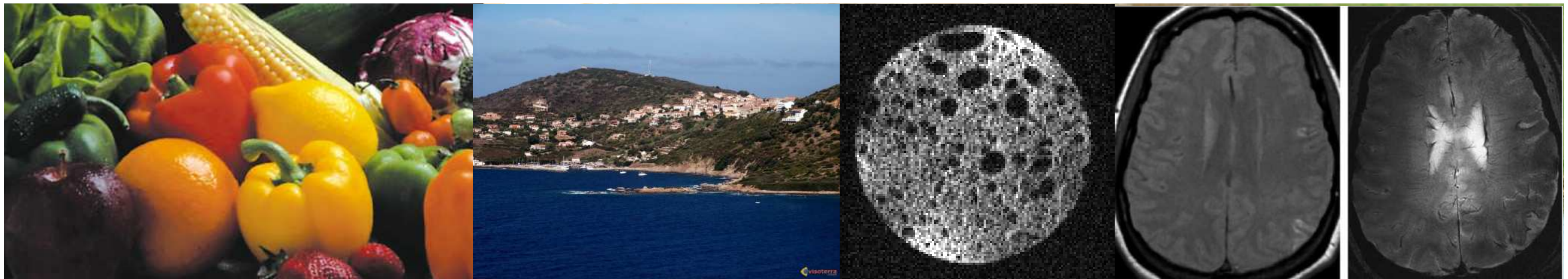
Imagerie RMN

Les bases du codage spatial

J.M. BONNY



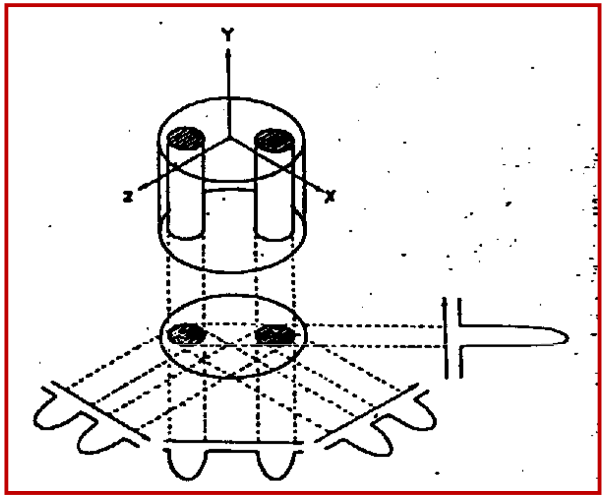
ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

INRA

Introduction

Rappels historiques

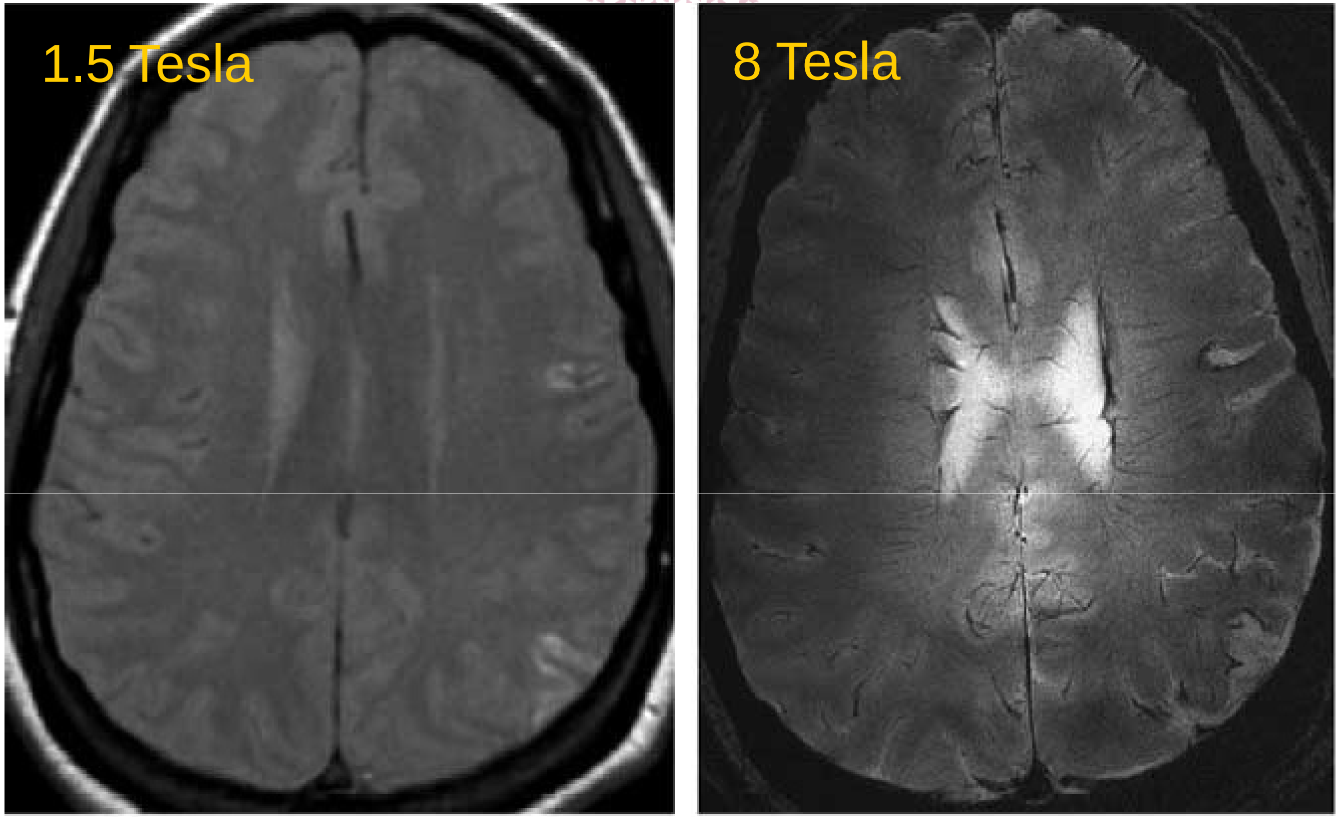
Première image de Lauterbur en 1973



Prix Nobel de Physiologie ou Médecine en 2003

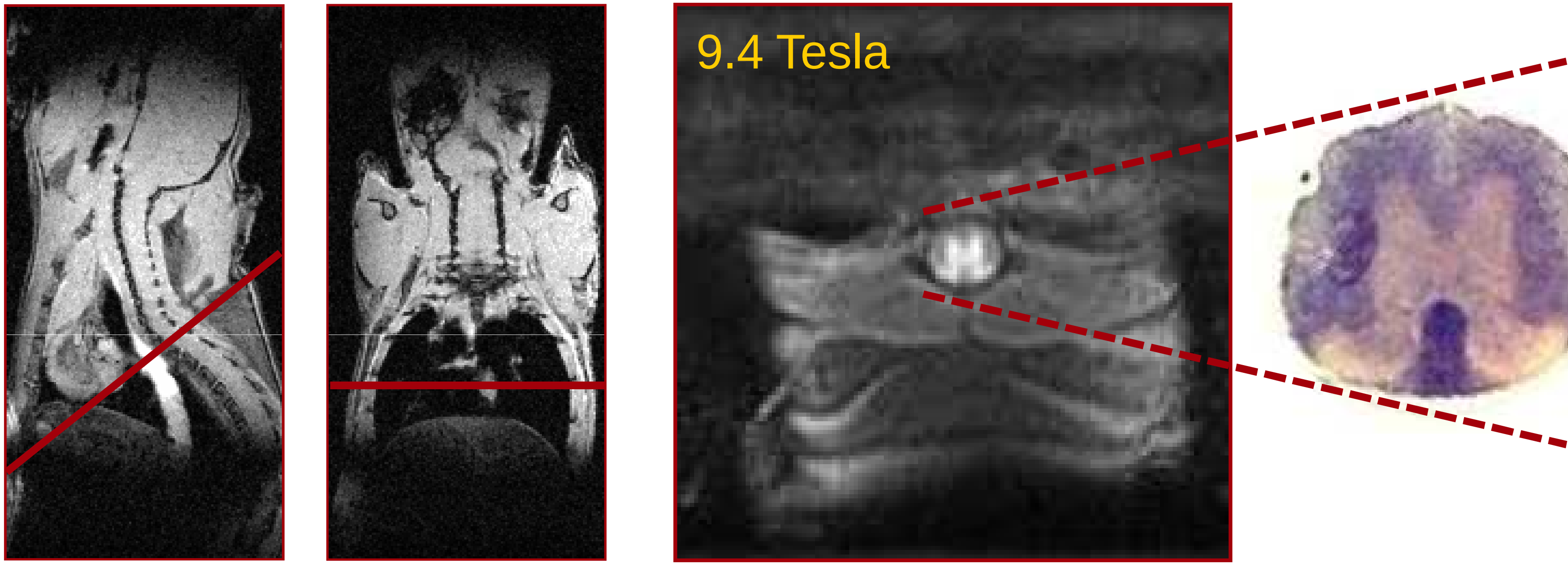
Lauterbur et Mansfield "for their discoveries concerning magnetic resonance imaging"

Quelques exemples …



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

Quelques exemples …



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

Objectifs

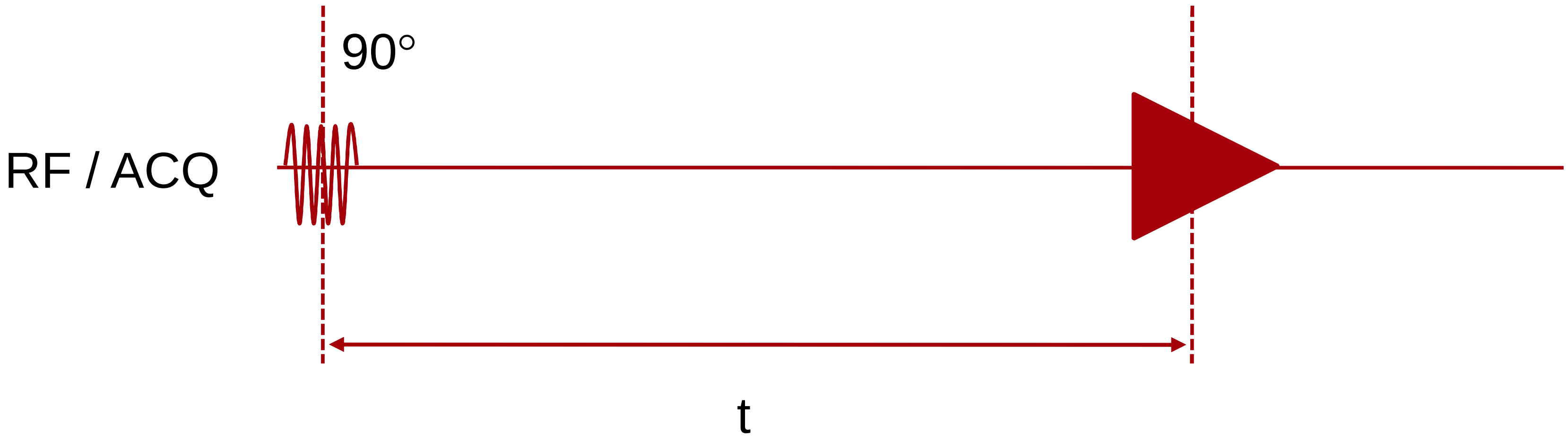
Comment obtenir (rapidement) plusieurs signaux RMN localisés ?

Outils permettant de décrypter la plupart des méthodes de codage spatial

- Balayage de l’espace k
- Sélection de tranche

Manipulation des contrastes pas abordée

Séquence de base



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

Signal obtenu

Signal RMN au point **r** après détection en quadrature

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

Démodulation par rapport à ω_0

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

Signal provenant de l'échantillon sans codage spatial

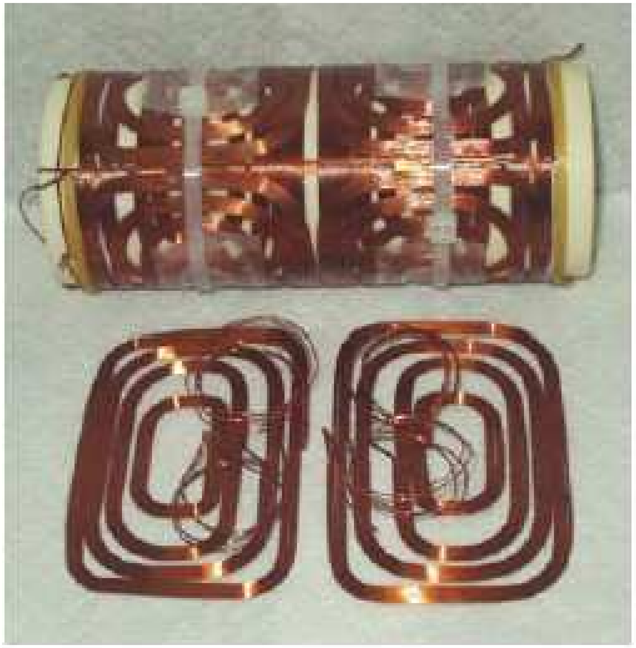
$$S(t) = \int \rho(\mathbf{r})\exp[i\phi(\mathbf{r},t)]d\mathbf{r}$$

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

Signal RMN en présence de gradient de champ magnétique

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

Les bobines de gradient



http://www.dotynmr.com/mri/mri_fcgcpg.htm

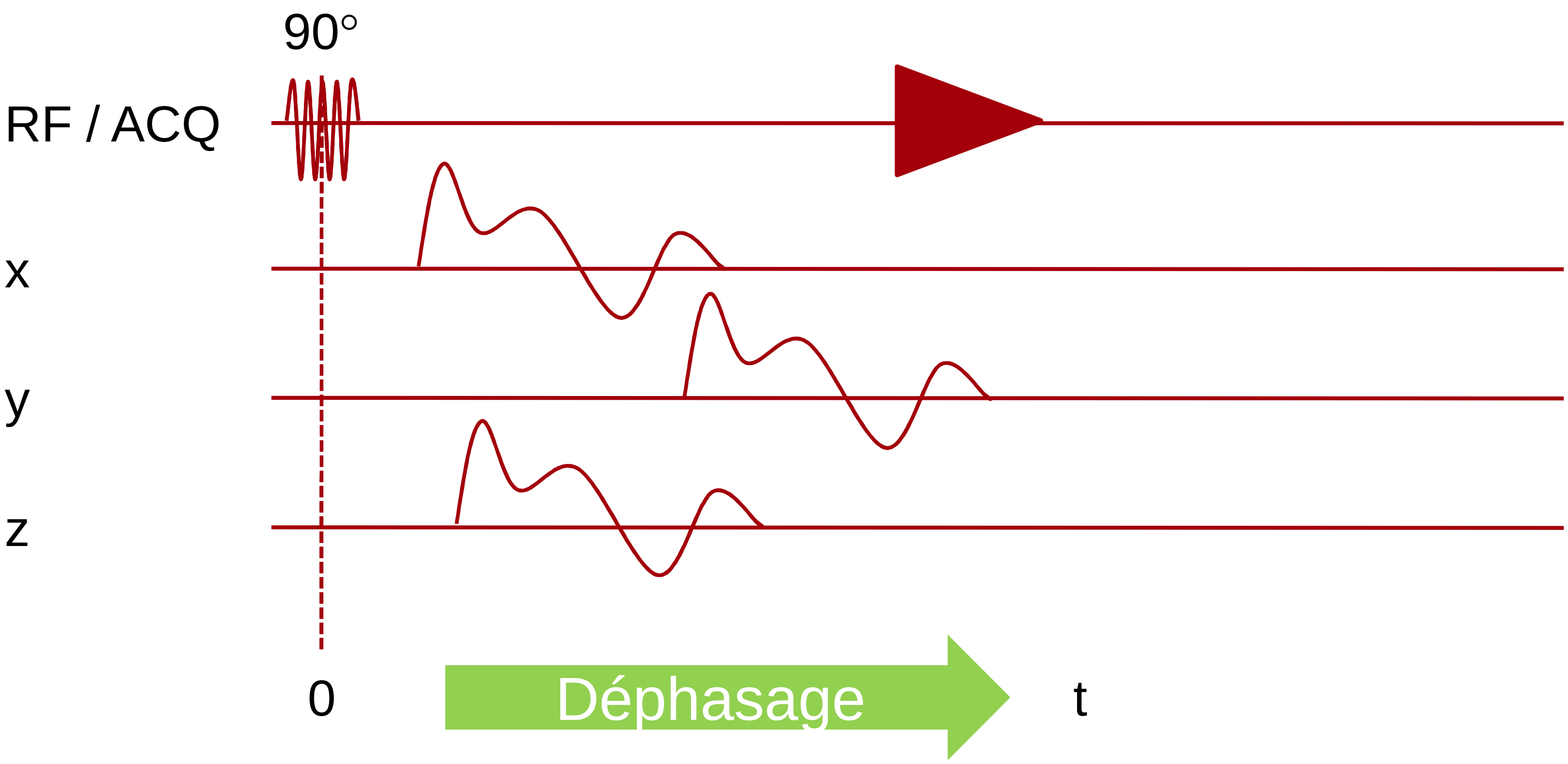
Effet des bobines de gradient

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

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

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

Séquence en présence de gradients



Signal obtenu

Phase en **r** à t

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

avec

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

Signal provenant de l'échantillon

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

Trajectoires dans l’espace réciproque (ou espace k)

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

L'espace k

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

Représentation du signal dans l'espace k

- Espace Cartésien
- Coordonnées (k_x,k_y,k_z)
- Signal en t représenté par le point de coordonnées (**k**(t),S(t))

$\mathbf{G}(t)$ → $\mathbf{k}(t)$ Trajectoire dans l'espace **k**

$S(t)$ Valeur du point de coordonnées **k**(t)

Intérêt de l'espace k

Par définition

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

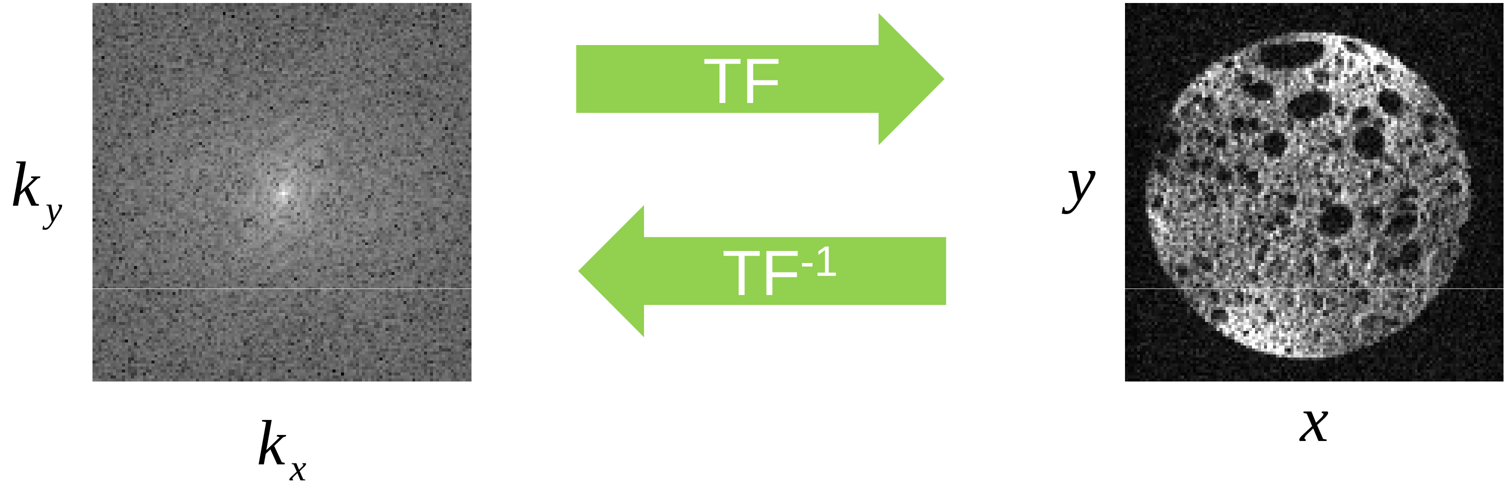
$$\mathbf{F}(S(\mathbf{k})) = \mathbf{F} \circ \mathbf{F}^{-1}(\rho(\mathbf{r})) = \rho(\mathbf{r})$$

Espace k réciproque de l'espace image

$S(\mathbf{k})$ — TF (3D) → $\rho(\mathbf{r})$

$S(\mathbf{k})$ ← TF^{-1} (3D) — $\rho(\mathbf{r})$

Espace k / Espace image



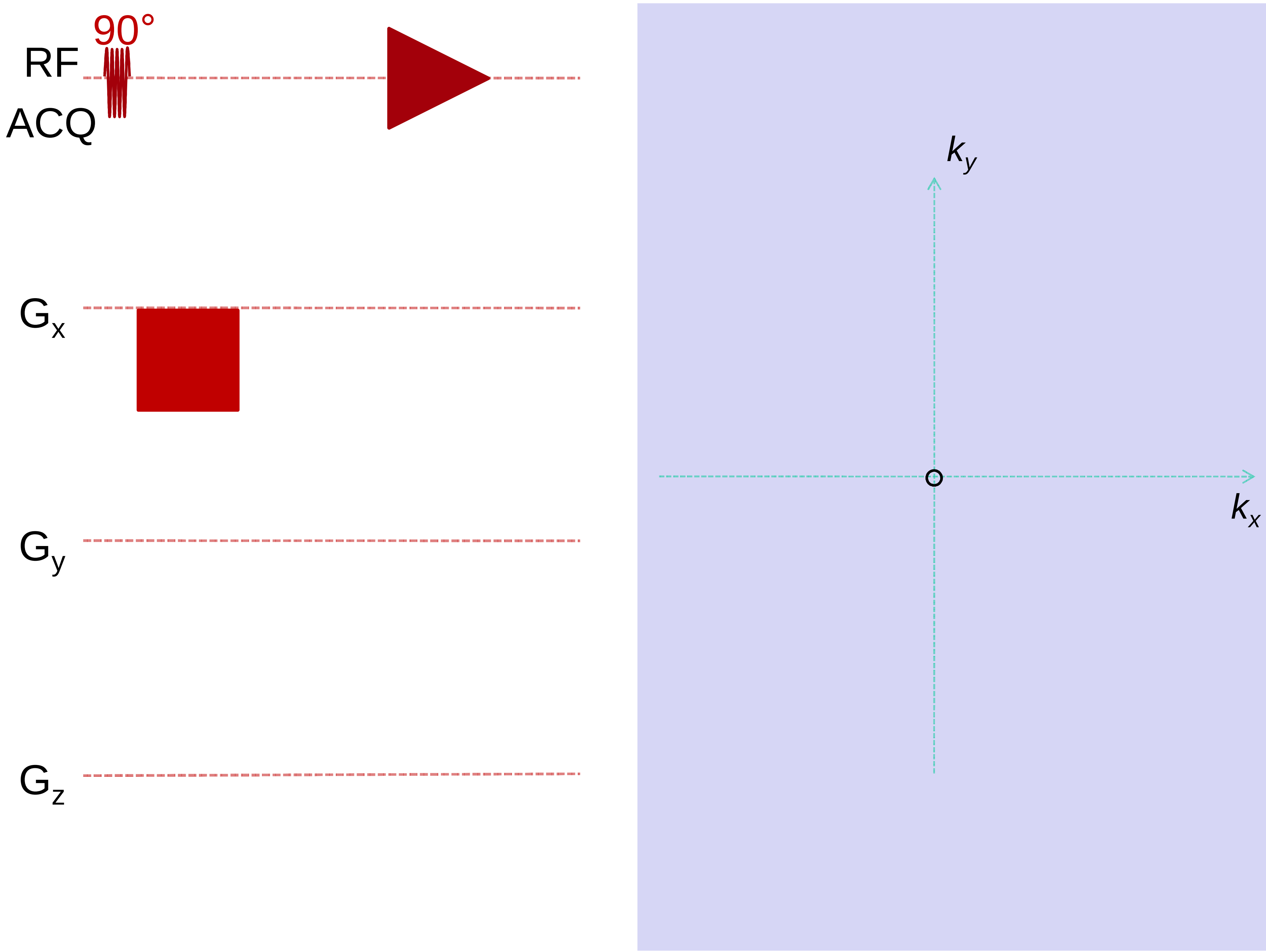
Principe général

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

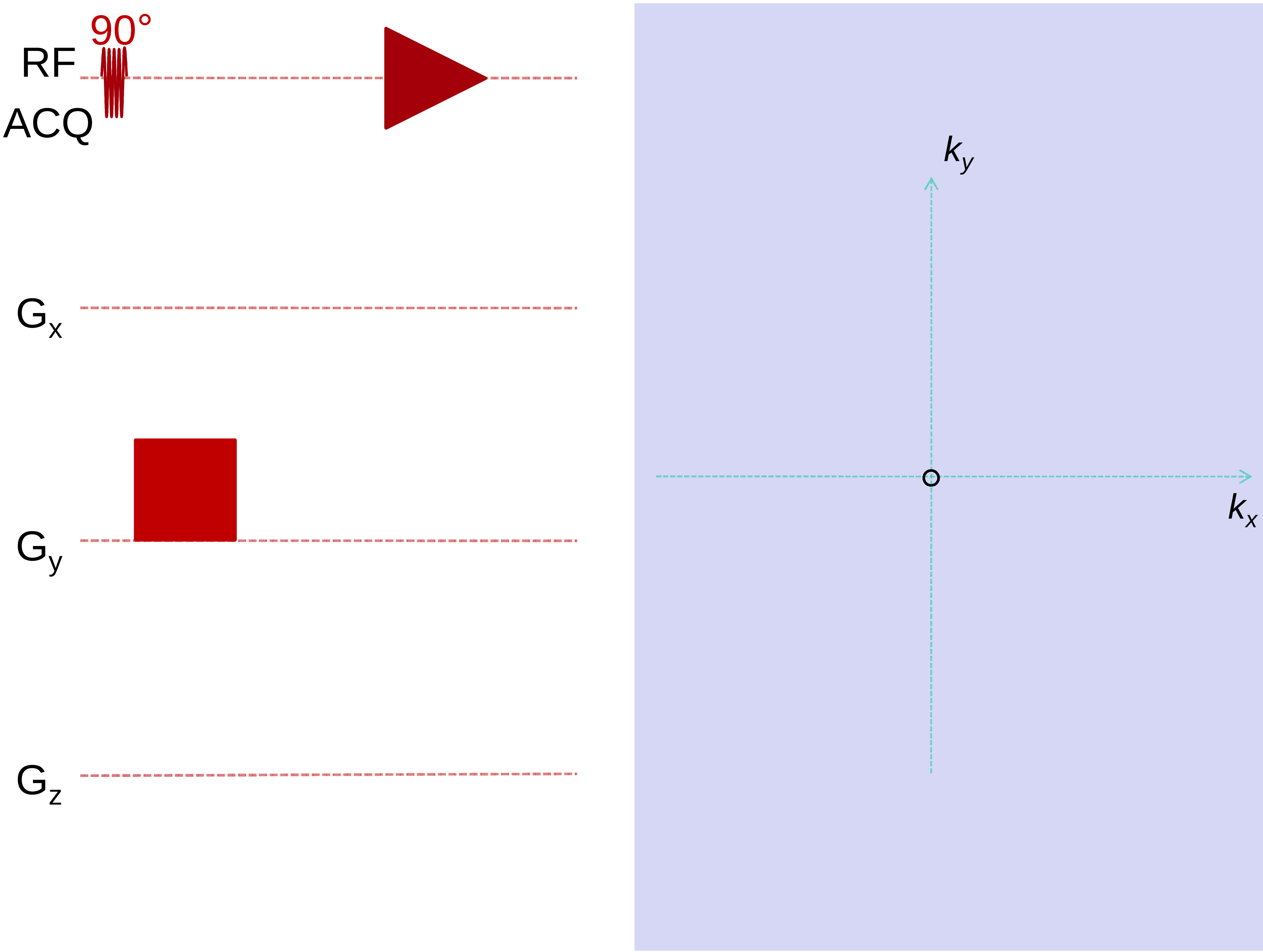
Trajectoire $\mathbf{k}_i(t) = \frac{\gamma}{2\pi}\int_0^t \mathbf{G}_i(t')dt'$

Remplissage de l'espace k

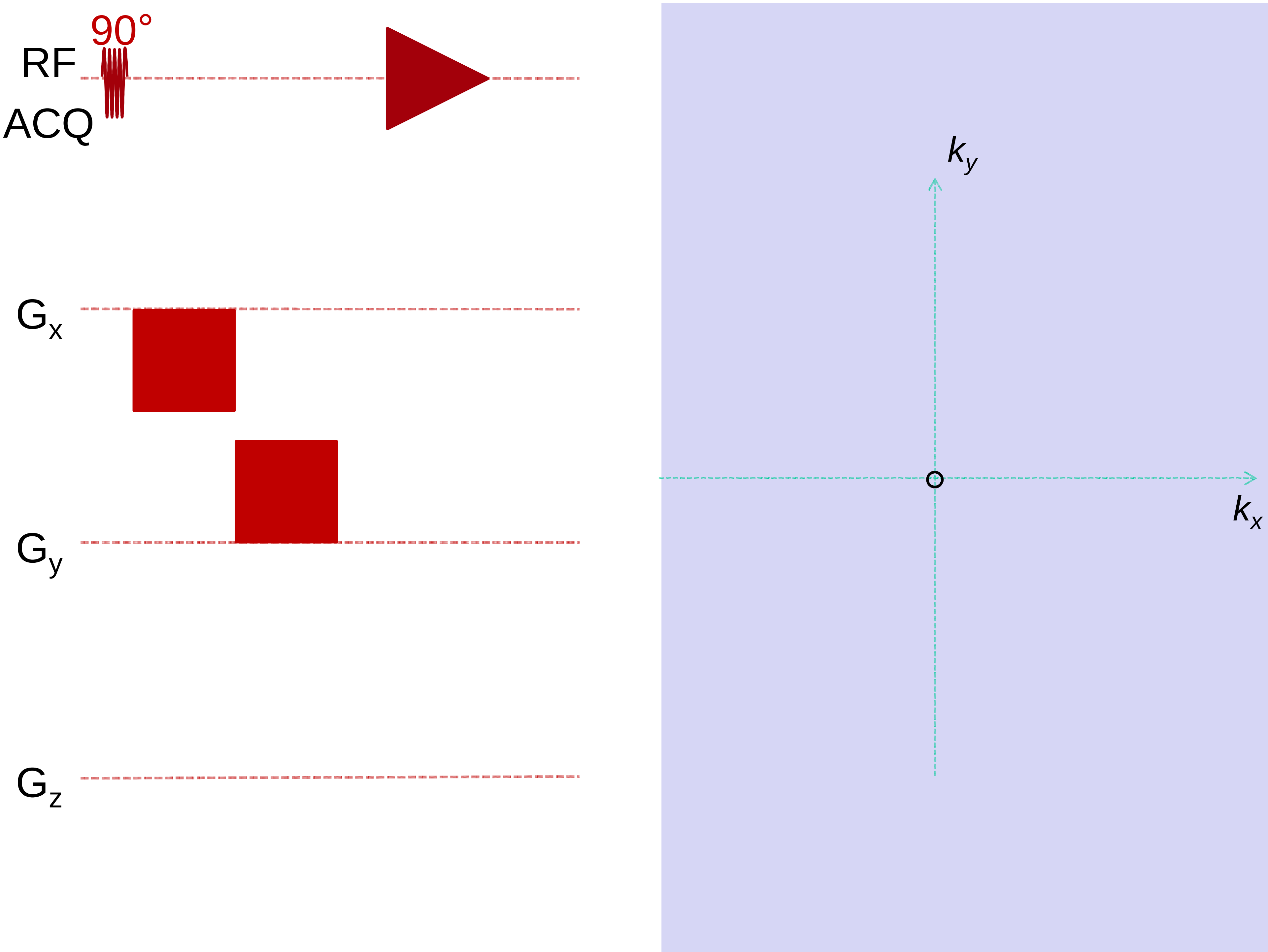
Image

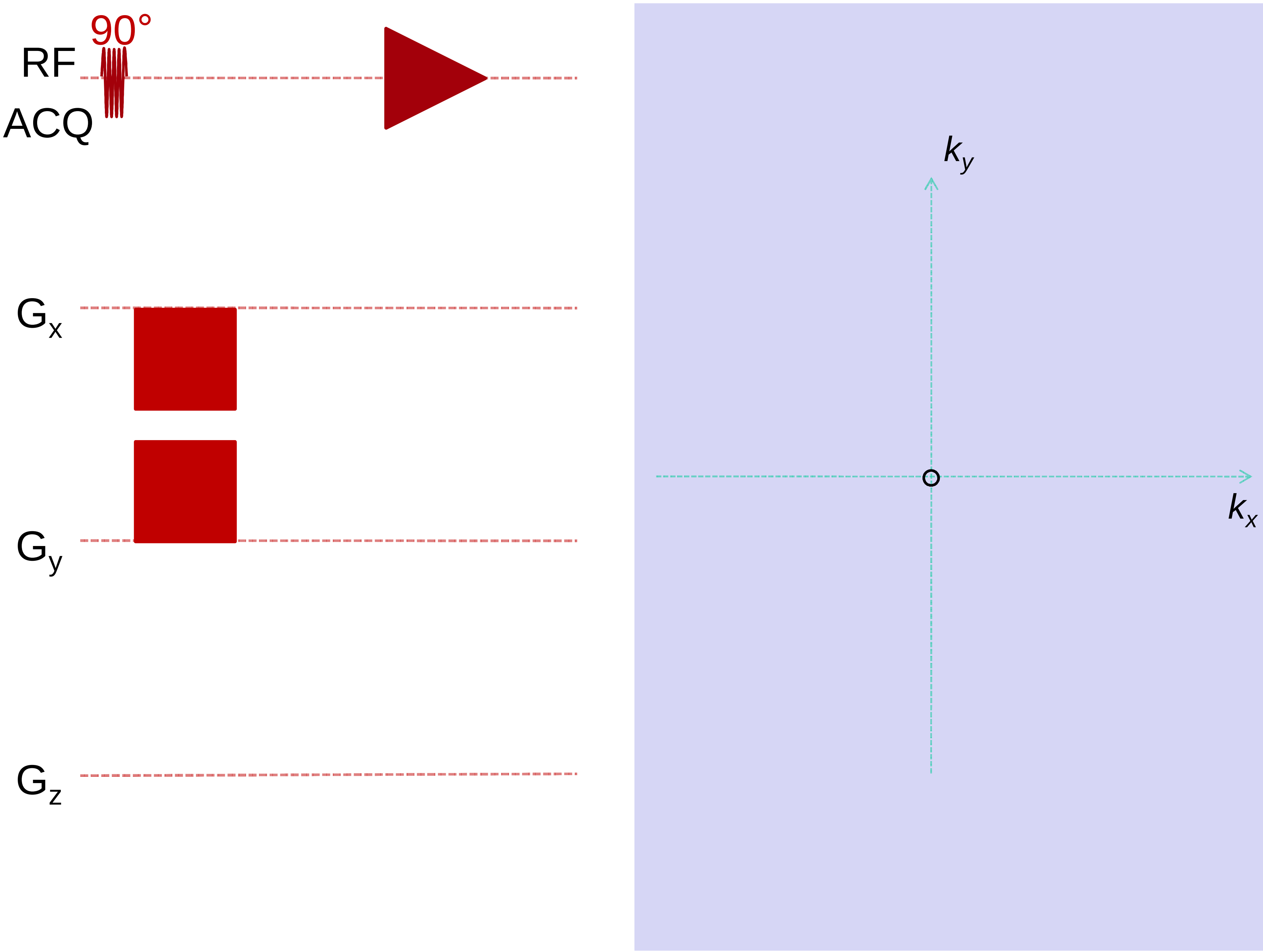


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x

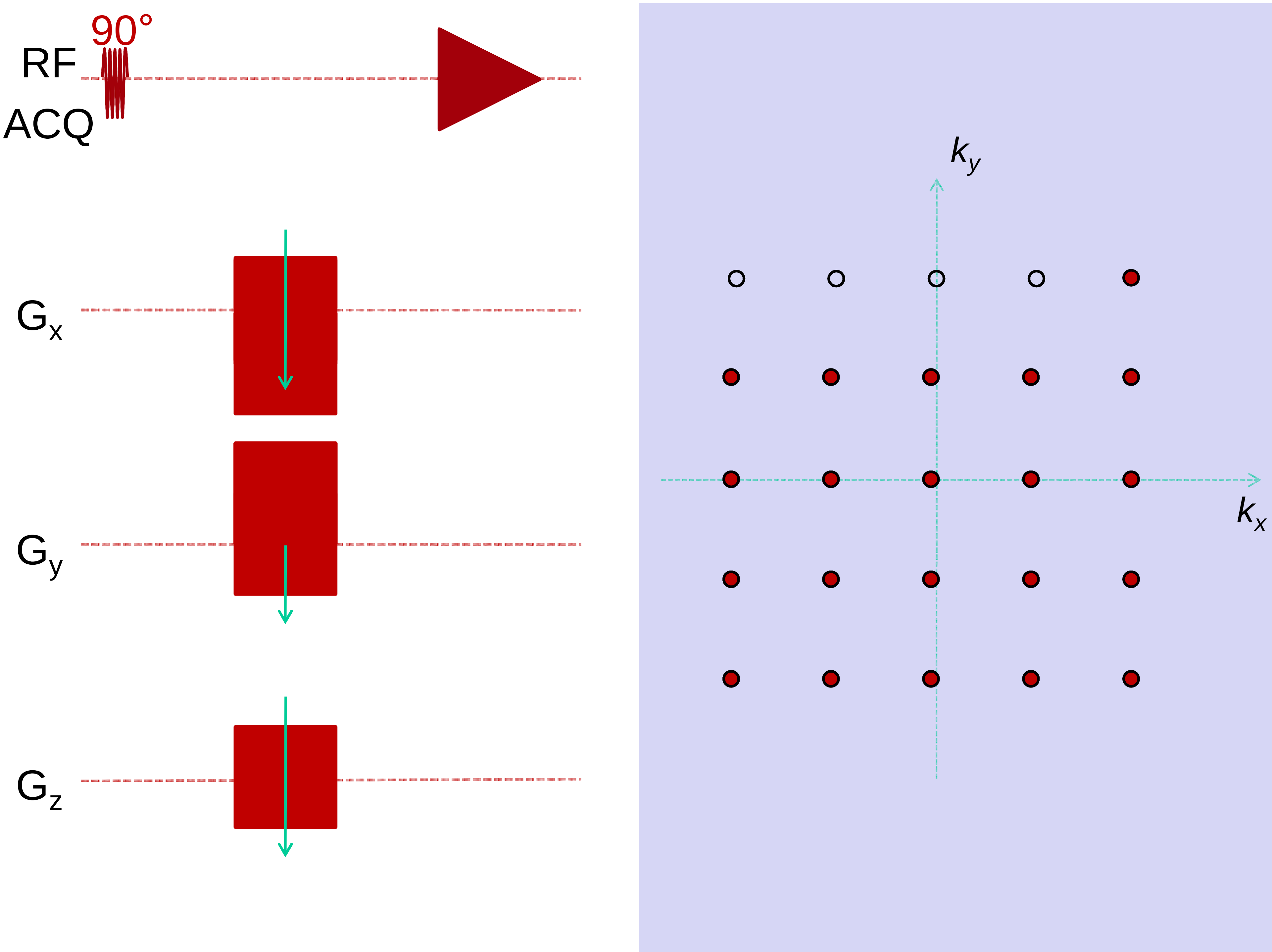


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x


90°
RF
ACQ
Gx
Gy
Gz
ky
kx



90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x

Pure phase encoded imaging

Balayage Cartésien de l'espace k

Gradients précédant l'acquisition

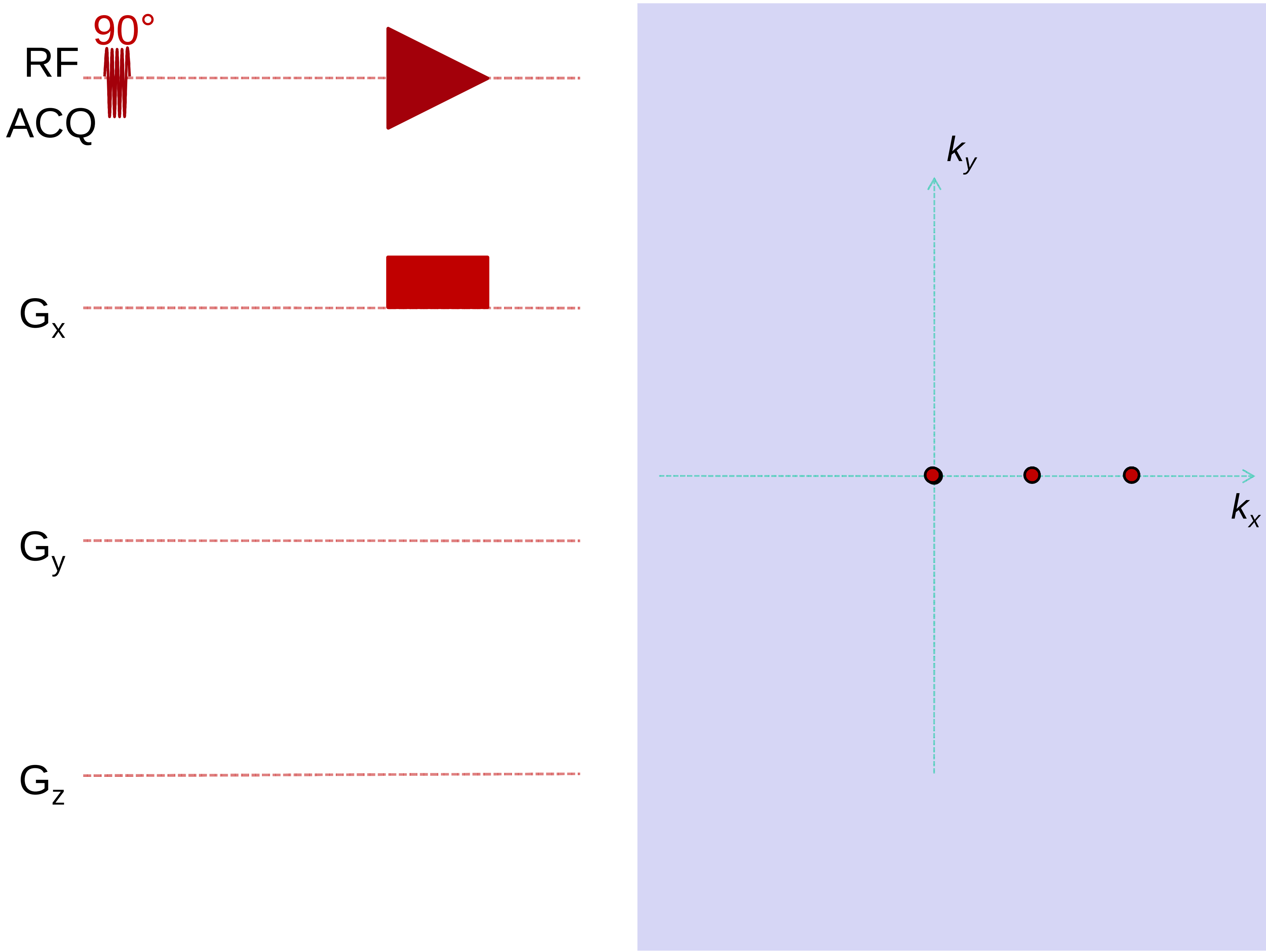
- Gradient de codage de phase
- Codage des 3 directions

Différents modes d'acquisition

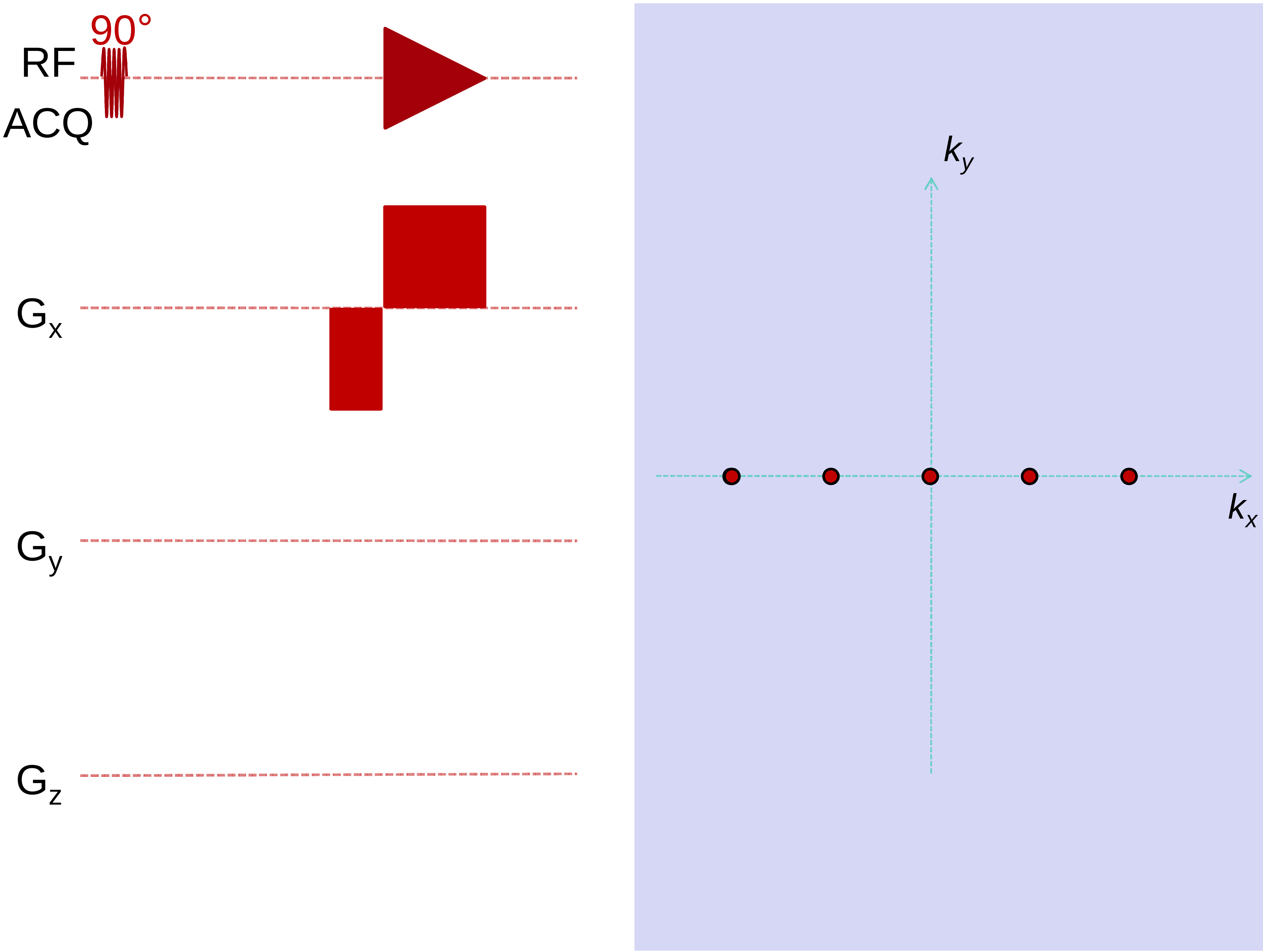
Un point du SIL	*Single Point Imaging*
FID complet	*Chemical Shift Imaging*

Temps d'acquisition $TA = N_x N_y N_z TR$

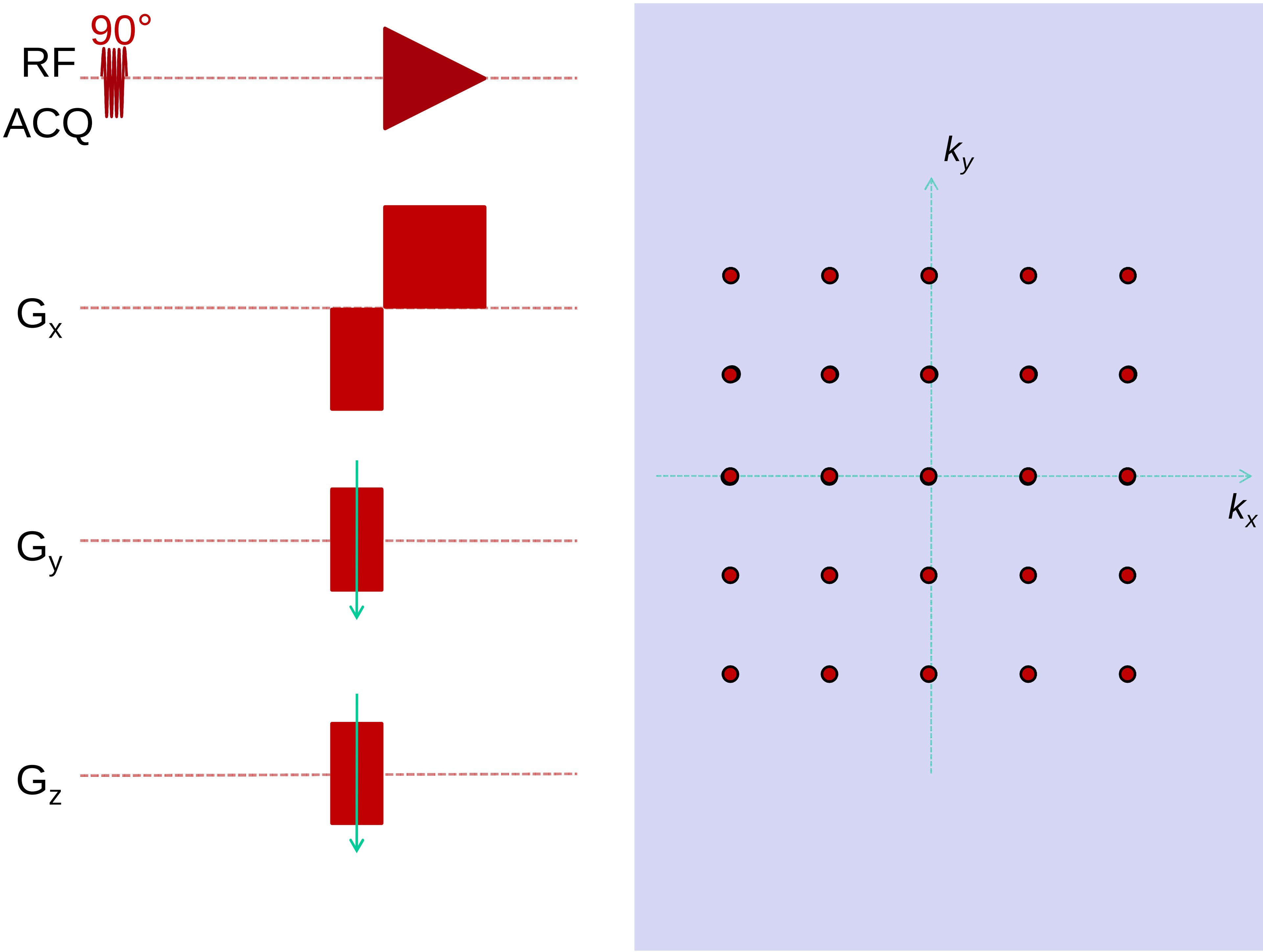
$TA = 64^3 \times 1s = 73\ h$



90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x



90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x

Encodage Spin Warp

Balayage Cartésien de l'espace k

Gradient pendant l'acquisition

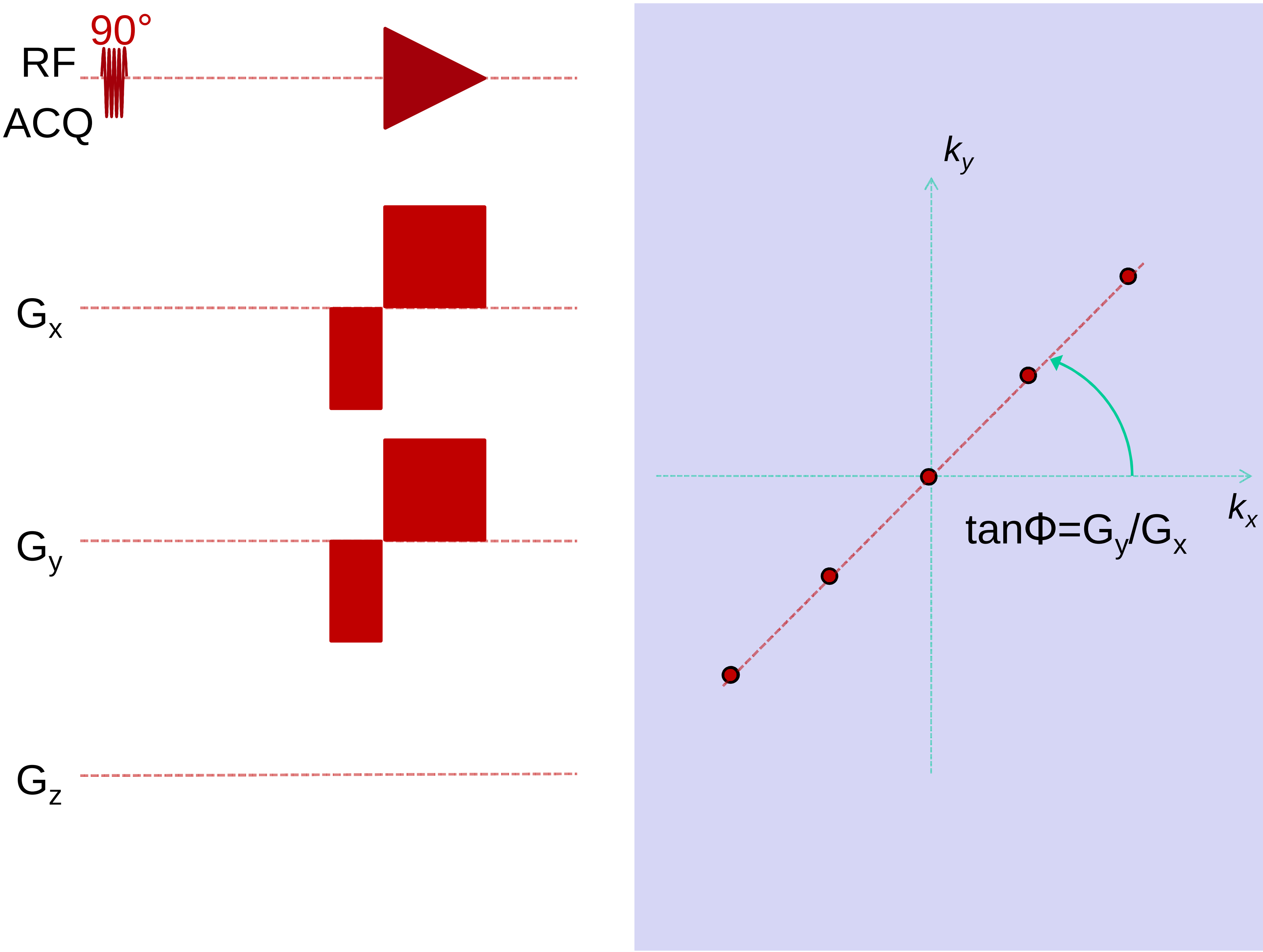
Gradient de lecture

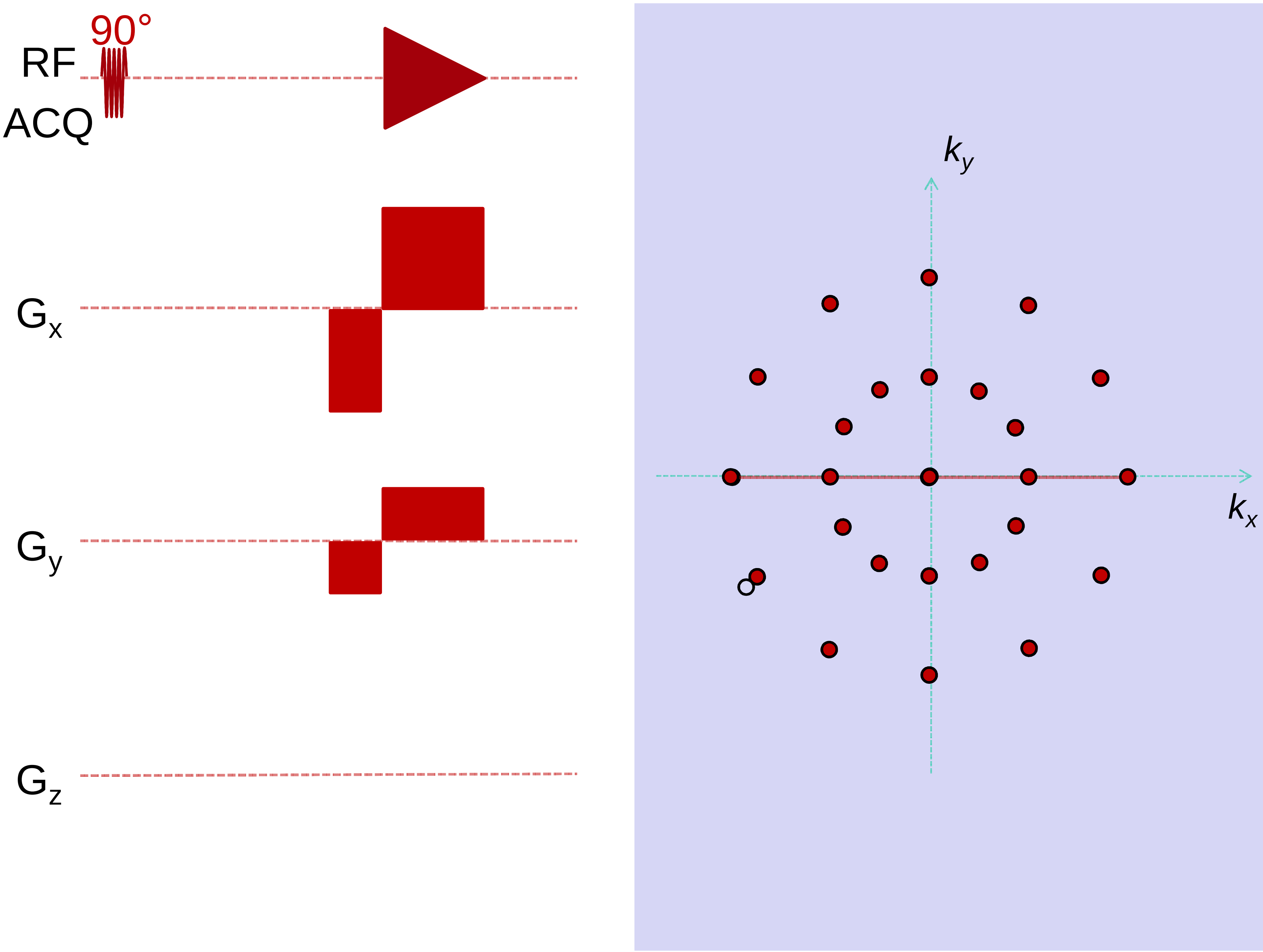
Une direction

Gradient de codage de phase

Autres directions

Temps d'acquisition $TA = N_y\ (N_z) TR$


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x
$\tan\Phi = G_y/G_x$



90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x

Encodage par projection

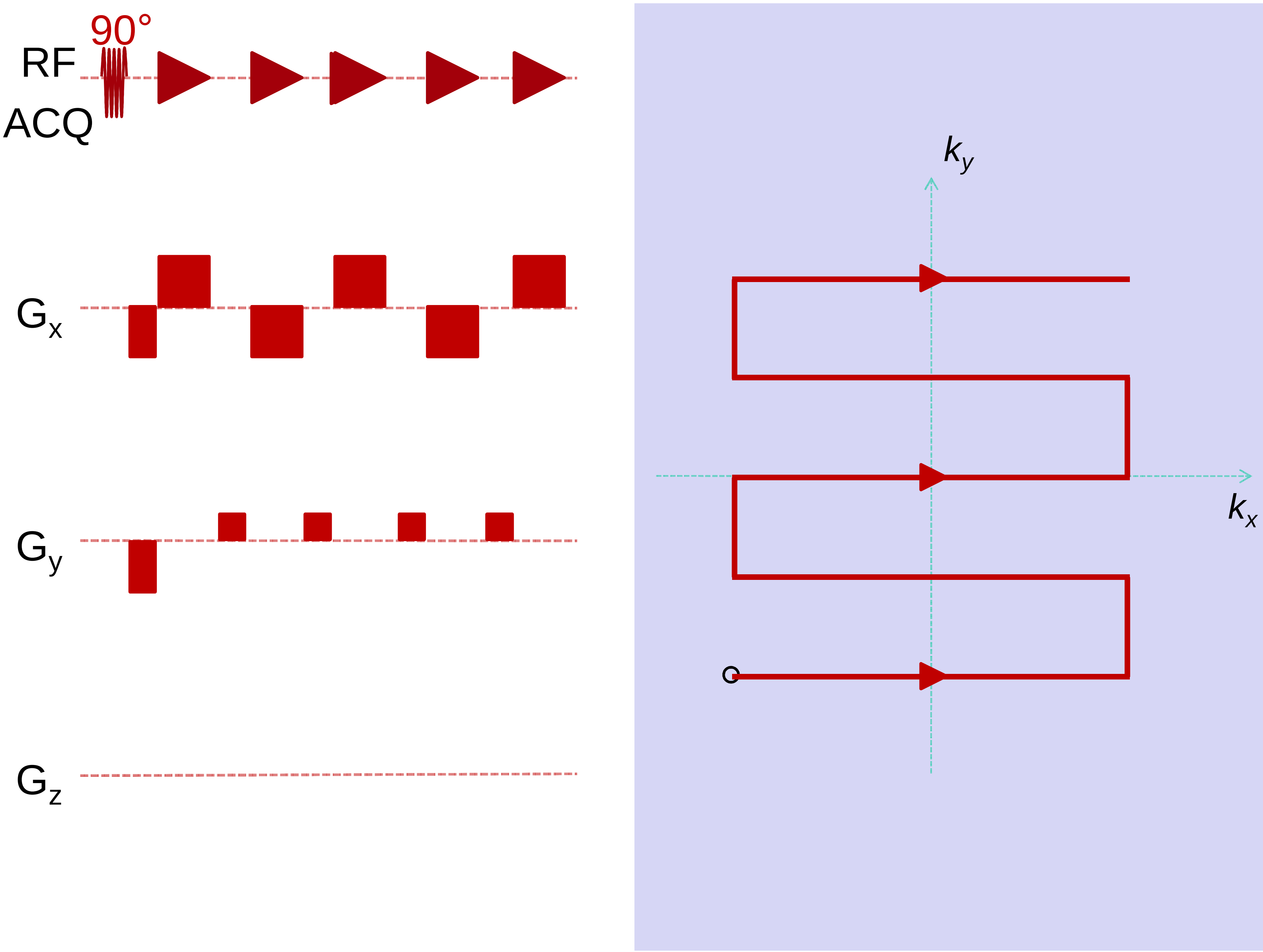
Balayage radial de l'espace k

Gradient pendant l'acquisition

Gradient de lecture

Pas de gradient de codage de phase

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



90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
k_y
k_x

Encodage *echo planar*

Balayage cartesien de l'espace k

Gradient de lecture alterné

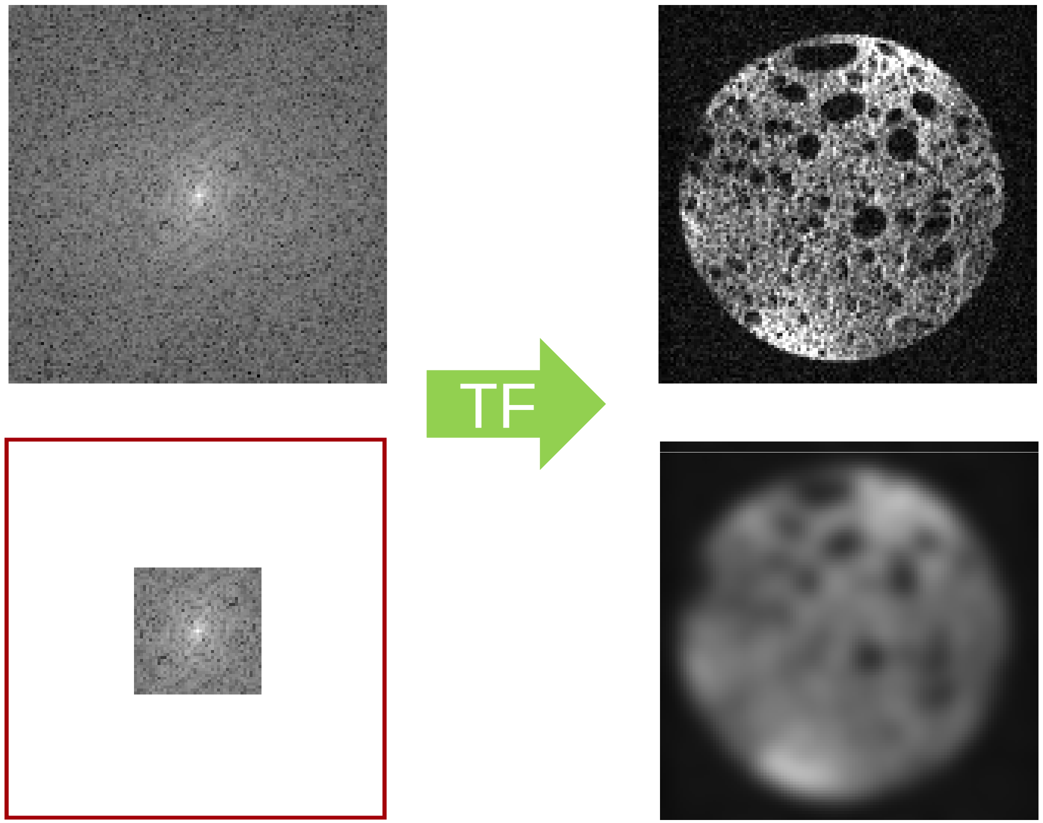
Incrément (blip) entre les phases de lecture

Temps d'acquisition TA = TR

Imagerie rapide

Conséquences du remplissage dans l'espace réciproque

Résolution spatiale



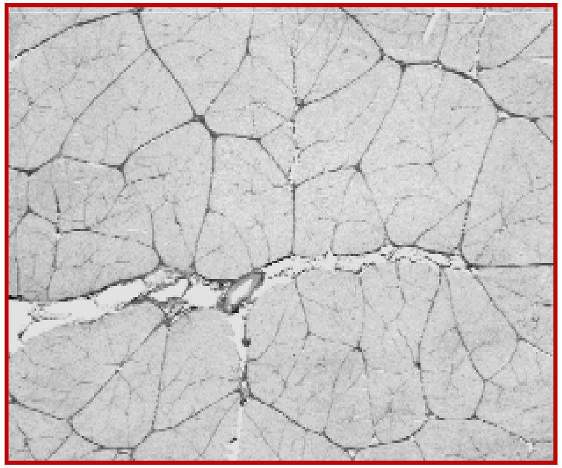
Résolution spatiale

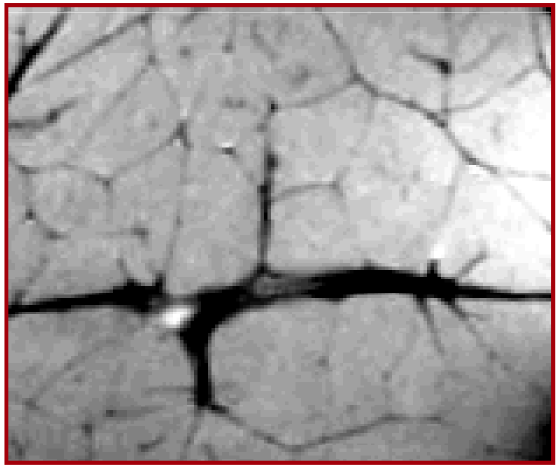
Domaine fréquentiel (espace k) à support limité

Résolution spatiale

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

Amplitude des gradients / Temps de commutation





Sélection de coupe

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

Principe d'une sélection de tranche

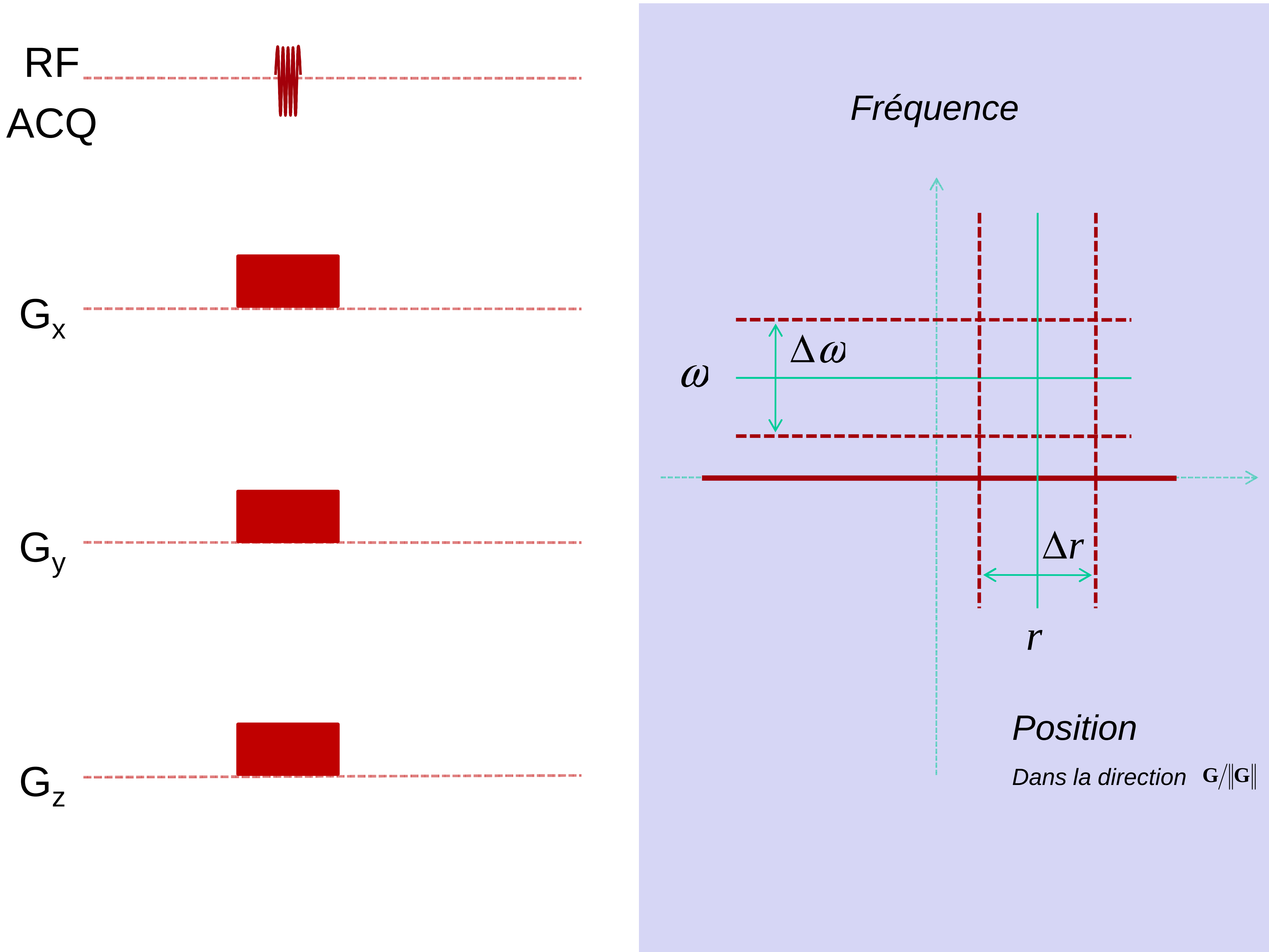
Excitation sélective d'une coupe épaisse

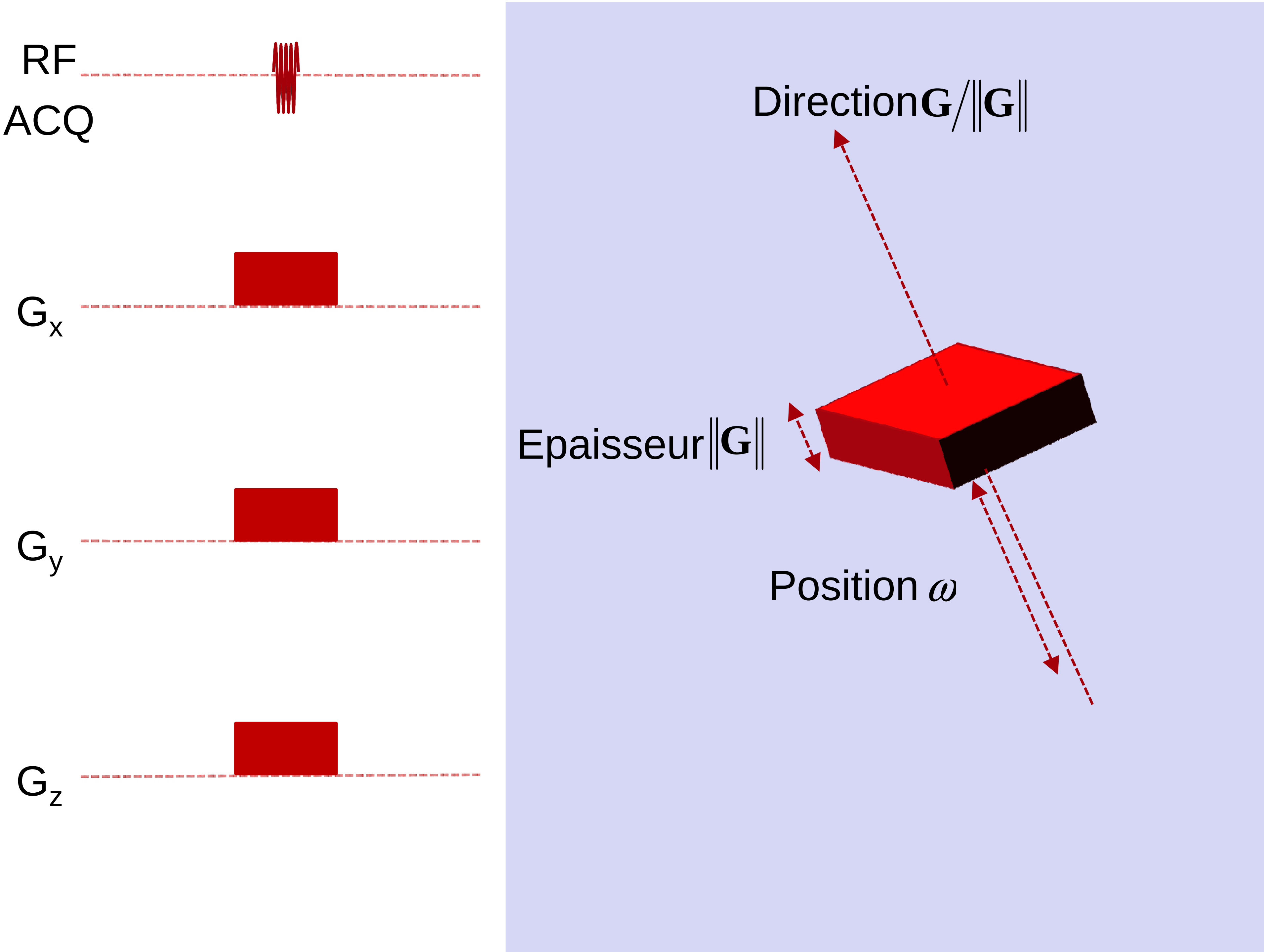
Application d'un gradient constant

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

Impulsion RF sélective en fréquence

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


RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
Fréquence
ω
$\Delta\omega$
Δr
r
Position
Dans la direction $\mathbf{G}/\|\mathbf{G}\|$



RF
ACQ
G_x
G_y
G_z
Direction $\mathbf{G}/\|\mathbf{G}\|$
Epaisseur $\|\mathbf{G}\|$
Position ω

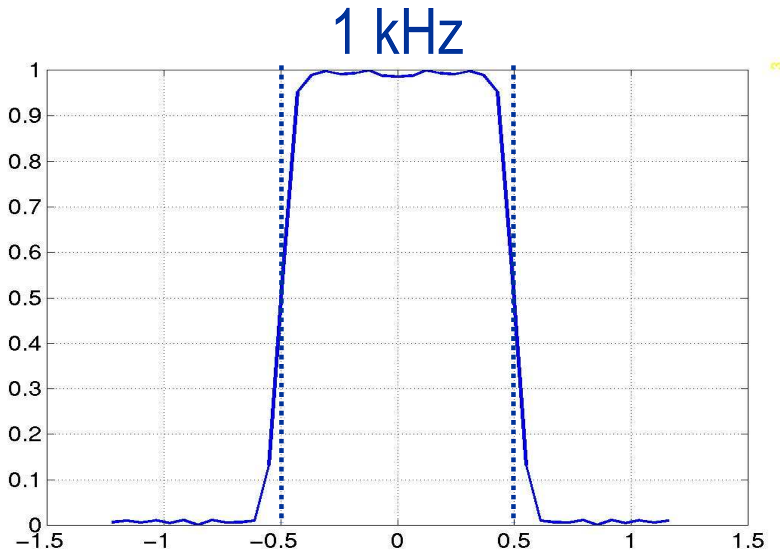
Synthèse et conclusions

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT

Synthèse et conclusions

Impulsions sélectives

Problème inverse	$B1(t) \rightarrow M_T(\omega)$
Formes algébriques prédéterminées	Gauss, Sinc, Sech (…)
Transformées existantes	SLR, IST



Synthèse et conclusions

Outils permettant de décrypter le codage spatial de 99% des séquences d'imagerie :

- Balayage de l'espace k
- Sélection de tranche

Séquences 2D

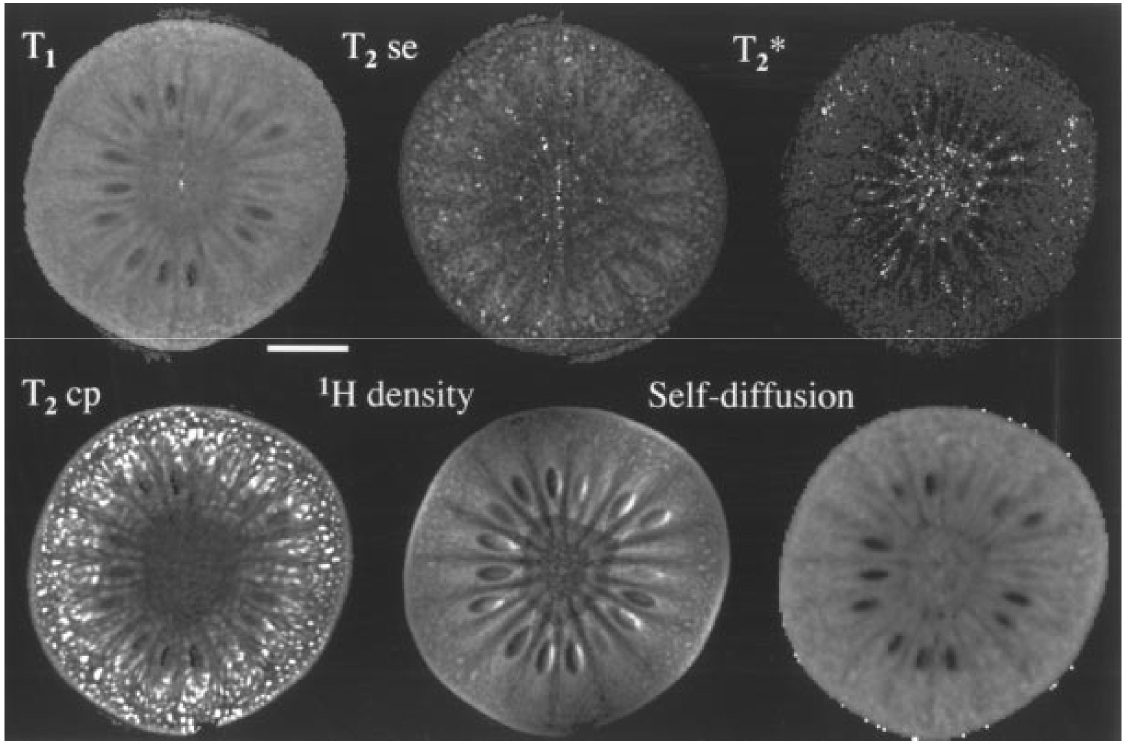
X	Sélection de tranche
Y/Z	Balayage de l'espace k

Séquences 3D

X/Y/Z	Balayage de l'espace k

Synthèse et conclusions

Ajout de gradients et d'impulsions pour manipuler le contraste



Clark et al, *J Sci Food Agric* (1998)

Références

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)

Encodage

Imagerie de projections

Bergin, Pauly, Macovski
Lung parenchyma : Projection reconstruction MR imaging
Radiology 179, 777-781 (1991)

Echo Planar

Mansfield
Multi planar image formation using NMR spin echoes
J Phys C 3, L55-L58 (1977)

Espace k

Twieg
The k space trajectory formulation of the NMR imaging process with applications in the analysis and synthesis of imaging methods
Med. Phys. 54, 338-343 (1983)

Impulsions sélectives

Fourier / Petits angles

Hoult
The solution of the bloch equations in the presence of a varying B1 field-An approach to selective pulse analysis
J Magn Reson 35, 69-86 (1979)

Sech / Passages adiabatiques

Silver, Joseph, Hoult
Highly selective π/2 and π 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)