INRAE

Résumé: les points importants du cours d'instrumentation RMN

Le matériel

- Au minimum
  - 1 aimant
  - 1 chaine RF pour exciter puis recevoir le signal
  - 1 sonde

- En général
  - 1 système de gradients
  - Des bobines pour homogénéiser $\mathbf{B}_0$
  - 1 système pour verrouiller le champ
  - 1 système de régulation de T
  - …

Le déroulé de l'expérience RMN

- Accorder la sonde
- Verrouiller le champ magnétique
- Homogénéiser le champ magnétique
- Déterminer la durée/puissance de l'impulsion
- Régler les paramètres de l'expérience
- Traiter le spectre RMN

INRAE

AgroResonance

Plateforme RMN pour l'agronomie, l'agro-alimentaire et la nutrition

Imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM)

Guilhem Pagés

Spectroscopie (RMN) vs Imagerie (IRM)

- Spectroscopie: Obtention d'un spectre donnant des informations sur la composition/structure chimique

- Imagerie: Codage spatial du signal RMN dans le but d'obtenir une image (1, 2 ou 3D)

Quelques challenges

- RMN: Méthode analytique relativement peu sensible

- Imagerie: Signal « découper » dans l'espace

Comment obtenir assez de signal?

IRM et le vivant

- L'eau est la molécule la plus présente dans le vivant (30-50 M chez l'homme)

- $^{1}H_2O$
  - γ et abondance naturelle du ^{1}H très élevés (sensibilité)
  - 2 protons par molécule d'eau

Observation des molécules d'eau

Comparaison RMN - IRM

RMN	IRM
➢ Enregistrement de la FID pour obtenir le spectre (théorème de Nyquist)	➢ Aucune information spectrale: besoin de quelques points du signal seulement
➢ Aucune information spatiale	➢ Le signal doit dépendre de la position spatiale

Coder spatialement le signal

- Gradients de champ magnétique
  - La fréquence et la phase du signal vont dépendre de la position spatiale des spins

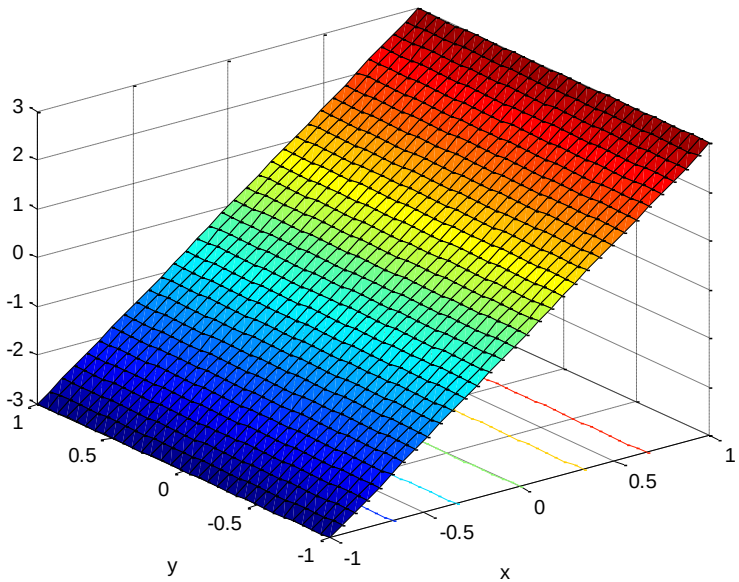
Sans gradients $\omega_0 = \gamma \mathbf{B}_0$

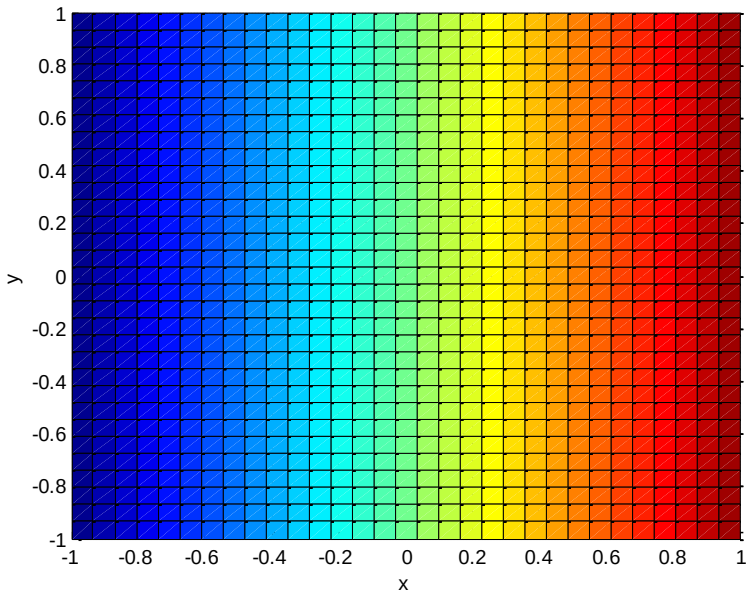
Avec gradients $\omega_0 = \gamma(\mathbf{B}_0 + \mathrm{G}_{dir} d_{dir})$

G_{dir} = intensité des gradients
dir= une ou une combinaison des 3 directions (x,y,z)
d= distance du point de l'espace au centre magnétique de l'aimant

Quelques exemples

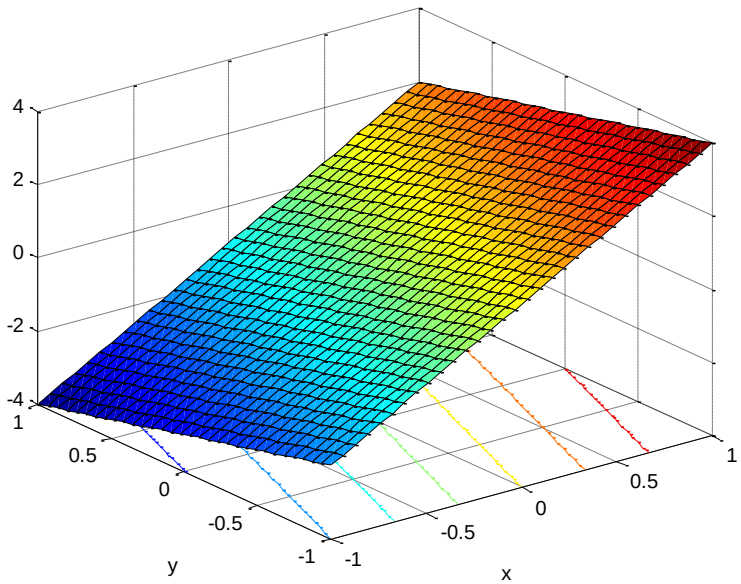
- $G_x=3$ $G_y=0$ $G_z=0$

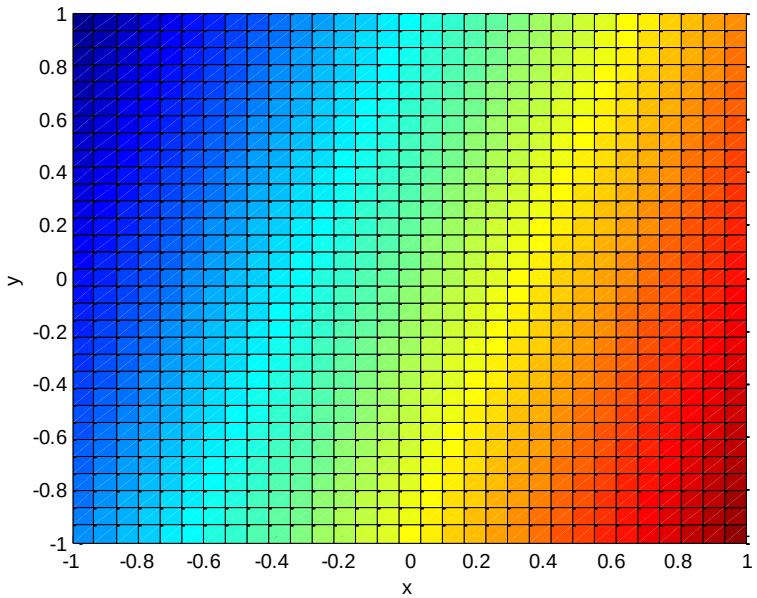




Quelques exemples

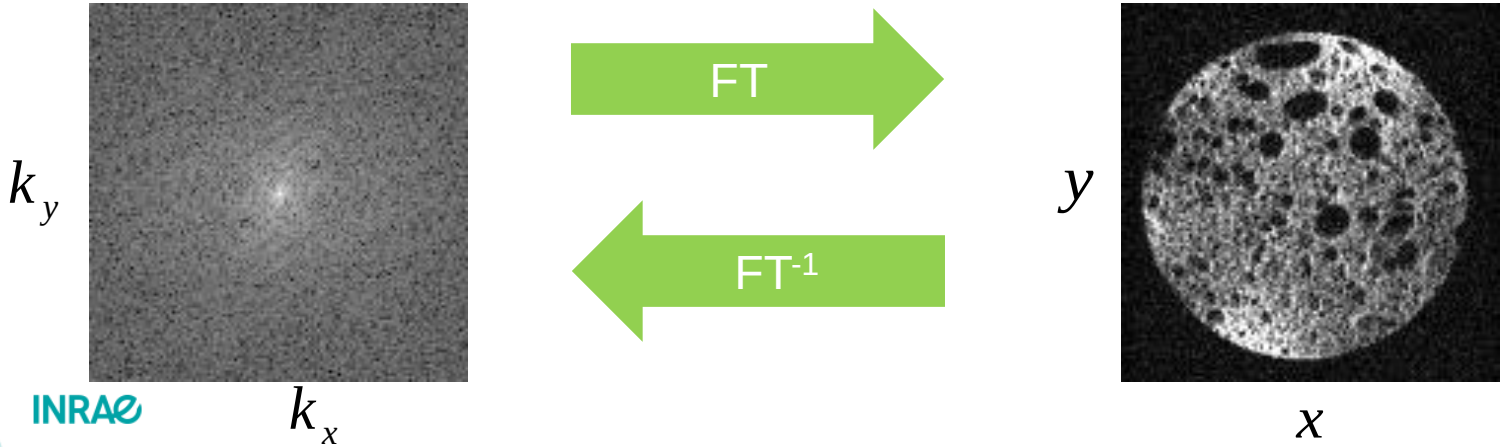
- $G_x=3$ $G_y=-1$ $G_z=0$





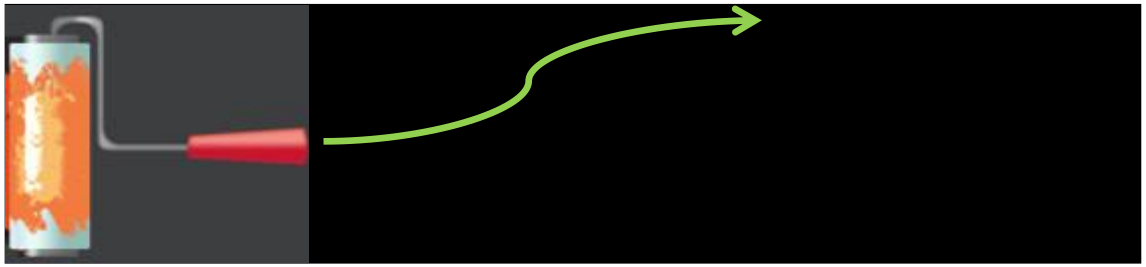
L'espace des k

- Changement de repère
- Signal RMN en fonction des fréquences spatiales
- Double Transformée de Fourier pour obtenir une image



Comment enregistrer un image?

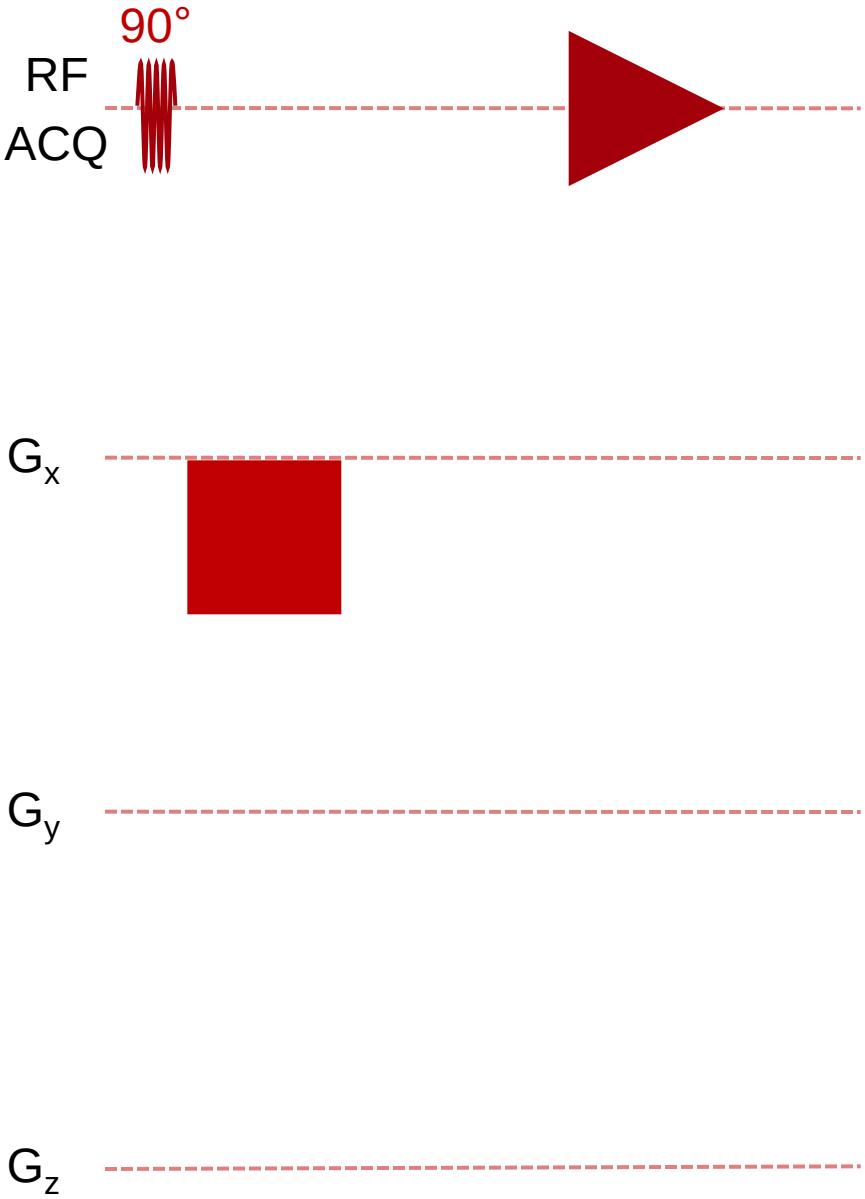
- Varier les gradients de champ magnétique pour se déplacer dans l'espace des k

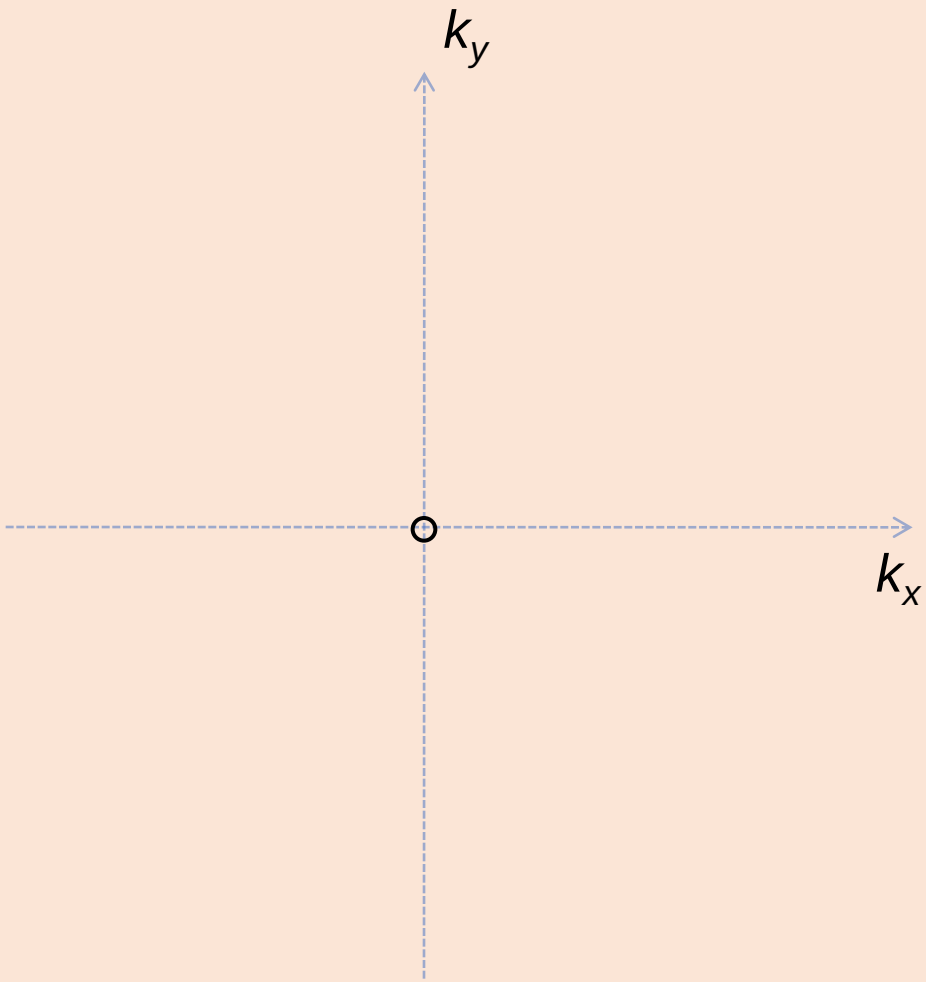


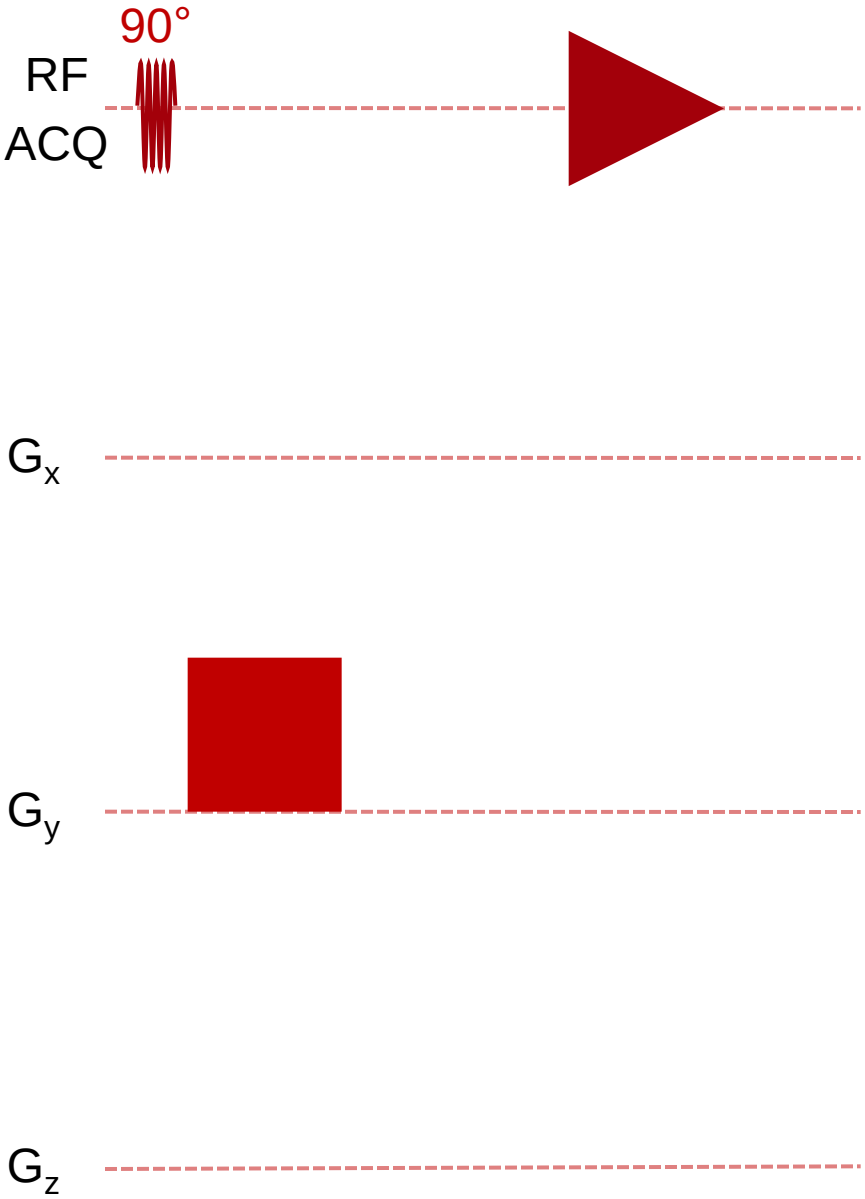
- Enregistrer le signal RMN pour remplir l'espace des k

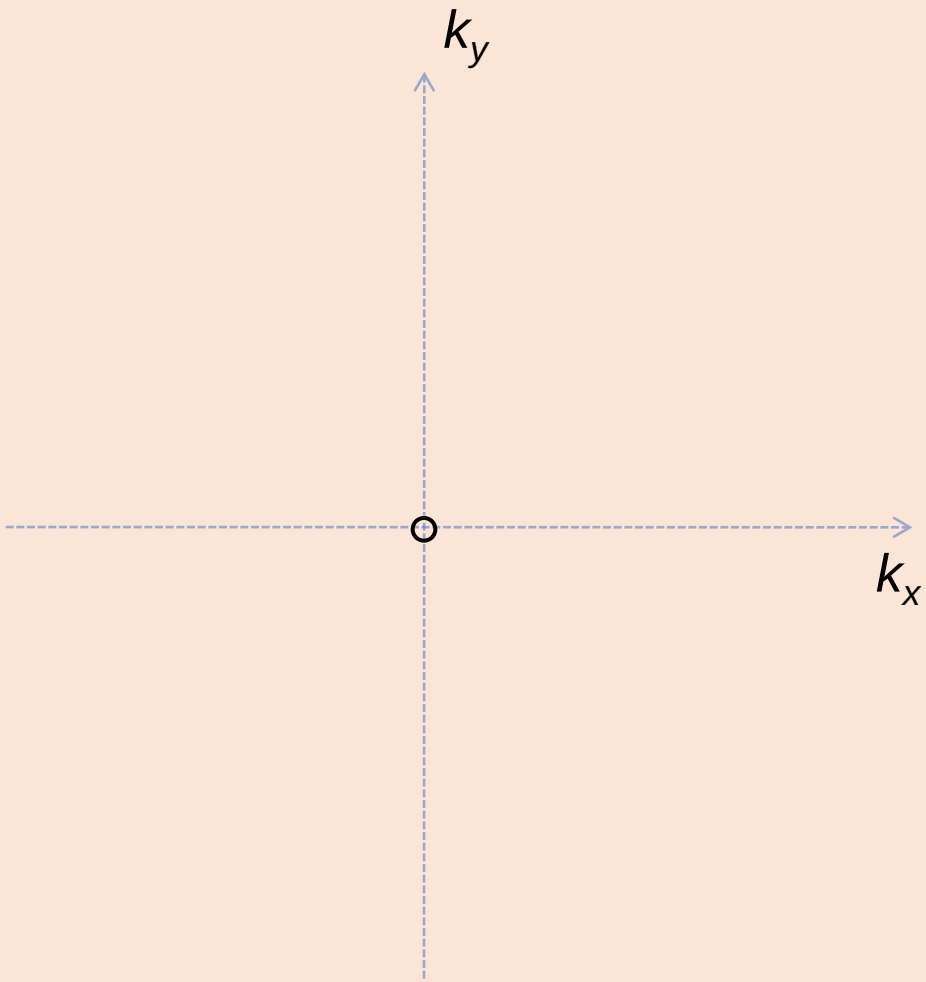
En pratique

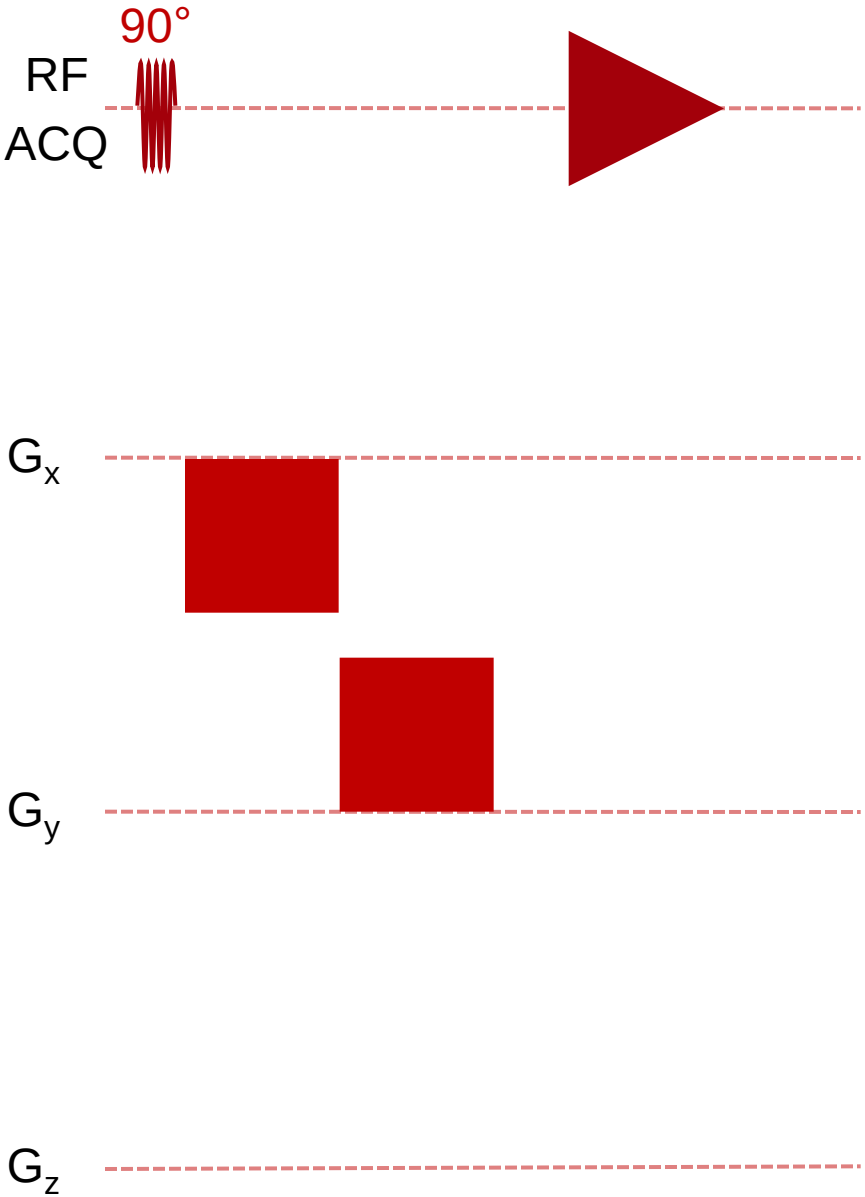
- Exemple de remplissage de l'espace des k

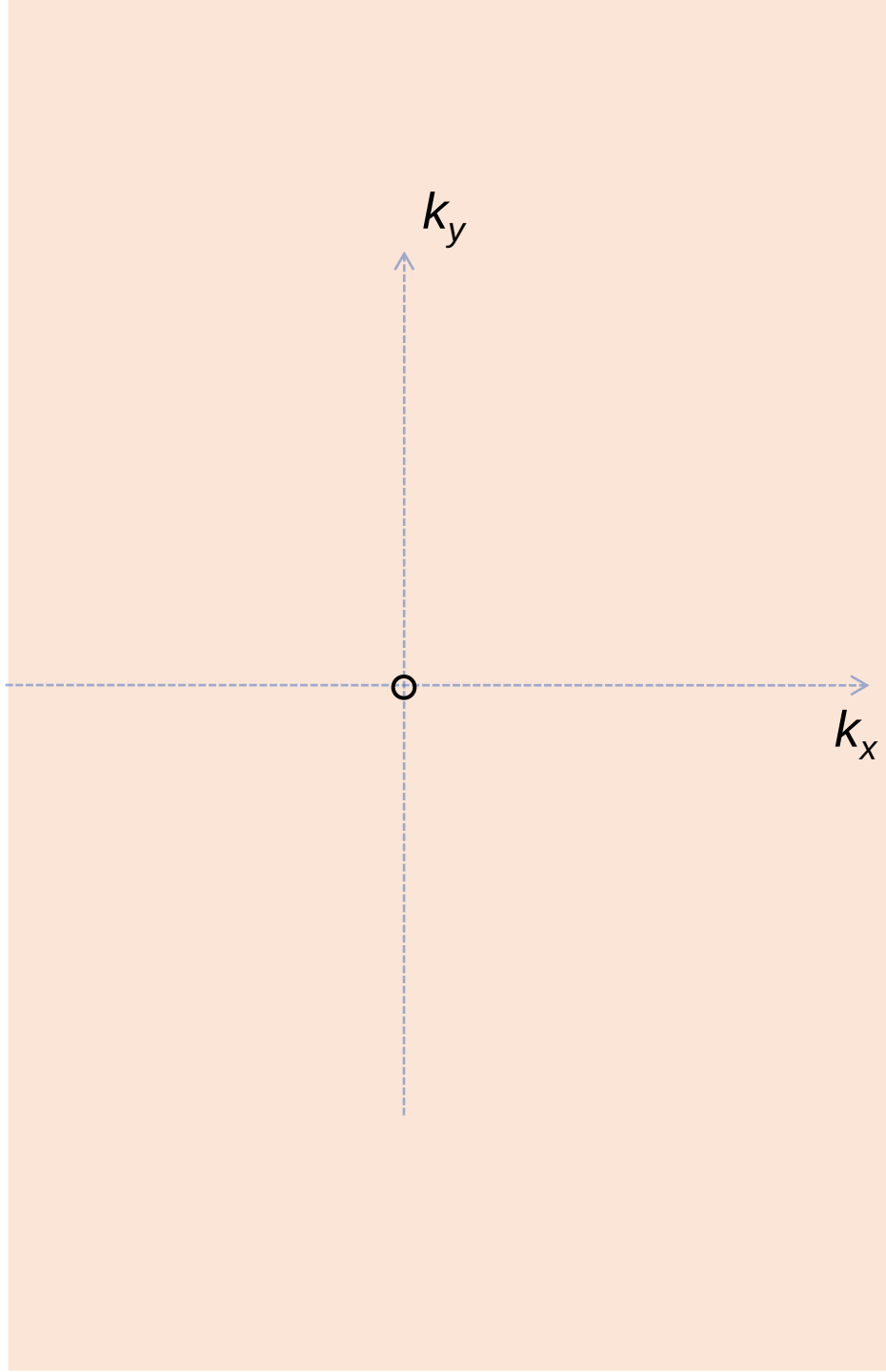

90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z

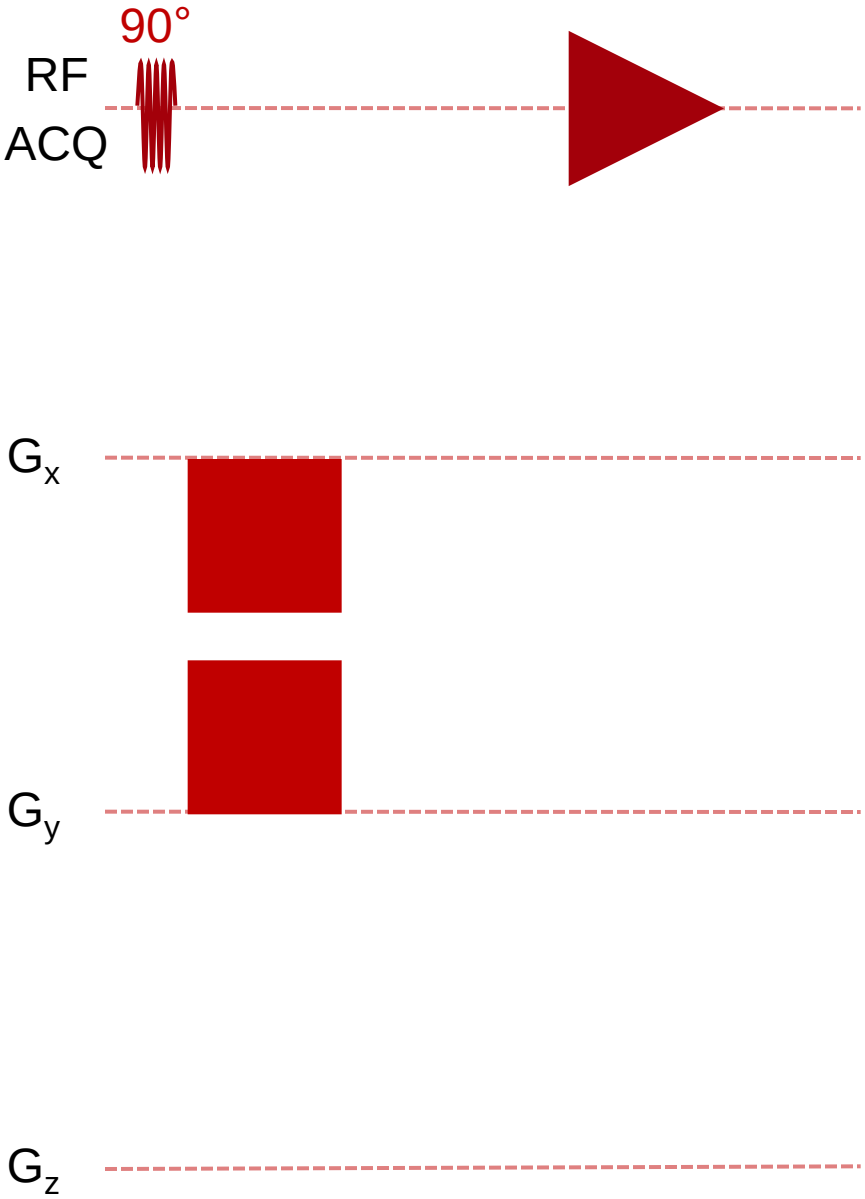

k_y
k_x

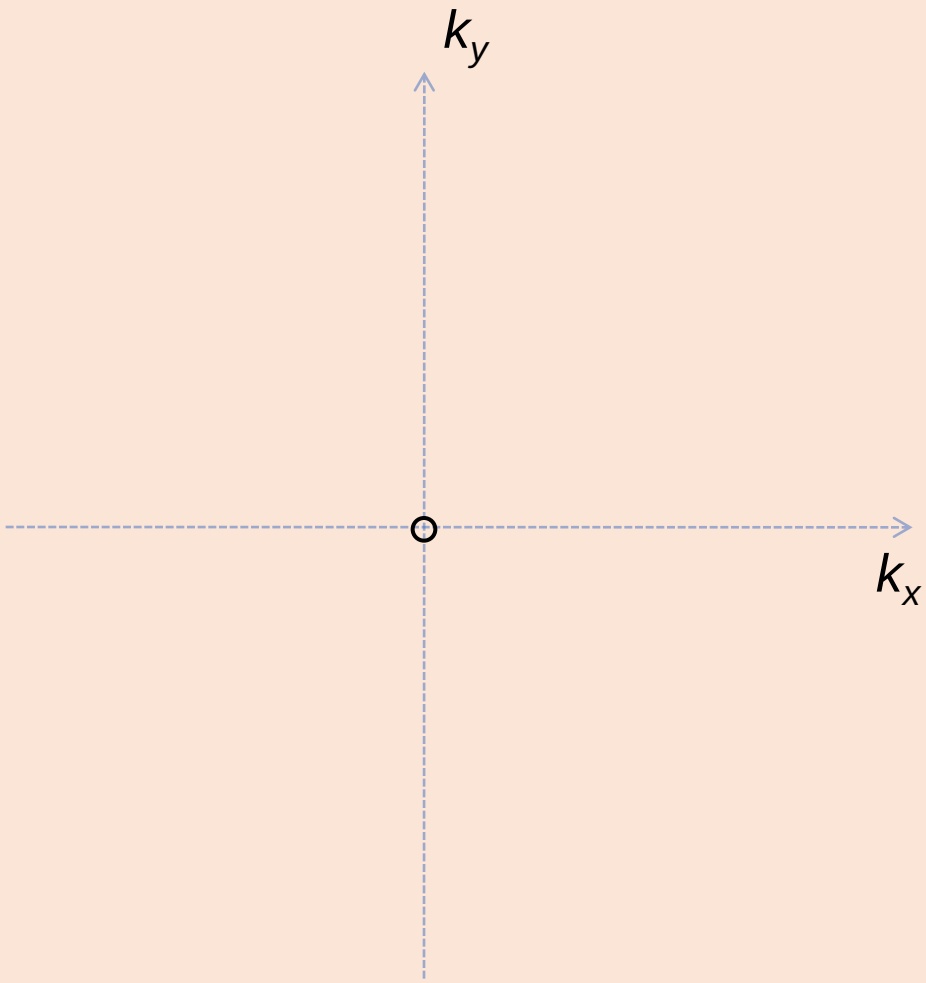

90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z

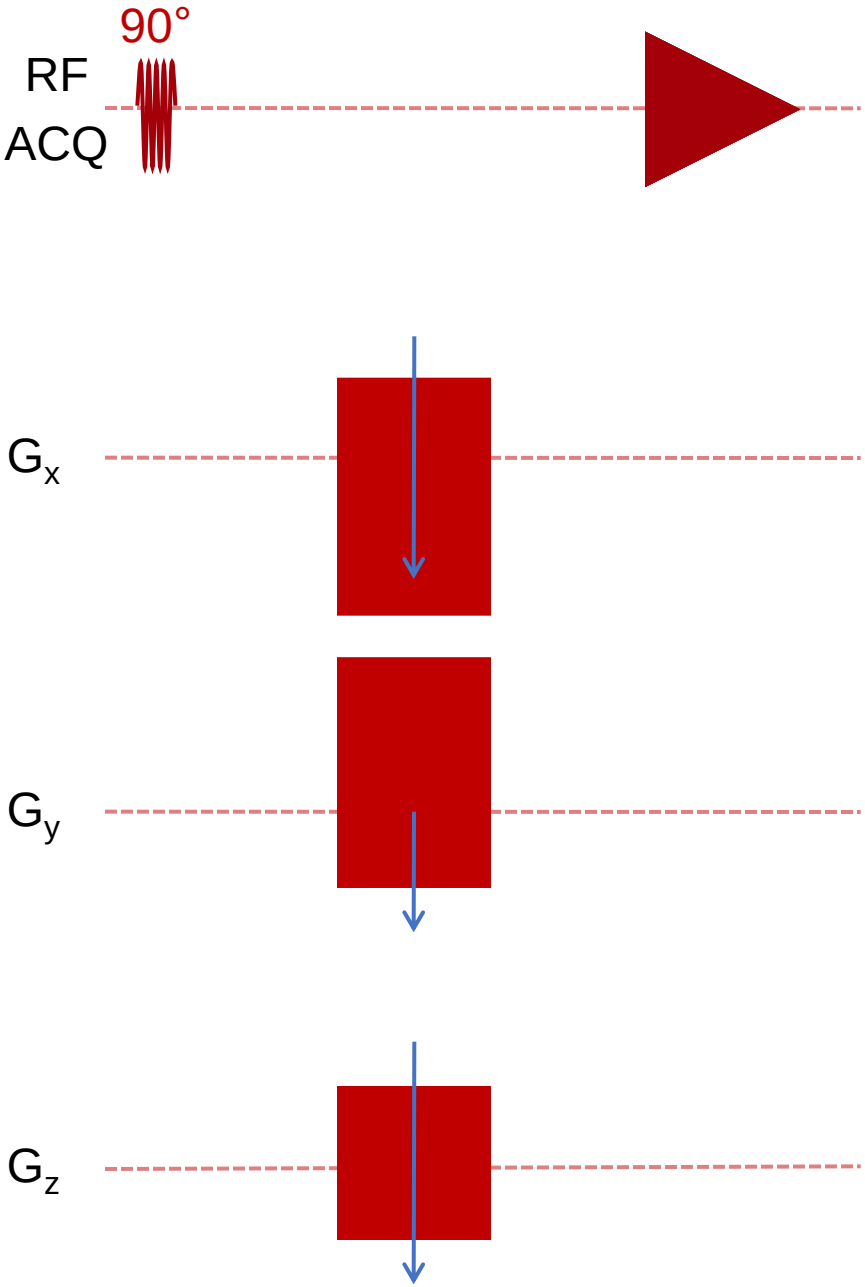

k_y
k_x

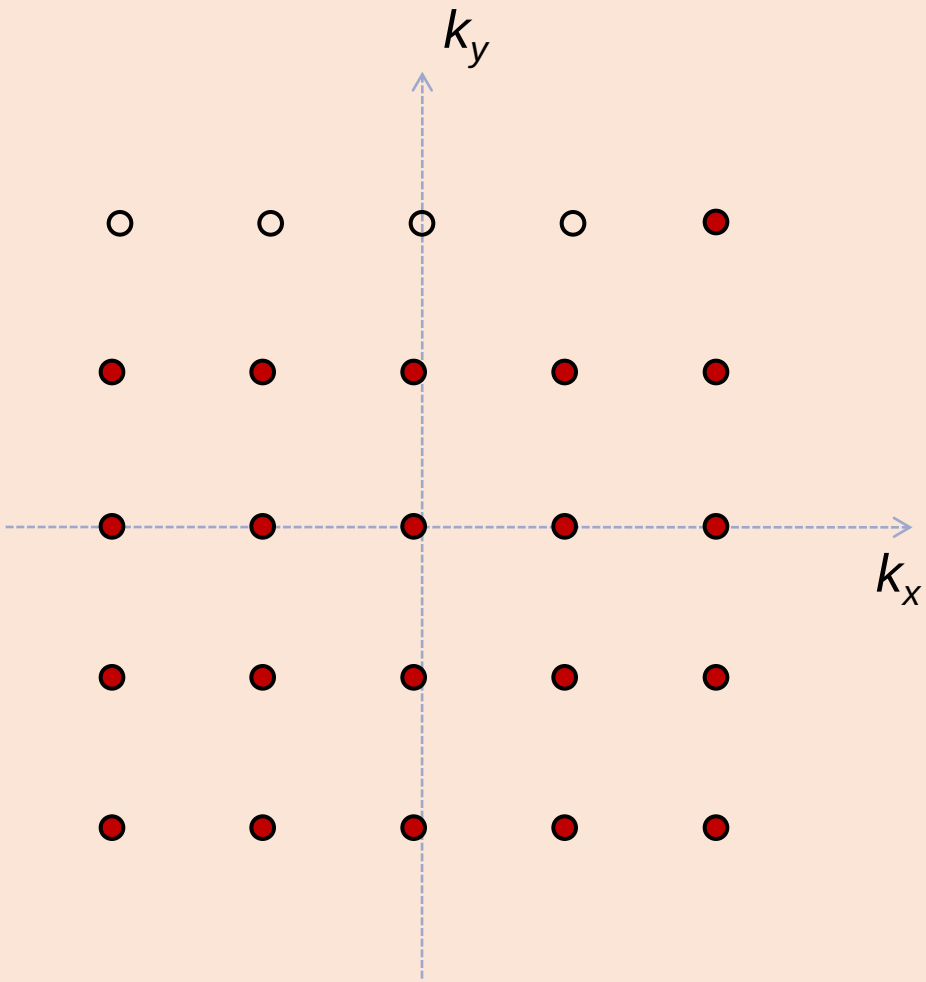

90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z


k_y
k_x


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z

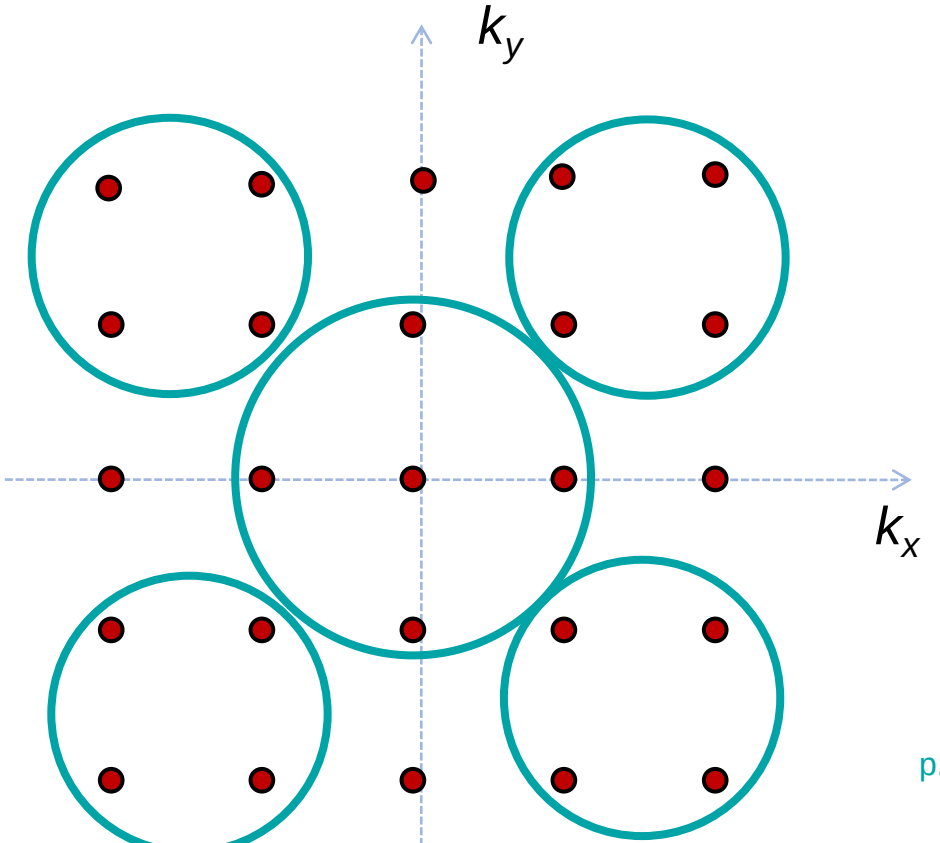

k_y
k_x


90°
RF
ACQ
G_x
G_y
G_z


k_y
k_x

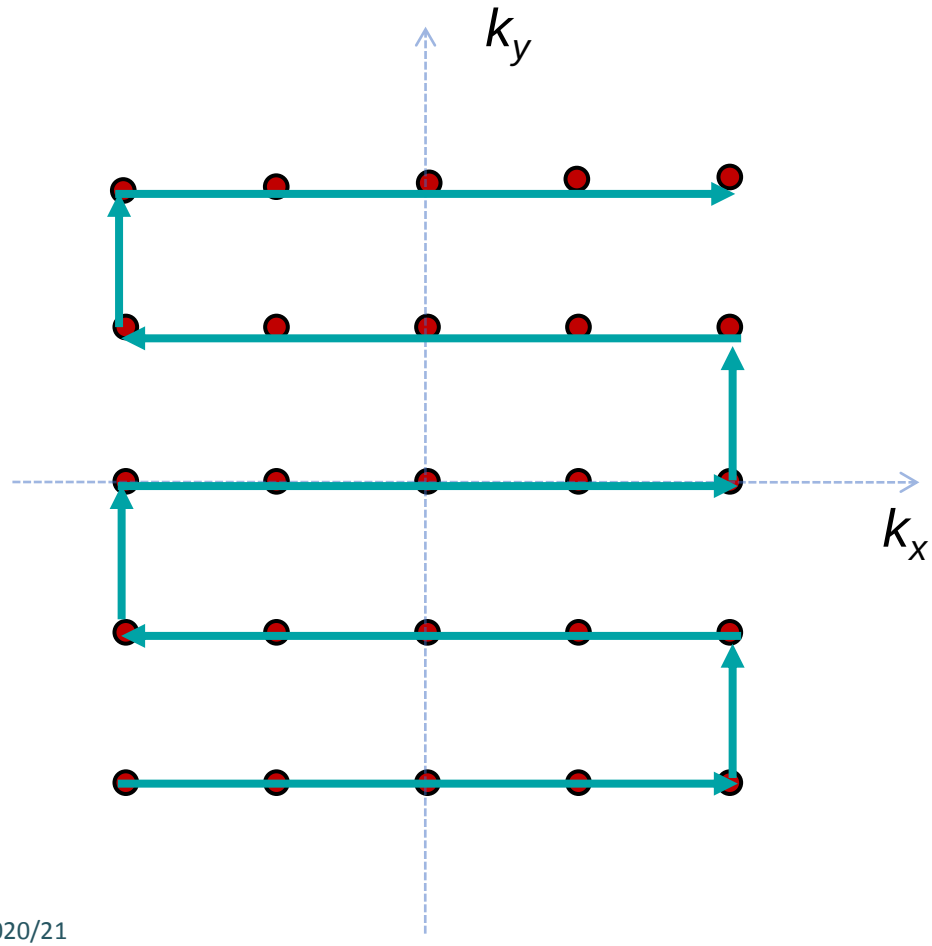
Stratégie d'acquisition des données

- Quelques propriétés de l'espace des k
  - Points au centre: code le signal et la forme générale
  - Points aux périphéries: détails de l'image



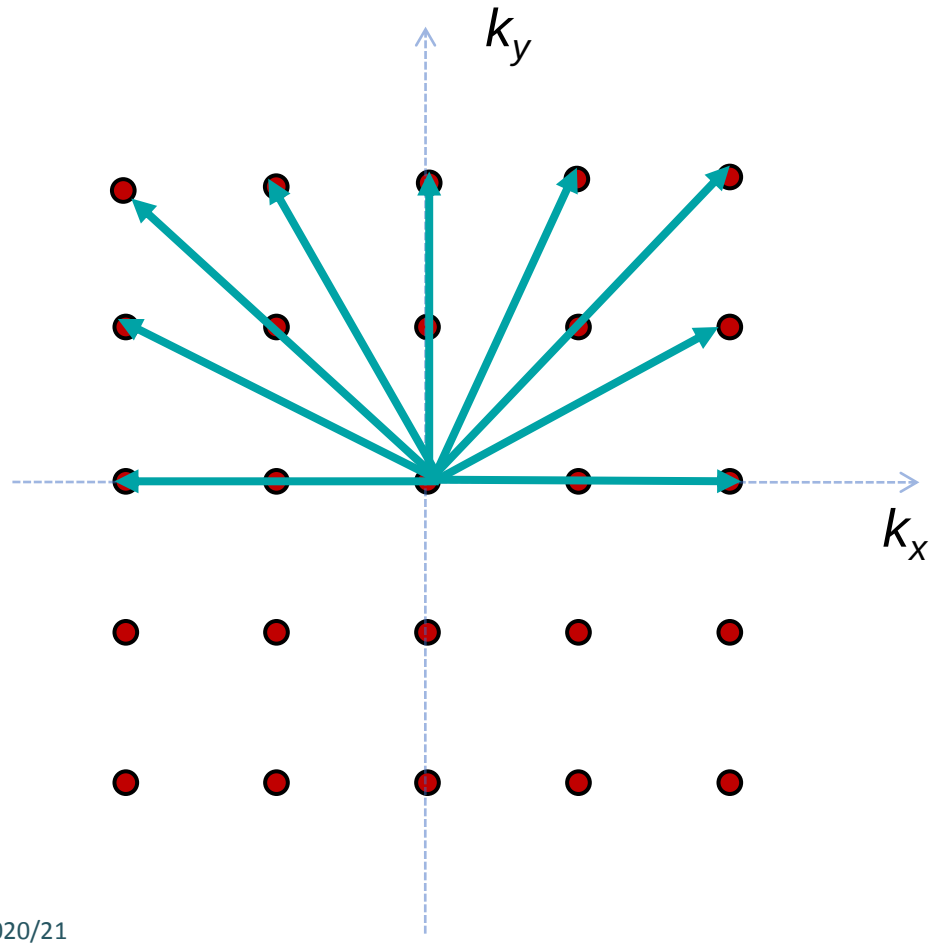
Stratégie d'acquisition des données

- Remplissage de l'espace des k
  - Cartésien



Stratégie d'acquisition des données

- Remplissage de l'espace des k
  - Cartésien / radial



Stratégie d'acquisition des données

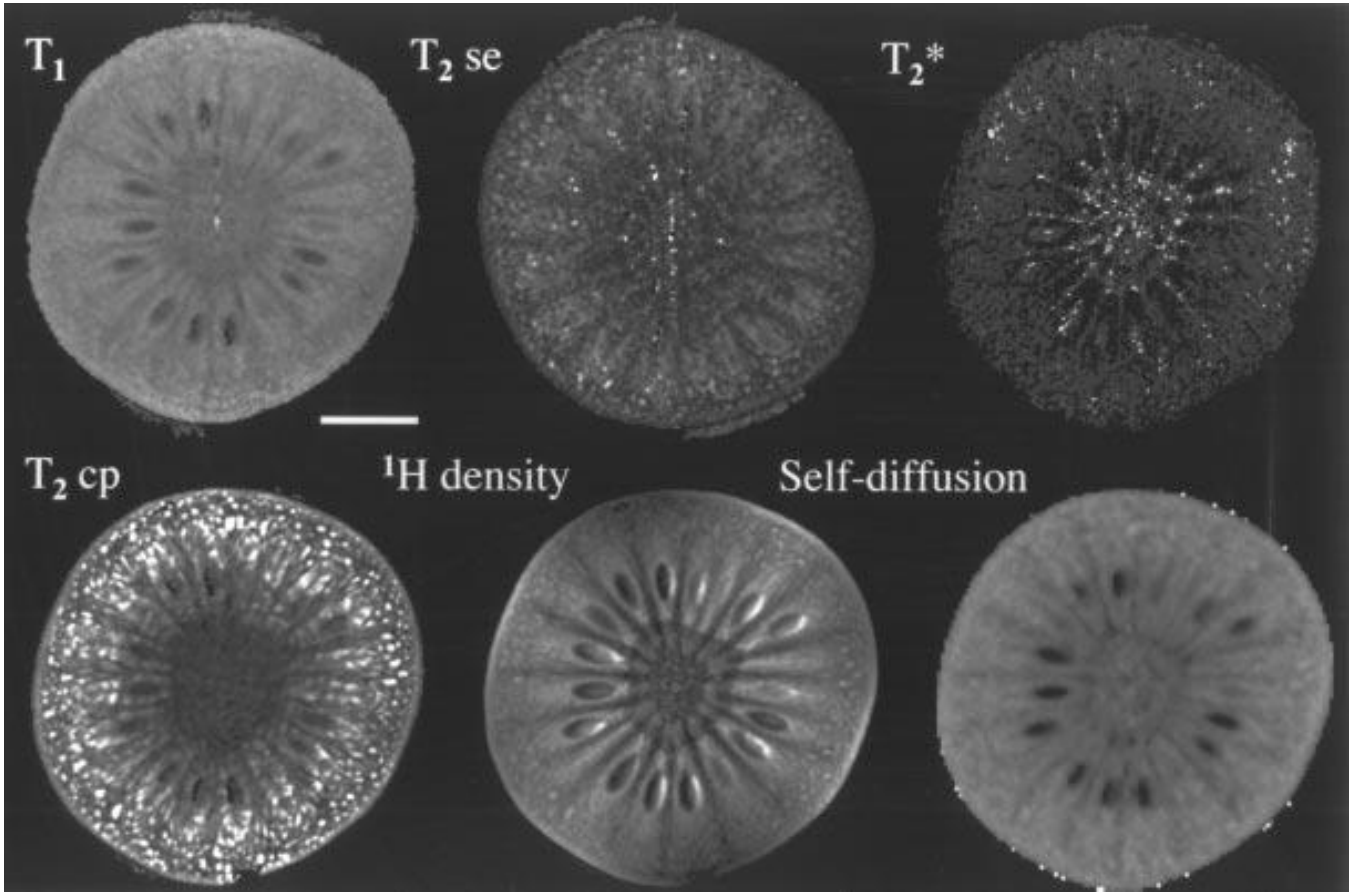
- Remplissage de l'espace des k
  - Cartésien / radial / spiral / …
  - Enregistrement de plusieurs points à la fois
  - Premiers points enregistrés

Le contraste en IRM

- Contraste apporté par les propriétés magnétiques locales

- Quelques contrastes
  - Relaxation (T_1, $T_{1\rho}$, T_2, T_2*)
  - Densité de noyaux
  - Diffusion

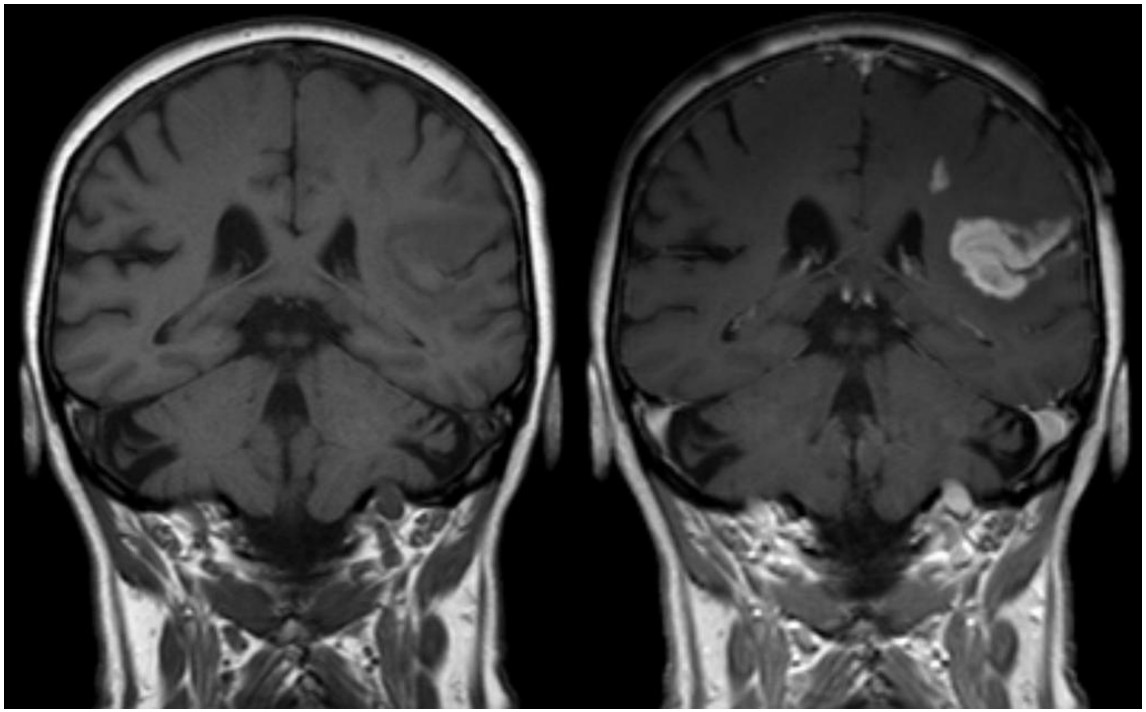
Le contraste en IRM



Clark et al., J. Sci. Food. Agr., 1998, 78,349

Augmenter le contraste

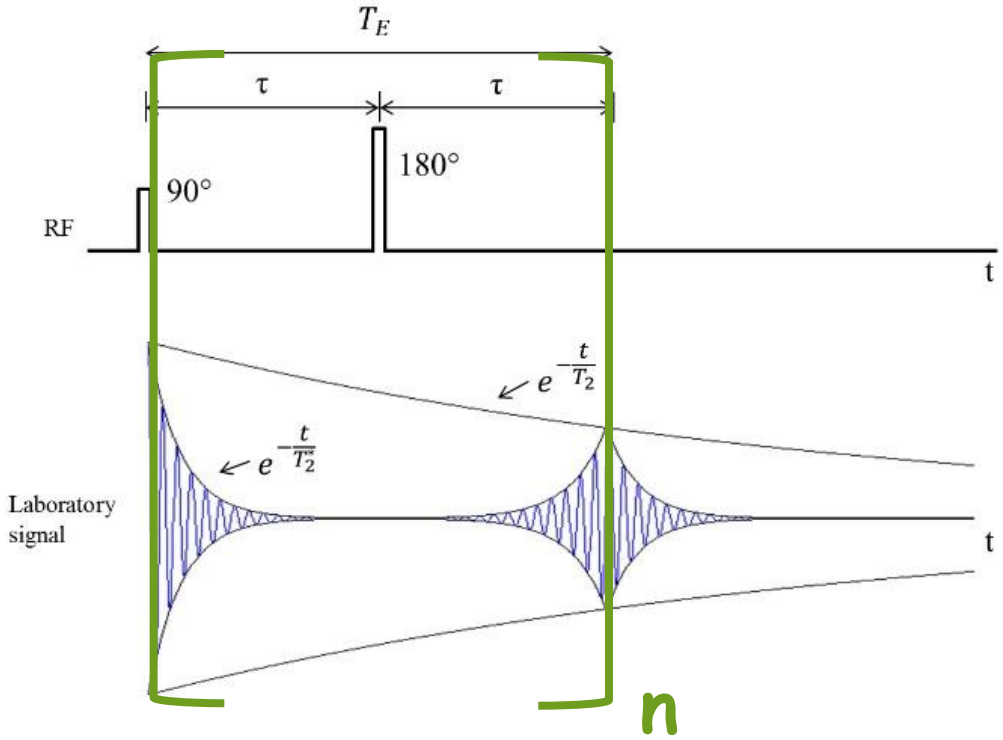
- Injection d'un produit de contraste pour changer sélectivement (localement) les propriétés magnétiques de l'eau d'un tissu



https://www.wikiwand.com/en/MRI_contrast_agent

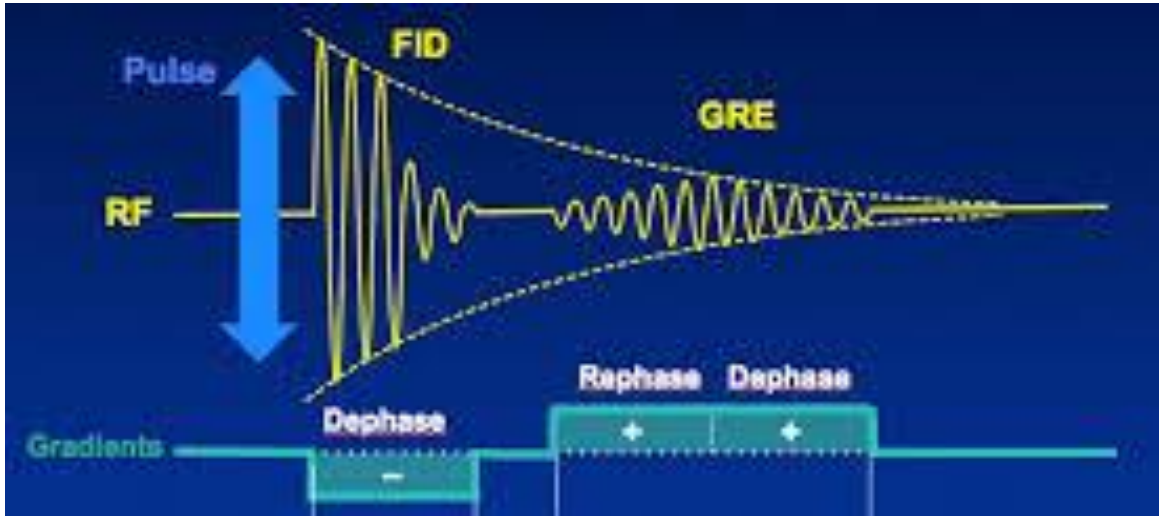
Obtention de l'image

- Refocalisation du signal
  - Echo de spin (impulsion RF)



Obtention de l'image

- Refocalisation du signal
  - Echo de spin (impulsion RF)
  - Echo de gradients



Imagerie de l'eau… mais pas que

- Imagerie métabolique
  - Imagerie spectroscopique (CSI, MRSI)
  - Imagerie de fonctions spécifiques (CEST)

- Imagerie de noyaux X
  - ^{31}P = cycle énergétique
  - ^{13}C = cycles biochimiques

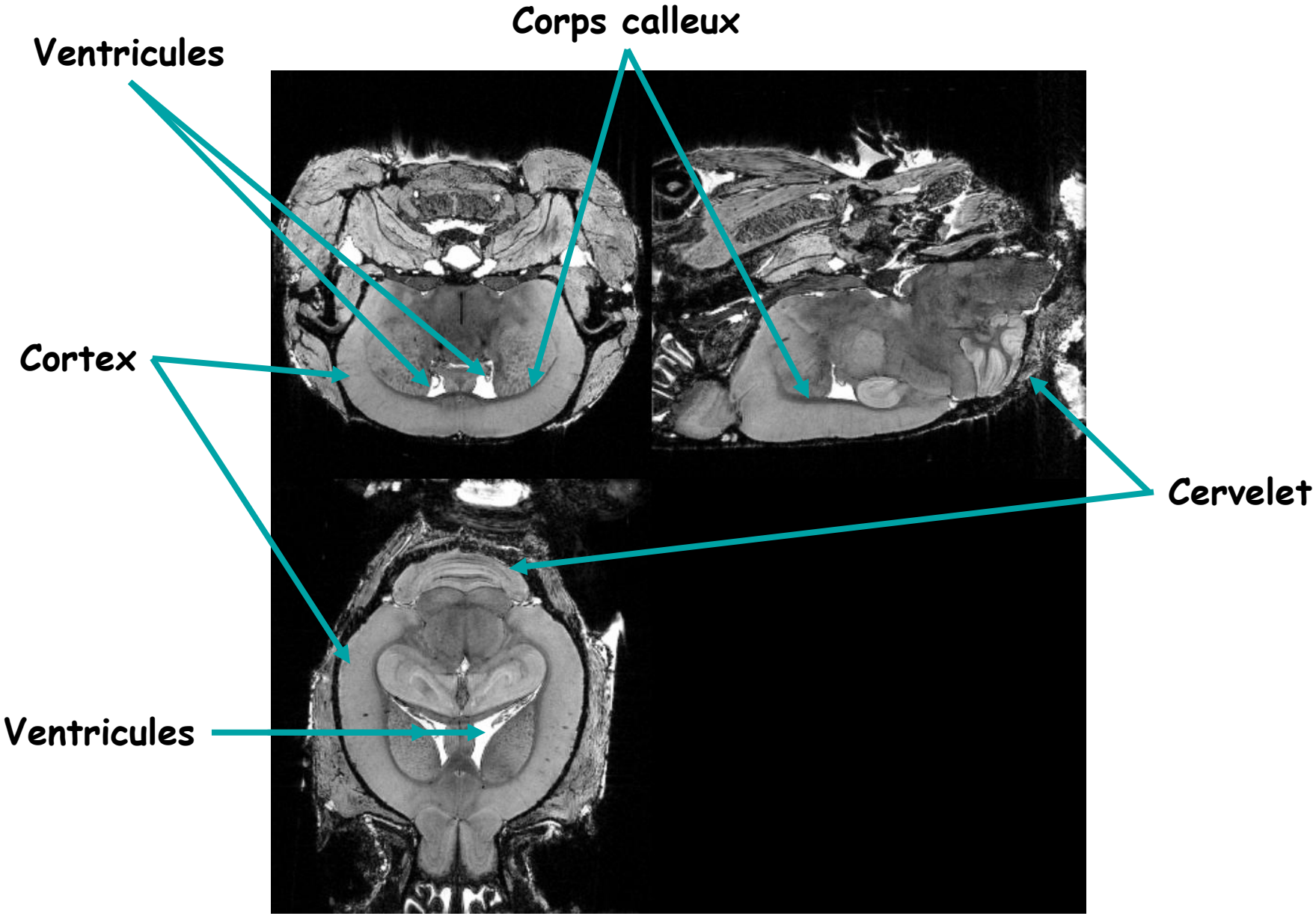
Résolution *vs* temps d'acquisition

- « Quantité de signal » disponible invariant

- Compromis nécessaire entre
  - Résolution élevée (souhait) mais peu de signal
  - Résolution faible et beaucoup de signal

INRAE

Exemple 1: Cerveau de souris fixé: Contraste & temps


Corps calleux
Ventricules
Cortex
Cervelet
Ventricules

INRAE

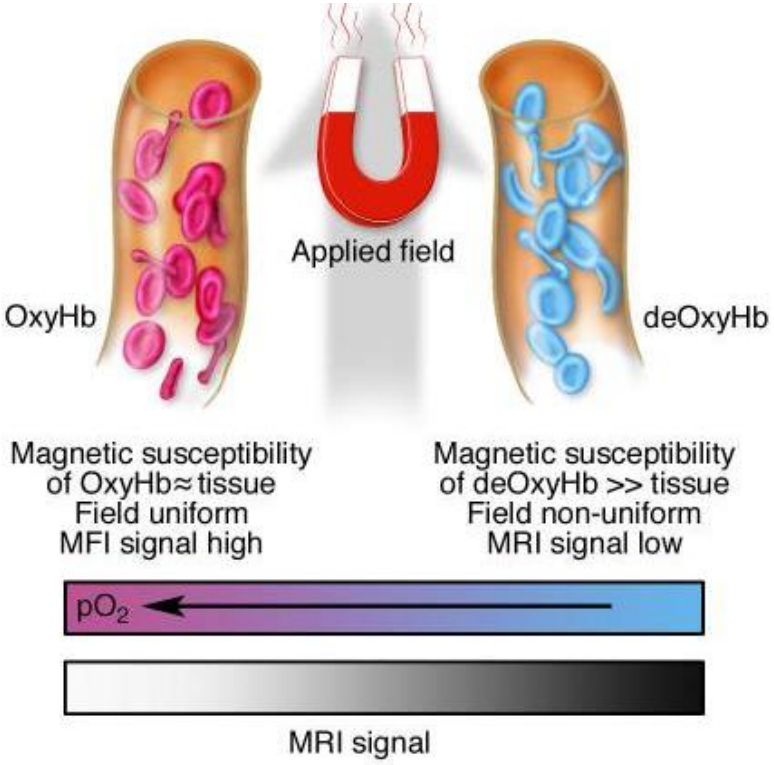
> Exemple 2: IRM fonctionnelle

Davidenko O., NeuroImage, 2018, 183, 37

Activation neuronales

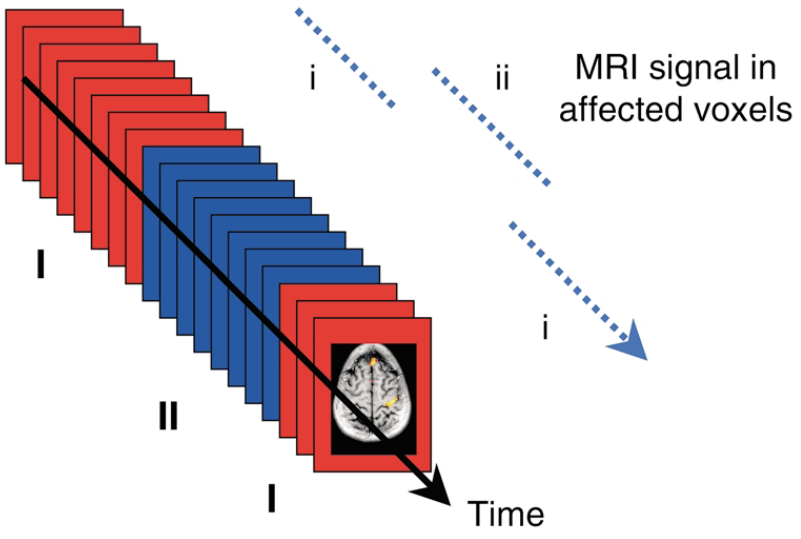
- Fonctionnement des neurones après activation

- En IRM, effet BOLD (blood oxygen level dependent)

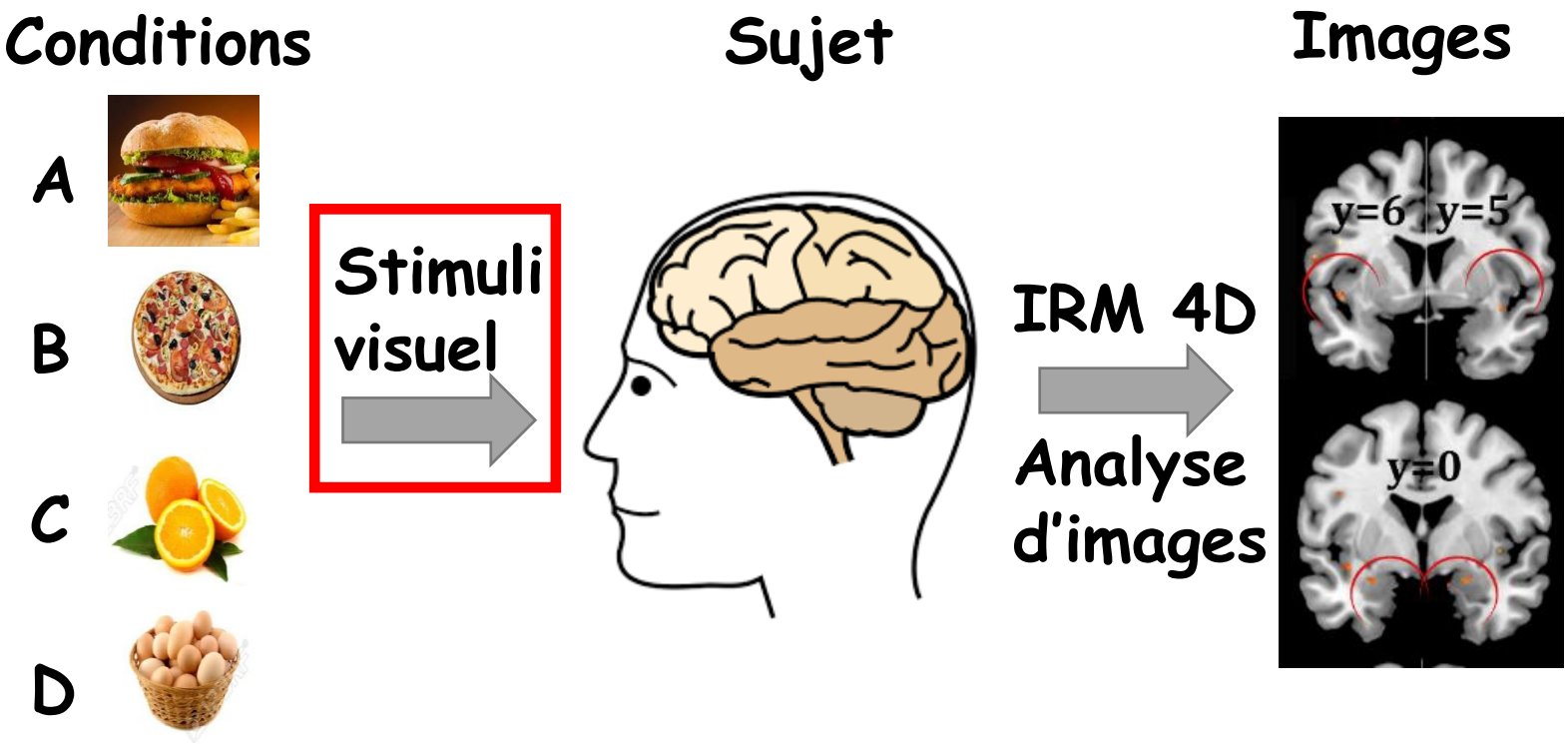


Activation neuronales

- Enregistrement d'images en fonction de stimulations
- Si activation, consommation d'O_2
- Contraste choisi pour être sensible à l'O_2 du sang



IRMf & nourriture

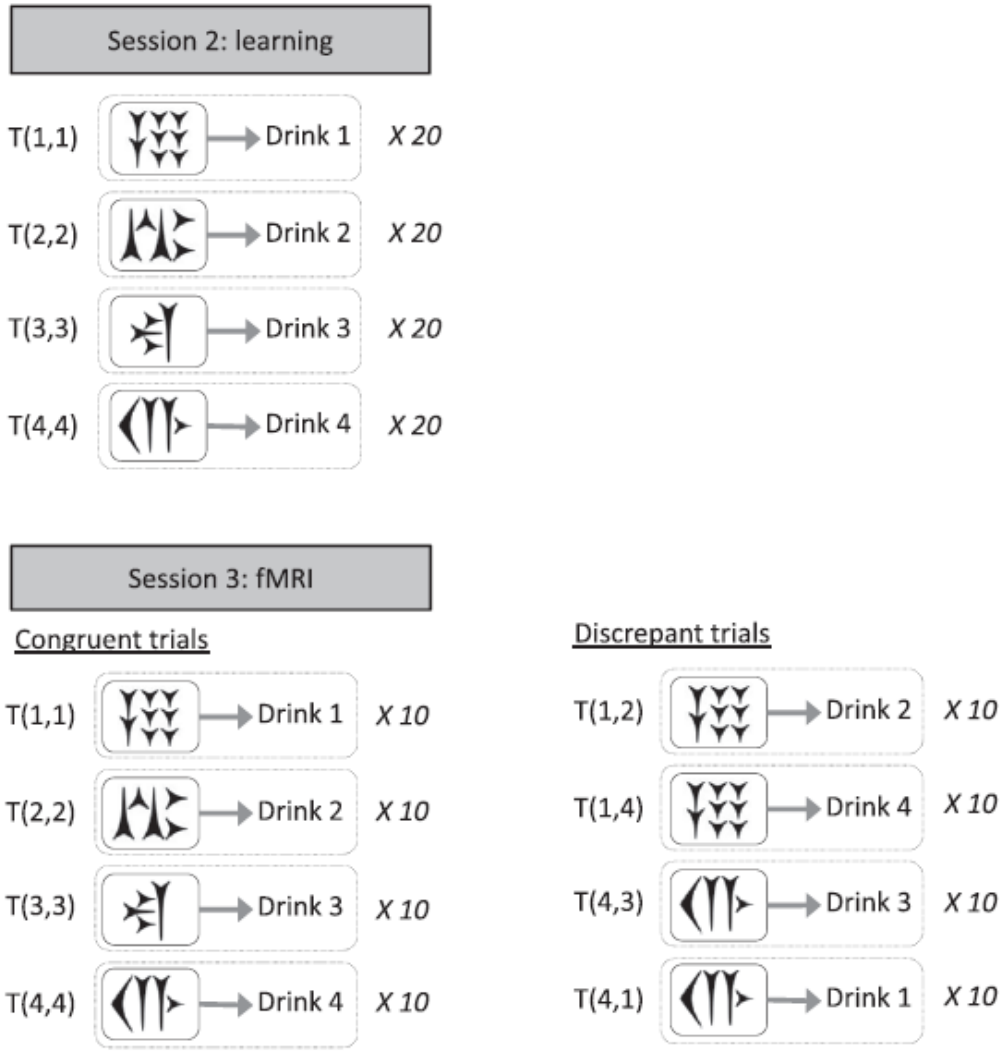


- Détection des régions encodant des différences entre les conditions

IRMf & aliments: activation sensorielle

- Gustatomètre compatible IRM

Etude de l'effet de surprise



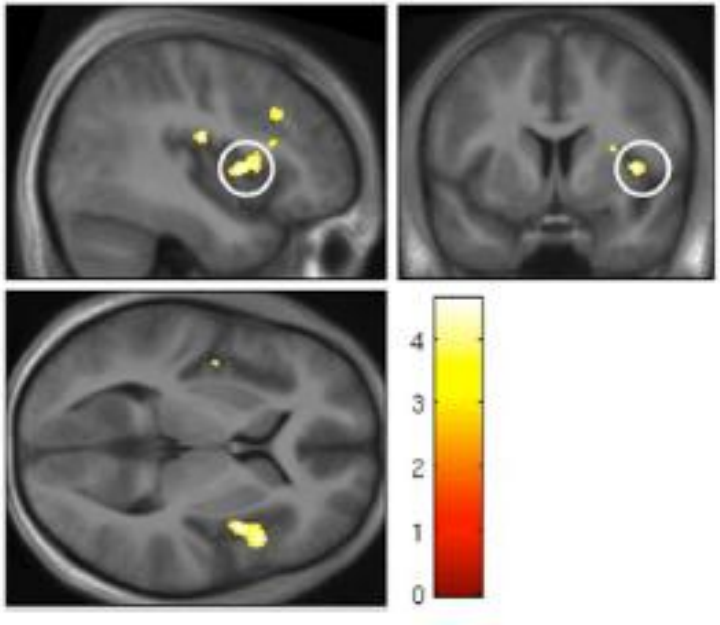
On ne réagit pas pareil

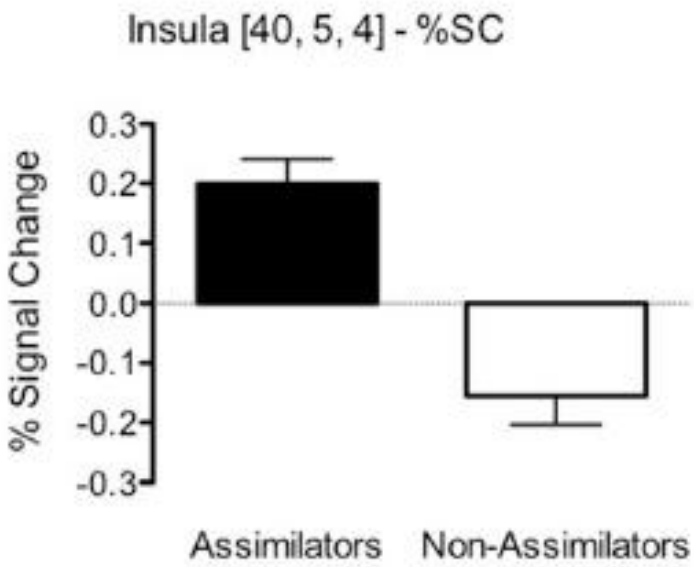
- Les apprenants
  - Variation des évaluations de la boisson en fonction de la surprise

- Les non-apprenants
  - Notation similaire indépendamment des conditions expérimentales

Quelles différences dans le cerveau?

Insula

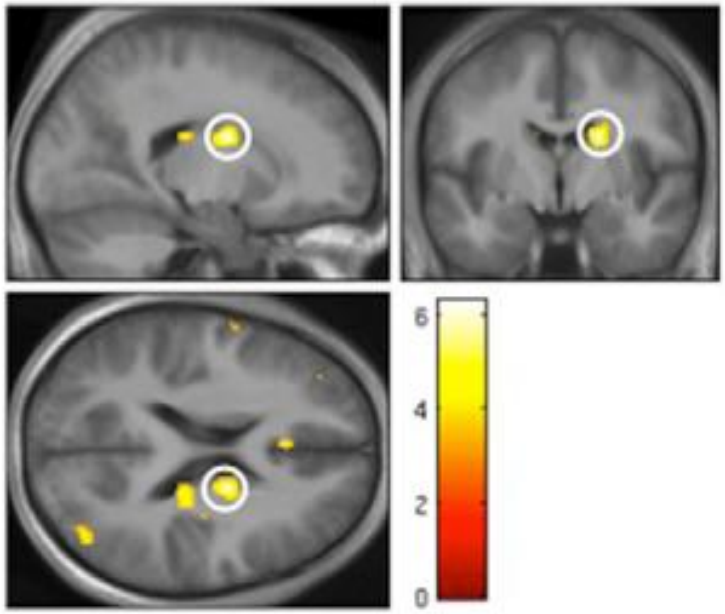


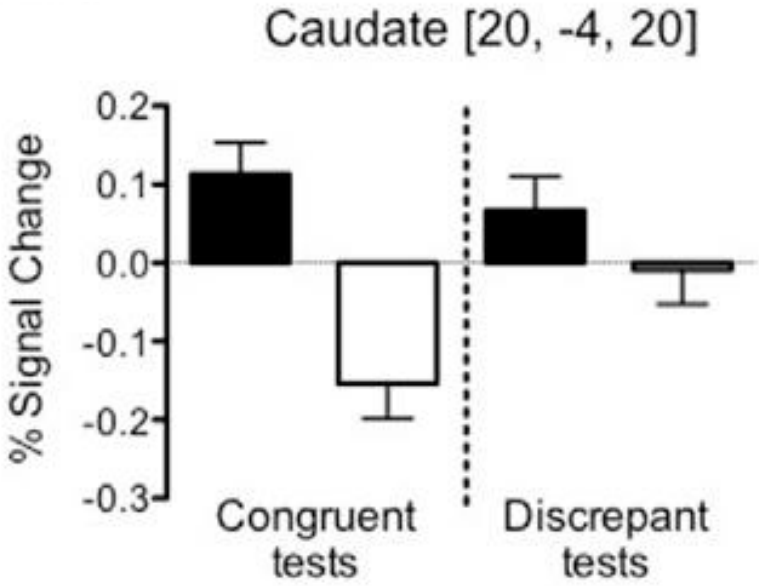


Rôle dans l'anticipation du stimulus

Quelles différences dans le cerveau?

Noyau caudé





Mécanisme de prédiction de l'erreur

INRAE

> Résumé: les points importants

IRM

- Etude des molécules d'eau (principalement)
- Codage spatial de l'image par les gradients de champ magnétique
- Contraste de l'image
  - Propriétés magnétiques locales de l'eau
  - Injection d'un agent de contraste pour modifier les propriétés locales