Commençons par un aperçu général de l'IRM...

Les différentes étapes d'un examen d'IRM peuvent être décrites très simplement :

- 1. Le patient est placé dans un aimant;
- 2. On envoie une onde radio;
- **3.** L'onde radio est désactivée :
- 4. Le patient émet un signal, qui est reçu et utilisé pour...
- 5. La reconstruction de l'image.

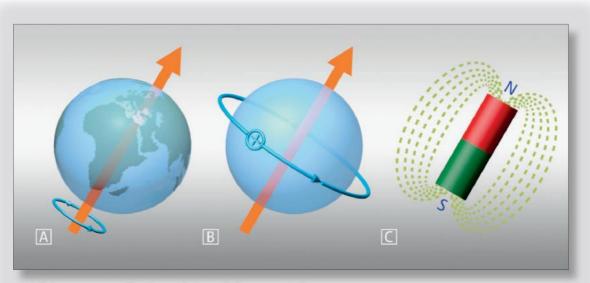


Fig. 1: Les protons possèdent une charge positive. Comme la Terre, ils tournent constamment autour d'un axe et ont leur propre champ magnétique.

Examinons ces étapes plus en détail

Que se passe-t-il lorsqu'on met un patient dans l'aimant d'un appareil à résonance magnétique?

Pour le comprendre, quelques notions élémentaires de physique sont indispensables, même si cela peut vous sembler un peu fastidieux.

Comme chacun sait, les atomes se composent d'un noyau et d'une enveloppe, elle-même constituée d'électrons. Le noyau contient, entre autres, des protons, des petites particules qui ont une charge électrique positive (quelle qu'elle soit). Ces protons sont comparables à de petites planètes. Comme la Terre, ils tournent constamment, ou ils tournent autour d'un axe (figure 1). C'est pourquoi on dit que les protons ont un spin. La charge électrique positive, qui est liée au proton, tourne naturellement avec lui. Et qu'est-ce qu'une charge électrique en mouvement? C'est un courant électrique.

Si vous avez retenu quelques notions de physique de vos années à l'école, vous savez qu'un courant électrique produit une **force magnétique** ou **champ magnétique**. Donc, un courant électrique s'accompagne toujours d'un champ magnétique.

C'est très facile à démontrer. Prenez un clou rouillé et approchez-vous d'une prise électrique - plus près, plus près. Vous sentez qu'il est repoussé par la force magnétique. Vous ne pouvez pas l'introduire dans la prise.

Récapitulons



Un proton a un spin, ce qui signifie que la charge électrique du proton se déplace elle aussi.
Une charge électrique en

mouvement est un courant électrique, et celui-ci engendre un champ magnétique. Par conséquent, le proton possède son propre champ magnétique et peut être considéré comme une barrette aimantée (figure 1C).

Que deviennent les protons quand on les place dans un champ magnétique externe?

Les protons – qui se comportent comme des petits aimants – s'alignent dans le champ magnétique externe comme l'aiguille d'une boussole dans le champ magnétique de la Terre. Mais il y a une grosse différence. L'aiguille de la boussole s'aligne toujours dans la direction du champ magnétique, alors que les protons peuvent s'orienter dans deux sens (figure 2) :

Les protons peuvent s'aligner avec les pôles Sud et Nord dans la direction du champ externe, parallèlement à celui-ci.

Ou bien ils peuvent pointer dans la direction complètement opposée, antiparallèle. Ces types d'alignement se situent à des niveaux d'énergie différents. Je vous explique: un homme peut s'aligner parallèlement au champ magnétique de la Terre, c'est-à-dire marcher normalement, ou il peut s'aligner de façon antiparallèle, dans la direction opposée. Les deux états ont des niveaux d'énergie différents, c'est-à-dire qu'ils ont besoin de quantités d'énergie différentes.

Marcher avec les jambes est certainement moins fatigant que marcher sur les mains. Et ça demande aussi moins d'énergie. (Dans les figures, cela sera illustré comme pointant vers le haut ou vers le bas, voir figure 2).

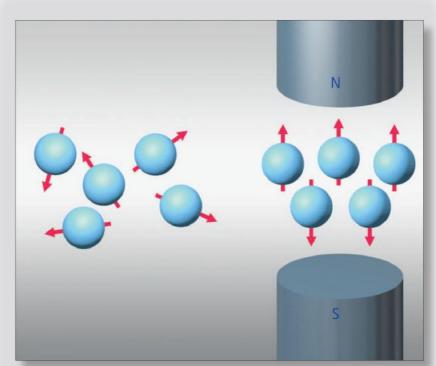


Fig. 2 : Normalement, les protons sont alignés de manière aléatoire. Mais cela évolue lorsqu'ils sont exposés à un fort champ magnétique externe. Ensuite, ils ne sont alignés que de deux façons, soit **parallèlement** soit **antiparallèlement** au champ magnétique externe.



Naturellement, l'état d'alignement privilégié est celui qui demande le moins d'énergie. Il y a donc plus de protons au niveau d'énergie inférieur, parallèle au champ magnétique externe, qui « marchent avec les jambes », si vous voulez. Les protons qui se trouvent au niveau d'énergie supérieur ou antiparallèle (c'est-à-dire qui « marchent sur les mains », pour reprendre notre métaphore) sont un peu moins nombreux.

La différence entre les deux groupes de protons est cependant très faible et dépend de l'intensité du champ magnétique appliqué. Pour vous donner une petite idée, pour environ 10 millions de protons qui « marchent sur les mains », il y en environ 10 000 007 qui « marchent avec les jambes ». La différence – « 007 » – est facile à retenir, vous ne trouvez pas?

Il est peut-être déjà évident à ce stade que pour l'IRM, les **protons mobiles** sont importants (ils constituent un sous-ensemble de tous les protons présents dans le corps). Le mouvement des protons – précession

Examinons de plus près ces protons

Nous verrons que les protons ne se contentent pas d'être là. alignés parallèlement ou antiparallèlement aux lignes de champ magnétique. Ils se déplacent d'une certaine façon. On appelle ce type de mouvement précession (figure 4A).

Quel type de mouvement est la « précession »?

Imaginez une toupie. Lorsque vous la touchez, elle se met à «tituber» ou à effectuer des mouvements de bascule. Mais elle ne tombe pas. Pendant la précession, l'axe des cercles de la toupie forme un cône (figure 4B).

Il est difficile de dessiner la précession d'un proton, car il s'agit d'un mouvement très rapide, comme nous le verrons plus loin.

Le proton

Par souci de simplicité, nous allons faire un « arrêt sur image », pour obtenir un instantané d'un moment précis dans le temps.

Pour des raisons que nous développerons plus tard, la vitesse de précession des protons est une variable cruciale. Cette vitesse peut être mesurée comme la fréquence de précession, c'est-à-dire le nombre précessions par seconde. La fréquence de précession n'est pas constante. Elle dépend de l'intensité du champ magnétique (pour l'intensité du champ magnétique, voir page 94), dans lequel les protons sont placés.

Plus le champ magnétique est puissant, plus la vitesse de précession est rapide et plus la fréquence de précession est élevée.

C'est comme une corde de violon : plus la force exercée sur la corde est forte, plus sa fréquence est élevée.

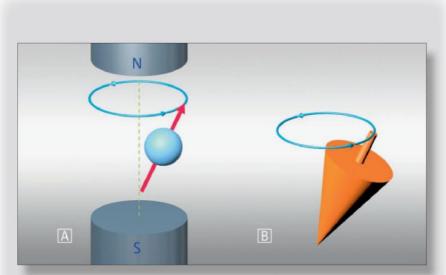


Fig. 4: Lorsqu'on touche une toupie en mouvement, elle effectue un mouvement de basculement. Les protons qui évoluent dans un champ magnétique puissant démontrent eux aussi ce type de mouvement, appelé précession.



Il est possible et indispensable de calculer précisément cette fréquence. Pour cela, on utilise une équation appelée équation de Larmor:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

ω₀ est la **fréquence de précession** - mesurée en Hz ou en MHz:

B₀ est l'intensité du champ magnétique externe, qui est donnée en Tesla (T) (voir page 94); et

γ est ce qu'on appelle le rapport gyromagnétique.

L'équation indique que la fréquence de précession devient plus élevée lorsque l'intensité du champ magnétique augmente. La relation exacte est déterminée par le rapport gyro-magnétique Y. Ce rapport gyromagnétique est différent selon les matériaux (par exemple, la valeur pour les protons d'hydrogène est de 42,5 MHz/T).

On peut comparer cela au taux de change, qui varie selon les devises.

C'est l'heure de la pause



Mais avant, récapitulons ce que nous avons jusqu'à présent :

· Les protons ont une charge électrique positive, qui est constamment en mouvement, car les protons possèdent un spin.

- · Cette charge électrique en mouvement est un courant électrique, et celui-ci s'accompagne toujours d'un champ magnétique.
- · Donc, chaque proton possède son propre petit champ magnétique et peut être considéré comme une barrette aimantée.
- · Quand on met un patient dans l'aimant d'un appareil à résonance magnétique, les protons, qui se comportent comme de petits aimants, s'alignent dans le champ magnétique externe. Ils le font de deux manières : parallèle et antiparallèle.

- L'état qui demande le moins d'énergie est privilégié, de sorte que les protons qui « marchent avec les jambes » sont un peu plus nombreux que les protons qui marchent « sur les mains » (figure 3).
- Les protons « précessionnent » le long des lignes de champ du champ magnétique, à la manière d'une toupie qui « précessionne » le long des lignes de champ du champ magnétique de la Terre.
- La fréquence de précession peut être calculée avec l'équation de Larmor. Elle est aussi plus élevée dans les champs magnétiques plus puissants. Pourquoi cette fréquence de précession est-elle importante?

Cela a un rapport avec la « résonance » de l'imagerie par résonance magnétique. Mais pour comprendre cela, il faudra encore quelques minutes.

Après la pause, vous devriez passer en revue ce récapitulatif avant de continuer. . .

Le système de coordonnées

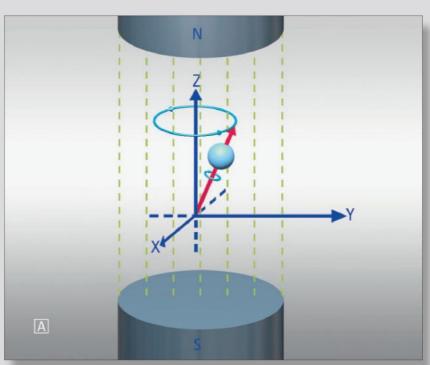
Pour faciliter la communication (et le dessin des illustrations), commençons par utiliser un système de coordonnées comme celui utilisé à l'école (figure 5). Comme vous le voyez, l'axe z va dans la direction des lignes de champ magnétique, et peut donc les représenter. Nous pouvons donc arrêter de dessiner l'aimant externe dans toutes les autres illustrations.

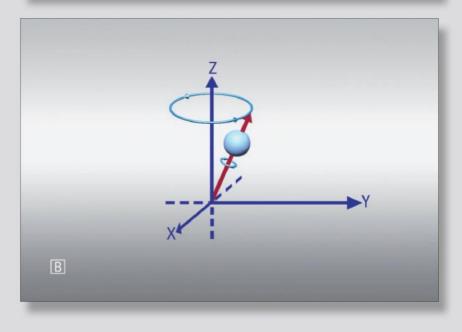
A partir de là, nous illustrerons également les protons comme vecteurs ou des petites flèches.

Au cas où vous l'auriez oublié, je vous rappelle qu'un vecteur représente une certaine force (par sa taille) qui agit dans une certaine direction (direction de la flèche). La force qui est représentée par des vecteurs dans nos illustrations est la force magnétique.



 $Fig.\ 5: L'utilisation$ d'un système de coordonnées facilite la description du mouvement des protons dans le champ magnétique, et nous pouvons également arrêter de dessiner l'aimant externe.





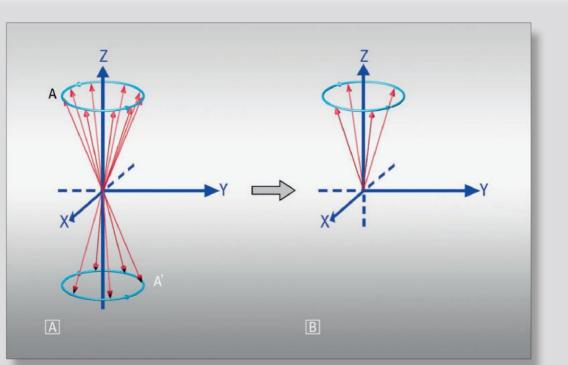


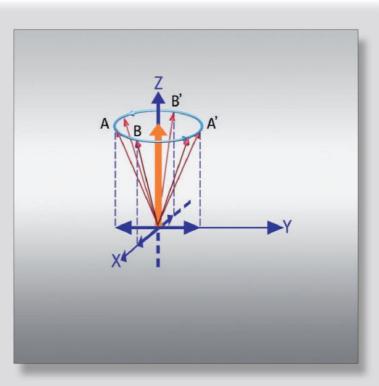
Fig. 6 : Les cinq protons, qui « pointent » vers le bas, annulent les effets magnétiques du nombre équivalent de protons qui « pointent » vers le haut (A). En fait, il suffit donc de regarder les quatre protons non opposés (B).

Voyons maintenant la figure 6. Ici, nous avons 9 protons pointant vers le haut, qui se déplacent parallèlement aux lignes du champ magnétique externe, et 5 protons pointant vers le bas, qui se déplacent de manière antiparallèle au champ magnétique externe.

Ce que nous voyons dans la figure n'est qu'une image prise à un moment précis. Une image prise juste un peu plus tard montrerait les protons dans différentes positions, parce qu'ils précessionnent. La précession est phénomène extrêmement rapide. La fréquence de précession des protons de l'hydrogène se situe autour de 42 MHz dans un champ magnétique de 1 Tesla (voir page 94); cela signifie que les protons précessionnent plus de 42 millions de fois par seconde autour du « cône de crème glacée ». Le corps humain contient des milliards de protons qui précessionnent à cette vitesse.

Il est facile d'imaginer qu'à un certain moment, il peut y avoir un proton (A dans l'illustration) qui pointe dans une direction, et un autre proton (A') qui pointe exactement dans la direction opposée. Le résultat est très important : les forces magnétiques dans les directions opposées s'annulent, comme deux personnes tirant aux extrémités opposées d'une corde. Enfin, pour chaque proton pointant vers le bas, il y en a un qui pointe vers le haut, ce qui annule son effet magnétique. Mais comme nous l'avons appris, il y a plus de protons qui pointent vers le haut que vers le bas, et les forces magnétiques de ces protons ne sont pas annulées par les autres. Nous nous retrouvons donc avec quelques protons (4 dans notre exemple) pointés vers le haut (figure 6).

Fig. 7: La force magnétique du proton A, illustrée par une flèche (un vecteur), peut être considérée comme résultant de deux composantes : l'une pointant vers le haut le long de l'axe z, et l'autre en direction de l'axe v. La composante le long de l'axe y est annulée par le proton A', dont la force magnétique a également une composante le long de l'axe y, mais dans la direction opposée. Il en va de même pour les autres protons, par exemple B et B', qui annulent leurs vecteurs magnétiques respectifs le long de l'axe x. Contrairement aux vecteurs magnétiques du plan xy- qui s'annulent, les vecteurs de l'axe z pointent dans la même direction et s'additionnent donc pour former un nouveau vecteur de somme magnétique pointant vers le haut.



Cependant, les forces magnétiques qui pointent vers le haut et vers le bas ne sont pas les seules à pouvoir s'annuler ou se neutraliser. Lorsque les protons qui pointent vers le haut s'avancent, il peut y en avoir un qui pointe vers la droite, tandis qu'un autre pointe vers la gauche; ou pour un qui pointe vers l'avant, il y en a un qui pointe vers l'arrière, et ainsi de suite (les protons correspondants dans la figure 7 sont marqués A et A', B et B' par exemple). Cela signifie que les forces magnétiques opposées des protons restants s'annulent dans ces directions. Ceci est vrai pour toutes les directions sauf une, la direction de l'axe z, le long du champ magnétique externe (figure 7). Dans cette direction, les vecteurs uniques (les forces magnétiques uniques) s'additionnent, comme des personnes tirant sur la même extrémité d'une corde.

On obtient en fait un vecteur magnétique dans la direction du champ magnétique externe (la flèche orange sur l'axe z de la figure 7); et ce vecteur est un vecteur somme constitué par l'addition des vecteurs magnétiques des protons pointant vers le haut.

Qu'est-ce que cela signifie? Cela signifie qu'en plaçant un patient dans l'aimant de l'unité de RM (ou dans tout autre champ magnétique puissant), le patient lui-même devient un aimant, c'est-à-dire qu'il a son propre champ magnétique. Pourquoi? Parce que les vecteurs des protons qui ne s'annulent pas s'additionnent (figure 8).

Comme cette aimantation est longitudinale par rapport au champ magnétique externe, on l'appelle aimantation longitudinale.

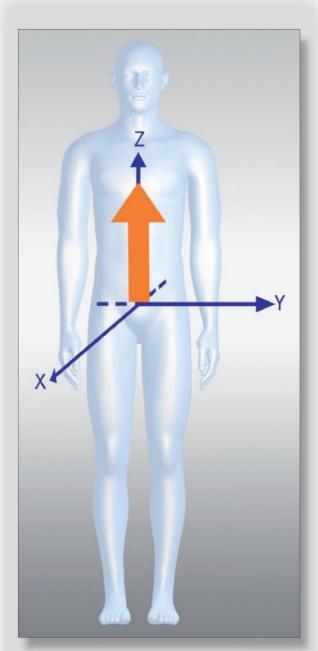


Fig. 8 : Dans un puissant champ magnétique externe, un nouveau vecteur magnétique est induit chez le patient, qui devient lui-même un aimant. Ce nouveau vecteur magnétique est aligné avec le champ magnétique extérieur.

Comme nous l'avons vu, le nouveau vecteur magnétique du patient qui en résulte pointe dans la direction du champ extérieur, le long de ses lignes de champ. C'est ce qu'on appelle la direction longitudinale. Et c'est en fait ce nouveau vecteur magnétique qui peut être utilisé pour obtenir un signal. L'idéal serait de pouvoir mesurer l'aimantation du patient, mais ce n'est pas possible, parce que cette force magnétique va dans la même direction, c'est-à-dire parallèle au champ magnétique externe (figures 7 et 8).

Prenons un exemple : Imaginez que vous êtes assis sur un bateau qui flotte sur une rivière. Vous avez un tuyau d'eau à la main et vous versez de l'eau dans la rivière. Pour quelqu'un qui vous observe depuis le rivage, il est impossible de savoir combien d'eau vous versez (c'est-à-dire la quantité d'aimantation qui vient s'ajouter à l'ancienne direction).

Cependant, lorsque vous pointez le tuyau d'eau vers la rive et que vous changez la direction du nouveau champ magnétique, l'eau peut être directement captée et mesurée par un observateur impartial sur la rive (figure 9). En conclusion, cela veut dire qu'on ne peut pas mesurer directement l'aimantation longitudinale du champ magnétique externe. Pour cela, il faudrait que l'aimantation ne soit pas longitudinale, mais transversale au champ magnétique extérieur.



C'est l'heure de la pause



Mais avant, récapitulons ce que nous avons appris jusqu'à présent. Après la pause, vous devriez passer en revue ce récapitulatif avant continuer.

- · Les protons ont une charge positive et ont un spin. Par conséquent, ils ont leur propre champ magnétique et peuvent être considérés comme des barrettes aimantées.
- · Quand on les place dans un puissant champ magnétique externe, ils s'alignent avec celui-ci. Certains sont parallèles (pointant vers le haut), d'autres sont antiparallèles - (pointant vers le bas).
- Les protons ne sont pas immobiles, ils précessionnent autour des lignes de champ magnétique. Et plus le champ magnétique est puissant, plus la fréquence de précession élevée. Cette relation mathématiquement décrite dans l'équation de Larmor.
- Les protons parallèles et antiparallèles peuvent s'annuler mutuellement. Mais comme il y a plus de protons parallèles au niveau d'énergie inférieur (« pointant vers le haut »), il reste quelques protons dont les forces magnétiques ne sont pas annulées. Tous ces protons pointant vers le haut additionnent leurs forces dans la direction du champ magnétique externe. Donc, quand on met un patient dans l'aimant de l'appareil de RM, il a son propre champ magnétique, qui est longitudinal au champ externe de l'aimant de l'appareil de RM (figures 7 et 8). Mais comme il est longitudinal, on ne peut pas le mesurer directement.