

D'où provient le signal?

Nous avons maintenant sélectionné la position et l'épaisseur de notre coupe. Mais comment pouvons-nous savoir de quel point de notre coupe provient un certain signal - une information indispensable pour construire une image?

L'astuce est similaire au gradient de sélection de la coupe, qui n'est activé que pendant l'application de l'impulsion RF.

Après l'émission de l'impulsion RF, tous les protons de la coupe précessionnent à la même fréquence.

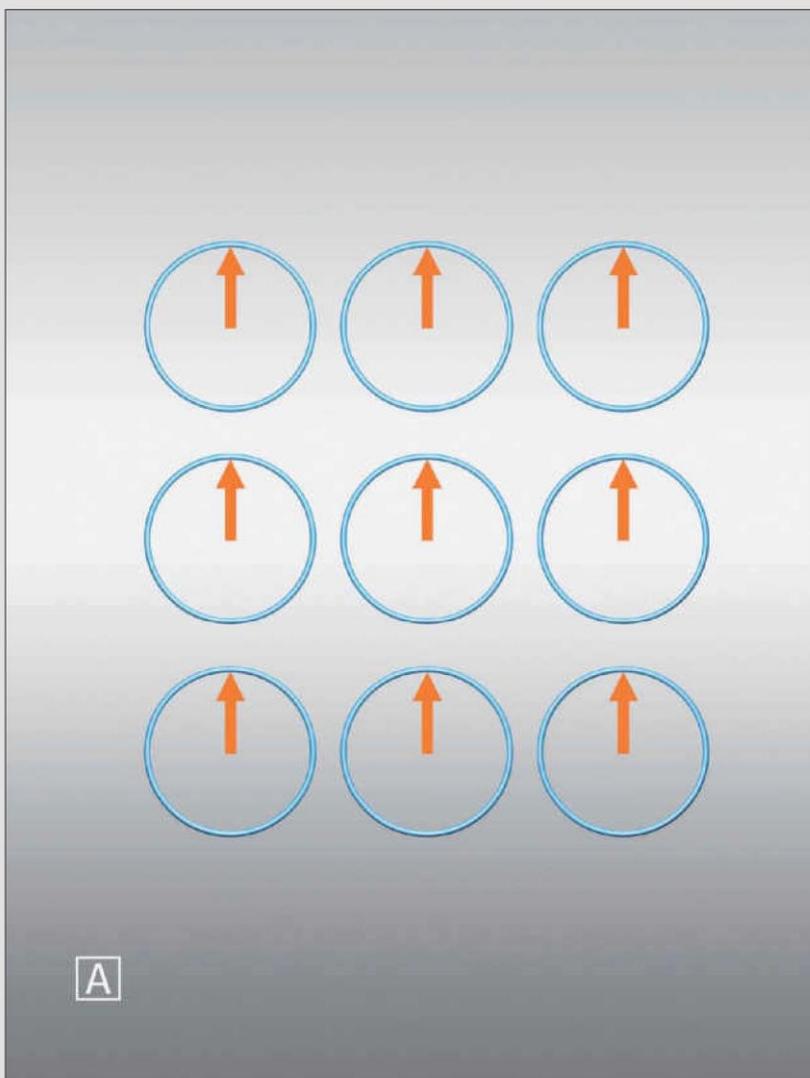
Nous appliquons maintenant un autre champ à gradient qui, dans notre exemple, diminue de gauche à droite.

Fig. 59 : Pour déterminer d'où provient un signal dans une certaine coupe, nous utilisons un champ à gradient magnétique. En (A), neuf protons sont représentés dans la même coupe. Ils précessionnent en phase avec la même fréquence, après l'émission de l'impulsion RF.

Un champ à gradient magnétique est alors superposé au champ externe, qui, en (B), diminue en intensité de gauche à droite.

Les protons dans les trois colonnes subissent maintenant des champs magnétiques différents et émettent donc leurs signaux avec des fréquences différentes (par exemple 65, 64 et 63 MHz). Le gradient magnétique correspondant est appelé **le gradient de codage des fréquences**.

Nous pouvons maintenant savoir de quelle colonne provient un signal, mais nous ne pouvons toujours pas en déterminer l'origine exacte.



Ainsi, la fréquence de précession des protons va également diminuer de gauche à droite (dans notre exemple, les fréquences de précession sont respectivement de 65,64 et 63 MHz).

Le résultat est que les protons des différentes colonnes émettent leurs signaux à ces différentes fréquences. Le gradient appliqué est donc appelé le **gradient de codage des fréquences**.

Cependant, tous les protons d'une même colonne auront toujours des signaux de même fréquence. Nous pouvons maintenant savoir, à partir de la fréquence, de quelle colonne provient un signal, mais nous ne pouvons toujours pas en déterminer l'origine exacte. Comme ces informations spatiales ne sont pas suffisantes, nous devons faire autre chose.



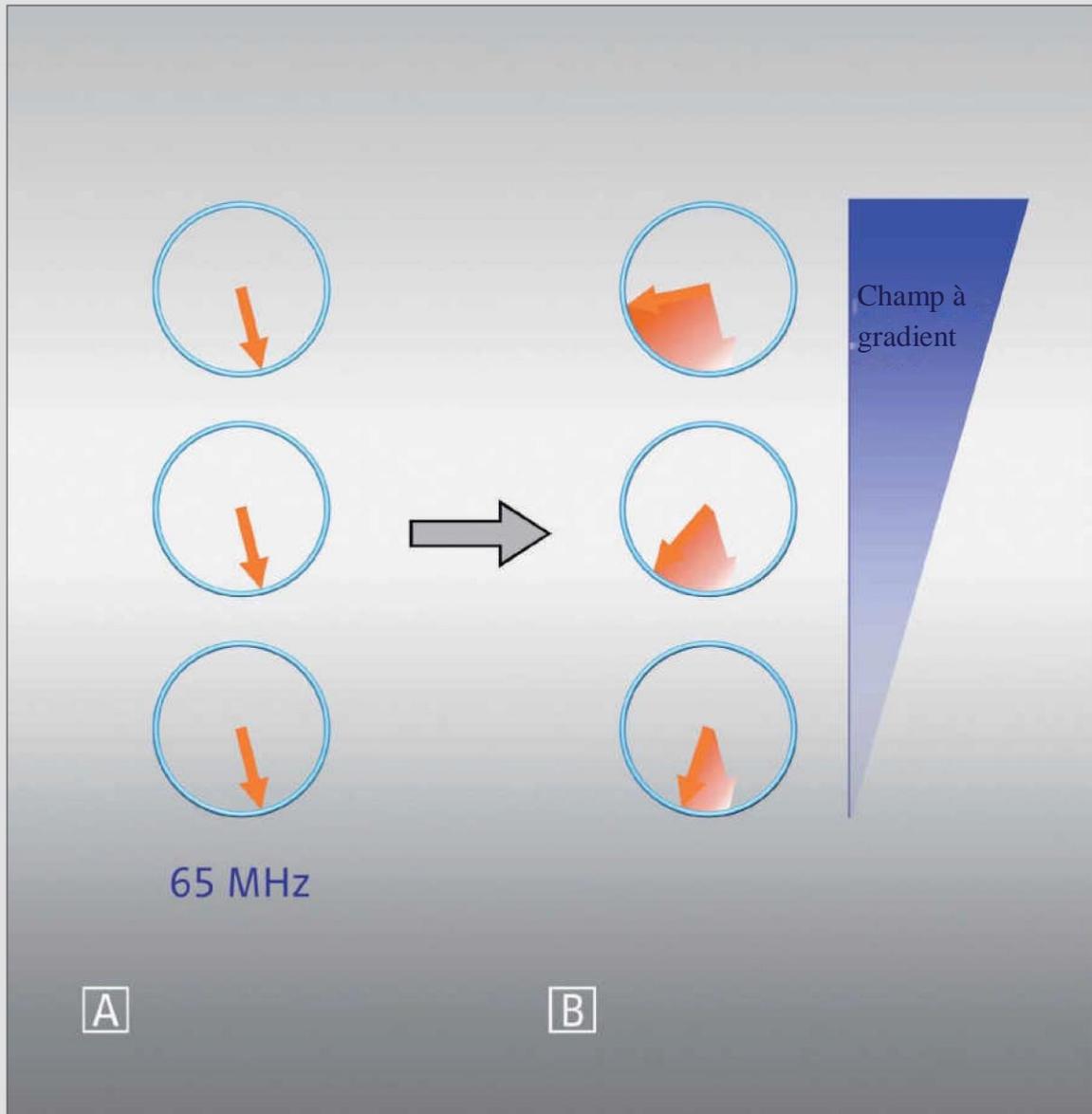
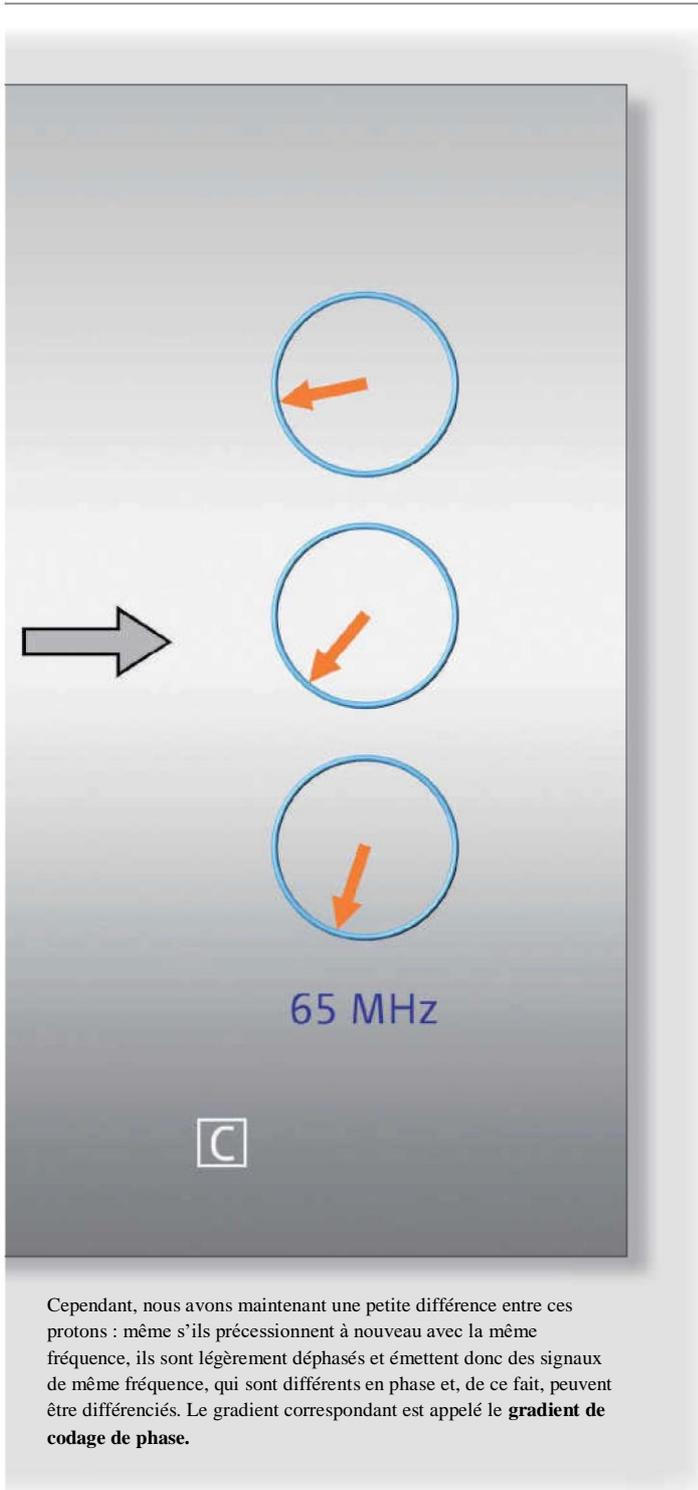


Figure 60 : Pour savoir d'où provient un certain signal dans une colonne de même fréquence, nous utilisons un gradient supplémentaire. En (A), la colonne avec la fréquence de précession de 65 MHz de la figure 59 est représentée. Nous activons maintenant un champ à gradient, qui est plus intense en haut qu'en bas de la colonne pendant un temps très court (B). Le proton du haut précessionne donc plus vite que celui du milieu, qui précessionne à son tour plus vite que le proton du bas. Cette différence de fréquence de précession ne dure que très peu de temps; lorsque le gradient est désactivé, tous les protons subissent à nouveau le même champ magnétique et ont donc à nouveau la même fréquence de précession de 65 MHz (C).



Théoriquement, on pourrait à nouveau utiliser la même démarche avec le gradient magnétique. Cependant, cela pose quelques difficultés pratiques, par exemple, cela peut avoir pour conséquence que deux points situés à des endroits différents ont la même fréquence. Pour résoudre ce problème, on procède différemment, ce qui est illustré à la figure 60.

Dans la figure 60, nous regardons simplement les protons d'une colonne de la figure 59, la colonne de 65 MHz. Les protons sont en phase après le « fouettement » de l'impulsion RF. Maintenant, nous appliquons un gradient magnétique le long de cette colonne pendant un court instant. Les protons accélèrent ainsi leur précession, en fonction de l'intensité du champ magnétique auquel ils sont exposés. Dans notre exemple (figure 60B), le proton du haut précessionne donc plus vite que celui du milieu, qui précessionne à son tour plus vite que le proton du bas.

Lorsque ce court gradient est désactivé, tous les protons de la colonne subissent à nouveau le même champ magnétique, et ont donc la même fréquence de précession. Il existe cependant une différence importante : Auparavant, les protons (et leurs signaux) étaient en phase. Maintenant, les protons et leurs signaux ont toujours la même fréquence, mais ils sont déphasés. (C'est comme si leurs vecteurs magnétiques se rapprochaient de l'antenne à des moments différents).

Comme le gradient que nous avons utilisé provoque la précession des protons dans différentes phases, il est appelé le **gradient de codage de phase**.

Le fonctionnement de cette phase de codage est trop compliqué pour une introduction de base; si vous souhaitez obtenir plus de détails, procurez-vous un exemplaire de « MR Buzzology » pour en savoir plus.

Car il suffit ici de savoir que tous ces différents signaux peuvent maintenant être affectés à un certain endroit de la coupe, de sorte que nous pouvons maintenant reconstruire notre image.

Récapitulons :



- Nous pouvons sélectionner une coupe à examiner en utilisant un champ à gradient, qui est superposé au champ magnétique externe. Les protons le long de ce champ à gradient sont exposés à différentes intensités de champ magnétique, et ont donc des fréquences de précession différentes. Comme ils ont des fréquences de précession différentes, nous pouvons envoyer une impulsion RF qui ne contient que ces fréquences, qui excitent les protons dans la coupe que nous voulons examiner.

- L'épaisseur de la coupe peut être modifiée de deux façons : en changeant la bande passante de l'impulsion RF ou en modifiant la pente du champ à gradient.

- Le gradient de sélection de la coupe n'est activé que pendant l'impulsion RF.

- Pour déterminer le point dans une coupe d'où provient un certain signal, nous utilisons deux autres gradients, le gradient de codage des fréquences et le gradient de codage de phase.

- Le gradient de codage des fréquences est envoyé après le gradient de sélection de la coupe. Dans notre exemple, il est appliqué dans la direction de l'axe x. Il en résulte différentes fréquences de précession le long de l'axe x, et donc différentes fréquences des signaux correspondants.

- Le gradient de codage de phase est activé pendant une courte période après l'impulsion RF, le long de l'axe y dans notre exemple. Pendant ce court moment, les protons le long de l'axe précessionnent à des fréquences différentes. Lorsque ce gradient est désactivé, ils retournent à leur ancienne fréquence de précession, qui était la même pour tous. Cependant, en raison de ce gradient de codage de phase, les protons et leurs signaux sont maintenant déphasés, ce qui peut être détecté.

Avec toutes ces informations de fréquence et de phase, nous pouvons maintenant attribuer un certain signal à un endroit précis, ce qui donne notre image RM (... enfin!).

Quelques notions de base supplémentaires

Jusqu'à présent, nous avons abordé pratiquement tous les aspects importants des bases de la RM. Mais pourquoi avons-nous seulement parlé du proton, du noyau d'hydrogène? Qu'en est-il des autres noyaux?

Comme vous vous en souvenez, le noyau d'un atome est composé de **protons** et de **neutrons**. Le noyau d'**hydrogène**, qui est composé d'un seul proton, fait exception à la règle. Et lorsque nous parlons du proton, nous parlons du noyau d'hydrogène, car les deux sont identiques (les termes « proton » et « noyau d'hydrogène » sont interchangeables). Le noyau d'hydrogène est préférable pour l'IRM, car l'hydrogène est présent en abondance dans le corps. Le noyau d'hydrogène émet aussi le meilleur signal : à partir d'un nombre égal de noyaux différents dans le même champ magnétique, c'est l'hydrogène qui émet le signal le plus intense. De nos jours, toutes les images RM sont des images à base de protons/d'hydrogène. Cependant, des recherches sont en cours sur l'utilisation d'autres noyaux, comme le **sodium**.

Peut-on utiliser tous les autres noyaux pour l'imagerie?

La réponse est non. Deux conditions préalables importantes doivent être remplies.

- Premièrement, nous ne pouvons utiliser que les noyaux qui ont un spin.

Cela s'explique facilement : comme nous l'avons vu au début, les protons tournaient, et donc leur charge électrique tournait aussi. Et la charge électrique en mouvement était le courant qui provoquait le champ magnétique du proton. C'est la base de tout. Sans spin, il n'y a pas de champ magnétique.

- Deuxièmement, le noyau doit avoir un nombre impair de protons (et de neutrons – mais là, on est dans le domaine de la physique pure – on va donc en rester sur les protons).

Pourquoi un nombre impair? Pensez simplement au proton comme à une barrette aimantée. Si vous avez un noyau contenant deux protons (ou tout autre nombre pair), ces barrettes aimantées s'accrocheront ensemble comme n'importe quel autre aimant (les pôles opposés s'attirent).

Le résultat : leurs moments magnétiques s'annuleront. Si nous avons un noyau avec un nombre impair de protons, p. ex. trois, les paires de protons s'accrocheront toujours ensemble et se neutraliseront. Cependant, il restera toujours un proton qui a encore un moment magnétique. Les noyaux ayant un nombre impair de protons ont donc un moment magnétique, et peuvent principalement être utilisés pour l'IRM.

En voici quelques exemples : **carbone 13**, **fluor 19**, **sodium 23**, **phosphore 31**.



Le matériel MR – un aperçu

Examinons un peu le matériel. La partie la plus importante de l'appareil de RM est l'aimant principal, qui doit être assez puissant pour permettre l'imagerie RM. La puissance d'un aimant est exprimée en **Tesla** ou Gauss, où 1 Tesla = 10 000 Gauss.

Gauss était un mathématicien allemand, qui a été le premier à mesurer le champ géomagnétique de la terre. Tesla est considéré comme le « père » du courant alternatif. C'était un homme singulier, qui a refusé de partager le prix Nobel avec l'inventeur Thomas Edison au début des années 1900.

Les aimants utilisés pour l'imagerie ont pour la plupart une intensité de champ allant jusqu'à 1,5 Tesla, tandis que les aimants de 3 Tesla sont également devenus populaires (ils sont appelés « à champ élevé », avec le terme « à champ ultra-élevé » utilisé pour désigner les aimants encore plus puissants). Fondamentalement, plus l'aimant est fort, meilleur est le signal RM. Malheureusement, les problèmes techniques et les artefacts d'image augmentent également avec **l'intensité du champ magnétique**. De ce fait, seuls les aimants de 3 Tesla sont actuellement utiles pour le travail clinique général.

Juste pour avoir une idée de la puissance des aimants de RM : le champ magnétique terrestre est compris entre 0,3 et 0,7 G, l'aimant de la porte d'un réfrigérateur a environ 100 G = 0,01 T).

Le champ magnétique des aimants RM doit être très homogène, car il détermine directement la fréquence de précession. L'homogénéité est mesurée en **ppm** (partie par million) dans un volume défini. Pour la calculer, la différence entre le champ maximal et le champ minimal est divisée par le champ moyen et multipliée par un million. Nous avons déjà montré à la page 27 à quel point des inhomogénéités, même assez petites, et donc des différences de fréquence de précession peuvent être préjudiciables.

L'homogénéité du champ magnétique peut être améliorée en effectuant quelques ajustements électriques ou mécaniques, un processus appelé **homogénéisation du champ magnétique** (*shimming*).

Types d'aimants

En IRM, différents types d'aimants ont été utilisés - en voici une brève description.

Aimants permanents :

Qui ne connaît pas les aimants permanents? C'est ce type d'aimant qui fascine les petits enfants. Il a deux avantages : il est toujours magnétique et n'utilise aucune énergie pour agir.

Ses inconvénients possibles sont l'instabilité thermique, son champ limité et son poids (un aimant de 0,3 T peut peser environ 100 tonnes!).

Cet aimant n'est utilisé aujourd'hui que dans les systèmes à faible champ.

Aimants résistifs :

Dans un **aimant résistif**, un courant électrique passe à travers une boucle en fil et génère un champ magnétique. Les aimants résistifs sont donc également appelés **électro-aimants**. Ils ne sont magnétiques que tant qu'un courant électrique les traverse. Ils utilisent donc de l'énergie électrique.

Comme il y a une résistance au passage de l'électricité à travers le fil, ces aimants se réchauffent en cours de fonctionnement et doivent être refroidis.

Par rapport aux aimants permanents, ils atteignent une intensité de champ plus élevée. Cependant, les aimants résistifs ne sont pas très pratiques avec des champs élevés, car ils créent beaucoup de chaleur qui doit être dissipée. En général, les aimants résistifs ne présentent plus un intérêt majeur.

Aimants supraconducteurs :

Ces sont les aimants supraconducteurs qui sont les plus utilisés dans les appareils à résonance magnétique. Ils utilisent également l'électricité, mais ils sont dotés d'un conducteur spécial sous tension. Celui-ci est refroidi à la température de supraconductivité (environ 4 °K ou -269 °C). À cette température, le matériau sous tension perd sa résistance pour l'électricité. Ainsi, si vous envoyez un courant électrique une fois, il y circule en permanence, créant un champ magnétique constant. Les **cryogènes (hélium, azote)** sont utilisés pour refroidir ces aimants et doivent être ajoutés de temps en temps.

Lorsque, pour une raison quelconque, la température de ces aimants dépasse la **température de supraconductivité**, il se produit une perte de supraconductivité

(appelée évanouissement de la supraconductivité ou « **quench** ») et une résistance soudaine au flux d'électricité. Il en résulte une production rapide de chaleur, qui entraîne une ébullition rapide des cryogènes (ceux-ci quittent le système par des « **tubes de quench** »). Les avantages des aimants supraconducteurs sont une forte intensité de champ magnétique et une excellente homogénéité du champ magnétique. (De l'ordre de 10 à 50 ppm sur une région de 45 cm de diamètre). Une intensité de champ élevée et une **homogénéité de champ** facilitent des études très détaillées et rapides, et permettent la spectroscopie.

Les inconvénients des aimants supraconducteurs sont leur coût relativement élevé, et l'utilisation de cryogènes plutôt coûteux.



Votre carte d'assurance, s'il vous plaît. Et avez-vous vos protons avec vous?

Quelle est l'intensité de champ idéale?

Cette question est aussi facile à répondre que celle de la puissance idéale d'une voiture. Voici quelques-uns des avantages et des inconvénients :

- une intensité de champ plus élevée permet une meilleure résolution spatiale et des examens plus rapides, et peut être utilisée pour la spectroscopie;
- les systèmes à faible champ offrent en revanche un meilleur contraste des tissus, sont moins chers à l'achat et leur coût d'entretien est moins élevé.

La plupart des appareils de RM actuels sont des systèmes de 1,5 Tesla, les systèmes de 3,0 Tesla devenant de plus en plus populaires.

Un autre élément du matériel : les bobines

En IRM, des bobines de radiofréquence sont nécessaires pour envoyer l'impulsion RF afin d'exciter les protons, et pour recevoir le signal résultant. La technologie des bobines est extrêmement importante. Les mêmes bobines ou des bobines différentes peuvent être utilisées pour transmettre l'impulsion RF et recevoir le signal. Diverses bobines sont utilisées - voici quelques commentaires.

Bobines de volume

Les **bobines de volume** sont utilisées dans toutes les unités de RM. Elles enveloppent complètement la partie du corps qui doit être imagée. Ces bobines de volume doivent être proches de la taille du sujet.

La **bobine de corps** est une partie permanente de l'appareil et entoure le patient. Elle est importante, car elle est l'émettrice pour tous les types d'examens. Elle reçoit également le signal lorsque de grandes parties du corps sont imagées. Les bobines de tête (le type de bobine spécialisé le plus fréquemment utilisé), peuvent agir comme bobine de réception (avec la bobine de corps transmettant les impulsions RF), ou peuvent également transmettre les impulsions RF (les bobines dites d'émission-réception).

Bobines de gradient

Les **bobines de gradient** sont utilisées pour faire varier systématiquement le champ magnétique en produisant des champs électromagnétiques linéaires supplémentaires, ce qui permet de sélectionner les coupes et d'obtenir des informations spatiales. Comme nous avons trois dimensions dans l'espace, il existe trois ensembles de bobines de gradient. Comme ces bobines cognent contre leurs dispositifs d'ancrage, elles sont la cause du bruit que vous entendez pendant un examen RM.

Bobines de surface

Les **bobines de surface** sont placées directement sur la région d'intérêt, et ont des formes différentes correspondant à la partie à examiner.

Il s'agit généralement de bobines de réception uniquement, la plupart du signal reçu provenant des tissus environnants; les structures plus profondes ne peuvent pas être examinées avec ces bobines. Comme pour les **bobines de tête**, l'impulsion RF est transmise par la bobine de corps dans ces cas.

Bobines de correction

Comme nous l'avons déjà mentionné à propos des aimants, les champs magnétiques présentent des inhomogénéités. Une meilleure homogénéité peut être obtenue par des réglages électriques et mécaniques. Pour ce processus, appelé homogénéisation du champ magnétique (*shimming*), on utilise des **bobines de correction**.

Pourquoi les appareils de RM nécessitent-ils des installations spéciales?

Ces systèmes étant généralement très lourds, certaines exigences statiques doivent être respectées. Mais il y a d'autres facteurs importants.

Le puissant champ magnétique du système RM s'étend au-delà de l'aimant. Naturellement, le champ magnétique peut attirer des objets métalliques (même très lourds!) et les transformer en projectiles!



*Si vous écoutez la musique
que vous dites écouter, vos
protons sont déjà habitués!*



Ils doivent donc rester à l'extérieur de la salle d'examen. Le champ magnétique influence également les appareils mécaniques et électriques, comme les ordinateurs, les moniteurs, les stimulateurs cardiaques et les appareils à rayons X. Ces appareils doivent donc être maintenus à une certaine distance de l'appareil de RM.

D'autre part, il y a aussi des influences externes. L'air est rempli d'ondes radio – pensez à toutes les stations que vous pouvez recevoir sur votre radio. Pour éviter les interférences entre les ondes radio extérieures et celles émises par l'unité RM, l'ensemble du système doit être protégé par une **cage de Faraday**.

En outre, il faut tenir compte du fait que les objets métalliques de grande taille, en particulier lorsqu'ils sont en mouvement (comme les ascenseurs, les voitures), peuvent influencer le champ magnétique de l'appareil, et doivent également être tenus à l'écart de l'appareil RM.

Spectroscopie RM

La **spectroscopie RM** est utilisée depuis longtemps, bien avant que la RM ne soit utilisée pour l'imagerie. Cette procédure est utilisée comme un outil analytique, car elle permet d'identifier les différents états chimiques de certains éléments sans détruire l'échantillon. Notions que la spectroscopie et l'imagerie peuvent être combinées (**imagerie spectroscopique**). Cela nous permet d'obtenir des informations in vivo sur la chimie et le métabolisme à des endroits spécifiques, comme dans le cerveau, le foie ou même le cœur.

Comme ces mesures peuvent être répétées sans danger, des études de suivi de la physiologie cellulaire sont possibles. Cela peut, par exemple, être utile pour l'évaluation de certaines maladies et des effets d'une thérapie.

Comme la spectroscopie nécessite des aimants très homogènes avec des intensités de champ plus élevées, elle ne peut être réalisée qu'avec l'utilisation d'appareils RM qui possèdent des aimants supraconducteurs.

Une dernière révision



Maintenant que vous êtes arrivés jusqu'ici, nous espérons sincèrement que vous en savez un peu plus sur l'IRM. Une révision finale?

Oui, mais essayons une approche différente cette fois-ci : jetez un coup d'œil à l'index des pages suivantes. Vérifiez si vous comprenez tous les termes mentionnés. Si ce n'est pas le cas, reportez-vous aux numéros de page indiqués pour une courte révision.

Si vous comprenez tout ou au moins la plupart des termes, réjouissez-vous!



Si vous êtes arrivé jusqu'ici, un deuxième livre ne devrait pas poser de problème.