

C'est l'heure de la pause



Récapitulons ce que nous avons appris jusqu'à présent. Après la pause, vous devriez passer en revue ce récapitulatif avant de 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 anti-parallèles - (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 est élevée. Cette relation est 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.

Émission d'une onde radio

Que se passe-t-il après avoir mis un patient dans l'aimant d'un appareil à résonance magnétique?

On envoie une **onde radio**. Le terme « onde radio » est utilisé pour décrire une onde électromagnétique qui se trouve dans la gamme de fréquences des ondes reçues par votre radio. Comme vous pouvez l'imaginer, l'onde radio dont il est question ici est complètement différente. Ce que nous envoyons réellement au patient n'est pas une onde de longue durée, mais une courte salve d'une **onde électromagnétique**, appelée **radiofréquence ou impulsion RF**. Le but de cette impulsion RF est de perturber les protons, qui précessionnent tranquillement en alignement avec le champ magnétique externe.

Nous verrons cela en détail un peu plus loin. Mais toutes les impulsions RF ne perturbent pas l'alignement des protons : Pour cela, nous avons besoin d'une **impulsion RF** spéciale, qui peut échanger de l'énergie avec les protons.

C'est comme si quelqu'un vous regardait. Vous ne le remarquerez peut-être pas, car il n'y a pas d'échange d'énergie. Donc vous ne changez pas de position ou d'alignement. Mais si quelqu'un vous donnait un coup dans le ventre, et donc, échangeait de l'énergie avec vous, votre alignement serait perturbé. Et cela peut expliquer pourquoi nous avons besoin d'une certaine impulsion RF capable d'échanger de l'énergie avec les protons pour modifier leur alignement.

Mais quand une impulsion RF peut-elle échanger de l'énergie avec les protons?

Pour cela, elle doit avoir la même fréquence, c'est-à-dire la même « vitesse » que les protons, si vous voulez. Imaginez que vous roulez à vélo sur une piste et que quelqu'un dans le couloir voisin veut vous donner un hamburger, c'est-à-dire échanger de l'énergie avec vous. Comme vous avez faim, le hamburger vous donnera une nouvelle énergie.



Fig. 10 :
L'échange d'énergie est possible lorsque les protons et l'impulsion de radiofréquence ont la même fréquence.

Ce transfert d'énergie est possible lorsque les deux cyclistes roulent à la même vitesse, se déplacent sur la piste de course à la même fréquence :

Si la vitesse/fréquence est différente... ... le transfert d'énergie est minime ou impossible.

« Vitesse » des protons et résonance

Quelle était la vitesse, ou mieux, la fréquence des protons?

Ils avaient leur **fréquence de précession** que l'on peut calculer avec l'équation de Larmor (voir page 10). Ce n'est que lorsque l'impulsion RF et les protons ont la même fréquence que les protons peuvent capter une partie de l'énergie de l'onde radio, un phénomène appelé **résonance** - c'est de là que vient la « résonance » dans la résonance magnétique.

On peut illustrer la notion de résonance à l'aide de diapasons. Imaginez que vous êtes dans une pièce avec différents types de diapasons (accordés sur le « la », le « mi » et le « ré »). Quelqu'un entre dans la pièce avec un diapason accordé sur le « la » que l'on a frappé pour émettre un son. Parmi tous les diapasons présents dans la pièce, ceux qui sont accordés sur le « la », et seulement ceux-là, captent l'énergie, se mettent à vibrer et à émettre du son. On appelle ce phénomène la résonance.

Comment réagissent les protons lorsqu'ils sont exposés à l'impulsion RF?

Certains d'entre eux captent l'énergie, et passent d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau supérieur. Si vous vous souvenez du chapitre précédent, ceux qui marchaient avec les jambes se mettent à marcher sur leurs mains. Et cela a un certain effet sur l'aimantation du patient, comme vous pouvez le voir dans la figure 11. Supposons qu'à partir de la somme nette de 6 protons pointant vers le haut, après l'envoi de l'impulsion RF, 2 points se trouvent en bas.

Le résultat est que ces 2 protons annulent les forces magnétiques du même nombre de protons, ce qui pointe vers le haut.

En fait, l'aimantation dans la direction longitudinale - qui est de 6 avant l'impulsion RF - diminue donc à 2.



Qu'arrive-t-il d'autre aux protons lorsqu'ils sont exposés à l'impulsion RF?

Comme nous venons de l'apprendre, certains des protons captent de l'énergie, et passent d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau supérieur, diminuant ainsi l'aimantation dans le sens longitudinal.

Mais il se passe autre chose. Vous souvenez à quoi ressemblent les ondes radio? Regardez la figure 12 : elles ressemblent à un fouet.

Et comment réagissent les animaux savants lorsque le dresseur fait claquer son fouet? Ils marchent en rang, au pas, tous ensemble, en phase.

Croyez-le ou non, l'impulsion RF produit le même résultat que le claquement du fouet, pas sur les animaux, mais sur les protons. Lorsque les protons pointent aléatoirement à gauche/droite, en arrière/en avant et ainsi de suite, ils annulent également leurs forces magnétiques dans ces directions (comme nous l'avons lu à la page 13).



Fig. 12 : Les ondes radio ressemblent à un fouet, et les ondes radio en IRM agissent également comme un fouet.

Fig. 11 : L'impulsion de radiofréquence échange de l'énergie avec les protons (A) et certains d'entre eux passent à un niveau d'énergie supérieur, qui pointe vers le bas dans l'illustration (B). En effet, l'aimantation le long de l'axe z diminue, car les protons qui pointent vers le bas « neutralisent » le nombre équivalent de protons pointant vers le haut.

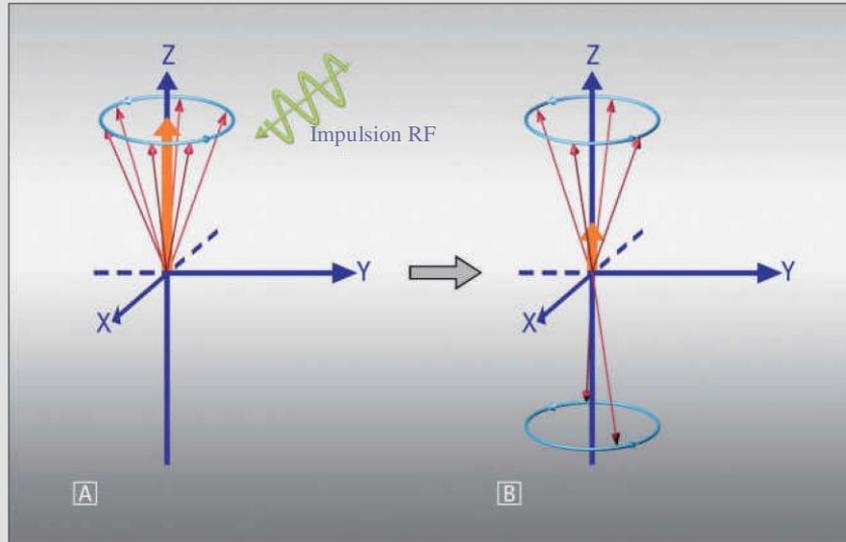
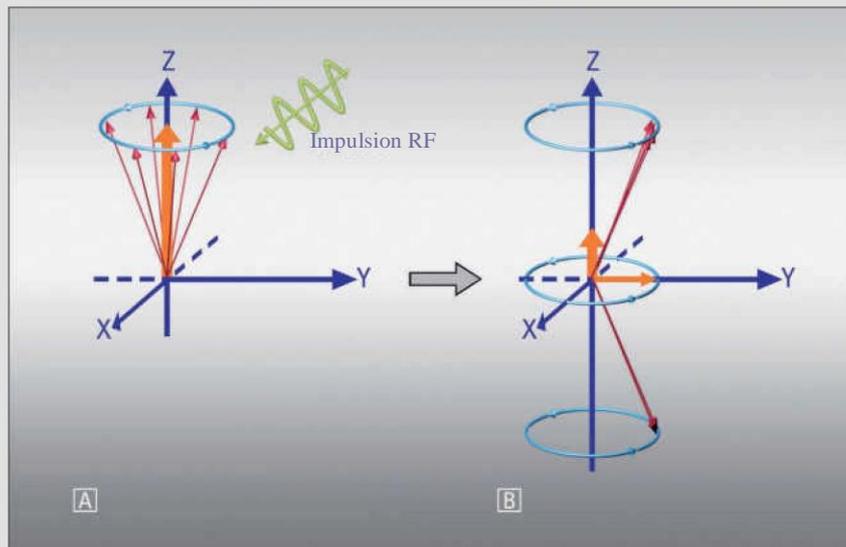


Fig. 13 : L'onde radio a deux effets sur les protons : elle élève certains protons à un niveau d'énergie supérieur (ils pointent vers le bas), et elle fait également en sorte que les protons avancent au pas, tous en même temps. La première se traduit par une diminution de l'aimantation le long de l'axe z, ce qu'on appelle l'aimantation longitudinale. Cette nouvelle aimantation dans le plan x-y- (→), une nouvelle aimantation transversale, qui se déplace avec les protons en précession.



Grâce à l'impulsion RF, les protons ne pointent plus dans des directions aléatoires, mais se déplacent de manière synchronisée – ils sont « en phase ». Ils pointent maintenant dans la même direction au même moment, et donc leurs vecteurs magnétiques s'additionnent dans cette direction.

Il en résulte un vecteur magnétique pointant du côté vers lequel les protons en précession pointent, et ce dans une direction transversale (figure 13). C'est pourquoi on parle d'**aimantation transversale**.



Fig. 14 : Les protons qui précessionnent en phase provoquent une nouvelle aimantation transversale.

Alors, qu'a-t-on appris de nouveau?



Refaites-le à l'aide de la figure 15.

- Donc, quand on met un patient dans l'aimant de l'appareil de RM, il crée son propre champ magnétique, qui est longitudinal au champ externe.

- L'envoi d'une impulsion RF qui a la même fréquence que la fréquence de précession des protons provoque deux effets :

- Certains protons captent l'énergie, commencent à marcher sur les mains et diminuent ainsi le niveau d'aimantation longitudinale.

- ET : Les protons se synchronisent, commencent à précessionner en phase. Leurs vecteurs s'additionnent maintenant également dans une direction transversale au champ magnétique externe, et une aimantation transversale est ainsi établie.

En résumé : L'impulsion RF provoque une diminution de l'aimantation **longitudinale** et établit une nouvelle **aimantation transversale** (figures 13 et 15).

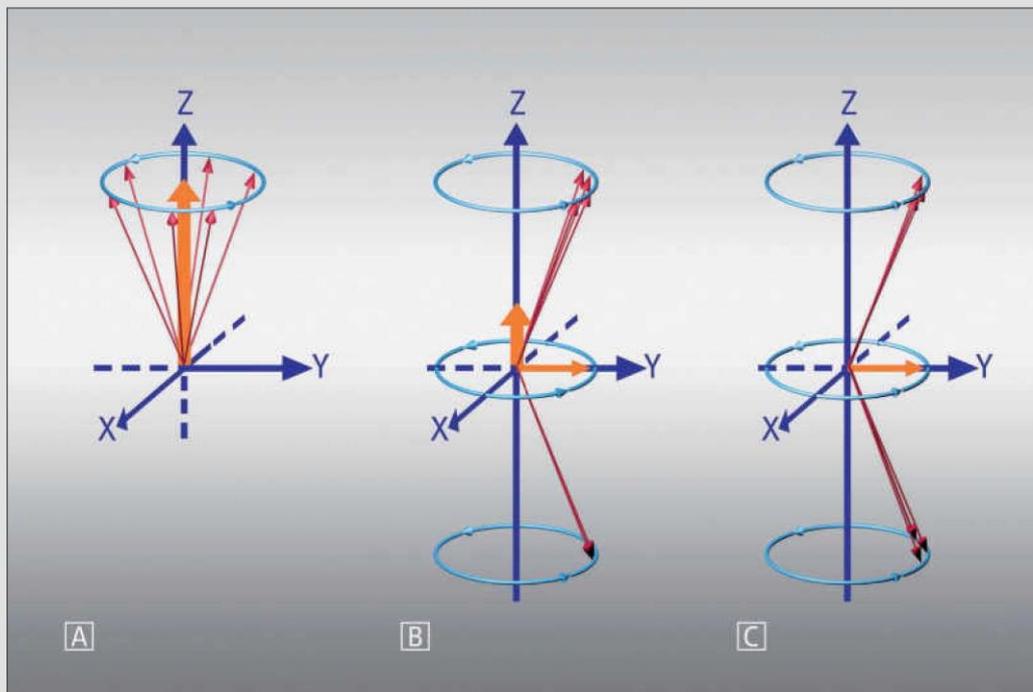


Fig. 15 : Dans un puissant champ magnétique externe, un nouveau vecteur magnétique est induit chez le patient (A). L'émission d'une impulsion RF provoque une nouvelle aimantation transversale tandis que l'aimantation longitudinale diminue (B). Selon l'impulsion RF, l'aimantation longitudinale peut même disparaître totalement (C).

Gros plan sur le vecteur transversal

Voyons de plus près le vecteur d'aimantation transversale qui vient de se créer.

Il se déplace en phase avec les protons en précession (figure 16). Le nouveau vecteur magnétique s'approche, puis s'éloigne, s'approche, puis s'éloigne, et ainsi de suite.

Et le point suivant est important : en se déplaçant et en changeant constamment, le **vecteur magnétique** induit un courant électrique. Nous avons déjà parlé du phénomène opposé : la charge électrique mobile du proton (le courant électrique) induit le champ magnétique du proton.

C'est aussi vrai dans l'autre sens : un champ magnétique en mouvement provoque un courant électrique, par exemple dans une antenne. Et ce courant électrique induit par le champ magnétique en mouvement est le signal de l'IRM. Lorsque le vecteur magnétique transversal se déplace avec les protons en précession, il se déplace avec la fréquence de précession. Le signal de RM qui en résulte a donc également la **fréquence de précession** (figure 16) : Mais comment pouvons-nous réaliser une image de ce courant électrique, qui est en fait notre signal RM?

Pour cela, nous devons savoir d'où provient le signal dans le corps. Comment allons-nous le savoir? C'est vraiment très simple : nous ne mettons pas le patient dans un **champ magnétique** qui a la même force sur toute la partie du patient que nous voulons examiner.

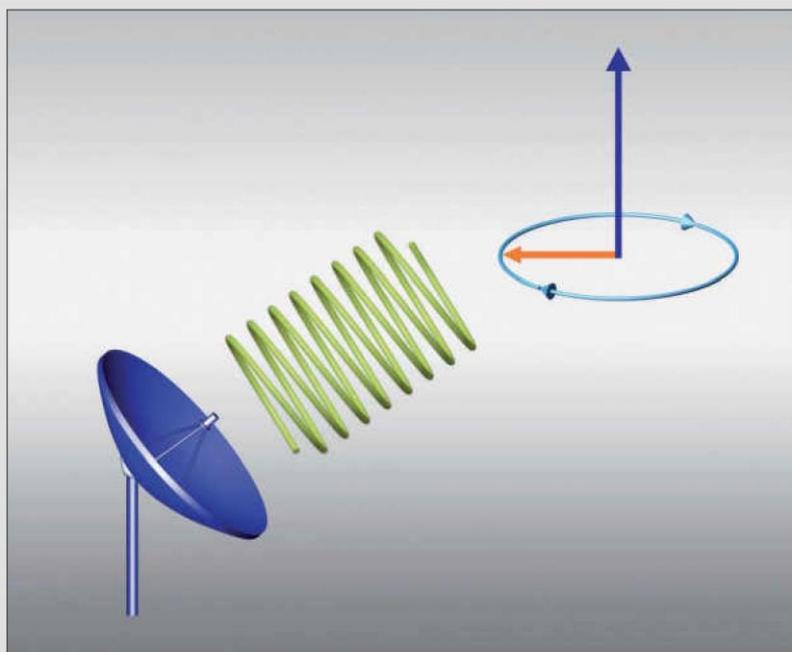
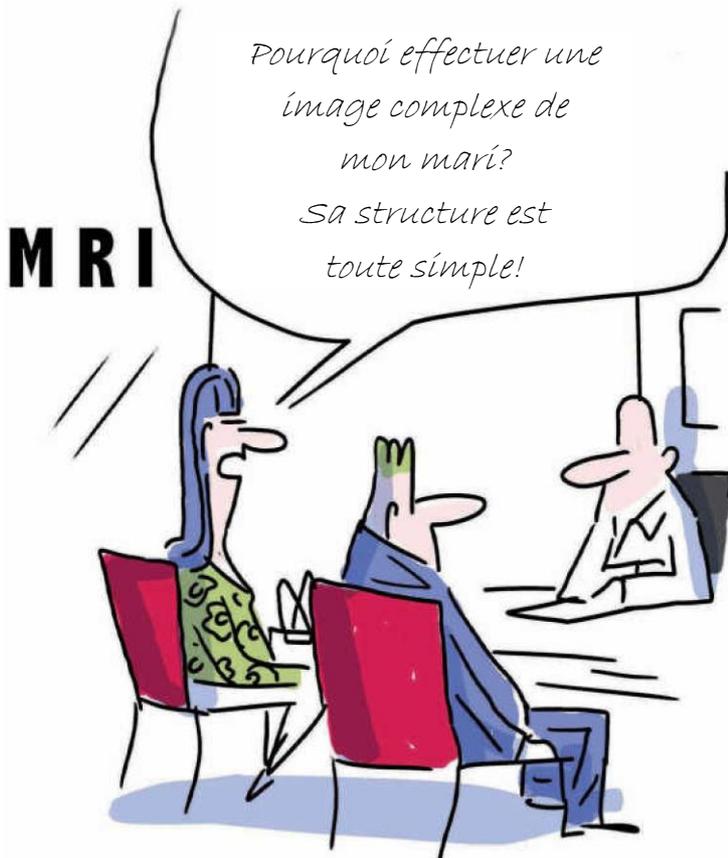


Fig. 16 : La nouvelle aimantation transversale se déplace avec les protons en précession (voir figure 13). Ainsi, pour un observateur extérieur, l'aimantation transversale change constamment de direction et peut induire un signal dans une antenne.



Prenons plutôt un champ magnétique, qui a une force différente à chaque point de la section transversale du patient. Quel est le résultat?

Nous avons entendu dire que la fréquence de précession d'un proton dépend de la force du champ magnétique – comme la fréquence d'une corde de violon dépend de la force avec laquelle on la tire.

Si cette force diffère d'un point à l'autre chez le patient, alors les protons à différents endroits se mettent à effectuer un mouvement de précession avec des fréquences différentes.

Et comme ils se précisent avec des fréquences différentes, le signal RM qui en résulte, provenant de différents endroits, a également une fréquence différente. Et grâce à la fréquence, nous pouvons attribuer un signal à un certain endroit.

C'est comme avec votre télévision : lorsque vous êtes dans la cuisine (où vous n'avez probablement pas de télévision) et que vous entendez un son de votre émission préférée, vous savez d'où vient ce son. Il provient de l'endroit de votre appartement où se trouve la télévision. Ce que vous faites inconsciemment, c'est de relier un certain son à un certain endroit dans l'espace.

Bien, ça suffit pour l'information spatiale pour l'instant, nous y reviendrons en détail à la page 87.

Plus de détails sur le signal RM

Si nos protons tournaient en **synchronisation**, en phase, et que rien ne changeait, on obtiendrait un signal comme dans la figure 16.

Mais ce n'est pas ce qui se passe. Dès que l'impulsion RF est désactivée, tout le système, qui a été perturbé par l'impulsion RF, retourne à son état initial, calme et tranquille. Il se relaxe.

L'aimantation transversale nouvellement établie commence à disparaître – un processus appelé **relaxation transversale** – et l'aimantation longitudinale reprend sa taille initiale – un processus appelé **relaxation longitudinale**.

Pourquoi?

La raison pour laquelle l'aimantation longitudinale revient à sa taille normale est plus facile à expliquer, nous allons donc commencer par là (voir figure 17).

Aucun proton ne « marche sur les mains » plus longtemps qu'il ne le faut. Un trait humain, en quelque sorte. Les protons qui ont été élevés à un niveau d'énergie supérieur par l'impulsion RF reviennent à leur niveau d'énergie inférieur, et recommencent à « marcher avec les jambes ».

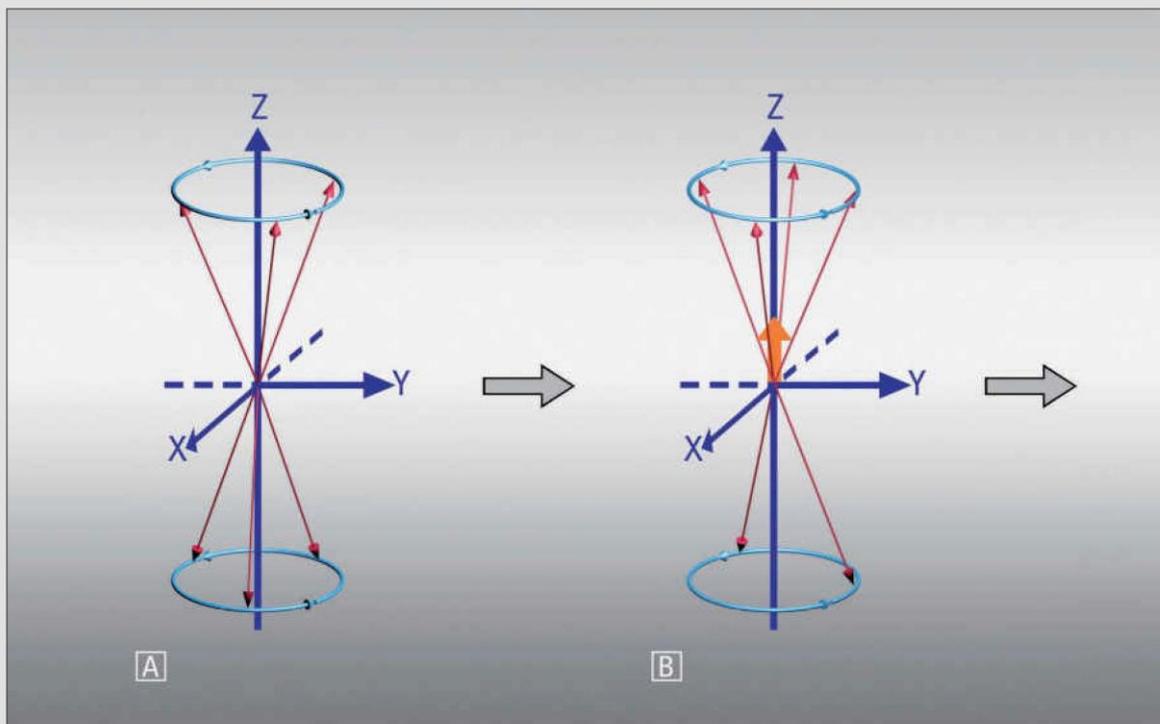


Fig. 17 : Après la désactivation de l'impulsion RF, les protons repassent de leur état d'énergie supérieur à leur état d'énergie inférieur, c'est-à-dire qu'ils pointent à nouveau vers le haut. Ceci est illustré « un par un ». L'effet est que l'aimantation longitudinale augmente et revient à sa valeur initiale. Notez que pour simplifier, les protons n'ont pas été représentés comme étant en phase : ce sujet est traité plus en détail dans les figures 20 et 26.

Après l'arrêt de l'impulsion RF, les protons retournent à l'état d'énergie inférieur, c'est-à-dire qu'ils pointent à nouveau vers le haut, mais tous les protons ne le font pas exactement en même temps. Il s'agit plutôt d'un processus continu, comme si un proton après l'autre revenait à son état initial. Ceci est illustré par la figure 17 pour un groupe de protons. L'effet est que l'**aimantation longitudinale** augmente et revient à sa valeur initiale.

Qu'advient-il de l'énergie que les protons avaient captée à partir de l'impulsion RF?

Cette énergie est simplement transmise à leur environnement, qu'on appelle le **réseau**.

Et c'est pourquoi ce processus n'est pas seulement appelé relaxation longitudinale, mais aussi **relaxation spin-réseau**.

En se remettant sur pied, c'est-à-dire en pointant à nouveau vers le haut, ces protons n'annulent plus les vecteurs magnétiques du même nombre de protons pointant vers le haut, comme ils le faisaient auparavant. Ainsi, l'aimantation dans cette direction, l'**aimantation longitudinale** augmente, et revient finalement à sa valeur initiale (figure 17).

Si vous tracez l'aimantation longitudinale en fonction du temps après la désactivation de l'impulsion RF, vous obtenez une courbe comme sur la figure 18. Elle augmente avec le temps. On l'appelle aussi « courbe **T₁** ».

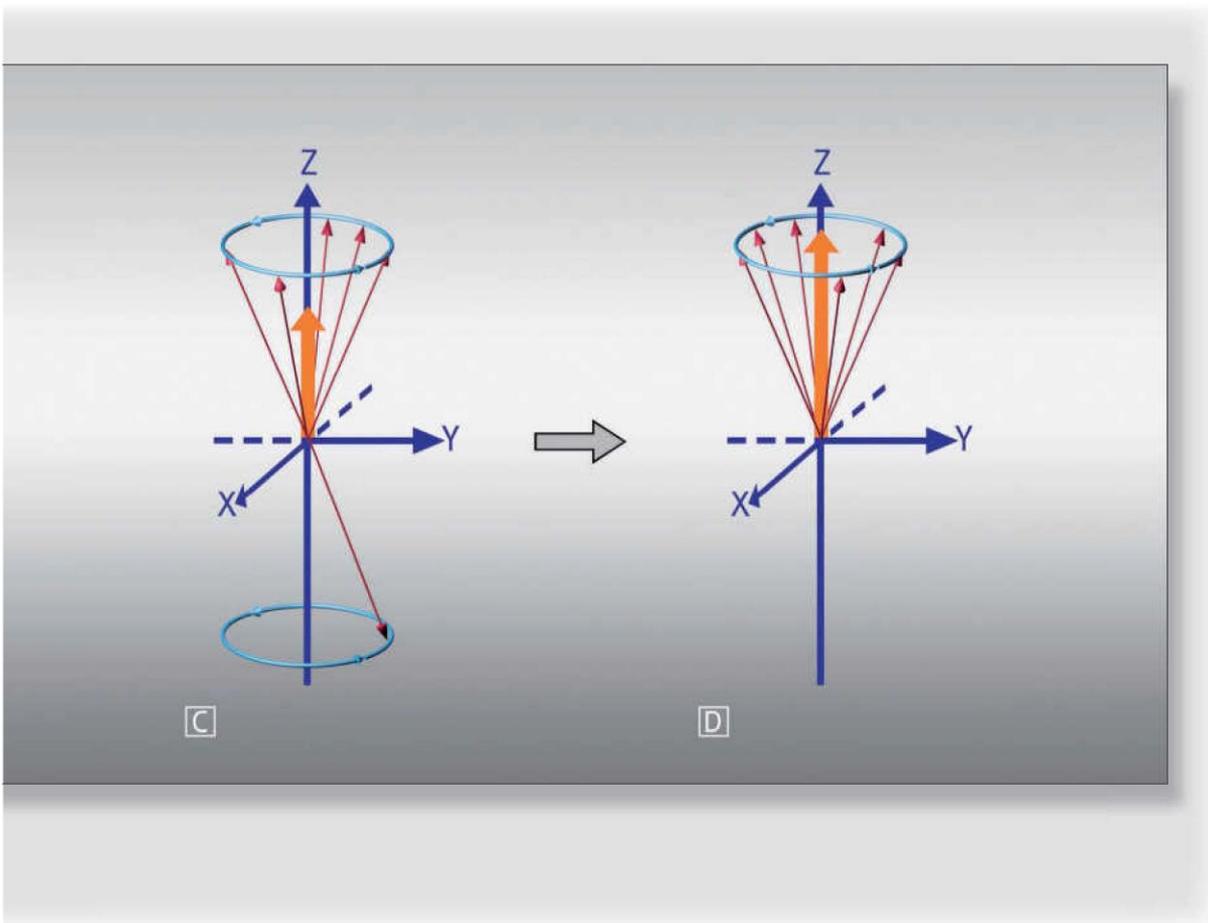
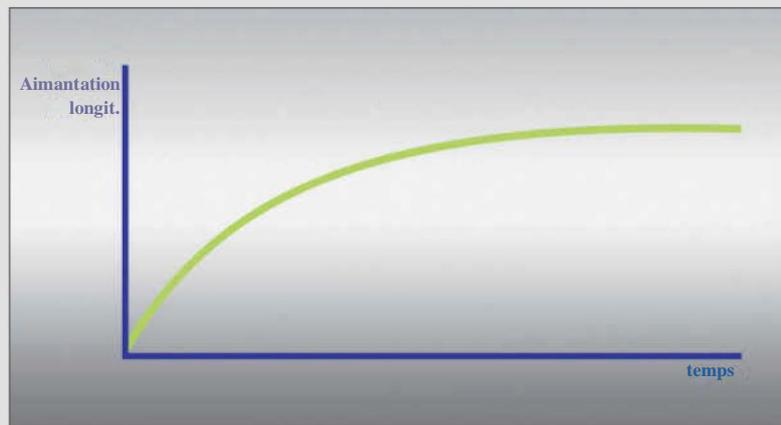


Fig. 18 : Si on trace l'aimantation longitudinale en fonction du temps après que l'impulsion RF a été désactivée on obtient une courbe dite « T_1 ».



Le temps requis à l'aimantation longitudinale pour revenir à sa valeur initiale, est décrit par le **temps de relaxation longitudinale**, également appelé T_1 . En fait, il ne s'agit pas du temps exact qu'il faut, mais d'une constante de temps, qui décrit la vitesse à laquelle ce processus se déroule.

Comme quand on chronomètre le tour de circuit d'un pilote lors d'une course automobile.

Le chrono vous donne une idée approximative, mais pas exacte, du temps que peut prendre la course. Ou plus scientifiquement, T_1 est une constante de temps comparable aux constantes de temps qui décrivent par exemple la désintégration radioactive.

Pour se rappeler que la valeur T_1 correspond au temps de relaxation **longitudinale**, il y a un moyen mnémotechnique très simple :

Si vous retournez le « 1 », il ressemble beaucoup à un « l », comme dans longitudinale.

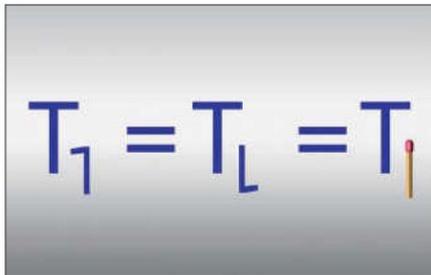
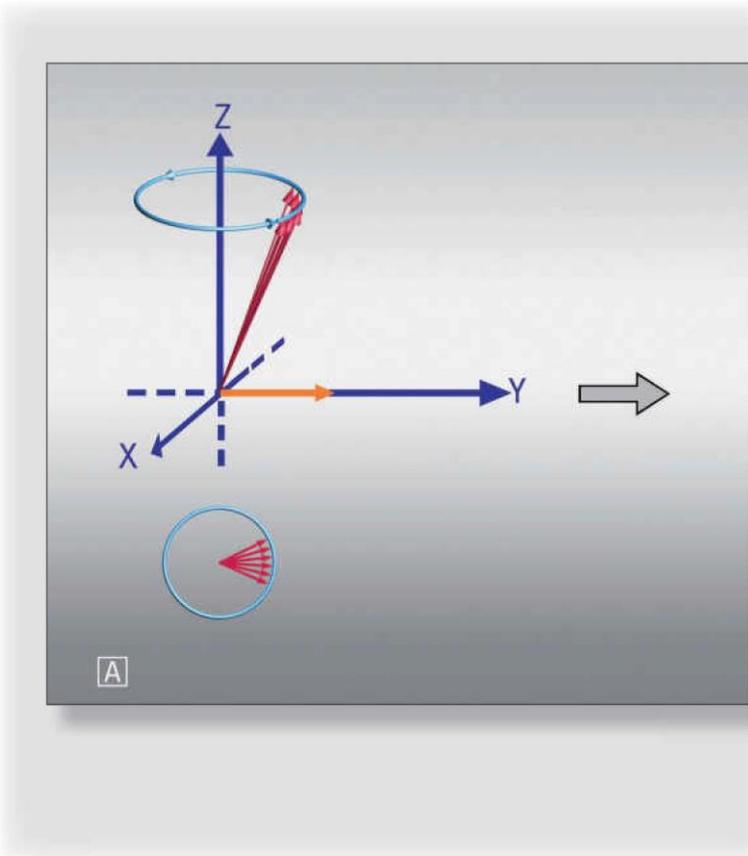


Fig. 19 : T_1 est le temps de relaxation longitudinale qui a un rapport avec l'échange d'énergie thermique.

Je vous rappelle également que cela décrit la relaxation spin-réseau.

Mais il y a d'autres indices cachés : le « 1 » ressemble aussi à une allumette. Et cette allumette devrait vous rappeler quelque chose, que nous avons également déjà mentionné : la relaxation longitudinale a un rapport avec l'échange d'énergie (l'énergie thermique) que les protons émettent vers le réseau environnant tout en revenant à leur état d'énergie inférieur.



À propos de T_2

Bon, assez parlé de l'aimantation longitudinale. Passons à l'aimantation transversale.

Supposons que ce soit la situation juste avant que l'impulsion RF ne soit désactivée.

Lorsque l'impulsion RF est désactivée, les protons se déphasent parce que plus rien ne les en empêche. Par souci de simplicité, ceci est illustré pour un groupe de protons qui « pointent tous vers le haut » dans la figure 20.

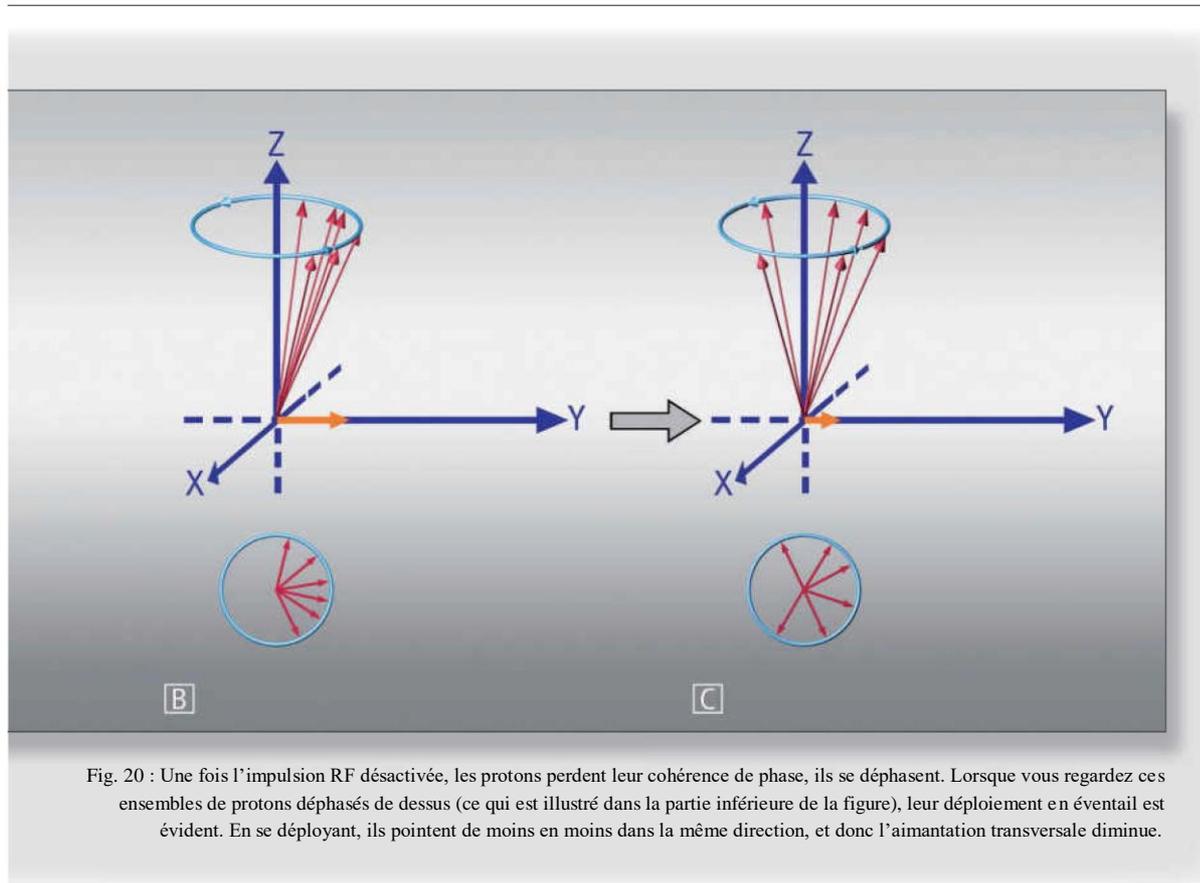


Fig. 20 : Une fois l'impulsion RF désactivée, les protons perdent leur cohérence de phase, ils se déphasent. Lorsque vous regardez ces ensembles de protons déphasés de dessus (ce qui est illustré dans la partie inférieure de la figure), leur déploiement en éventail est évident. En se dépliant, ils pointent de moins en moins dans la même direction, et donc l'aimantation transversale diminue.

Nous avons entendu précédemment que les protons se déplacent à une fréquence déterminée par l'intensité du champ magnétique dans lequel ils se trouvent, et que tous les protons devraient subir le même champ magnétique. Mais ici, ce n'est pas le cas :

Premièrement, le champ de l'aimant de RM dans lequel le patient est placé n'est pas totalement uniforme, pas totalement homogène, mais varie un peu, provoquant ainsi différentes fréquences de précession.

Deuxièmement, chaque proton est influencé par les petits champs magnétiques des noyaux voisins qui ne sont pas non plus répartis de manière uniforme, ce qui entraîne également des fréquences de précession différentes. Ces variations du champ magnétique interne sont en quelque sorte caractéristiques d'un tissu.

Ainsi, une fois que l'impulsion RF est désactivée, les protons ne sont plus obligés de rester en phase; et comme ils ont des fréquences de précession différentes (ce que nous venons de le voir), ils seront bientôt déphasés.

Il est intéressant de voir à quelle vitesse les protons se déphasent : supposons qu'un proton - p1 - tourne à 10 millions de tours par seconde, c'est-à-dire avec une fréquence de précession de 10 mégahertz.

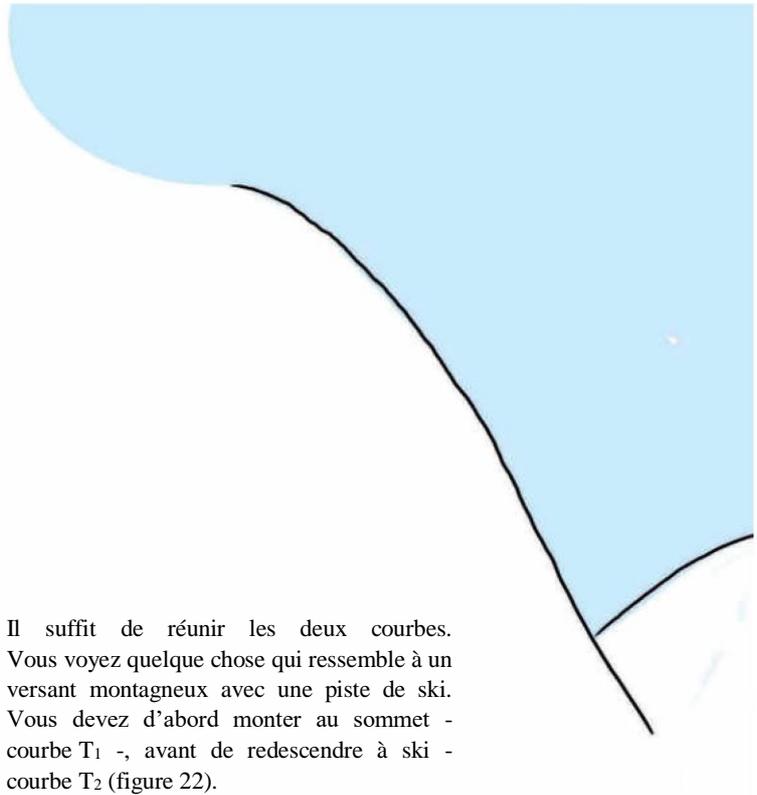
En raison d'inhomogénéités, un proton voisin - p2 - se trouve dans un champ magnétique, qui est plus fort de 1 %; ce proton a une fréquence de précession de 10,1 mégahertz, soit 1 % de plus. En 5 microsecondes ($0,000005$ sec ou 5×10^{-6}), p2 aura fait 50,5 tours ou révolutions, alors que le proton p1 n'en aura fait que 50. Dans ce court laps de temps, les protons seront déphasés de 180° , annulant ainsi leurs moments magnétiques dans le plan respectif.

Comme nous l'avons fait pour l'aimantation longitudinale, nous pouvons tracer l'aimantation transversale en fonction du temps. On obtient une courbe comme dans la figure 21. Cette courbe descend, car l'**aimantation transversale** disparaît avec le temps. Et comme vous vous en doutez probablement, il y a aussi une constante de temps, qui décrit la vitesse à laquelle l'aimantation transversale disparaît, diminue. Cette constante de temps est le **temps de relaxation transversale** T_2 .

Comment se souvenir de ce qu'est le « T_2 »? Facile :

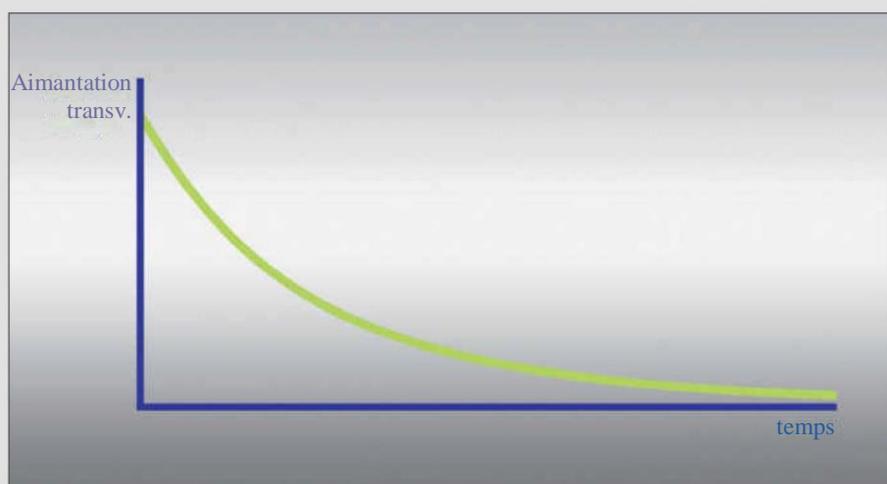
T_2 est T x 2 est TT est Tt

et cela signifie qu'il décrit le « T transversal », donc la relaxation de l'aimantation transversale. La courbe résultante de la figure 21 est donc appelée une **courbe T_2** . Un synonyme de relaxation transversale est « **relaxation spin-spin** », qui rappelle le mécanisme sous-jacent, une interaction spin-spin. Comment se souvenir, lequel est le T_1 - et lequel est la courbe T_2 ?



Il suffit de réunir les deux courbes. Vous voyez quelque chose qui ressemble à un versant montagneux avec une piste de ski. Vous devez d'abord monter au sommet - courbe T_1 -, avant de redescendre à ski - courbe T_2 (figure 22).

Fig. 21 : Si l'on trace l'aimantation transversale en fonction du temps après que l'impulsion RF a été désactivée, on obtient une courbe comme celle illustrée, qui est appelée courbe T_2 .



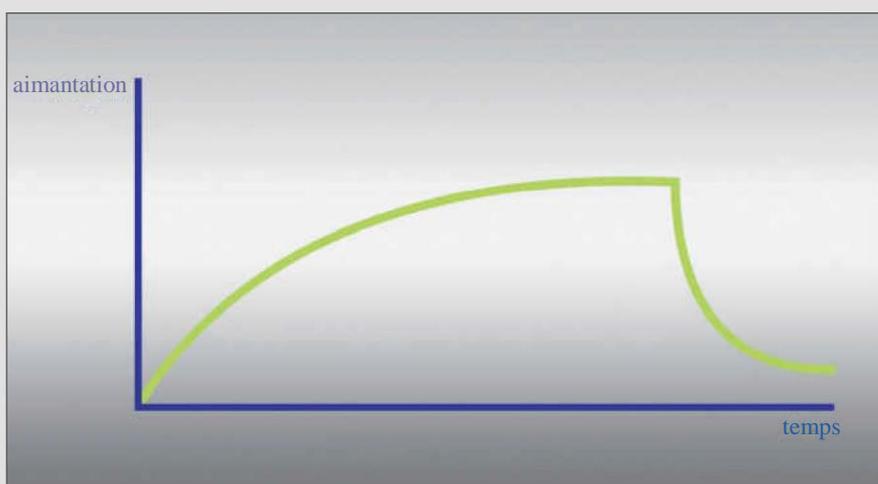


Fig. 22 :
L'association d'une courbe T_1 et d'une courbe T_2 ressemble à une montagne. Il faut plus de temps pour escalader une montagne que pour la descendre en sautant ou en glissant, ce qui aide à se souvenir que T_1 est normalement plus long que T_2 .

Bon, c'est le moment de récapituler



Voici ce que nous avons appris :

- Les protons sont comme des petits aimants.
 - Dans un champ magnétique externe, ils s'alignent parallèlement ou anti-parallèlement.
 - L'état d'énergie inférieur (parallèle) est privilégié, de sorte que quelques protons supplémentaires s'alignent de cette façon.
 - Les protons effectuent un mouvement qui ressemble au basculement d'une toupie.
 - On appelle ce mouvement « précession ».
 - La fréquence de précession dépend de l'intensité du champ magnétique externe – une relation qui est décrite par l'équation de Larmor.
- Plus le champ magnétique est puissant, plus la fréquence de précession est élevée.
- Les protons « pointant » dans des directions opposées annulent mutuellement leurs effets magnétiques dans les directions respectives.
 - Comme il y a plus de protons alignés parallèlement au champ extérieur, il y a un moment magnétique net aligné avec le champ magnétique externe ou longitudinal à celui-ci.
 - Une impulsion de radiofréquence qui a la même fréquence que les protons en phase de précession peut provoquer une résonance, transférer de l'énergie aux protons. Il en résulte que plus de protons sont antiparallèles et donc neutralisent ou annulent plus de protons dans la direction opposée.
- Conséquence, l'aimantation longitudinale diminue.
- L'impulsion RF provoque également la précession des protons en synchronisation, en phase. Il en résulte un nouveau vecteur magnétique (l'aimantation transversale), qui se déplace avec les protons en précession.
 - Lorsque l'impulsion RF est désactivée,
 - l'aimantation transversale diminue et disparaît,
 - tandis que l'aimantation longitudinale augmente à nouveau.

Cette relaxation longitudinale est décrite par une constante de temps T_1 , le **temps de relaxation longitudinale**.

La relaxation transversale est décrite par une constante de temps T_2 , le **temps de relaxation transversale**.

La relaxation longitudinale et la relaxation transversale sont des processus différents et indépendants, et c'est pourquoi nous les avons examinés individuellement (voir figures 17 et 20).

C'est ce que vous devriez savoir maintenant.