



CODAGE SPATIAL EN

I(IMAGERIE) par **R**(RESONANCE) **M**(MAGNETIQUE)

Muriel ROTH

Centre d'IRM fonctionnelle de Marseille

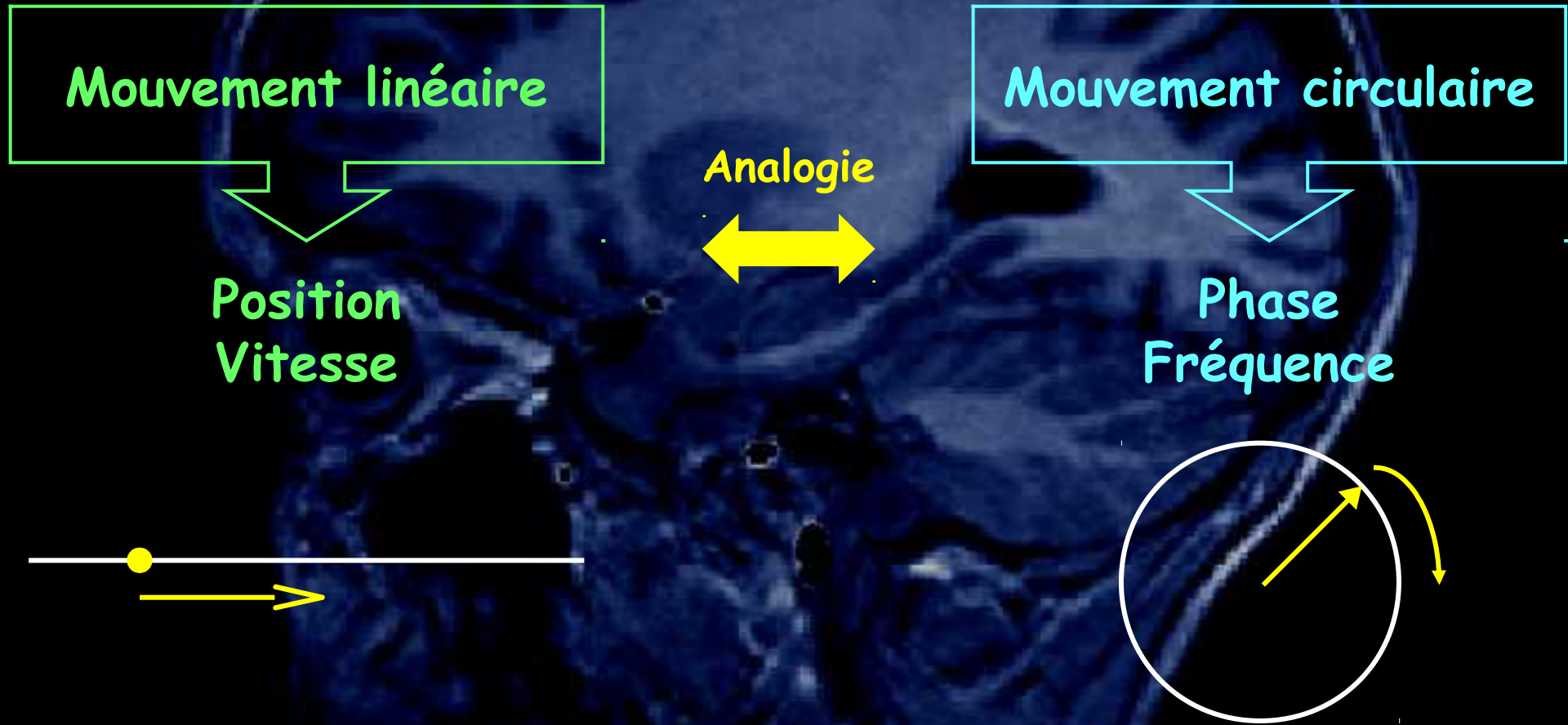
Les fréquences spatiales

La sélection de coupe

Le codage spatial d'une coupe

La relation Fourier / image

Rappel phase / fréquence



Les gradients de champ magnétique

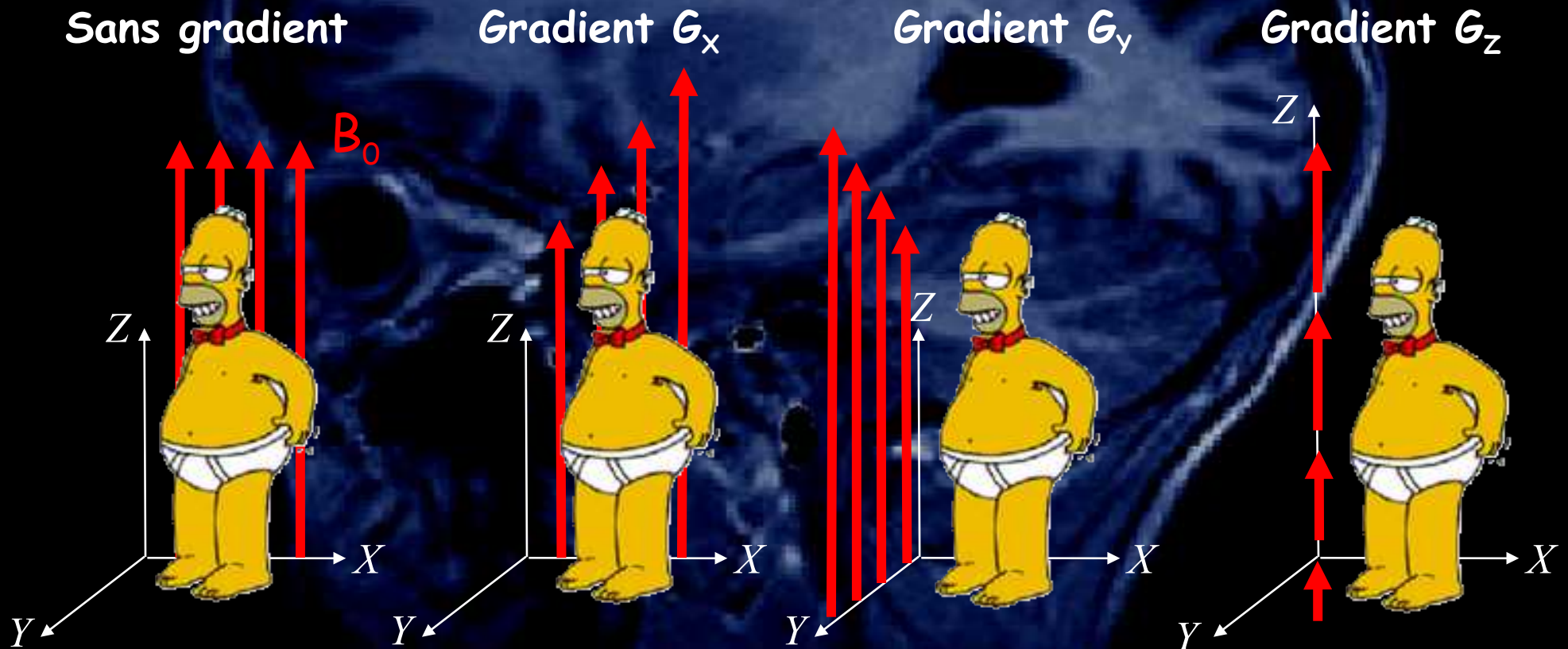
En IRM, la fréquence de résonance des protons est proportionnelle au champ magnétique :

$$f_0 = \gamma / 2\pi \cdot B_0 = \gamma B_0$$

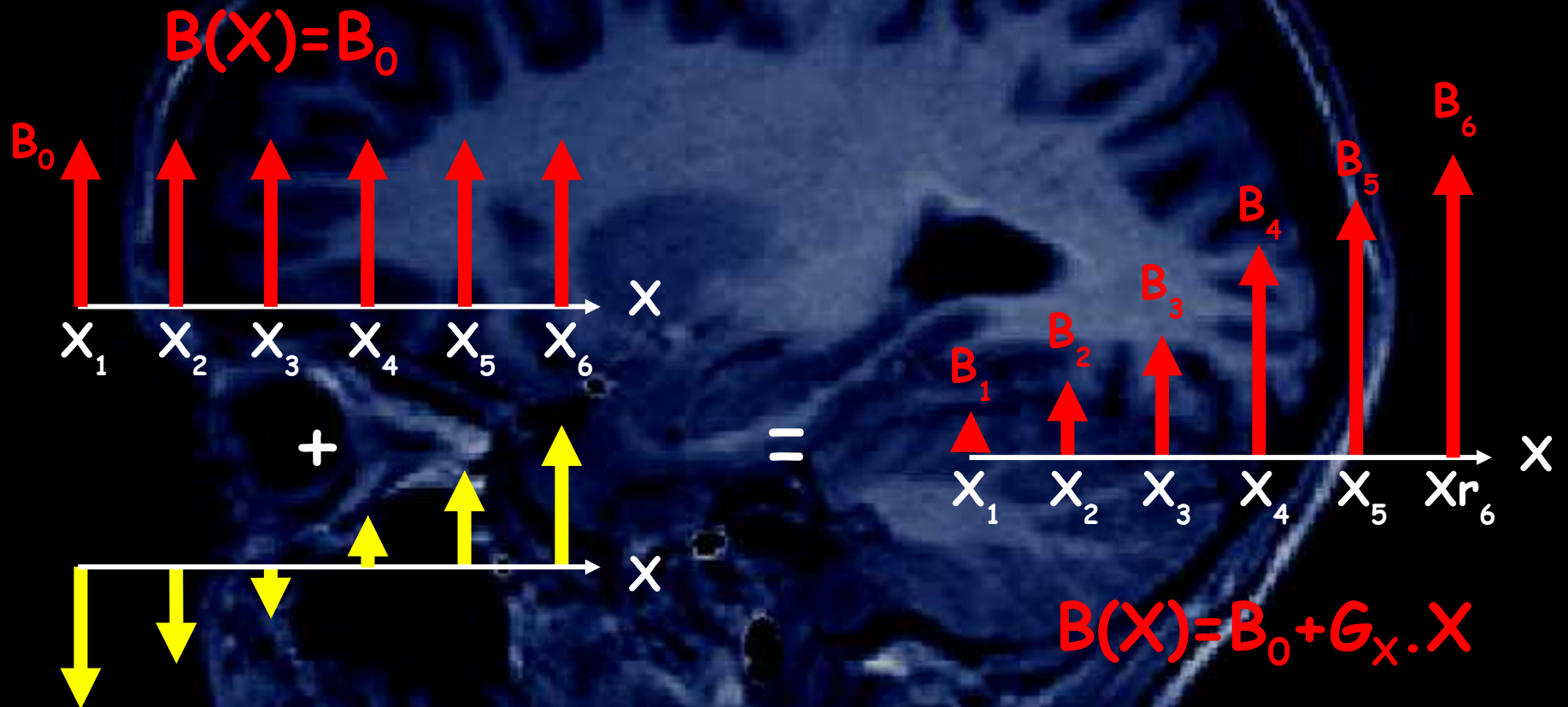
Si on fait varier le champ magnétique B_0 dans l'espace, la fréquence de rotation des protons va être différente suivant leurs positions.

Les gradients de champ magnétique

On va pouvoir effectuer un codage spatial par la fréquence en ajoutant au champ magnétique B_0 des gradients de champ.



Les gradients de champ magnétique



Champ magnétique final
dans la direction de B_0

Les gradients de champ magnétique

Le champ magnétique perçu par les protons pendant l'application d'un gradient G est donné par :

$$B = B_0 + G_x \cdot X + G_y \cdot Y + G_z \cdot Z$$

On a donc pour un gradient de direction $r(X, Y, Z)$ (obtenu par application d'une combinaison des gradient G_x , G_y et G_z) :

$$B(r) = B_0 + G_r \cdot r$$

La fréquence du signal

La fréquence du signal recueilli en IRM en présence d'un gradient de champ magnétique dans la direction $r(X,Y,Z)$, va donc dépendre de la position r dans l'espace :

$$f(r) = \gamma \cdot B(r) = \gamma \cdot (B_0 + G_r \cdot r)$$

La fréquence du signal

Le signal en IRM est démodulé (c'est à dire que la fréquence de Larmor $f_0 = \gamma \cdot B_0$ est éliminée pour ne garder que les déphasage supplémentaires liés au codage spatial).

Avant démodulation, on a : $f(r) = \gamma \cdot (B_0 + G_r \cdot r)$

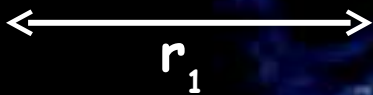
Après démodulation, on a : $f_d(r) = \gamma \cdot G_r \cdot r$

Notion de fréquence spatiale

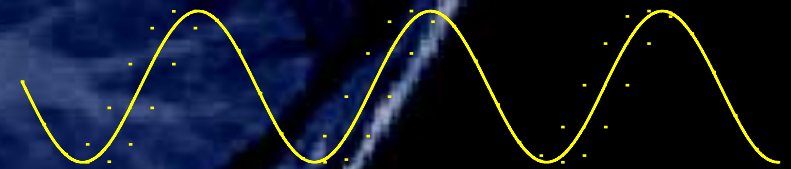
Espacement régulier d'un motif élémentaire \longrightarrow Période spatiale p

Nombre de fois que le motif se reproduit par unité de longueur

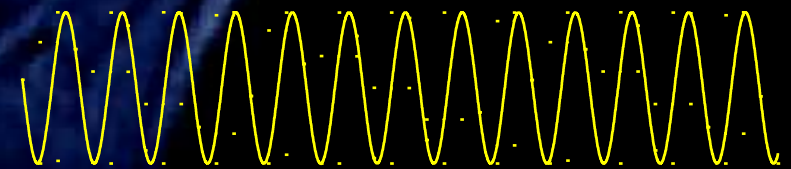
\longrightarrow Fréquence spatiale : $k = \frac{1}{r}$



Fréquence spatiale k_1



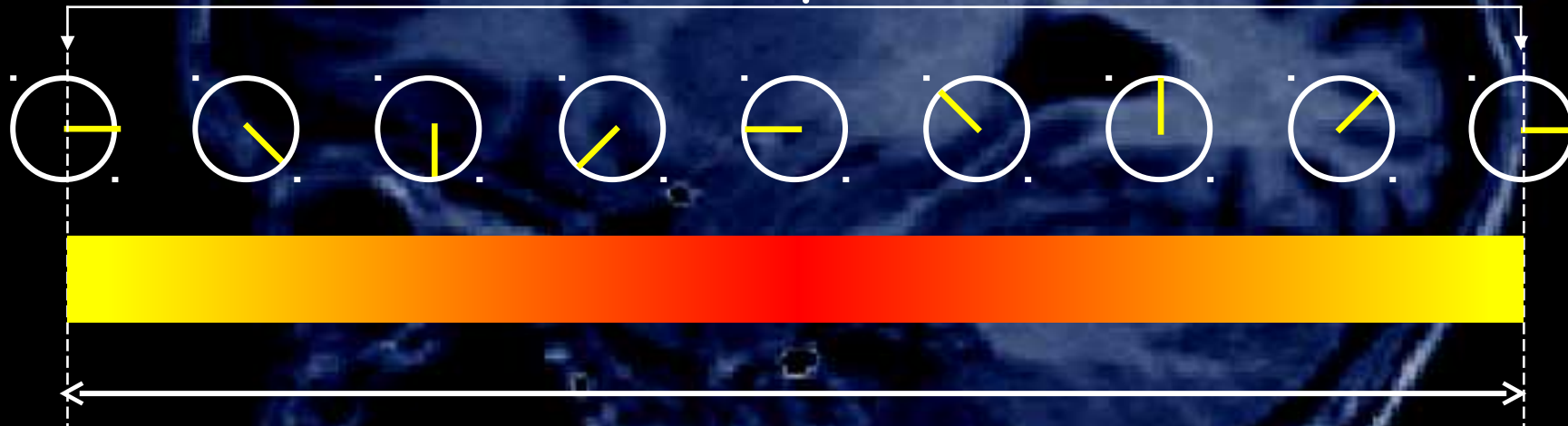
Fréquence spatiale $k_2 > k_1$



Fréquence spatiale et gradients

Gradient $G(r)$

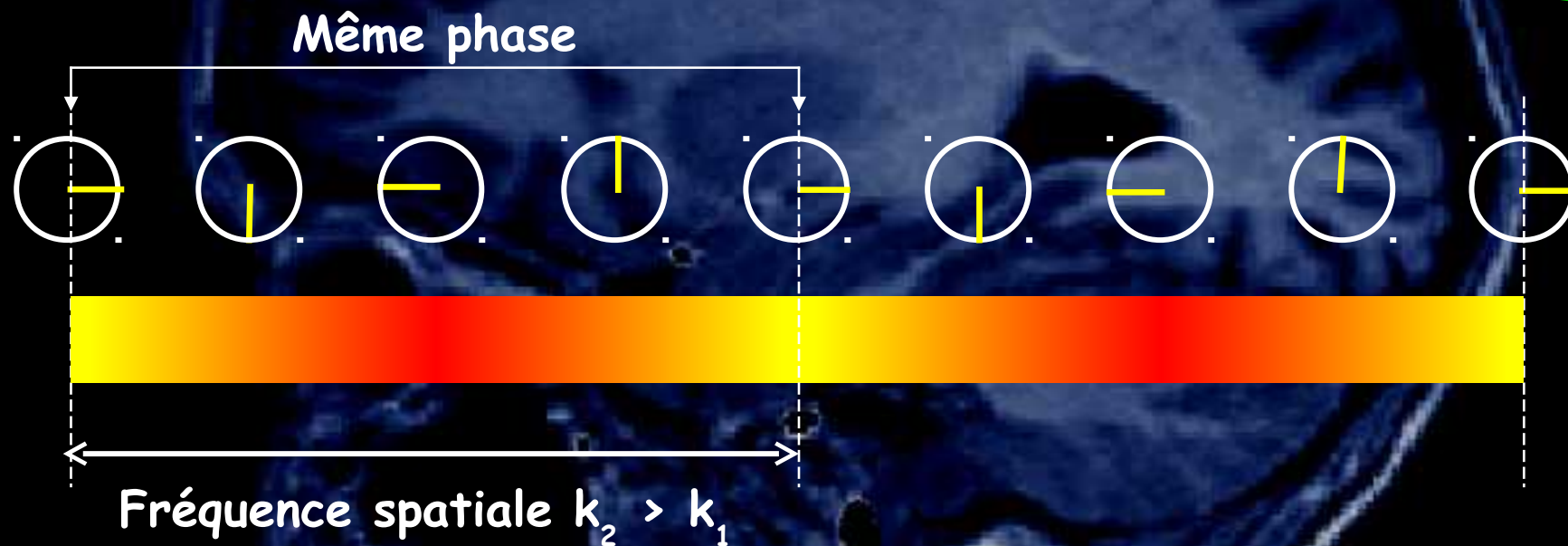
Même phase



Fréquence spatiale $k_1 = 1/r$

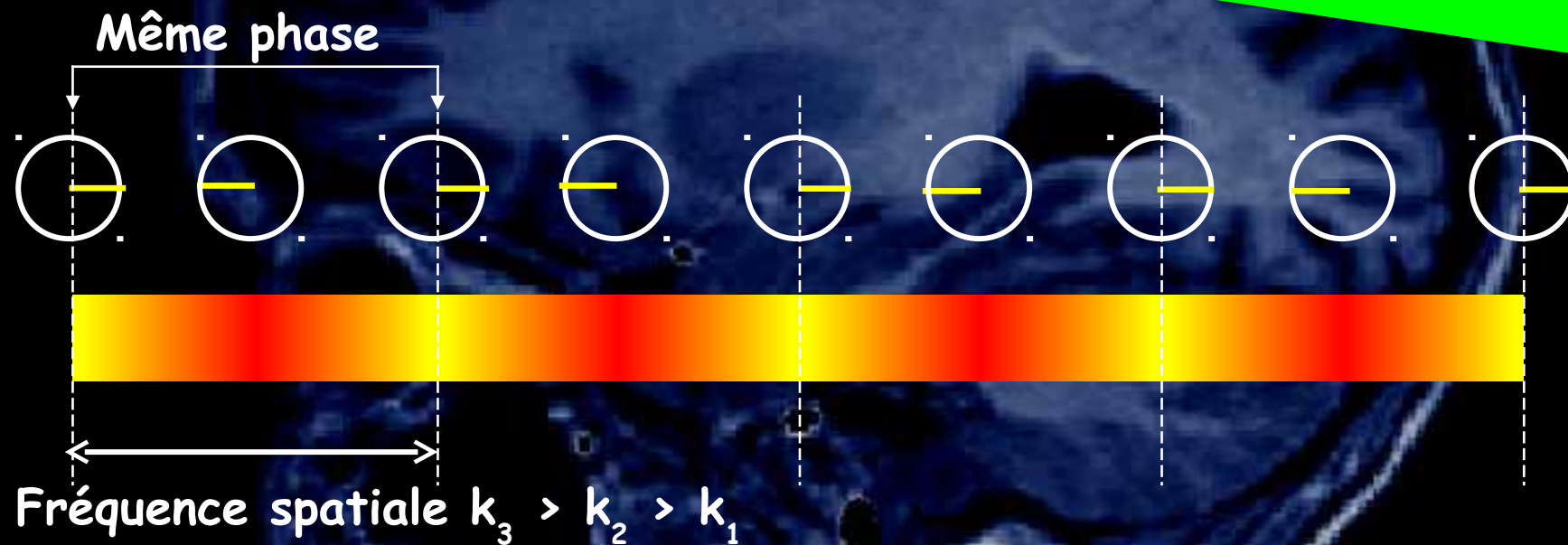
Fréquence spatiale et gradients

Gradient + intense



Fréquence spatiale et gradients

Gradient encore + intense



Le signal RMN

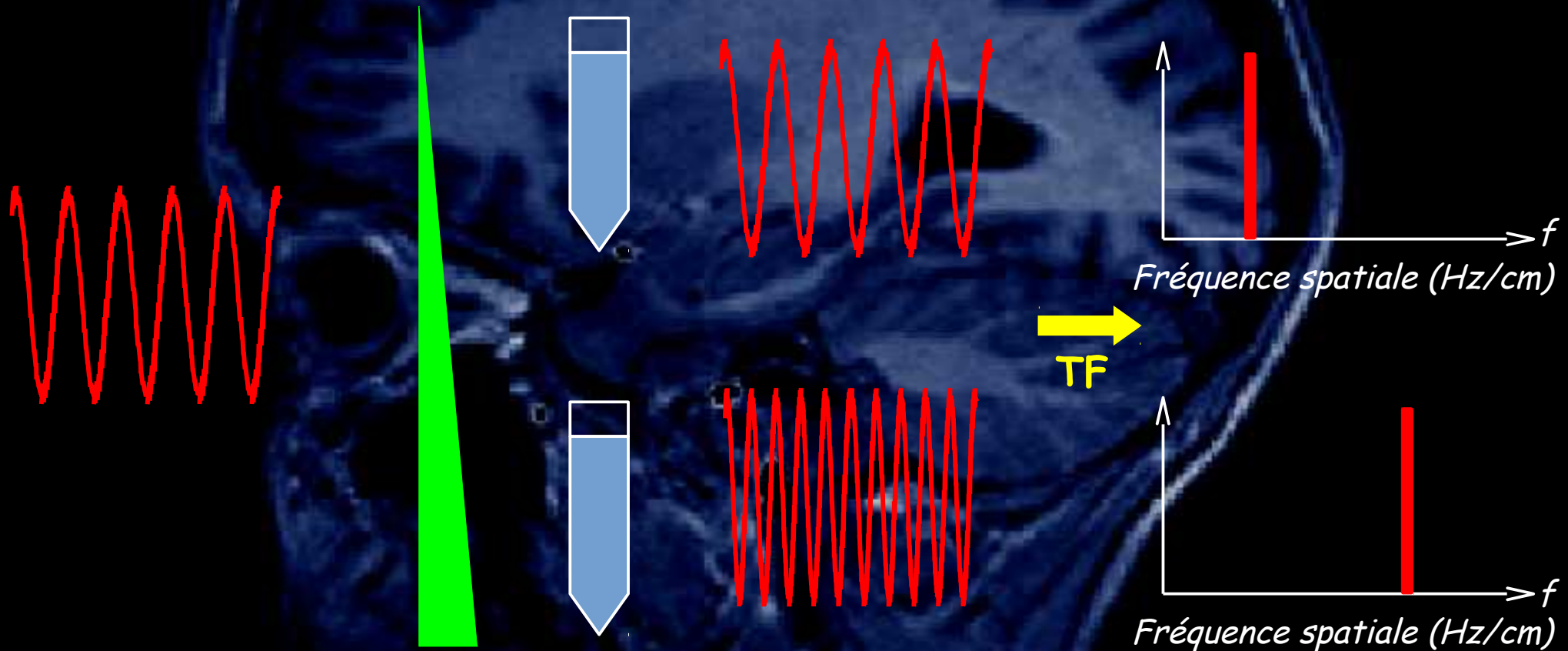
Excitation RF

Gradient

Gels

Signaux RMN

Transformée de Fourier



Le signal RMN

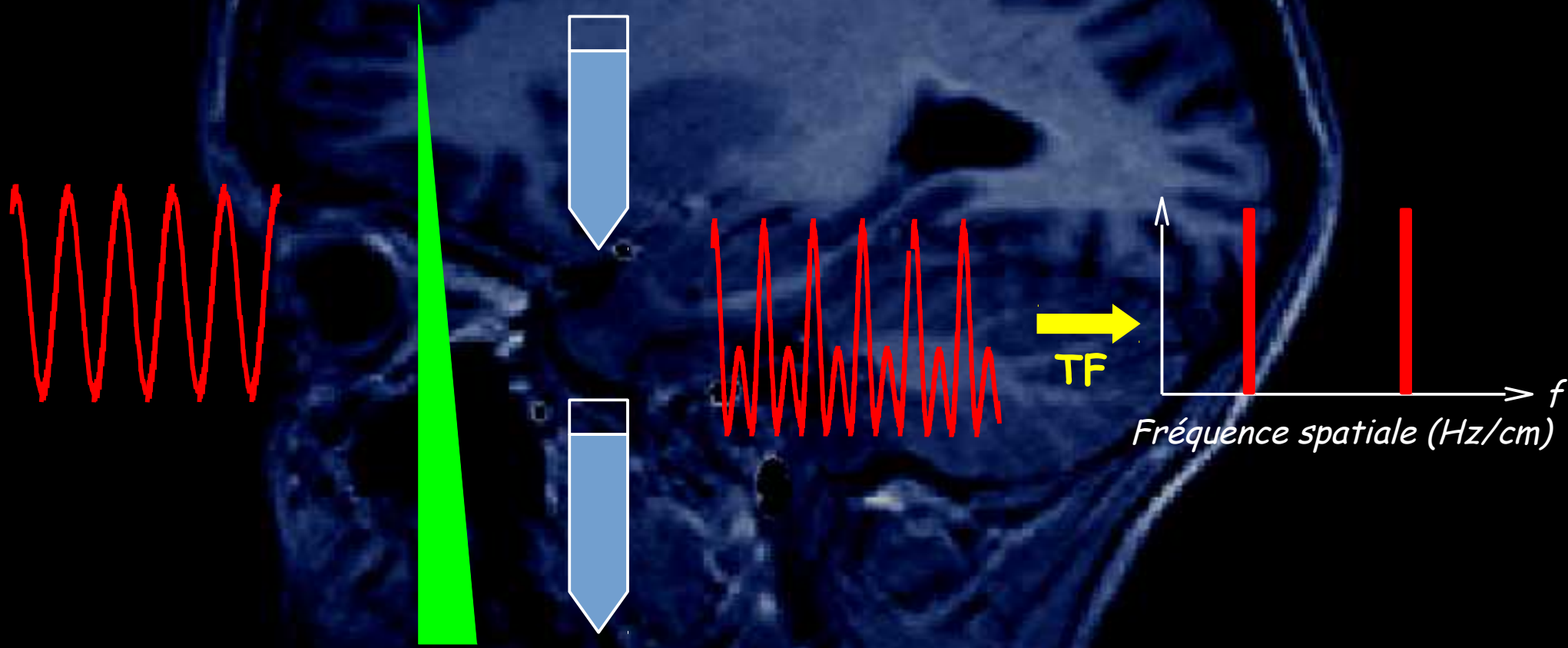
Excitation RF

Gradient

Gels

Signal RMN

Transformée de Fourier



Les fréquences spatiales

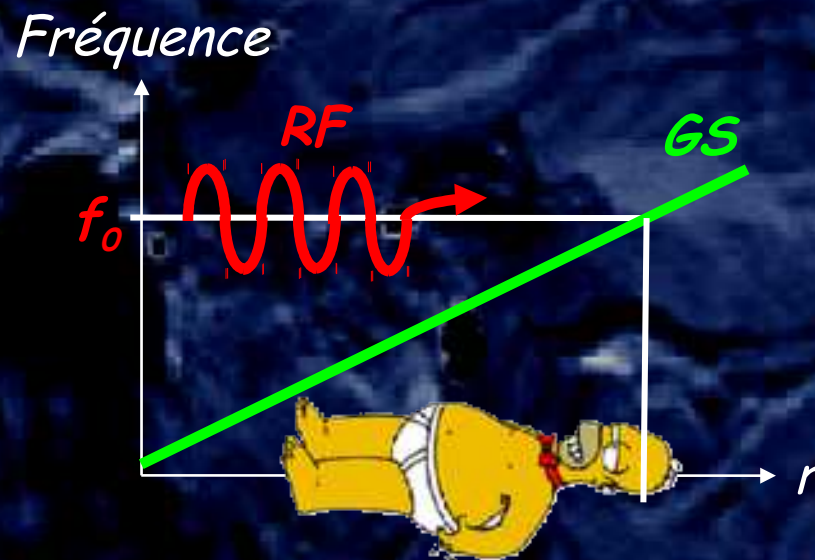
La sélection de coupe

Le codage spatial d'une coupe

La relation Fourier / image

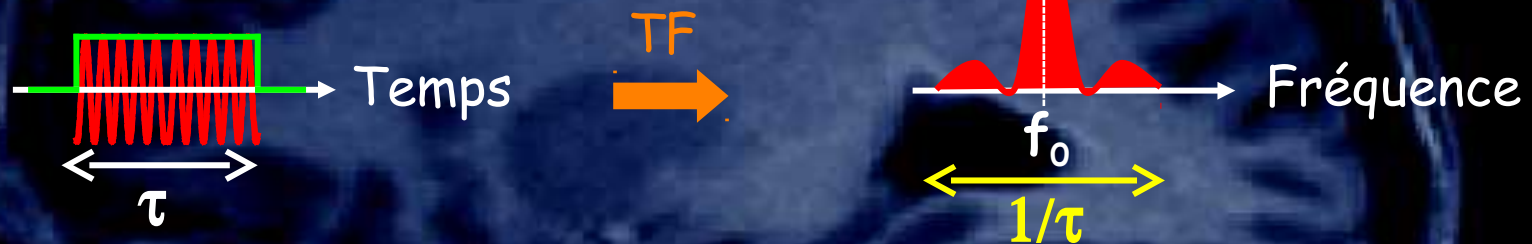
Les impulsions radiofréquence

La sélection d'une coupe consiste à appliquer un gradient de champ magnétique GS (gradient de sélection de coupe) dans une direction r simultanément à une impulsion radiofréquence d'excitation.



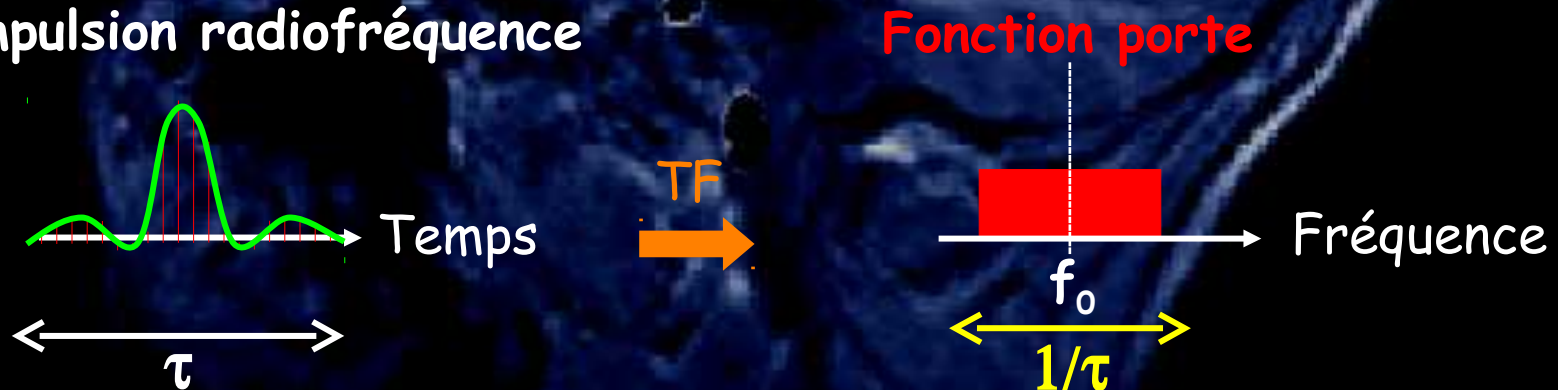
Les impulsions radiofréquence

Impulsion radiofréquence



Plage de fréquences = Bande passante

Impulsion radiofréquence



Les impulsions radiofréquence

Si on applique un gradient magnétique GS dans la direction r , la fréquence du signal est donnée par :

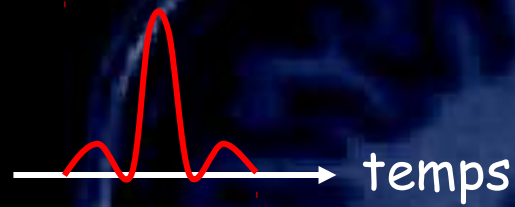
$$f(r) = \gamma \cdot B(r) = \gamma \cdot (B_0 + GS \cdot r)$$

Une variation de fréquence correspond donc à une variation spatiale :

$$\Delta f = \gamma \cdot GS \cdot \Delta r$$

L'épaisseur de coupe

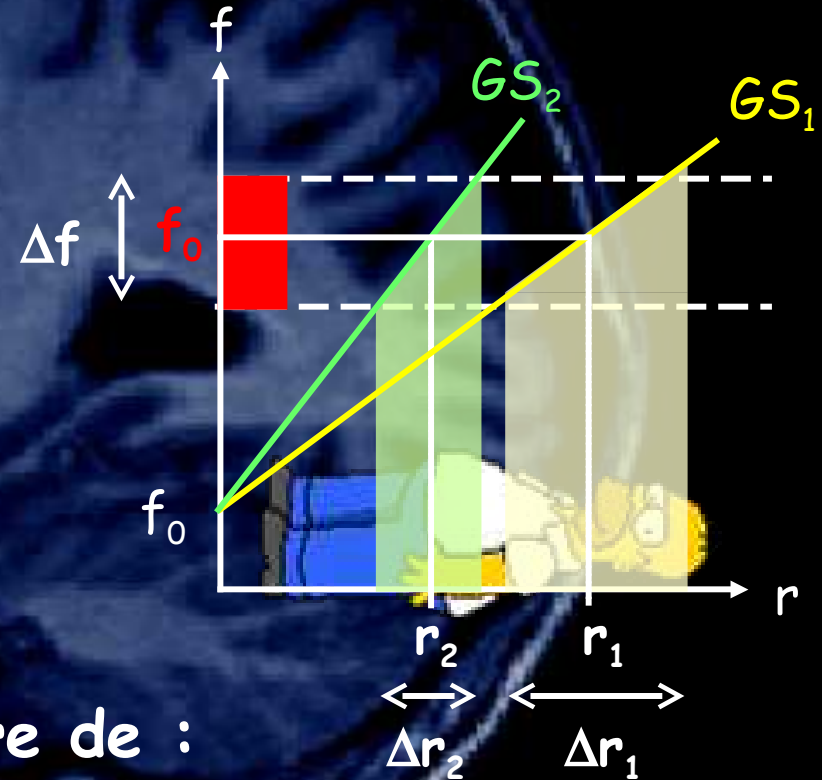
Impulsion radiofréquence



TF



Gradient de sélection de coupe

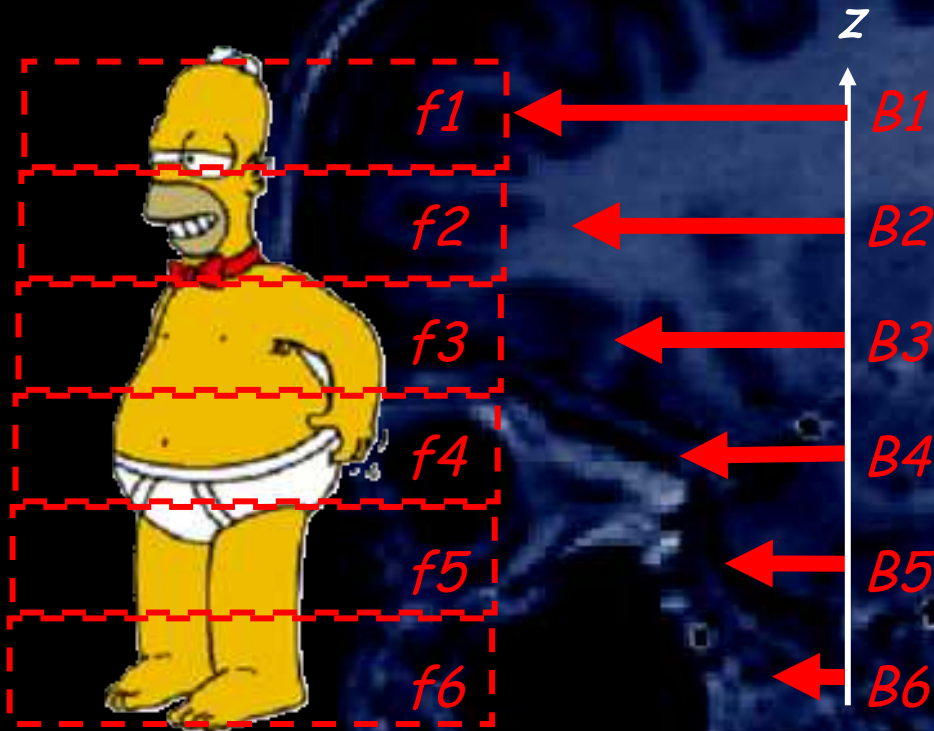


L'épaisseur de coupe Δr va dépendre de :

- la bande passante d'excitation
- L'intensité du gradient G_s

$$\Delta r = \Delta f / \gamma \cdot G_s$$

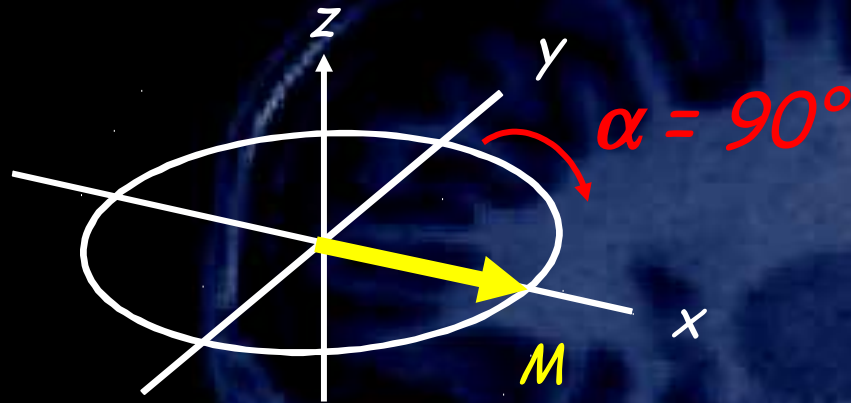
La sélection de coupe



Dans chaque coupe orthogonale à la direction du gradient G_s , les protons "voient" la même valeur de champ donc tournent à la même vitesse.

Chaque coupe a une fréquence de résonance différente.

La sélection de coupe



*Impulsion 90°
sur un seul
plan de coupe*



La position du plan de coupe est choisie en adaptant la fréquence de l'impulsion RF à la valeur du champ magnétique.

Application numérique

Lors d'un examen du foie, un radiologue veut sélectionner des coupes axiales. Pour cela, une impulsion RF de forme gaussienne tronquée à 5% et de durée 4 msec est appliquée simultanément à un gradient de champ magnétique G_z . La largeur de raie dans le domaine fréquentiel de l'impulsion est de $\Delta f = 440$ Hz.

L'épaisseur de coupe est donnée par $e = 2\pi \Delta f / \gamma G_z$

On donne $\gamma/2\pi = 42,576$ MHz/T.

Quelle est la valeur du gradient G_z à appliquer pendant l'impulsion pour obtenir une épaisseur de coupe de 4 mm ?

Application numérique

La valeur du gradient de champ G_z est donnée par :

$$G_z = \frac{2\pi \Delta f}{\gamma e} = \frac{440}{42,576 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 2,58 \text{ mT/m}$$

Application numérique

Le fourreau de gradients du système IRM est alimenté par un unique amplificateur de puissance qui permet de monter au maximum à 30 mT/m sur chaque bobine indépendamment et à 57% de cette valeur maximale lorsque les 3 bobines sont utilisées simultanément. La séquence d'imagerie utilisée bloque l'amplitude des gradients à 57% de la valeur maximale du système.

Quelle est l'épaisseur de coupe minimale qu'il est possible d'acquérir avec cette séquence d'imagerie ?

Application numérique

L'épaisseur de coupe minimale e_{\min} est donnée par :

$$e_{\min} = \frac{2\pi \Delta f}{\gamma G_{Z_{\max}}} = \frac{440}{42,576 \times 0,57 \times 30} = 0,6 \text{ mm}$$

Les fréquences spatiales

La sélection de coupe

Le codage spatial d'une coupe

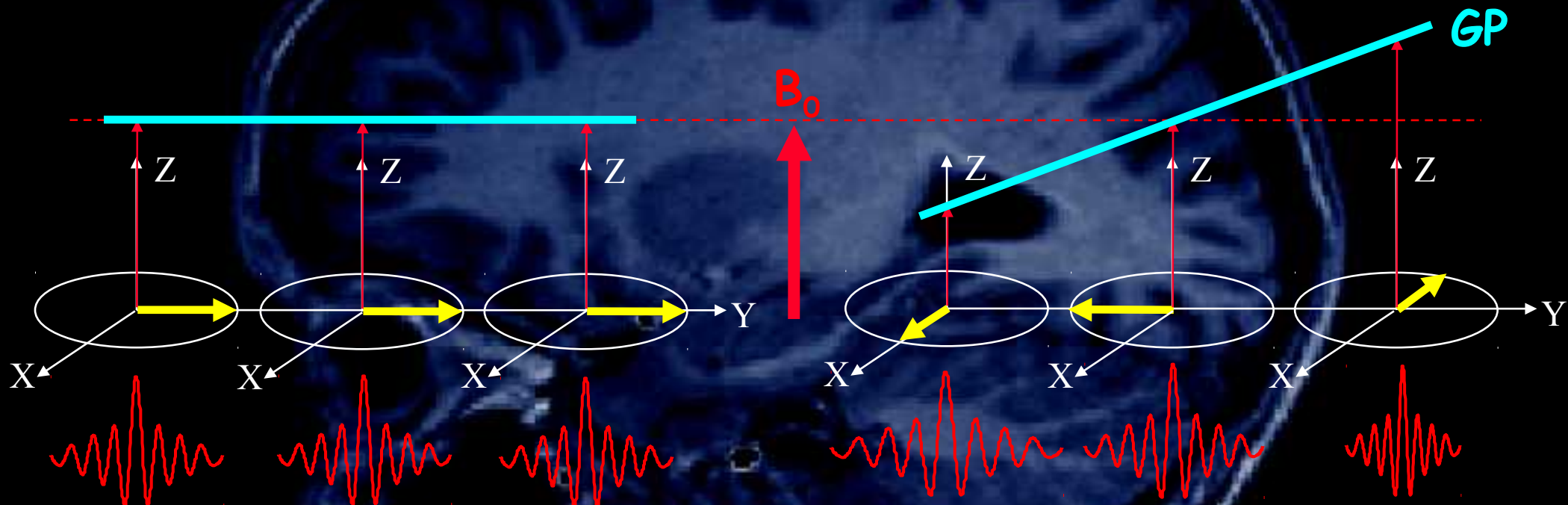
La relation Fourier / image

Les gradients de codage spatial

Après avoir excité uniquement les spins d'une coupe, deux gradients de champ appliqués dans le plan de coupe vont permettre d'effectuer le codage spatial de celle-ci :

- le gradient de codage de phase G_p
- le gradient de codage de fréquence (gradient de lecture) G_R

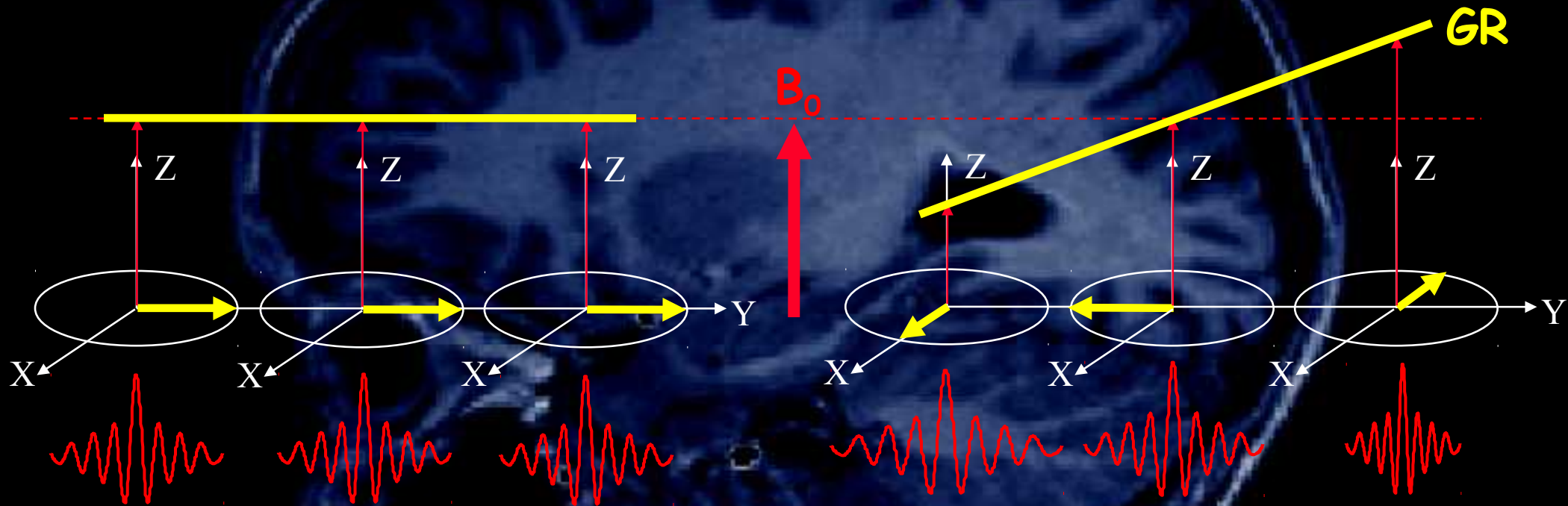
Le codage de la phase



La phase est identique

La fréquence est différente
⇒ Déphasage

Le codage de la fréquence



La fréquence est identique

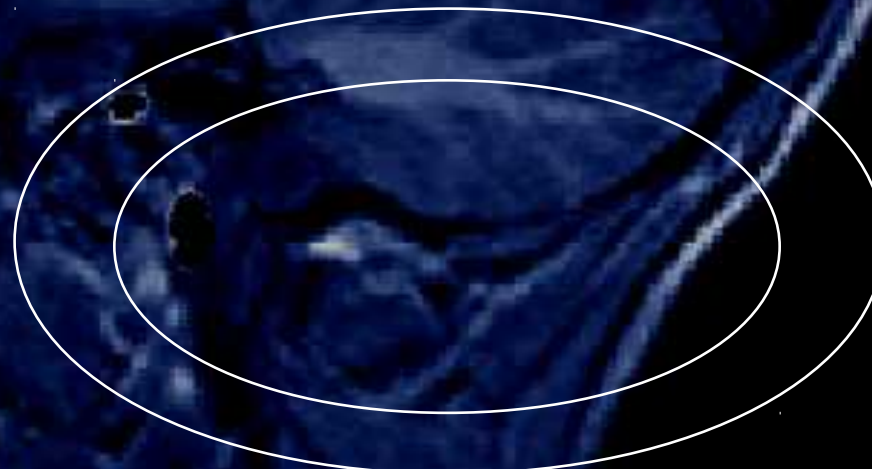
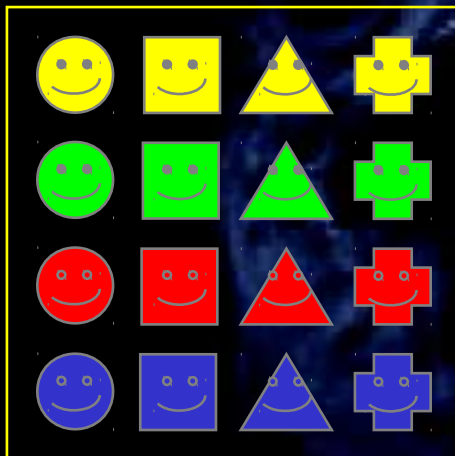
Les spins tournent à une fréquence différente

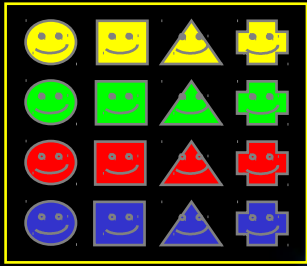
Codage spatial d'un plan image (4x4)

Analogie

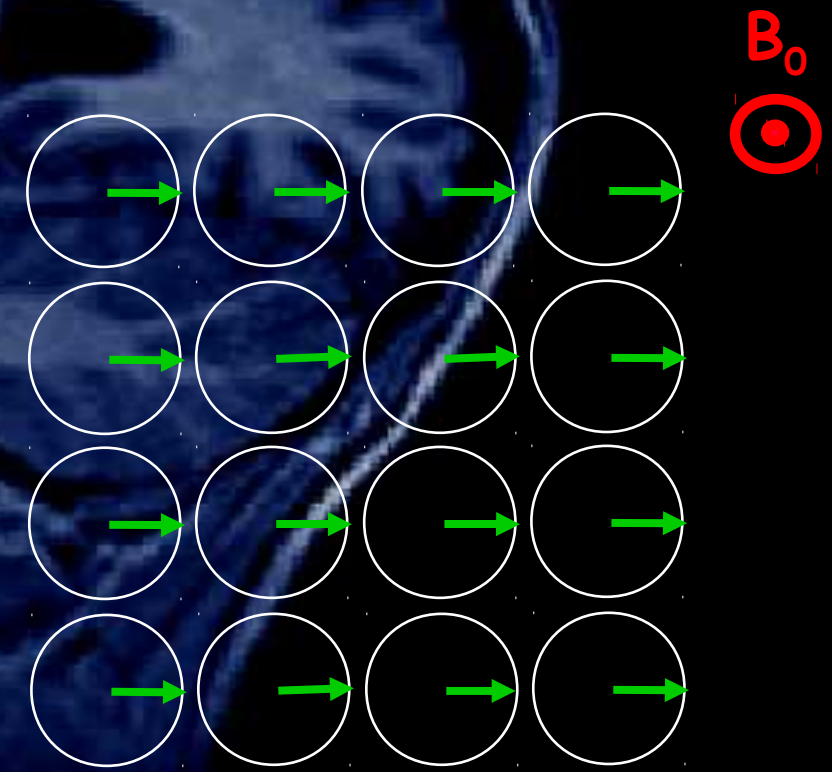
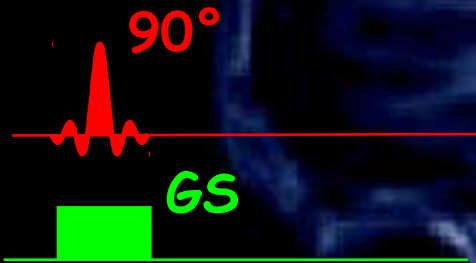
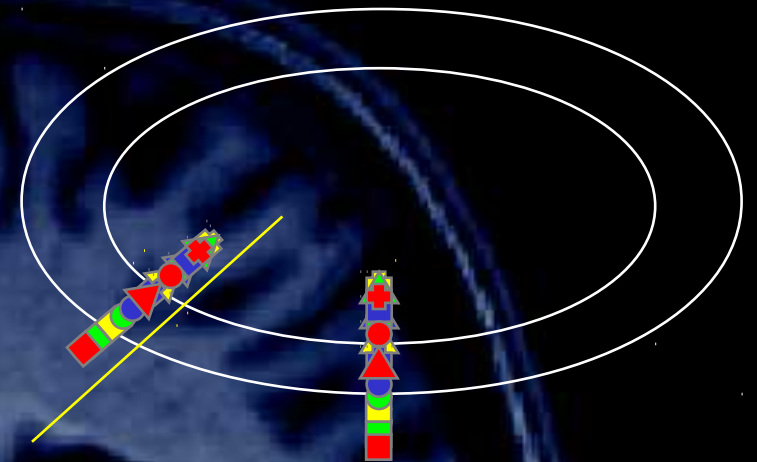


Reconstruire le plan d'une classe
dont les élèves sont sur 4 lignes et sur 4 colonnes,
sans avoir à rentrer dans la classe mais
en demandant aux élèves de venir courir sur un stade.

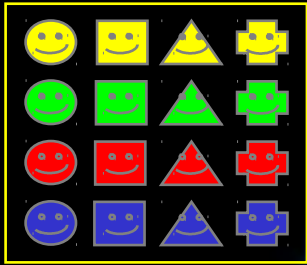




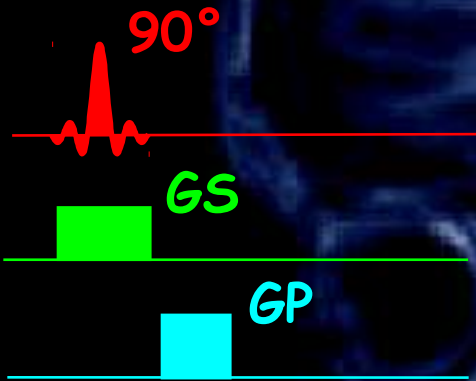
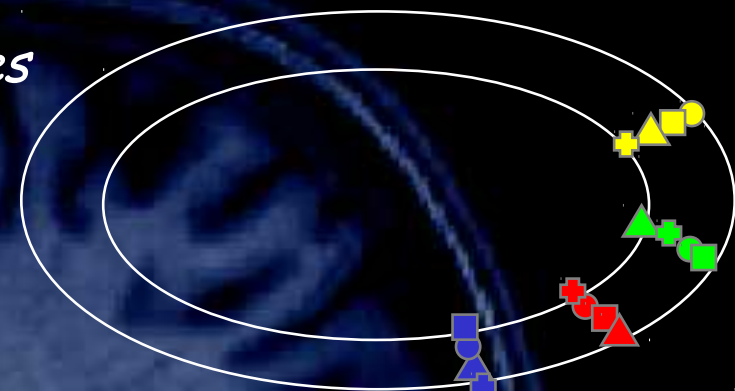
Tous les élèves partent à la même vitesse.



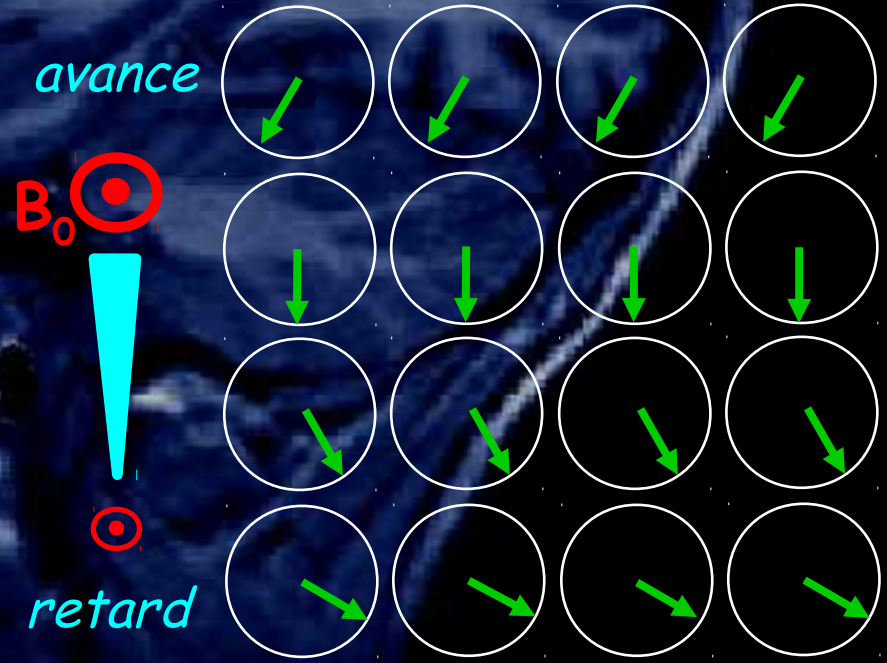
Tous les protons de la coupe tournent à la même fréquence.

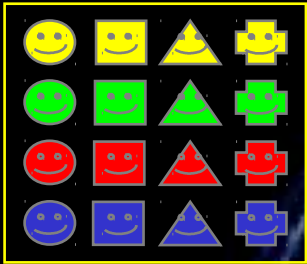


Les élèves courent à des vitesses différentes suivant leur numéro de ligne.

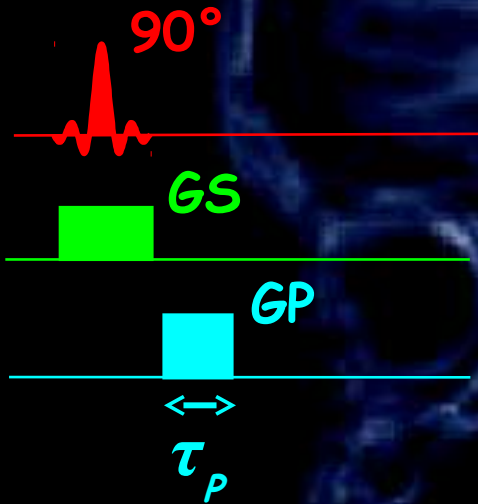
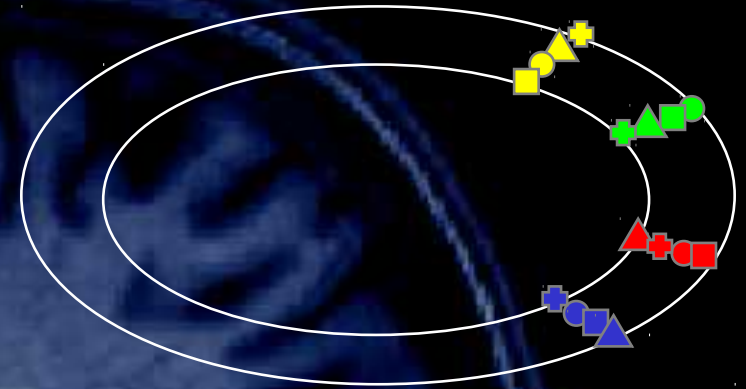


Les protons de la coupe tournent à des fréquences différentes suivant le champ magnétique perçu.

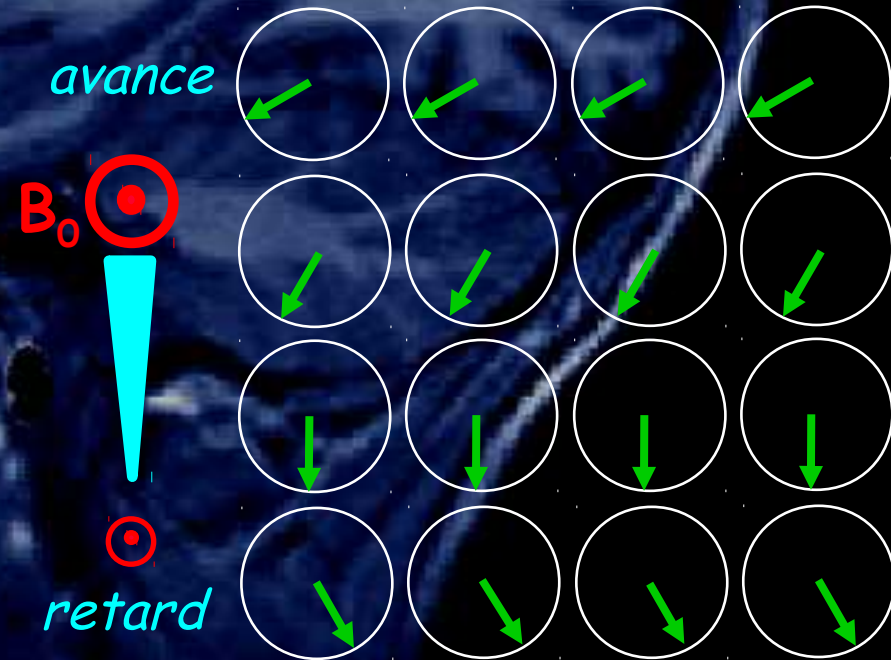


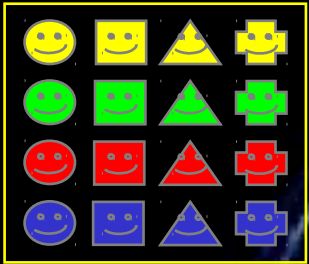


Au bout de τ_P , les élèves repartent à la vitesse f_0 .

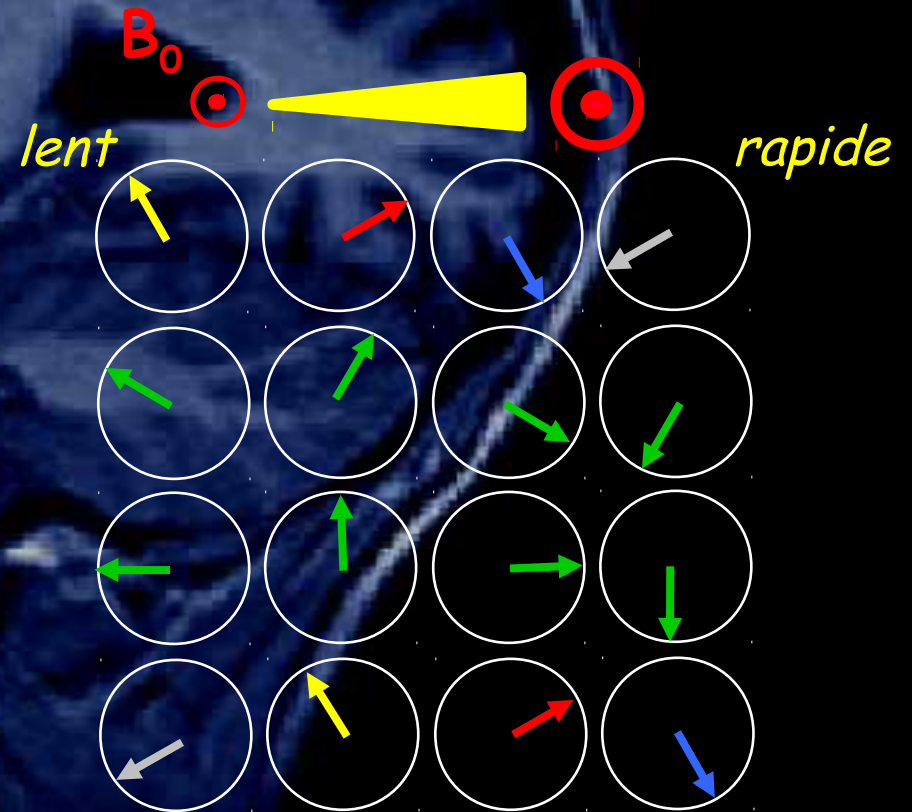
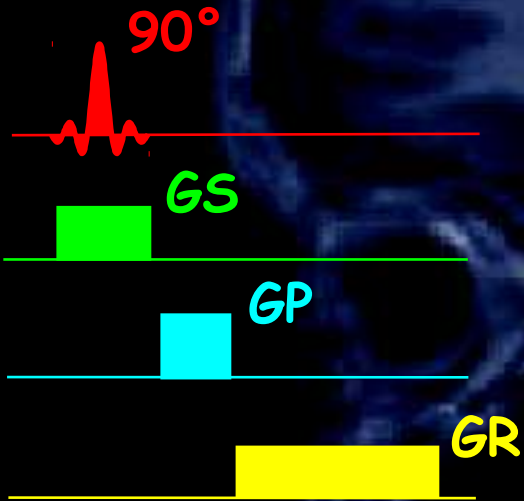
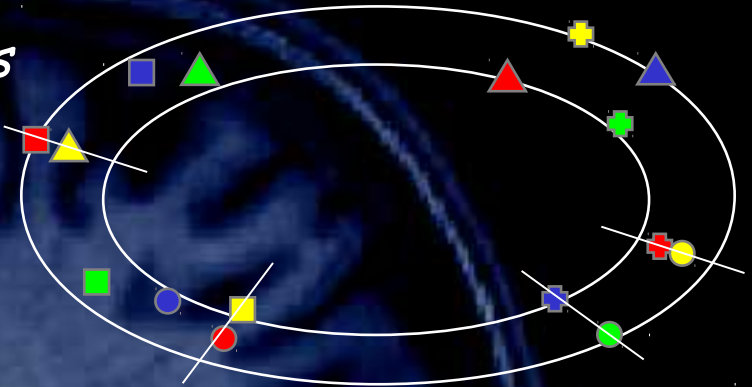


Au bout de τ_P , les protons précessent à f_0 en conservant leur déphasage.



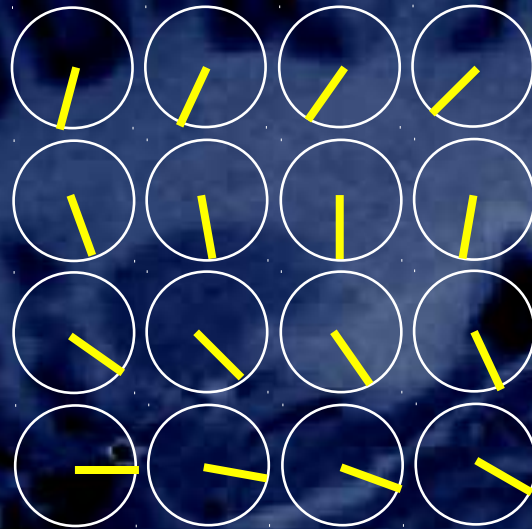
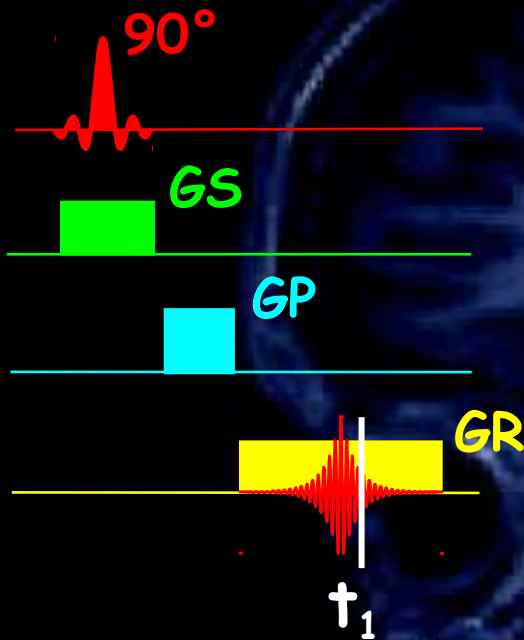


Les élèves courent à des vitesses différentes suivant leur numéro de colonne.



Les protons de la coupe tournent à des fréquences différentes suivant le champ magnétique perçu.

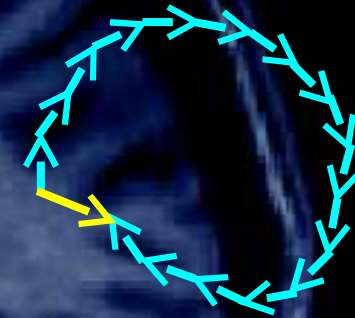
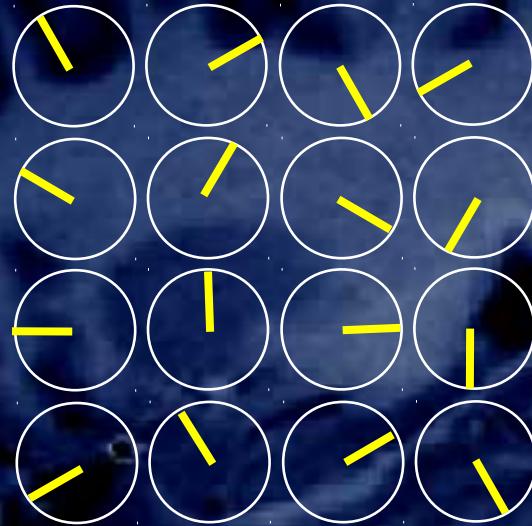
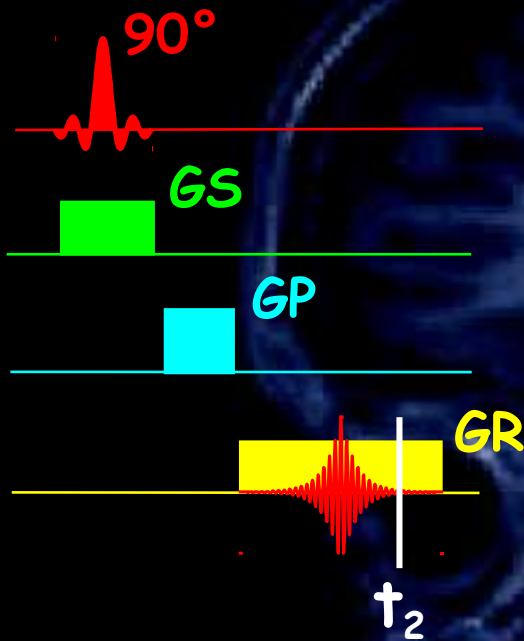
Le signal après codage spatial



Vecteur aimantation M_1
(amplitude A_1 , phase φ_1)

Le signal en t_1 est donné par le vecteur aimantation M_1 qui représente tout l'échantillon (tout le plan de coupe) : il a subi GP pendant τ_P et GR pendant t_1 .

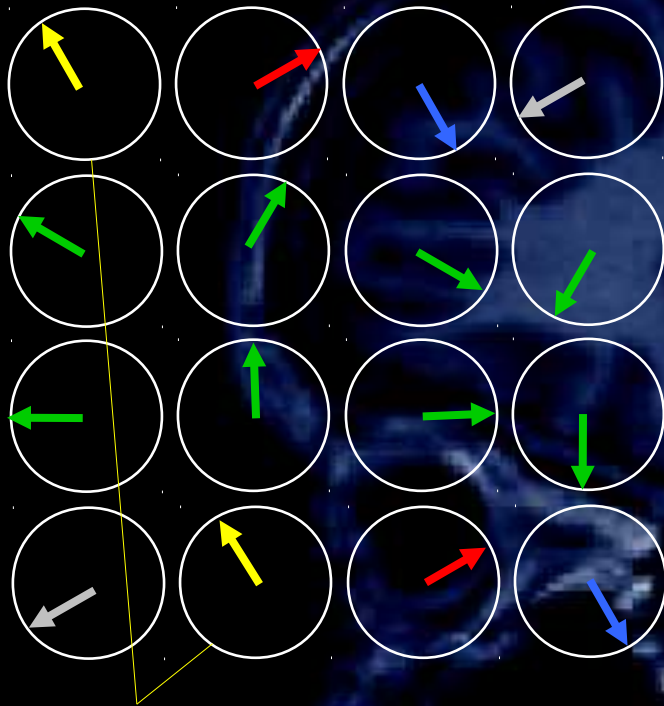
Le signal après codage spatial



Vecteur aimantation M_2
(amplitude A_2 , phase φ_2)

Le signal en t_2 est donné par le vecteur aimantation M_2 qui représente tout l'échantillon (tout le plan de coupe) : il a subi GP pendant τ_P et GR pendant t_2 .

Le signal après codage spatial



Même phase

Problème :

Impossible d'apprécier en une fois le déphasage et le nombre de tours effectué par chaque aimantation

($f_0 \sim 100$ MHz soit plus de 1 million de tours/sec)

Solution : Incrémentation de GP



Le signal après codage spatial

Chaque proton va avoir une valeur contrôlée de phase et de fréquence

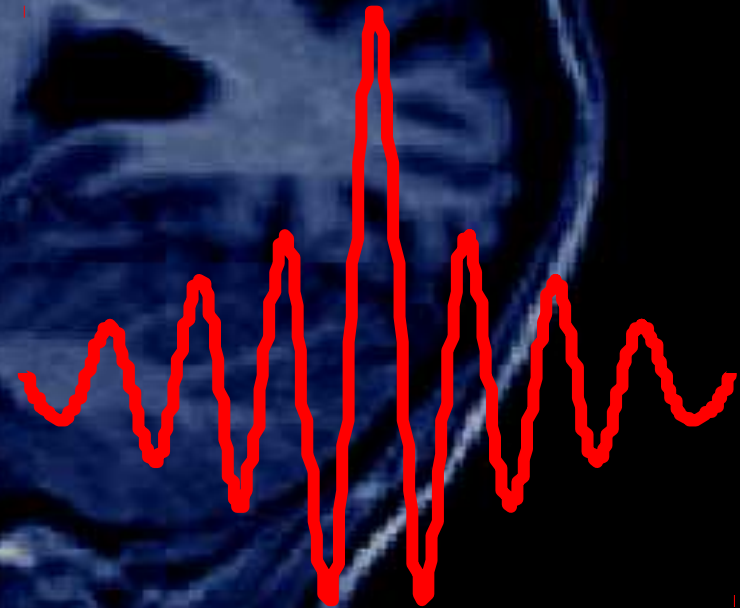
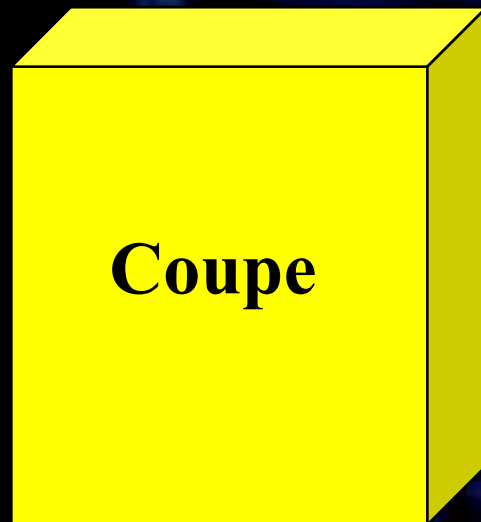
f_{1,p_1}	f_{2,p_1}	f_{3,p_1}	f_{4,p_1}
f_{1,p_2}	f_{2,p_2}	f_{3,p_2}	f_{4,p_2}
f_{1,p_3}	f_{2,p_3}	f_{3,p_3}	f_{4,p_3}
f_{1,p_4}	f_{2,p_4}	f_{3,p_4}	f_{4,p_4}

Résultat du codage spatial :

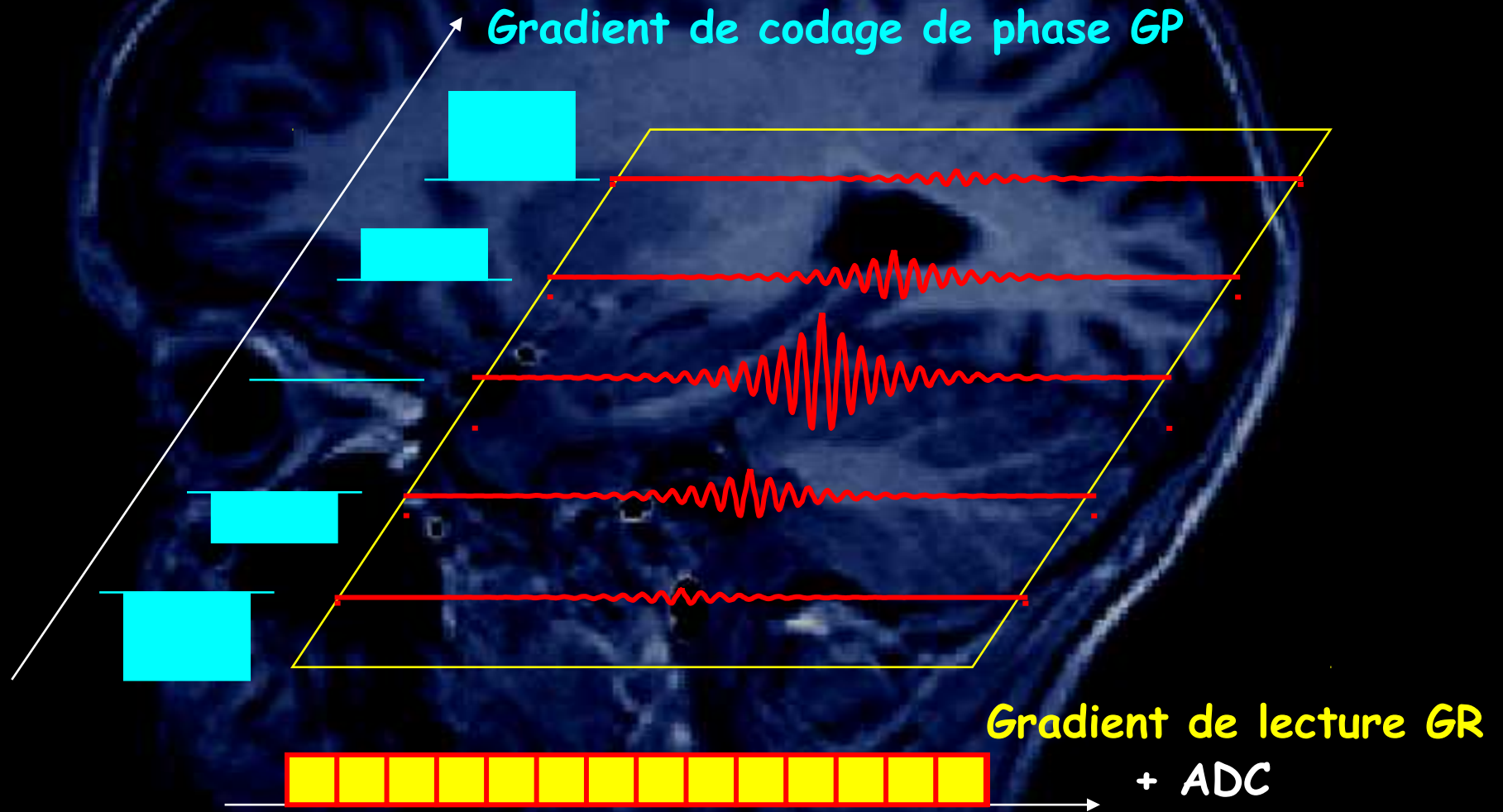
Espace des fréquences (Plan de Fourier)

Le signal après codage spatial

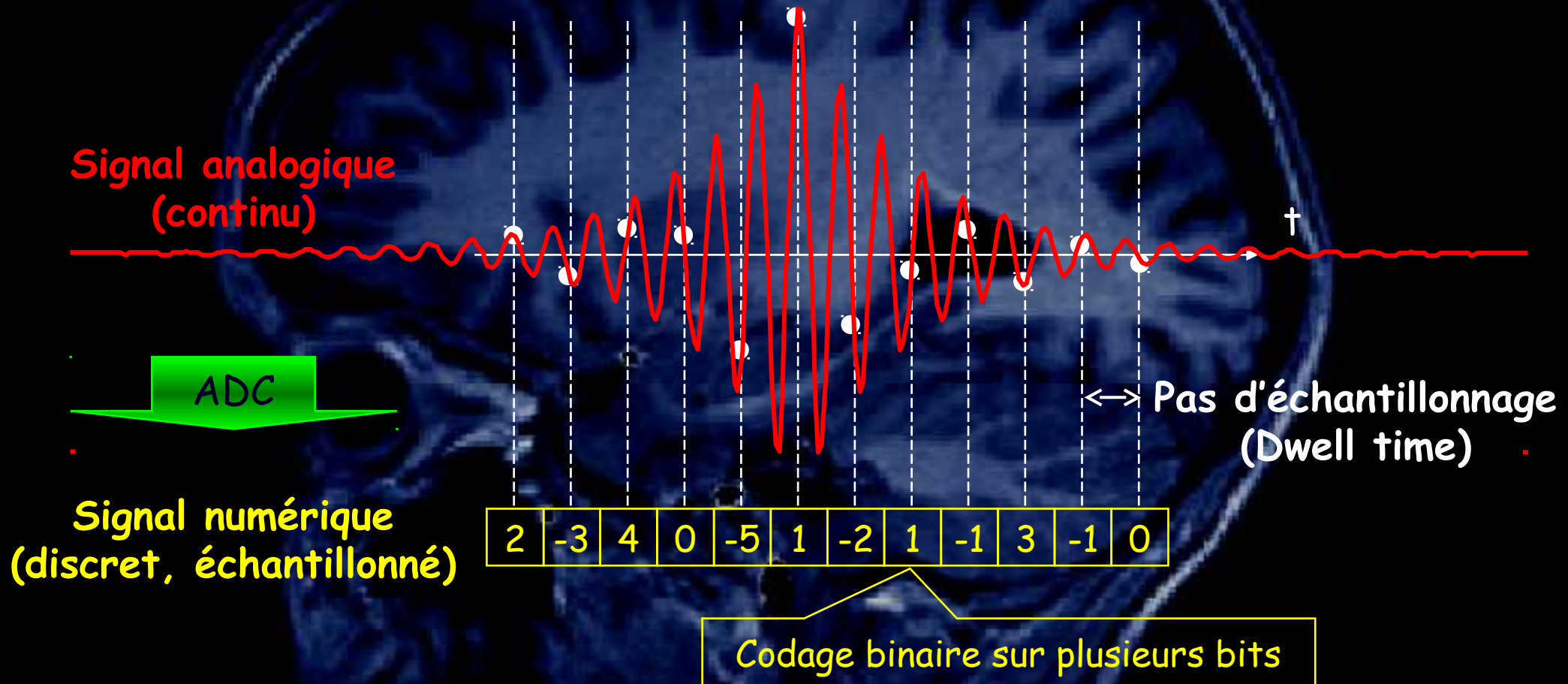
Chaque fois qu'une nouvelle impulsion RF est envoyée, un écho provenant de l'ensemble des protons de la coupe est recueilli :



L'acquisition d'une image

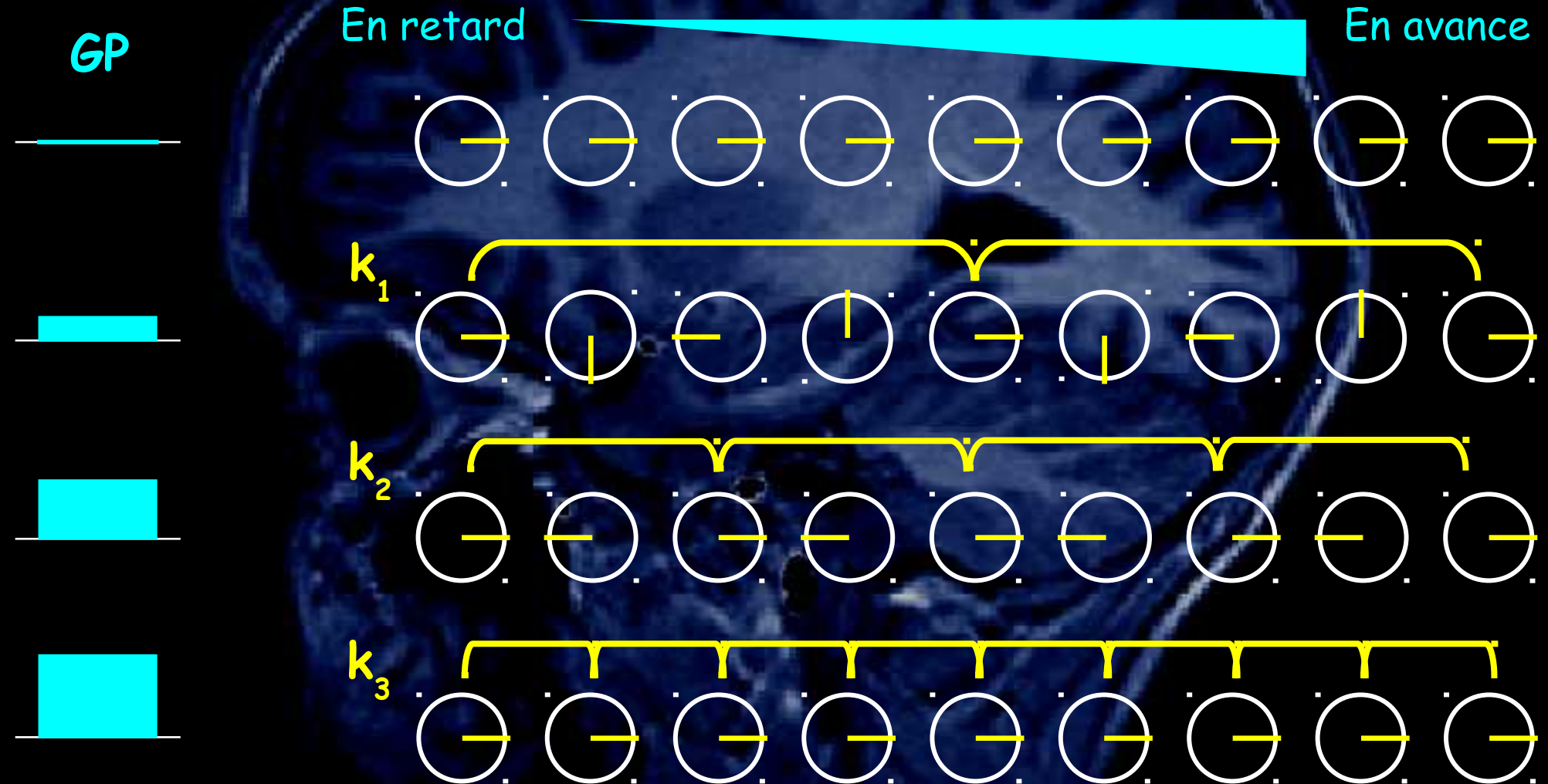


L'acquisition d'une image

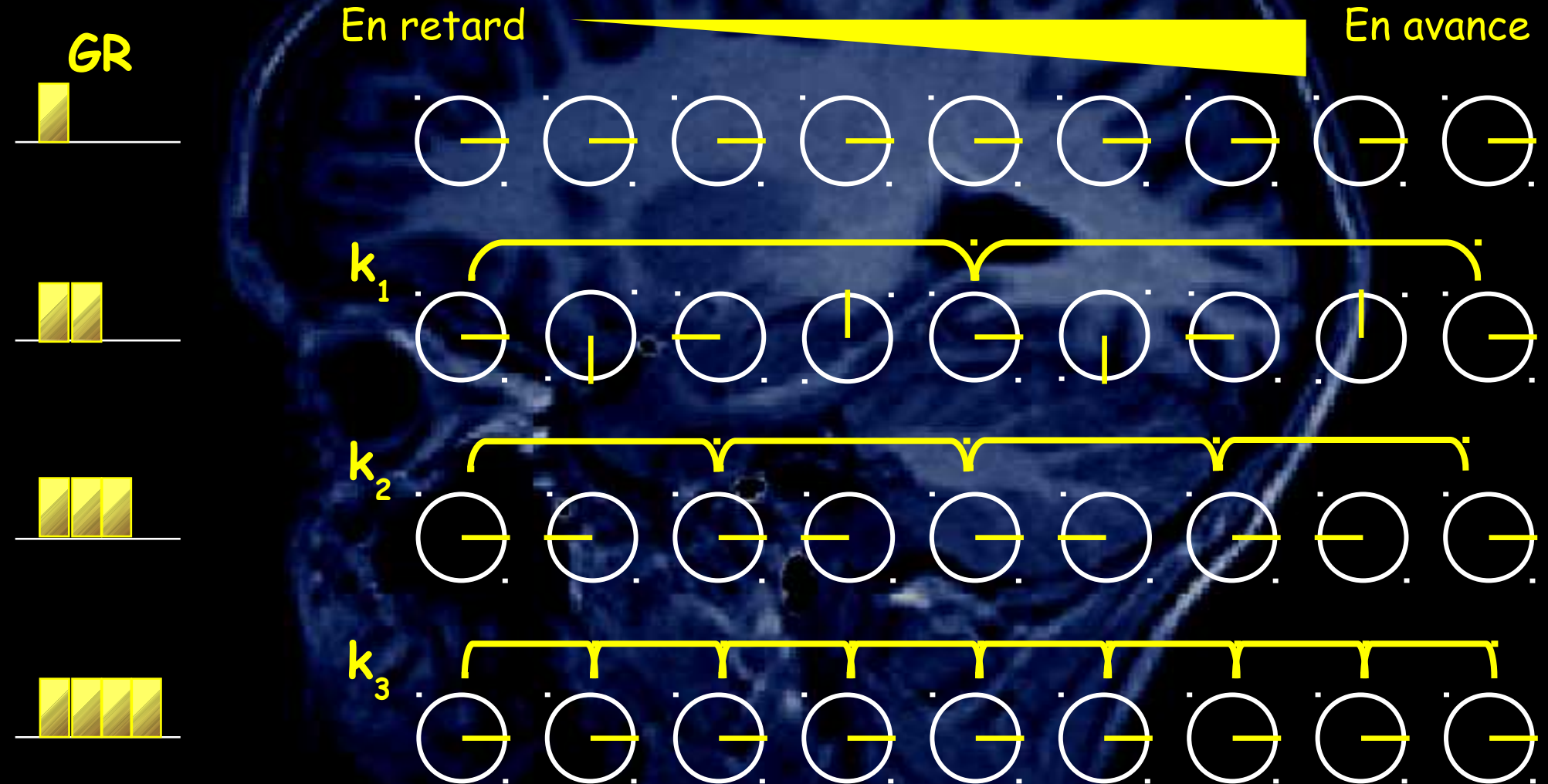


(ADC = Analog-to-Digital converter)

L'acquisition d'une image

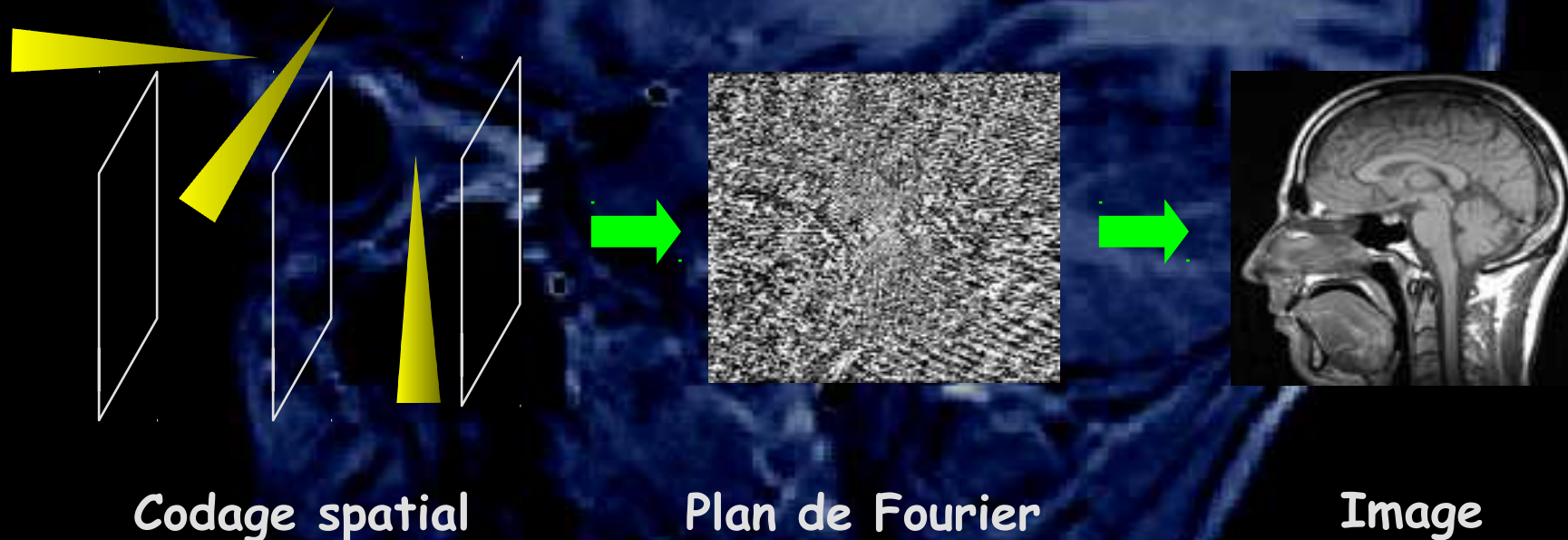


L'acquisition d'une image



L'acquisition d'une image

- L'image en RMN est réalisée en deux étapes :
- l'acquisition du plan de Fourier (codage spatial),
 - la reconstruction (transformation de Fourier).



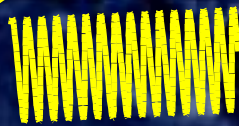
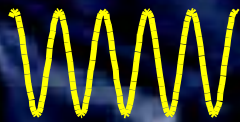
Les fréquences spatiales

La sélection de coupe

Le codage spatial d'une coupe

La relation Fourier / image

La transformation de Fourier



On entend non pas une vibration (fonction du temps) mais une note donc une fréquence.

La transformation de Fourier

La transformée de Fourier est une opération mathématique qui permet de représenter en fréquence des signaux.



Si l'objet à imager est décrit par une fonction $f(r)$ avec r le vecteur direction de coordonnées (X, Y, Z) , sa transformée de Fourier est donnée par :

$$F(k_r) = \iiint f(r) e^{-2i\pi (k_r \cdot r)} dr$$

où $k_r = (k_x, k_y, k_z)$ correspond aux fréquences spatiales du plan de Fourier.

La transformation de Fourier

De même que les signaux 1D présentent des changements d'amplitude (sonore) dans le temps, les signaux 2D présentent des variations d'intensité (lumineuse) dans l'espace.

La transformée de Fourier permet de passer du domaine spatial ou temporel dans le domaine fréquentiel.

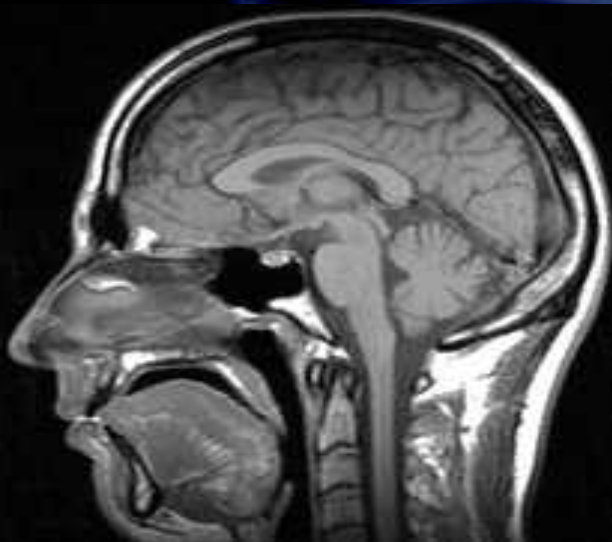
La transformation de Fourier

Dans un signal sonore (signal 1D), les basses fréquences représentent les sons graves et les hautes fréquences, les sons aigus.

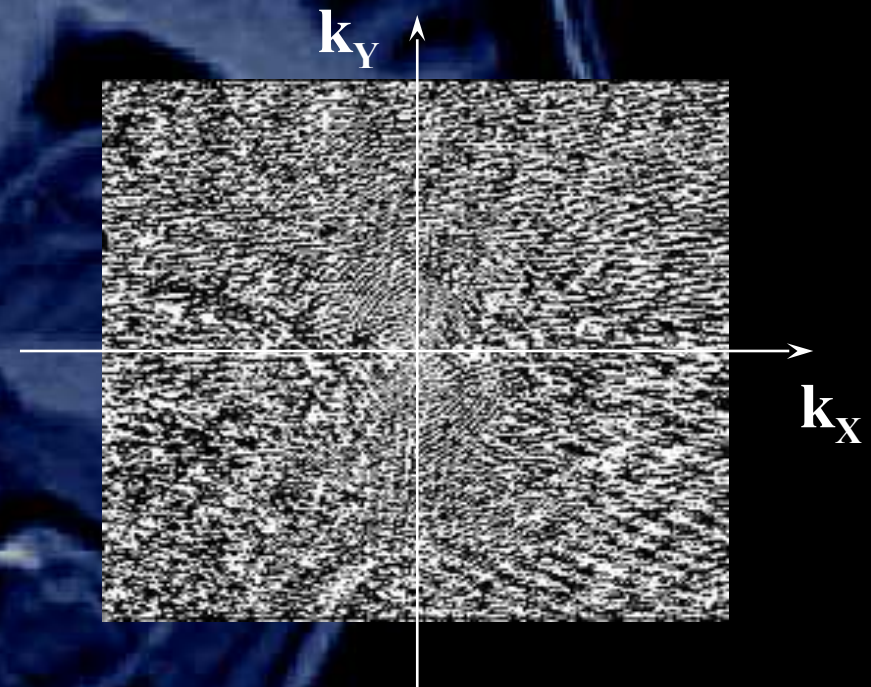
Dans le cas d'une image (signal 2D), les basses fréquences représentent les grandes surfaces homogènes et les parties floues alors que les hautes fréquences représentent les contours, plus généralement les changements brusques d'intensité et enfin le bruit.

Fréquences spatiales en 2D

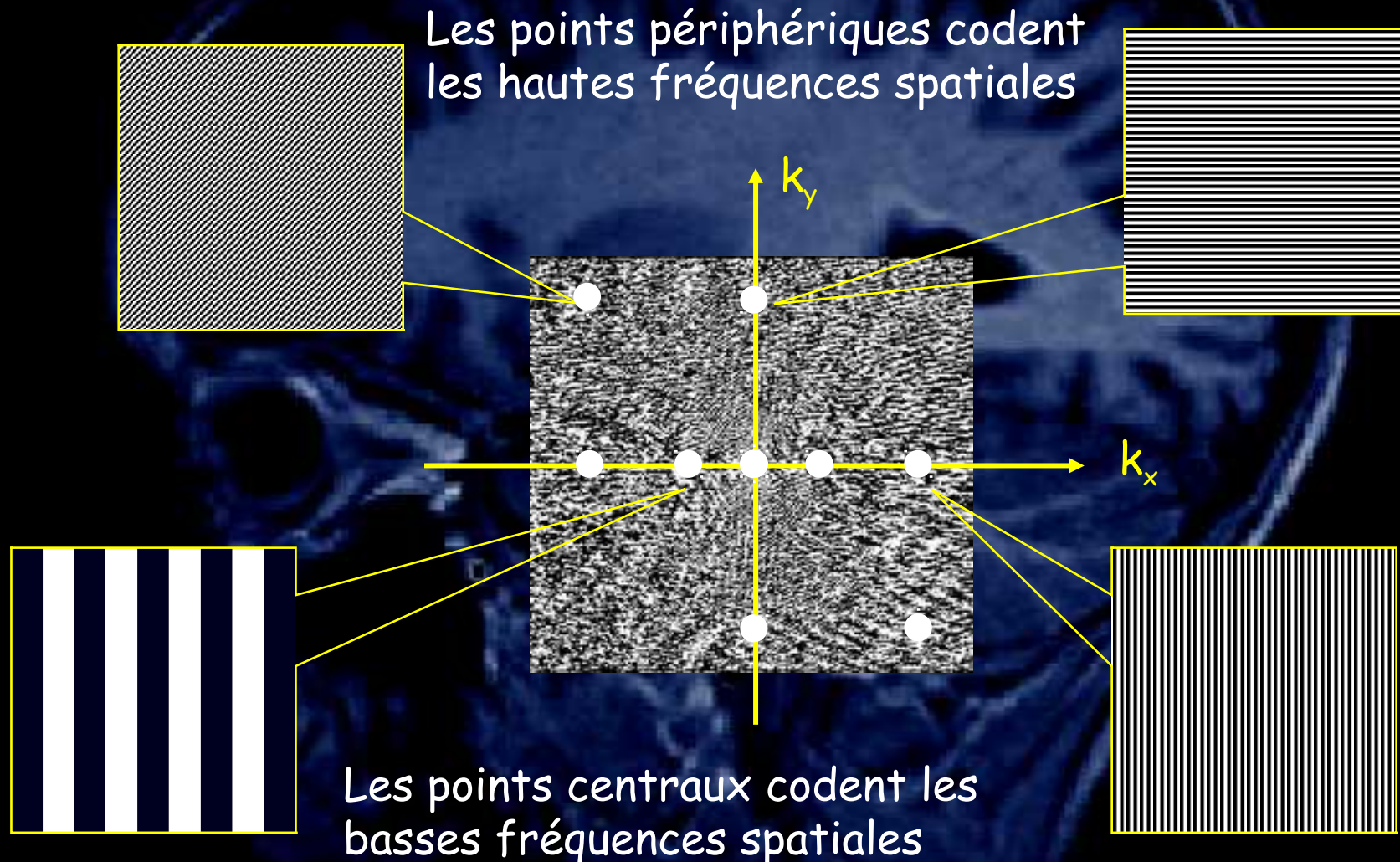
Cerveau



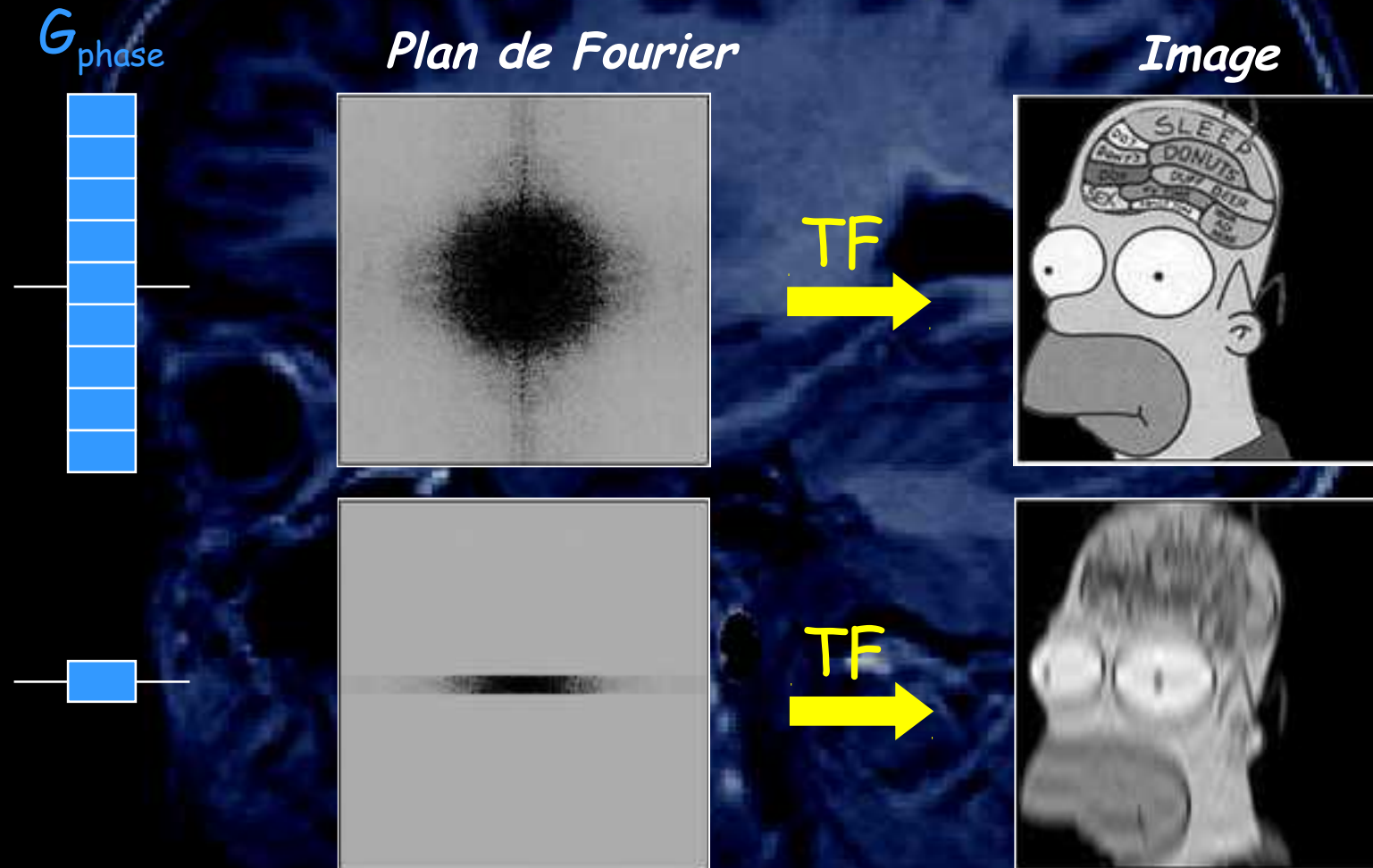
TF



Fréquences spatiales en 2D

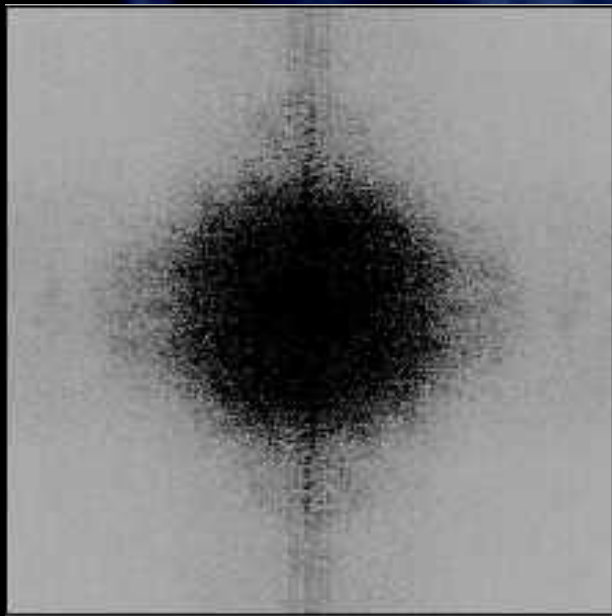


L'information est répartie différemment dans le plan de Fourier et dans l'image.

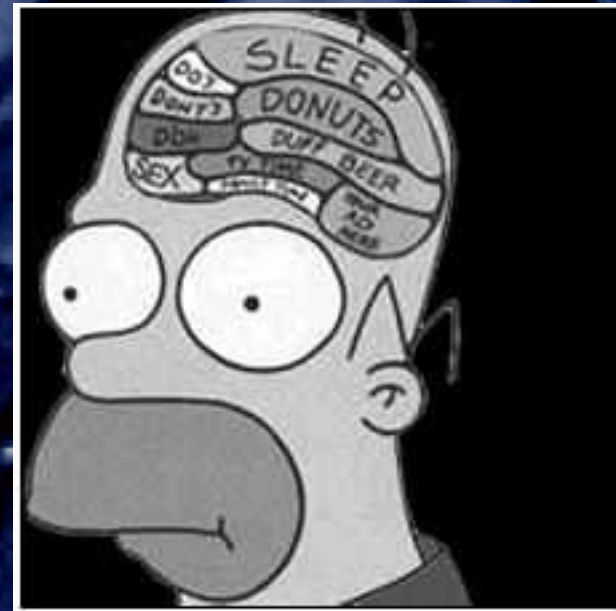


Le centre du plan de Fourier

Le contraste et la forme générale se situent au centre : basses fréquences spatiales.

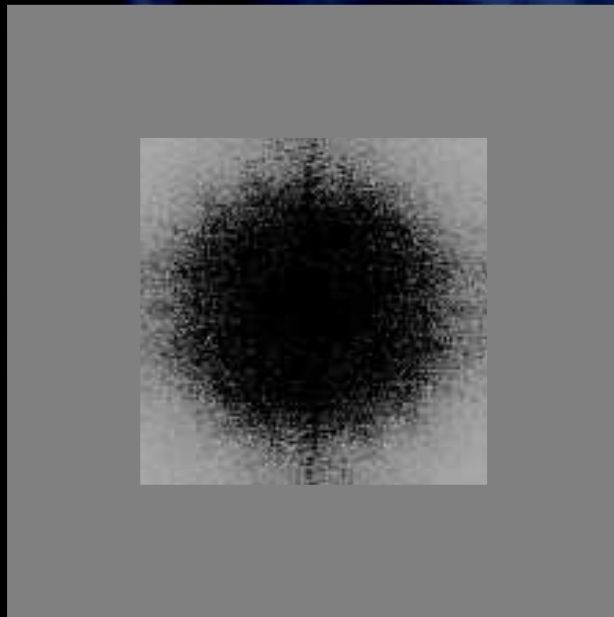


TF
→



Le centre du plan de Fourier

Le contraste et la forme générale se situent au centre : basses fréquences spatiales.

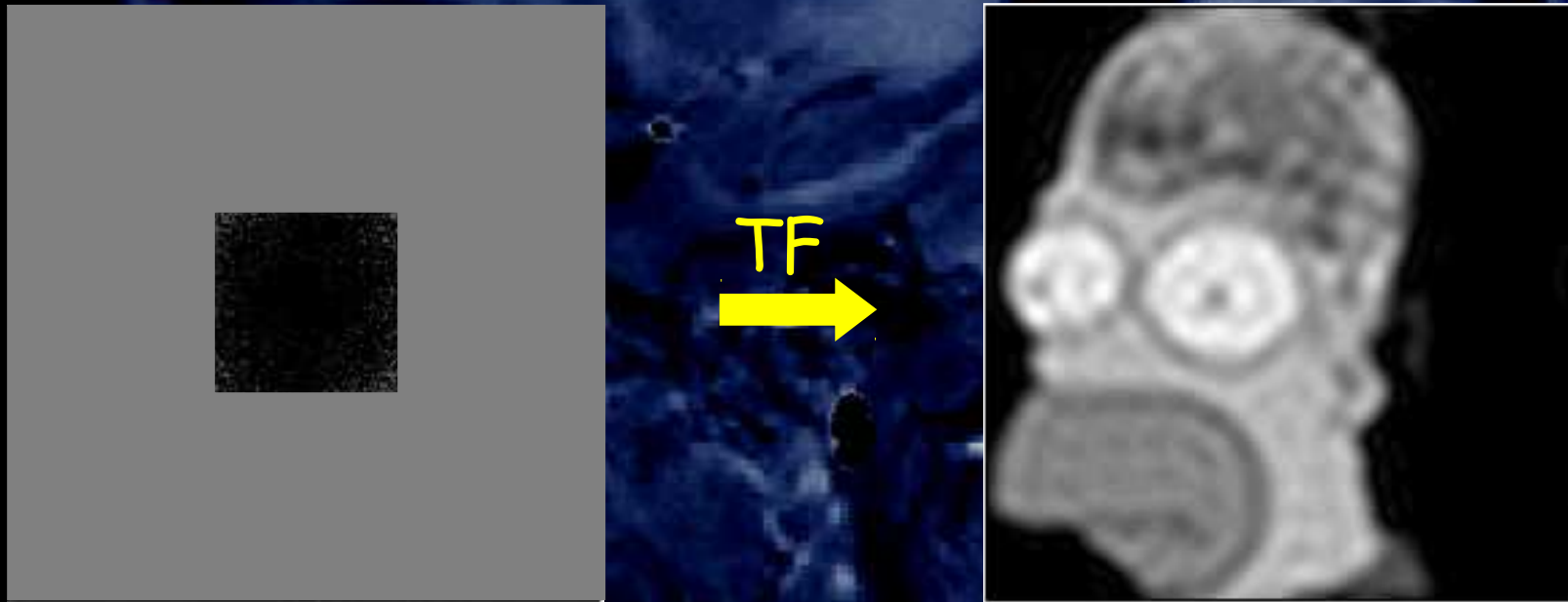


TF
→



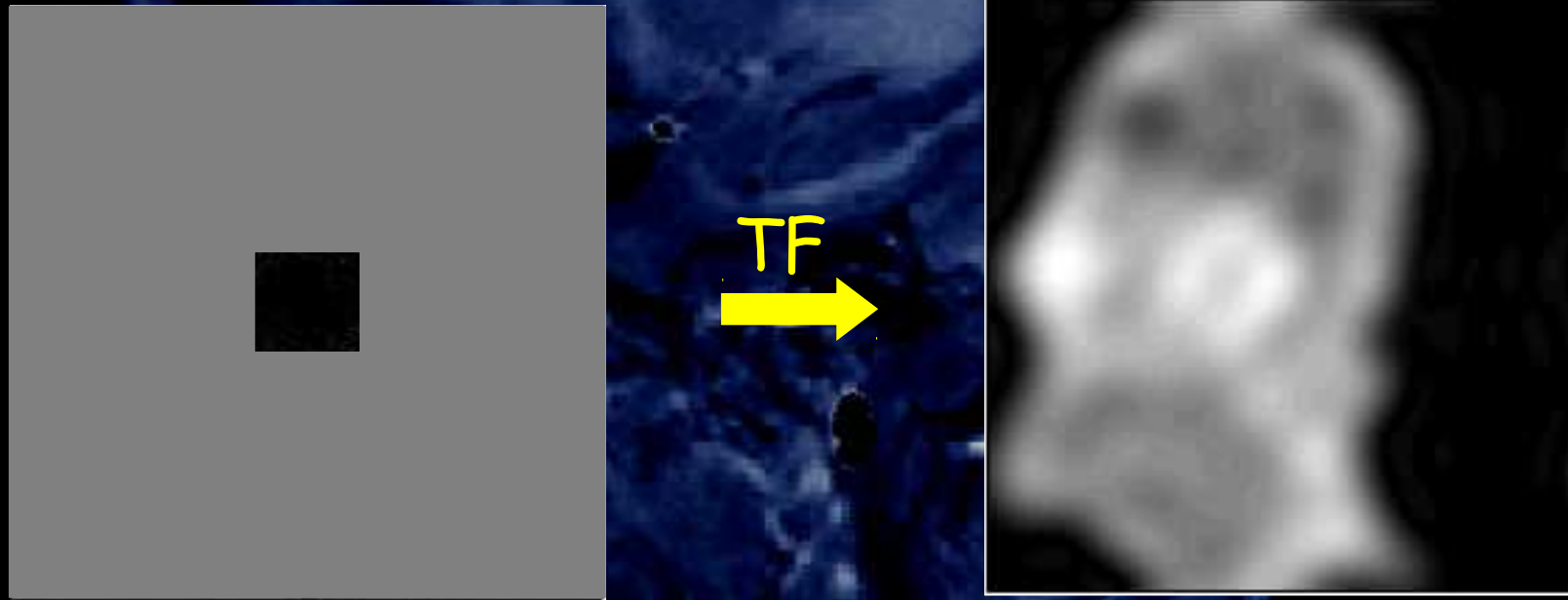
Le centre du plan de Fourier

Le contraste et la forme générale se situent au centre : basses fréquences spatiales.



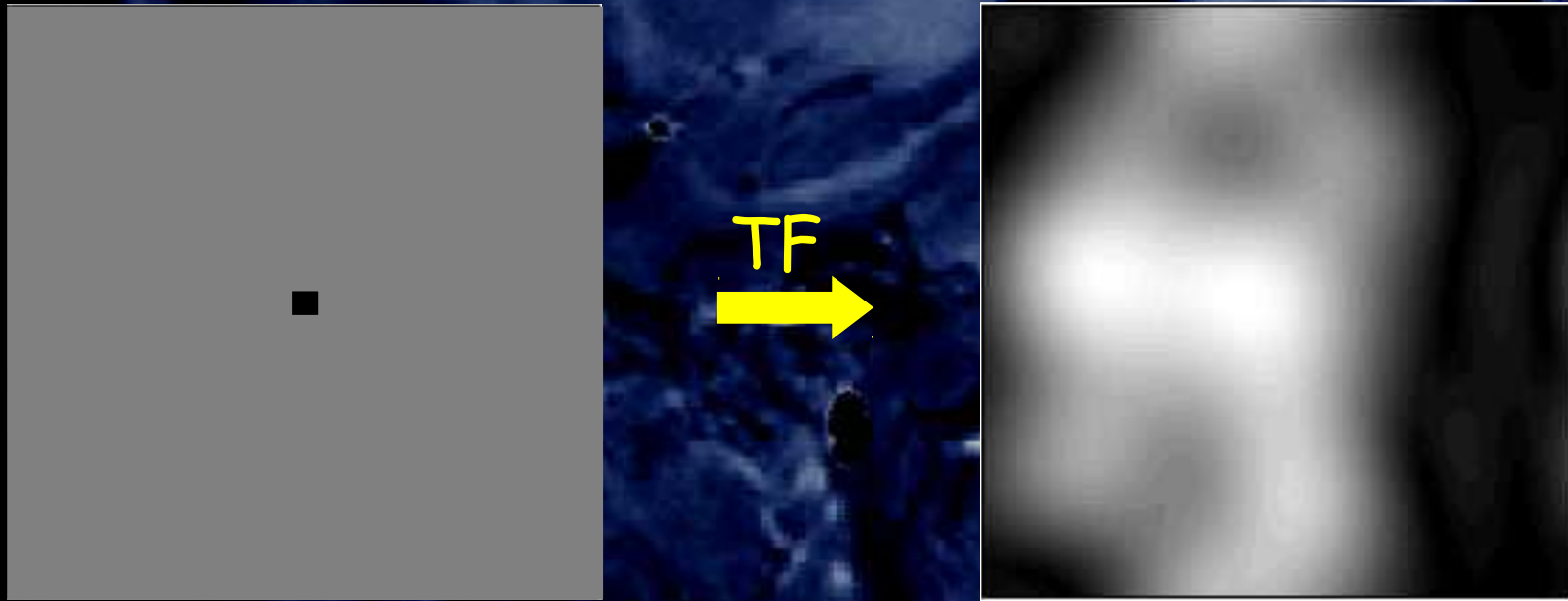
Le centre du plan de Fourier

Le contraste et la forme générale se situent au centre : basses fréquences spatiales.



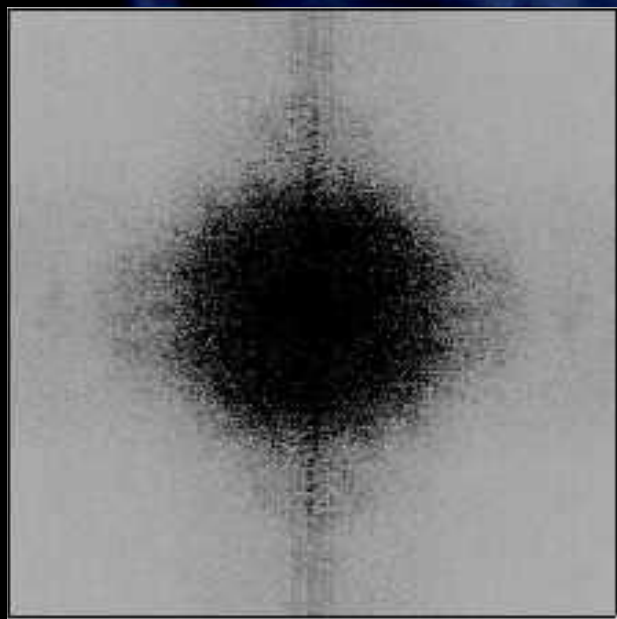
Le centre du plan de Fourier

Le contraste et la forme générale se situent au centre : basses fréquences spatiales.

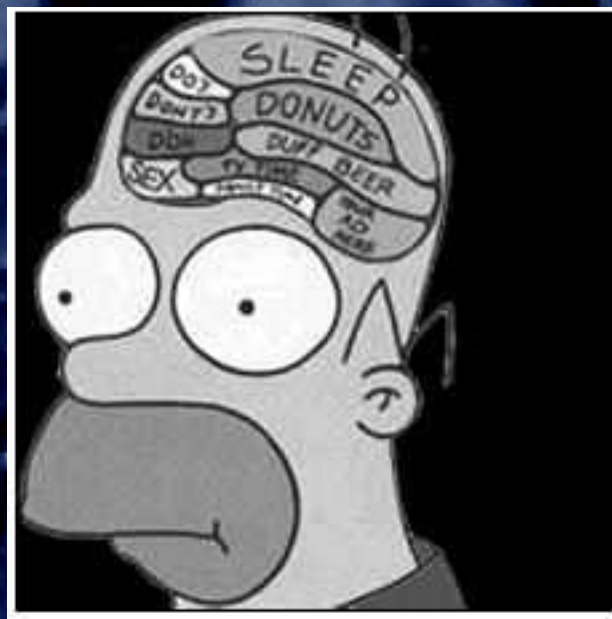


La périphérie du plan de Fourier

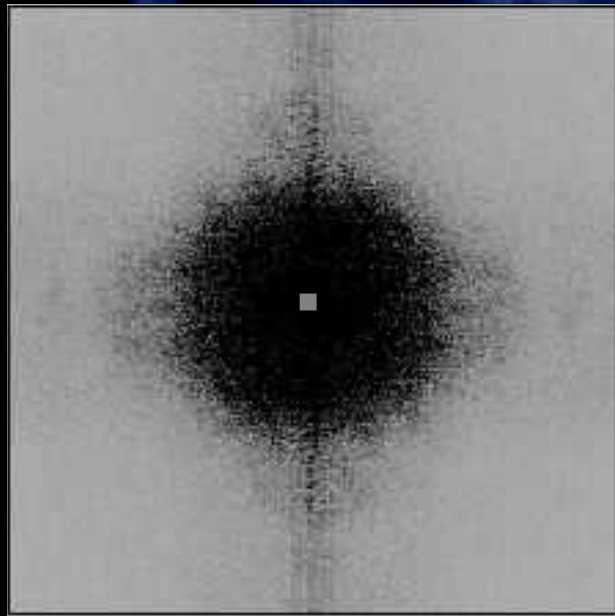
La résolution spatiale et les contours se situent en périphérie : hautes fréquences spatiales.



TF



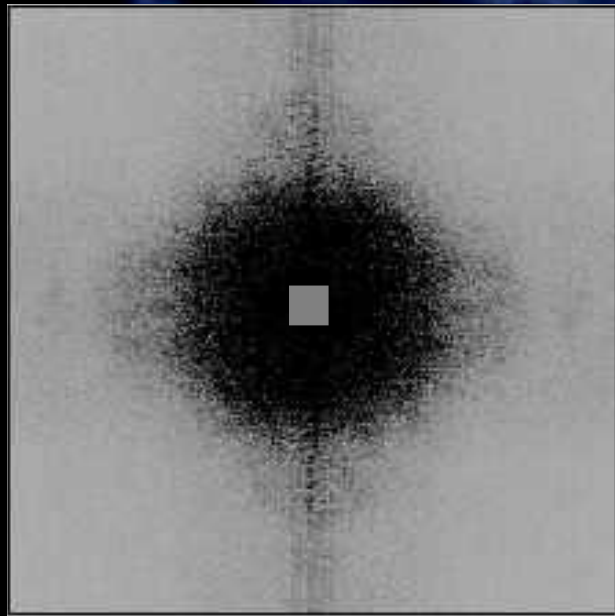
La résolution spatiale et les contours se situent en périphérie : hautes fréquences spatiales.



TF
→



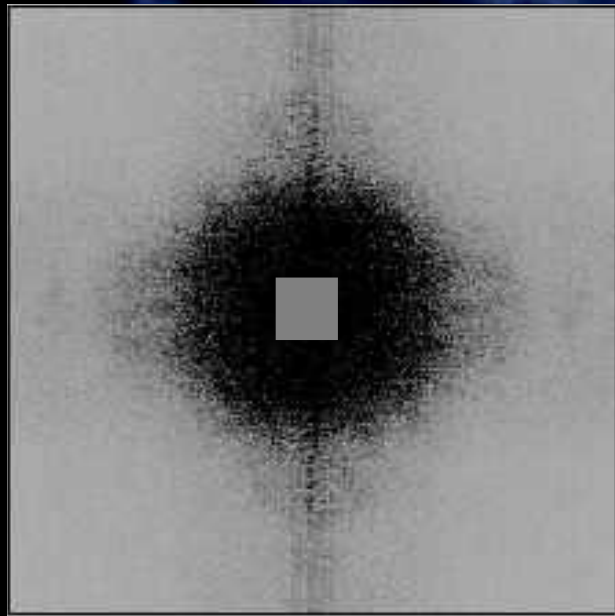
La résolution spatiale et les contours se situent en périphérie : hautes fréquences spatiales.



TF
→



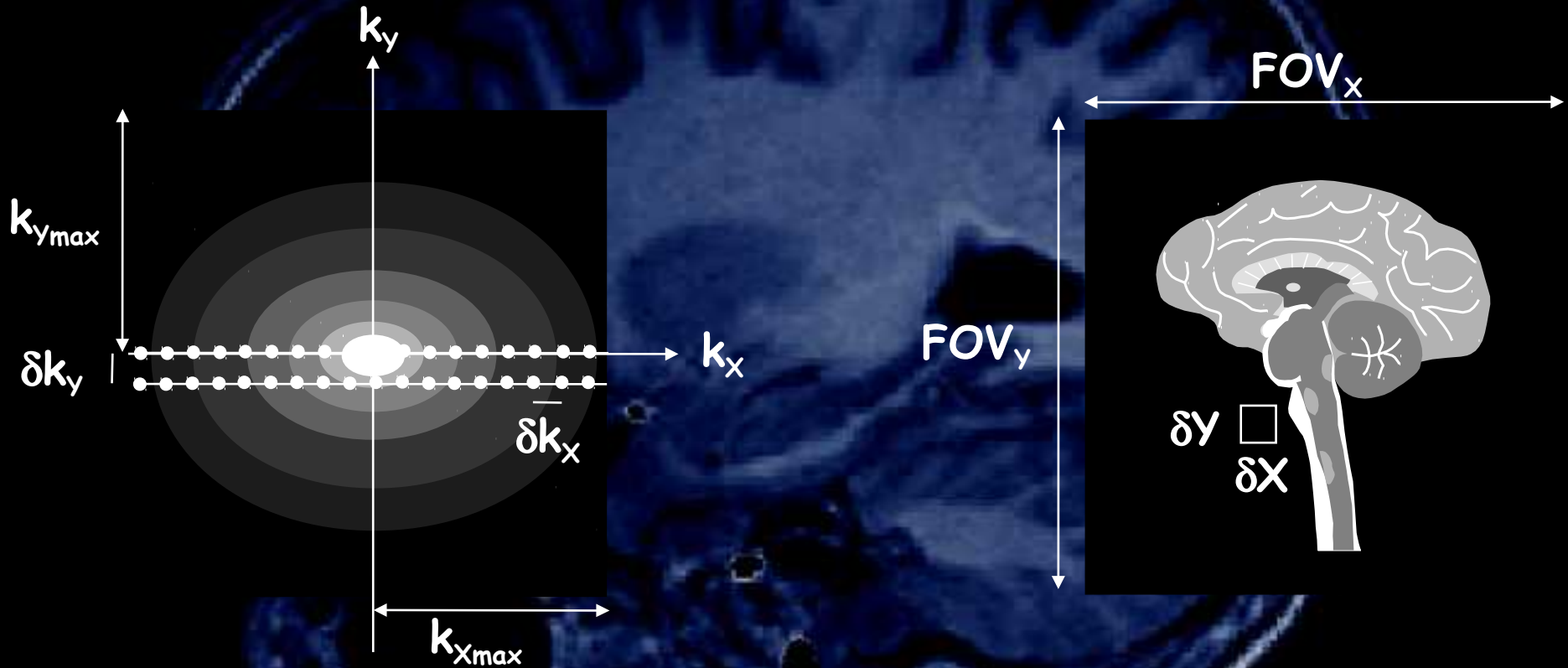
La résolution spatiale et les contours se situent en périphérie :
hautes fréquences spatiales.



TF
→



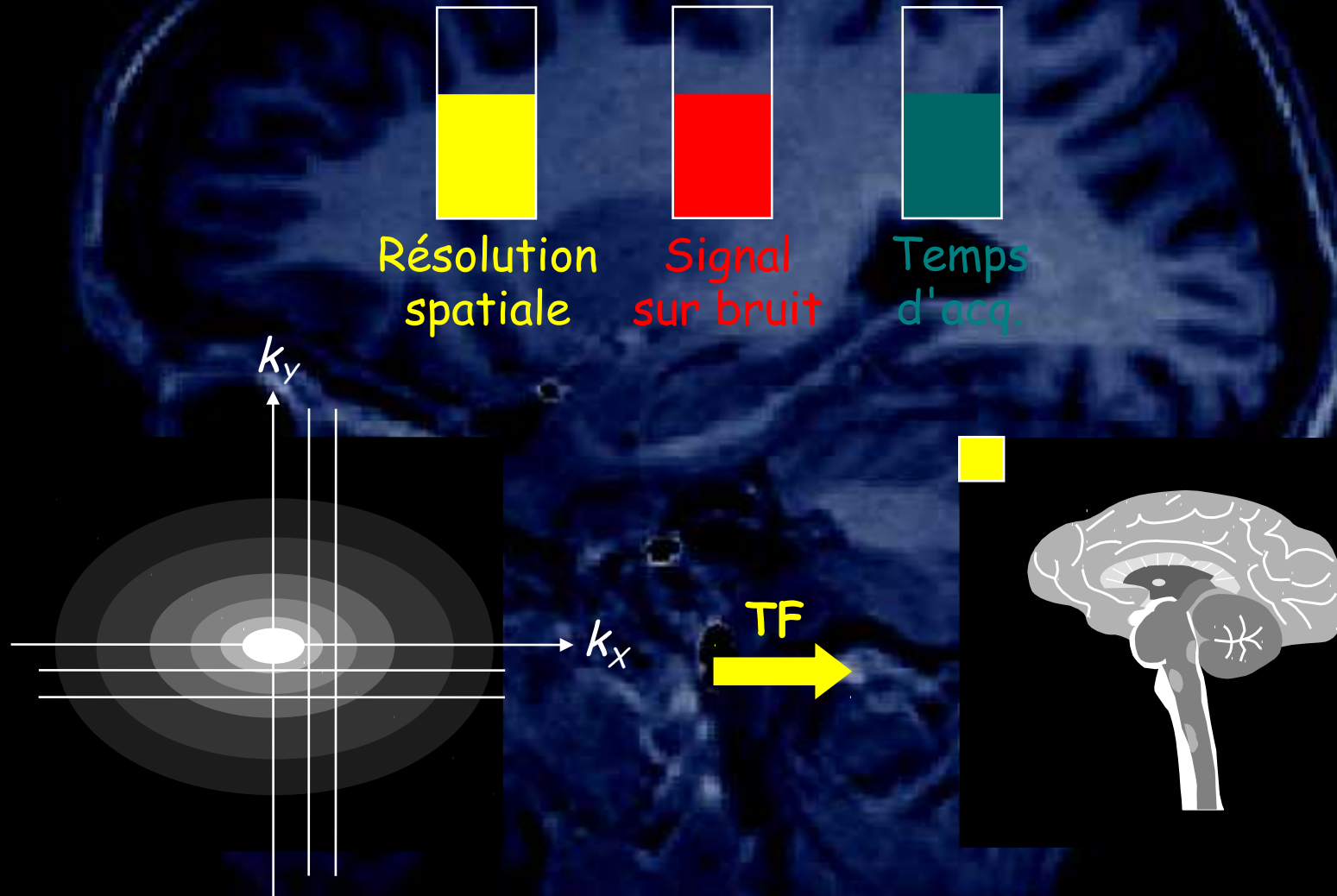
La relation Plan de Fourier - Image



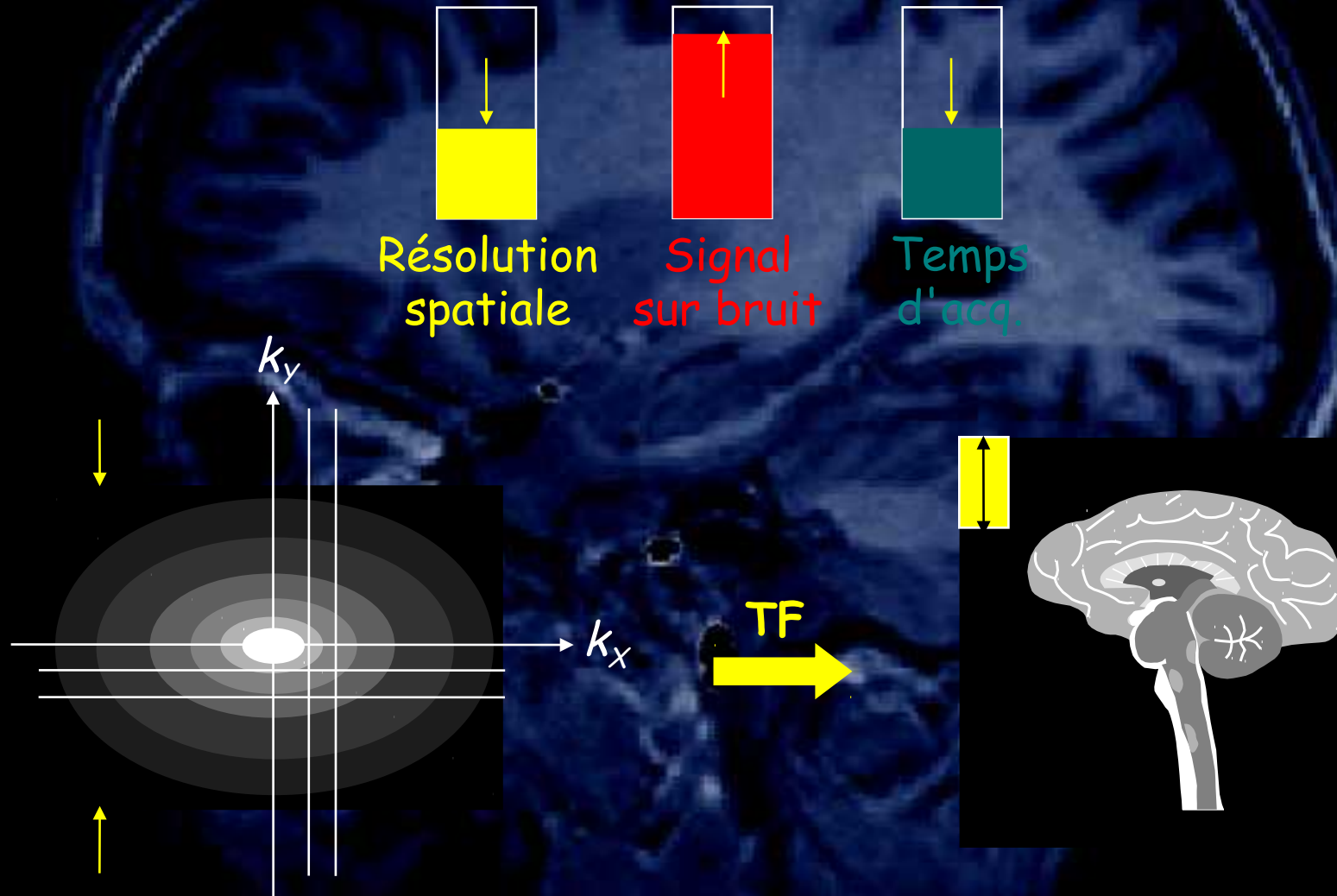
$$FOV_{X \text{ ou } Y} = \frac{1}{\delta k_{X \text{ ou } Y}}$$

$$\delta X \text{ ou } \delta Y = \frac{1}{k_{Xmax \text{ ou } Ymax}}$$

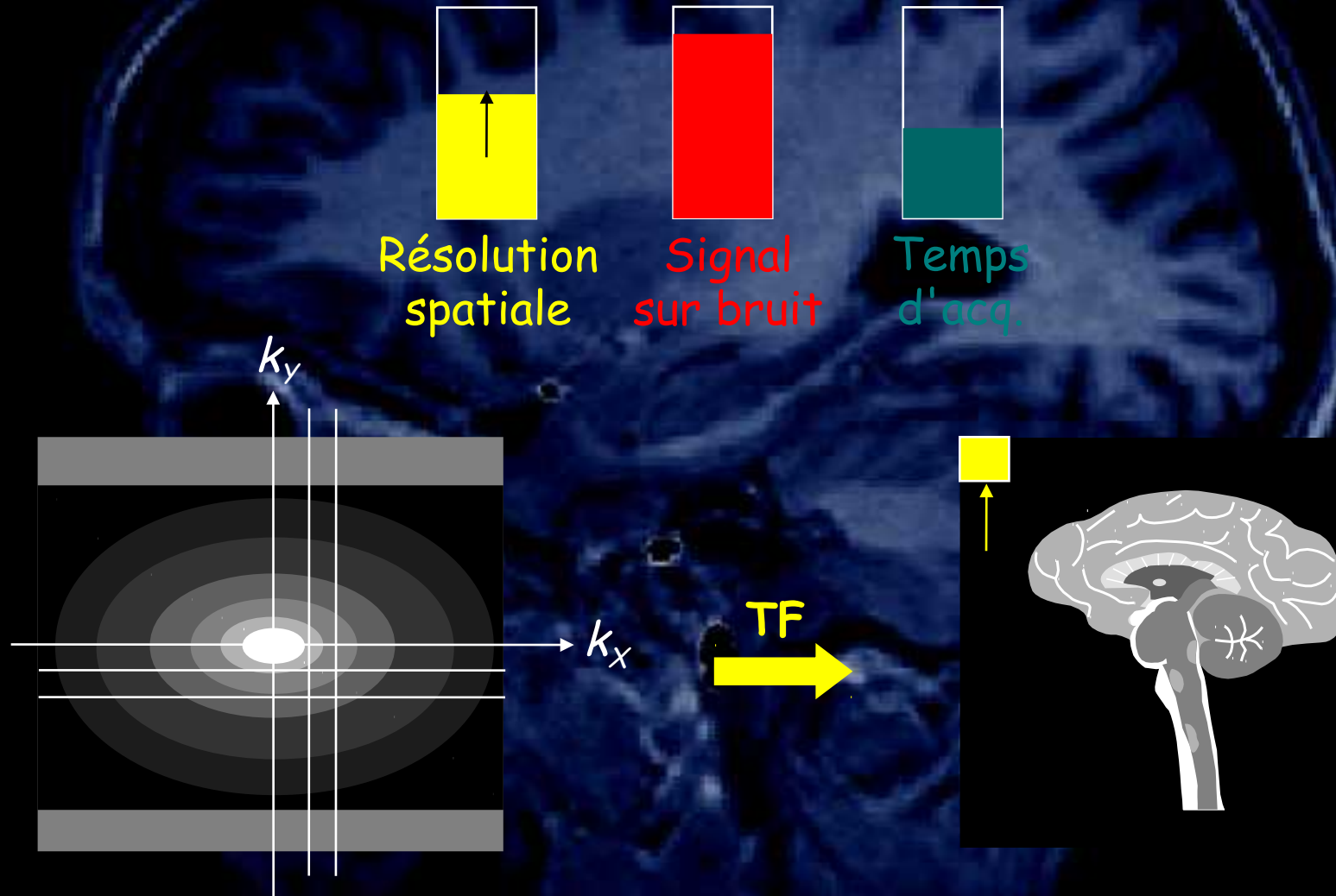
Matrice carrée



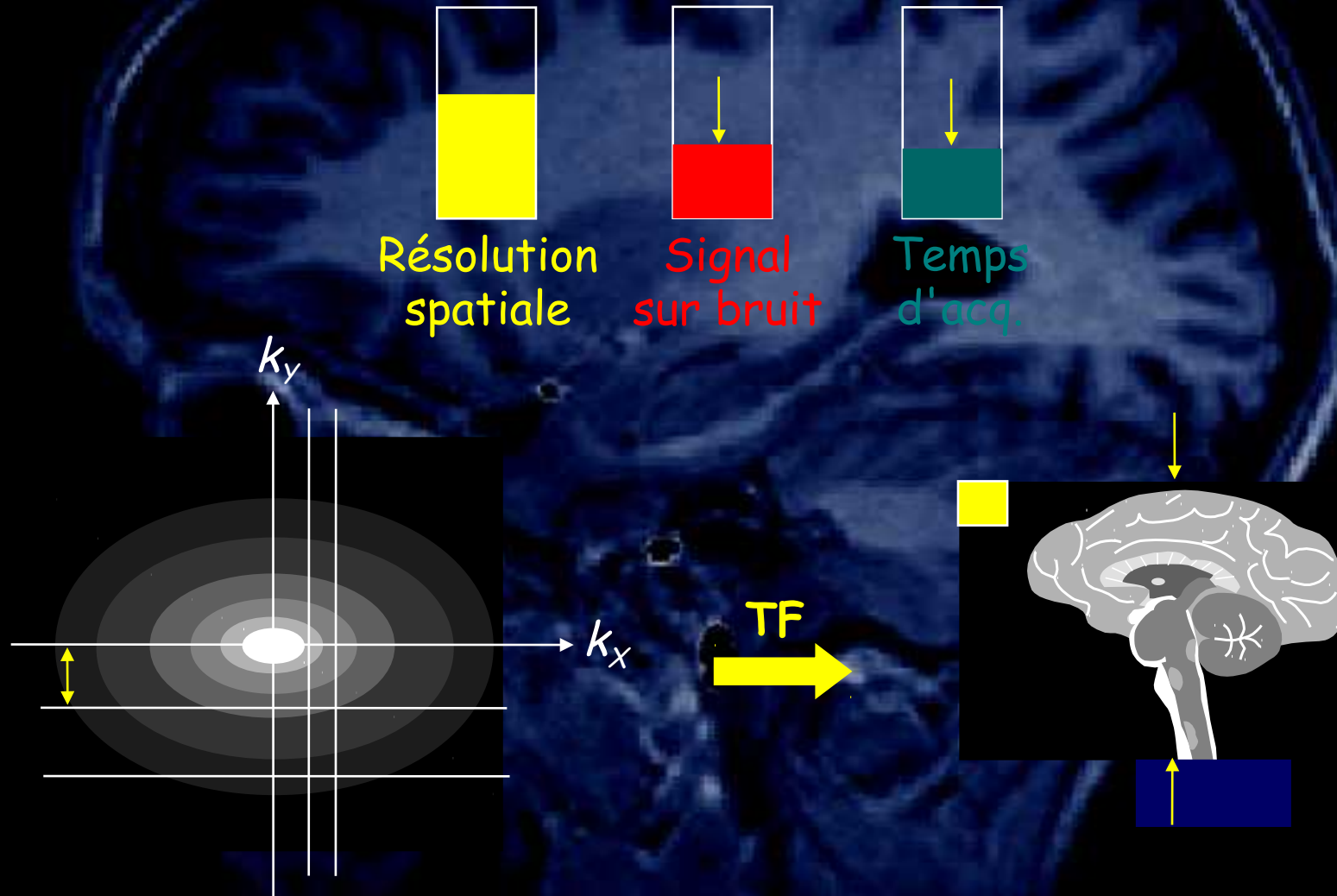
Matrice rectangulaire



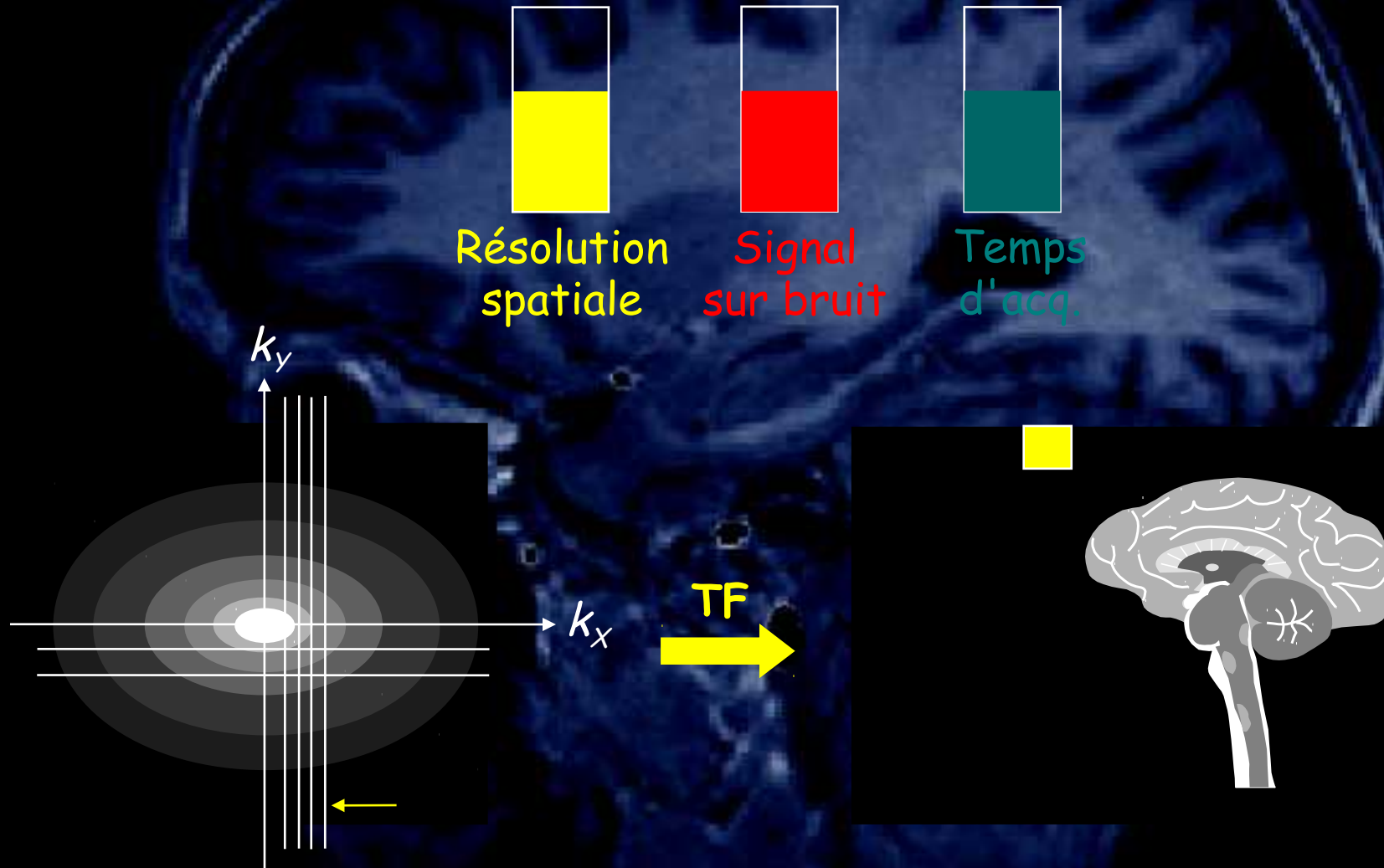
Zero-filling



FOV rectangulaire



Suréchantillonnage en fréquence



Suréchantillonnage en phase

