

L'écriture du plan de Fourier

Techniques avancées : Plan de Fourier, remplissage spiral, technique propeller
Techniques de synchronisation...

Jean-Pierre Tasu
Université et CHU de Poitiers

j.p.tasu@chu-poitiers.fr

Introduction

Les plus grandes avancées technologiques :

- « Hard »

- Champs B0 : puissance, homogénéité

- Antennes : antennes de surface en réseau

- RF : le « multitransmit » (pour le 3T)

- Techniques d'acquisition :

- Imagerie ultra rapide, EPI et diffusion

- imagerie parallèle

Plan

Rappels sur le
plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

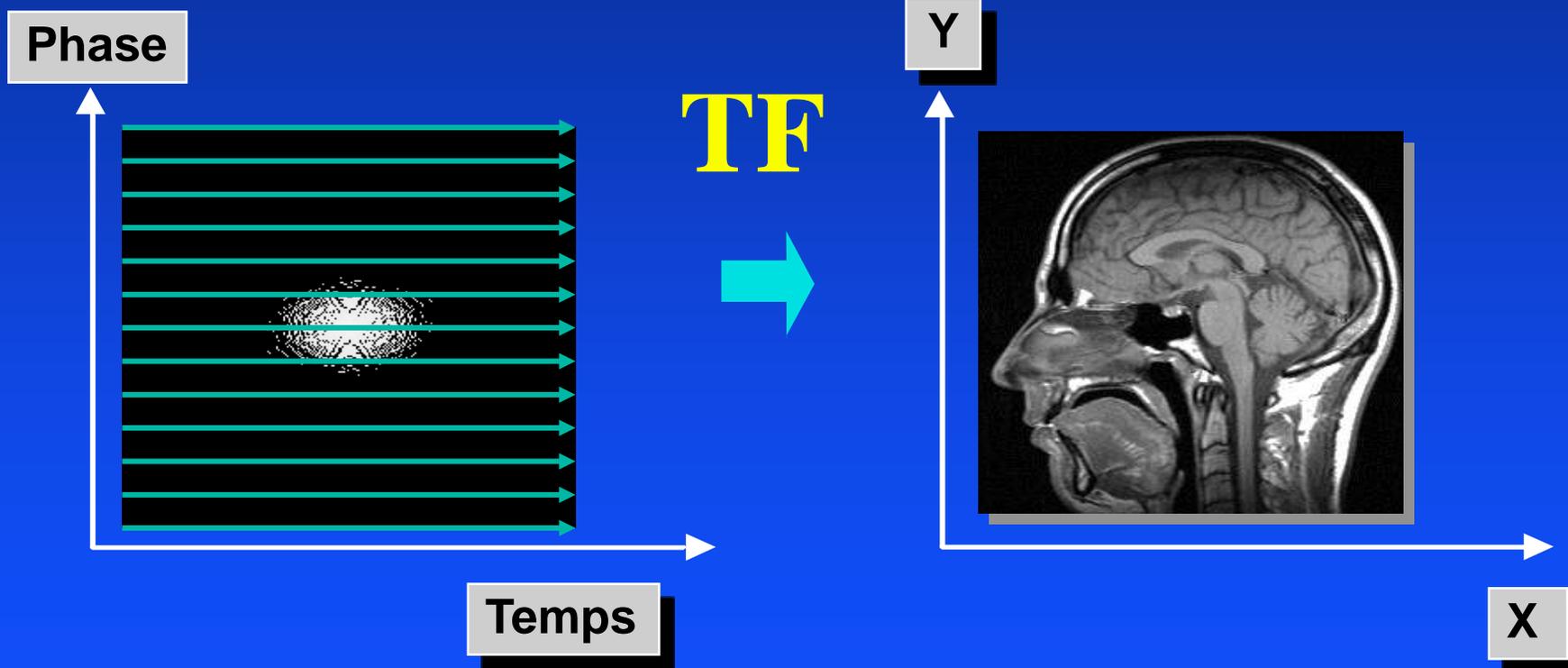
Rappels
sur le plan
de Fourier

RAPPELS SUR LE PLAN DE FOURRIER

L'ES rapide

Plan de Fourier

Plan Image



L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

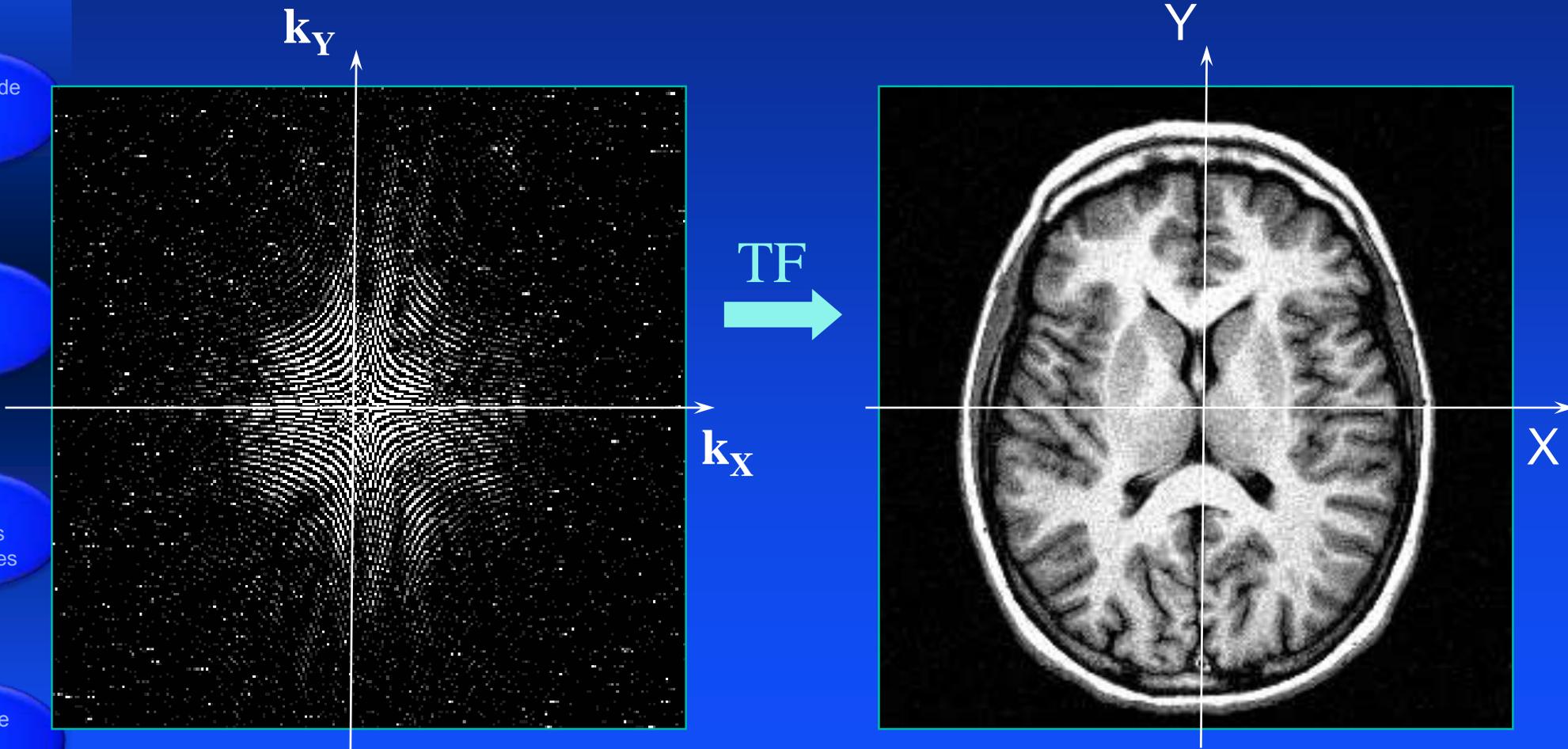
RAPPELS SUR LE PLAN DE FOURRIER

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



Rappels
sur le plan
de Fourier

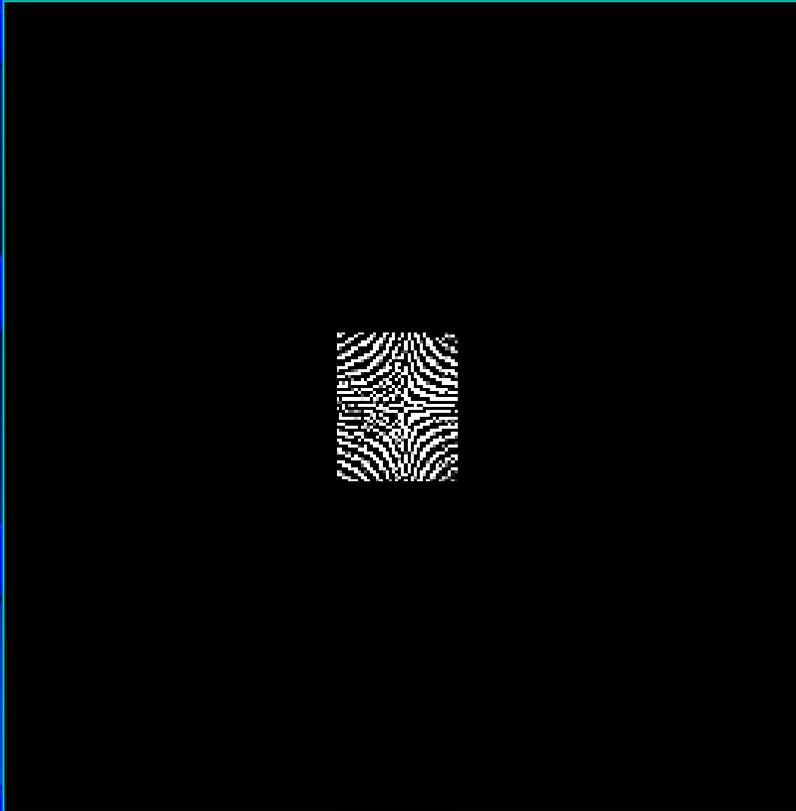
RAPPELS SUR LE PLAN DE FOURRIER

L'ES rapide

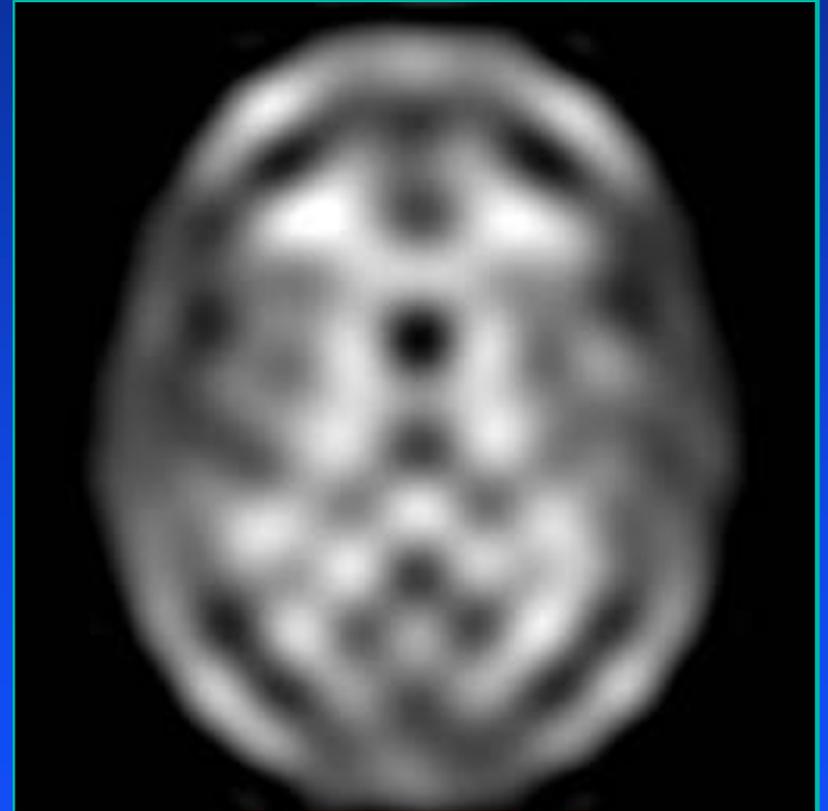
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



TF
→



Rappels
sur le plan
de Fourier

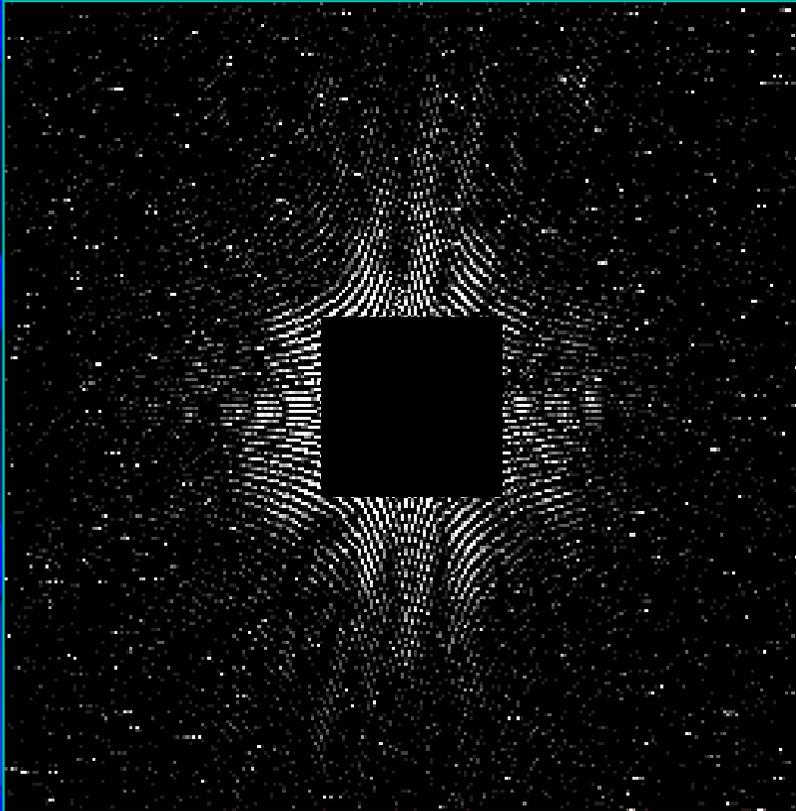
RAPPELS SUR LE PLAN DE FOURRIER

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



TF
→



Rappels
sur le plan
de Fourier

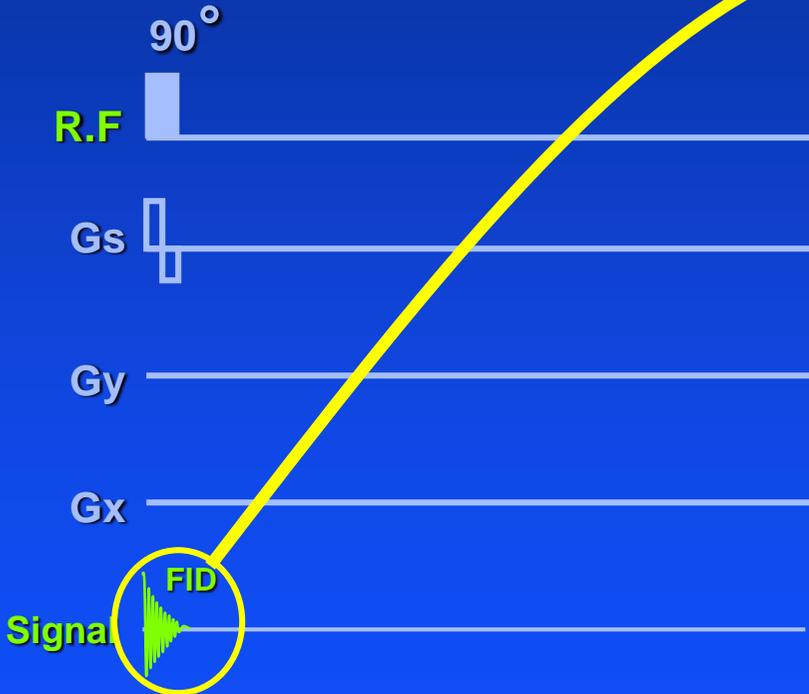
L'ES rapide

L'EPI

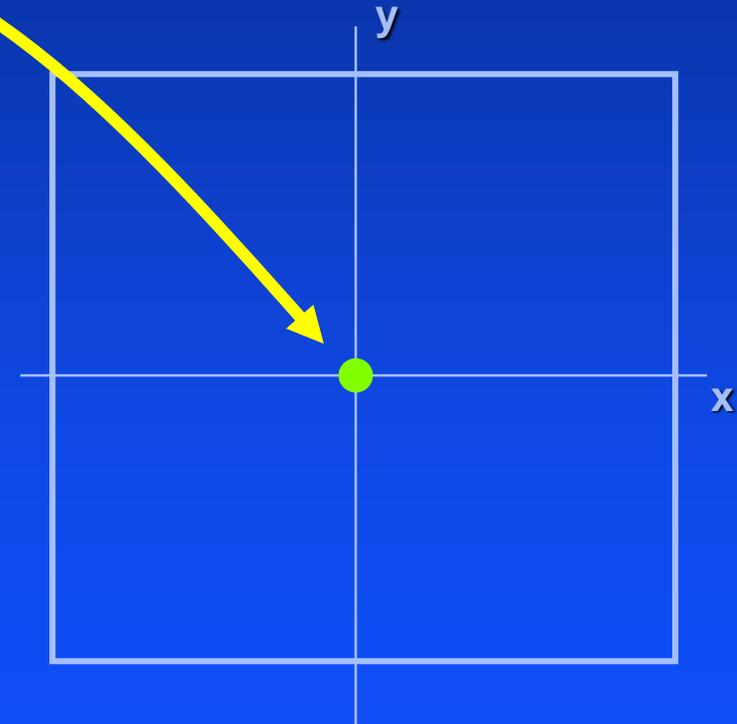
Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

L'écho de spin « classique »



Apparition du signal: on
se place au centre du plan
de Fourier



Rappels
sur le plan
de Fourier

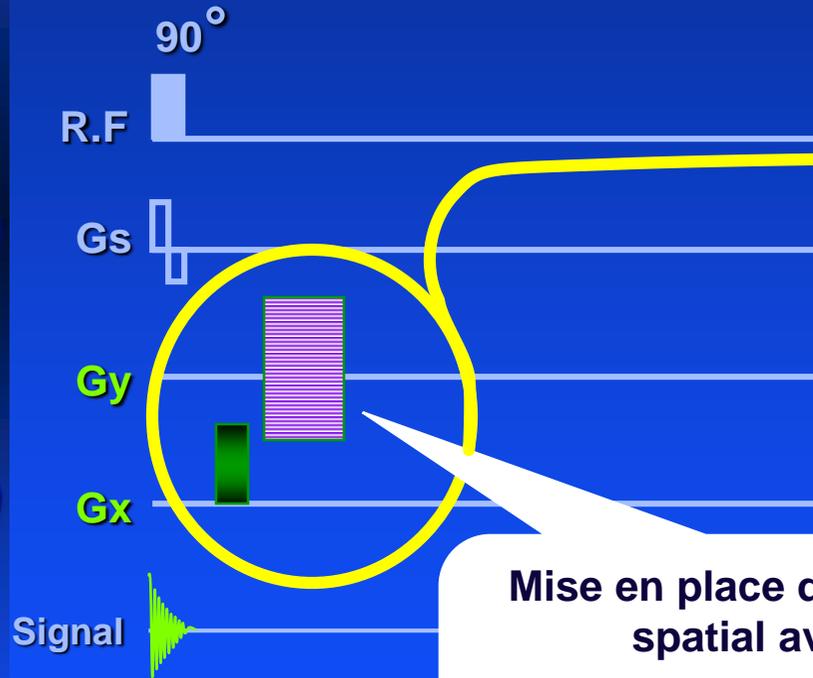
L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

L'écho de spin « classique »



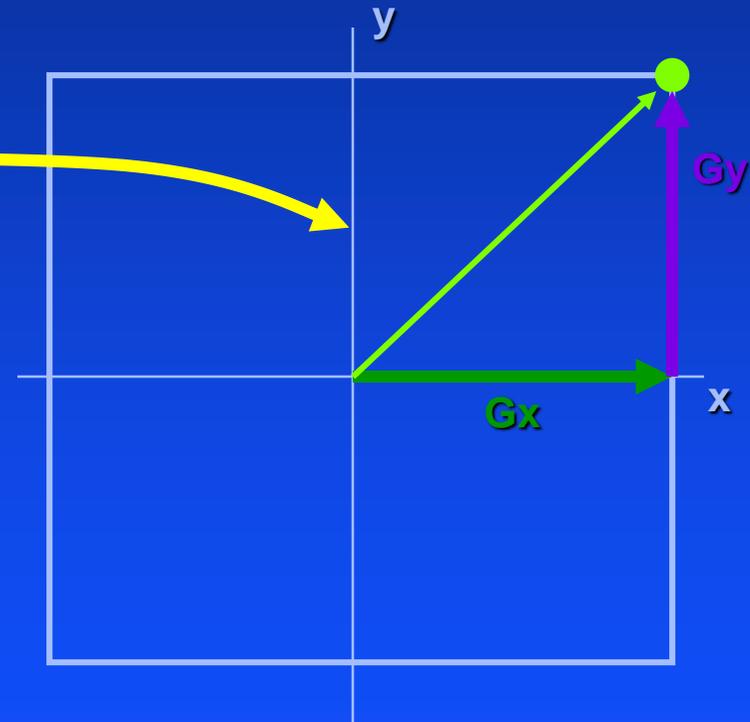
Mise en place du codage
spatial avec:

Codage en Fréquence : Gx
Codage en Phase : Gy

Déplacement du signal

Selon :

$Gx + Gy$



Rappels
sur le plan
de Fourier

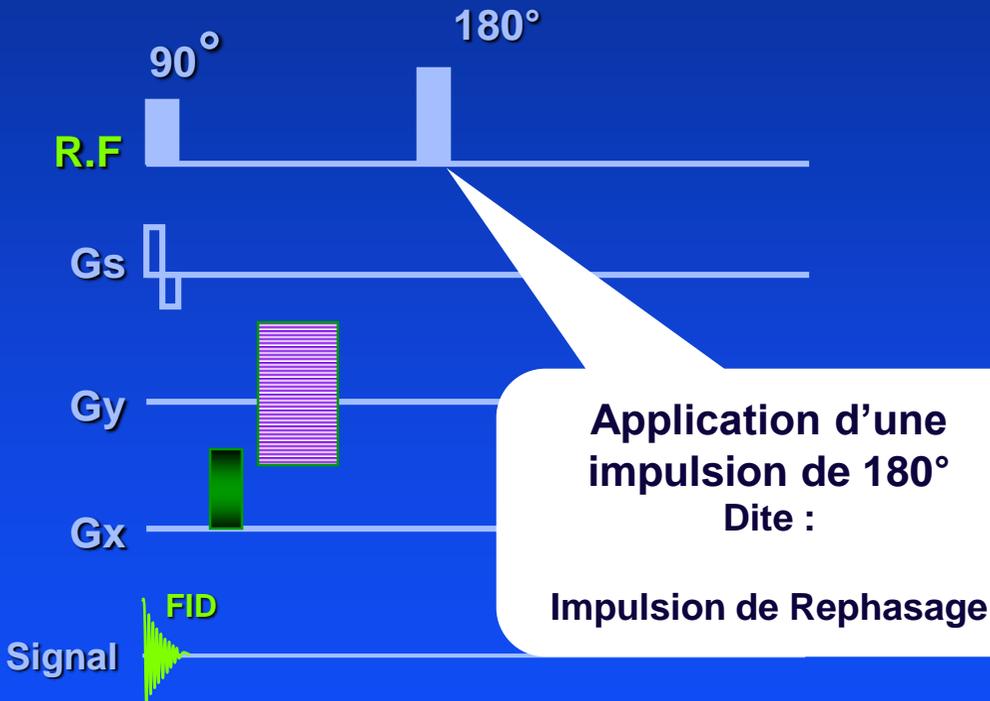
L'ES rapide

L'EPI

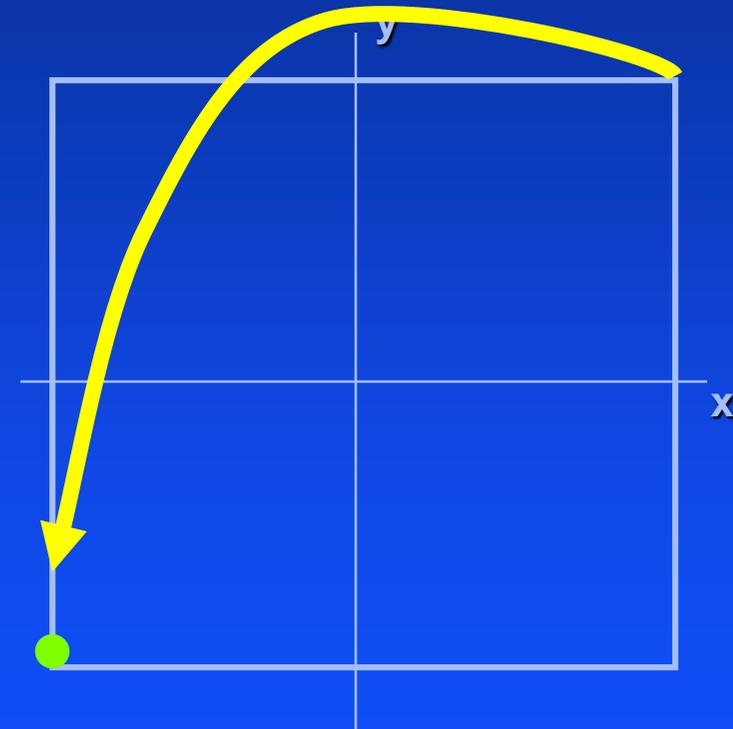
Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

L'écho de spin « classique »



Déplacement du signal
Symétriquement
Par rapport au centre du plan



Rappels
sur le plan
de Fourier

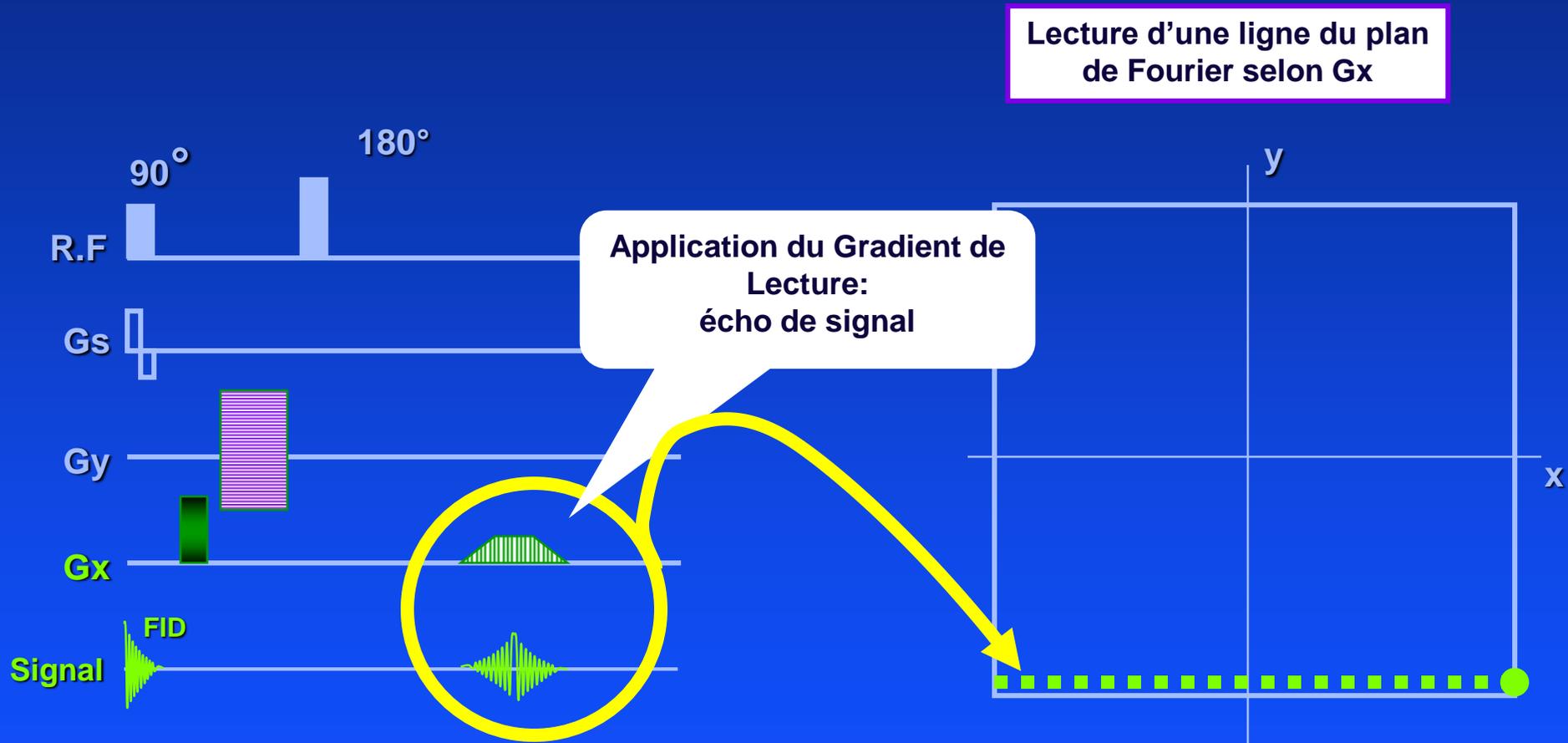
L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

L'écho de spin « classique »



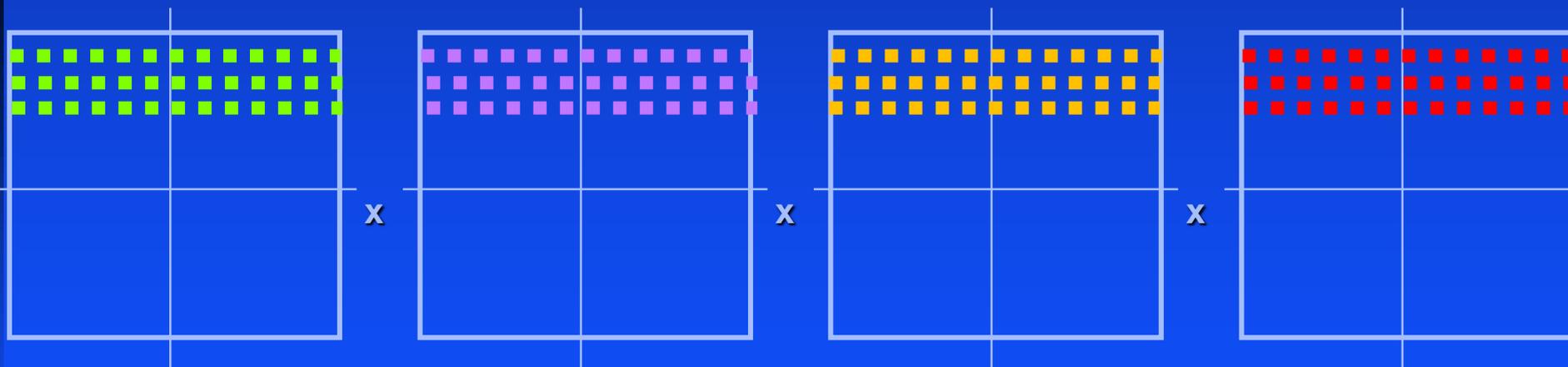
L'acquisition synchronisée

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide



L'EPI



Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Ici cardiaque

Même principe si synchronisation respiratoire

Plan

Rappels sur le
plan de Fourier

L'ES rapide

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Echo de spin rapide :

lire plusieurs lignes après une impulsion 180°

	Philips	Siemens	GE	Hitachi	Toshiba
ES rapide	Turbo SE	Turbo SE	Fast SE	Fast SE	Fast SE

Écho de spin rapide

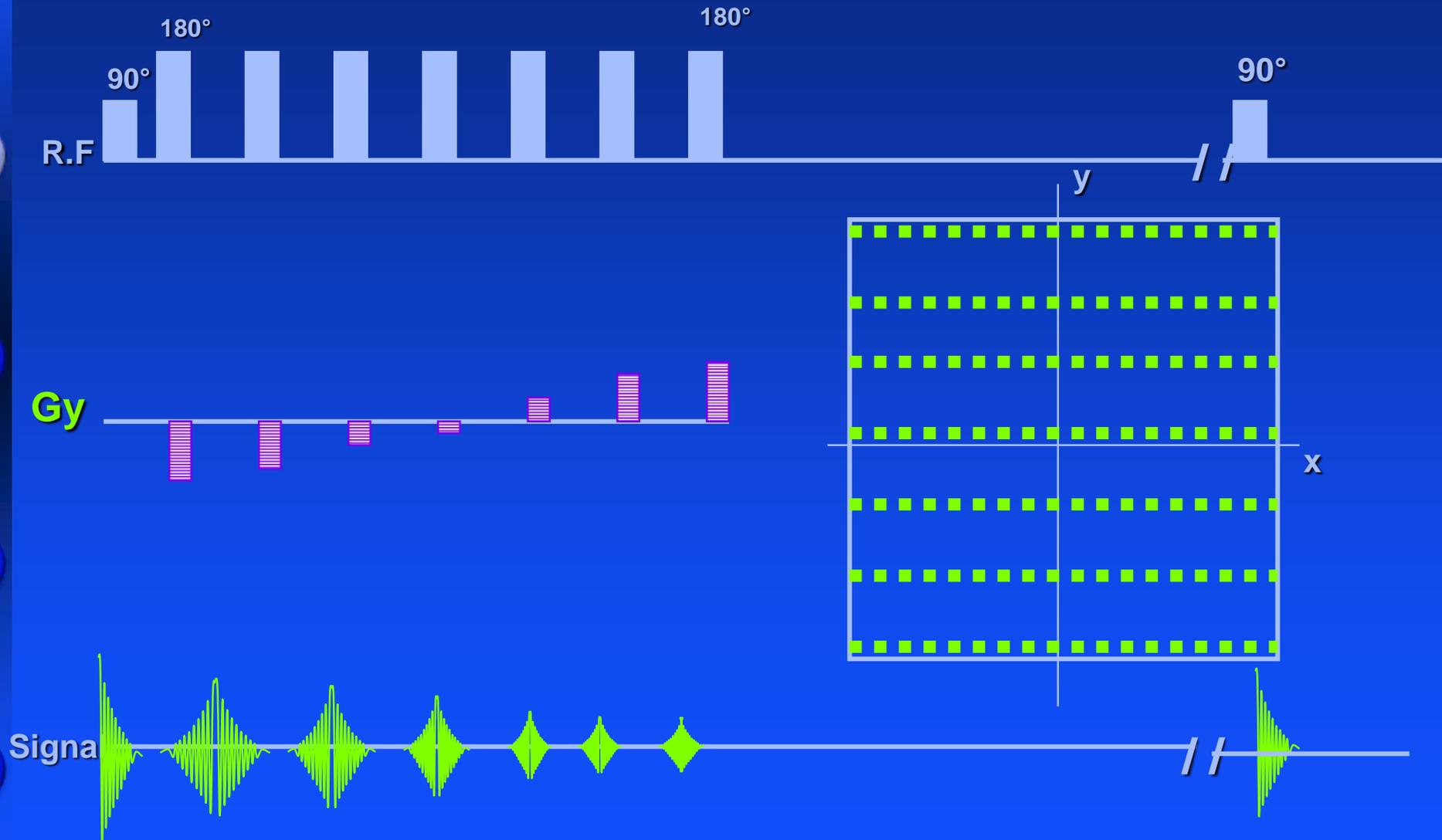
Rappels sur le plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes spécifiques

L'imagerie parallèle



Écho de spin rapide

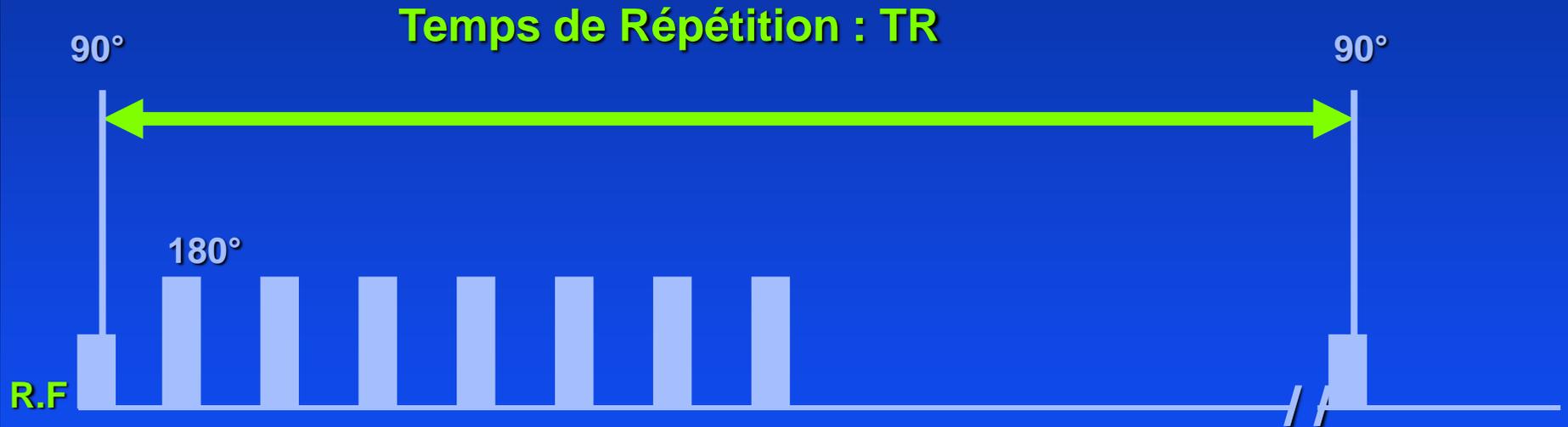
Rappels sur le plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes spécifiques

L'imagerie parallèle



Écho de spin rapide

Rappels sur le plan de Fourier

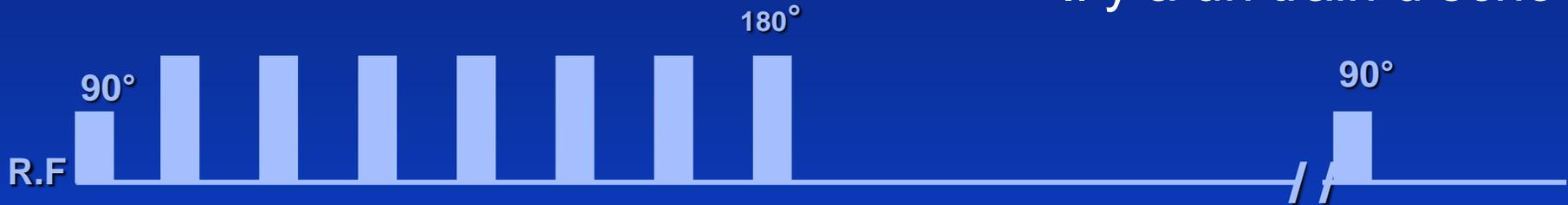
L'ES rapide

L'EPI

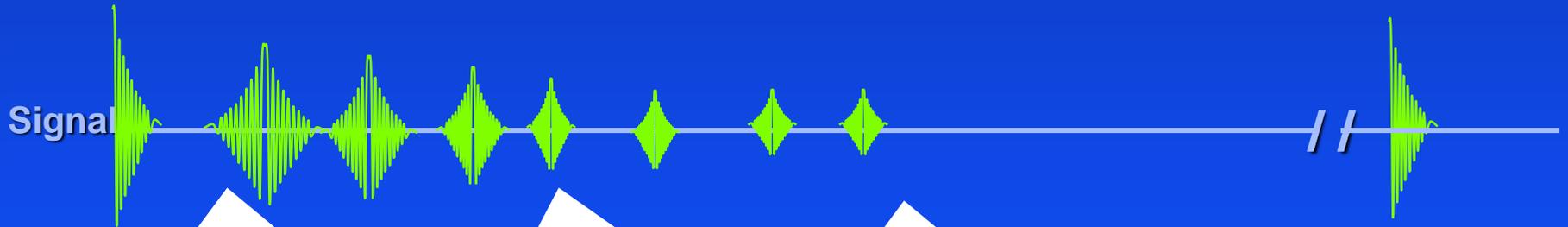
Les méthodes spécifiques

L'imagerie parallèle

Il y a un train d'écho

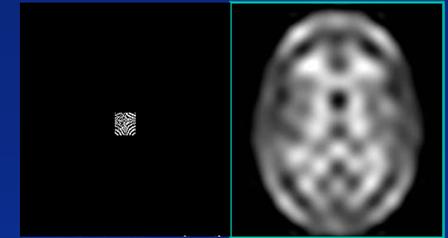


Écho de signal n°1 = TE 1 // Écho de signal n°7 = TE 7



Informations en densité // Informations pondérées en T2

Écho de spin rapide



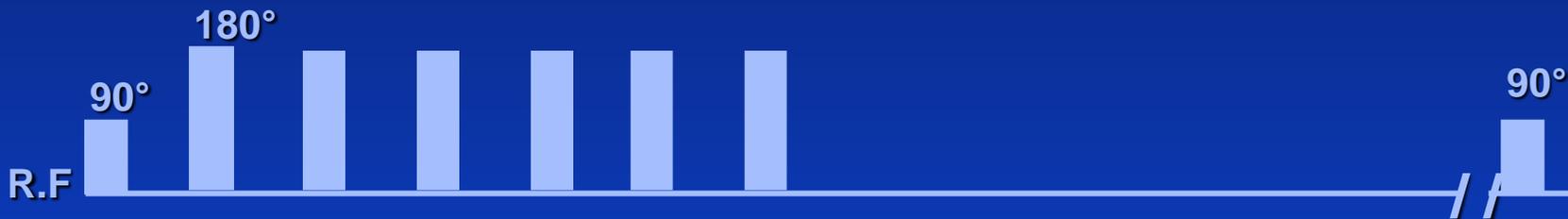
Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

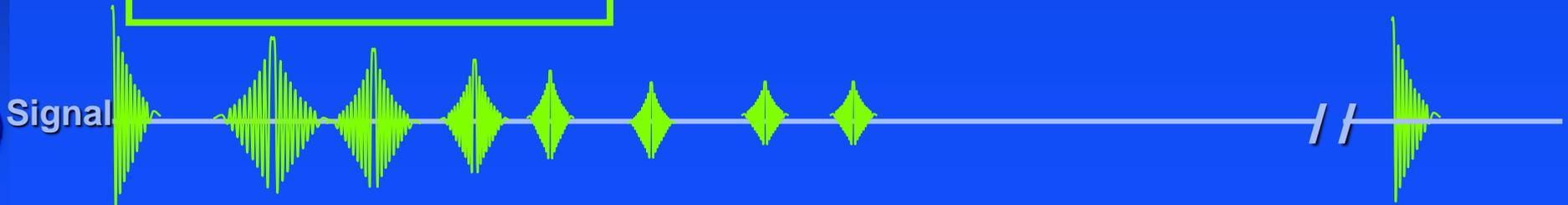


Gradients de codage en phase :

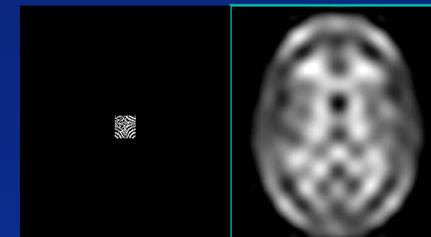
Faibles puis Forts



Pondération T1



Écho de spin rapide



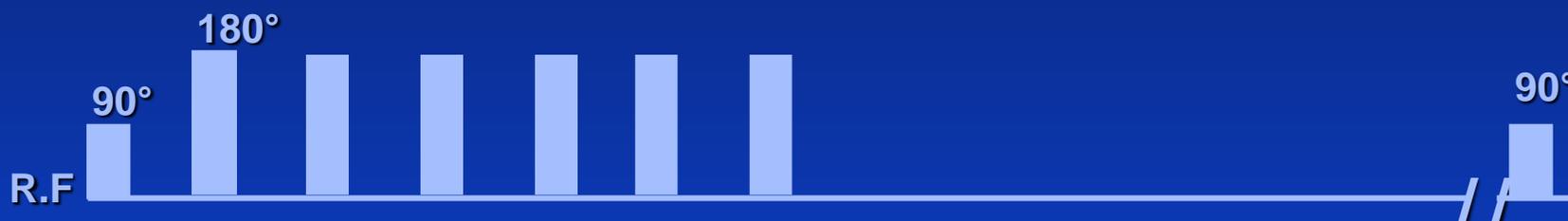
Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

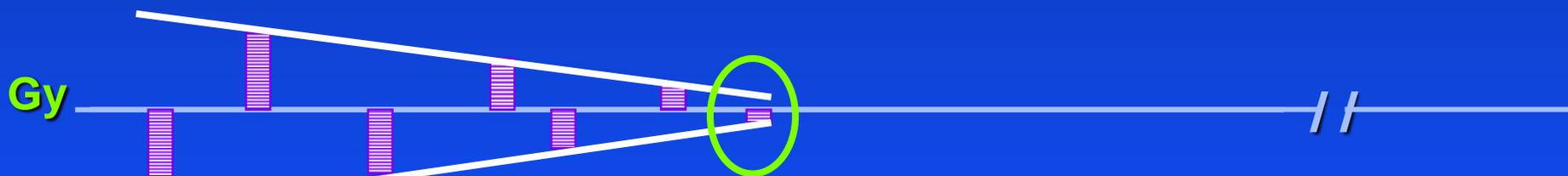
Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

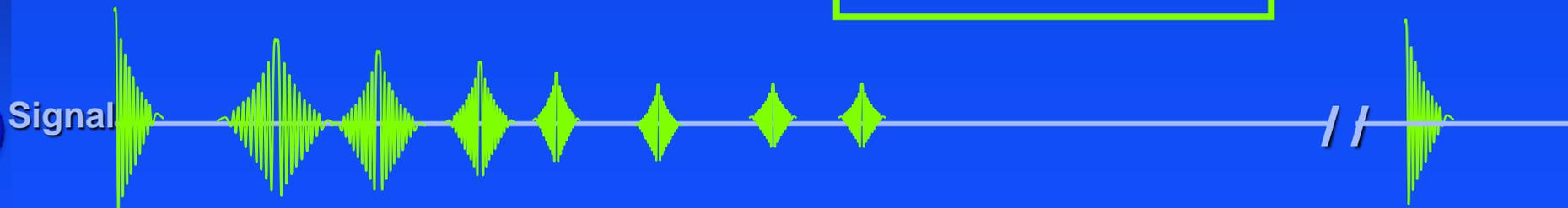


Gradients de codage en phase :

Forts puis Faibles



Pondération T2



Écho de spin rapide

- ✓ TR plus long qu'en Spin écho classique : ne donne pas la pondération...
- ✓ Toujours un effet T2 dans la séquence

Augmentation du train d'écho	effet
Pondération T2	augmente
Rapport S/B	diminue
Temps d'acquisition	diminue

- ✓ Accès aux matrices élevées (512 ou 1024)
- ✓ Persistance du signal de la graisse en pondération T2

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

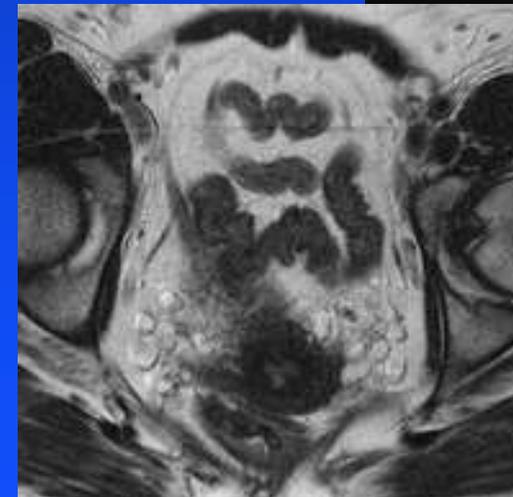
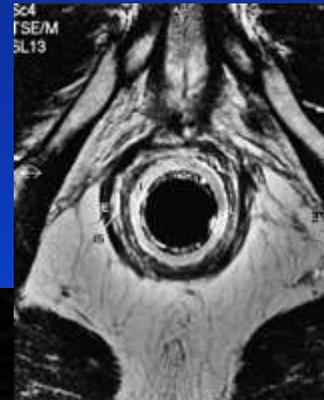
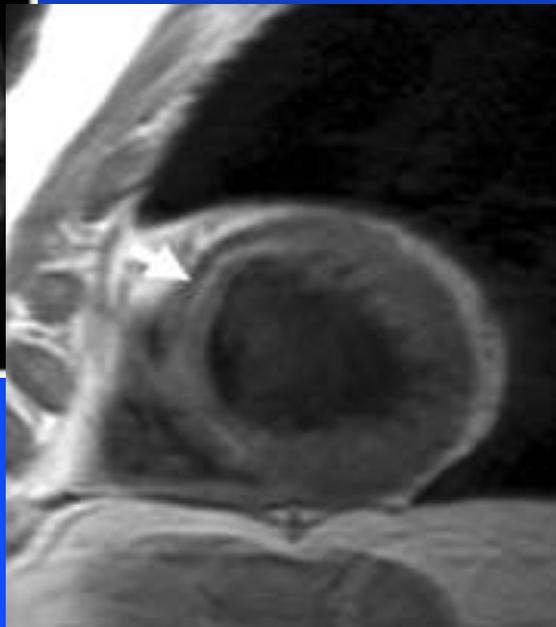
Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Écho de spin rapide

Applications

✓ imagerie de « tous les jours »



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Echo de spin ultra-rapide :

lire la quasi totalité des lignes après une impulsion 180°

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

	Philips	Siemens	GE	Hitachi	Toshiba
ES ultra-rapide	SSH- TSE UFSE	SSTSE HASTE	SS-FSE	FSE - ADA	(Super)F ASE DIET

HASTE = Half Fourier single shot Turbo spin echo
SS = single shot, UF = ultrafast

Half-Scan : 0,6 \Rightarrow Séquence type HASTE

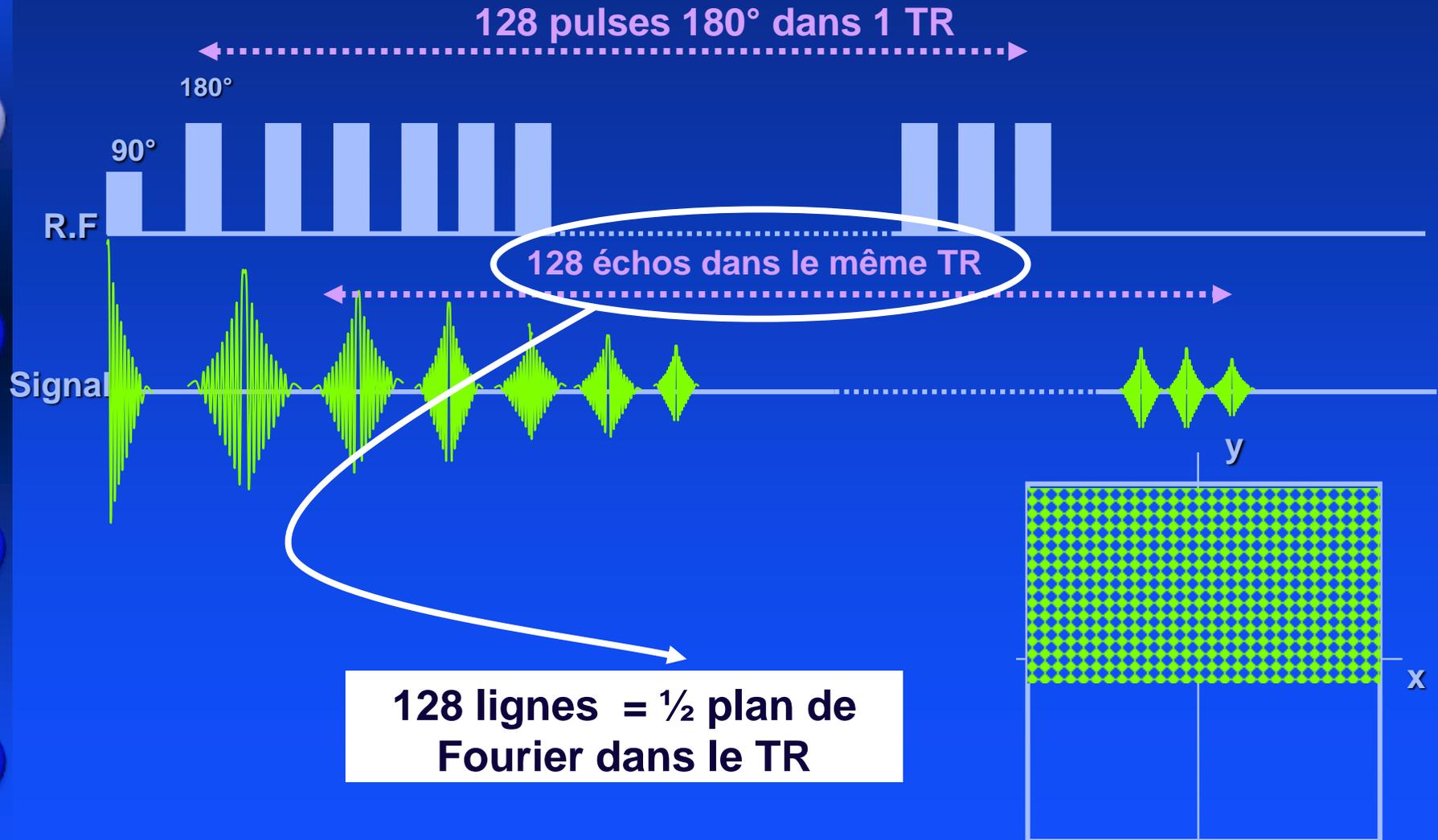
Rappels sur le plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes spécifiques

L'imagerie parallèle



128 lignes = $\frac{1}{2}$ plan de Fourier dans le TR

Half-Scan : 0,9 \Rightarrow Séquence type RARE

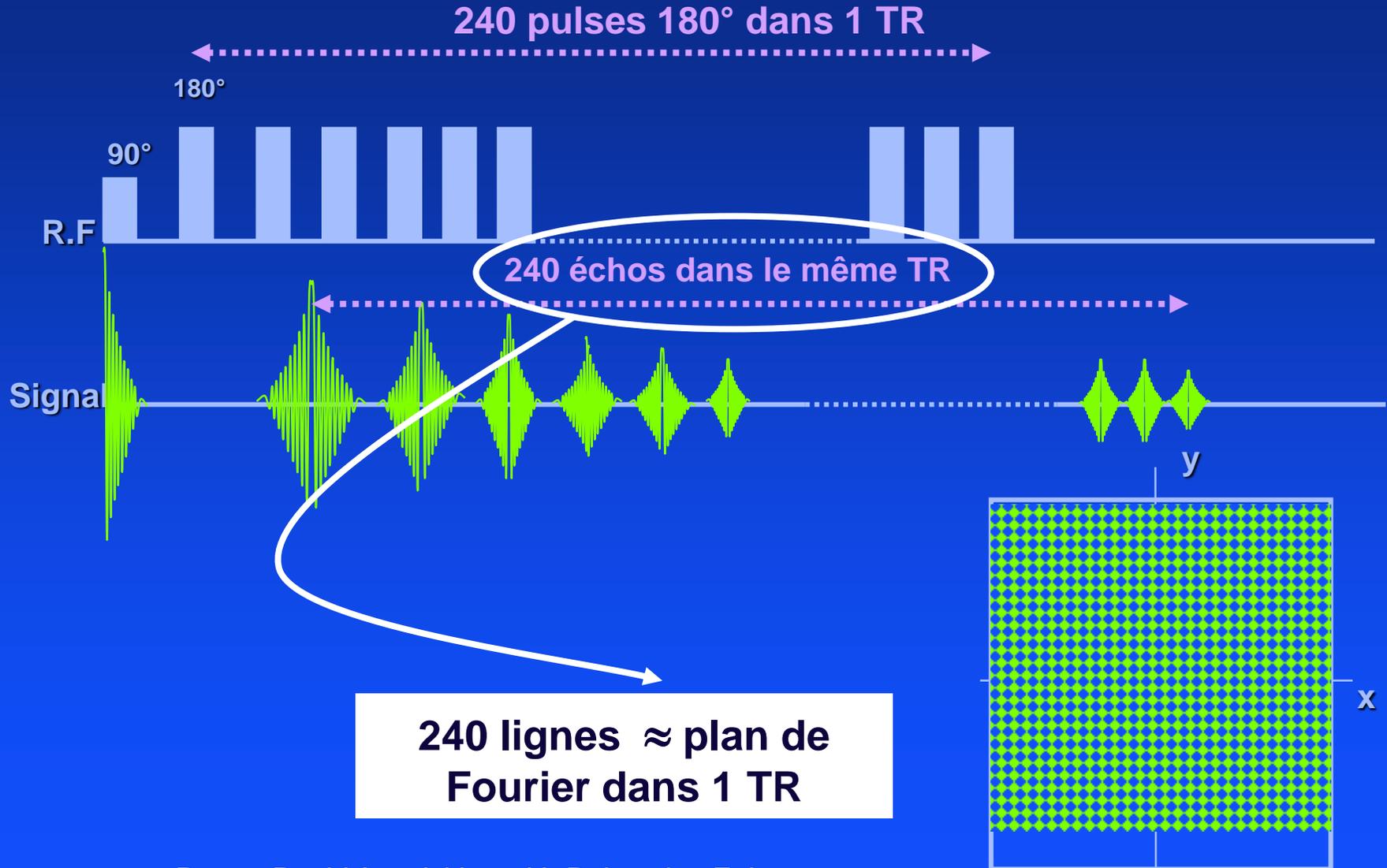
Rappels sur le plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes spécifiques

L'imagerie parallèle



Rare = Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement

Écho de spin ultra rapide

Propriétés

- ❑ Grand TE (écho tardifs) : pondération T2
- ❑ Dégradation du rapport S/B (écho tardifs)
- ❑ Applications : cholangio MR, IRM anté natal

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Écho de spin ultra rapide

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

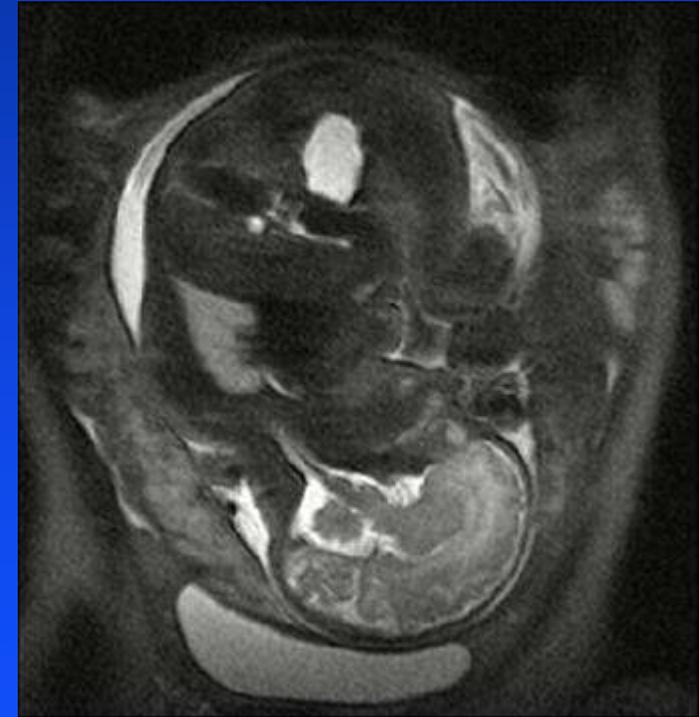
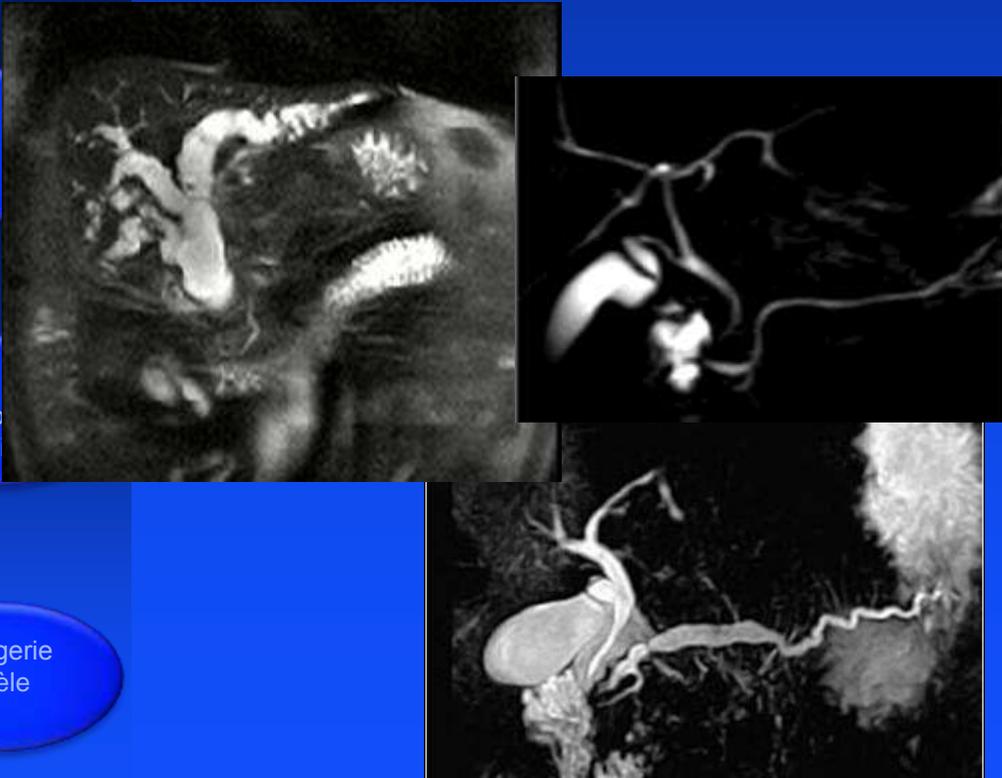
Cholangio-IRM ou Bili-IRM

IRM Obstétricale

L'EPI

Les
métho
spécif

L'imagerie
parallèle



Plan

Rappels sur le
plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Echo Planar imaging (EPI)

lire tout le plan de Fourier après une seule impulsion

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

	Philips	Siemens	GE	Hitachi	Toshiba
Echo planar - ES	SE-EPI	EPI SE	SE EPI	SE EPI	SE EPI
Echo planar - EG	FFE-EPI TFE-EPI	EPI Perf EPIFI	GRE EPI	SG-EPI	FE-EPI

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Écho

Le Premier écho est un
écho de spin



Écho planar

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



Écho planar

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



EPI « Blipped »

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

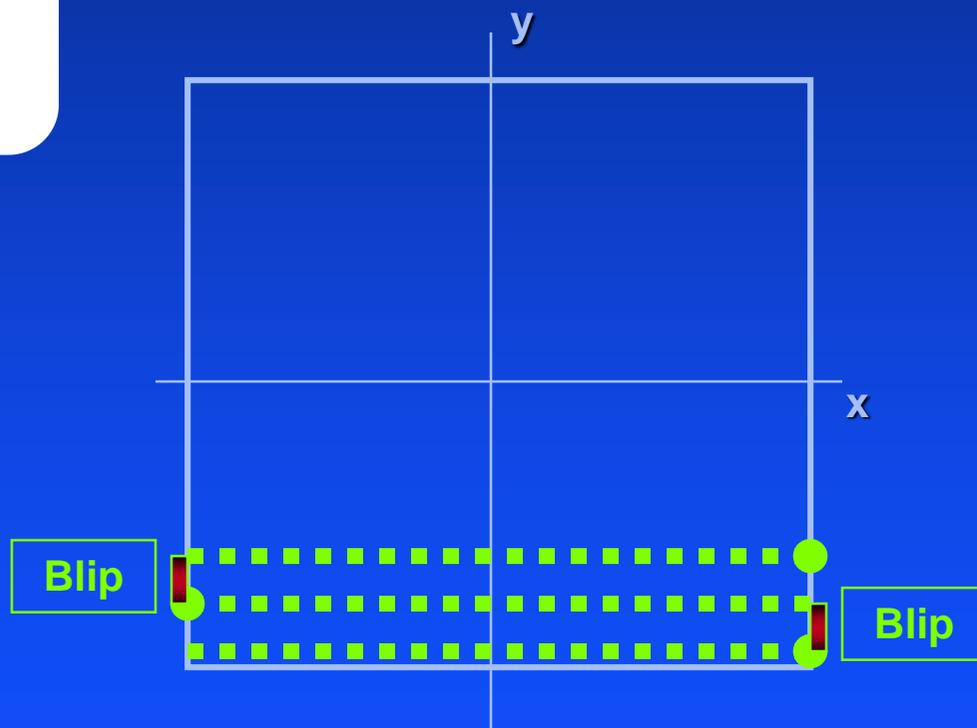
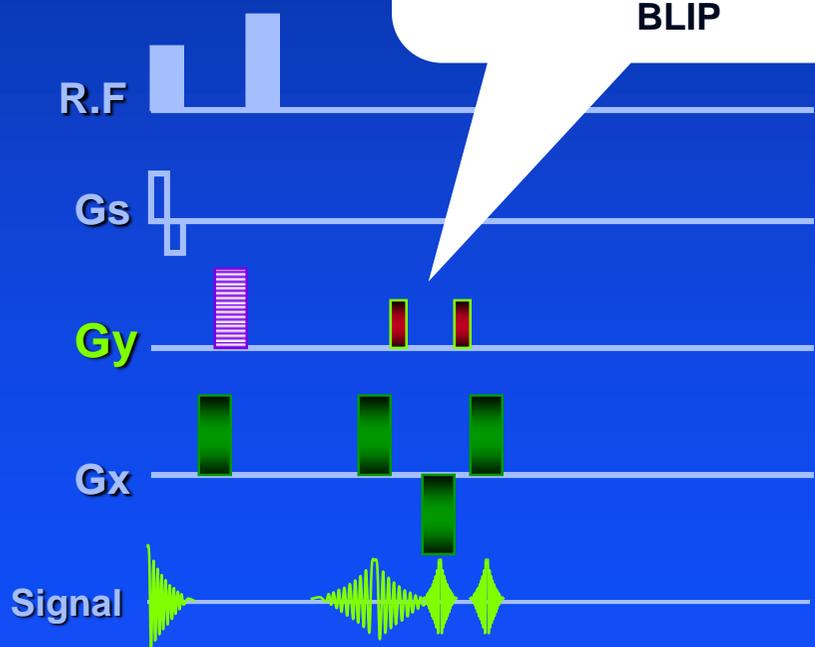
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

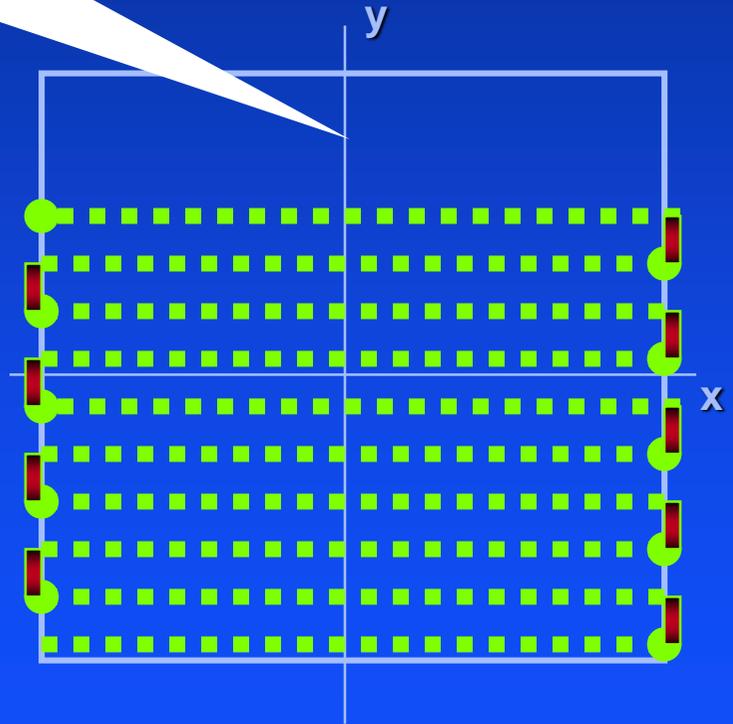
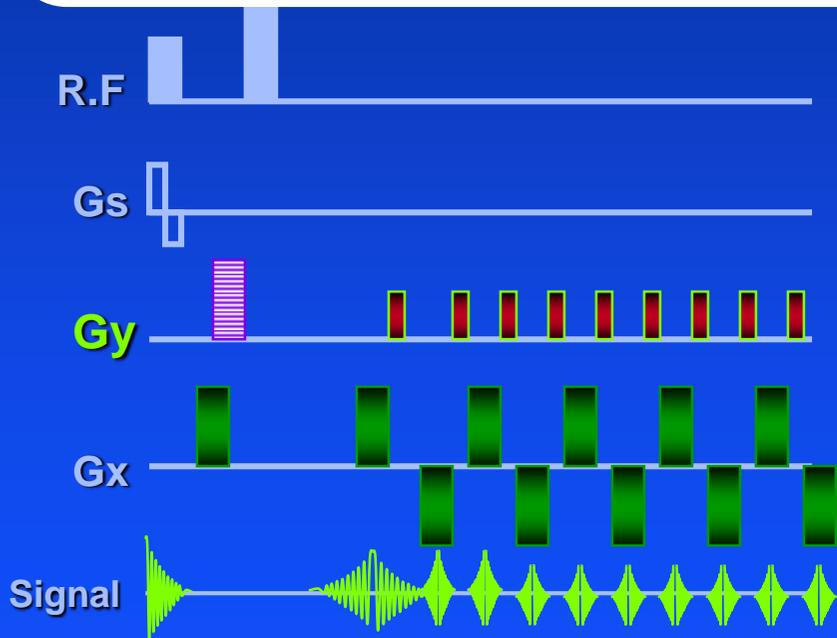
Application d'un petit
gradient de codage en
phase appelé :

BLIP



EPI « Blipped »

Remplissage de l'espace k de Fourier en un seul TR !



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

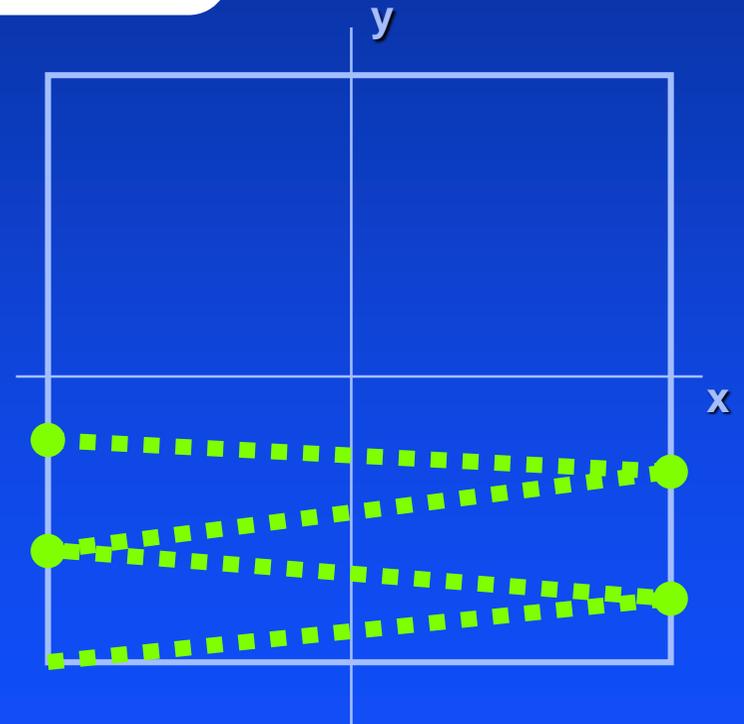
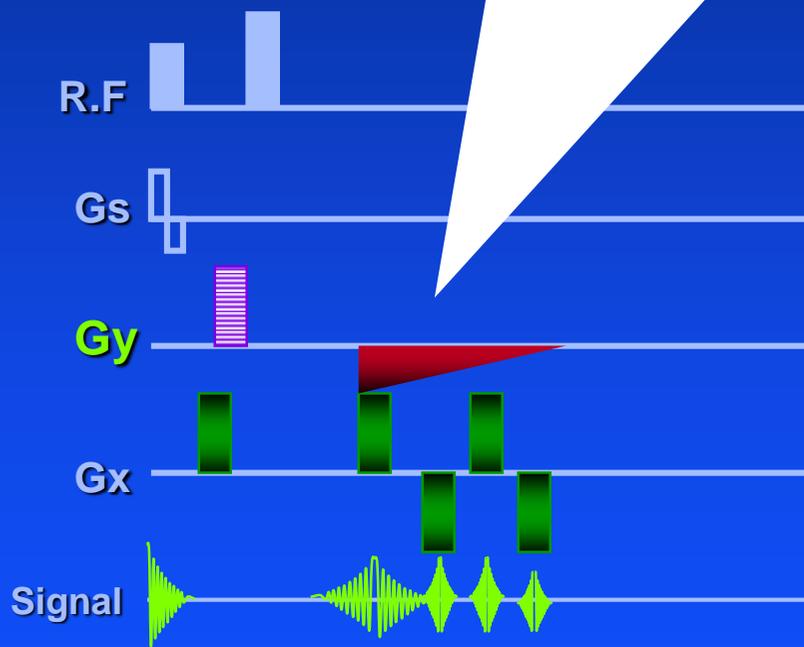
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

EPI « Mansfield »

Application d'un gradient de codage en phase de pente continue et régulière



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

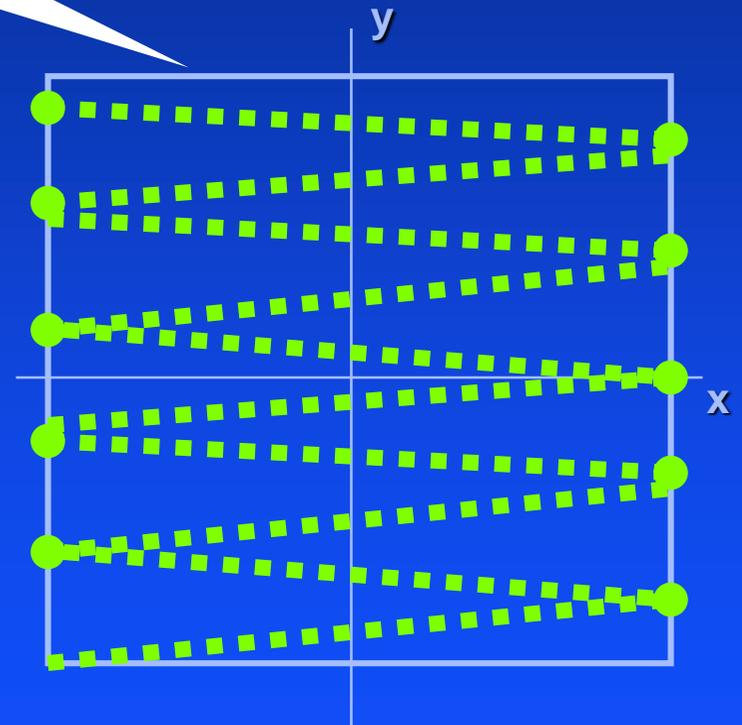
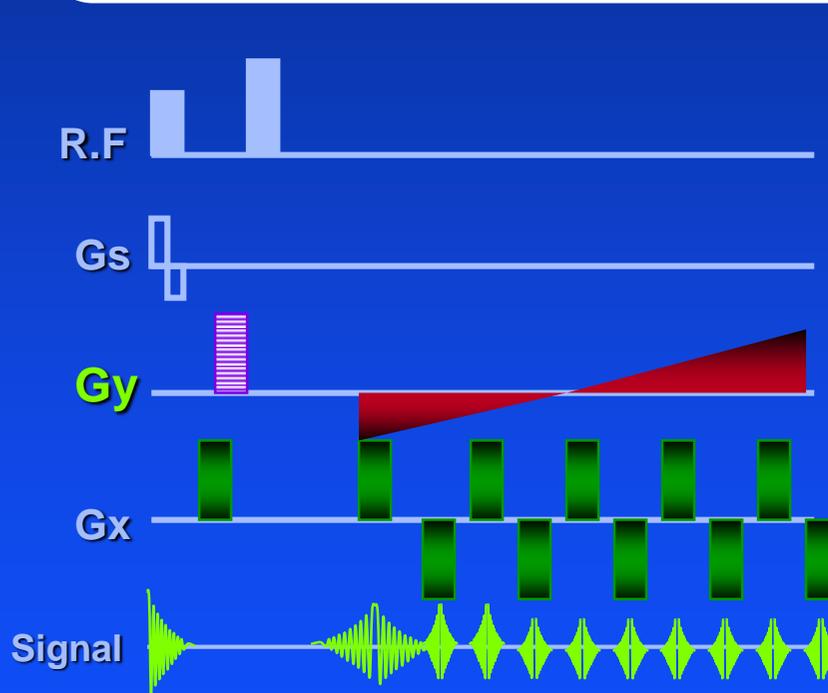
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

EPI « Mansfield »

Remplissage de l'espace k de Fourier en un seul TR !



Technique de « Lecture en dents de scie » de l'espace K

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

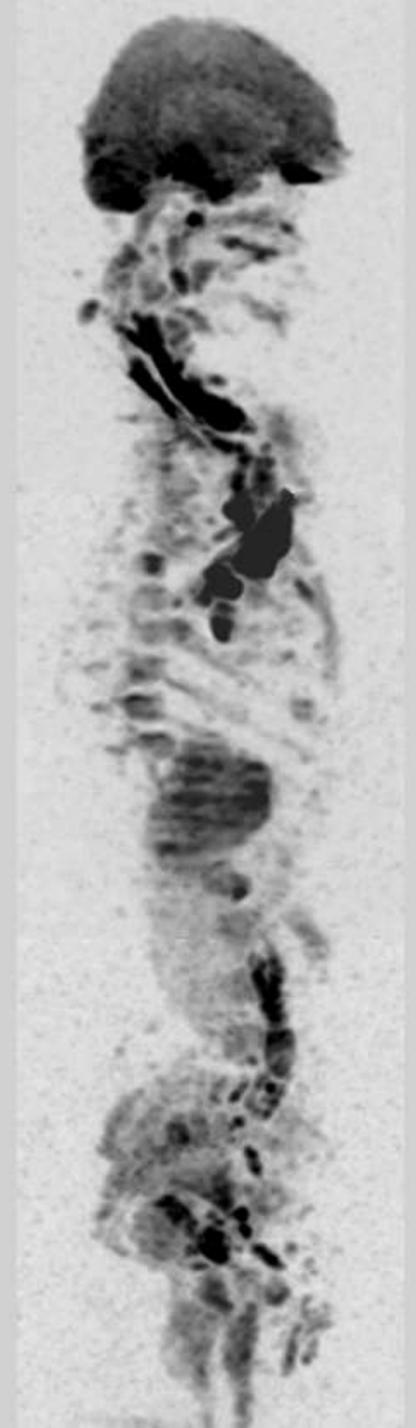
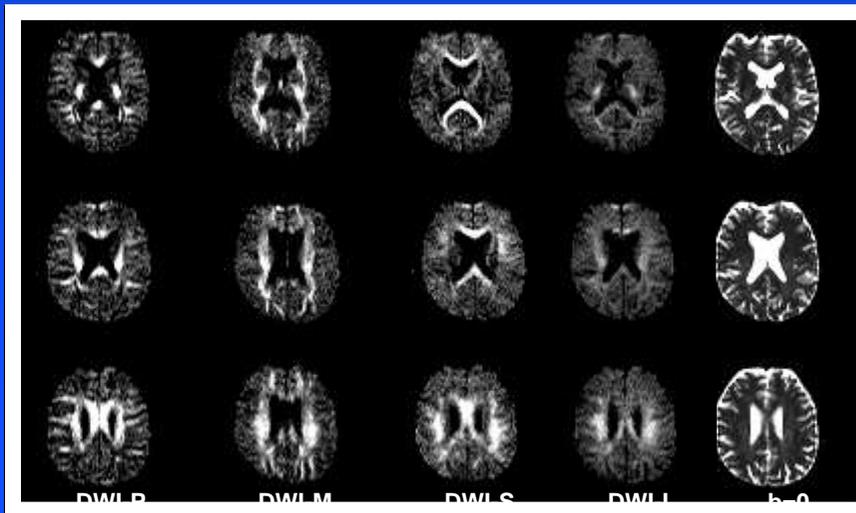
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Écho planar

- ✓ Séquence ultra rapide
- ✓ Artéfacts
 - ✓ blurring (décalage des lignes de lecture)
 - ✓ Susceptibilité magnétique
- ✓ Application : Diffusion +++



Plan

Rappels sur le
plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes
spécifiques

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

On peut également lire autrement le plan de Fourier :

- L'imagerie spirale
- L'imagerie propeler
- Les techniques de lecture asymétrique
- l'imagerie parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

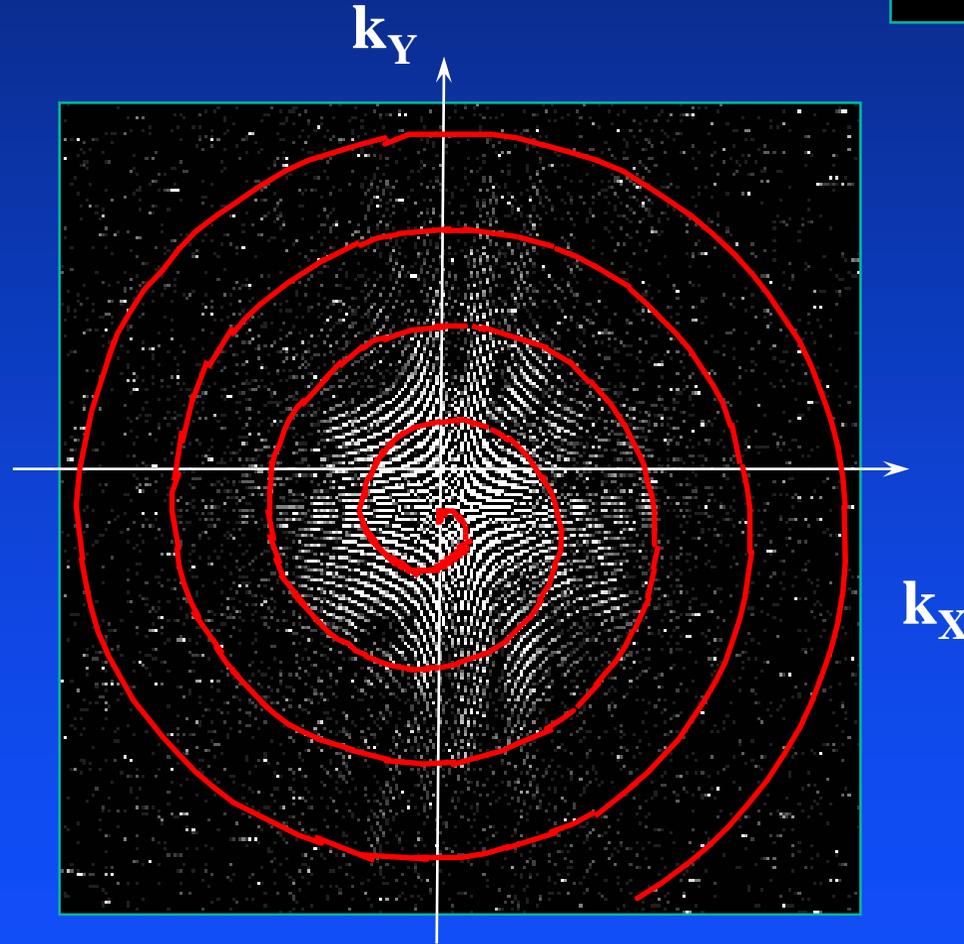
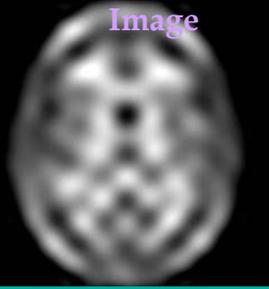
L'imagerie
parallèle

Imagerie spirale

k-space



Image



Rappels
sur le plan
de Fourier

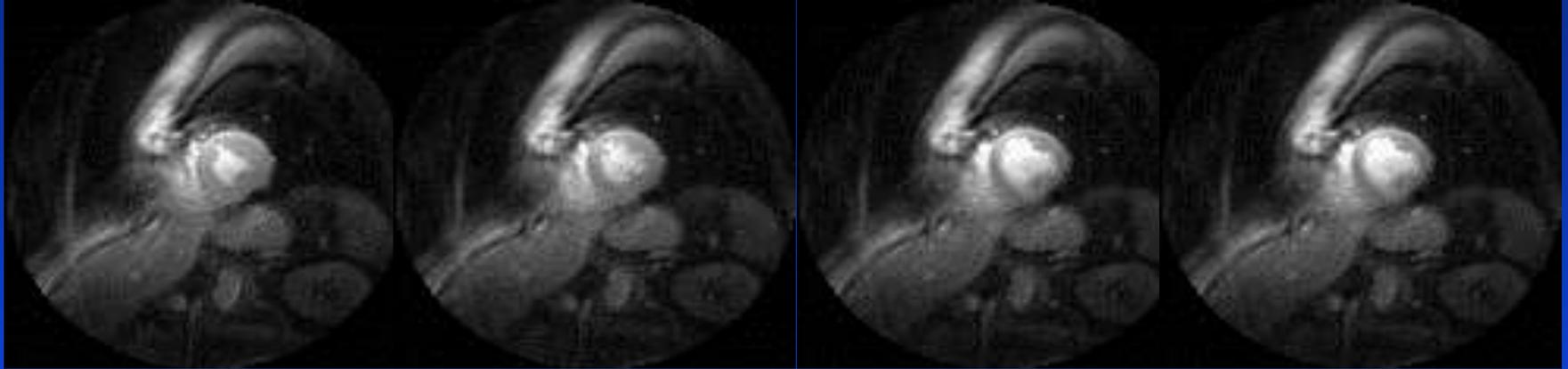
L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Imagerie spirale



Jusqu'à 100 images/sec

Application : perfusion myocardique

Imagerie "propeler" (ou Blaid)

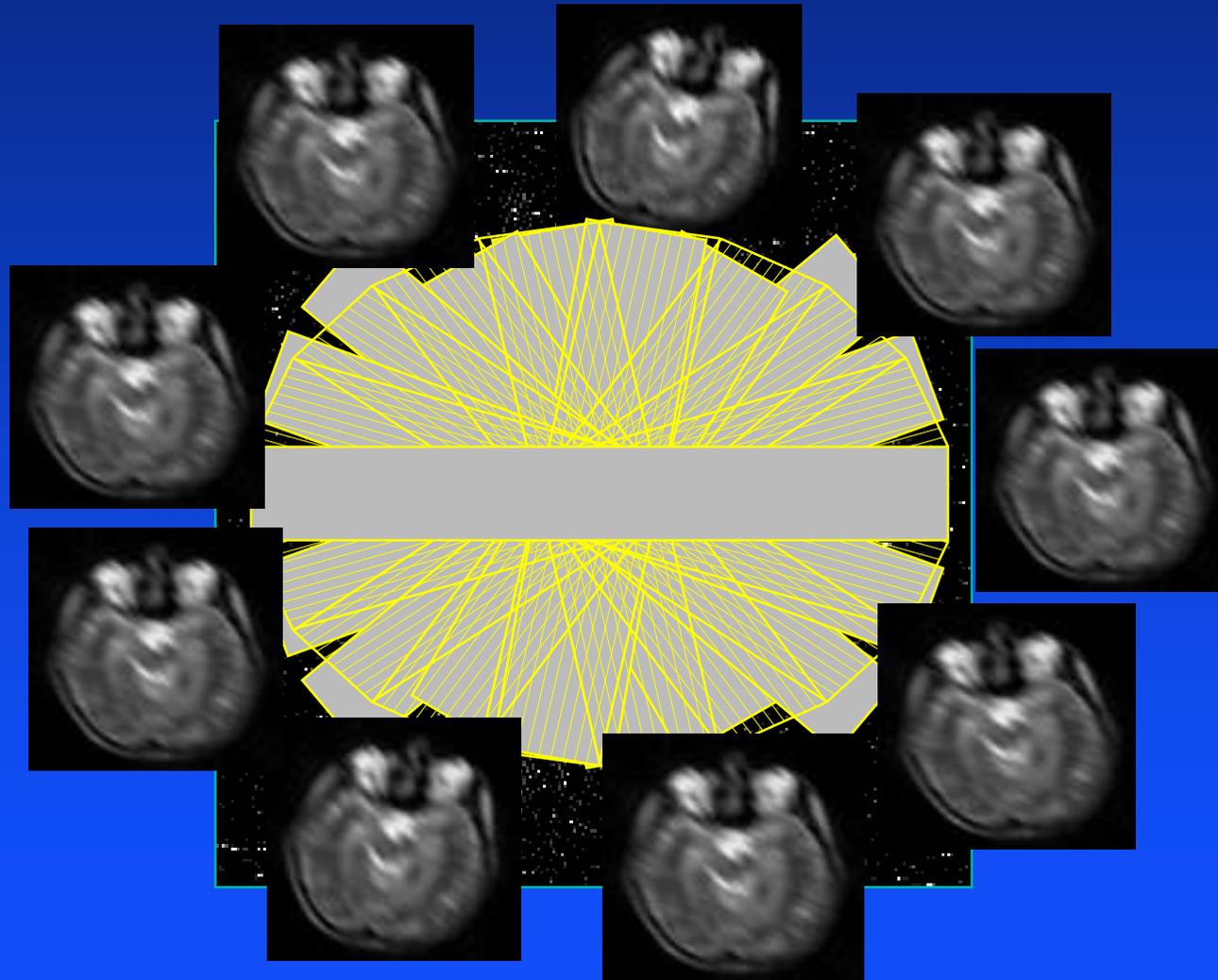
Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



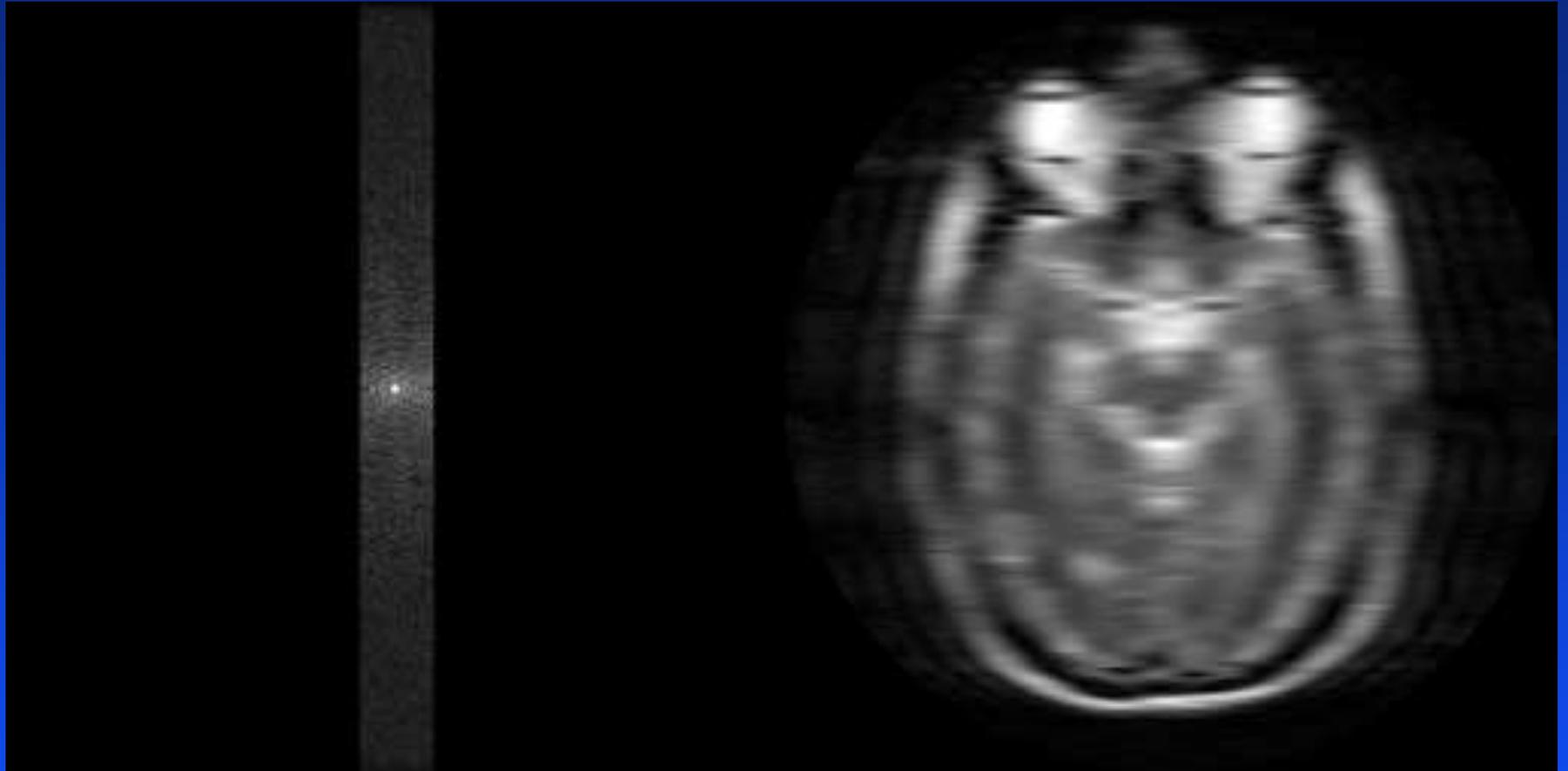
Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



Lecture renouvelée du centre du plan de Fourier

Correction du mouvement du patient (surtout cyclique)

Imagerie asymétrique

Rappels
sur le plan
de Fourier

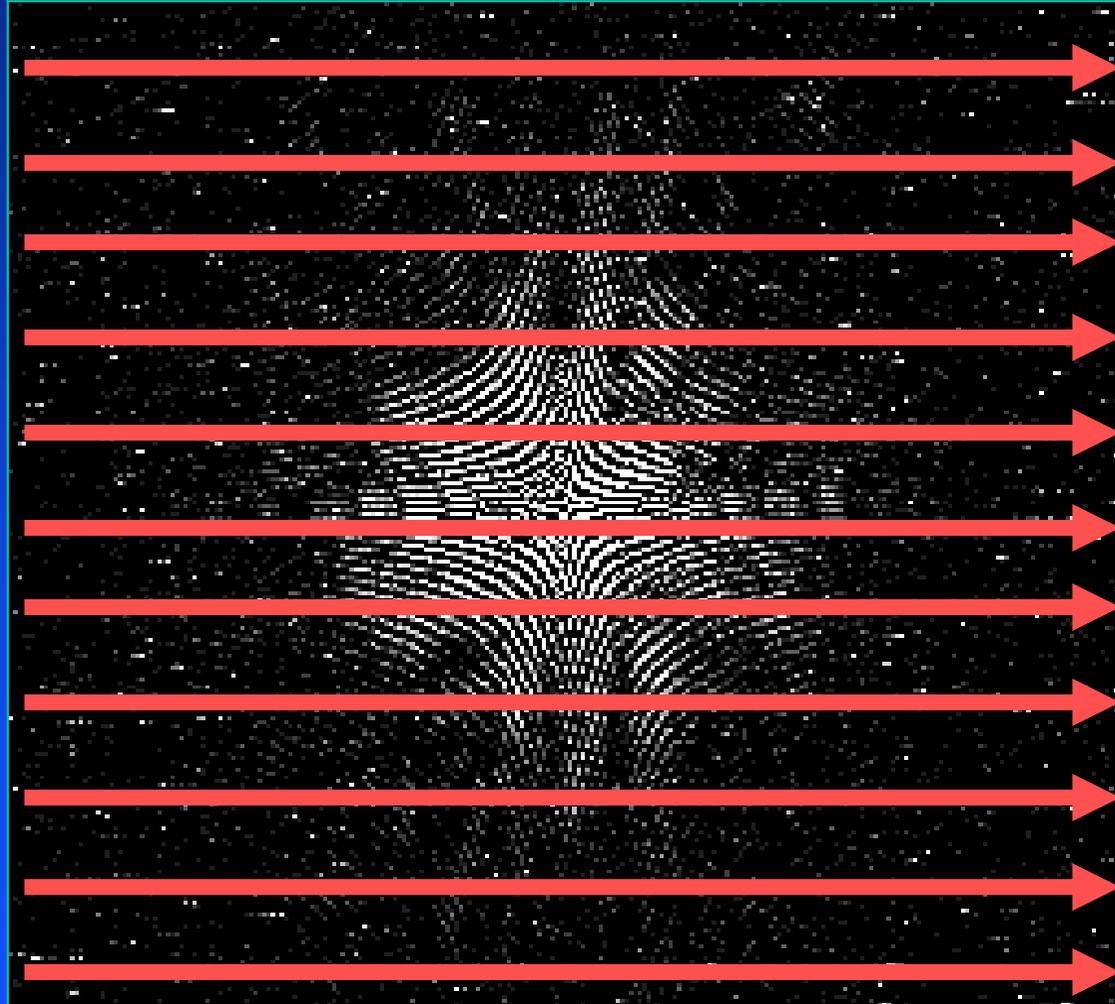
L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Kmax



Kmin

Acquisition en mode «Linear »

Imagerie asymétrique

Rappels
sur le plan
de Fourier

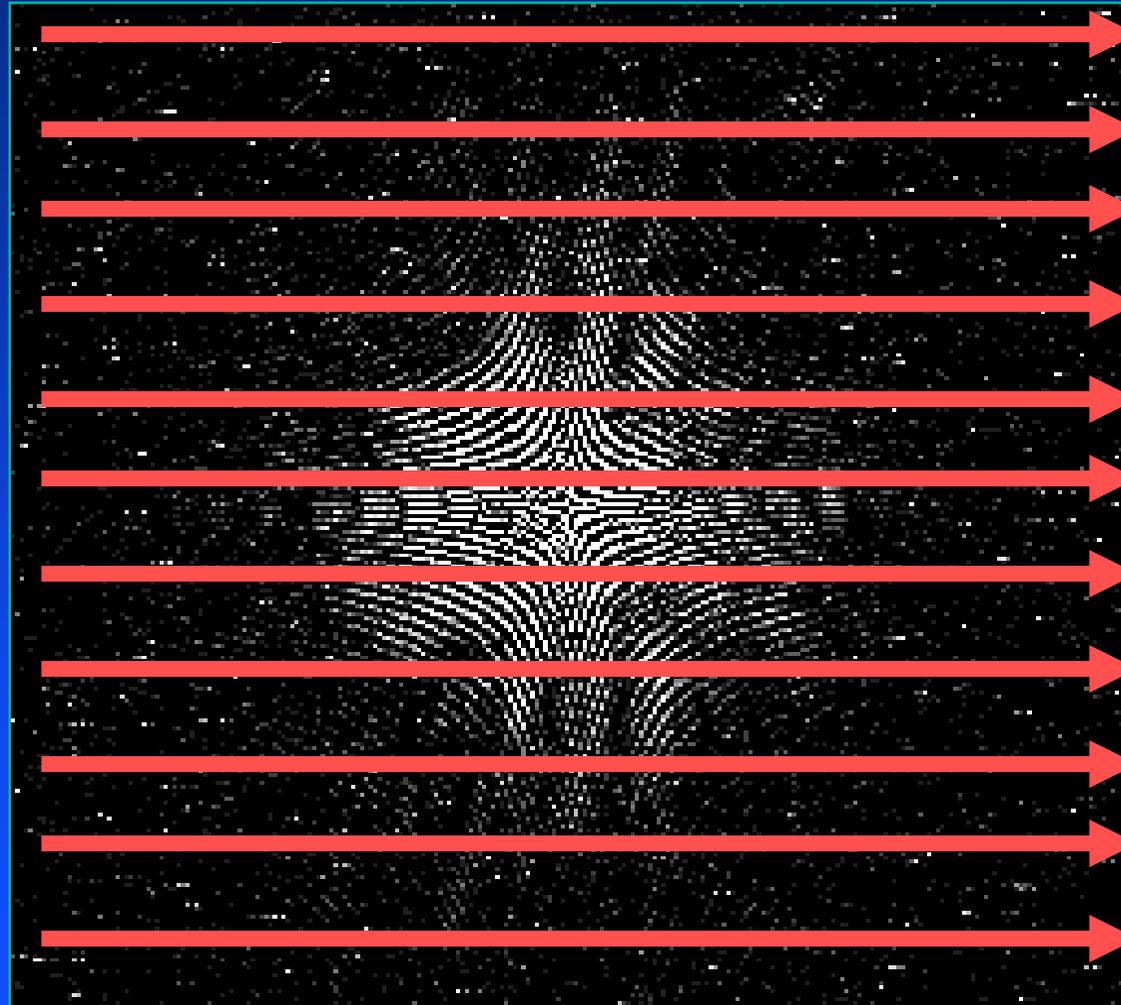
L'ES rapide

L'EPI

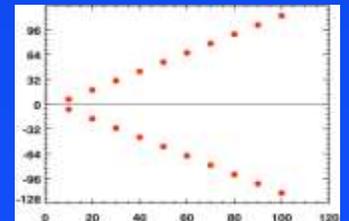
Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Kmax



Kmin



Acquisition en mode « Low-High »

Imagerie asymétrique

Rappels
sur le plan
de Fourier

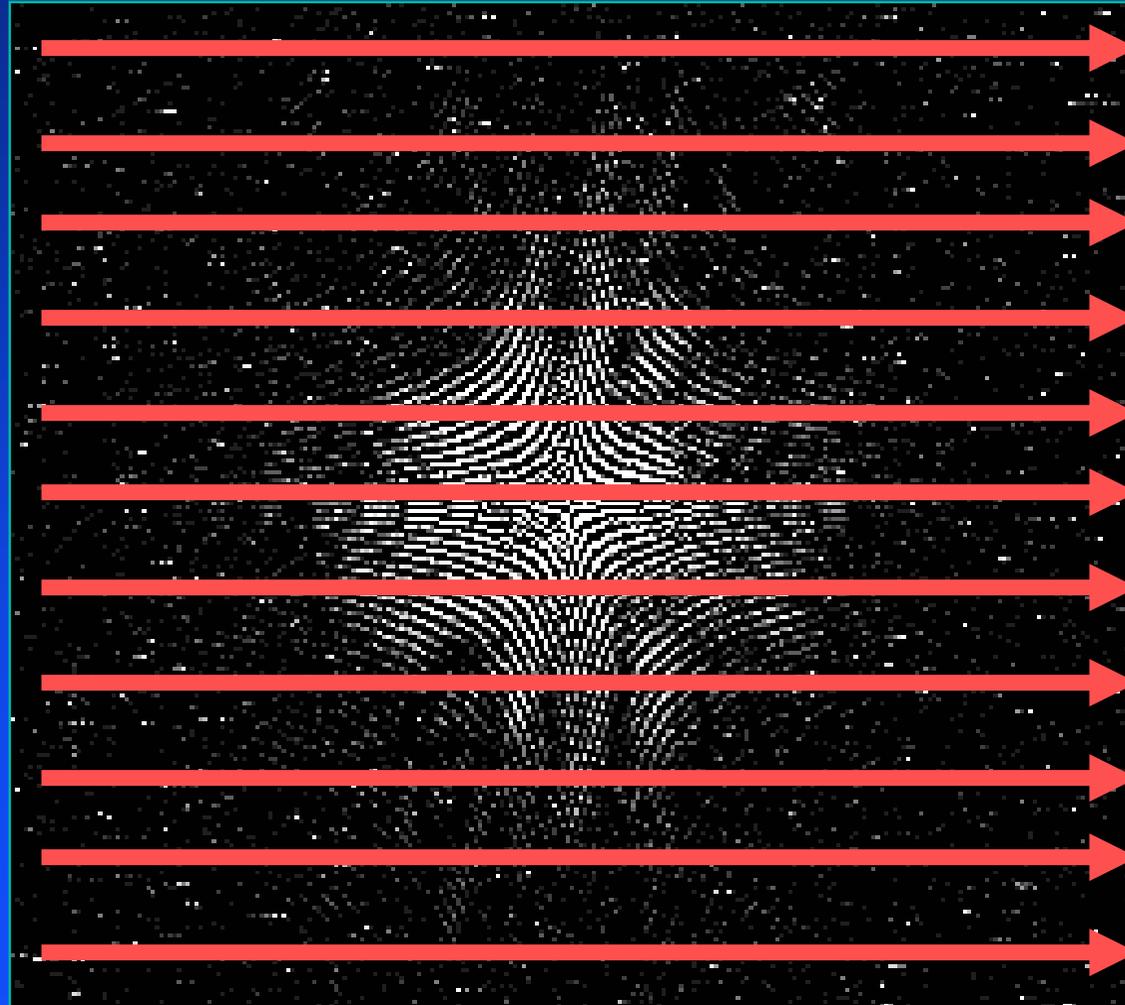
L'ES rapide

L'EPI

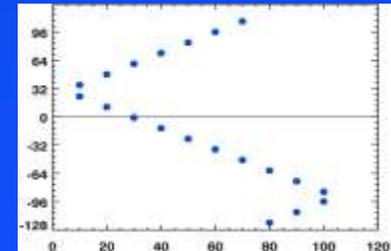
Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

K_{max}



K_{min}



Acquisition en mode « Asymmetric »

Rappels
sur le plan
de Fourier

Applications :

L'ES rapide

Avantages:

- Plus de signal que le mode linéaire
- Moins de blurring avec des shots longs

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

Applications : imagerie ostéo articulaire (imagerie du cartilage)

L'imagerie
parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

TE ultra court (UTE: ultrashort TE)

TE	Durée (ms)	Exemples
Très long	200	HASTE, EPI, FSE T2
Long	20-200	HASTE, FSE T2, EPI
Intermédiaire	5- 20	Séquence T1, DP
Court	0,5-5	Séquence T1
Ultracourt	0,05-0,5	Short T2

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

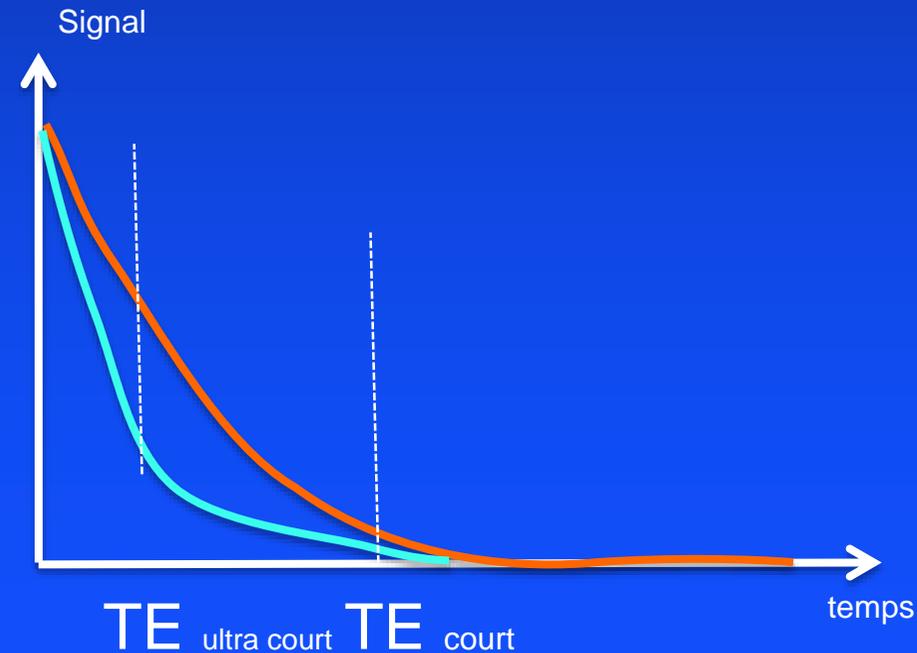
Avec un TE ultra court (UTE: ultrashort TE)

■ Sur le plan technique

- ◆ Demi RF ($10\mu\text{s}$)
- ◆ Gradients puissants (40 mT/m , ou plus...)

■ T2 de tissus

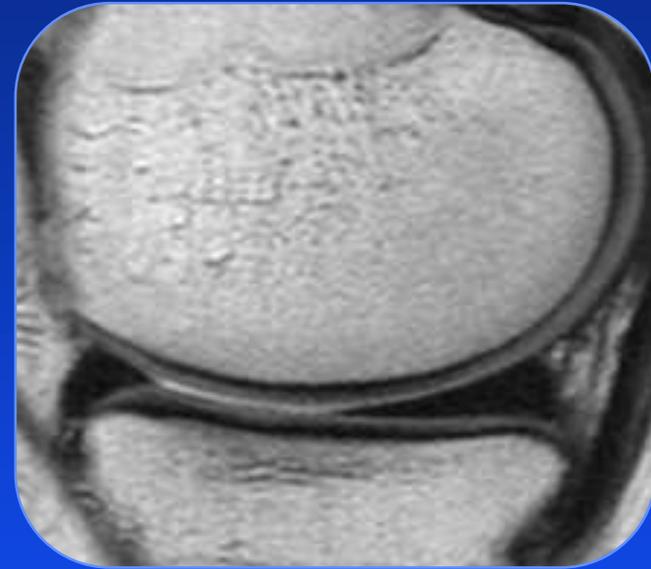
- ◆ Ligaments 4-10ms
- ◆ Tendon d'Achille ; 0,25 ms
- ◆ Ménisques ; 5-8ms
- ◆ Périoste ; 5-11ms



Asymmetric TSE (1.5 T)



TR/TE 3000/30 Linear
Sc 4:54



Asymmetric
Sc 3:25

Asymmetric:
Renforcement du contour du cartilage
Signal liquidien renforcé

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Un cas particulier - le mode silent

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

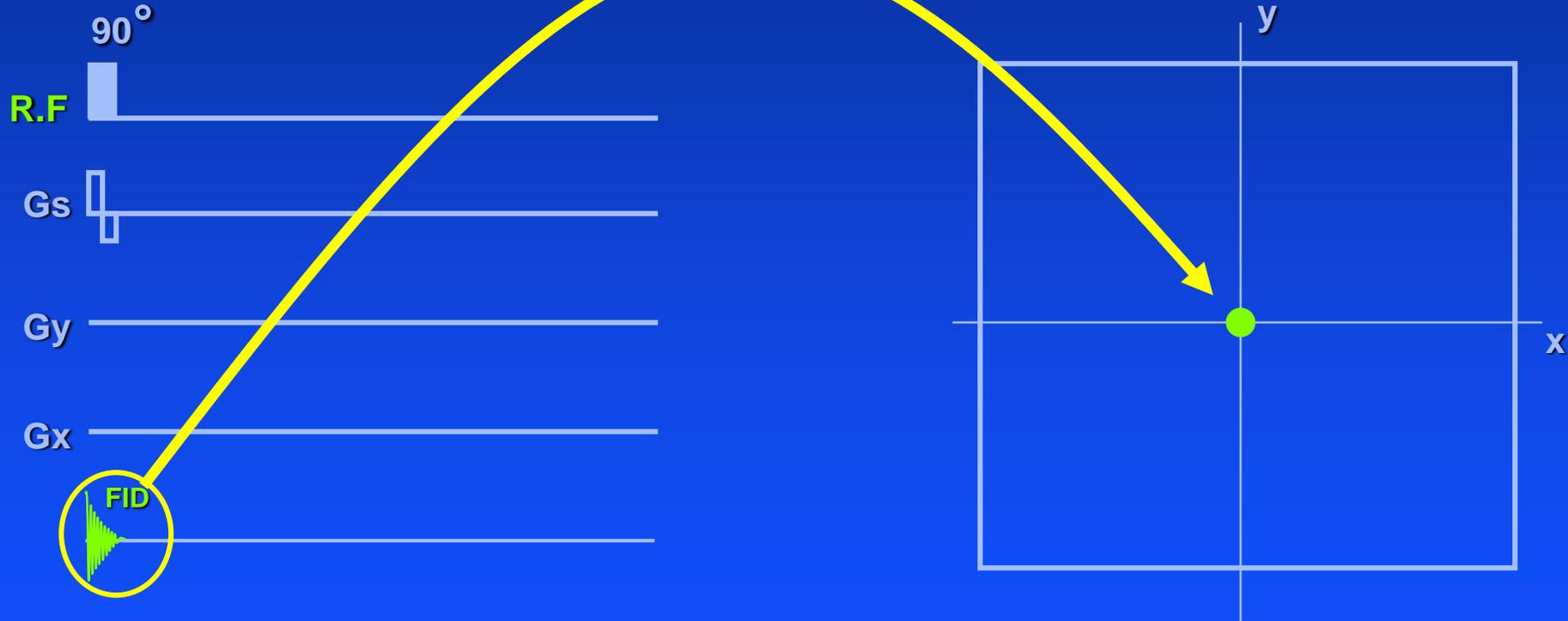
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

L'imagerie de la première bascule

Apparition du signal



Ce signal décroît très vite mais est mesurable...

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'imagerie de la première bascule

Peu de signal = acquisition 3D

Gradients moins sollicités : moins de bruits ; 75 dB versus 100 dB ou plus)
Nom commercial;

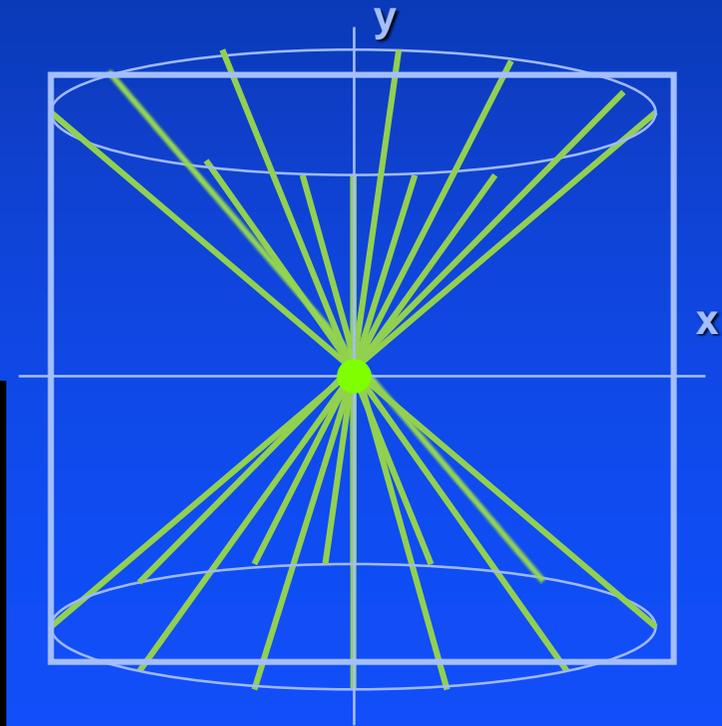
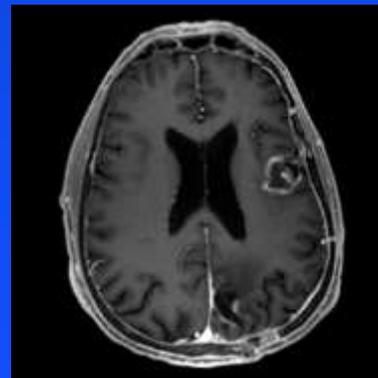
Silent (GE Heath care)
QUIET (Siemens Heath care)

Applications ; T1 3D neuro par exemple

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



Plan

Rappels sur le
plan de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

L'imagerie parallèle

Acquérir plus d'informations

	Philips	Siemens	GE	Hitachi	Toshiba
Imagerie parallèle	Sense	Sense	Asset	Sense	Sense

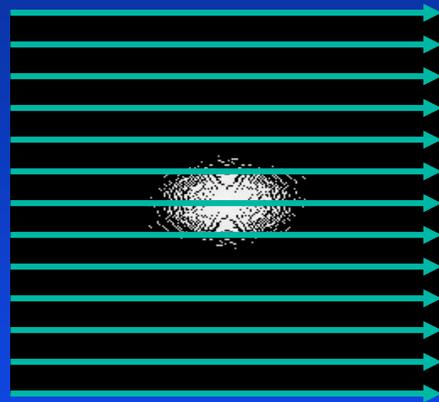
Sense = SENSitivity Encoding

Asset = Area Spatial Sensitivity Encoding Technique

PAT = Parallel Acquisition Technique

Principes de l'imagerie parallèle

■ Imagerie conventionnelle



Espace K



Espace image

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

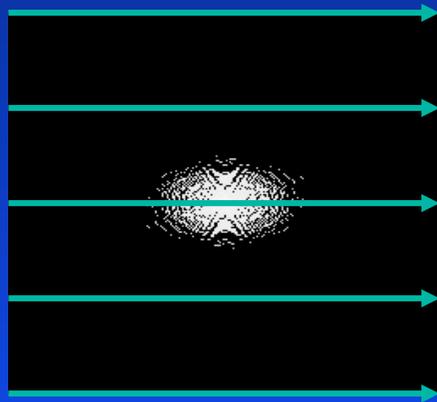
Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



Sous-échantillonnage
de l'espace K

TF



reconstruction



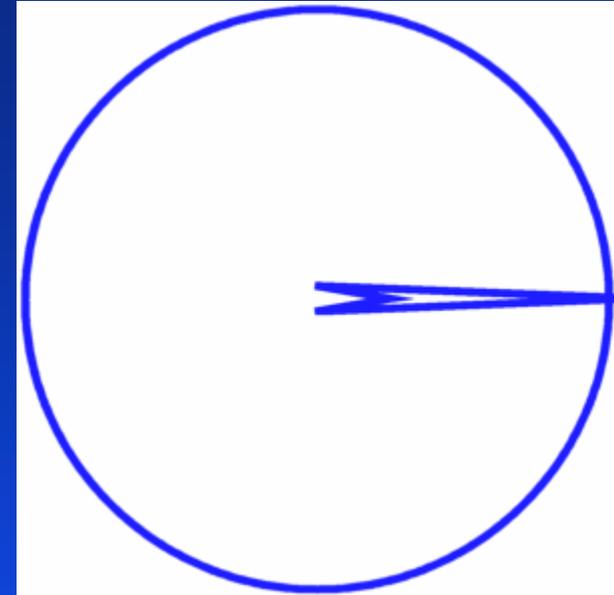
Repliement
Chute du S/B



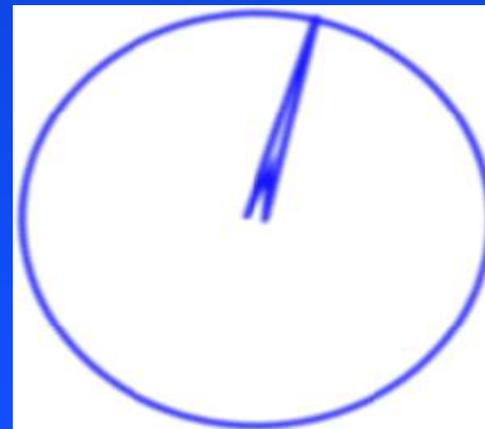
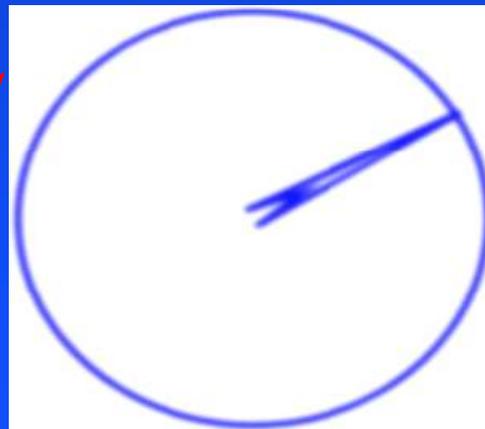
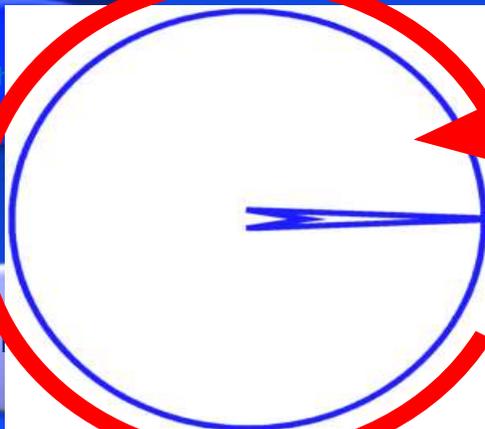
Principes de l'imagerie parallèle

■ Pourquoi un repliement ?

Visualisation
(fréquence élevée)



Sous-échantillonnage



...

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

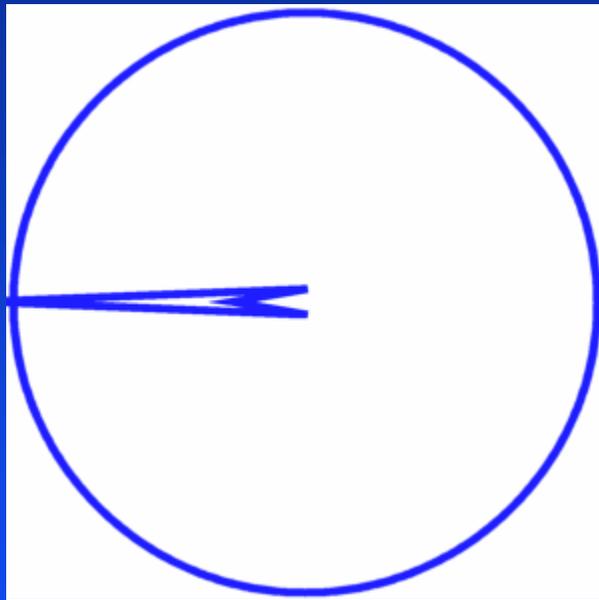
L'EPI

Les
méthodes
spé

L'im
par

Principes de l'imagerie parallèle

■ Pourquoi un repliement ?



Sous-échantillonnage



Repliement

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

■ Pourquoi moins de signal ?



Sous-échantillonnage
de l'espace K

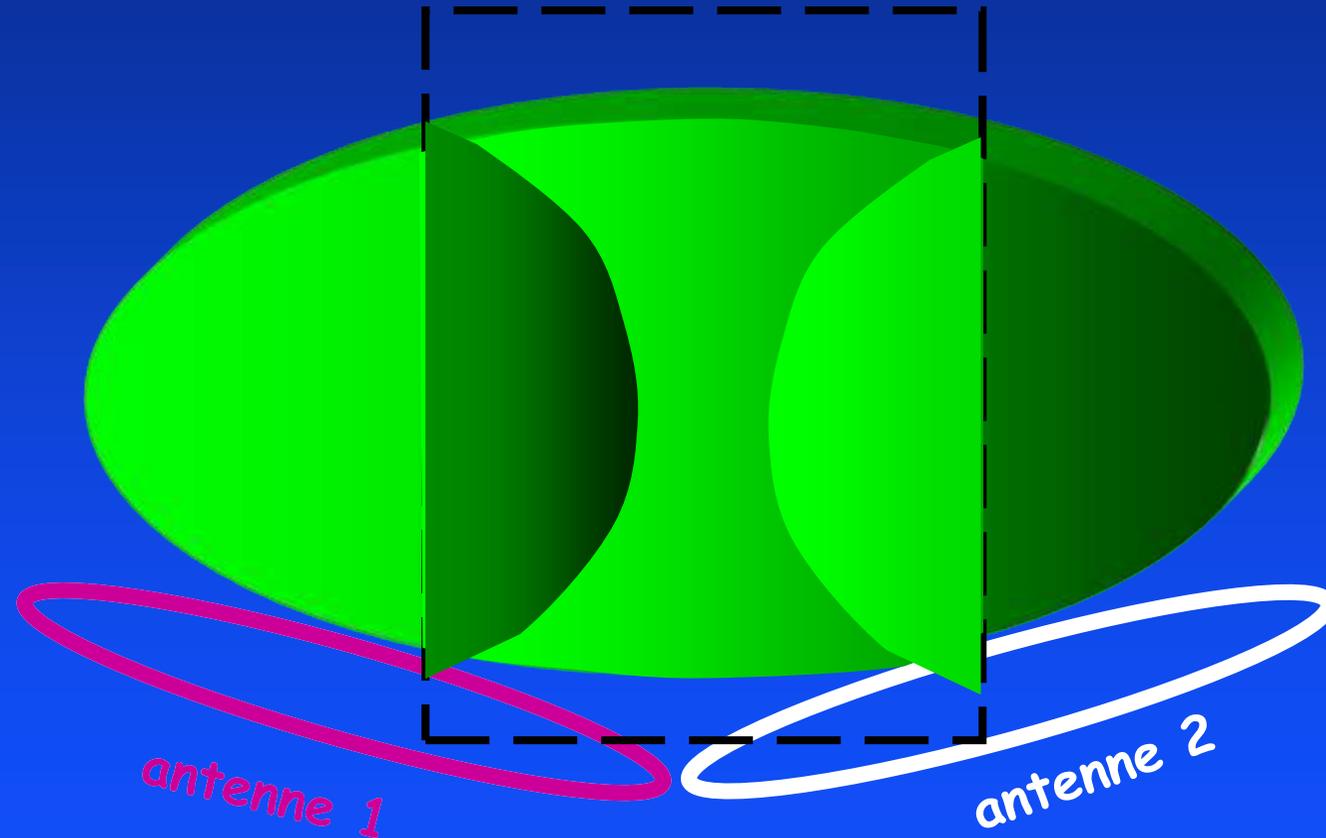


3 fois moins de lignes ($R=3$, facteur d'accélération)

$$S / B \approx \frac{S / B_{normal}}{g \sqrt{R}}$$

Principes de l'imagerie parallèle

- Avec deux antennes ;



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

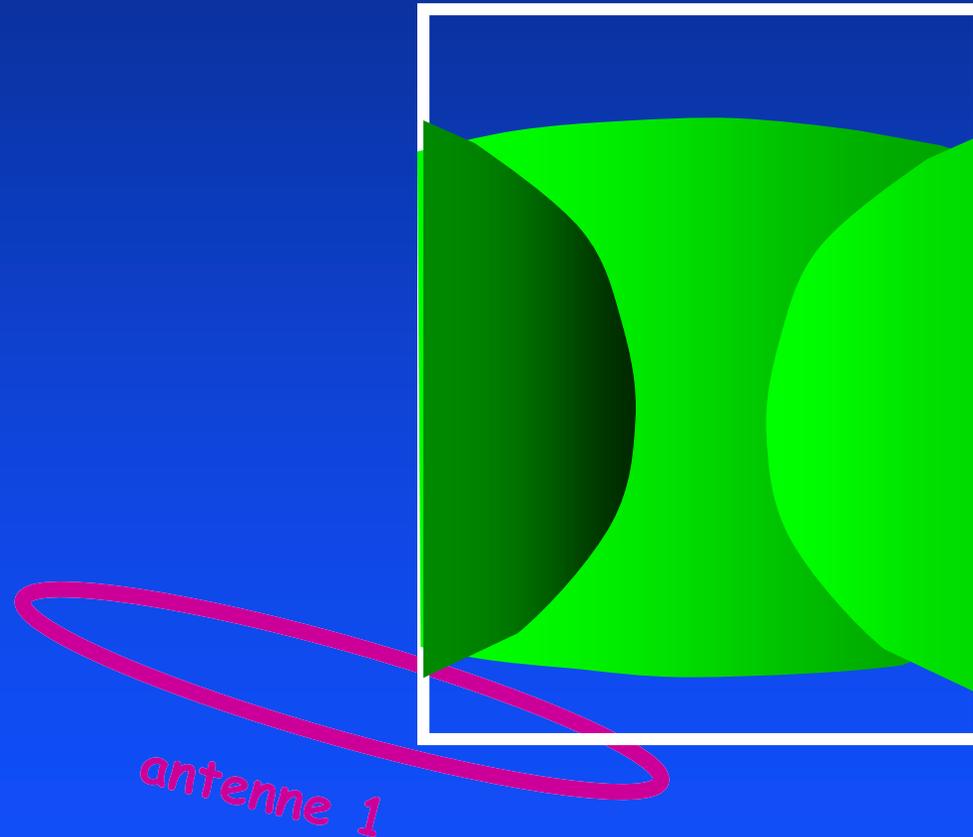
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

- Avec deux antennes ;



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

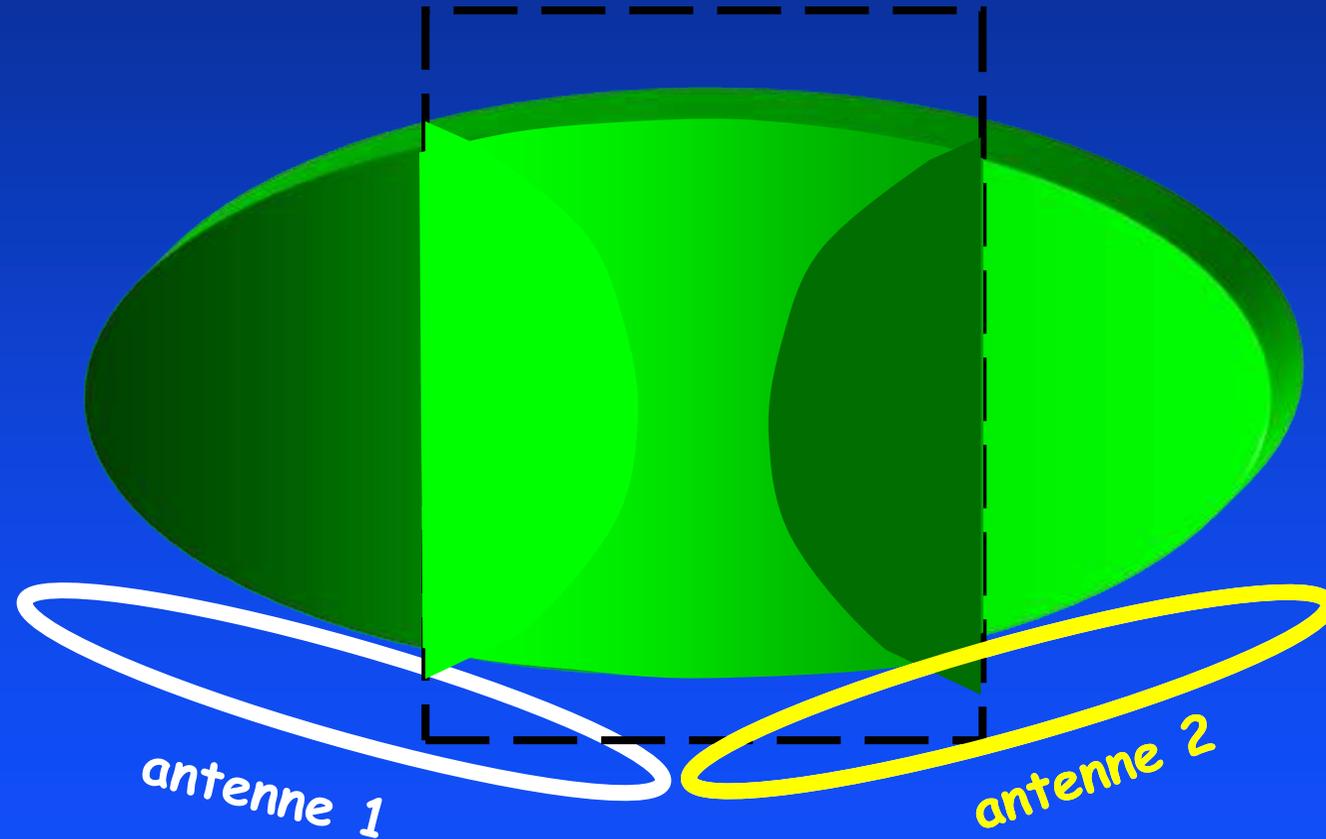
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

- Avec deux antennes ;



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

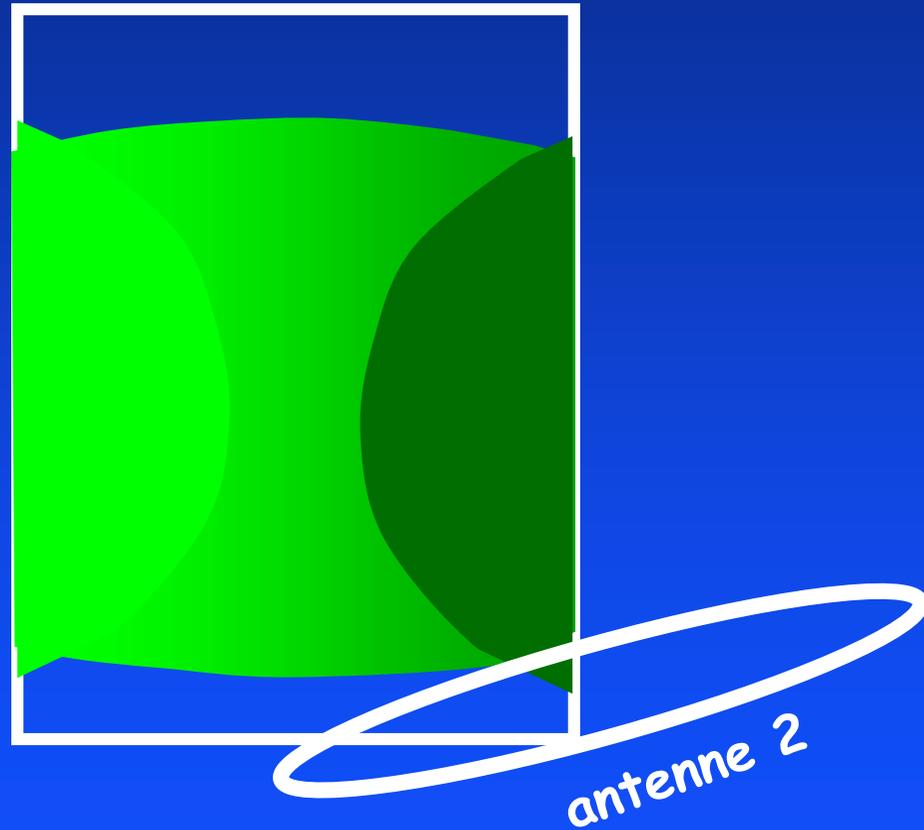
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

- Avec deux antennes ;



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

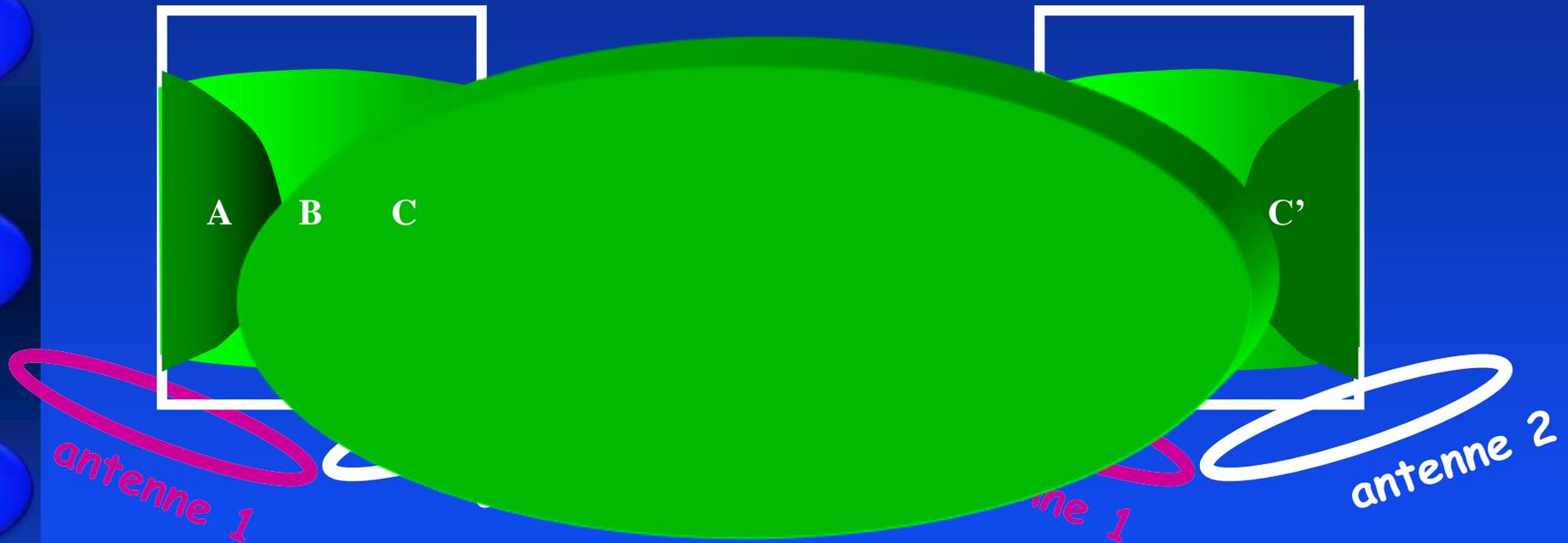
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

■ Pour résumer ;



A : signal replié faible + signal non replié

B : signal non replié

C : signal replié fort + signal non replié

A' : signal replié fort + signal non replié

B' : signal non replié

C' : signal replié faible + signal non replié

→ **n équation à n inconnues**

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Antenne tête à 8 canaux

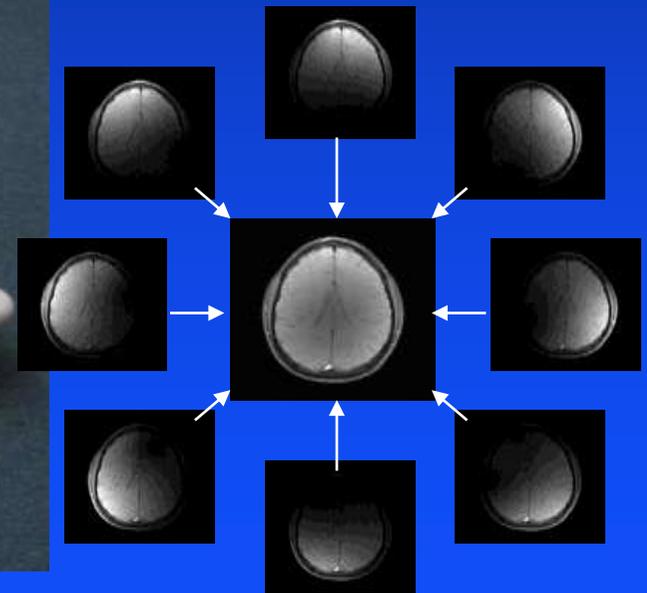
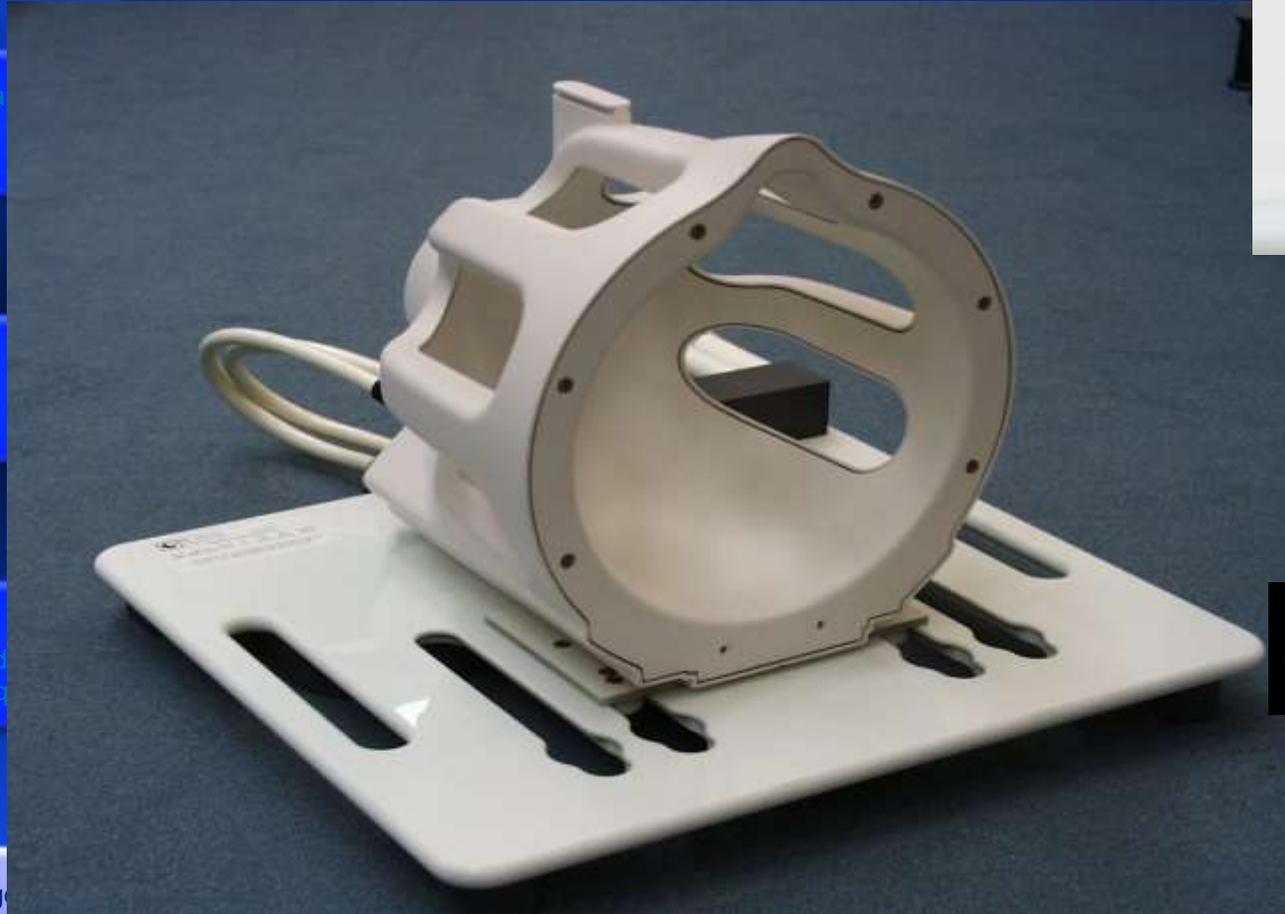
Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES ra

L'EPI

Les
méthod
spécifi

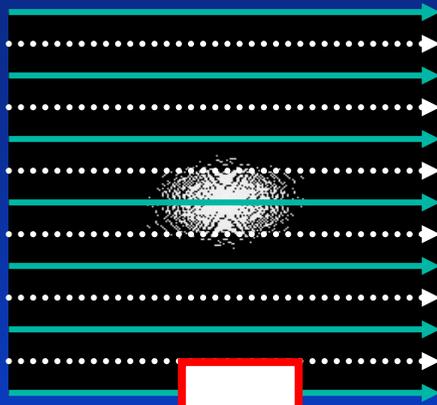
L'imag
parallèle



Antenne tête de MRI Devices Corp.

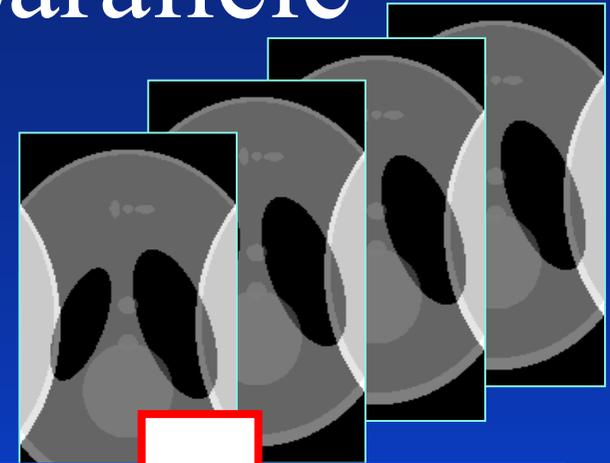
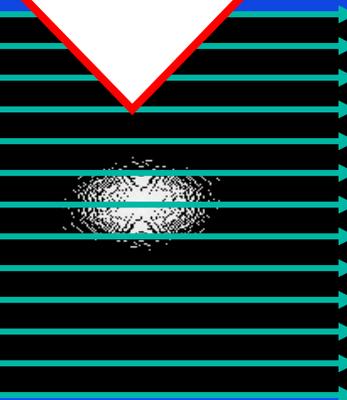
Principes de l'imagerie parallèle

Acquisition:



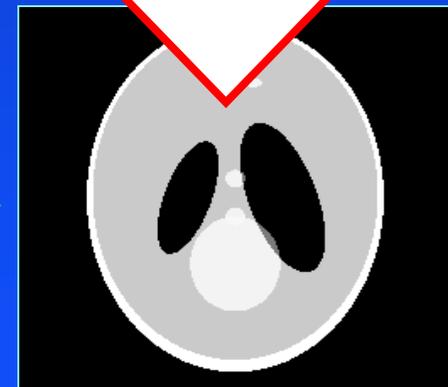
Espace sous-échantillonné

SMASH



Images repliement

SENSE



SMASH = simultaneous acquisition of spatial harmonics

Rappels sur le plan

L'ES rap

L'EPI

Les méthodes spécifiques

L'imagerie parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

■ Résumé :

- ◆ Antennes superficielles en réseau (« phase array »)
- ◆ Calcul de l'algorithme de dépliement
 - ☞ Séquence de calibration : SENSE, SMASH (pour
 - ☞ Auto calibration pendant l'acquisition : GRAPPA (pour Generalized Autocalibrating Partially Parallel Acquisitions)
- ◆ Facteur d'accélération : x 2...

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

Principes de l'imagerie parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

■ Avantages :

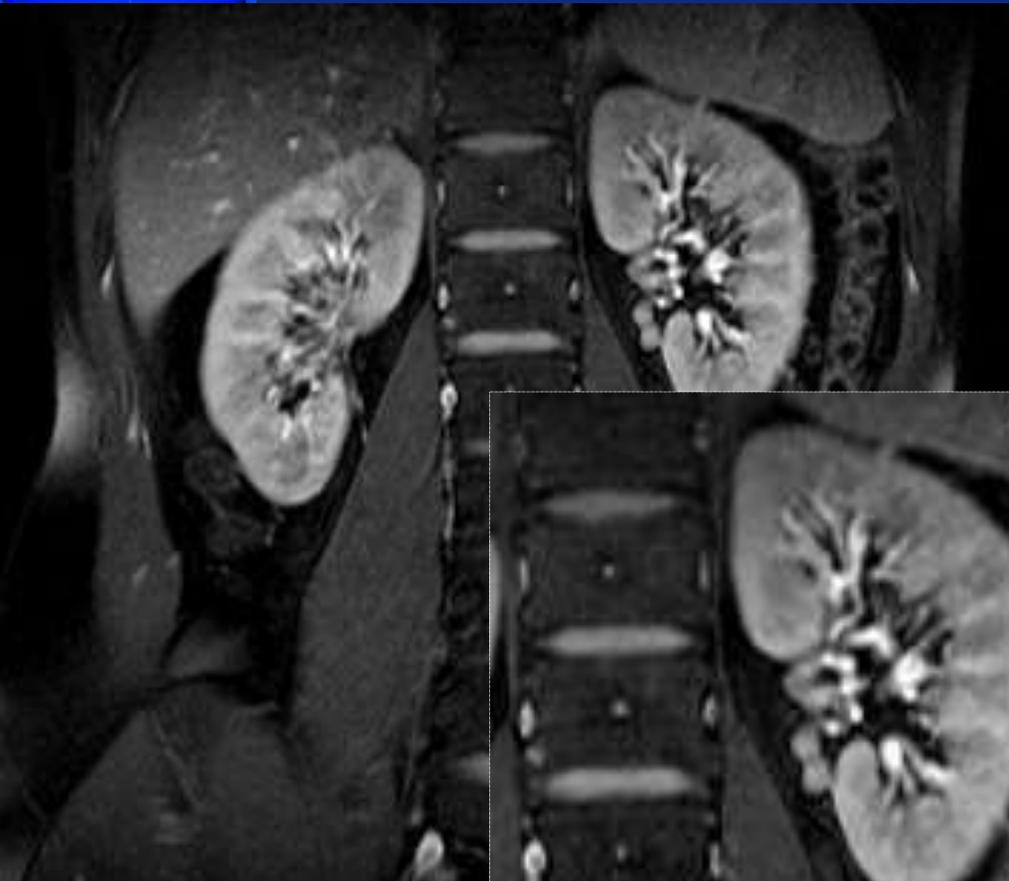
- ◆ Diminue le temps d'acquisition, à S/B égal
 - ☞ Aller plus vite
 - ☞ Augmenter la résolution spatiale

- ◆ Diminue le train d'écho :
 - ☞ Diminution de l'effet T2, Rapport S/B augmenté
 - ☞ Moins de saturation de la graisse

- ◆ Améliore les séquences de diffusion (Blurring diminué)

Augmenter la résolution spatiale

Rappels
sur le plan



Référence

Matrice : 300 x 512



imagerie parallèle x2

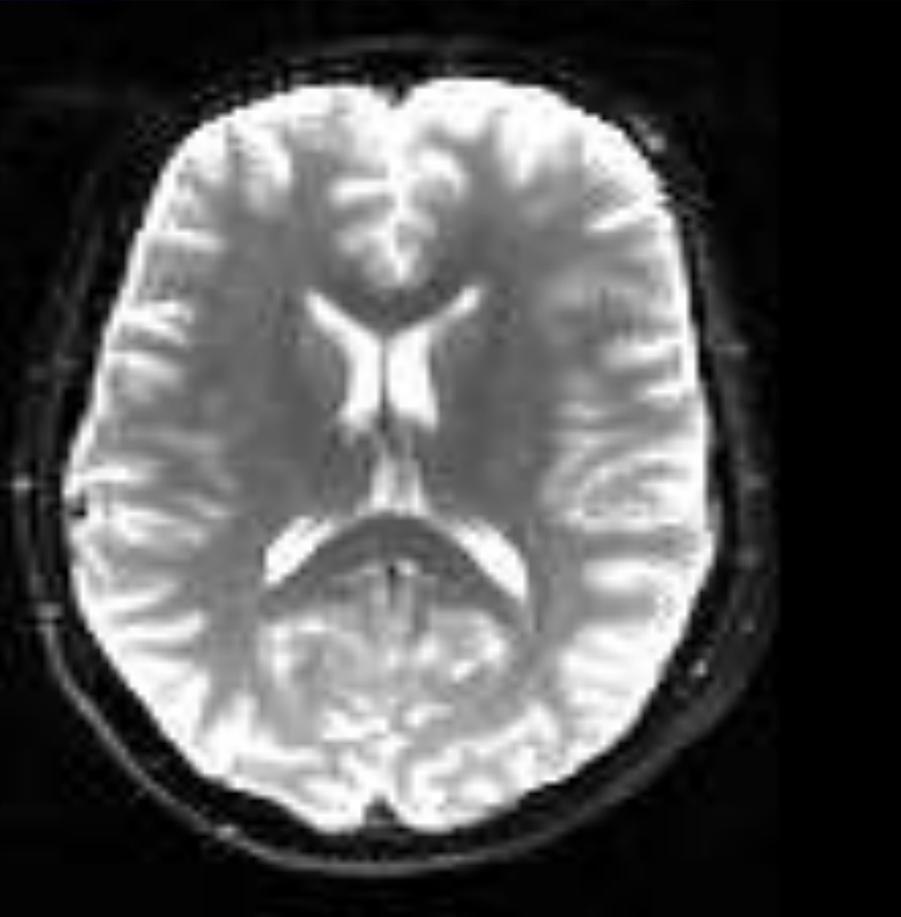
600 x 512

Antenne 8 éléments
TSE

L'imagerie
parallèle

Diminuer le temps d'acquisition

Rappels
sur le plan



Référence

L'imagerie
parallèle

Temps d'acq : 100 ms



Single shot EPI SE

Imagerie parallèle (x2)

50 ms

Rappels
sur le plan
de Fourier

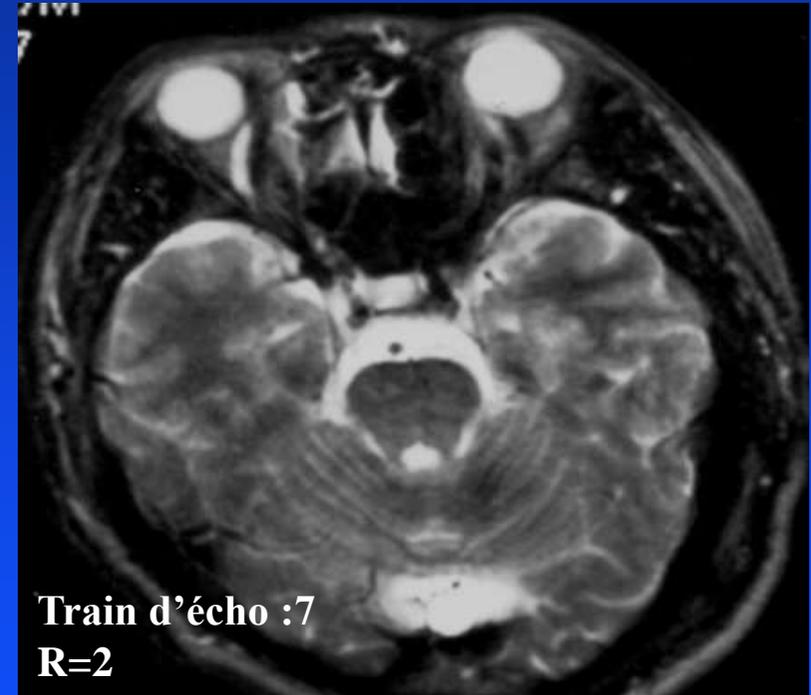
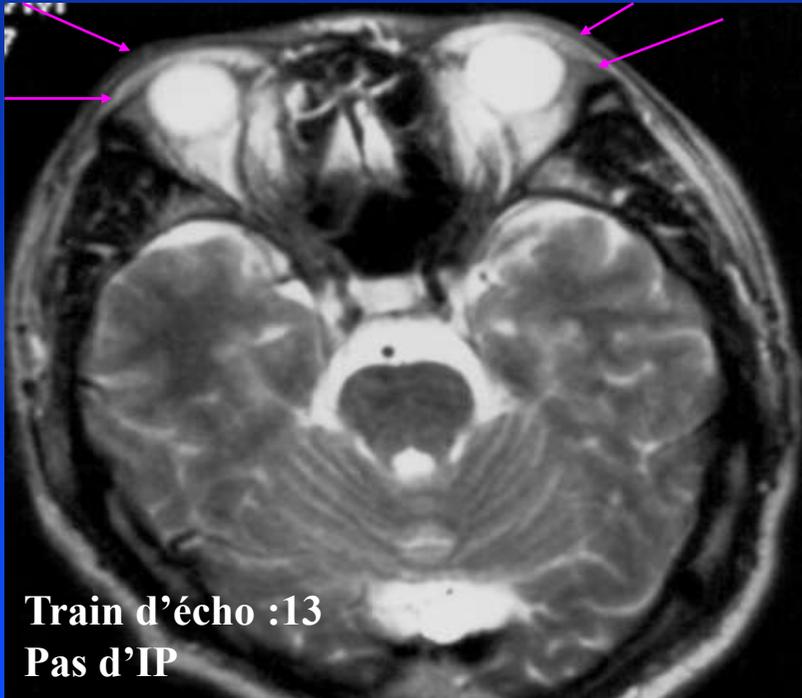
L'ES rapide

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle

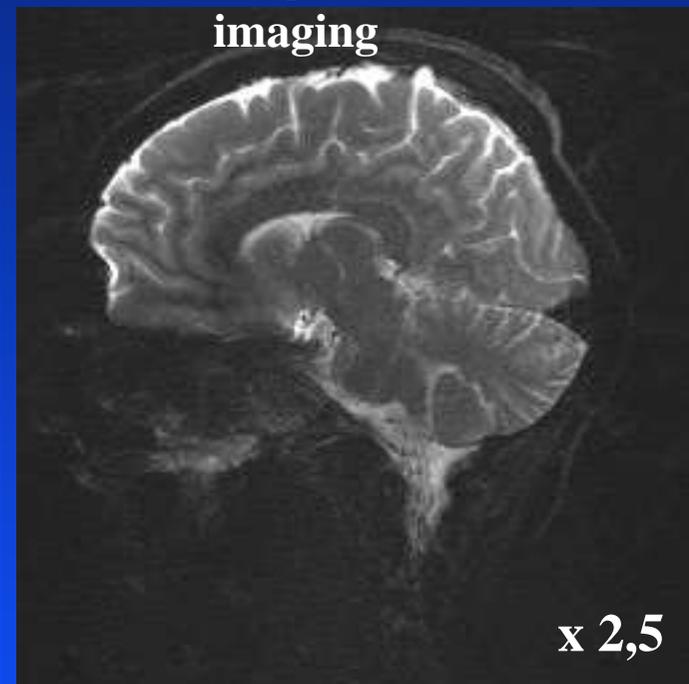
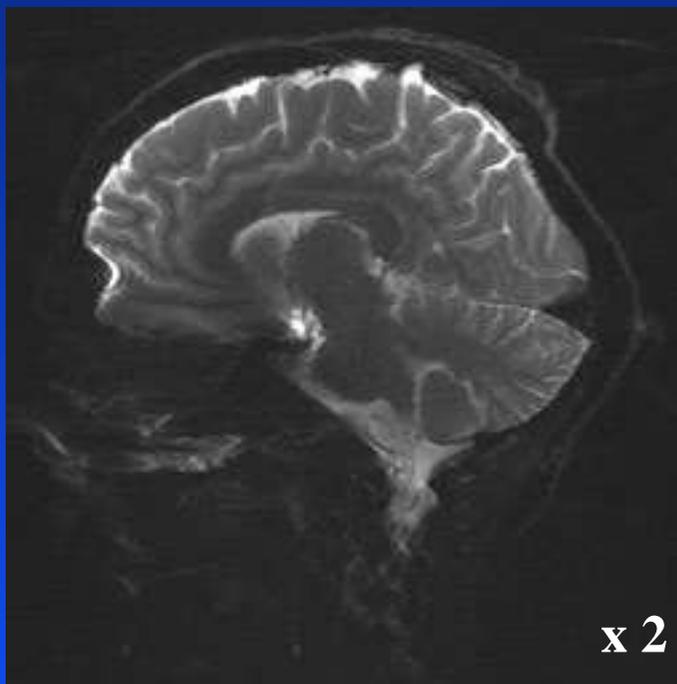
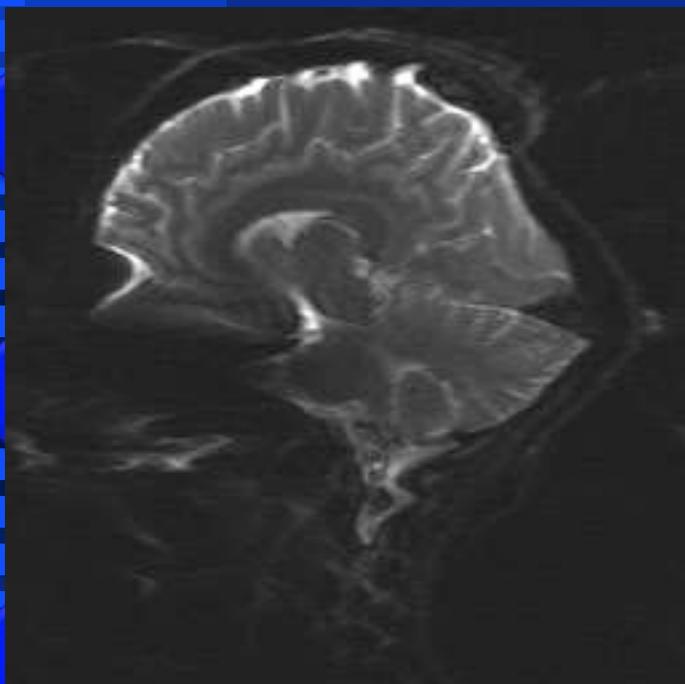
- Diminution des artéfacts liés à des trains d'écho long :
 - ◆ Artéfact d'hypersignal de la graisse



Diminuer les artéfacts

Moins de distorsion et d'effet de susceptibilité

Rappels
sur le plan
de Fourier



Single shot diffusion
imaging

x 2

x 2,5

Référence

Imagerie parallèle

Temps d'acq : 134 ms

134 ms

92 ms

Résolution : 128 x 128

256 x 256

256 x 256

L'imagerie
parallèle

Rappels
sur le plan
de Fourier

Artéfacts spécifiques

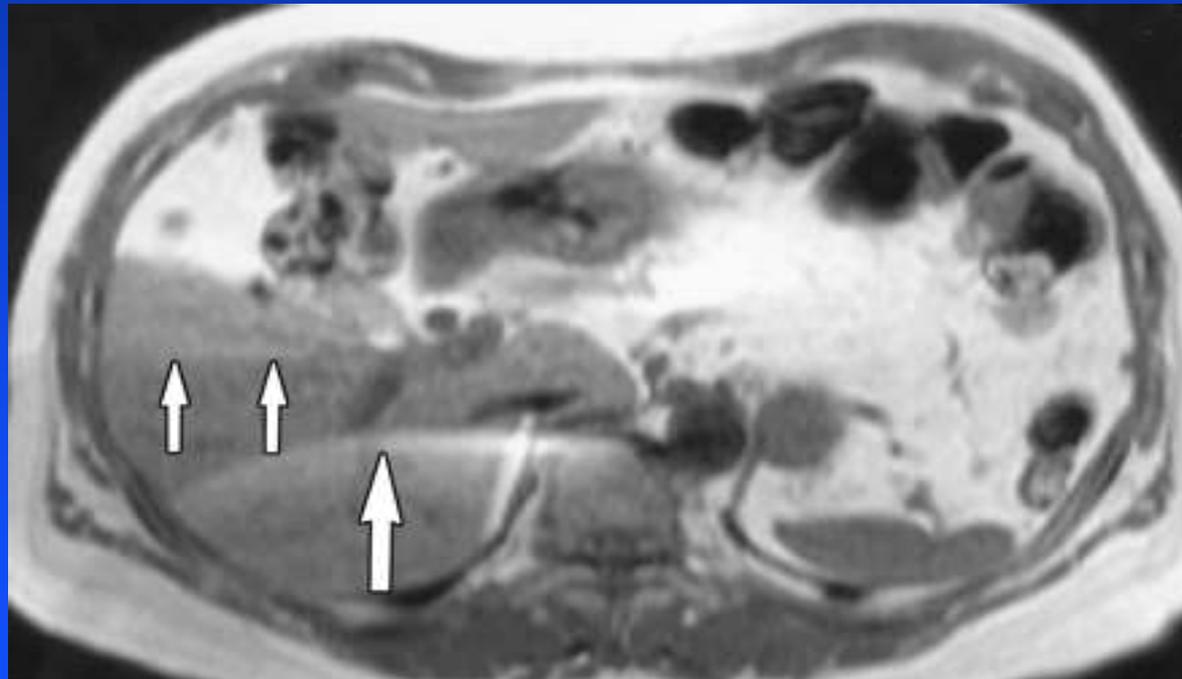
L'ES rapide

- Défaut de cohérence entre calibration et image
 - ◆ Respiration, mouvement...

L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

L'imagerie
parallèle



Rappels
sur le plan
de Fourier

L'ES rapide

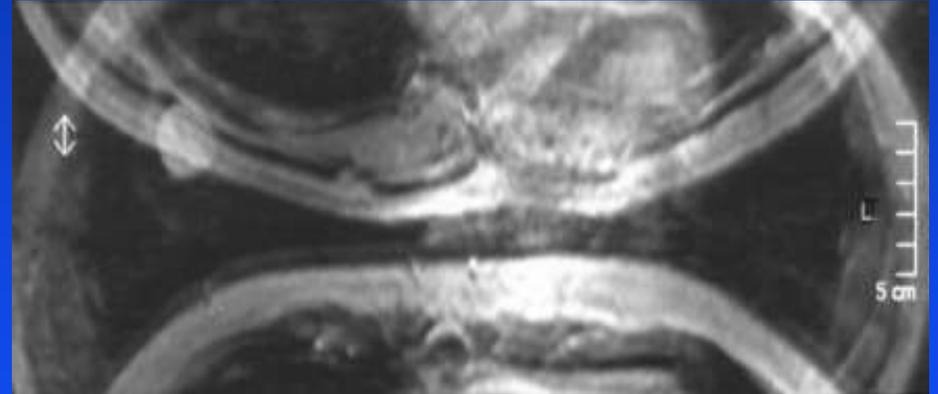
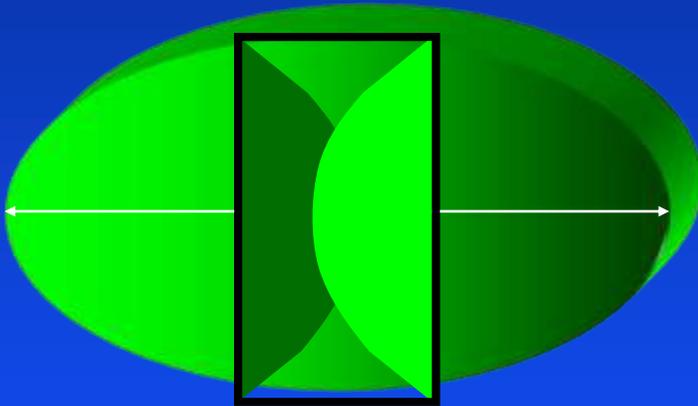
L'EPI

Les
méthodes
spécifiques

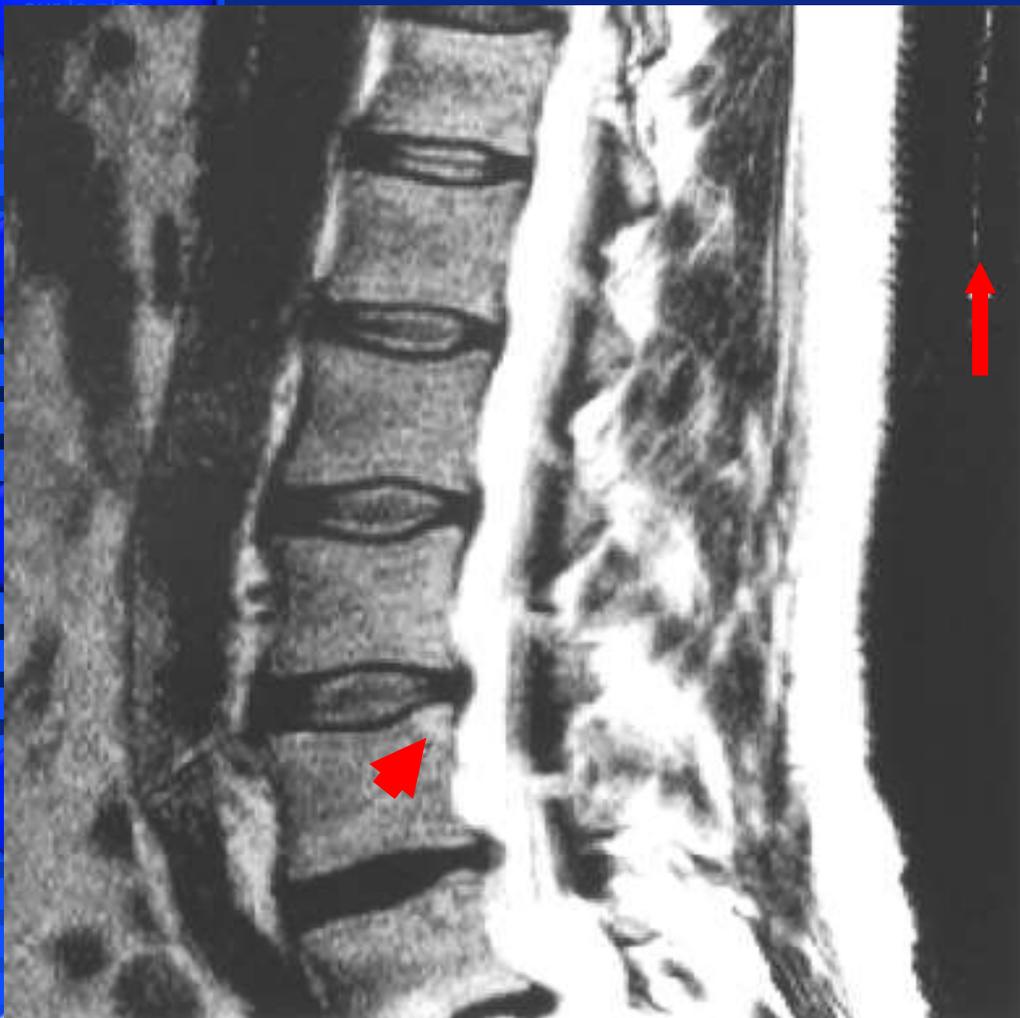
L'imagerie
parallèle

Artéfacts spécifiques

■ Champ de vue trop petit



$R=2$
FOV : > moitié de l'objet



L'imagerie
parallèle

aliasing

correction aliasing

CONCLUSION

1. Les méthodes de reconstruction moderne du plan de Fourier ont permis le développement de l'imagerie moderne en IRM (cœur, diffusion, perfusion...)
1. L'imagerie parallèle est le « multi barrette » de l'IRM