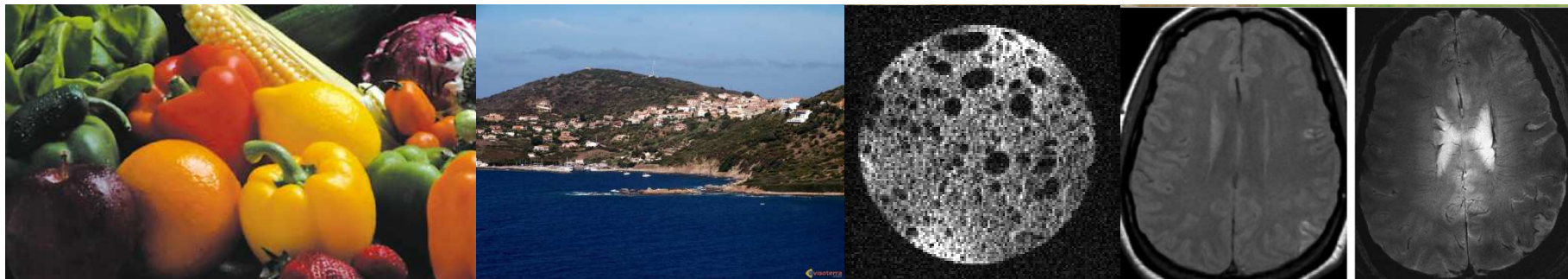




# Les bases du codage en imagerie

J.M. BONNY

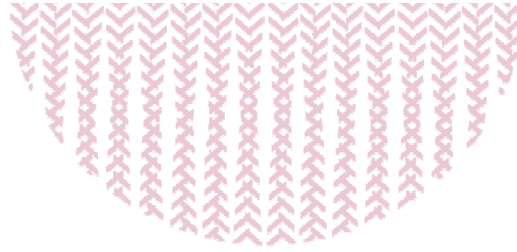
STIM-UR QuaPA, INRA Clermont-Fd



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT





De l'espace  $k$  à l'image

Excitation sélective d'une coupe épaisse

Introduction à l'imagerie parallèle



# Introduction



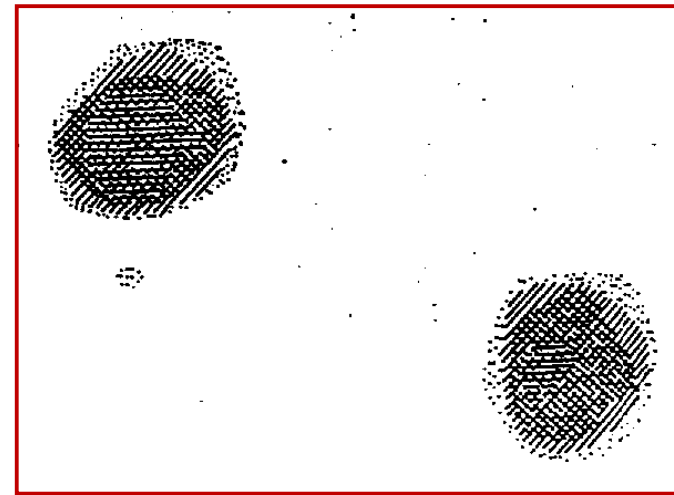
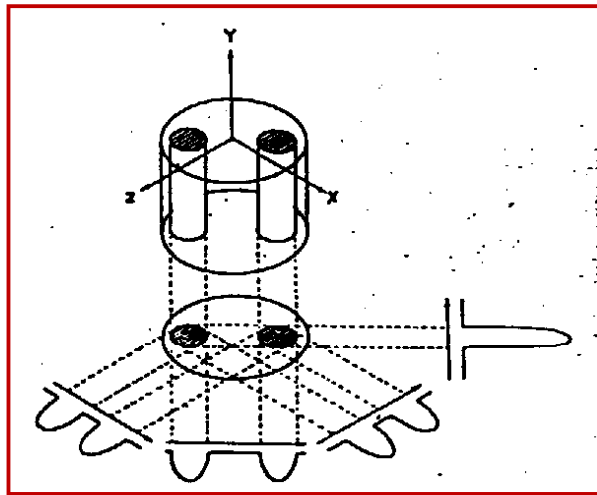
GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

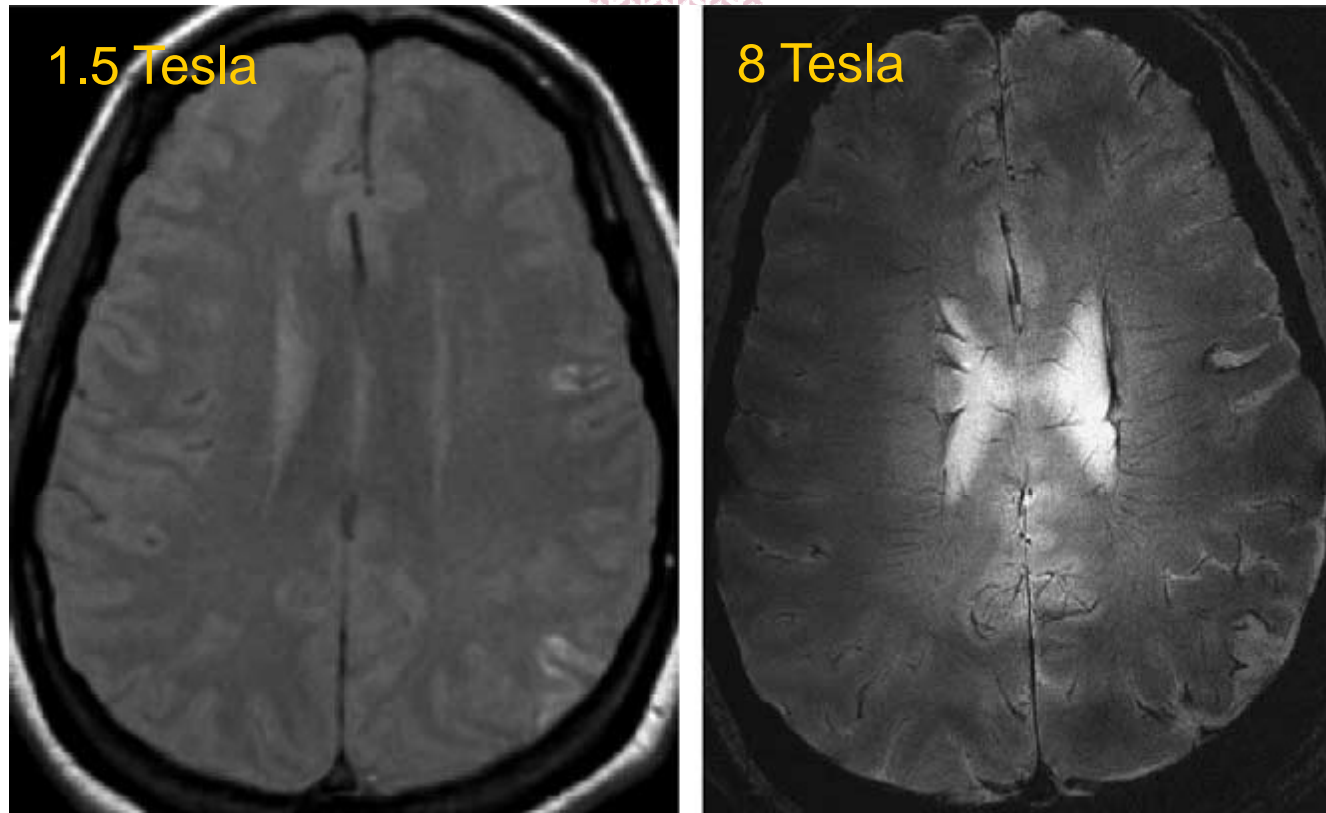
INRA

# Rappels historiques

Première image de Lauterbur en 1973

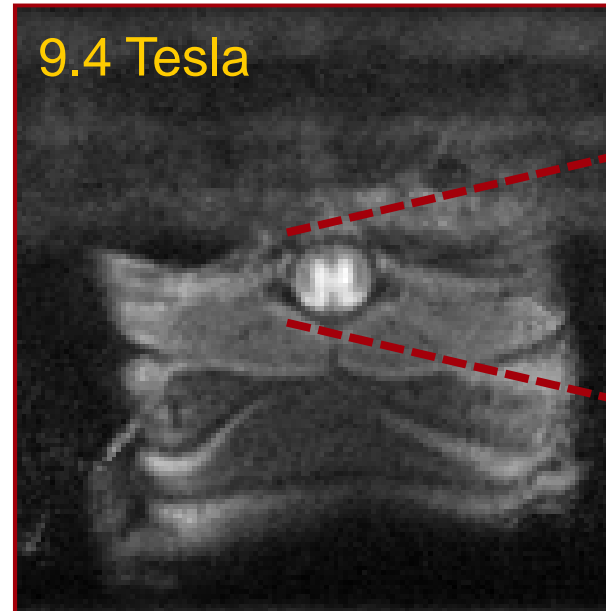
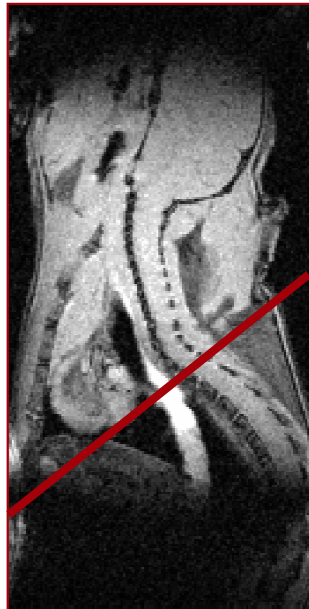


## Quelques exemples ...



Novak *et al.*, *Magn. Reson. Imaging* (2005)

## Quelques exemples ...



Bonny *et al.*, *Neurobiol. Dis.* (2004)

## Objectifs

Comment obtenir (rapidement) plusieurs signaux RMN localisés ?

Outils permettant de décrypter la plupart des méthodes de codage spatial

- Balayage de l'espace  $k$
- Sélection de tranche
- Reconstruction parallèle

Manipulation des contrastes pas abordée

- Relaxation négligée
- Spins non couplés

# IRM, SRM ... quelle différence ?

## Equipement

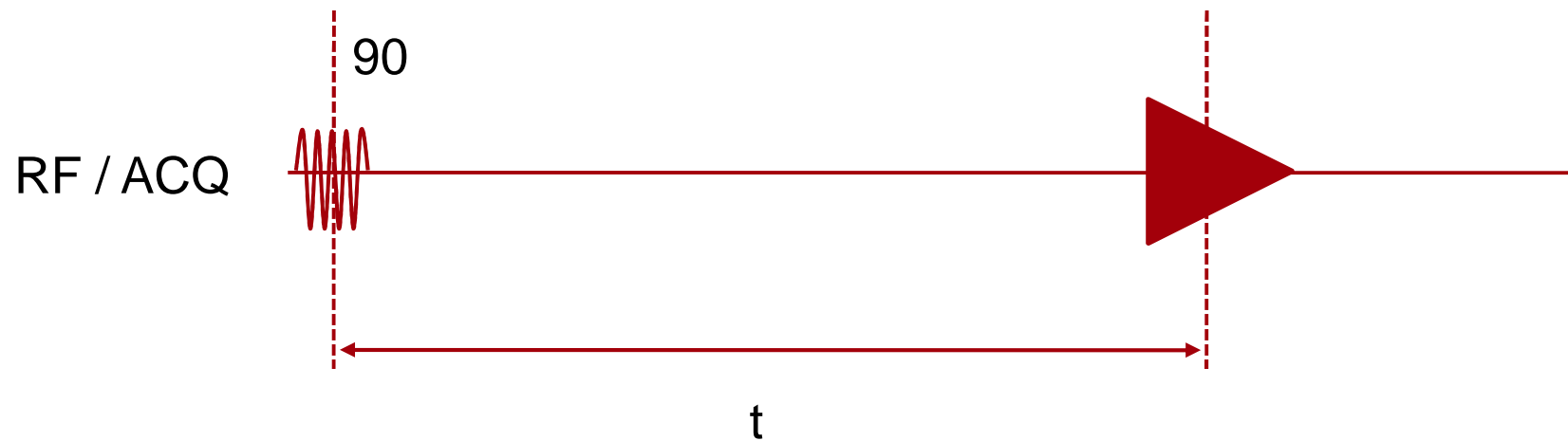
Aimant  
Chaine RF  
Chaine de détection  
**Gradients 3 axes**

## Séquence

Détection de cohérences  
**Codage spatial**



# Séquence de base



Signal d'induction libre (SIL ou *FID*)

## Signal obtenu

Signal RMN au point  $\mathbf{r}$  après détection en quadrature

$$S(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}) \exp[i\phi(\mathbf{r}, t)]$$

Démodulation par rapport à  $\omega_0$

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \int_0^t [\omega(\mathbf{r}, t') - \omega_0] dt'$$

Signal provenant de l'échantillon sans codage spatial

$$S(t) = \int \rho(\mathbf{r}) \exp[i\phi(\mathbf{r}, t)] d\mathbf{r}$$

$$S(t) = \int \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad \text{Si } \omega(\mathbf{r}) = \omega_0$$



# Signal RMN en présence de gradient de champ magnétique



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



## Effet des bobines de gradient

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} G_x(t) \\ G_y(t) \\ G_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B}{\partial x}(\mathbf{r}, t) \\ \frac{\partial B}{\partial y}(\mathbf{r}, t) \\ \frac{\partial B}{\partial z}(\mathbf{r}, t) \end{bmatrix}$$

$$\omega(\mathbf{r}, t) = \gamma \mathbf{G}(t) \cdot \mathbf{r} + \omega_0 = \gamma [G_x(t)x + G_y(t)y + G_z(t)z] + \omega_0$$

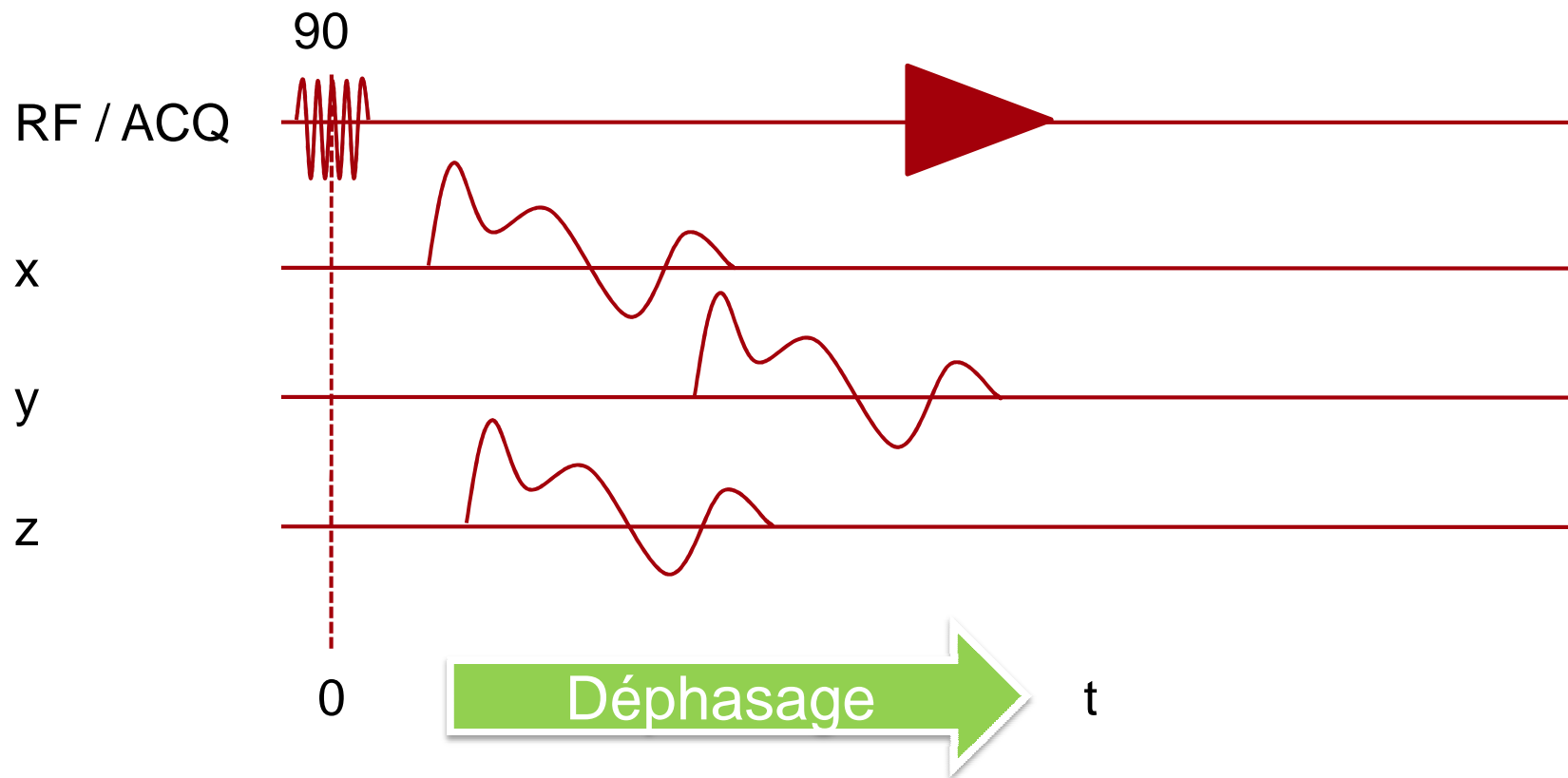
A l'origine du repère "image"  $\omega(0, t) = \omega_0$

# Les bobines de gradient



[http://www.dotynmr.com/mri/mri\\_fcgcpg.htm](http://www.dotynmr.com/mri/mri_fcgcpg.htm)

# Séquence en présence de gradients



## Signal obtenu

Phase en  $\mathbf{r}$  à  $t$

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \int_0^t [\omega(\mathbf{r}, t') - \omega_0] dt' = \gamma \int_0^t \mathbf{G}(t') \cdot \mathbf{r} dt' = 2\pi \mathbf{k}(t)$$

avec

$$\mathbf{k}(t) = \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^t \mathbf{G}(t') dt'$$

Signal provenant de l'échantillon

$$S(\mathbf{k}(t)) = \int \rho(\mathbf{r}) \exp[2\pi i \mathbf{r} \cdot \mathbf{k}(t)] d\mathbf{r}$$



# Encodage de Fourier

## Notion d'espace $k$



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA



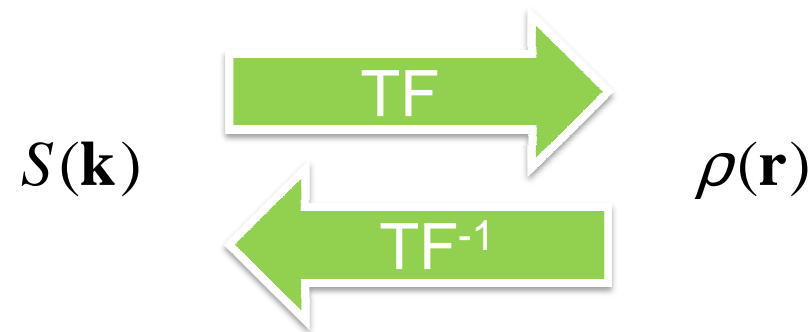
## Espace k

Par définition

$$S(\mathbf{k}) = \int \rho(\mathbf{r}) \exp(2\pi i \mathbf{r} \cdot \mathbf{k}) d\mathbf{r} = \text{TF}^{-1}(\rho(\mathbf{r}))$$

$$\text{TF}(S(\mathbf{k})) = \text{TF} \circ \text{TF}^{-1}(\rho(\mathbf{r})) = \rho(\mathbf{r})$$

Espace k réciproque de l'espace image



# Principe du codage de Fourier

$S(\mathbf{k})$  échantillonné dans un espace cartésien / Espace  $k$

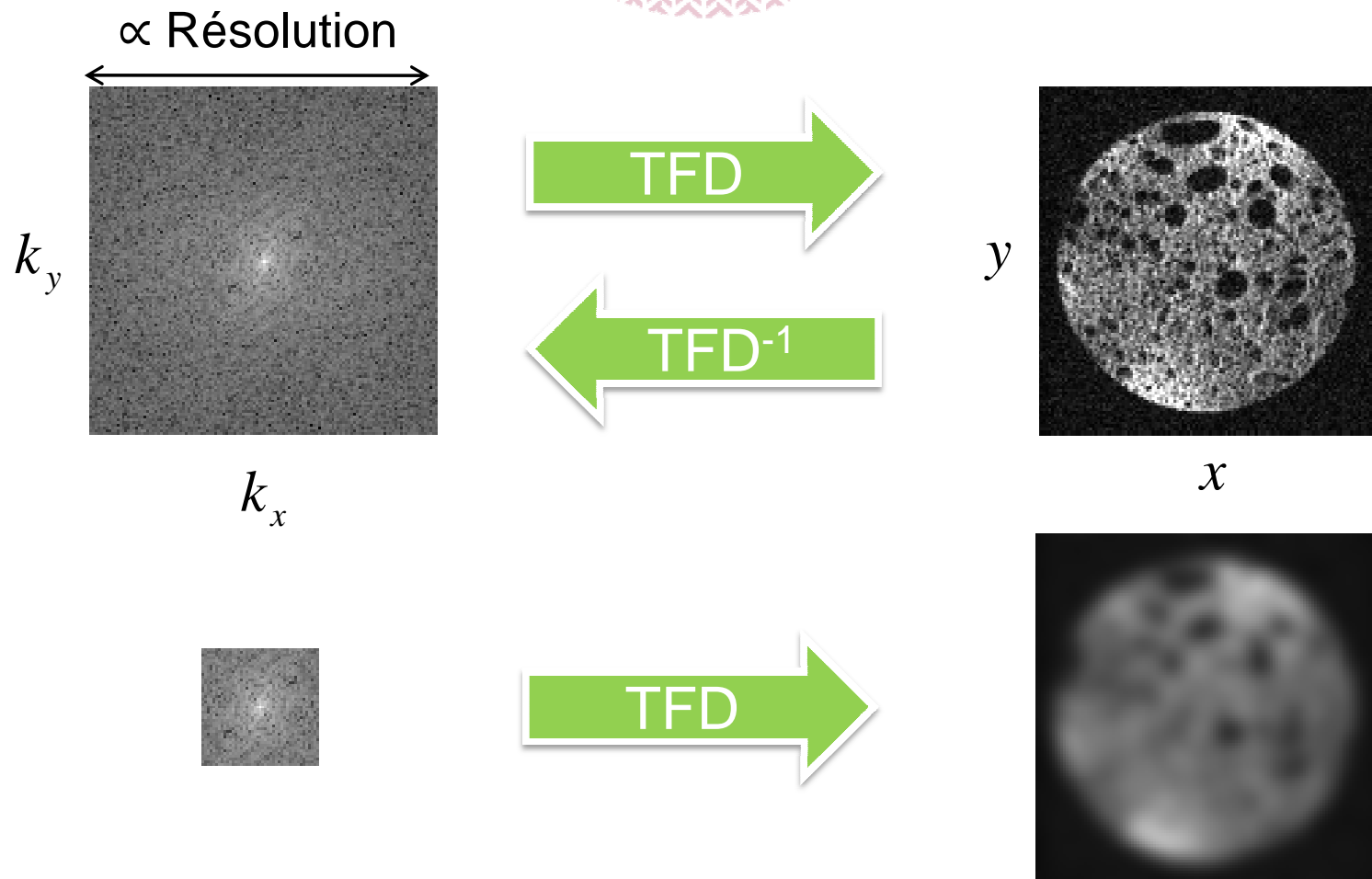
$\hat{S}(\mathbf{k})$  signal discret sur un support limité

$$\hat{S}(\mathbf{k}) = S(\mathbf{k}) \cdot \text{rect}(\mathbf{k}) \cdot \text{comb}(\mathbf{k})$$

Reconstruction effectuée par TF discrète (rapide)

$$\hat{S}(\mathbf{k}) \xrightarrow{\text{TFD}} \hat{\rho}(\mathbf{r}) \approx \rho(\mathbf{r})$$

# Espace k / Espace image

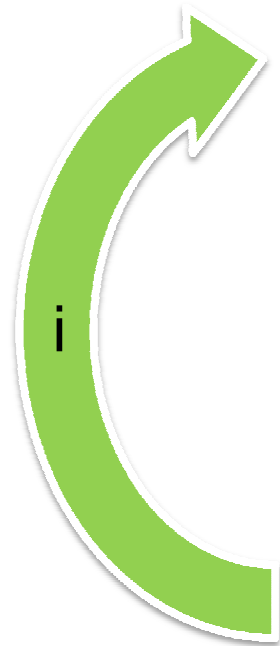


# Trajectoire dans l'espace k

Evolution des gradients  $\mathbf{G}(t)$   Trajectoire dans l'espace k  $\mathbf{k}(t)$

Echantillonnage du signal RMN en  $\mathbf{k}(t)$    $\hat{S}(\mathbf{k}(t))$

# Principe général



Evolution temporelle du gradient  $\mathbf{G}_i(t)$

Intégration

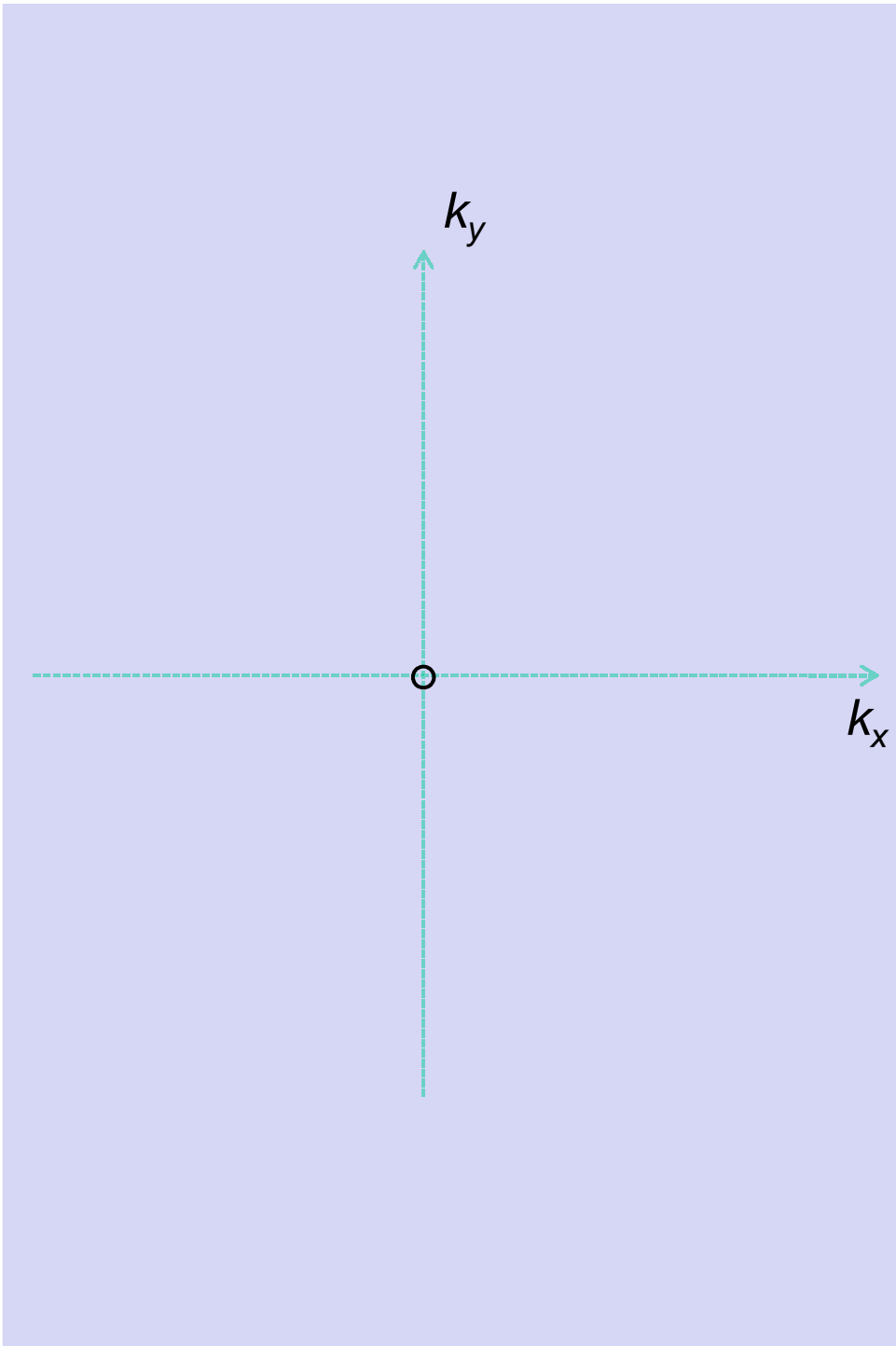
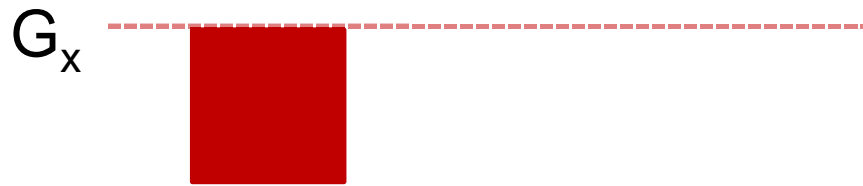
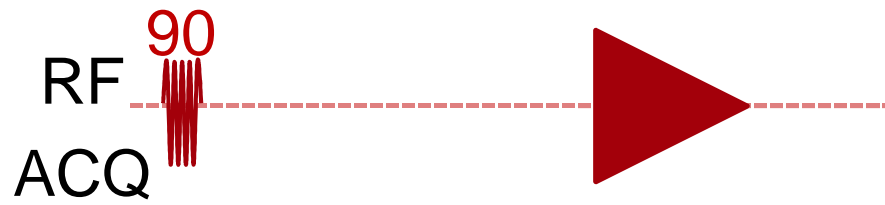
$$\text{Trajectoire } \mathbf{k}_i(t) = \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^t \mathbf{G}_i(t') dt'$$

Acquisition

Remplissage de l'espace k

Transformée de Fourier

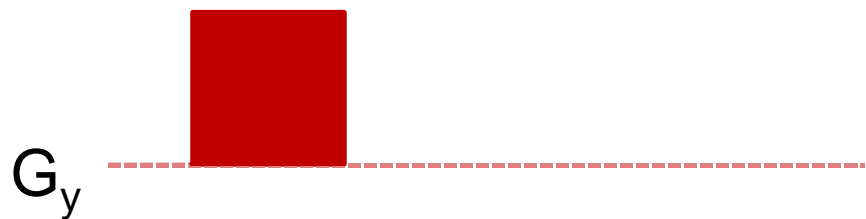
Image





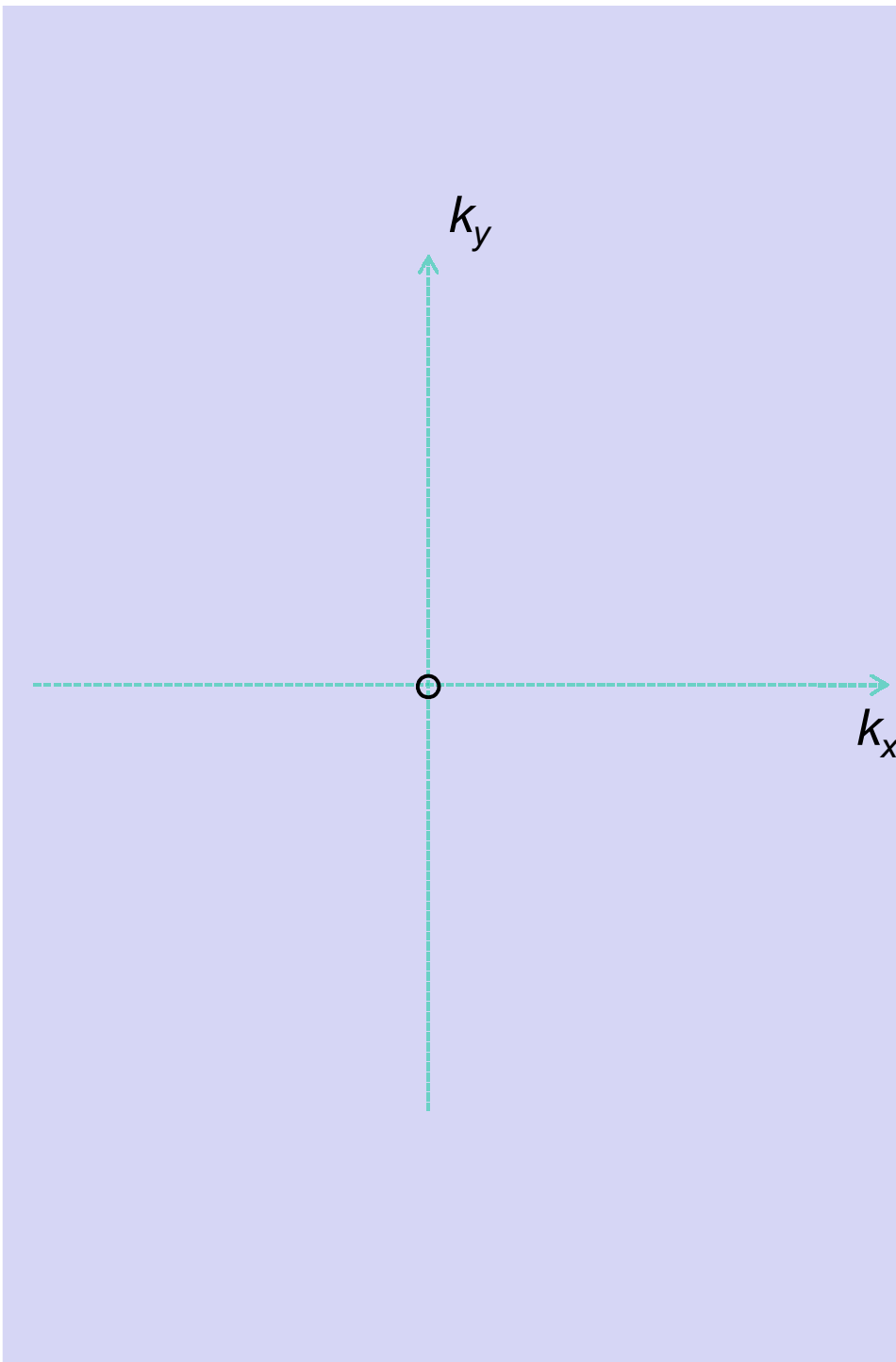
$G_x$

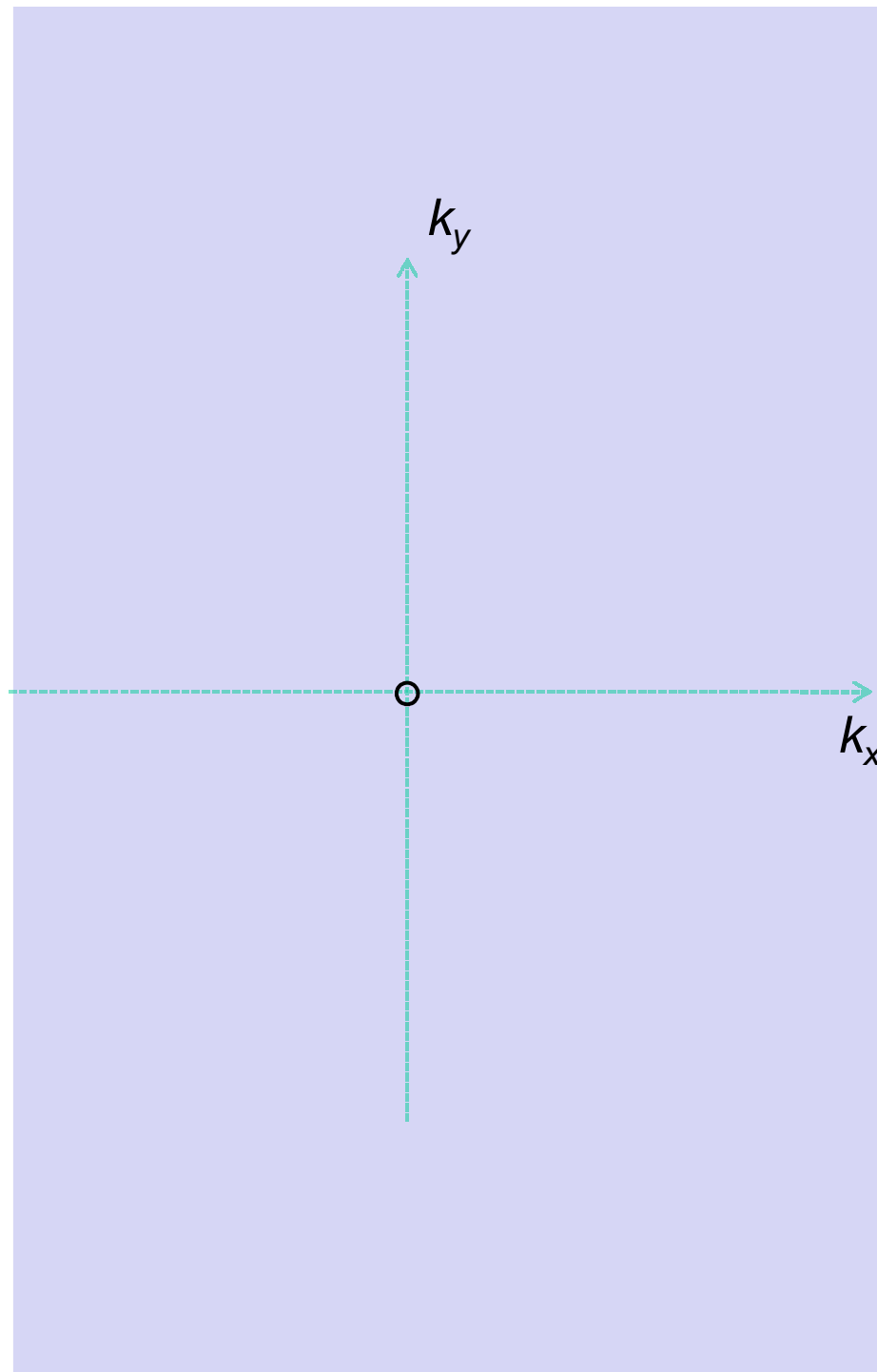
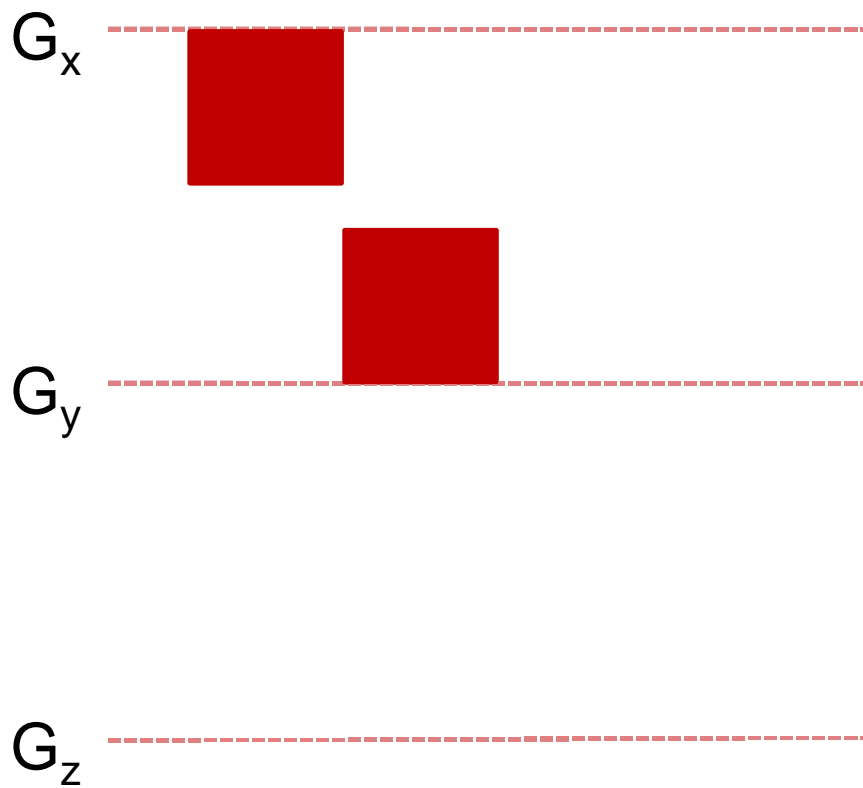
A horizontal red dashed line extending across the width of the diagram, representing the  $G_x$  gradient.



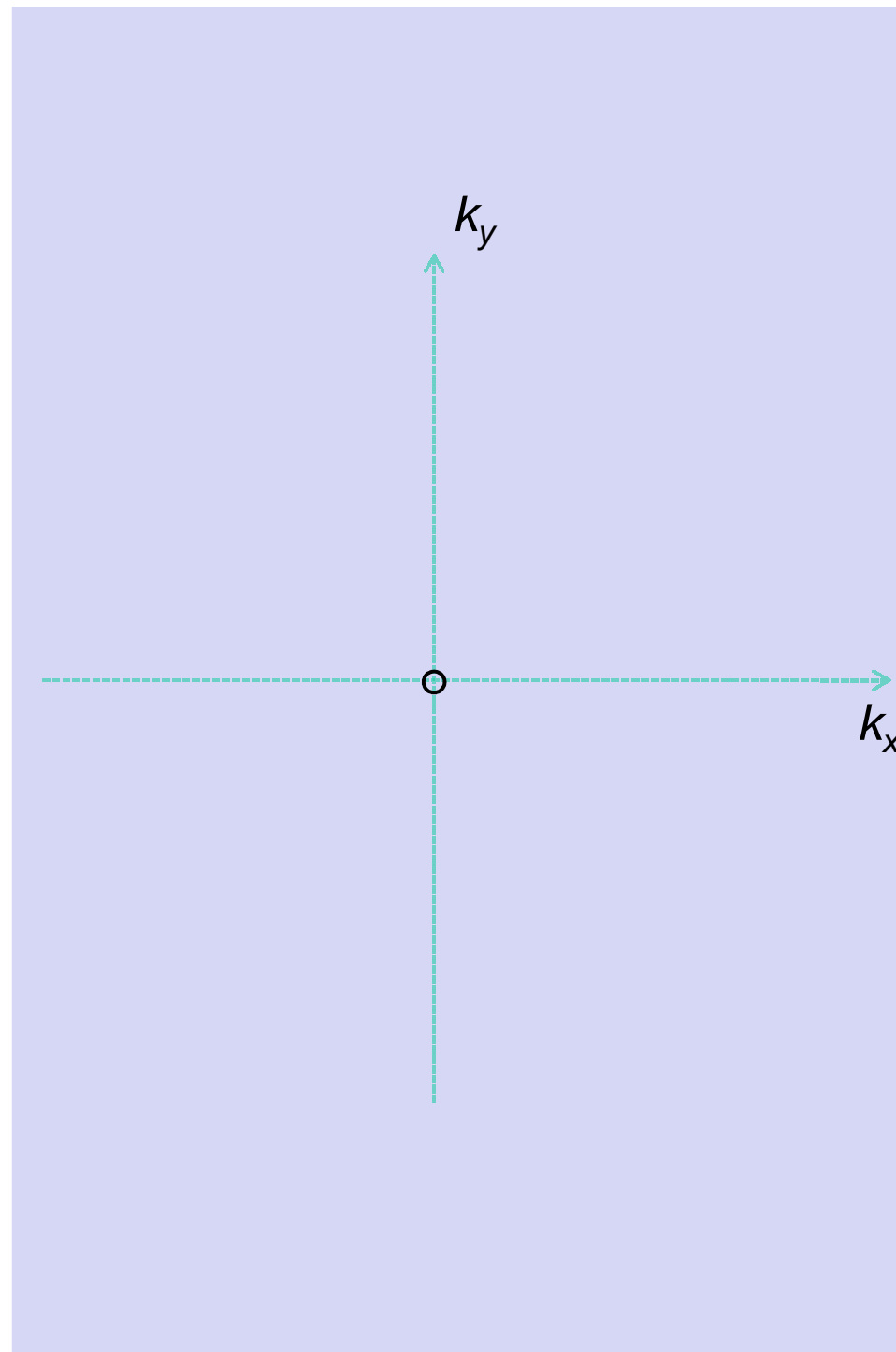
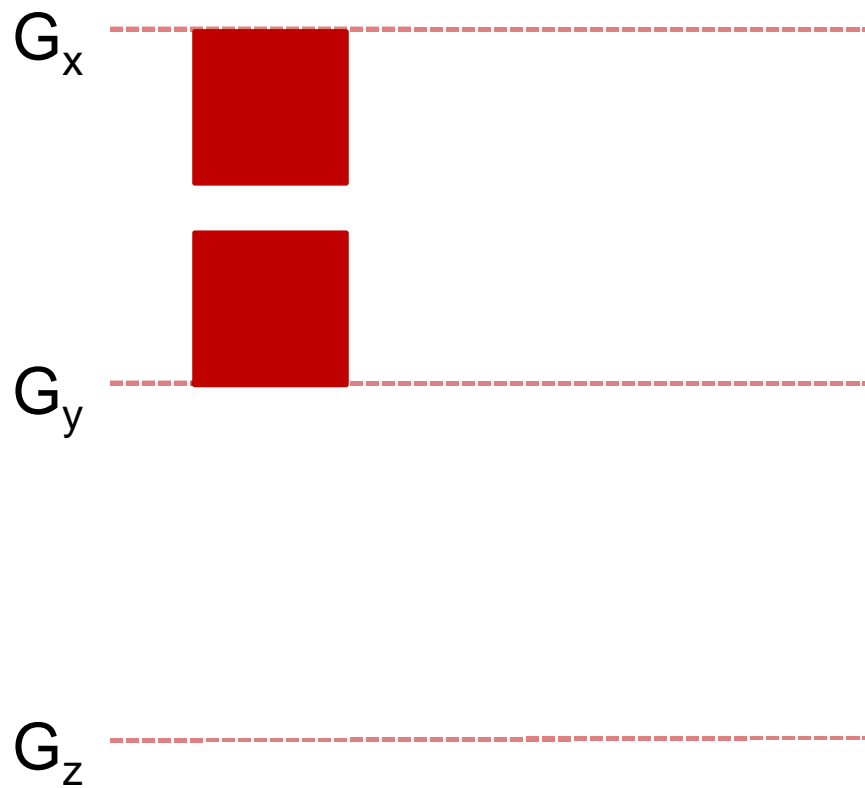
$G_z$

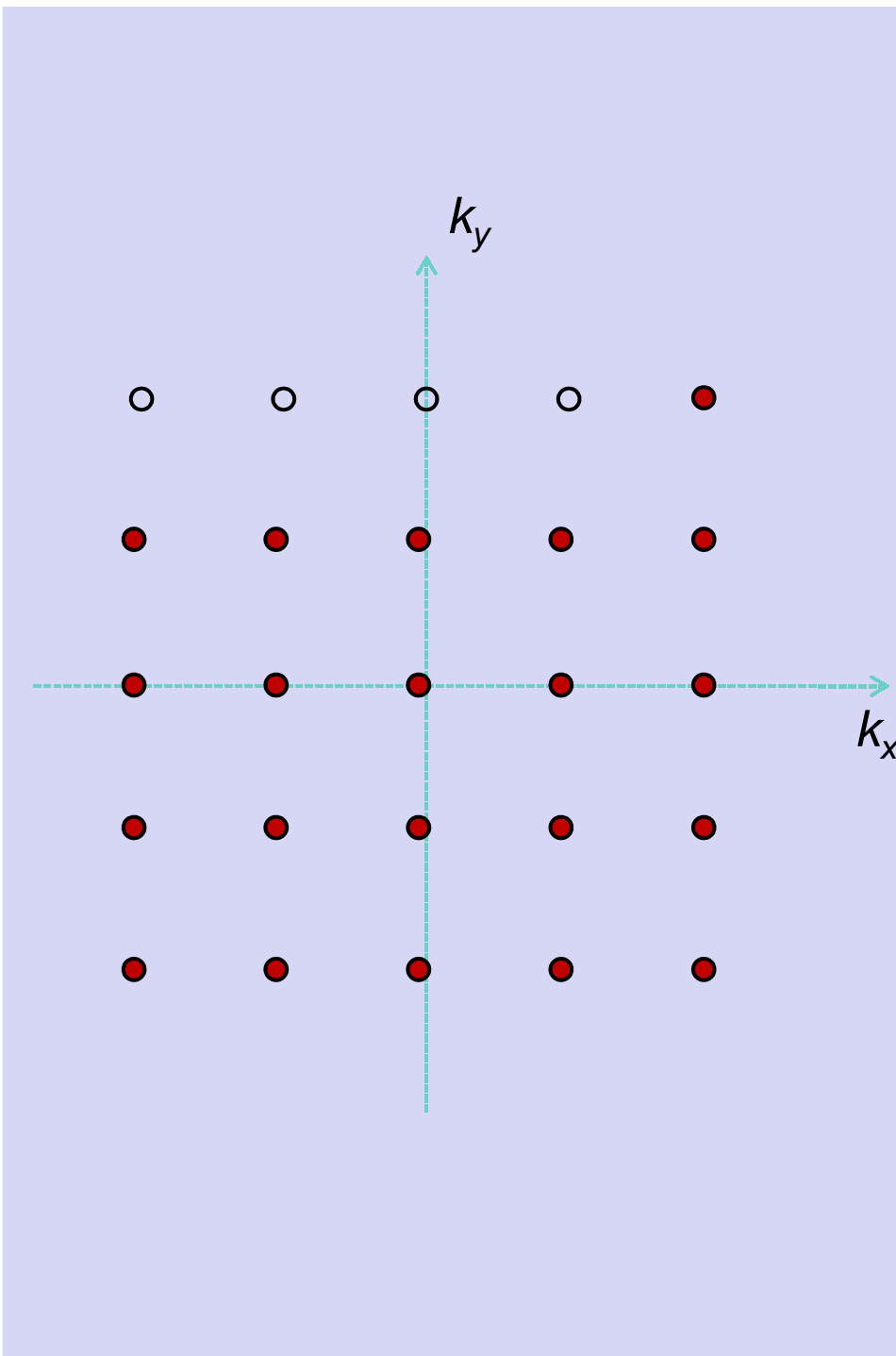
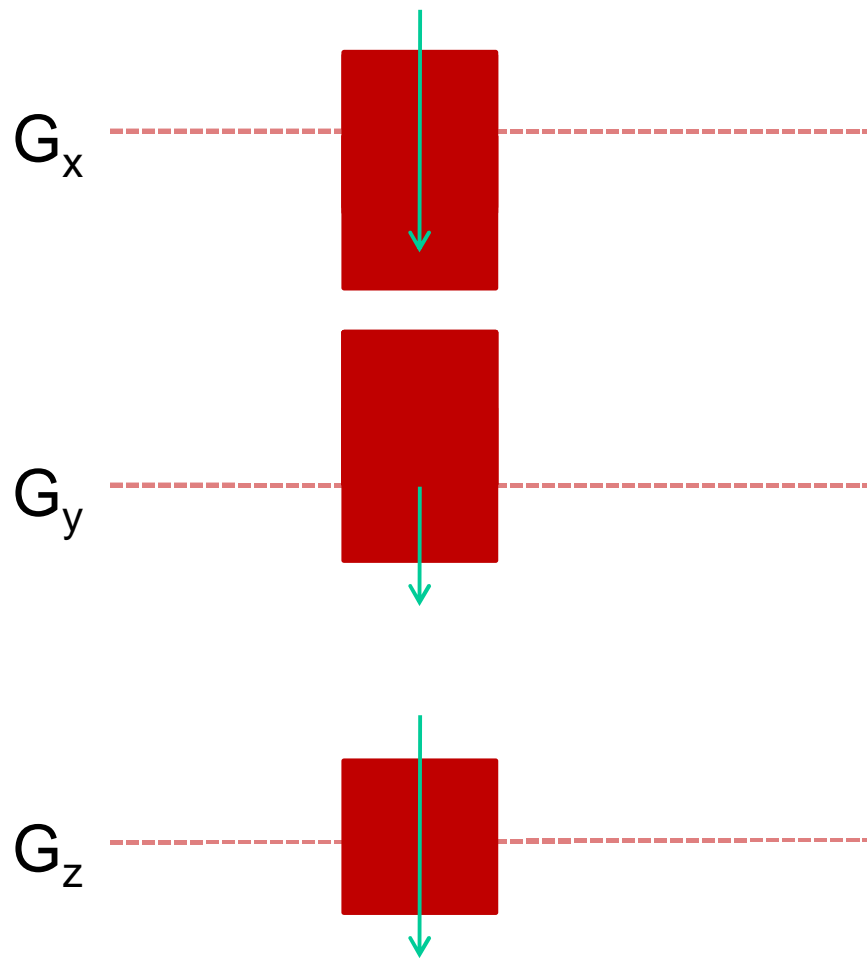
A horizontal red dashed line extending across the width of the diagram, representing the  $G_z$  gradient.











# *Pure phase encoded imaging*

Balayage Cartésien de l'espace k

Gradients précédant l'acquisition

Gradient de codage de phase

Codage des 3 directions

Différents modes d'acquisition

Un point du SIL

FID complet

*Single Point Imaging*

*Chemical Shift Imaging*

Temps d'acquisition

$$TA = 64^3 \times 1s = 73 \text{ h}$$

$$TA = N_x N_y N_z TR$$

# Pure phase encoded imaging

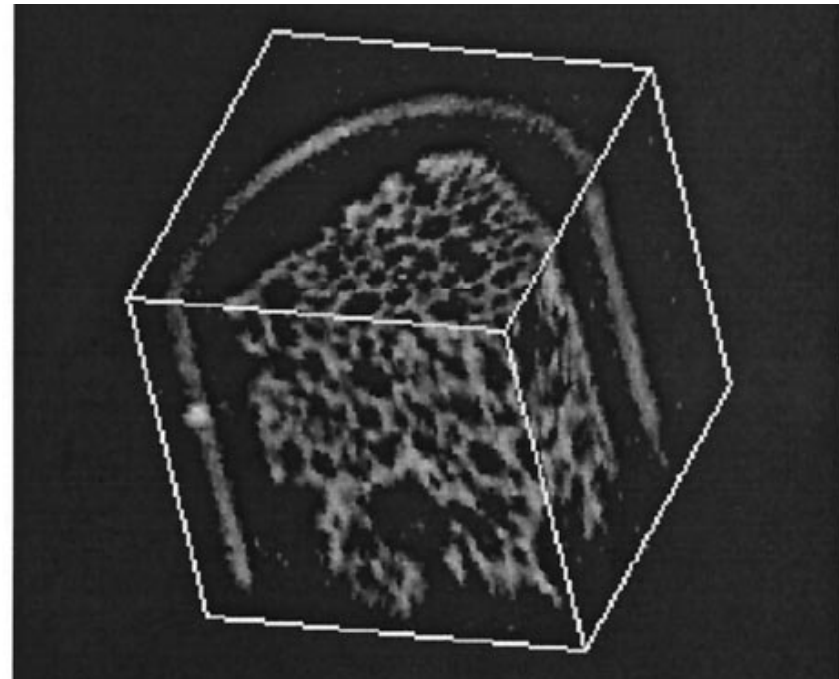
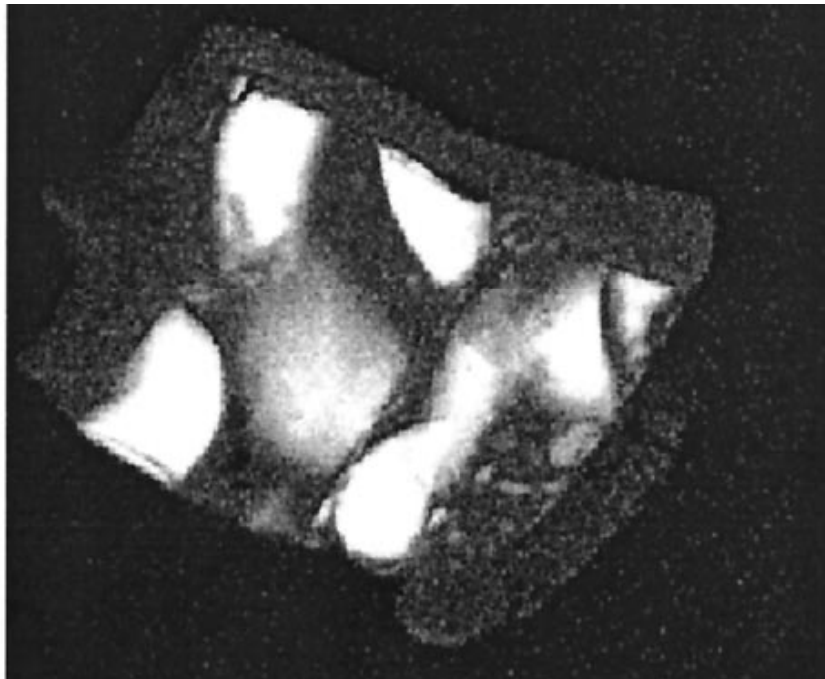


Magnetic Resonance Imaging 19 (2001) 501–503

MAGNETIC  
RESONANCE  
IMAGING

Application of Single Point Imaging (SPI) to solid state materials

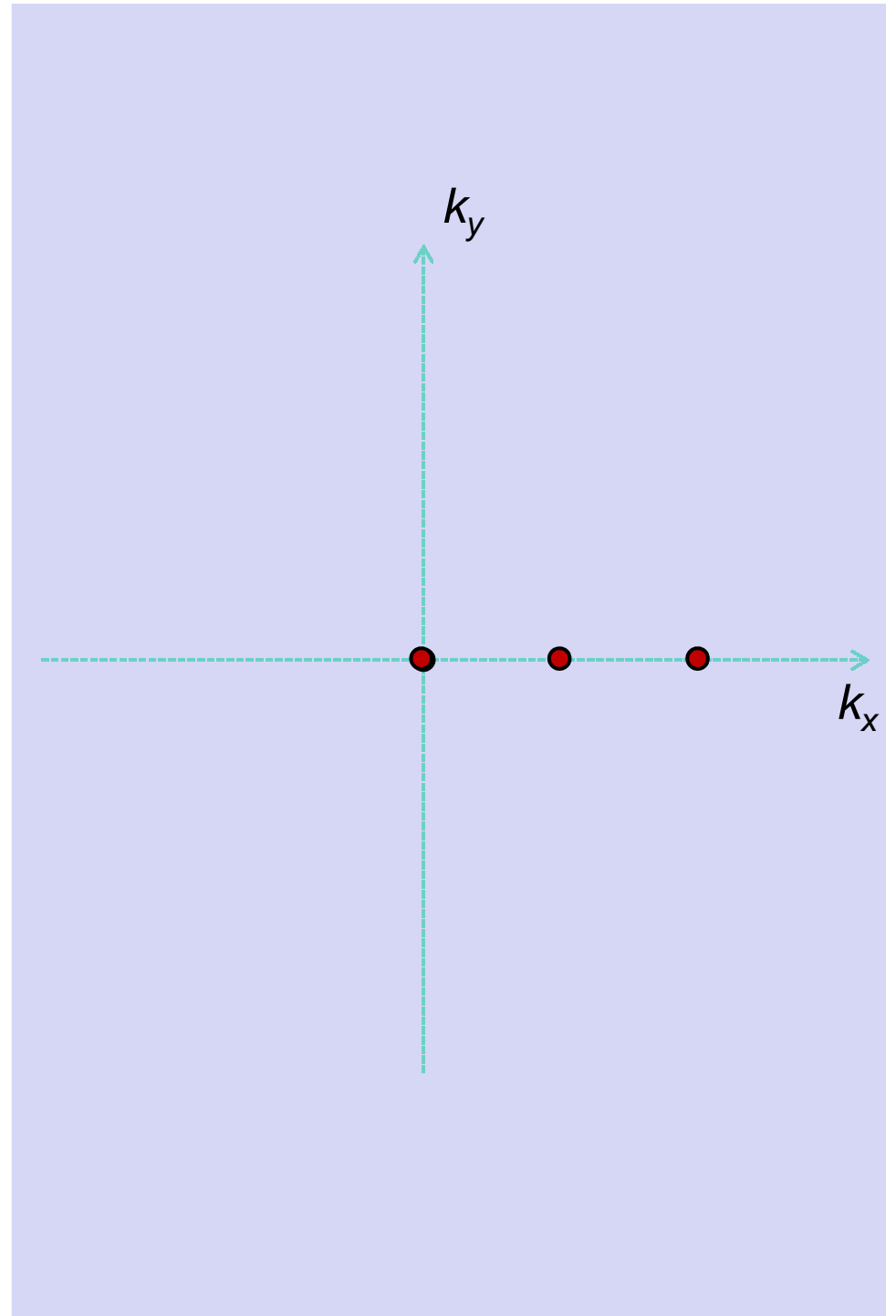
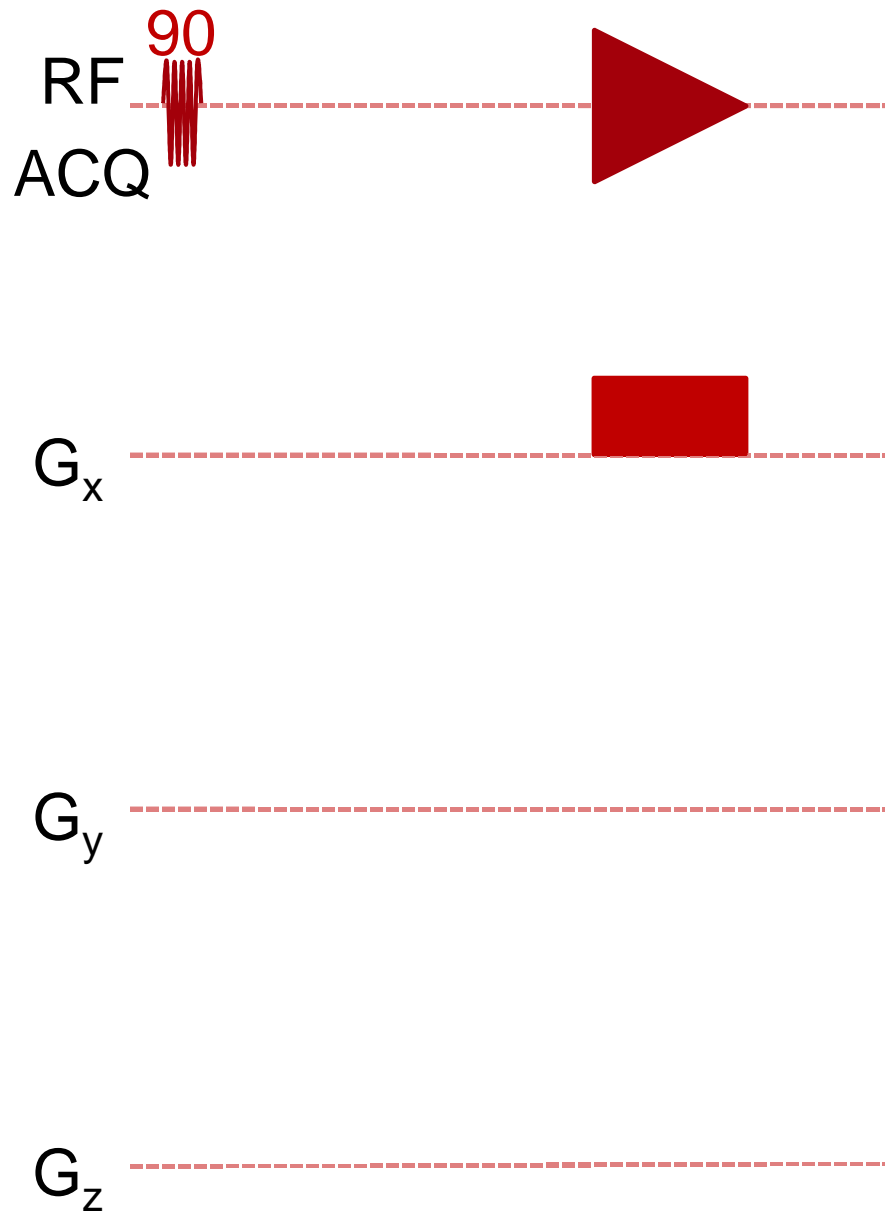
Zhanjun Fang<sup>a</sup>, Dieter Hoepfel<sup>b,\*</sup>, K. Winter<sup>c</sup>

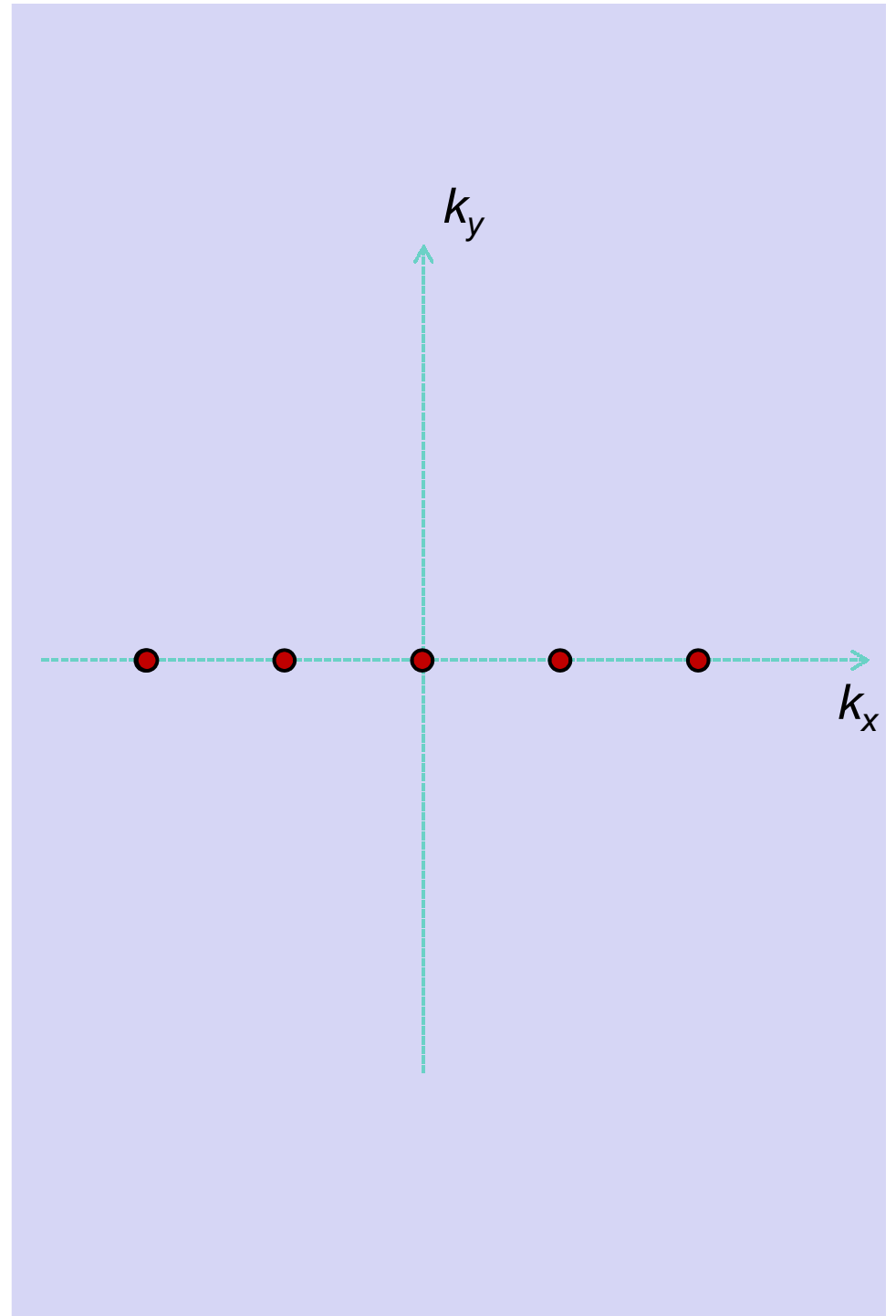
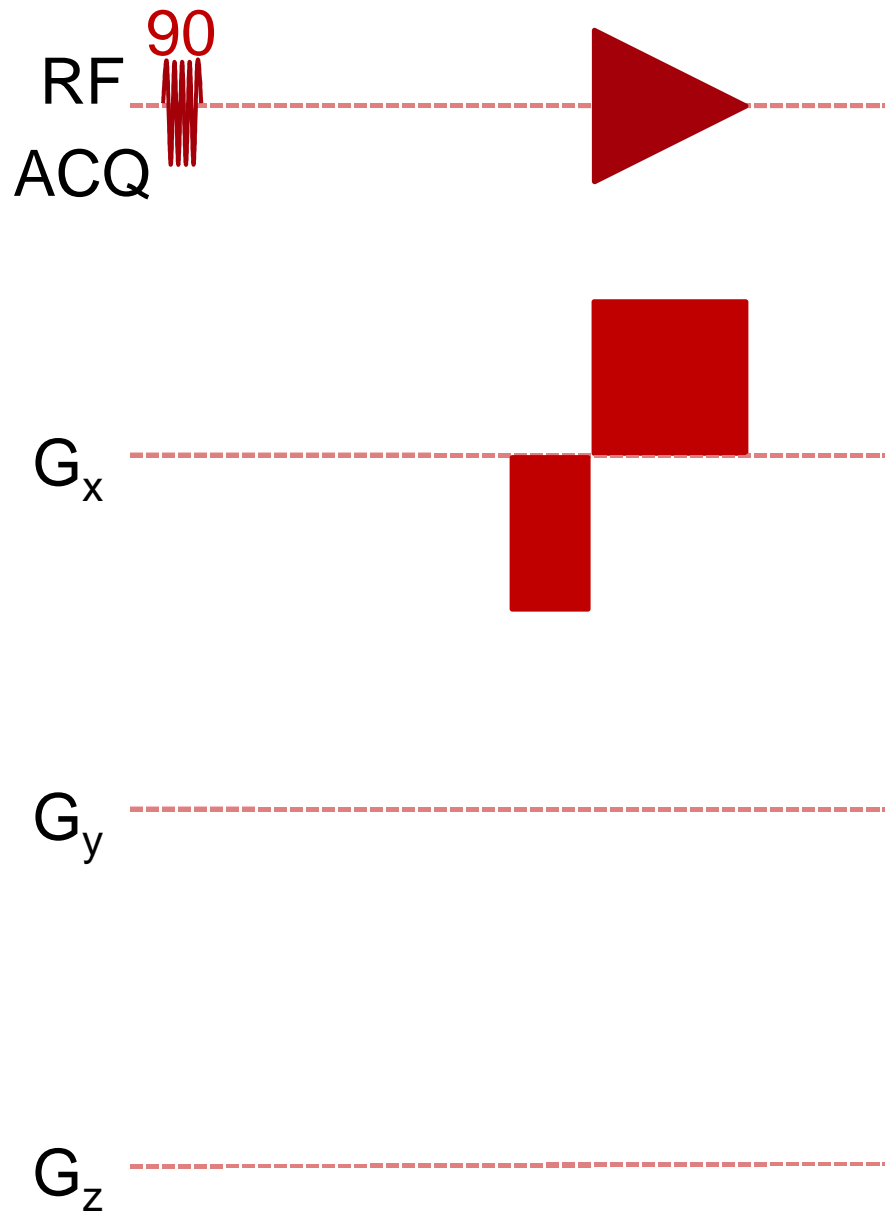


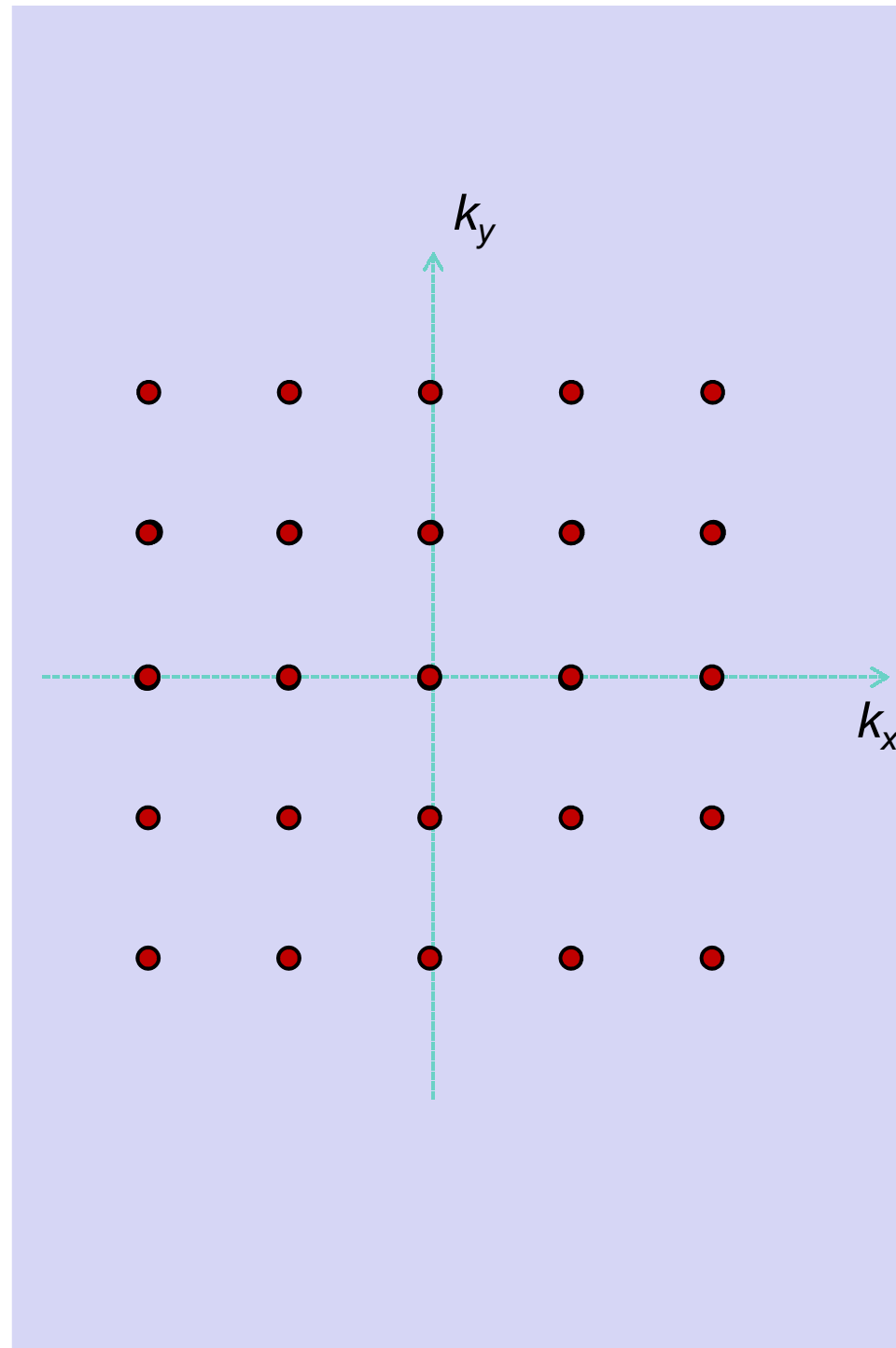
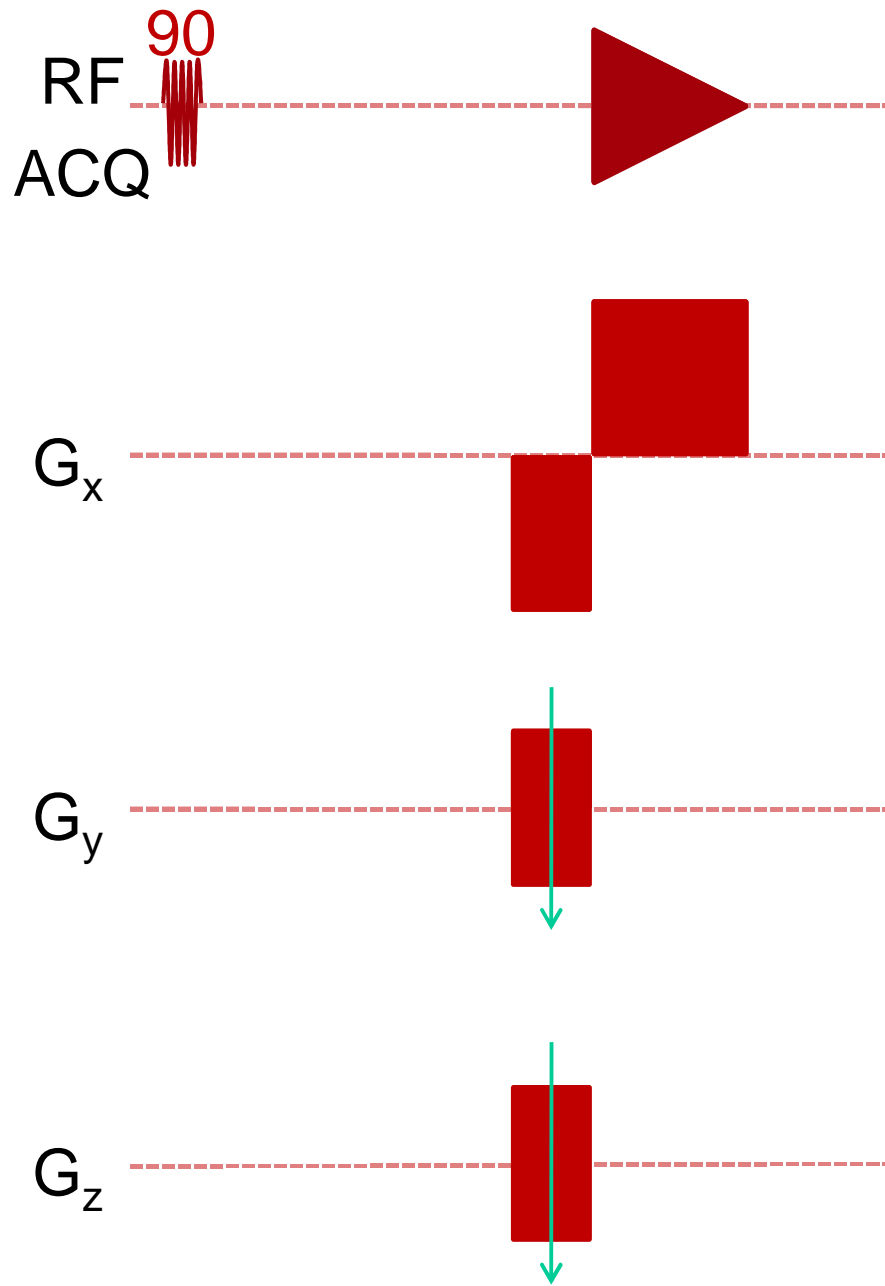
GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT









# *Encodage Spin Warp*

Balayage Cartésien de l'espace k

Gradient pendant l'acquisition

Gradient de lecture

Une direction

Gradient de codage de phase

Autres directions

Temps d'acquisition

$$TA = N_y N_z TR$$



# Encodage Spin Warp

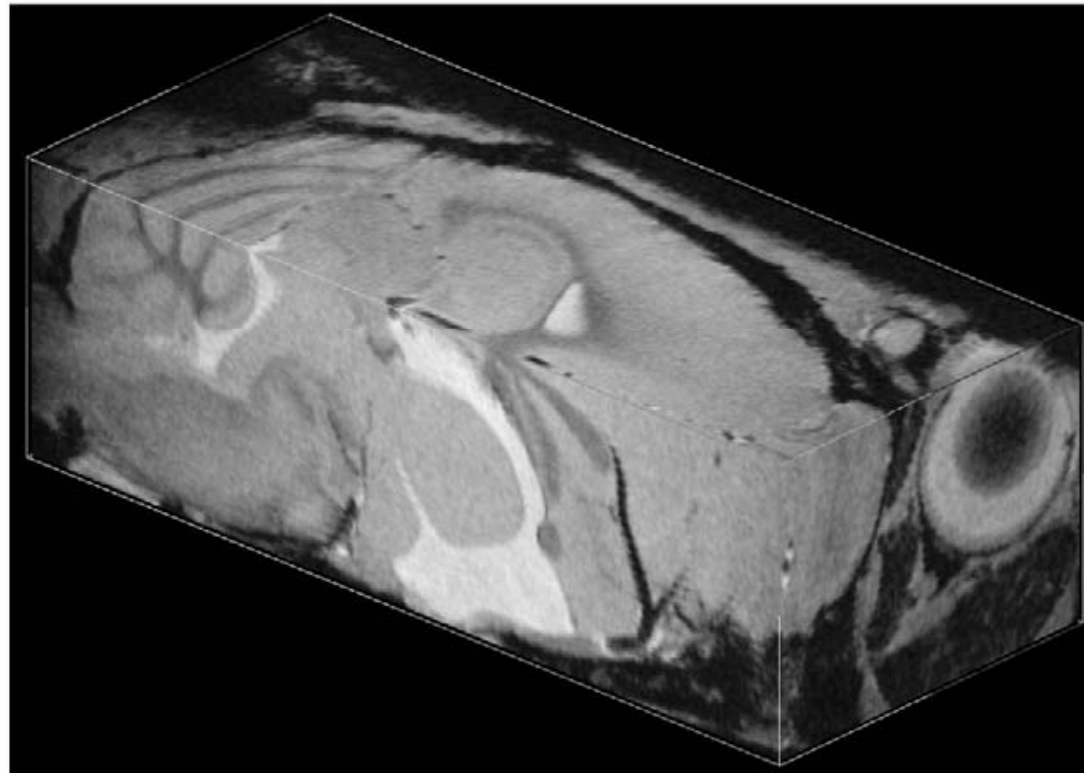


Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)  
ScienceDirect  
Magnetic Resonance Imaging 26 (2010) xxx–xxx



$V=0.05 \times 0.05 \times 0.1 \text{ mm}^3$   
 $Tacq = 30'$

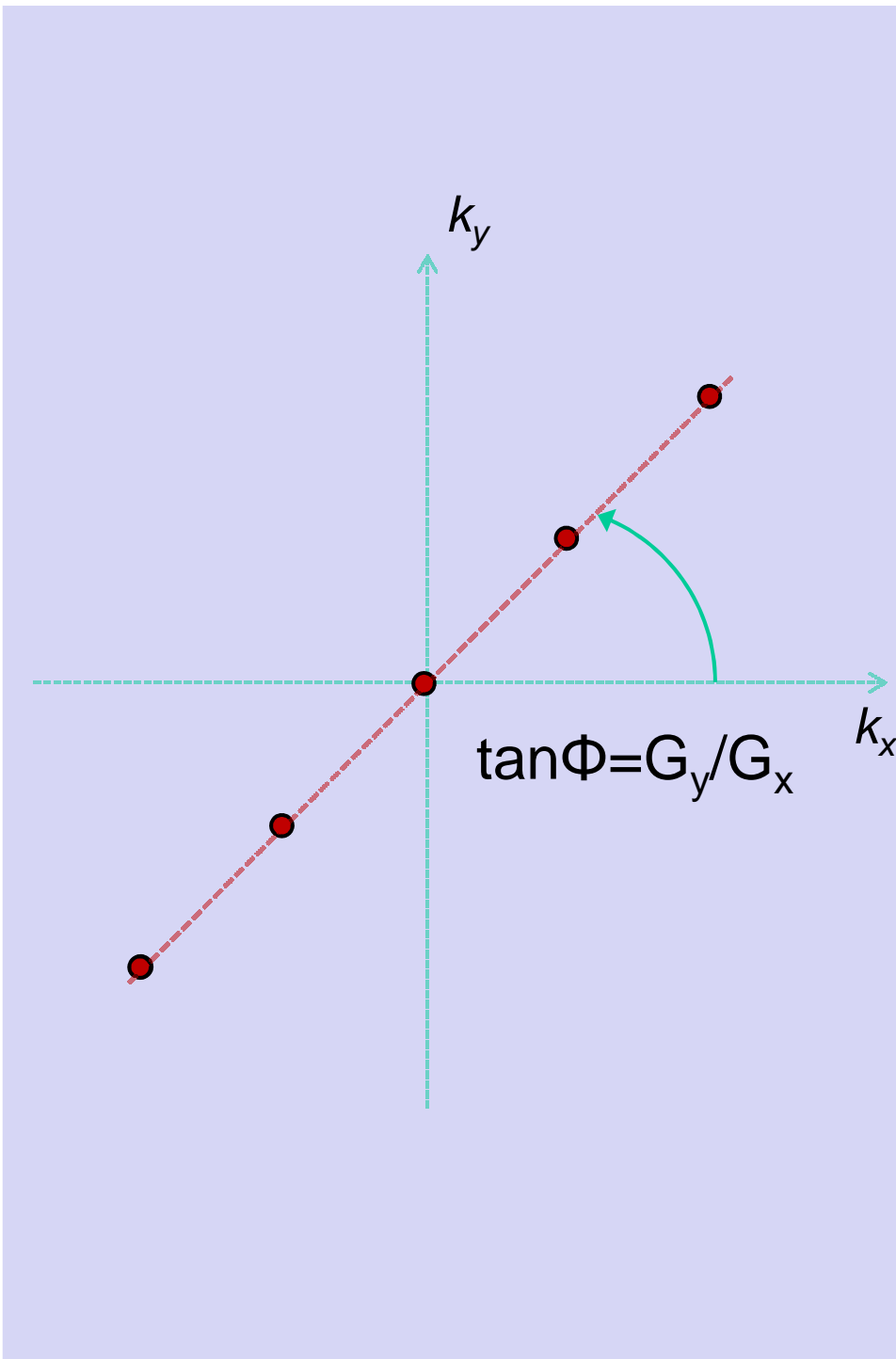
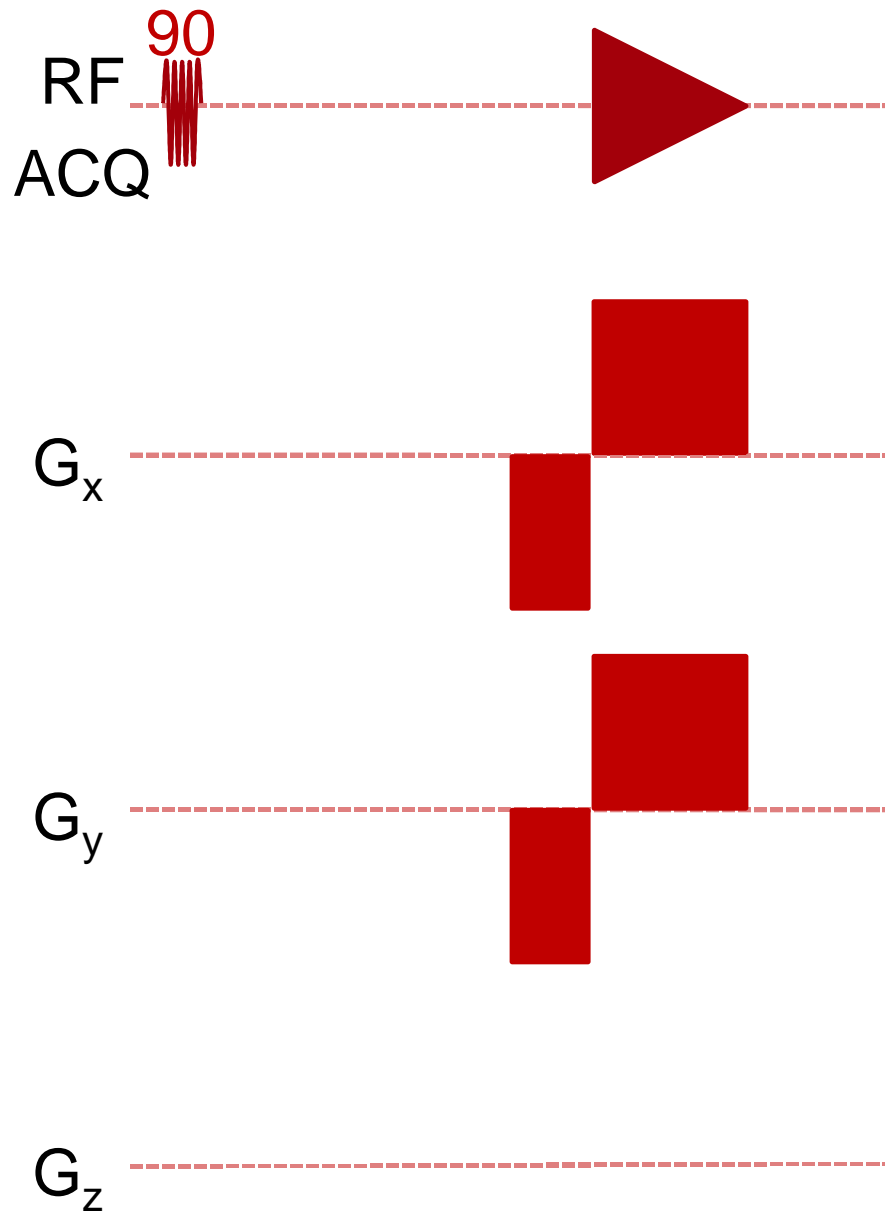
Initial in vivo rodent sodium and proton MR imaging at 21.1 T  
Victor D. Schepkin<sup>a,\*</sup>, William W. Brey<sup>a</sup>, Peter L. Gor'kov<sup>a</sup>, Samuel C. Grant<sup>b,c</sup>  
<sup>a</sup>National High Magnetic Field Laboratory, Florida State University, Tallahassee, FL 32310-4001, USA  
<sup>b</sup>Department of Chemical and Biomedical Engineering, Florida State University, Tallahassee, FL 32310-4001, USA  
Received 22 June 2009; revised 14 September 2009; accepted 12 October 2009

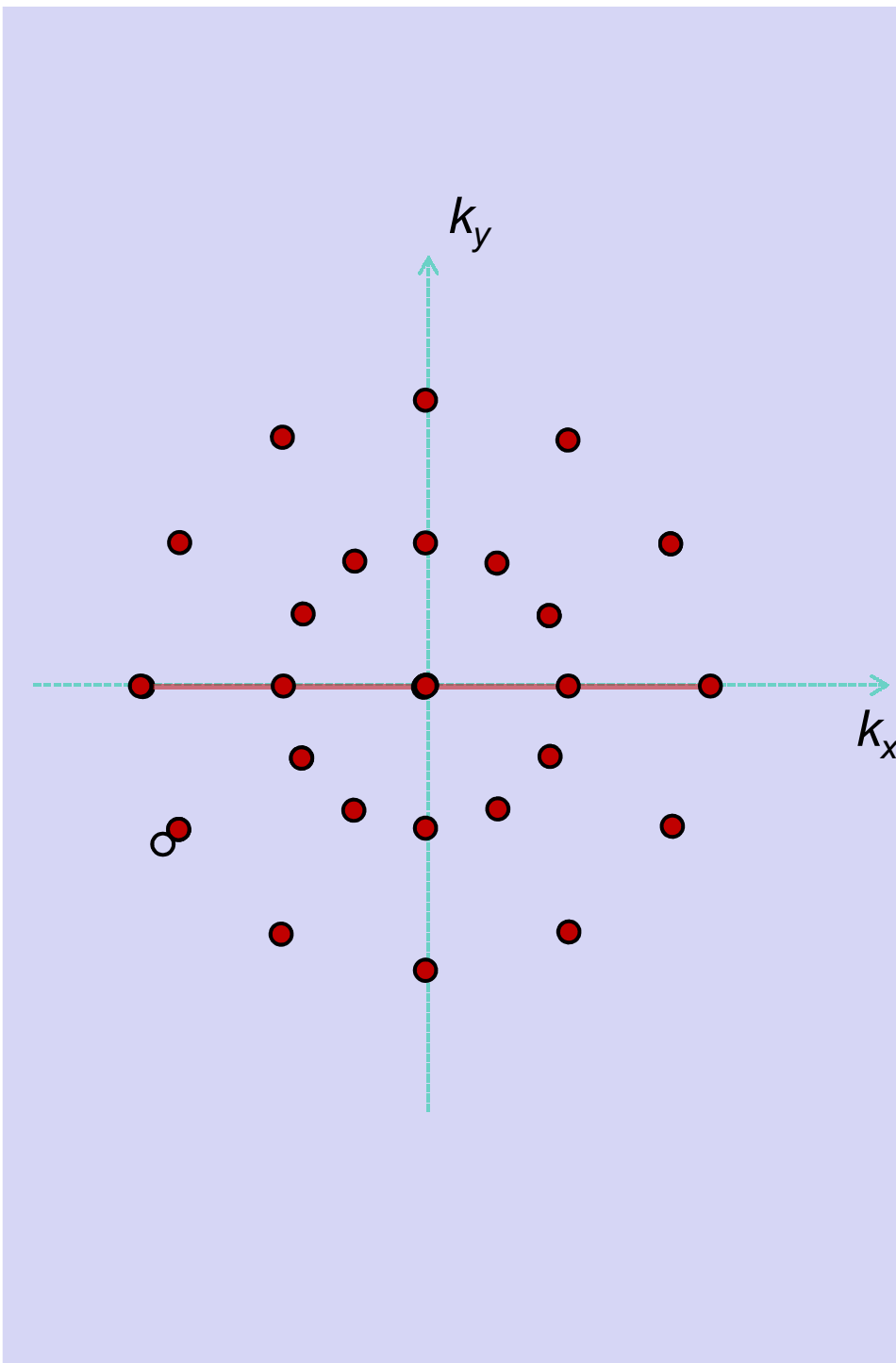
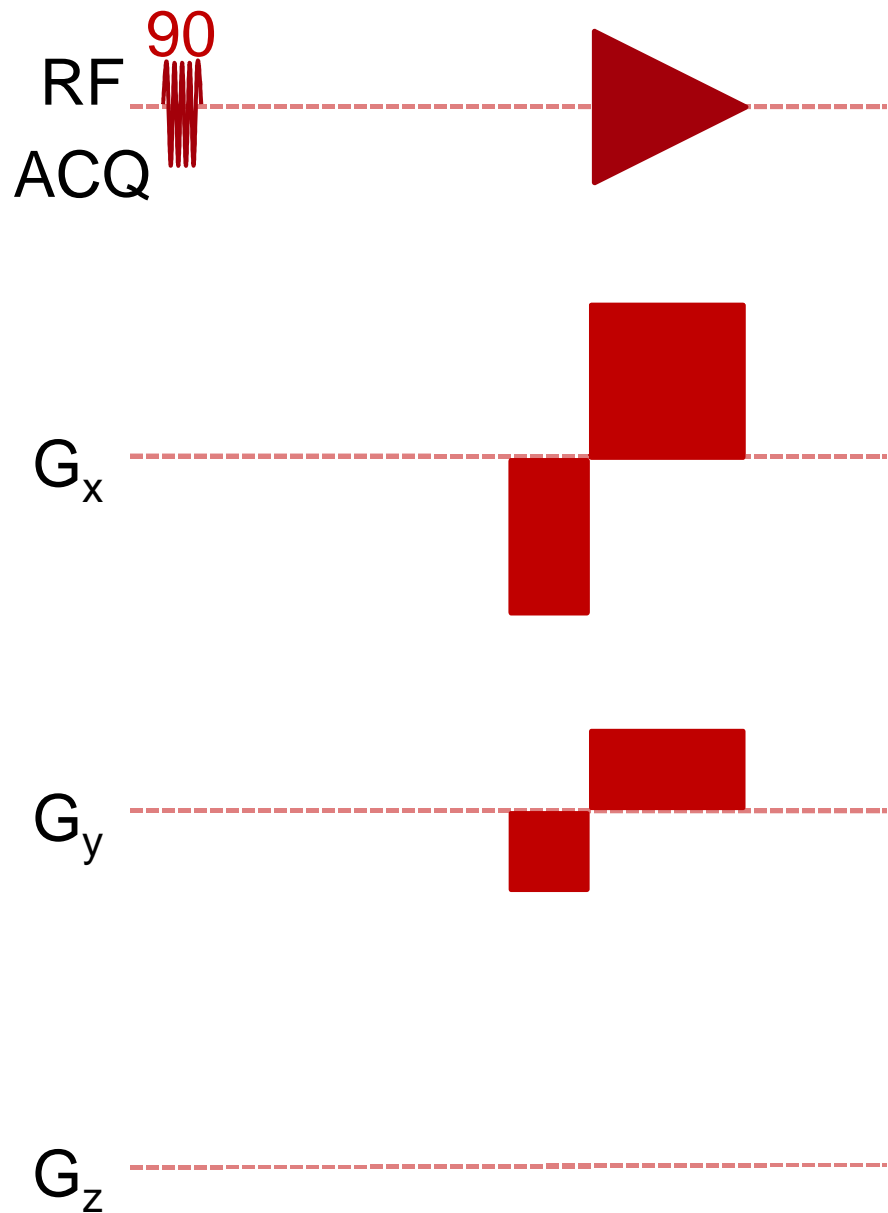


GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT







# Encodage par projection

Balayage radial de l'espace k

Gradient pendant l'acquisition

Gradient de lecture

Pas de gradient de codage de phase

Temps d'acquisition  $TA = N_{\phi} (N_{\theta}) TR$

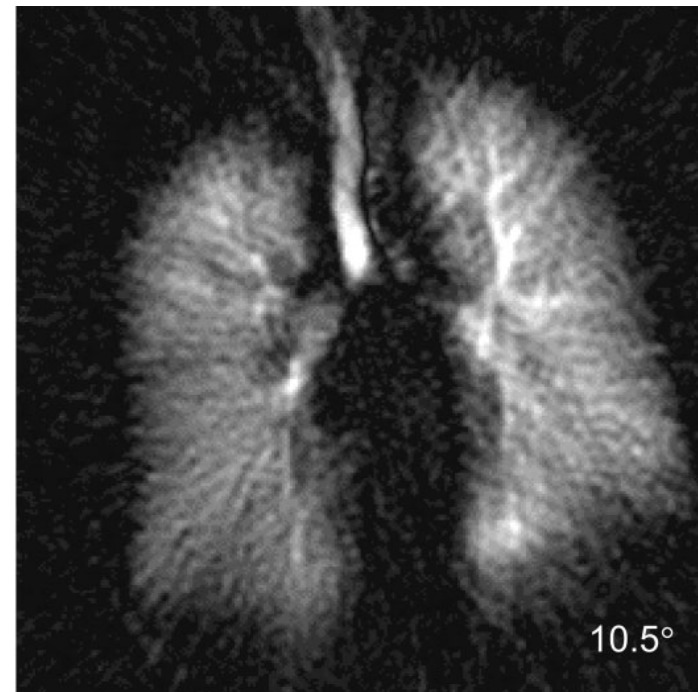
TE court si remplissage à partir du centre

# Imagerie radiale / TE court

Magnetic Resonance in Medicine 49:991-997 (2003)

## Dynamic Radial Projection MRI of Inhaled Hyperpolarized $^3\text{He}$ Gas

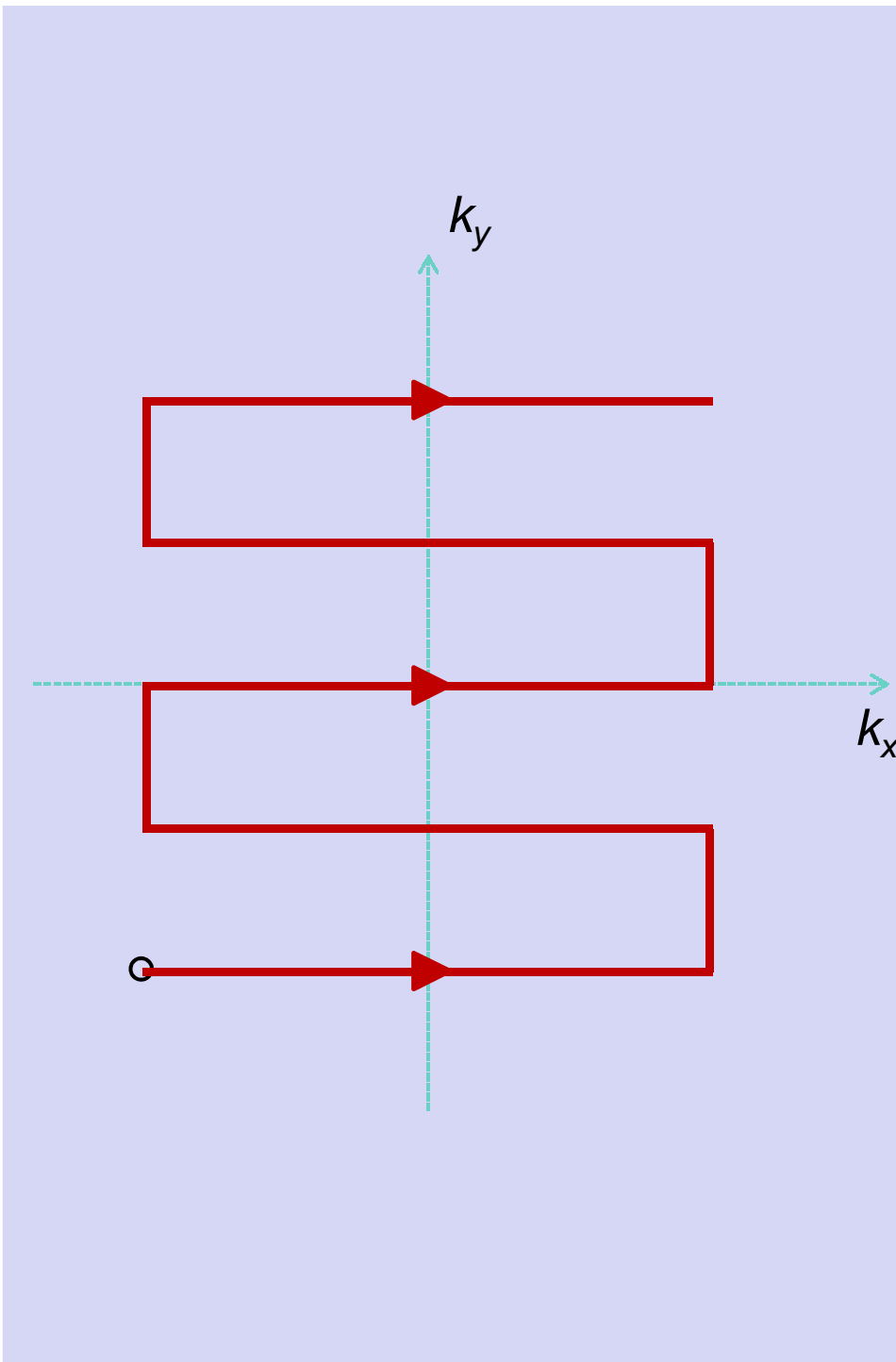
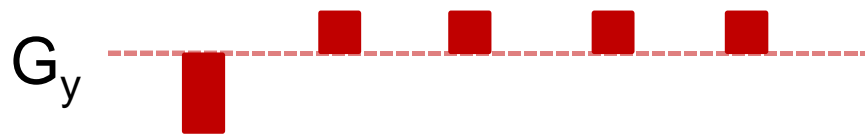
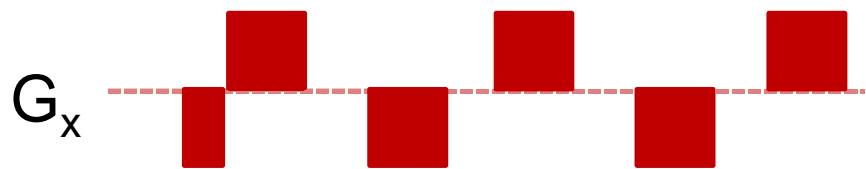
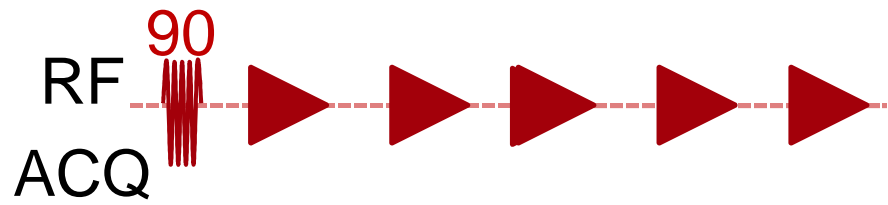
Jim M. Wild,<sup>1\*</sup> Martyn N.J. Paley,<sup>1</sup> Larry Kasuboski,<sup>2</sup> Andrew Swift,<sup>1</sup> Stan Fischele,<sup>1</sup> Neil Woodhouse,<sup>1</sup> Paul D. Griffiths,<sup>1</sup> and Edwin J.R. van Beek<sup>1</sup>



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA



# Encodage *echo planar*

Balayage cartésien de l'espace k

Gradient de lecture alterné

Incrément (*blip*) entre les phases de lecture

Temps d'acquisition  $TA = TR$

Imagerie rapide

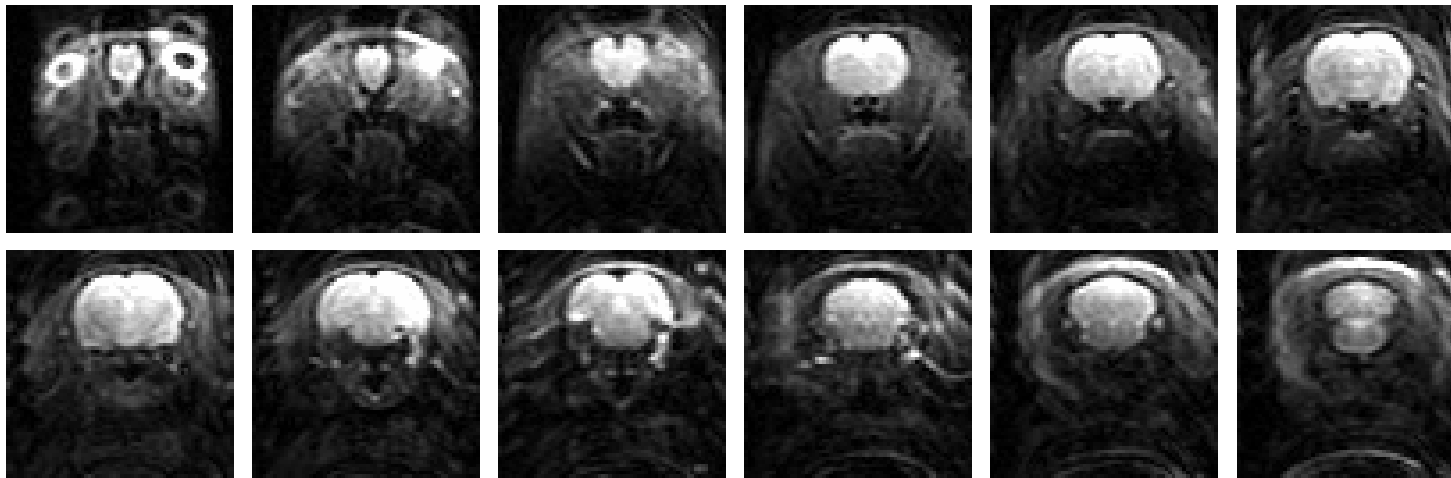
# Encodage echo planar

Cerveau de rat *in vivo* à 4.7 T

$V = 0.5 \times 0.5 \times 2 \text{ mm}^3$

$T_{acq} = 4,8''$

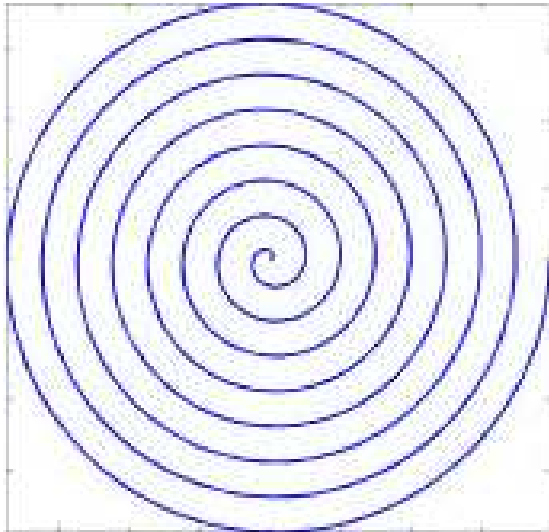
RSB  $\approx 80$



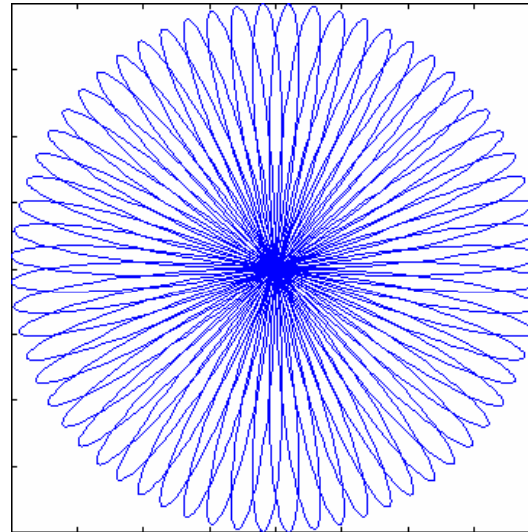


# Autres trajectoires

Spirale



Rosette



Stochastiques

# Autres trajectoires, autres reconstructions ...

TFD méthode de référence en cas d'échantillonnage cartésien de l'espace k

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_{k_i} \sum_{k_j} \hat{S}(\mathbf{k}) \exp(-2\pi i \mathbf{r} \cdot \mathbf{k})$$

En cas d'échantillonnage non cartésien

TFD pondérée  $\rho(\mathbf{r}) = \sum_{k_i} \sum_{k_j} W(\mathbf{k}) \hat{S}(\mathbf{k}) \exp(-2\pi i \mathbf{r} \cdot \mathbf{k})$

Interpolation cartésienne de  $\hat{S}(\mathbf{k})$  avant TFD

(...)



# Sélection de coupe



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA



# Principe d'une sélection de tranche

Excitation sélective d'une coupe épaisse

Application d'un gradient constant

Direction  $\mathbf{G}/\|\mathbf{G}\|$   
Amplitude  $\|\mathbf{G}\|$

Impulsion RF sélective en fréquence

Fréquence centrale  $\omega$   
Bande-Passante  $\Delta\omega$   
Forme

# Synthèse d'une impulsion sélective

Problème inverse

Formes algébriques prédéterminées

Transformées existantes

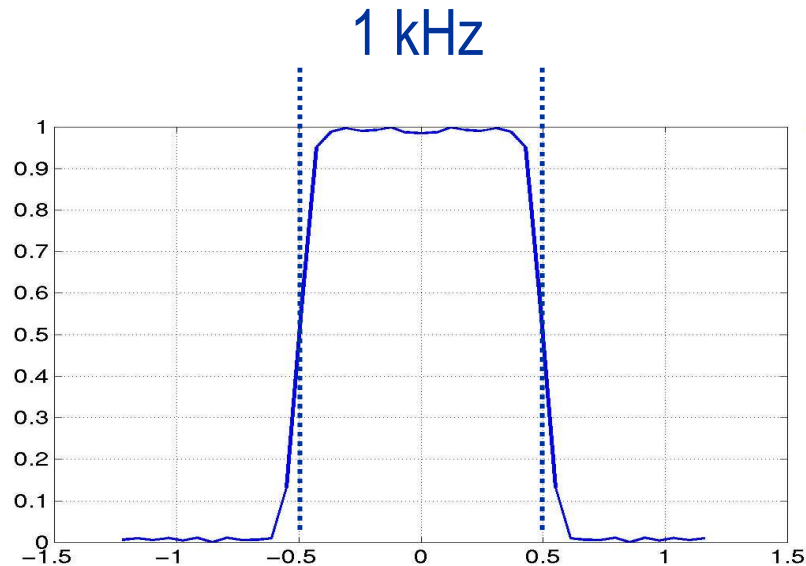
$M_T(\omega) \rightarrow B1(t)$

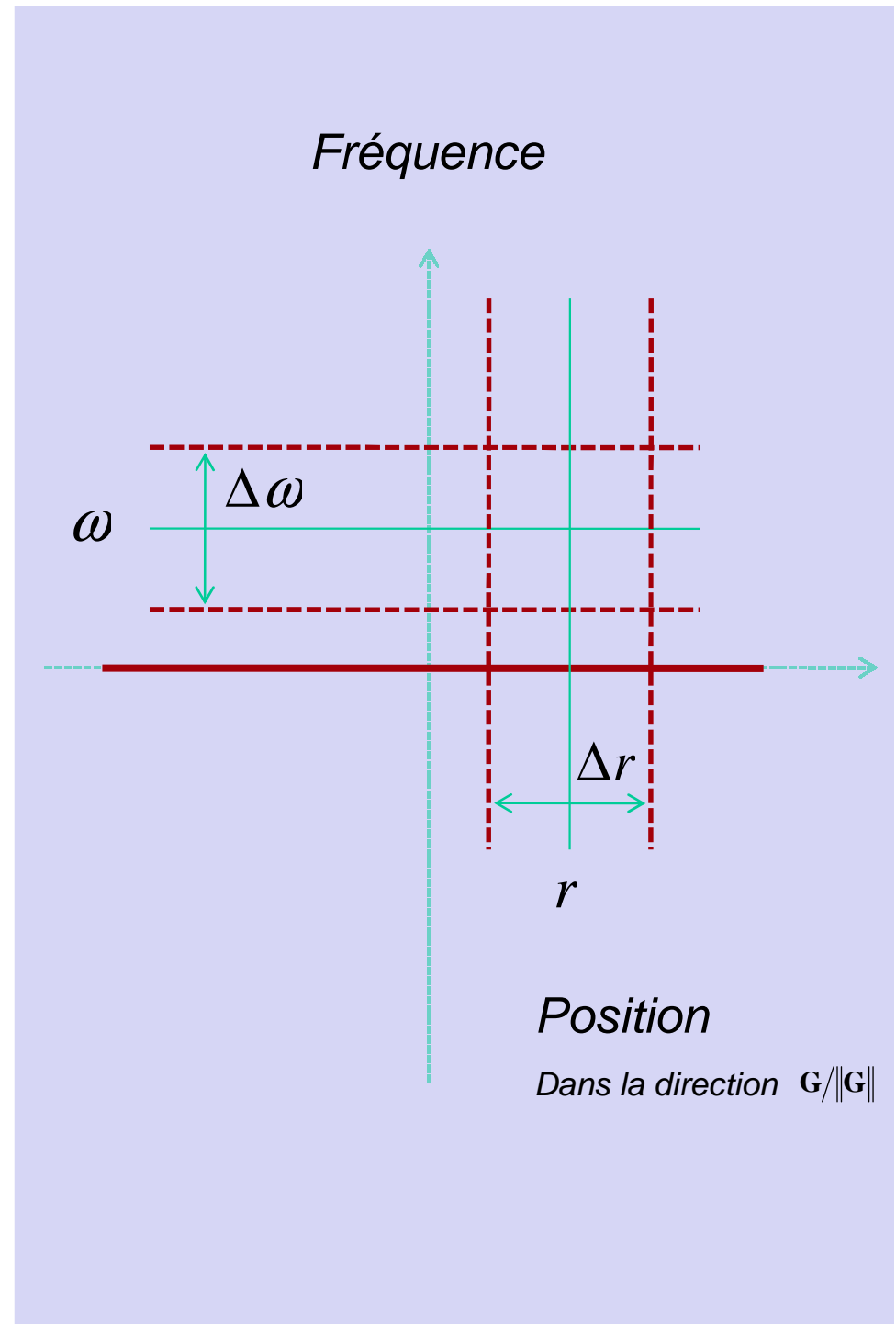
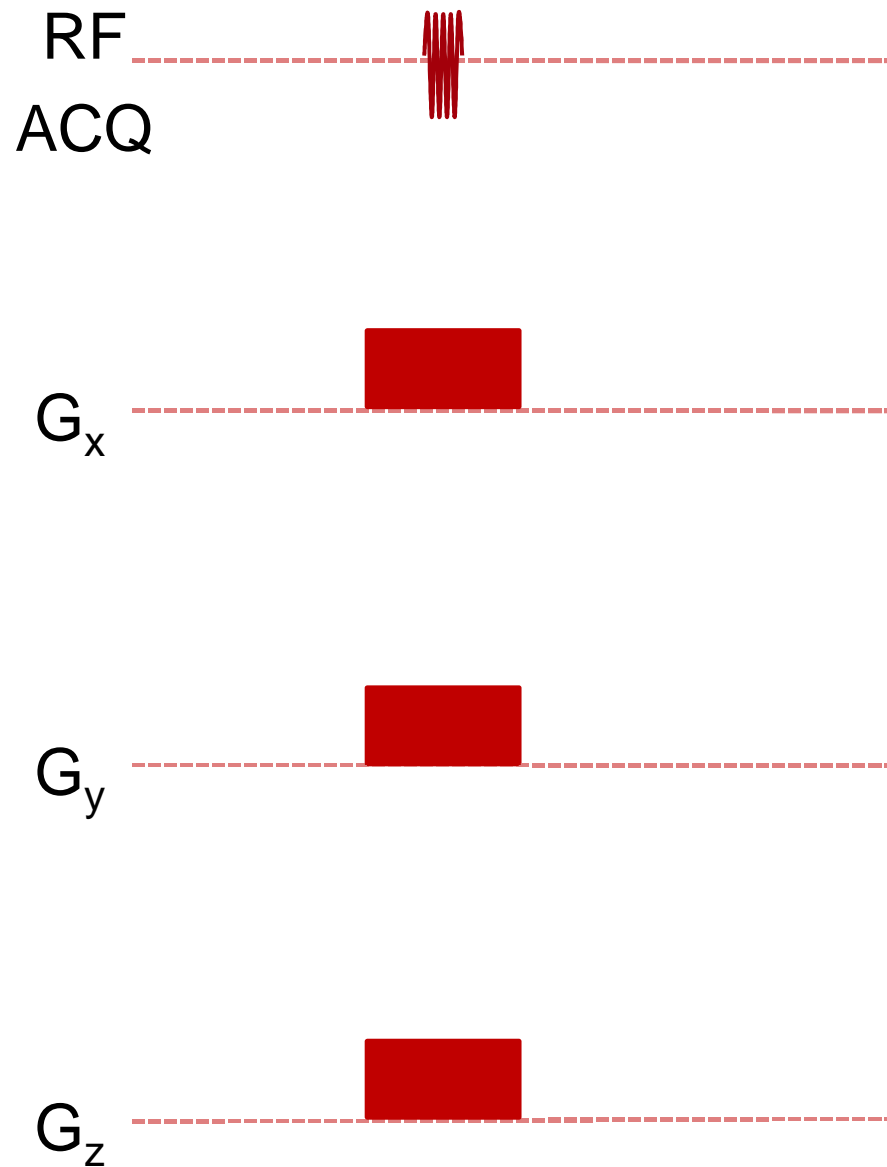
Gauss, Sinc, Sech (...)

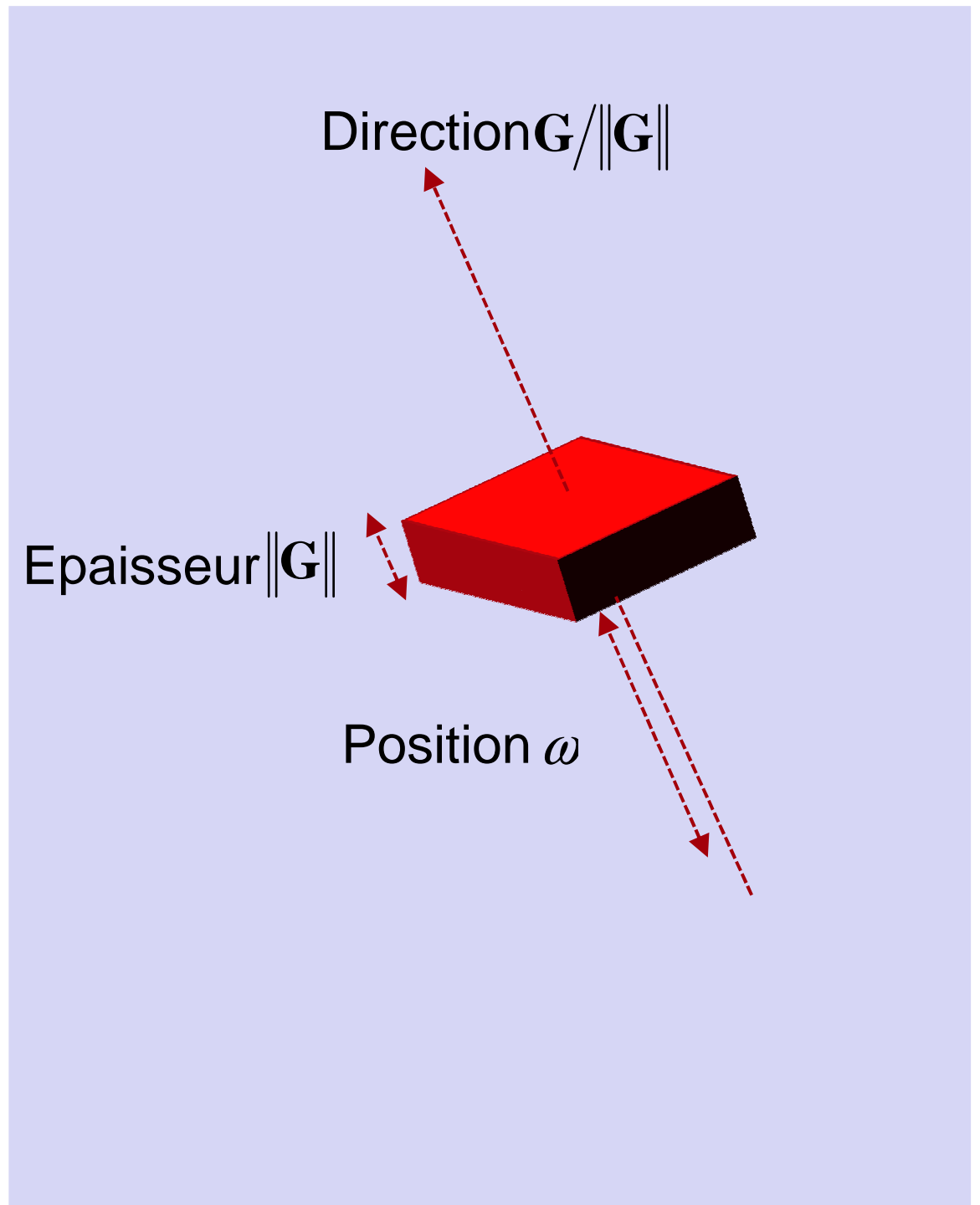
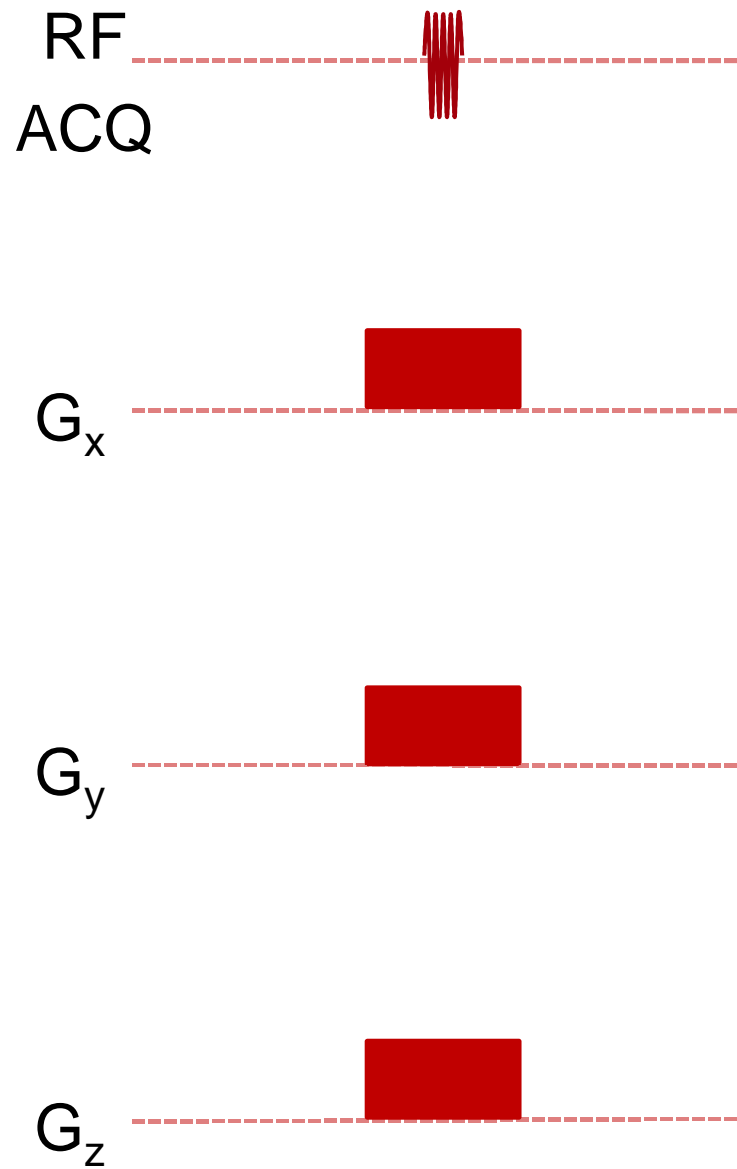
TF pour petits angles

Algorithme de Shinnar-Leroux

*Inverse Scattering transform*









# Introduction à l'imagerie parallèle (en réception)



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA



# Signal obtenu avec $M$ antennes réceptrices

$M$  signaux simultanés provenant de l'échantillon

Signal de l'antenne  $m$   $S_m(\mathbf{k}(t)) = \int B_m(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})\exp[2\pi i\mathbf{r}\cdot\mathbf{k}(t)]d\mathbf{r}$

$B_m(\mathbf{r})$  connu *a priori* en module et phase

Problème de reconstruction

Comment estimer  $\rho(\mathbf{r})$  à partir des  $M$  acquisitions ?  
Pour toute trajectoire  $\mathbf{k}(t)$

# Quelques solutions ... NMR phased array

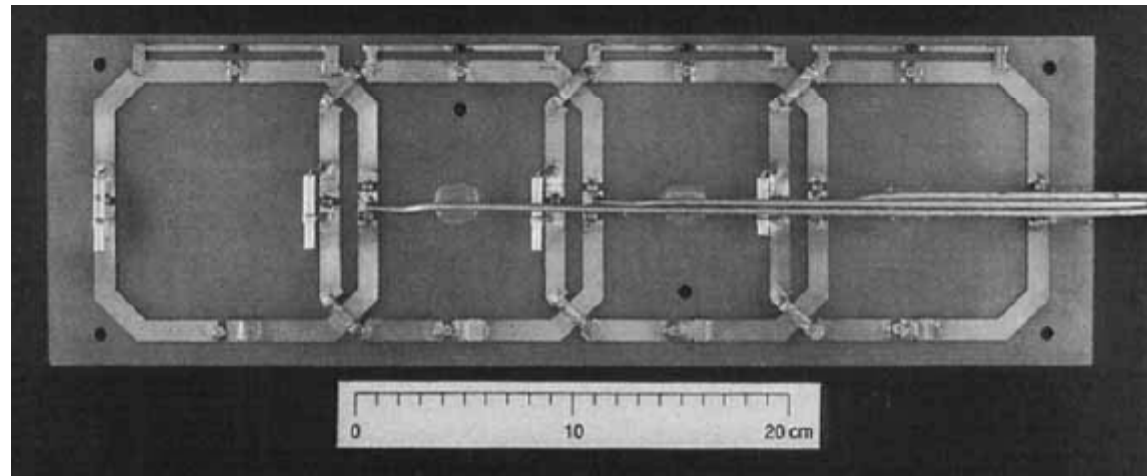
## Les réseaux d'antennes

MAGNETIC RESONANCE IN MEDICINE **16**, 192-225 (1990)

### The NMR Phased Array

P. B. ROEMER,\* W. A. EDELSTEIN,\* C. E. HAYES,† S. P. SOUZA,\*  
AND O. M. MUELLER\*

\*GE Corporate Research and Development Center, Schenectady, New York 12301;  
†GE Medical Systems, Milwaukee, Wisconsin 53201



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

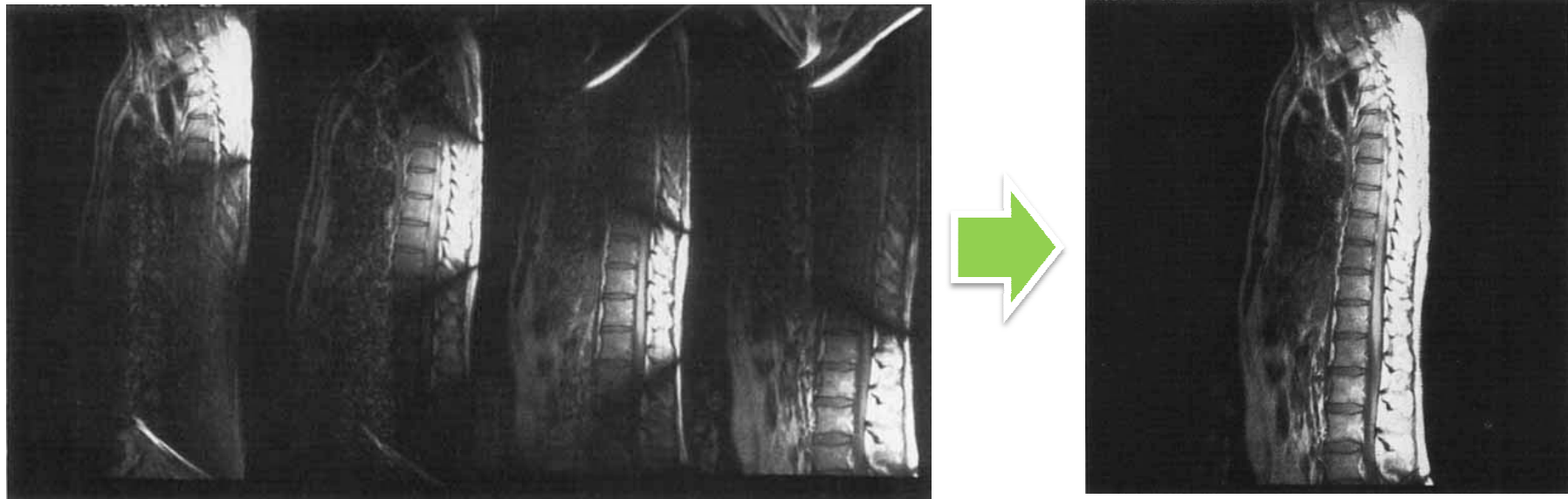
ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



# Quelques solutions ... NMR phased array

## Les réseaux d'antennes

Somme quadratique des images reconstruites séparément  
Gain en homogénéité et en sensibilité



## Quelques solutions ...

### Sous-échantillonnage de l'espace $k$

$P$  points

Trajectoires diverses

### Estimation de l'image dans une grille cartésienne

$N$  points

Accélération si  $N > P$

Indépendamment de  $B_m$

### Solutions de reconstruction

Dans l'espace  $k$

SMASH, GRAPPA

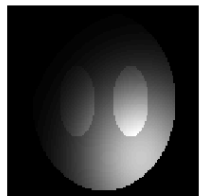
Dans l'espace image

SENSE

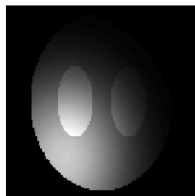
# Quelques solutions ... SENSE

SENSitivity Encoding = SENSE

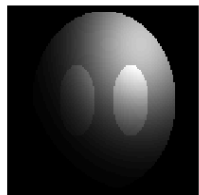
Fourier Encoding + Coil 1



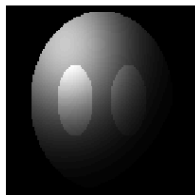
Fourier Encoding + Coil 2



Fourier Encoding + Coil 3



Fourier Encoding + Coil 4



$$B_m(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})$$

$N$  points

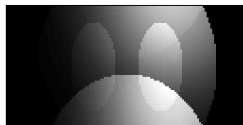
Reduced Fourier + Coil 1



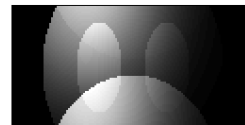
Reduced Fourier + Coil 2



Reduced Fourier + Coil 3



Reduced Fourier + Coil 4



$$B_m(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})$$

$P$  points



$$\rho(\mathbf{r})$$

Image reconstruite

$N$  points

# Quelques solutions ...

## Reconstruction

Problème inverse discret

$$S_m(\mathbf{k}_p) = \sum_{n=1}^N \rho(\mathbf{r}_n) B_m(\mathbf{r}_n) \exp[2\pi i \mathbf{r}_n \cdot \mathbf{k}_p]$$

Signal mesuré

Image estimée

Matrice d'encodage E

## Solution SENSE

Résolution d'un système linéaire  $\rho(\mathbf{r}_n) = f(\mathbf{E}, \text{bruit}) S_m(\mathbf{k}_p)$   
Taille de E      M x P lignes      N colonnes



# Synthèse et conclusions



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



# Synthèse et conclusions

Outils permettant de décrypter le codage spatial de la plupart des séquences d'imagerie

Balayage de l'espace k

Impulsions sélectives /Sélection de tranche

Imagerie parallèle

Gain en sensibilité et en homogénéité

Problème de reconstruction

Perspectives

Mesure des trajectoires réelles

Imagerie parallèle en émission

SMART

Imagerie à haut champ (sur des « gros » échantillons) (...)





# Références



GERM 2010, Saint-Dié  
Détection et acquisition en RMN

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



# Encodage

## **Article princeps**

Lauterbur

Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance.

*Nature* 242, 190–191 (1973)

## **Constant Time Imaging**

Gravina, Cory

Sensitivity and resolution of constant-time imaging.

*J. Magn. Reson. B.* 104, 53-61 (1994)

## **Chemical Shift Imaging**

Brown, Kincaid, Ugurbil

NMR chemical shift imaging in three dimensions.

*Proc Natl Acad Sci U S A.* 11, 79 (1982)

## **Spin Warp**

Edelstein, Hutchison, Johnson, Redpath

Spin warp NMR imaging and applications to human whole-body imaging.

*Phys Med Biol.* 25, 751-756 (1980)

# Impulsions sélectives

## **Fourier / Petits angles**

Hoult

The solution of the Bloch equations in the presence of a varying B<sub>1</sub> field-An approach to selective pulse analysis

*J Magn Reson* 35, 69-86 (1979)

## **Sech / Passages adiabatiques**

Silver, Joseph, Hoult

Highly selective  $\pi/2$  and  $\pi$  pulse generation

*J Magn Reson* 59, 347-351 (1984)

## **Transformée de Shinnar/LeRoux (SLR)**

Pauly, LeRoux, Nishimura, Macovski

Parameter relations for the Shinnar-LeRoux selective excitation pulse design algorithm

*IEEE Trans. Med. Imaging* 10, 53-65 (1991)

## **Mise en œuvre pratique SLR**

Matson

An integrated program for amplitude-modulated RF pulse generation and re-mapping with shaped gradients

*Magn. Reson. Imaging* 12, 1205-1225 (1994)



# Imagerie parallèle

## **Imagerie phased array**

Roemer, Edelstein, Hayes, Souza, Mueller

The NMR Phased Array

*Magn Reson Med* 16, 192-225 (1990)

## **Encodage et reconstruction**

Noll

Recent advances in MRI

[www.eecs.umich.edu/~dnoll/recent\\_adv\\_embs.pdf](http://www.eecs.umich.edu/~dnoll/recent_adv_embs.pdf)

Pruessmann

Encoding and reconstruction in parallel MRI

*NMR Biomed* 19, 288-299 (2006)