdot \text{BP} \cdot R_a \cdot T_a$$

$$R_a T_a \propto \omega^{1/2}$$

Bruit interne de l'antenne: fluctuation de charges dans le conducteur

a: dimension de l'antenne

Antenne RF + échantillon – bruit

Mesure de Q en charge $\rightarrow Ra+Ri$

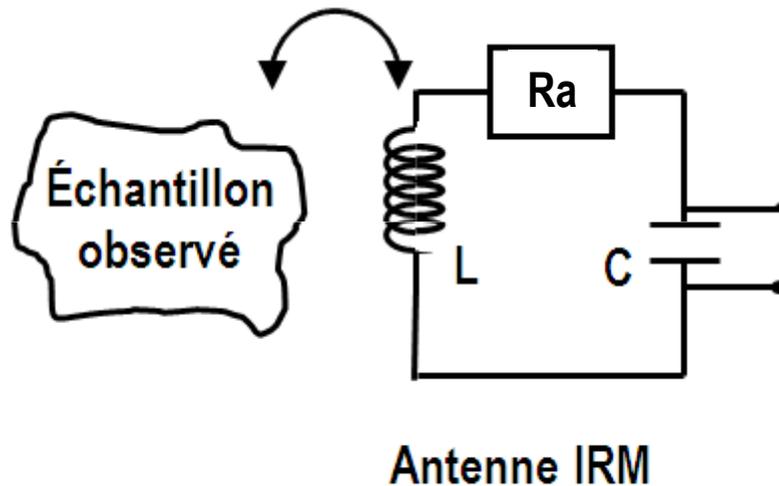
R_a : résistance propre de l'antenne

R_i : résistance de l'échantillon

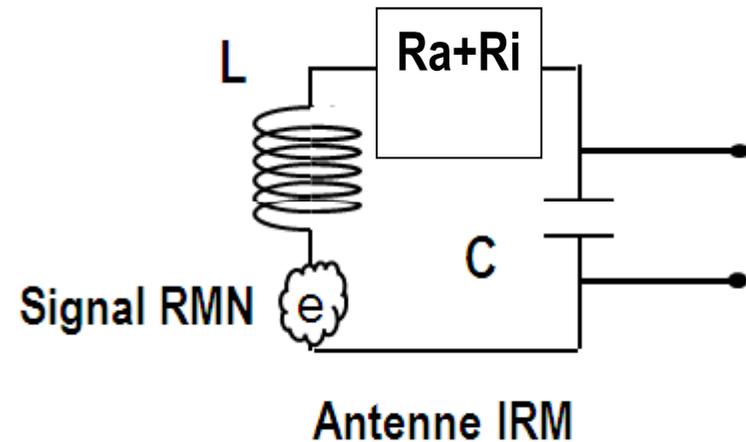
T_a : température de l'antenne

T_i : température de l'échantillon

couplage inductif



≡



$$\text{Bruit} = 4 \cdot k_B \cdot BP \cdot (R_a \cdot T_a + R_i \cdot T_i)$$

$$R_i T_i \propto a^3 \omega^2$$

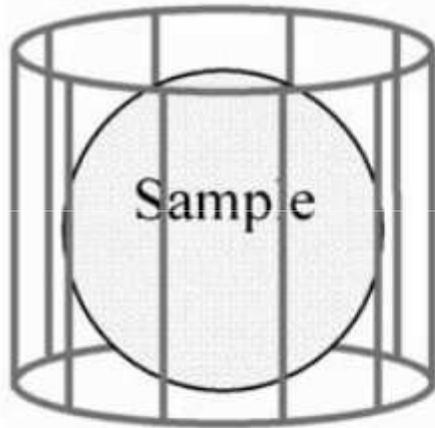
Bruit induit: fluctuation de charges dans l'échantillon

a: dimension de l'antenne

Antenne RMN - efficacité

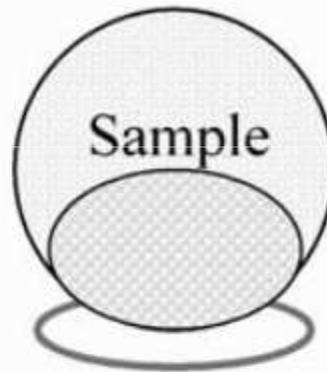
$$RSB \propto \frac{\text{volume élémentaire détecté}}{(\text{taille de l'objet})^{5/2}}$$

Diminuer la taille de l'antenne revient à filtrer spatialement le bruit de l'échantillon



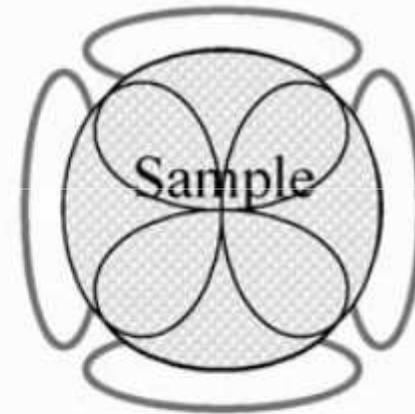
Volume coil
(e.g. Birdcage)

- Réponse uniforme
- SNR limité par l'objet



Surface coil

- Réponse locale
- SNR élevé



Phased array

- Réponse étendue
- SNR optimale

Puissance dissipée - SAR

À haut champ $Ra \ll Ri$

- Bruit de l'électronique négligeable
- Problème d'échauffement lors de l'application de champ RF (Specific Absorption Rate)

$$SAR = \frac{P_{\text{totale absorbée}}}{\text{poids patient}} \quad \text{En W/kg}$$

Maximum 4 W/kg

8 W/kg en cas d'application locale du champ RF

$$SAR = \frac{\sum \text{énergies déposées par impulsion RF}}{TR \cdot \text{poids patient}}$$

L'énergie d'une impulsion dépend: - de la durée de l'impulsion

- du carré de son amplitude

- d'un facteur de forme

Quadripôle – facteur de bruit

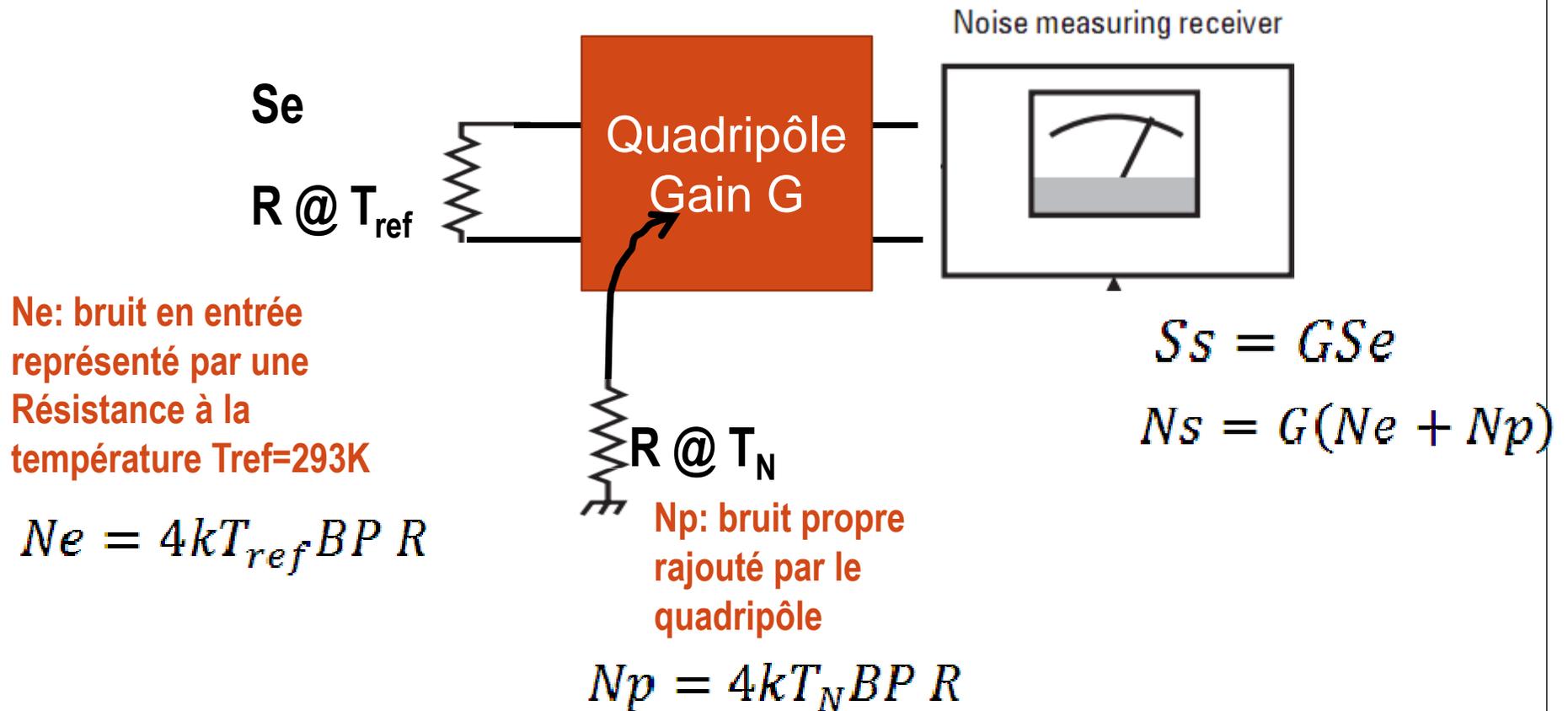


F, le facteur de bruit effectif de l'électronique, caractérise la dégradation apportée par le quadripôle.

$$F = \frac{SNR_e}{SNR_s}$$

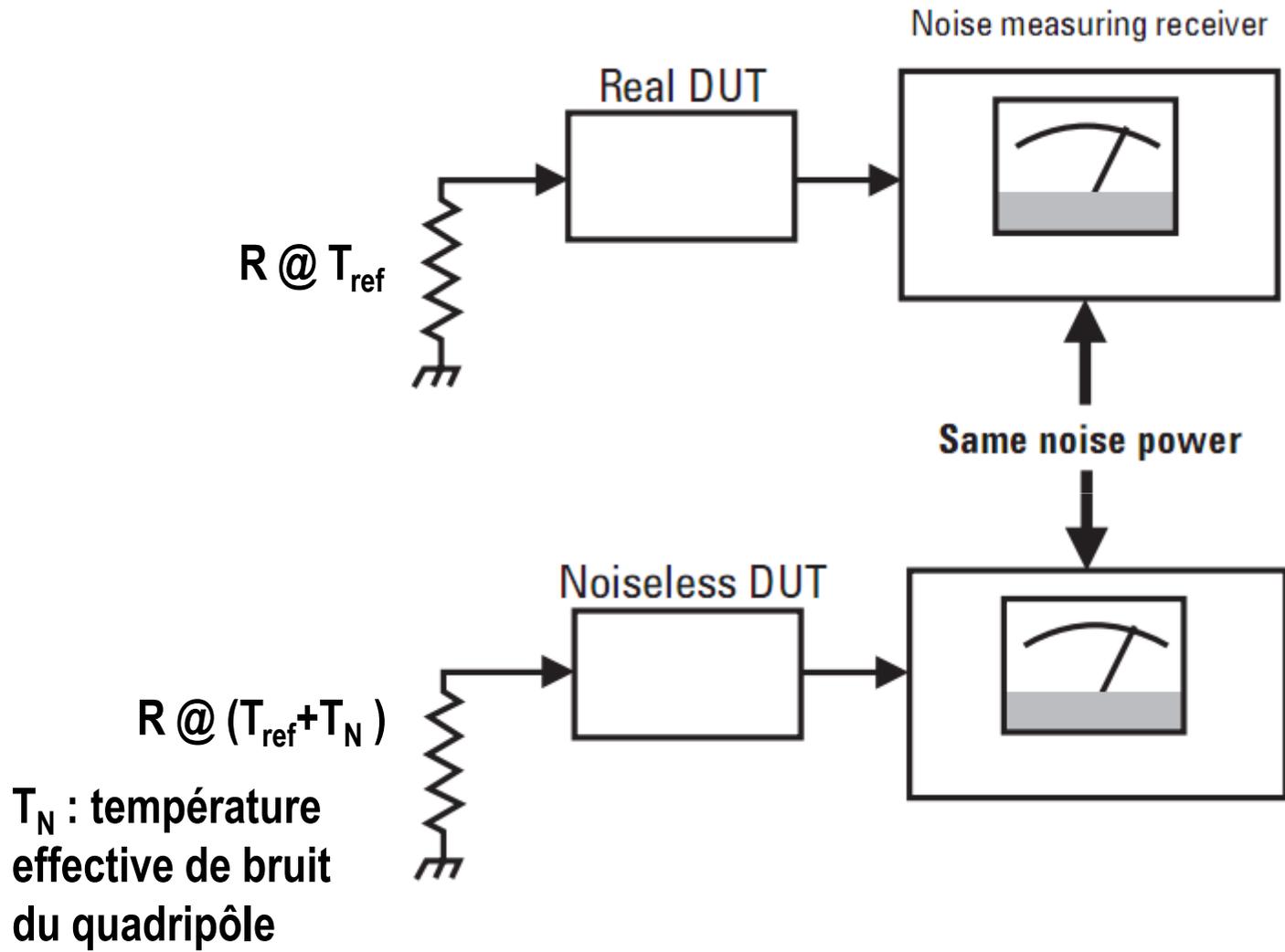
Le quadripôle peut être un câble coaxial, un préamplificateur etc...

Quadripôle – facteur et température de bruit



$$F = 1 + \frac{N_p}{N_e} = 1 + \frac{T_N}{T_{ref}}$$

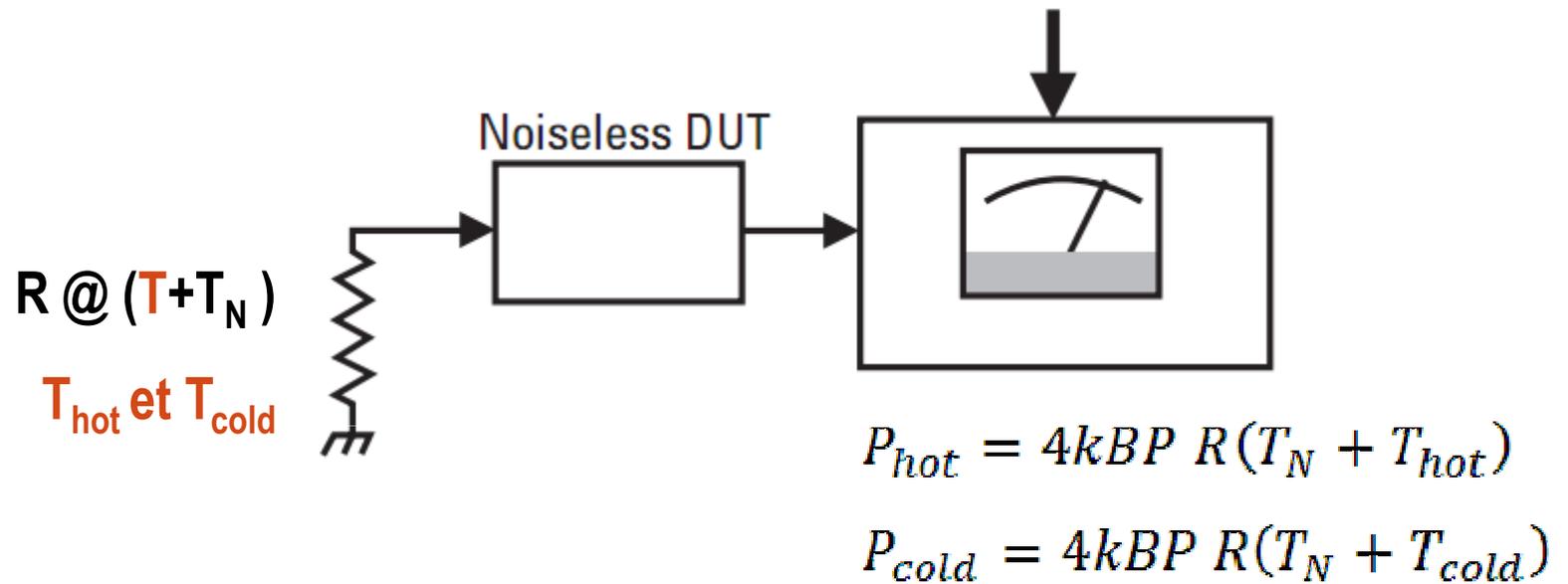
R @ T = bruit en entrée du quadripôle à tester



Agilent Y method

mesure du facteur de bruit – méthode des températures

Noise power measurement



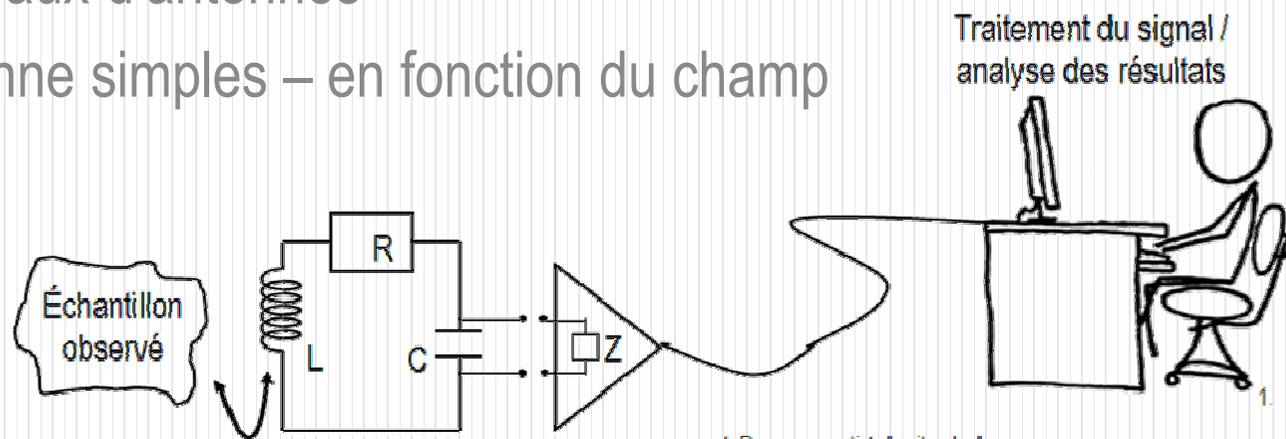
$$T_N = \frac{T_{hot} - T_{cold} \cdot \frac{P_{hot}}{P_{cold}}}{\frac{P_{hot}}{P_{cold}} - 1}$$

Bilan pertes

- Pertes par effet Joules dans la résistance de l'antenne
- Pertes magnétiques: courants induits créés par B_1 dans l'échantillon de diamètre D
d'autant plus important que l'échantillon vu par l'antenne est gros
- Pertes électriques: dépendent du champ électrique E (non utile en RMN)
Diminué la valeur locale des capacités permet de diminuer E
 $Perte = V^2 \cdot \omega^4$
- Pertes rajoutées par le préamplificateur, les câbles coaxiaux ...

Géométrie d'antenne

- émission de B_1
- Antennes de volume
- Antennes de surface
- Réseaux d'antennes
- Antenne simples – en fonction du champ



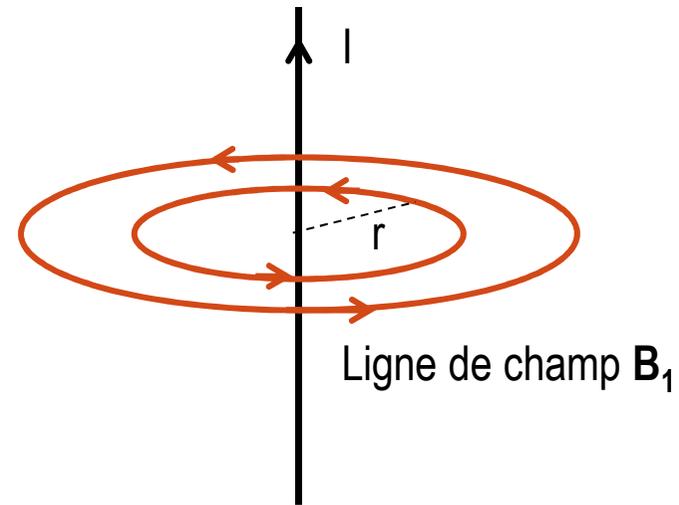
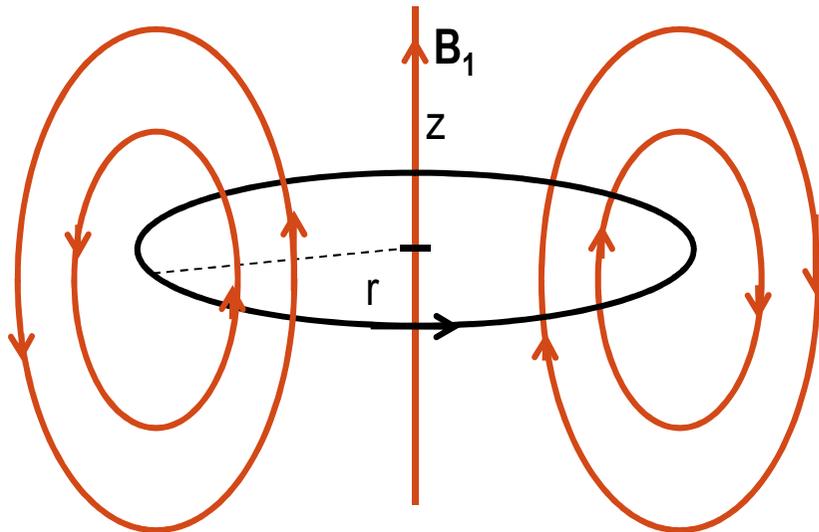
1. Personnage tiré du site xkcd

Comment crée B_1

- Fil de courant rectiligne

$$\frac{B_1}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot r}$$

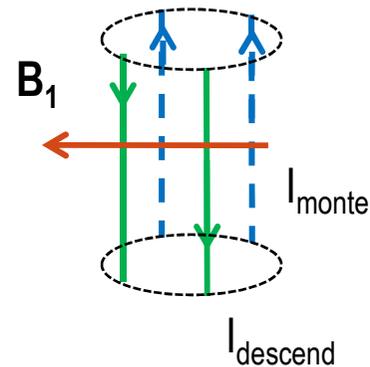
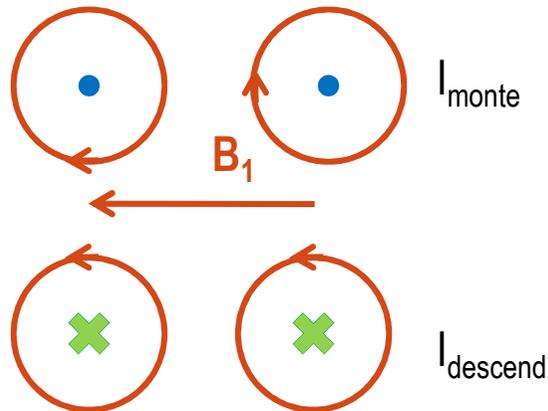
- Boucle de courant



$$\frac{B_{1z}}{I} = \frac{\mu_0 r^2}{(r^2 + z^2)^{3/2}}$$

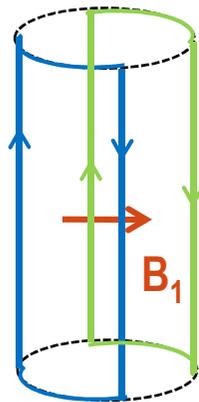
Comment crée B_1

- Géométrie 4 fils



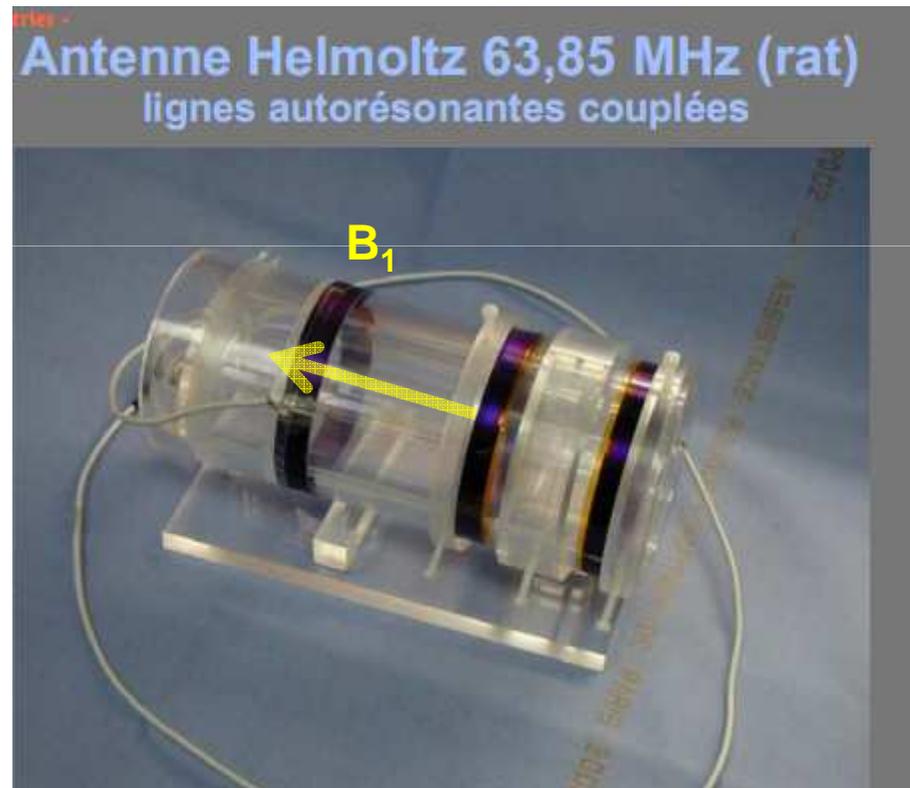
B_1 homogène

- Géométrie selle de cheval



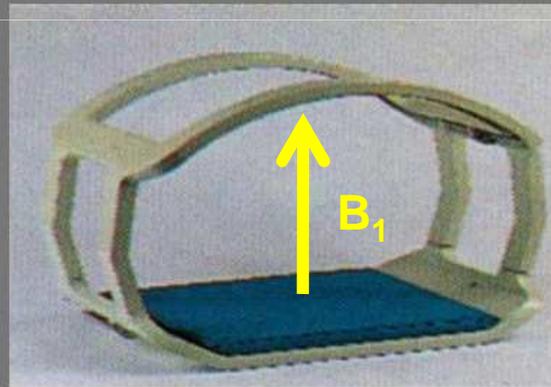
Antennes de volumes

- B_1 homogène parallèle à l'axe de l'antenne
 - Helmholtz
 - Solénoïde

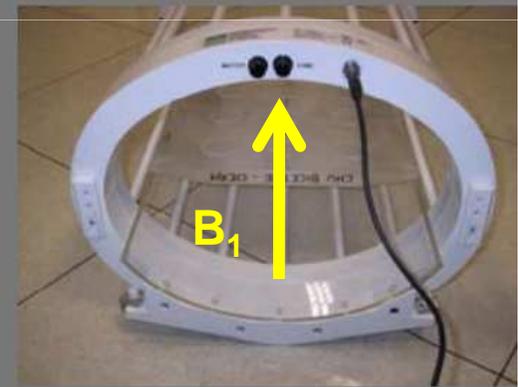


Antennes de volumes

- B_1 homogène perpendiculaire à l'axe de l'antenne
 - Selle de cheval
 - Slotted cylindre
 - Birdcage
 - Antenne TEM ($B_0 > 3T$)



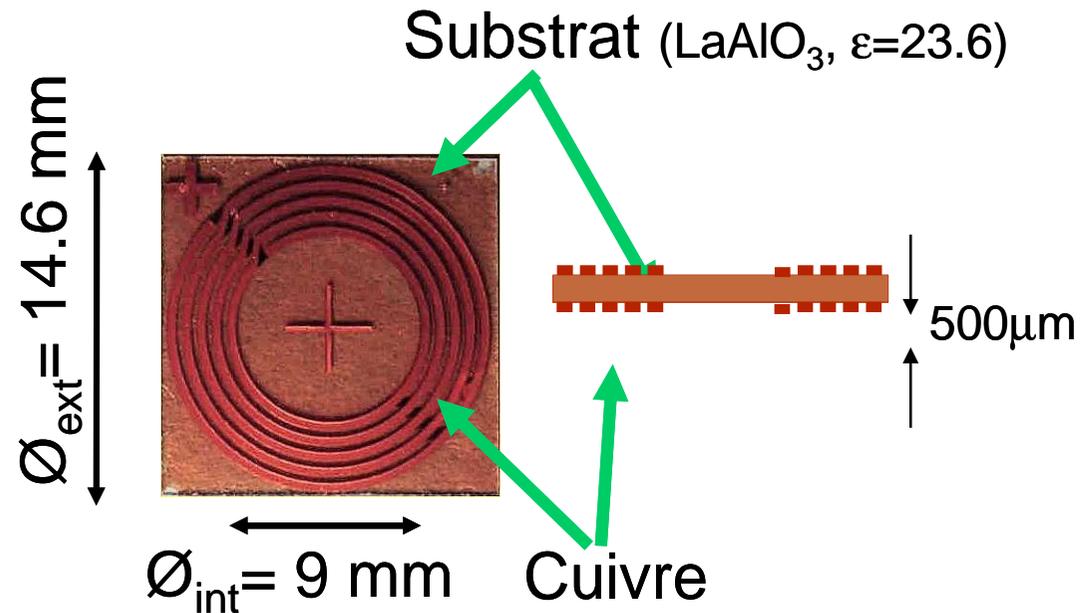
0,1 T Helmholtz/Selle de cheval



Cage d'oiseau elliptique

Antenne de surface – imagerie localisée

- Efficacité ++ car bruit de l'échantillon $R_i \ll R_a$
- Émission: antenne corps entier
- Réception: antenne de surface ou réseaux d'antennes de surface

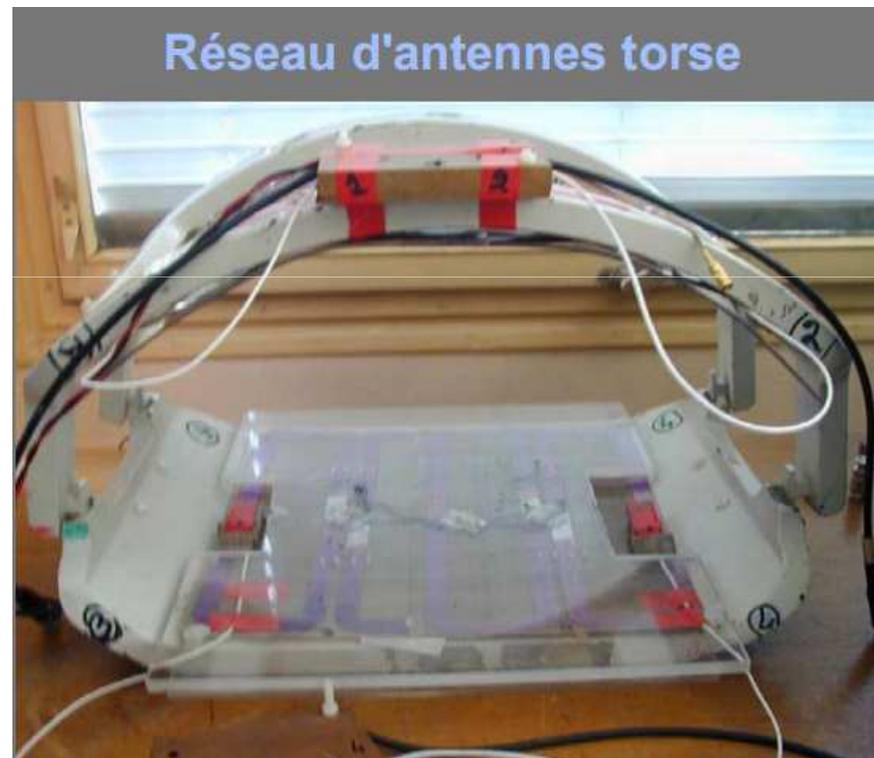


fabrication par microtechnologie² (PTP, IEF)

²Coutrot A. L. et al. [2001] Sensors and Actuators A. Physical. 91:80-84

Réseaux d'antennes de surface

- Amélioration de la sensibilité de détection
- Accélération du codage spatial (SMASH SENSE)



Réseaux d'antennes de surface

- Antennes → localisation à grande échelle (codage des basses fréquences)
- IRM classique par codage de Fourier : acquisition parallèle des signaux des différents voxels
- Nombre d'antennes et facteur d'accélération
- → augmentation de la vitesse d'acquisition sans contrainte supplémentaire sur le système de gradient
- → augmentation du RSB pour les signaux ayant une durée de vie courte
- → informations supplémentaires: réduction des artefacts de mouvements

Antennes bas champ & Antennes haut champ

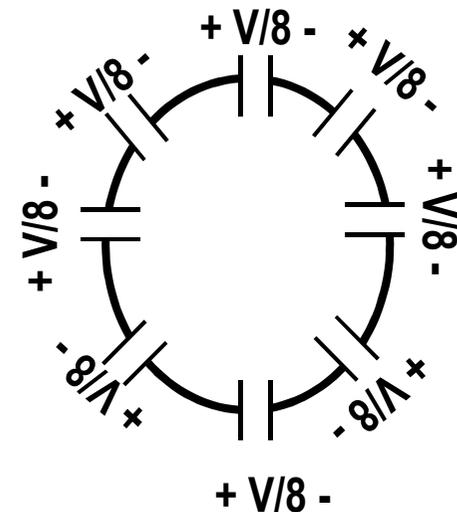
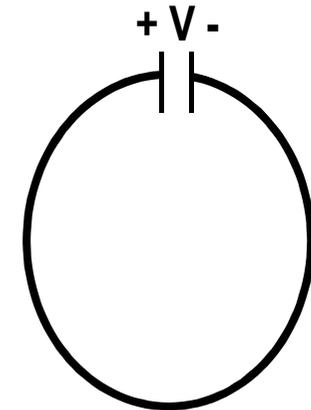
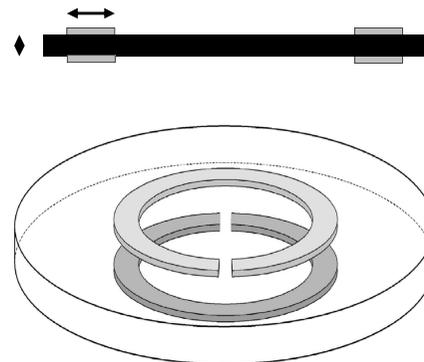
- Augmentation de B_0 taille de l'antenne $\sim \lambda$
→ Problème de déphasage le long de l'antenne

Antenne de surface de $\varnothing 24\text{ cm}$ @ 400MHz

Solution: répartition de la capacité ou éléments distribués

chaque segment inductif de longueur $\sim \lambda / 10$

- réduit le problème de déphasage
- réduit le champ $\mathbf{E}(\propto V)$
- réduit l'échauffement
- réduit les pertes



Conclusion

- Choix de l'antenne en fonction de l'expérimentation et du champs statique B_0
- Accord / adaptation
- Chaîne d'acquisition la moins bruyante possible (câble entre l'antenne et le préamplificateur, facteur de bruit du préamplificateur...)