Quelle est la durée d'un temps de relaxation?

À la fin de la section précédente, nous avons vu qu'il faut plus de temps pour escalader une montagne que pour la descendre à ski, ce qui aide à se souvenir que le T_1 est normalement plus long que le T_2.

Juste pour vous donner une idée : Le T_1 est environ 2 à 10 fois plus long que le T_2. Ou en termes absolus dans les tissus biologiques, le T_1 est d'environ 300 à 2 000 ms, et le T_2 est d'environ 30 à 150 ms.

Il est difficile de déterminer avec précision la fin de la relaxation longitudinale et transversale. Ainsi, le T_1 et le T_2 n'ont pas été définis comme le moment où la relaxation est terminée. Le T_1 correspond au temps nécessaire pour que l'aimantation longitudinale retourne à 63 % de sa valeur finale.

Le T_2 correspond au temps mis par l'aimantation transversale pour revenir à 37 % de sa valeur initiale. Ces pourcentages sont dérivés d'équations mathématiques (63 % = 1 - 1/e; 37 % = 1/e) décrivant l'intensité du signal, mais nous ne voulons pas entrer dans les détails ici. (Toutefois, il convient de mentionner que $1/T_1$ est également appelé **taux de relaxation longitudinale**, et $1/T_2$ **taux de relaxation transversale**.)

Auparavant, on pensait que la mesure des temps de relaxation donnerait des résultats caractéristiques des tissus, et permettrait ainsi un typage exact des tissus.

RESTRICTED

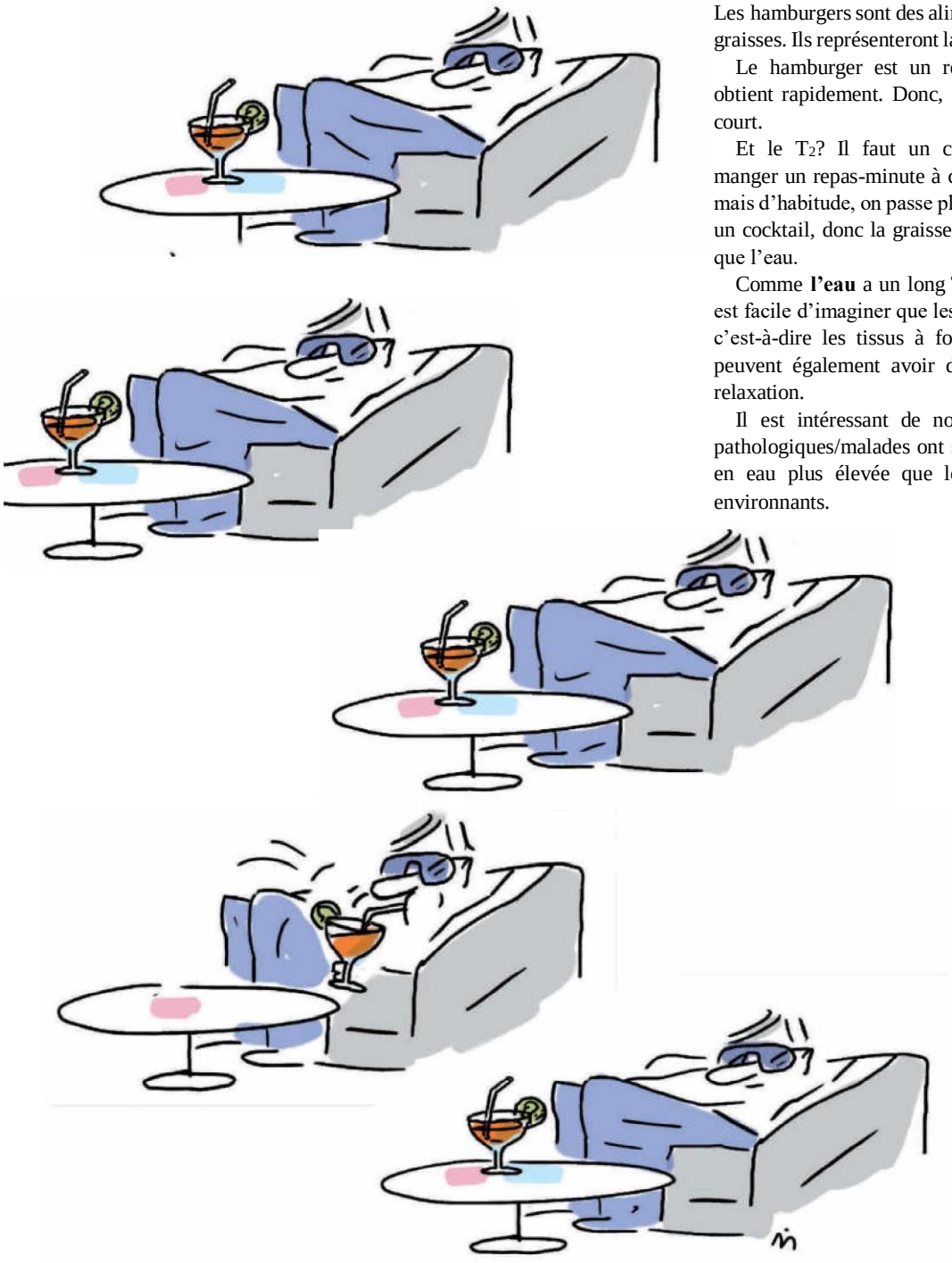
Cependant, cela s'est révélé faux, car il y a un chevauchement important des périodes. Qu'est-ce qu'un temps de relaxation long, qu'est-ce qu'un temps de relaxation court, et quels sont les tissus qui ont un temps de relaxation long ou court?

Regardez la figure 23. Que voyez-vous? Vous voyez quelqu'un boire un cocktail (ou boisson « allongée »), un liquide quelconque (représentant de l'eau).

Lorsque vous allez dans votre bar préféré, qui est naturellement bondé, car c'est un endroit populaire, et que vous commandez un cocktail, vous devez attendre un certain temps avant qu'on vous apporte votre verre – le T_1 est long. Quand vous avez enfin votre cocktail, il vous faut aussi beaucoup de temps pour le boire, donc le T_2 est aussi long. C'est un point important à retenir : l'eau/les liquides ont un long T_1 et un long T_2.

Fig. 23 : Les liquides ont un long T_1 et un long T_2

RESTRICTED



Maintenant, regardez ce monsieur à la figure 24 en train de manger un hamburger. Les hamburgers sont des aliments très riches en graisses. Ils représenteront la graisse pour nous.

Le hamburger est un repas-minute qu'on obtient rapidement. Donc, la **graisse** a un T_1 court.

Et le T_2? Il faut un certain temps pour manger un repas-minute à cause de la graisse; mais d'habitude, on passe plus de temps à boire un cocktail, donc la graisse a un T_2 plus court que l'eau.

Comme **l'eau** a un long T_1 et un long T_2, il est facile d'imaginer que les « tissus aqueux », c'est-à-dire les tissus à forte teneur en eau, peuvent également avoir de longs temps de relaxation.

Il est intéressant de noter que les tissus pathologiques/malades ont souvent une teneur en eau plus élevée que les tissus normaux environnants.

RESTRICTED

Fig. 24 : Par rapport aux liquides/à l'eau, la graisse a un T_1 court et un T_2 court.

RESTRICTED

À quoi cela est-il dû?

En fait, le T_1 dépend de la composition, de la structure et de l'environnement des tissus.

Comme nous l'avons appris, la **relaxation T_1 a un rapport avec** l'échange d'énergie thermique, qui est transmise des protons à l'environnement, c'est-à-dire le réseau. Les protons en précession ont un champ magnétique qui change constamment de direction, et qui fluctue constamment en fonction de la fréquence de Larmor. Le réseau possède également ses propres champs magnétiques.

Les protons veulent maintenant transmettre de l'énergie au réseau pour se relaxer.

Cela peut être fait très efficacement, lorsque les fluctuations des champs magnétiques dans le réseau se produisent à une fréquence proche de la fréquence de Larmor.

Lorsque le réseau est constitué de liquide/eau pur, il est difficile pour les protons de se débarrasser de leur énergie, car les petites molécules d'eau se déplacent trop rapidement.

Et comme les protons, qui se trouvent au niveau d'énergie supérieure, ne peuvent pas transmettre rapidement leur énergie au réseau, ils ne reviendront que lentement à leur niveau d'énergie inférieur, leur alignement longitudinal.

La réapparition de l'aimantation longitudinale prend donc beaucoup de temps, ce qui signifie que les liquides/l'eau ont un long T_1S.

Lorsque le réseau est constitué de molécules de taille moyenne (la plupart des tissus corporels peuvent être considérés comme des liquides contenant des molécules de taille variable, un peu comme de la soupe) qui se déplacent et ont des champs magnétiques fluctuants proches de la fréquence de Larmor des protons en précession, l'énergie peut être transférée beaucoup plus rapidement, de sorte que le T_1 est court.

Notre exemple des hamburgers et de la bicyclette en est une autre illustration : (voir page 17) le transfert des hamburgers (l'énergie) d'un vélo (le proton) à l'autre (le réseau), est simple et efficace, lorsque les deux se déplacent à la même vitesse.

S'ils ne se déplacent pas à la même vitesse, le transfert d'énergie sera moins efficace.

Pourquoi la graisse a-t-elle un T_1 court?
Les liaisons carbonées aux extrémités des acides gras ont des fréquences proches de la fréquence de Larmor, ce qui permet un transfert d'énergie efficace.

Et pourquoi le T_1 est-il plus long dans les champs magnétiques plus puissants?
Comme nous l'avons entendu au début, la fréquence de précession dépend de l'intensité du champ magnétique, une relation décrite par l'équation de Larmor.

Si nous avons un champ magnétique plus puissant, les protons se déplacent plus rapidement.

Et lorsqu'ils avancent plus vite, ils ont plus de mal à transférer leur énergie à un réseau dont les champs magnétiques fluctuent plus lentement.

Qu'est-ce qui influence le T_2?

La **relaxation T_2** se produit lorsque les protons se déphasent, ce qui - comme nous le savons déjà - a deux causes : des inhomogénéités du champ magnétique externe, et des inhomogénéités des champs magnétiques locaux dans les tissus (voir page 27). Comme les molécules d'eau se déplacent très rapidement, leurs champs magnétiques locaux fluctuent rapidement, et donc se situent en quelque sorte dans la moyenne, de sorte qu'il n'y a pas de grandes différences nettes dans les champs magnétiques internes d'un endroit à l'autre. Et s'il n'y a pas de grandes différences d'intensité de champ magnétique dans un tissu, les protons restent en phase pendant longtemps, avant de se déphaser, et donc le T_2 est plus long. Avec les liquides impurs, par exemple ceux qui contiennent des molécules plus grosses, les champs magnétiques locaux fluctuent davantage. Les plus grosses molécules ne se déplacent pas aussi vite, de sorte que leurs champs magnétiques locaux ne s'annulent pas autant.

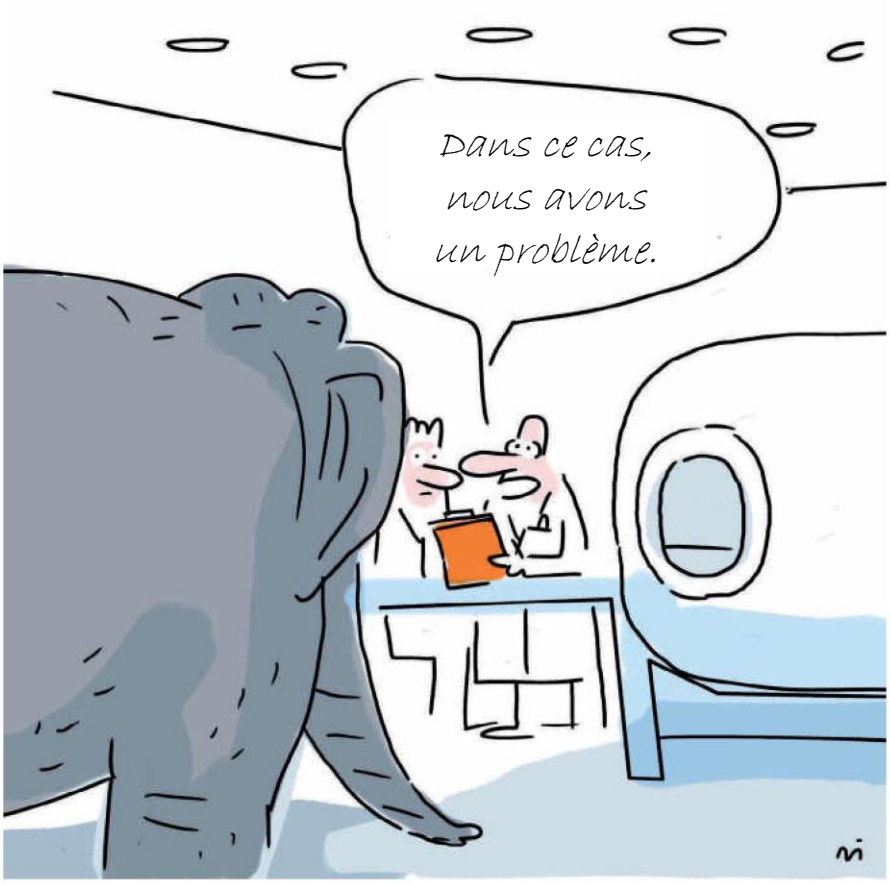
RESTRICTED

Ces différences plus importantes dans les champs magnétiques locaux entraînent par conséquent des différences plus importantes dans les fréquences de précession, ce qui fait que les protons se déphasent plus rapidement, le T_2 étant plus court.

Cela peut être illustré par l'exemple suivant : imaginez que vous roulez dans une rue truffée de nids-de-poule. Lorsque vous roulez lentement (ce qui équivaut à un environnement qui bouge lentement et que vous êtes immobile), votre voiture va tressauter chaque fois que vous passez dans un nid-de-poule. Les différences dans l'environnement (les variations du champ magnétique) ont une influence considérable.

Lorsque vous roulez très vite (ce qui équivaut à l'environnement qui se déplace très vite), vous ne ressentez plus chaque nid-de-poule. Avant qu'ils n'aient un effet majeur sur vous, vous êtes déjà revenu au niveau normal de la rue; ainsi, leur effet est pondéré, vous êtes beaucoup moins influencé par les différences dans l'environnement (les variations de l'intensité du champ magnétique).

Quel est le rapport entre tout cela et ce que nous voulons savoir? Tous ces processus influencent l'aspect final de votre image RM!



RESTRICTED

Le moment est venu de faire un petit récapitulatif :

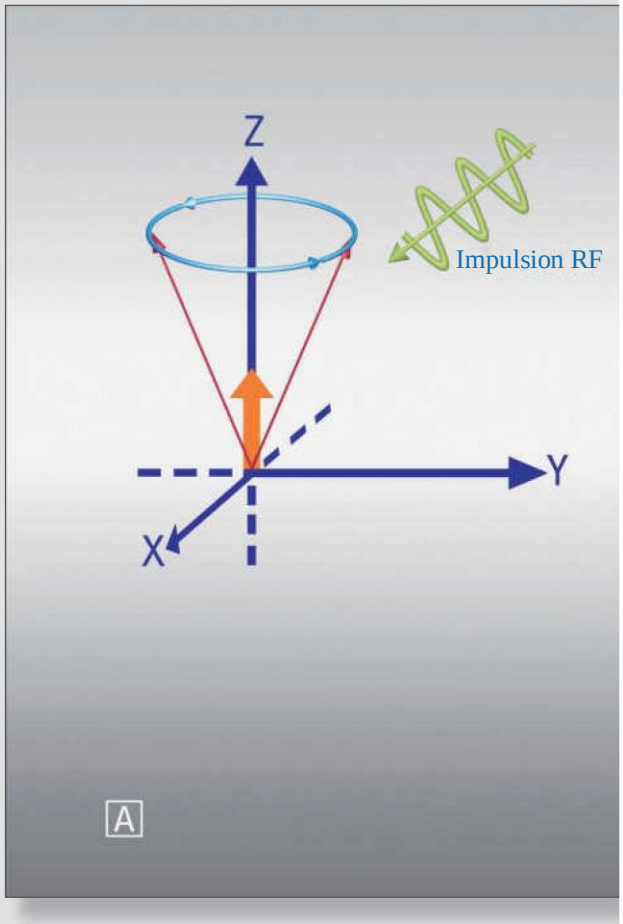
- Le T_1 est plus long que le T_2.
- Le T_1 varie en fonction de l'intensité du champ magnétique; dans les champs magnétiques plus puissants, il est plus long.
- L'eau a un T_1 long, la graisse a un T_1 court
- Le T_2 de l'eau est plus long que le T_2 des liquides impurs contenant des molécules plus grosses.

Une expérience...

Faisons maintenant une expérience

Regardez la figure 25 : vous pouvez voir deux protons, qui se déplacent autour de l'axe z. J'espère que vous vous souvenez que l'axe z indique la direction d'une ligne de champ magnétique (voir page 9). Au lieu de ces deux seuls protons, en réalité, il peut y en avoir 8 qui pointent vers le haut et 6 vers le bas, ou 82 qui pointent vers le haut et 80 vers le bas - il n'y aura que deux autres protons qui pointent vers le haut.

Fig. 25 : Si après l'impulsion RF, le nombre de protons au niveau d'énergie supérieure est égal au nombre de protons au niveau d'énergie inférieure, l'aimantation longitudinale a disparu, et il n'y a plus qu'une aimantation transversale à cause de la cohérence de phase. Le vecteur magnétique semble avoir été « incliné » de 90° sur le côté. L'impulsion RF correspondante est donc également appelée impulsion de 90°.



RESTRICTED

Comme nous le savons, ce sont ceux qui ont un effet magnétique net, car leurs effets ne sont pas annulés.

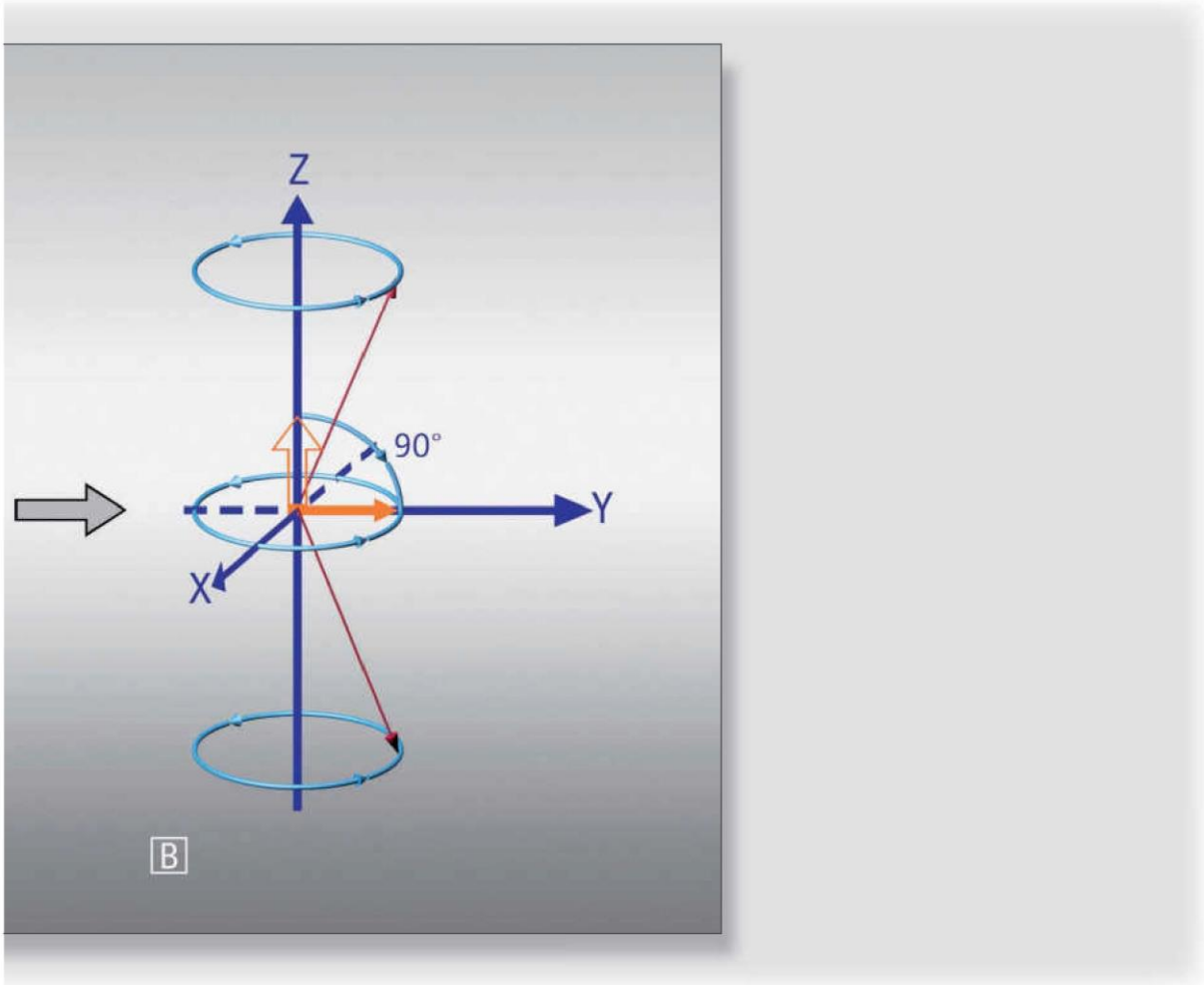
Émettons maintenant une impulsion RF, qui a juste la force et la durée correctes, de sorte que l'un des deux protons capte de l'énergie pour passer à un état d'énergie supérieur, c'est-à-dire pointe vers le bas/marche sur les mains.

Que va-t-il se passer? L'**aimantation longitudinale** (qui résultait jusqu'ici de deux protons pointant vers le haut) va diminuer, dans notre exemple, jusqu'à zéro (un point vers le haut est neutralisé par un point vers le bas).

Mais comme les deux protons sont en phase, il y a maintenant une aimantation transversale qui n'existait pas auparavant.

L'impulsion RF semble « incliner » le **vecteur magnétique** longitudinal de 90° sur le côté.

Cette impulsion RF est appelée **impulsion** de 90° Naturellement, d'autres impulsions RF sont également possibles, et sont désignées en conséquence, par exemple, **l'impulsion de 180°**.



RESTRICTED

Pour bien comprendre cela, prenons un autre exemple. Sur la figure 26A, nous avons 6 protons pointés vers le haut; nous émettons une impulsion RF, qui élève 3 d'entre eux à un niveau d'énergie supérieur (B).

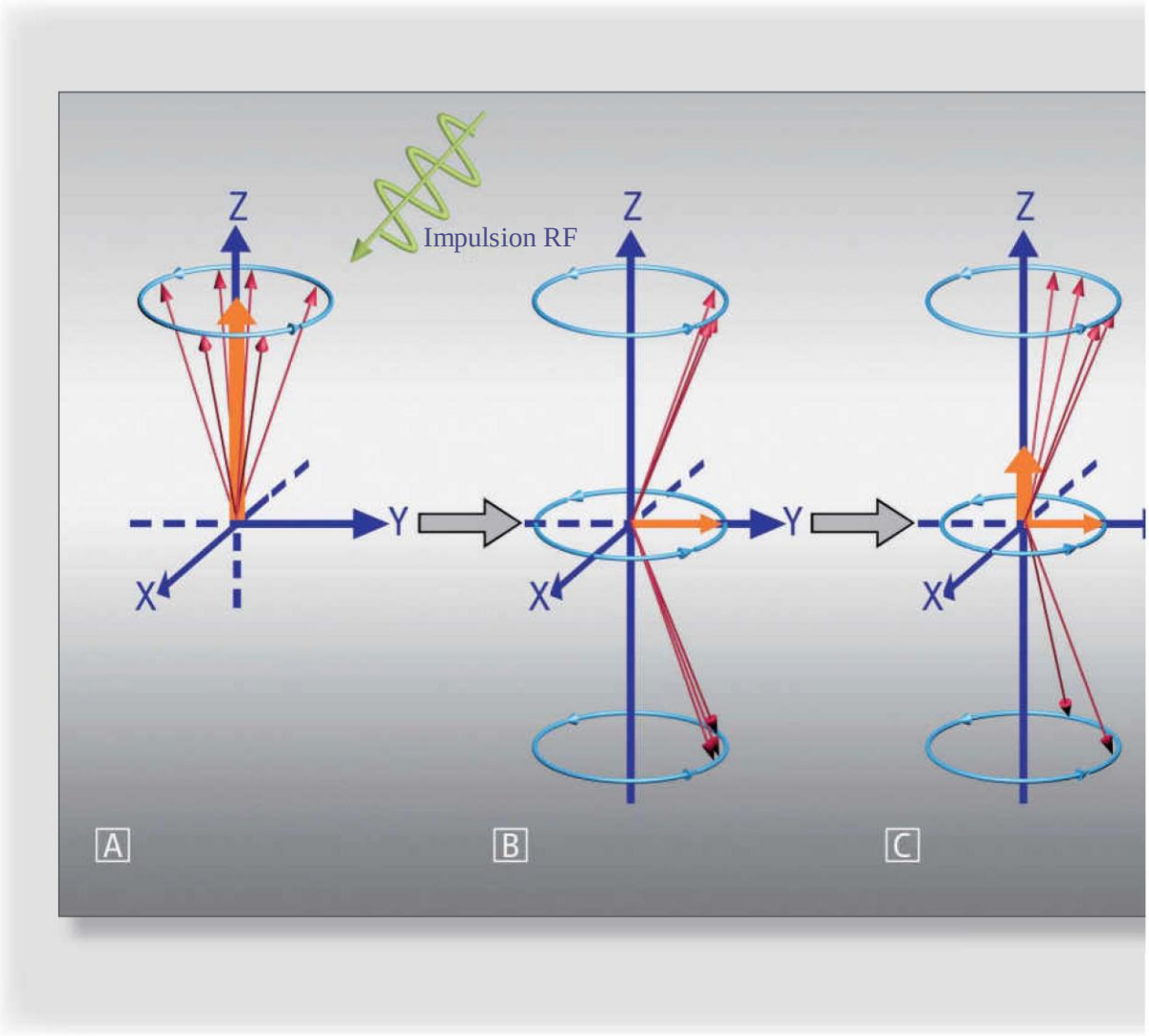
Résultat : l'aimantation longitudinale laisse la place à une aimantation transversale (qui vient d'utiliser une impulsion de 90°).

Que se passe-t-il lorsque l'impulsion RF est désactivée?

Deux choses se produisent : les protons retournent à leur état d'énergie inférieur et ils perdent la **cohérence de phase**.

Il est important de noter que les deux processus se déroulent simultanément et indépendamment. Par souci de simplicité, examinons ce qui se passe étape par étape, et concentrons-nous d'abord sur l'**aimantation longitudinale** :

• Après la désactivation de l'impulsion RF (figure 26C), un proton retourne à l'état d'énergie inférieur, ce qui fait que 4 protons sont dirigés vers le haut et deux vers le bas.



RESTRICTED

L'effet net : nous avons maintenant une aimantation longitudinale de « 2 ».

- Puis le proton suivant remonte; à présent, 5 protons sont dirigés vers le haut, et un vers le bas, ce qui donne une aimantation longitudinale nette de « 4 » (figure 26D).
- Lorsque le proton suivant monte, l'aimantation longitudinale est égale à « 6 » (figure 26E).

Vous avez sûrement déjà remarqué que l'aimantation transversale diminue en même temps (figure 26C-E). Pourquoi? Vous devriez pouvoir répondre à cette question : Après la désactivation de l'impulsion RF, les protons en précession perdent leur cohérence de phase.

Dans la figure 26B, tous les protons pointent dans la même direction, mais se déphasent de plus en plus. On a l'impression qu'ils se déploient en éventail (figure 26C-E).

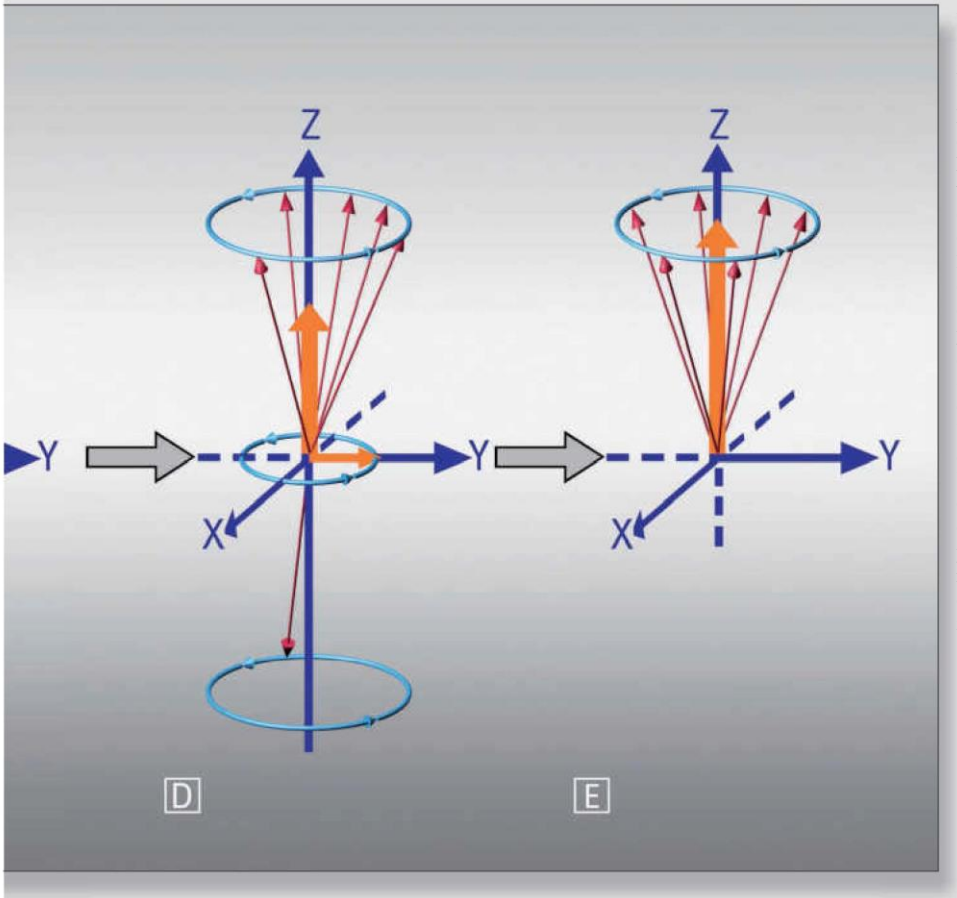


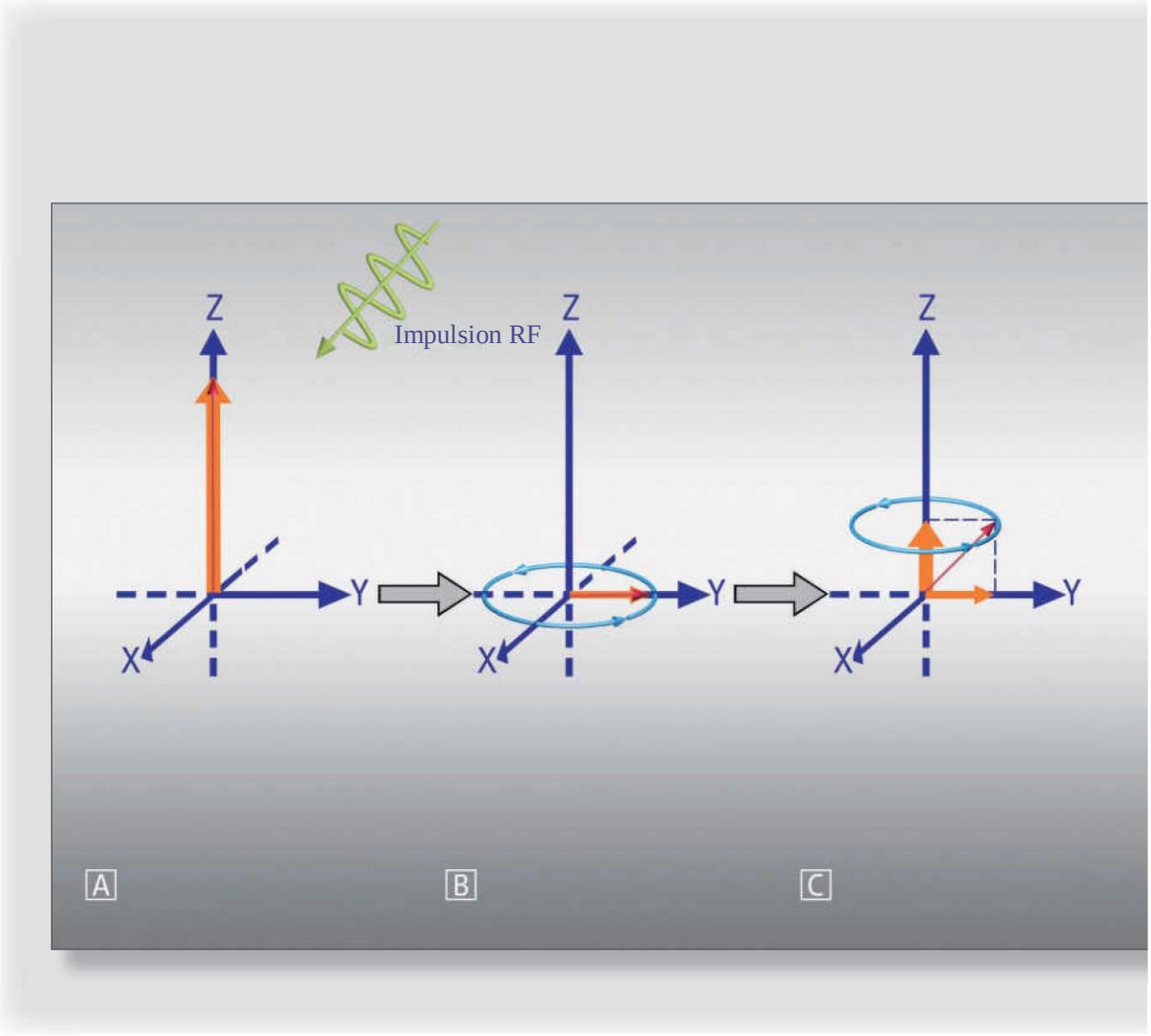
Fig. 26 : (A) montre la situation avant et (B) immédiatement après l'émission d'une impulsion RF. L'impulsion RF fait diminuer l'aimantation longitudinale (↑), et avec une impulsion de 90° comme illustré, elle devient nulle (B). Les protons commencent également à précessionner dans la phase (B), ce qui provoque la nouvelle aimantation transversale (→). Après la désactivation de l'impulsion RF (C-E), l'aimantation longitudinale augmente, récupère et l'aimantation transversale disparaît, puis se désintègre. Ces deux processus sont dus à des mécanismes totalement différents et se produisent indépendamment, même

RESTRICTED

Dans la figure 27, seuls les **vecteurs magnétiques** longitudinaux et transversaux sont représentés aux moments correspondants, comme dans la figure 26. Ces vecteurs magnétiques s'additionnent pour former un vecteur somme (→).

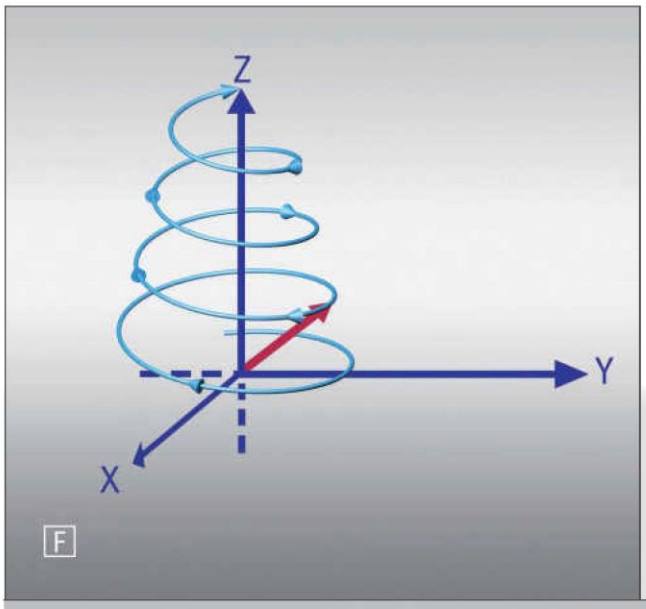
Comme vous vous en souvenez, les vecteurs représentent des forces d'une certaine taille et d'une certaine direction. Si vous additionnez des vecteurs pointant vers différentes directions, vous obtiendrez une direction qui se situe quelque part entre les deux, en fonction de la force exercée dans les directions initiales. Si nous faisons la même chose avec le vecteur longitudinal et le vecteur transversal, nous obtenons le **vecteur somme.**

Ce vecteur somme est très important, car il représente le moment magnétique total d'un tissu en général, et peut donc être utilisé à la place des deux vecteurs uniques, représentant séparément l'aimantation longitudinale et transversale. Notre vecteur de somme magnétique pendant la relaxation revient à une direction longitudinale, qui est finalement égale à l'**aimantation longitudinale**.



RESTRICTED

Ce qu'il faut retenir, c'est que tout ce système est en fait en précession, y compris le vecteur magnétique somme. Et donc - après que l'impulsion RF est désactivée - le vecteur somme effectue un mouvement en spirale (figure 27F).



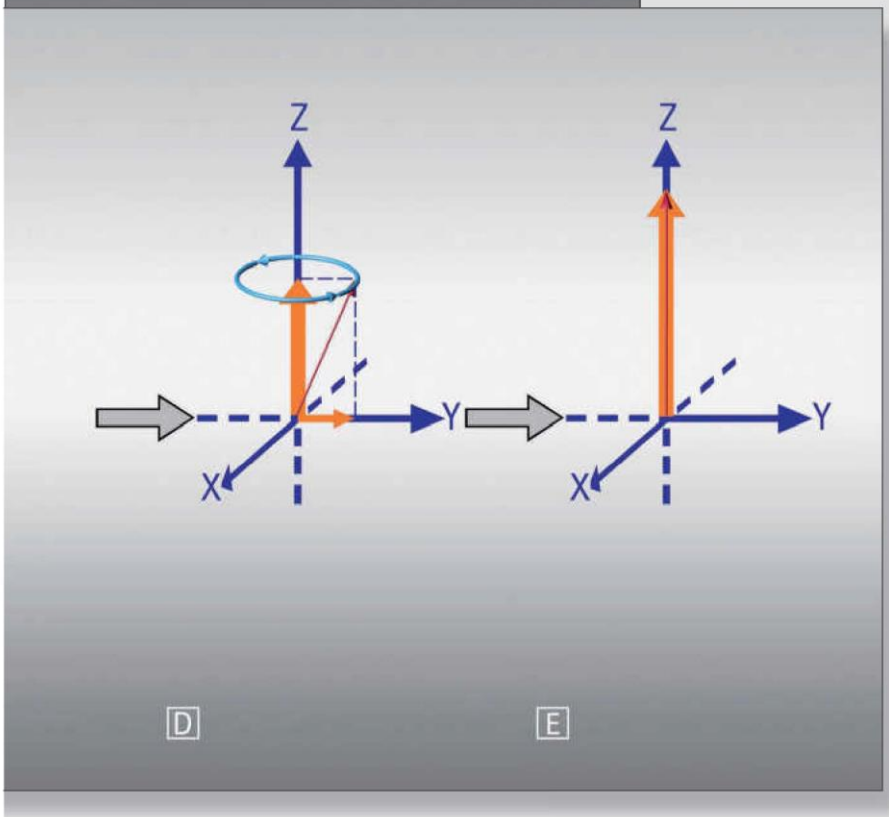


Fig. 27 : Dans cette illustration, seuls les vecteurs d'aimantation longitudinale et transversale de notre expérience de la figure 26 sont représentés. En (A) - avant l'impulsion RF - il n'y a qu'une aimantation longitudinale. Immédiatement après l'impulsion RF de 90°, il n'y a pas d'aimantation longitudinale mais une nouvelle aimantation transversale (B), et ce vecteur d'aimantation transversale tourne autour. Avec le temps, cette aimantation transversale diminue, tandis que l'aimantation longitudinale augmente (C-D), jusqu'à ce que le point de départ sans aimantation transversale mais avec une aimantation longitudinale complète soit à nouveau atteint (E). Les vecteurs d'aimantation longitudinale et transversale s'additionnent pour former un vecteur somme (→). Ce vecteur somme effectue un mouvement en spirale (F) lorsqu'il passe de sa direction dans le plan transversal (x-y) (pas d'aimantation longitudinale) à sa position finale le long de l'axe z (pas d'aimantation transversale).

RESTRICTED

J'espère que vous vous souvenez qu'une force/un moment magnétique changeant peut induire un courant électrique, qui est le signal que nous recevons et utilisons en RM.

Donc, si nous installons une antenne quelque part (figure 28), nous obtiendrons un signal comme illustré. C'est facile à imaginer, si l'on considère l'antenne comme un microphone, et la somme des vecteurs magnétiques comme ayant une sorte d'émetteur sonore (par exemple un tuyau de vapeur) à son extrémité.

Plus le vecteur s'éloigne du microphone, moins le son est fort. La fréquence du son, cependant, reste la même, car le **vecteur somme** tourne avec la fréquence de précession (figure 29). Le signal de notre expérience disparaît donc avec le temps, mais il a une fréquence constante.

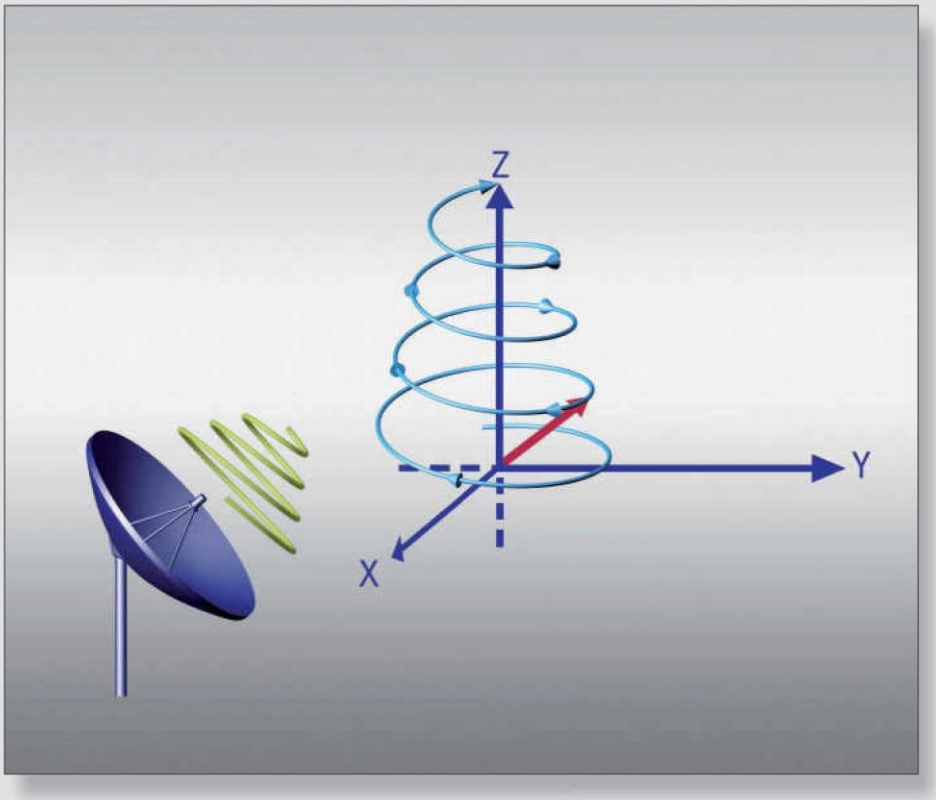


Fig. 28 : Pour un observateur externe, le vecteur somme de la figure 27F change constamment de direction et d'amplitude, tandis qu'il effectue son mouvement en spirale. Le vecteur somme induit un courant électrique dans une antenne, le signal MR. C'est la plus importante, immédiatement après la désactivation de l'impulsion RF, et elle diminue ensuite.

RESTRICTED

On appelle ce type de signal « signal de **décroissance à induction libre »**, ou **signal FID**.

Il devrait maintenant être évident que le vecteur magnétique détermine directement le signal IRM et l'intensité du signal en induisant des courants électriques dans l'antenne.

Au lieu d'« aimantation longitudinale » ou d'« aimantation transversale », on peut aussi employer le terme « signal » ou « intensité du signal » sur l'axe de nos courbes T_1 et T_2.

Espérons que cela deviendra plus clair au fur et à mesure que vous lisez.

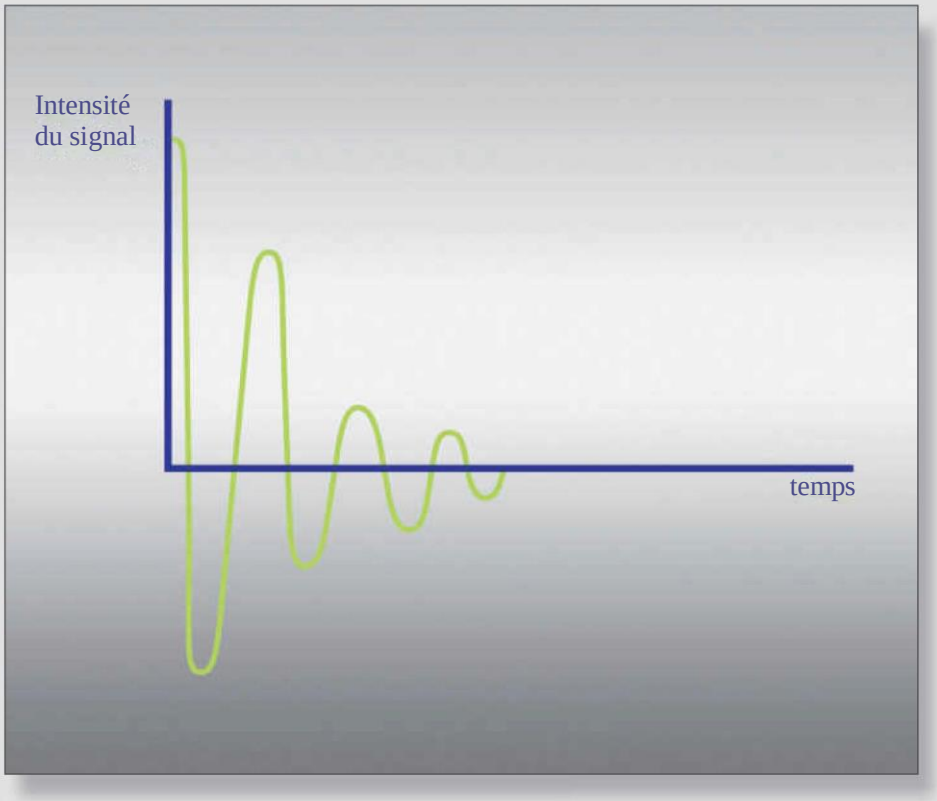


Fig. 29 : Le signal de notre expérience, dans les figures 26 à 28, disparaît avec le temps, mais il a une fréquence constante. On appelle ce type de signal « signal de décroissance à induction libre », ou signal FID.

RESTRICTED

Une autre expérience

Réalisons une autre expérience similaire à celle illustrée dans la figure 30. Comme nous voulons nous concentrer uniquement sur l'aimantation, nous pouvons laisser de côté le système de coordonnées. Sur la figure 30A, nous avons deux tissus, A et B, qui ont des temps de relaxation différents comme nous le verrons plus tard. Nous émettons une impulsion RF à 90°, nous la désactivons, et nous attendons un certain temps TR_{long} (nous expliquerons plus tard pourquoi nous utilisons le terme **TR)**. Puis nous émettons une deuxième impulsion de 90°. Que va-t-il se passer?

Tout comme après le temps TR_{long}, où le tissu A et le tissu B ont retrouvé toute leur **aimantation longitudinale** (trame 5), l'**aimantation transversale** après la deuxième impulsion sera la même pour les deux tissus, comme elle l'était après la première impulsion RF (trame 1). Le tissu A ne peut être différencié du tissu B.

Et si on n'attendait pas aussi longtemps d'une impulsion à l'autre? Examinons la figure 30B :

Après la première impulsion, une aimantation transversale de même niveau est établie dans les deux tissus, qui diminue après l'arrêt de l'impulsion.

Cependant, à TR_{court}, le tissu A a retrouvé une plus grande partie de son aimantation longitudinale que le tissu B. Lorsque la deuxième impulsion de 90° fait « basculer » l'aimantation longitudinale de 90 degrés, le vecteur magnétique transversal du tissu A est supérieur à celui du tissu B.

Et lorsque ce vecteur de A est supérieur, il se rapproche de notre antenne; ainsi, le tuyau de vapeur imaginaire à l'extrémité du vecteur A va provoquer un signal plus fort et plus puissant dans notre « microphone », l'antenne, que le vecteur de B.

La différence d'intensité du signal dans cette expérience dépend de la différence d'aimantation longitudinale, c'est-à-dire de la différence de T_1 entre les tissus. Grâce à ces deux impulsions, nous pouvons maintenant différencier le tissu A du tissu B, ce qui était impossible dans notre expérience, en choisissant une seule impulsion de 90° ou deux impulsions de 90° espacées d'un temps long (après un temps long, les différences de T_1 entre les tissus A et B ne jouent plus de rôle dans notre expérience, car après ce temps, le tissu B avec le T_1 le plus long revient lui aussi à son état initial).

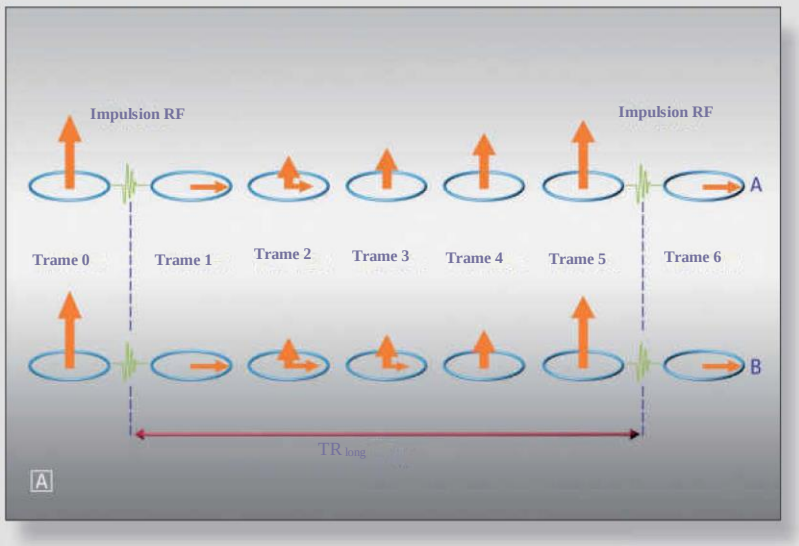


Fig. 30A

Lorsque nous n'attendons pas aussi longtemps que dans la figure 30A, mais que nous émettons l'impulsion RF après un temps plus court (TR_{court}), comme dans la figure 30B, l'aimantation longitudinale du tissu B, qui a le T_1 le plus long, n'a pas autant récupéré que celle du tissu A avec le T_1 le plus court. L'aimantation transversale

RESTRICTED

Lorsque vous utilisez plus d'une impulsion RF - une succession d'impulsions RF - vous utilisez ce que l'on appelle une **séquence** d'impulsions Comme vous pouvez utiliser différentes impulsions, par exemple des impulsions de 90° ou 180°, et que les intervalles de temps entre des impulsions successives peuvent être différents, il peut y avoir de nombreuses séquences d'impulsions différentes. Comme nous l'avons vu dans notre expérience, le choix d'une séquence d'impulsions déterminera le type de signal que vous obtiendrez d'un tissu. Il est donc nécessaire de choisir avec soin et de décrire la séquence d'impulsions pour une étude spécifique.

La séquence d'impulsions que nous avons utilisée était composée d'un seul type d'impulsion, l'impulsion de 90°. Elle a été répétée après un certain temps, appelé **TR = temps de répétition**.

Comment le TR a-t-il influencé le signal dans notre expérience?

Avec un TR long, nous avons obtenu des signaux similaires des deux tissus. Les deux apparaîtraient identiques sur une image RM, puisque l'aimantation transversale était la même pour les deux tissus. En utilisant un TR plus court, il y avait une différence d'intensité du signal entre les tissus, déterminée par leur différence de T_1.

L'image résultante est appelée image pondérée en T_1. Cela signifie que la différence d'intensité du signal entre les tissus de cette image, le **contraste** des tissus, est principalement due à leur différence de T_1. Il y a cependant toujours plus d'un paramètre qui influence le contraste des tissus; dans notre exemple, T_1 est le plus remarquable.

Qu'est-ce qu'un TR court, qu'est-ce qu'un TR long?

Un **TR** inférieur à 500 ms est considéré comme un TR court, un TR supérieur à 1 500 ms comme un TR long. Comme vous pouvez l'imaginer ou le savez déjà, nous ne créons pas seulement des images pondérées **T_1,** mais aussi des images pondérées en **T_2**, **et** des images dites **pondérées en densité de protons.**

Cette **densité** de protons, que l'on appelle aussi **densité de spin**, influence le contraste des tissus et peut s'expliquer très simplement : là où il y a beaucoup de protons, il y aura « beaucoup » de signaux. Là où il n'y a pas de protons, il n'y aura pas de signal. Nous y reviendrons un plus loin. Le fait est qu'en utilisant certaines séquences d'impulsions, nous pouvons faire en sorte que certaines caractéristiques des tissus soient plus ou moins importantes dans l'image résultante.

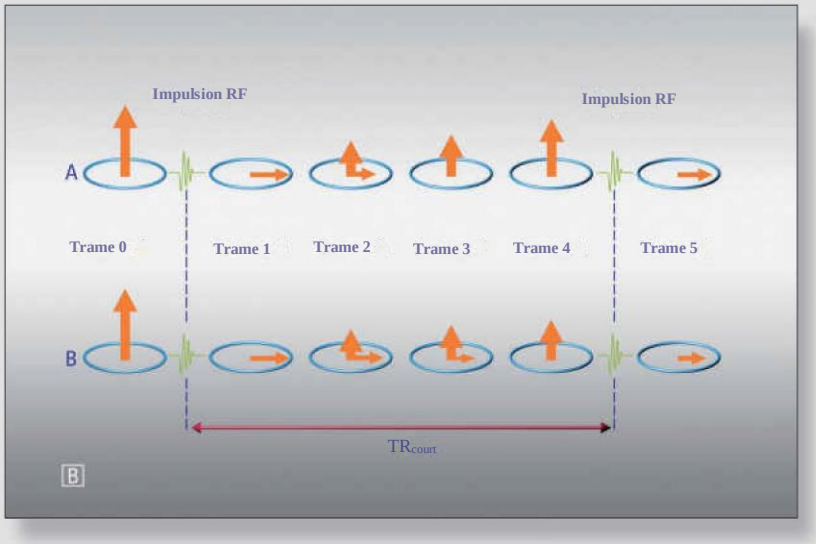


Fig. 30B

des deux tissus après la deuxième impulsion RF sera alors différente (image 5). Ainsi, en changeant le temps entre les impulsions RF successives, nous pouvons influencer et modifier l'aimantation et l'intensité du signal des tissus.

RESTRICTED

En choisissant une séquence d'impulsions, le médecin peut être comparé à un chef d'orchestre (figure 31) : il peut influencer l'aspect général du son (signal) en faisant en sorte que certains instruments (paramètres) influencent le son plus que d'autres. Tous les instruments (paramètres), cependant, jouent toujours un certain rôle dans le son final (signal).

Revenons à notre expérience pour une courte répétition :

- Avec un certain type d'impulsion RF, nous pouvons faire disparaître l'aimantation longitudinale et apparaître une aimantation transversale. L'« aimantation nette » (le vecteur somme de l'aimantation longitudinale et transversale) est « inclinée » de 90° dans ce cas (au départ, nous n'avions que l'aimantation longitudinale). L'impulsion RF correspondante est donc également appelée impulsion de 90°.
- La composante transversale de l'aimantation nette peut induire un signal mesurable dans une antenne.

Fig. 31 : Le médecin d'IRM peut être comparé à un chef d'orchestre : en choisissant certaines séquences d'impulsions, il peut modifier le signal résultant, qui est lui-même influencé par différents paramètres.

RESTRICTED

• Tout de suite après le début de la relaxation des impulsions RF : l'aimantation transversale commence à disparaître et la relaxation longitudinale à réapparaître. Le signal disparaît.
• Lorsqu'on applique la deuxième impulsion de 90°, l'aimantation nette est à nouveau inclinée de 90°, et nous recevons à nouveau un signal.
• L'intensité de ce signal dépend (entre autres) du niveau d'aimantation longitudinale initial. Vous vous souvenez de la courbe T_1-? La courbe T_1 décrit la relation entre le temps (après une impulsion RF) et le niveau d'aimantation longitudinale (figure 18).

Si on attend un long moment avant d'envoyer notre deuxième impulsion RF, l'aimantation longitudinale aura complètement récupéré.

Le signal après la deuxième impulsion RF sera donc le même que celui après la première impulsion. Cependant, lorsque la deuxième impulsion arrive plus tôt, le signal sera différent, car le niveau d'aimantation longitudinale à ce moment-là est moins élevé.

La différence d'intensité du signal

Sur la figure 32, vous pouvez voir les courbes T_1 pour le cerveau et pour le liquide céphalo-rachidien (LCR). Le cerveau a un temps de relaxation longitudinale plus court que le LCR.

À l'instant 0, nous n'avons aucune aimantation longitudinale, et cela peut être l'instant qui suit immédiatement notre première impulsion de 90°. Quand on attend un long moment avant de répéter l'impulsion de 90° (TR_{long}), l'**aimantation longitudinale a** à peu près récupéré. Les vecteurs magnétiques longitudinaux qui seront « inclinés » de 90°, ne diffèrent que dans une faible mesure, de sorte qu'il n'y aura qu'une petite différence dans l'intensité du signal, c'est-à-dire que le contraste tissulaire entre le cerveau et le LCR est faible. Cependant, si on applique la deuxième impulsion après un temps plus court, TR_{court}, la différence d'aimantation longitudinale sera assez importante, donc le **contraste des tissus** sera meilleur.

Et comme on peut le voir à la distance entre les deux courbes, il y a un laps de temps où le contraste des tissus est le plus prononcé.

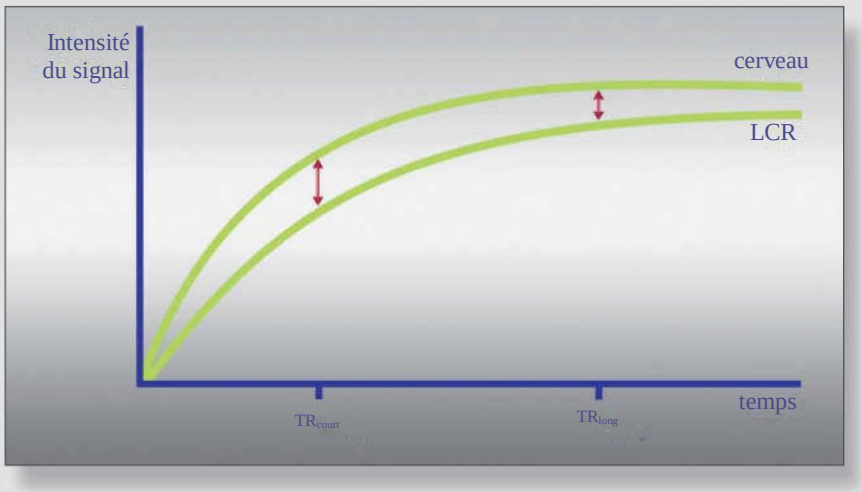


Fig. 32 : Le cerveau a un temps de relaxation longitudinale plus court que le LCR. Avec un TR court, les intensités de signal du cerveau et du LCR diffèrent davantage qu'après un TR long.

RESTRICTED

Pourquoi les signaux après un temps TR très long entre les impulsions ne sont-ils pas identiques?

Nous avons déjà entendu l'explication. L'intensité du signal dépend de nombreux paramètres. Quand on attend un long moment, le T_1 n'influence plus le contraste des tissus, mais il peut encore y avoir une différence dans la densité de **protons** des tissus en question.

Et quand on attend un très long moment TR dans notre expérience de la figure 32, la différence de signal est principalement due à des densités de protons différentes. Nous avons ce qu'on appelle **une image pondérée** par la densité de **protons (ou la densité de spin).**

Nous avons maintenant entendu parler des images pondérées en T_1 et en densité de protons.

Image pondérée en T_2

Comment va-t-on obtenir une image pondérée en T_2?

C'est un peu plus difficile à comprendre. Faisons une autre expérience, un peu différente des précédentes. D'abord, nous utilisons une impulsion de 90°. L'aimantation longitudinale est inclinée, on obtient une aimantation transversale. Que se passe-t-il après cette impulsion, quand on attend un court moment?

Vous pouvez certainement répondre à cette question sans difficulté - sinon, retournez à la page 27 avant de continuer à lire.

Après l'arrêt de l'impulsion, l'aimantation longitudinale commence à réapparaître, alors qu'au même moment, l'aimantation transversale commence à disparaître. Pourquoi l'aimantation transversale disparaît-elle? C'est parce que les protons perdent leur cohérence de phase, comme on l'a vu plus tôt.

Ceci est illustré par la figure 33 pour trois protons, qui sont presque exactement en phase comme on le voit en (A) mais de plus en plus étalés, parce qu'ils ont des fréquences de précession différentes (voir B et C). La perte de **cohérence de phase** entraîne une diminution de l'aimantation transversale et donc une perte de signal. Nous allons maintenant faire quelque chose de nouveau : après un certain temps (que nous appelons TE/2, la moitié de **TE**, pour des raisons que vous comprendrez dans quelques minutes), nous émettrons une **impulsion de 180°.**

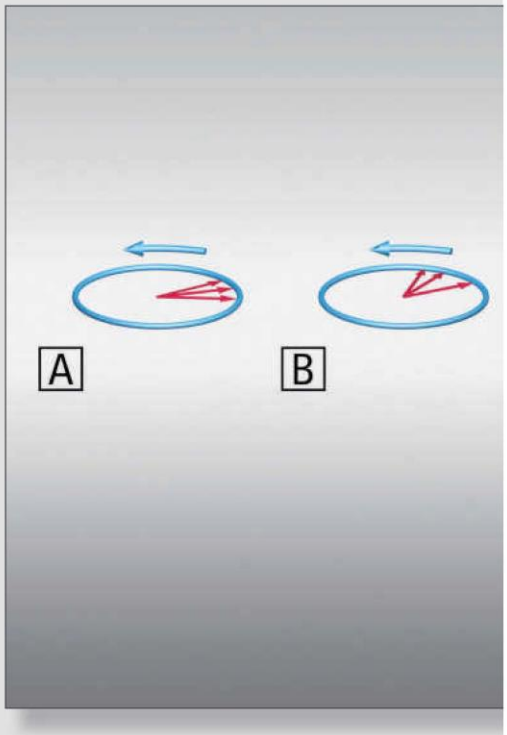


Fig. 33 : Après la désactivation de l'impulsion RF, les protons se déphasent (A-C). L'impulsion de 180° déclenche leur précession dans la direction opposée, et donc ils se rephasent à nouveau (D-F).

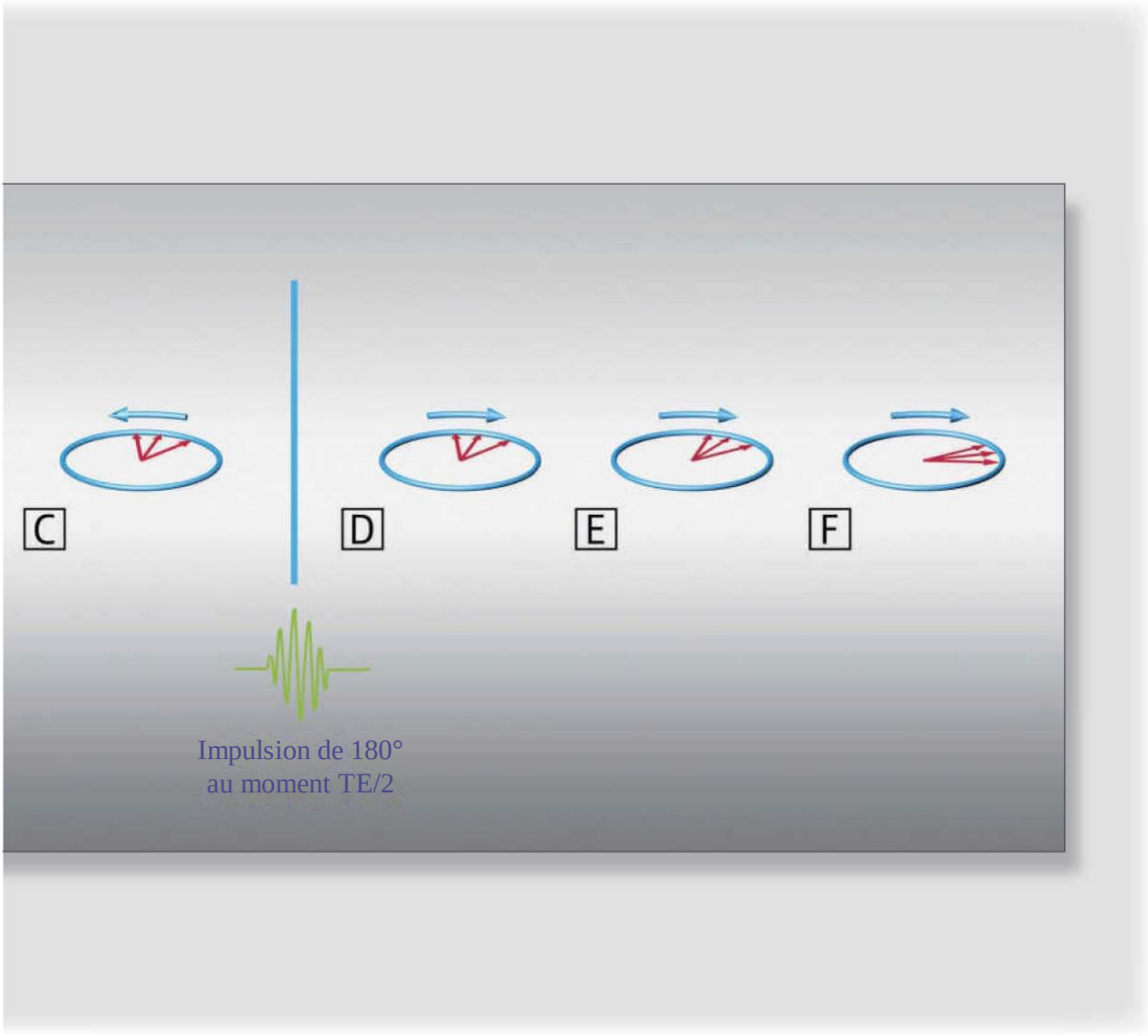
RESTRICTED

Que se passe-t-il?

L'impulsion de 180° agit comme un mur de caoutchouc; elle fait tourner les protons, de sorte qu'ils précessionnent dans la direction opposée, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre.

Résultat, les protons les plus rapides sont maintenant derrière les plus lents. Si on attend encore un temps TE/2, les plus rapides auront rattrapé les plus lents (voir figure 33F).

À ce stade, les protons sont presque à nouveau en phase, ce qui se traduit par une aimantation transversale plus forte, et donc par un signal à nouveau plus fort. Un peu plus tard, cependant, les protons les plus rapides seront à nouveau en tête, le signal diminuant à nouveau.



RESTRICTED

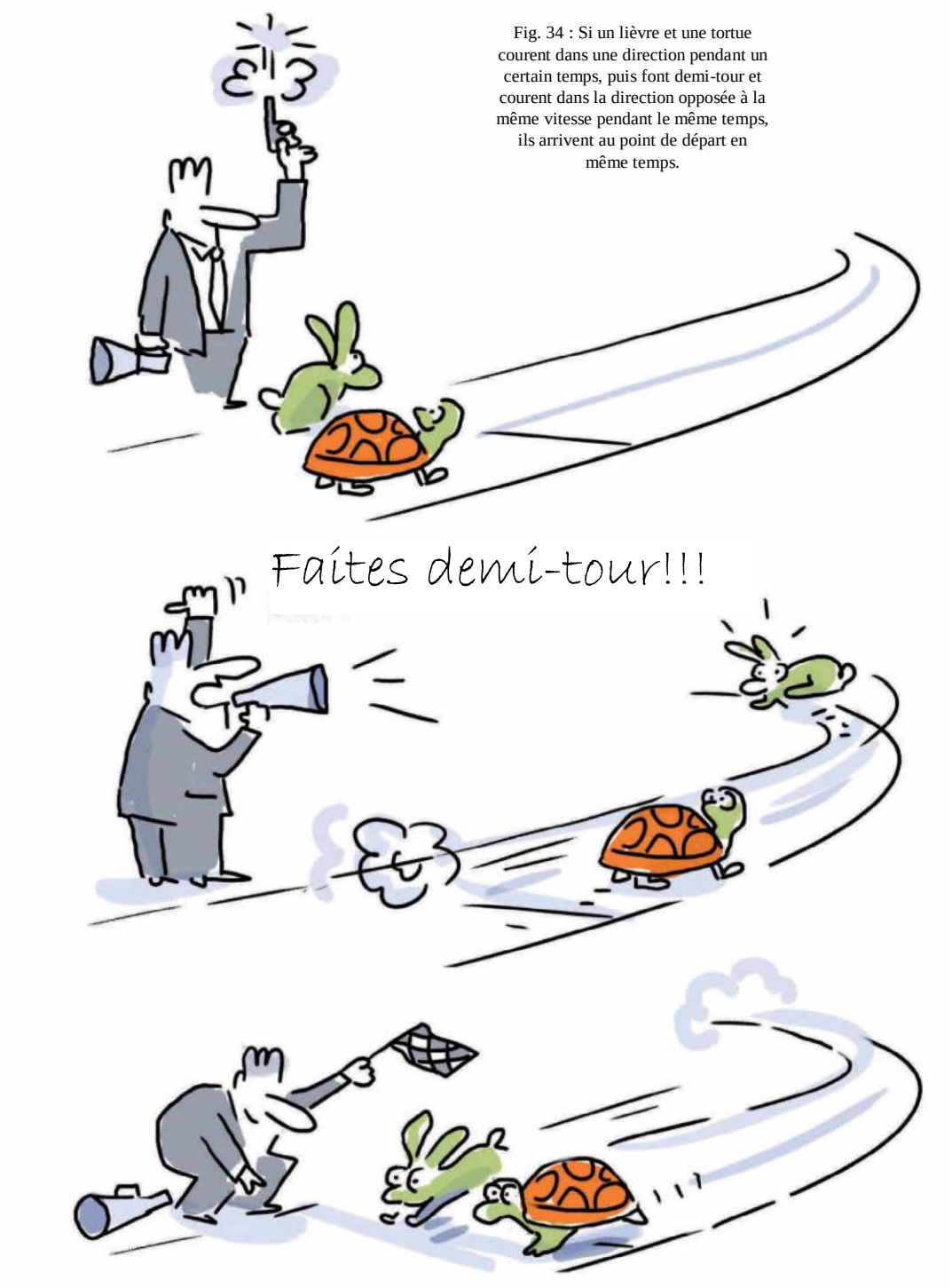


Fig. 34 : Si un lièvre et une tortue courent dans une direction pendant un certain temps, puis font demi-tour et courent dans la direction opposée à la même vitesse pendant le même temps, ils arrivent au point de départ en même temps.

RESTRICTED

Pour illustrer cet exemple, imaginez une course entre une tortue et un lièvre qui s'élancent sur la même ligne de départ (figure 3 4). Après un certain temps (TE/2), le lièvre devance la tortue. Si vous faites courir les concurrents dans la direction opposée pendant la même durée, ils seront tous deux de retour sur la ligne de départ exactement au même moment (en supposant qu'ils courent à une vitesse constante).

Dans notre expérience, l'**impulsion de 180°** agit comme un mur, d'où les protons rebondissent, comme une montagne qui réfléchit les ondes sonores comme des échos. C'est pourquoi le signal fort qui en résulte est également appelé écho, ou **écho de spin**.

Une fois que nous avons notre signal, notre écho de spin, les protons perdent à nouveau leur cohérence de phase, les plus rapides passant devant, comme nous l'avons vu.

Nous pouvons naturellement refaire l'expérience avec une autre impulsion de 180°, et une autre et une autre ...

Si nous traçons maintenant le temps en fonction de l'intensité du signal, nous obtenons une courbe comme dans la figure 35.

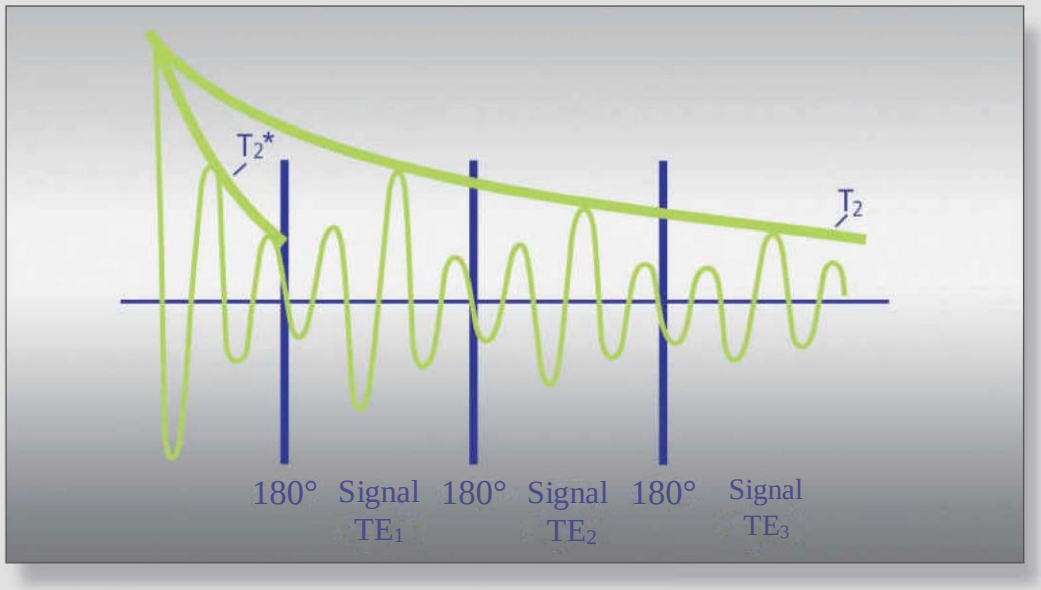


Fig. 35 : L'impulsion de 180° a pour effet de rephaser les protons qui se déphasent, ce qui se traduit par un signal plus fort, l'écho de spin après le temps TE. Les protons se déphasent alors à nouveau et peuvent être rephasés une nouvelle fois par une impulsion de 180°, etc. Il est donc possible d'obtenir plus d'un signal, plus d'un écho de spin. Les échos de spin, cependant, diffèrent en intensité en raison de ce qu'on appelle les effets T_2.
Une courbe reliant les intensités des échos de spin est la courbe T_2. Si nous n'utilisions pas l'impulsion de 180°, l'intensité du signal diminuerait beaucoup plus rapidement. Une courbe décrivant l'intensité du signal dans ce cas est la courbe **T_2*-(T_2 étoile)**, qui est décrite de manière un peu plus détaillée à la page 52.

RESTRICTED

Cette courbe nous montre que l'écho de spin (le signal résultant) diminue avec le temps. C'est parce que notre impulsion de 180° ne « neutralise » que les effets qui influencent les protons de manière constante, et ce sont les inhomogénéités constantes du champ magnétique externe.

Les inhomogénéités constantes des champs magnétiques locaux à l'intérieur du tissu ne peuvent pas être « égalisées », car elles pourraient avoir une influence différente sur certains protons avant et après l'impulsion de 180°. Ainsi, certains des protons peuvent encore être derrière ou devant la majorité des protons qui atteindront la ligne de départ au même moment. Ainsi, d'écho en écho, l'intensité du signal diminue en raison de ce qu'on appelle les **effets T_2**. Une courbe reliant les intensités des échos de spin est la **courbe T_2**.

Peut-être devrions-nous illustrer cela par un exemple : imaginez deux bus remplis de gens, par exemple après un match de football ou de soccer. Ils se tiennent sur une ligne de départ (figure 36). Avec deux microphones, vous enregistrez le signal (par exemple le chant de la foule) qui provient de chaque bus. Les bus partent dans la même direction.

En écoutant le chant de la foule, c'est-à-dire en enregistrant le signal, vous pouvez reconnaître qu'un signal disparaît plus vite que l'autre.

Il y a deux raisons possibles à cela : La différence d'intensité du signal, la différence de chant, peut-être due à des différences dans les propriétés inhérentes aux deux groupes (inhomogénéités internes); un des deux bus est peut-être rempli de « fêtards », qui se sont fatigués moins vite que les gens de l'autre groupe.

Ou ... un des deux bus roule plus vite que l'autre (la perte de signal serait donc due à des influences extérieures, à des inhomogénéités du champ magnétique externe).

Pour savoir quelle est la raison réelle de la disparition du signal, vous pouvez faire un demi-tour aux bus après un certain temps TE/2, et leur faire reprendre la route à la même vitesse également pendant le temps TE/2.

Après 2 x TE/2 = TE, les bus seront de retour sur la ligne de départ. L'intensité du signal que vous enregistrez avec votre microphone ne dépend alors que de ses propriétés intrinsèques, c'est-à-dire de la fatigue de la foule.

Examinons notre courbe, lorsque nous avons tracé le temps en fonction de l'intensité du signal envoyant plusieurs impulsions de 180° (voir figure 35). Si vous n'utilisez pas une impulsion de 180° pour neutraliser des inhomogénéités externes constantes, les protons connaîtront de plus grandes différences d'intensité de champ magnétique, lorsque l'impulsion RF est désactivée. De ce fait, ils seront déphasés plus rapidement, et le temps de relaxation transversale sera plus court.

Une courbe décrivant l'intensité du signal dans ce cas est la **courbe T_2* (T_2 étoile)** L'étoile distingue ce temps de relaxation transversale plus court du T_2 après l'impulsion de 180°, dont nous avons déjà parlé.

Les effets correspondants sont appelés **effets T_2.** Ces effets T_2* sont importants avec les séquences d'imagerie dites rapides; nous en parlerons plus tard, et nous les aborderons plus en détail dans le livre « *MR Buzzology* ».

Dans notre exemple avec les bus, cela signifierait que nous enregistrons simplement les signaux, au fur et à mesure que les bus s'éloignent. Dans ces circonstances, les signaux disparaissent en raison de propriétés extrinsèques (vitesse du bus) et intrinsèques (épuisement des passagers) (voir figure 36).

Le type de séquence d'impulsions que nous avons utilisé dans notre expérience, est appelé **séquence d'écho de spin**, consistant en une impulsion de 90° et une impulsion de 180° (qui provoque l'écho). Cette séquence d'impulsions est très importante en imagerie RM, car elle est le « bourreau de travail » des séquences d'impulsions. Elle peut servir dans de nombreuses situations. Il est important de réaliser qu'avec une séquence d'écho de spin, nous ne produisons pas seulement des images pondérées en T_2, mais aussi des images pondérées en T_1 et en densité de protons. Nous y reviendrons tout à l'heure.

RESTRICTED

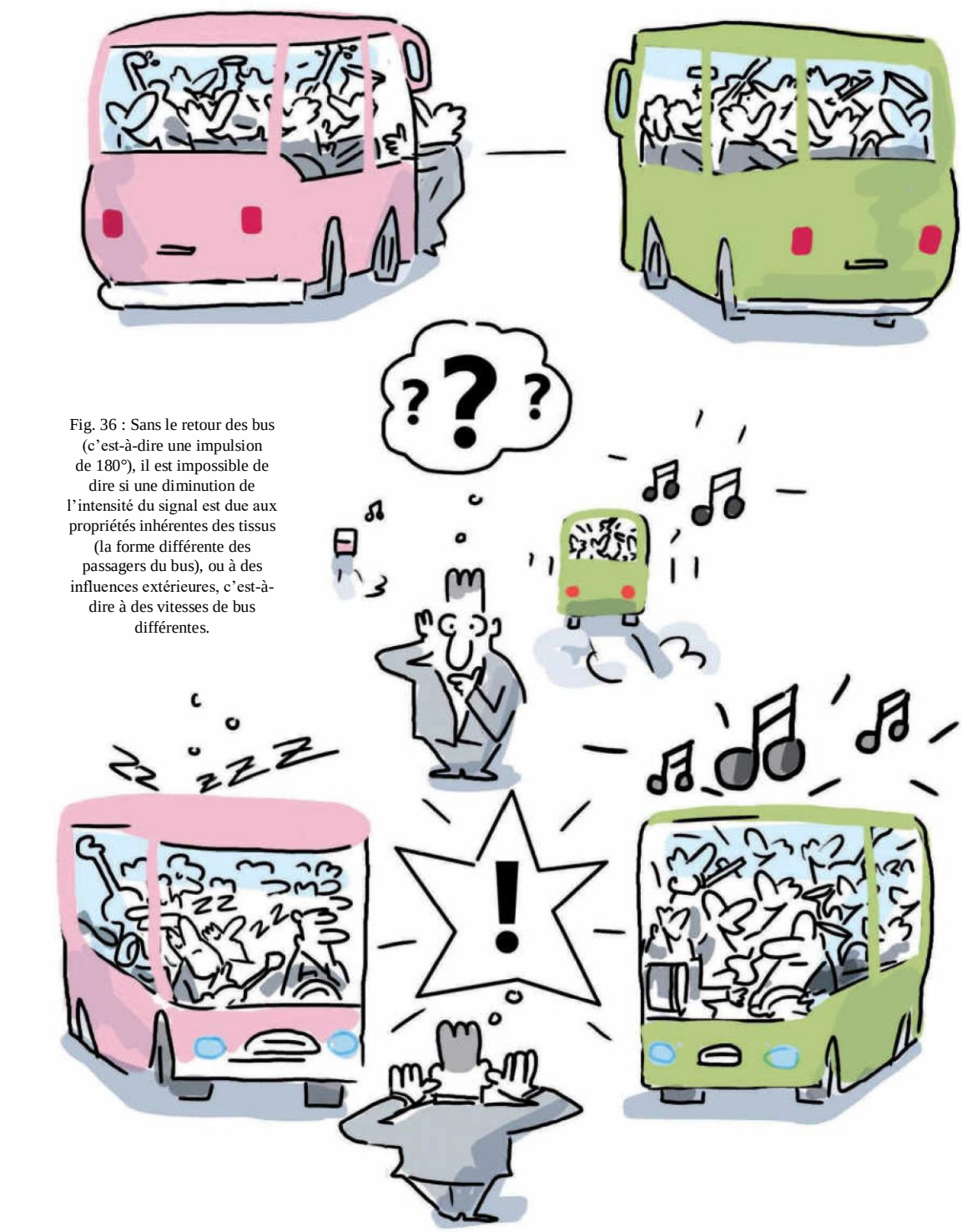


Fig. 36 : Sans le retour des bus (c'est-à-dire une impulsion de 180°), il est impossible de dire si une diminution de l'intensité du signal est due aux propriétés inhérentes des tissus (la forme différente des passagers du bus), ou à des influences extérieures, c'est-à-dire à des vitesses de bus différentes.

RESTRICTED

Gros plan sur les images pondérées T_2

Voyons d'abord la séquence pondérée T_2

Qu'avons-nous fait? D'abord, nous avons envoyé une impulsion de 90°, ce qui a entraîné une certaine aimantation transversale. Immédiatement après l'impulsion de 90°, nous avons une aimantation transversale maximale. Cependant, cette aimantation transversale disparaît, en raison des **effets T_2**. La vitesse à laquelle l'aimantation transversale disparaît peut être observée à partir d'une **courbe T_2;** sur la figure 37, nous avons tracé des courbes T_2 pour deux tissus différents, le tissu A ayant un T_2 court (par exemple le cerveau), le tissu B ayant un T_2 long (eau ou LCR). Les courbes commencent à 0, qui est le temps immédiatement après que l'impulsion de 90° est désactivée.

Lorsque nous attendons un certain temps que TE/2 envoie l'impulsion de 180°, l'aimantation transversale aura diminué. Après avoir attendu un autre temps TE/2 (c'est-à-dire TE après que l'impulsion de 90° soit désactivée), nous recevrons un signal, l'écho de spin.

L'intensité de cet écho est donnée par la courbe T_2 à l'instant TE. Ce temps entre l'impulsion de 90° et l'écho de spin est appelé **TE = temps avant écho.**

Le temps TE peut être choisi par l'opérateur. Et comme on peut le voir sur la courbe T_2-, le TE influence le signal résultant, et donc aussi l'image : plus le temps TE est court, plus le signal que nous recevons d'un tissu est fort. Pour obtenir le meilleur signal (et le plus fort), il peut sembler raisonnable d'utiliser un TE court, car avec des TE plus longs, l'intensité du signal diminue. Cependant, un TE court risque de poser problème (figure 37).

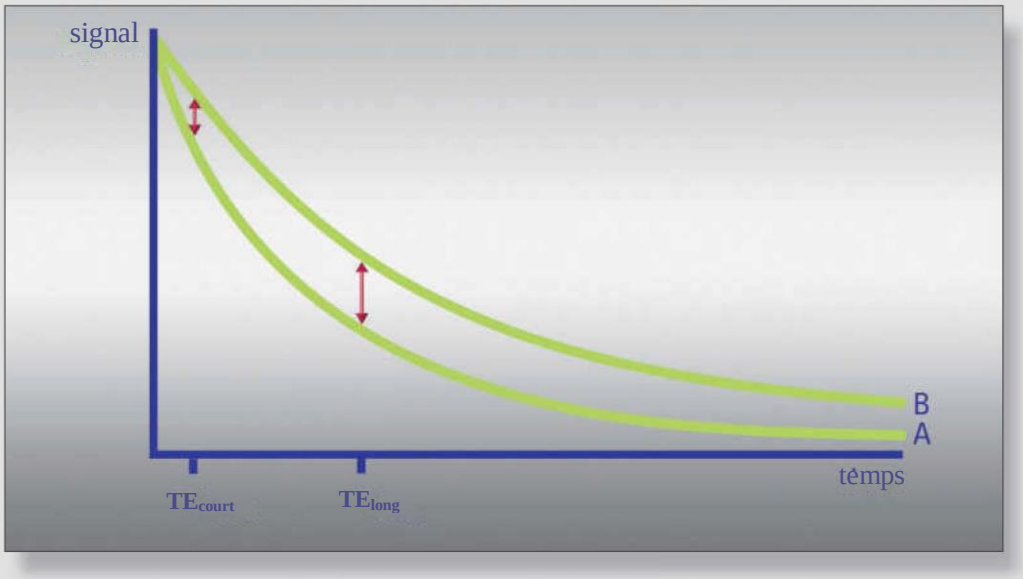


Fig. 37 : Courbes T_2 pour deux tissus ayant des temps de relaxation transversale différents; le tissu A a un T_2 plus court que le tissu B, et perd donc plus rapidement l'aimantation transversale. Avec un TE court (TE_{court}), la différence d'intensité du signal est moins prononcée qu'après un TE long (TE_{long}).

RESTRICTED

Examinons deux tissus différents. Le tissu B (eau ou LCR) a un T_2 plus long que le tissu A (cerveau).

Dans cet exemple, les deux courbes T_2 commencent au même point. Si nous attendons seulement un TE court (TE_{court}), la différence d'intensité du signal entre le tissu A et le tissu B est très faible. Les deux tissus peuvent difficilement être distingués, car il n'y a pratiquement pas de contraste (c.-à-d. la différence d'intensité du signal des tissus).

Conséquence : avec un TE court, les différences de T_2 n'influencent pas beaucoup le contraste des tissus.

Comme les deux courbes T_2 divergent avec un TE plus$_{long}$ (TE_{long}), la différence entre les courbes T_2, et donc la différence d'intensité du signal (c.-à-d. le **contraste**), est plus prononcée dans notre exemple. Il pourrait donc être raisonnable d'attendre un TE très long; l'image résultante devrait être très fortement pondérée en T2.

Mais (et il y a toujours un « mais ») si nous attendons plus longtemps, l'intensité totale du signal devient de plus en plus faible. Le **rapport signal/bruit** devient plus petit et l'image apparaît granuleuse.

Un exemple pour illustrer ce problème lié au signal/bruit : lorsque vous écoutez une station de radio locale, le signal est excellent (son puissant et bruit statique minimum).

Mais plus vous vous éloignez de la ville, plus le signal de la station de radio faiblit et le bruit statique augmente; et lorsque vous allez encore plus loin, vous ne pouvez plus discerner la musique du bruit de fond. C'est pareil pour le signal MR : il y a toujours un peu de bruit dans le système, mais lorsque le signal est fort, cela n'a pas beaucoup d'importance. Mais plus le signal est faible, plus il est difficile à distinguer du bruit de fond.

RESTRICTED

Récapitulons

Nous avons appris que :

La séquence d'écho de spin consistant en une impulsion de 90° et une impulsion de 180°.

- Après l'impulsion de 90°, les protons se déphasent en raison des inhomogénéités des champs magnétiques externe et interne.
- L'impulsion de 180° a pour effet de rephaser les protons qui se déphasent (le terme « spins » est parfois utilisé de façon interchangeable avec « protons »), ce qui se traduit par un signal plus fort (l'écho de spin).
- L'impulsion de 180° sert à « neutraliser » les inhomogénéités du champ magnétique externe.
- La diminution du signal d'un écho à l'autre, lors de l'utilisation de multiples impulsions de 180°, est due à des effets T_2 internes.
- En choisissant différents TE (temps différents après l'impulsion de 90°), le signal peut être pondéré en T_2 à des degrés divers. Avec des TE très courts, les effets T_2 n'ont pas encore eu le temps de se manifester.
- Avec des TE plus longs, la différence d'intensité du signal entre les tissus dépendra beaucoup de leurs T_2, c.-à-d. leur temps de relaxation transversale.
- Avec des TE très longs, il devrait y avoir encore plus de pondération T_2, mais l'intensité du signal en tant que telle serait si faible qu'on pourrait à peine le distinguer du bruit de fond.

À propos, qu'est-ce qu'un TR court et qu'est-ce qu'un TR long?

Un **TR** court est un TR qui est à peu près aussi court que le plus petit T_1 qui nous intéresse (souvenez-vous : Le T_1 était une constante de temps, et non le temps qu'il faut à un tissu pour retrouver son aimantation longitudinale). Un TR long est environ 3 fois plus long qu'un TR court.

Un TR inférieur à 500 ms est considéré comme un TR court, un TR supérieur à 1 500 ms comme un TR long (juste pour vous donner une idée générale). Un TE courte est le plus court possible, un TE long est également plus de 3 fois plus long.

Un TR inférieur à 20 ms est considéré comme un TR court, un TR supérieur à 80 ms comme un TR long.

Fig. 38 : Illustration schématique d'une séquence d'impulsions d'écho de spin.

RESTRICTED