

# Chapitre 4

## La séquence de base : séquence d'écho de spin

B. Kastler

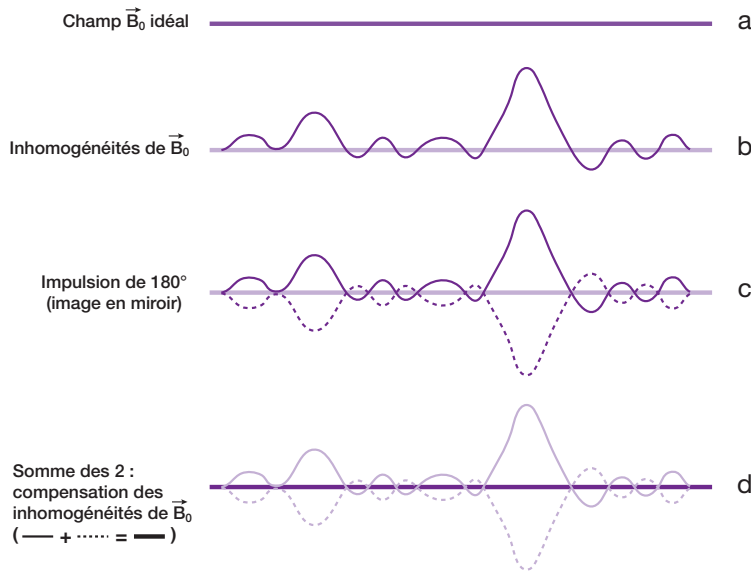
Nous venons de voir au chapitre précédent que le signal de FID observé est lié à la fois aux inhomogénéités de champ d'origine «moléculaire» ( $T_2$ ) responsables de la décroissance «irréversible» de l'aimantation transversale  $\vec{M}_{xy}$ , auxquelles *s'ajoutent* les inhomogénéités *propres* du champ magnétique externe  $\vec{B}_0$  ( $T_2^*$ ). Le (faible) signal de FID décroît ainsi de façon encore plus rapide selon une exponentielle en  $T_2^*$  du fait des inhomogénéités *propres (constantes)* de  $\vec{B}_0$  qui accélèrent considérablement le déphasage des spins. Or, ce qui nous intéresse *a priori*, c'est le *vrai*  $T_2$ , lié à l'interaction des spins entre eux (caractéristique de l'échantillon étudié) et non pas le  $T_2^*$ , lié aux «qualités» de l'imageur (homogénéité de  $\vec{B}_0$ ) et qui, de plus, affaiblit et réduit la durée du signal. Hahn propose dès 1955 (bien avant l'avènement de l'imagerie par résonance magnétique) une méthode pour se *débarrasser des inhomogénéités propres* du champ principal externe  $\vec{B}_0$  et accéder ainsi au *vrai*  $T_2$  *par l'écho de spin*.

Voyons tout de suite quel est le principe de l'écho de spin (ES) ou spin écho (SE).

Les inhomogénéités propres du champ principal  $\vec{B}_0$  étant constantes, il est possible, par l'application d'une impulsion RF de  $180^\circ$ , de *s'affranchir des déphasages induits* par  $\vec{B}_0$  qui eux aussi sont constants («rephasage des déphasages» constants induits par  $\vec{B}_0$ ). À la suite d'une impulsion de  $90^\circ$ , les spins se déphasent rapidement à cause des inhomogénéités de champ d'origine «moléculaire» (relaxation

spin-spin irréversible) et aussi à cause des inhomogénéités propres de  $\vec{B}_0$ . Si au bout d'un temps  $TE/2$  ( $TE/2 =$  demi-temps d'écho, *voir* ci-dessous), après l'impulsion RF de  $90^\circ$  (les spins se sont déjà déphasés), une impulsion RF de  $180^\circ$  est appliquée, celle-ci va inverser les déphasages (image en miroir) sans modifier le sens de rotation. Les spins qui précédaient le plus rapidement vont se retrouver à présent derrière les plus lents et, comme *les vitesses de précession (et le sens de rotation) restent identiques*, au bout d'un temps  $2 TE/2 = TE$  (temps d'écho), les spins seront de nouveau (presque) en phase, engendrant un signal dit *d'écho de spin*. En effet, le terme «presque» est justifié car la formation d'un écho (de spin) par une impulsion de  $180^\circ$  ne permet de s'affranchir que des déphasages dus aux inhomogénéités propres de  $\vec{B}_0$  qui sont constantes et non pas des déphasages «aléatoires» dus aux inhomogénéités de champ d'origine «moléculaire» (relaxation spin-spin ou transversale) qui sont «irréversibles».

Pour bien comprendre comment, grâce à l'impulsion de  $180^\circ$ , il est possible de s'affranchir des inhomogénéités propres de  $\vec{B}_0$ , on peut prendre un exemple imagé (fig. 4-1). Considérons une feuille de papier qui apparaît, vue en coupe, lisse au toucher pour un observateur à l'échelle humaine (correspondant, en IRM, à une homogénéité sur le plan macroscopique ou un champ  $\vec{B}_0$  idéal, fig. 4-1a). Lorsqu'on regarde la même coupe au microscope, cette



**Fig. 4-1.** Explication schématique de l'intérêt de l'impulsion de  $180^\circ$  pour s'affranchir des inhomogénéités propres de  $\vec{B}_0$  (voir texte).

feuille comporte de nombreux reliefs, traduisant son inhomogénéité à l'échelle microscopique (champ  $\vec{B}_0$  inhomogène, fig. 4-1b). Si l'on en fait une image en miroir, à  $180^\circ$  (correspondant à une impulsion de  $180^\circ$ ), on voit apparaître virtuellement une feuille de papier avec un relief symétrique (image en miroir, en pointillés, fig. 4-1c). Lorsque l'on fait la somme des deux reliefs (plan de coupe initial et image en miroir), on obtient de nouveau un plan de coupe parfaitement lisse correspondant au champ  $\vec{B}_0$  idéal (fig. 4-1d).

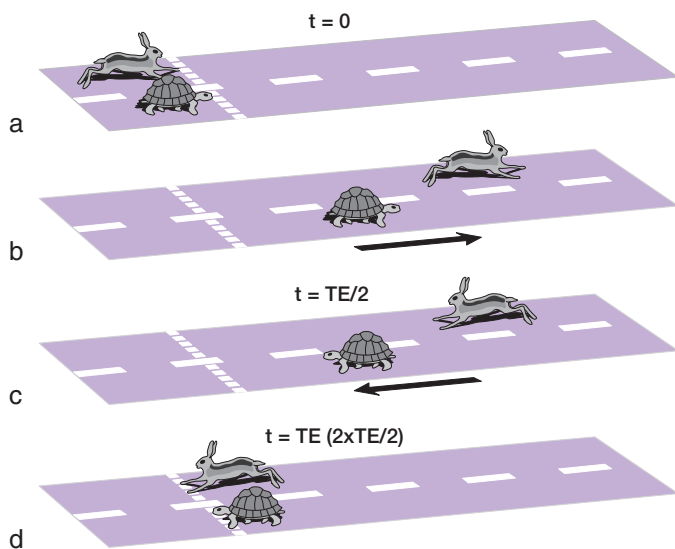
Avant de revenir en détail sur la formation de l'écho de spin (rephasage des spins par l'impulsion RF de  $180^\circ$ ), nous allons illustrer le phénomène par un exemple.

Imaginons (fig. 4-2) une course entre un lapin (rapide) et une tortue (lente) qui partent au temps  $t = 0$  d'une même ligne de départ (alignés = en phase). Ils vont se distancer rapidement (ils se déphasent) : le lapin est devant la tortue. Au bout d'un temps donné ( $TE/2$ ), on leur demande de repartir en sens inverse (impulsion de  $180^\circ$ ) vers la ligne de départ. En supposant que leurs vitesses respectives soient constantes, au bout du même temps ( $TE/2$ ), ils arriveront de nouveau ensemble sur la ligne d'arrivée (ils seront rephasés au temps d'écho  $TE$ ). Bien que les deux animaux (spins) courent à des vitesses différentes, donc se déphasent progressivement, une astuce

(l'impulsion de  $180^\circ$ ) permet de s'affranchir des différences en phases (liées aux différences en vitesse)<sup>1</sup>.

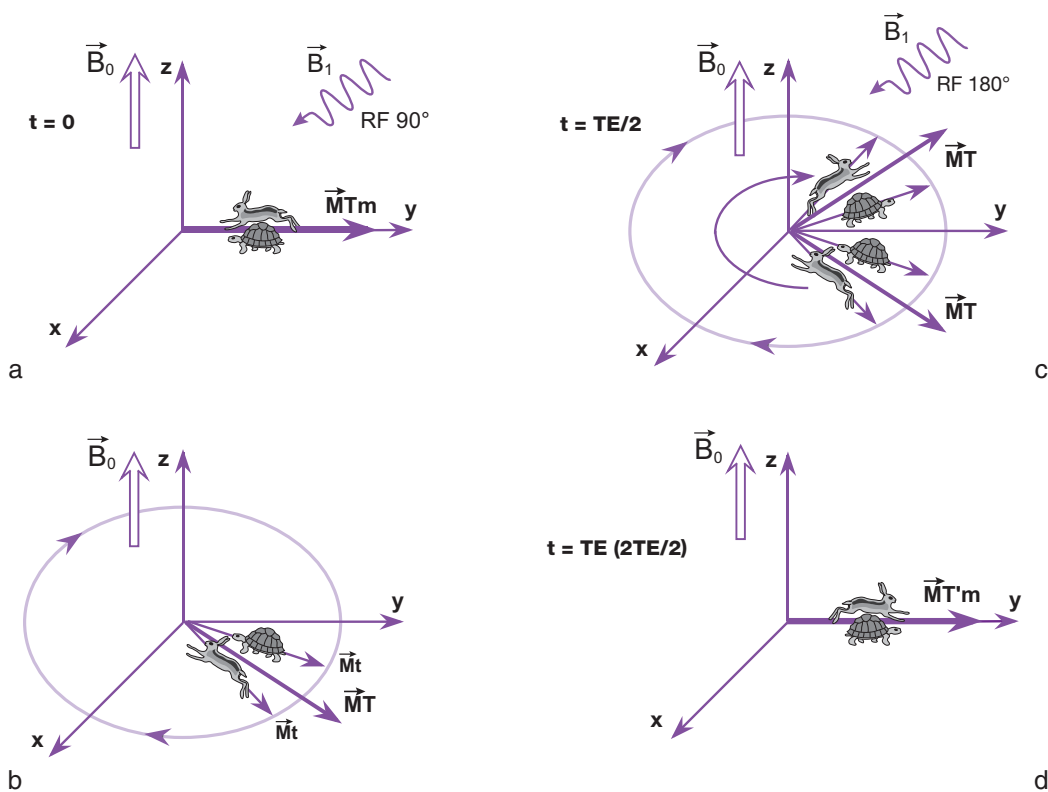
Pour mieux comprendre le phénomène d'écho de spin, il faut compléter cet exemple (fig. 4-3). La course a lieu autour d'un champ de course circulaire (pour illustrer les notions de précession «rotation» et les déphasages «angles»). Avant la course, le lapin et la tortue sont sur la ligne de départ (en phase, après l'impulsion de  $90^\circ$ ), contribuant à la formation du vecteur d'aimantation  $\vec{M}_{xy}$  ou  $\vec{M}_T$  (T pour transversal, maximal au départ). Ils vont se distancer rapidement, le lapin étant devant la tortue : ils se déphasent (différences d'angles), et le vecteur  $\vec{M}_T$  (signal) diminue. Au bout du temps  $TE/2$ , on applique l'impulsion de  $180^\circ$  : celle-ci va inverser les déphasages *sans modifier le sens de rotation* (ni la longueur de  $\vec{M}_T$ ) : on obtient une image en miroir (par rapport à l'axe  $Oy$ ). En supposant que leurs vitesses respectives soient constantes, les animaux se rapprochent progressivement (ils vont se rephaser : le vecteur  $\vec{M}_T$  – signal – recroît) ; au bout d'un second intervalle de temps  $TE/2$ , ils arriveront ensemble sur la ligne d'arrivée (ils seront rephasés au temps d'écho  $TE$ ) ; c'est le

<sup>1</sup> Cet exemple ne traduit cependant pas tout à fait la réalité, car il y a une «inversion de la vitesse» (*inversion du sens de rotation*), ce qui n'est pas le cas en IRM.



**Fig. 4-2.** Un lapin (rapide) et une tortue (lente) font une course.

Ils sont alignés sur la ligne de départ (= en phase) (a) et démarrent au temps ( $t = 0$ ). Rapidement, le lapin qui court plus vite va devancer la tortue (ils se déphasent progressivement) (b). Au bout d'un temps  $TE/2$ , on leur demande de se retourner et de repartir en sens inverse (impulsion de  $180^\circ$ ) vers la ligne de départ (c). Si leur vitesse respective reste constante, ils vont se rephaser progressivement et, au bout d'un même intervalle de temps  $TE/2$ , ils arriveront ensemble sur la ligne d'arrivée (ils seront rephasés au temps d'écho  $TE$ ) (d). Bien que les deux animaux (spins) courent à des vitesses différentes (donc se déphasent progressivement), une astuce (l'impulsion de  $180^\circ$ ) permet de s'affranchir des différences en phases (liées aux différences en vitesse).



**Fig. 4-3.** Pour mieux illustrer la précession «rotation» et les déphasages «angles», le champ de course doit être circulaire.

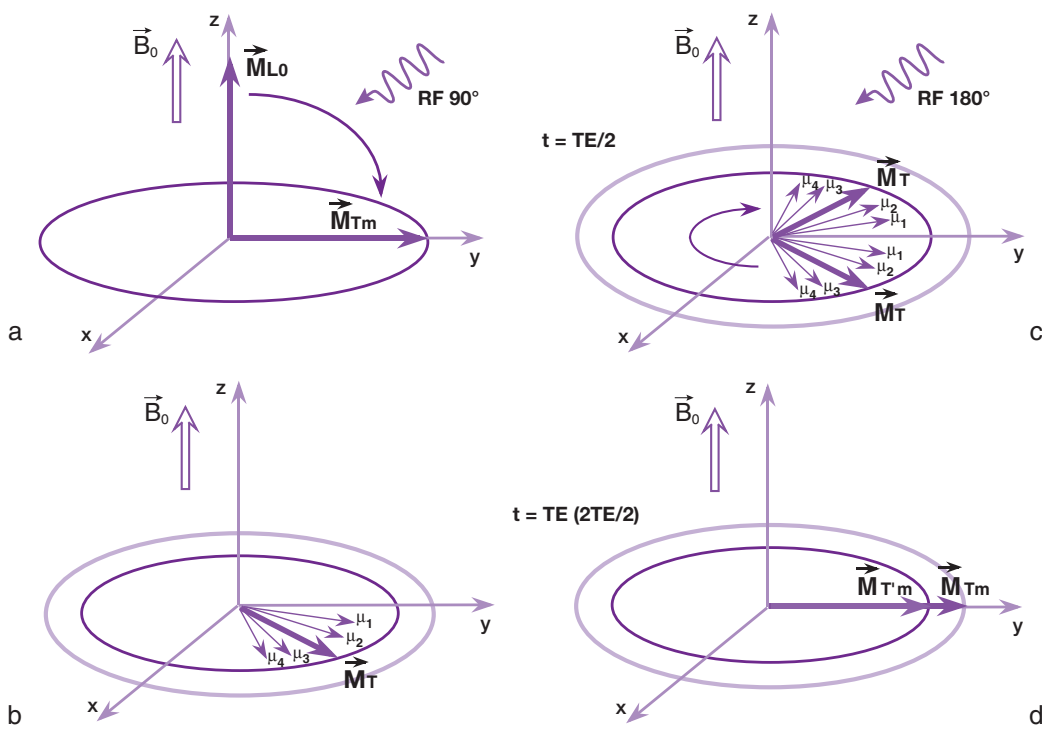
Avant la course, le lapin et la tortue sont «en phase» sur la ligne de départ (après l'impulsion de  $90^\circ \Rightarrow$  formation du vecteur d'aimantation transversal  $\vec{M}_T$ ) (a). Ils se distancent (déphasent) rapidement, le lapin étant devant la tortue :  $\vec{M}_T$  (signal) diminue (b). Au temps  $TE/2$ , on applique l'impulsion de  $180^\circ$  : elle inverse les déphasages *sans modifier le sens de rotation* (image en miroir par rapport à l'axe  $Oy$ ). Les animaux se rapprochent (se rephasent) progressivement : le vecteur  $\vec{M}_T$  (signal) croît (c). Au temps (temps d'écho)  $TE$ , ils arrivent ensemble (rephasés) sur la ligne de départ ; c'est le phénomène de l'écho : le vecteur  $\vec{M}_T$  est de nouveau maximal et le signal est mesuré (d).

phénomène de l'écho, le vecteur  $\vec{M}_T$  est de nouveau maximal : le signal est mesuré.

En fait, nous y reviendrons,  $\vec{M}_T$  est légèrement plus petit qu'au départ car il persiste un *déphasage aléatoire* (irréversible) lié à la relaxation spin-spin (inhomogénéités de champ d'origine «moléculaire»), dont on ne peut s'affranchir par l'impulsion de  $180^\circ$  : celle-ci corrige seulement les *déphasages constants*, c'est-à-dire les inhomogénéités propres constantes du champ principal  $\vec{B}_0$  («*rephasage des déphasages*») constants induits par  $\vec{B}_0$ .

Reprenons notre démonstration avec quatre spins  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  et  $\mu_4$ , (les fameux quatre en «surnombre») (fig. 4-4).

Au temps  $t = 0$ , les quatre spins sont en phase, le vecteur  $\vec{M}_T$  est maximal [ $\vec{M}_{Tm}$  immédiatement après l'impulsion de  $90^\circ$  est égal, en longueur, nous le savons, au vecteur d'aimantation longitudinal  $\vec{M}_{z0}$  (ou  $\vec{M}_{L0}$ )]. Ensuite, les spins se déphasent à cause des inhomogénéités de champ d'origine «moléculaire» (relaxation spin-spin irréversible) et aussi à cause des inhomogénéités propres de  $\vec{B}_0$ ; les plus rapides  $\mu_3$  et  $\mu_4$  sont en avant et les plus lents  $\mu_1$  et  $\mu_2$  en arrière : ils s'écartent en «éventail» et le vecteur  $\vec{M}_T$  (résultant) diminue ainsi en  $T_2^*$ . Au temps  $t = TE/2$ , une impulsion RF de  $180^\circ$  est appliquée : elle inverse les déphasages (image en miroir) *sans modifier le sens de*



**Fig. 4-4.** Illustration du phénomène de l'écho de spin avec quatre spins  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  et  $\mu_4$ .

(a)  $t = 0$ , les quatre spins sont en phase, le vecteur  $\vec{M}_T$  est maximal ( $\vec{M}_{Tm}$ ). (b) Les spins se déphasent à cause des inhomogénéités de champ d'origine «moléculaire» (relaxation spin-spin irréversible) et à cause des inhomogénéités propres de  $\vec{B}_0$ ; les plus rapides  $\mu_3$  et  $\mu_4$  sont en avant et les plus lents  $\mu_1$  et  $\mu_2$  en arrière : ils s'écartent en éventail et le vecteur  $\vec{M}_T$  (résultant) diminue ainsi en  $T_2^*$ . (c)  $t = TE/2$ , une impulsion RF de  $180^\circ$  est appliquée, elle inverse les déphasages (image en miroir) sans modifier le sens de rotation. Les spins  $\mu_3$  et  $\mu_4$  qui précédaient le plus rapidement vont se retrouver à présent derrière les plus lents  $\mu_1$  et  $\mu_2$ . (d)  $t = TE$  ( $2TE/2$ ), les spins sont de nouveau («presque») en phase (alignés) :  $\vec{M}_T$  est de nouveau maximal, induisant un signal dit d'écho de spin que l'on mesure. En fait, le déphasage lié à la relaxation spin-spin n'est pas corrigé par l'impulsion RF de  $180^\circ$ , le vecteur  $\vec{M}'_m$  est légèrement plus petit que  $\vec{M}_{Tm}$ ; il en est de même pour le signal mesuré : tous deux passent par un maximum qui cette fois-ci a diminué en  $T_2$ .

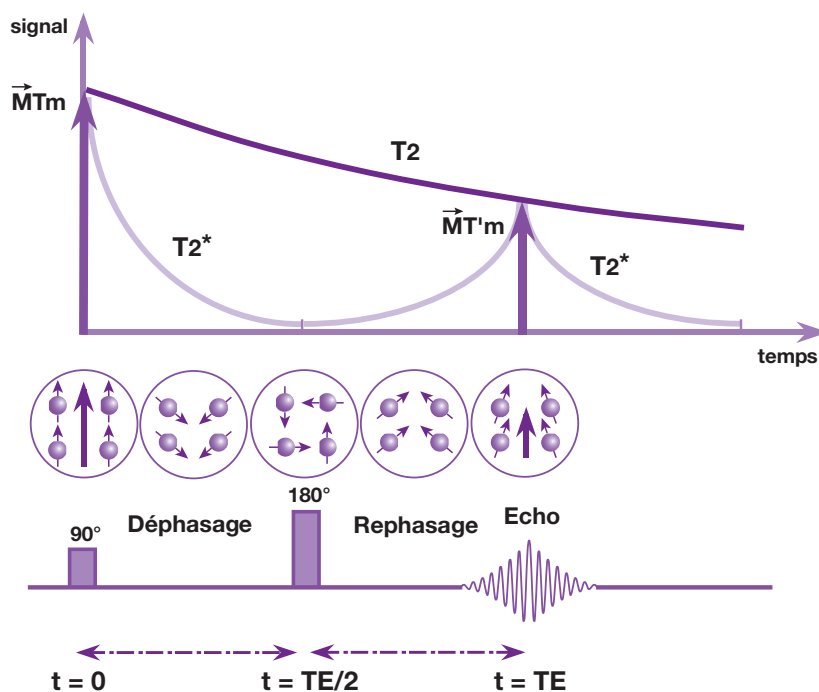
*rotation*. Les spins  $\mu_3$  et  $\mu_4$  qui précédaient le plus rapidement vont se retrouver à présent derrière les plus lents  $\mu_1$  et  $\mu_2$ ; comme *les vitesses de précession (et le sens de rotation) restent identiques*, au bout du temps d'écho TE ( $2 TE/2$ ), les spins seront de nouveau («presque») en phase (alignés) :  $\vec{M}_T$  est de nouveau maximal, engendrant un signal dit d'*écho de spin* que l'on mesure. En fait, le déphasage lié à la relaxation spin-spin n'est pas corrigé par l'impulsion RF de  $180^\circ$  : le vecteur  $\vec{M}'_m$  est légèrement plus petit que  $\vec{M}_{Tm}$ . Il en est de même pour le signal mesuré : tous deux passent par un maximum qui, cette fois-ci, a *diminué* en  $T_2$ . Pour bien fixer la chronologie des événements, nous allons compléter l'illustration du phénomène de l'écho de spin par un dernier exemple (fig. 4-5) :

- au temps  $t = 0$ , application de l'impulsion de  $90^\circ$  qui bascule  $\vec{M}_{L0}$  dans le plan transversal. Les (4) spins sont en phase (parfaitement

alignés-parallèles) et l'aimantation transversale est maximale :  $\vec{M}_{Tm} (= \vec{M}_{L0})$ ;

- les spins se déphasent rapidement : courbe en  $T_2^*$  ou FID (en fait l'aimantation transversale disparaît rapidement);
- au temps  $t = TE/2$ , application de l'impulsion de  $180^\circ$ ;
- les spins se rephasent;
- au temps  $t = TE$ , les spins sont rephasés : le signal réapparaît sous forme d'écho et il peut être mesuré. Cependant, comme nous le voyons sur la figure 4-5, les spins ne sont *pas parfaitement rephasés (alignés-parallèles)*. Ce déphasage est la conséquence de la relaxation spin-spin ( $T_2$  irréversible); le vecteur  $\vec{M}'_m$  (signal mesuré) est légèrement plus petit que  $\vec{M}_{Tm}$ .

Nous verrons par la suite que le cycle que nous venons de décrire (survenant au cours d'une excitation) ne permet d'obtenir qu'une ligne



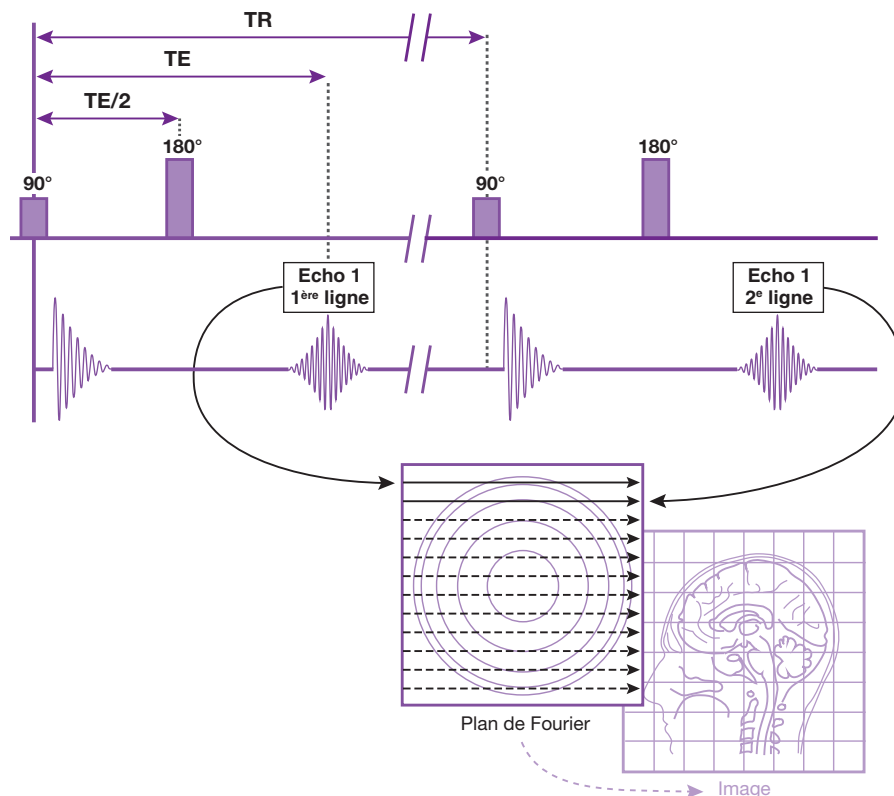
**Fig. 4-5.** Chronologie des événements au cours du phénomène de l'écho de spin.

- $t = 0$ , application de l'impulsion de  $90^\circ$  qui bascule  $\vec{M}_{L0}$  dans le plan transversal. Les (4) spins sont en phase (parfaitement alignés-parallèles) et l'aimantation transversale est maximale :  $\vec{M}_{Tm} (= \vec{M}_{L0})$ .
- Les spins se déphasent rapidement : courbe en  $T_2^*$  ou FID (en fait l'aimantation transversale disparaît rapidement).
- $t = TE/2$ , application de l'impulsion de  $180^\circ$ .
- Les spins se rephasent.
- $t = TE$ , les spins sont rephasés : le signal réapparaît sous forme d'écho et il peut être mesuré. Cependant, les spins ne sont pas parfaitement rephasés (alignés-parallèles). Ce déphasage est la conséquence de la relaxation spin-spin (irréversible) : le vecteur  $\vec{M}'_m$  (signal mesuré) est donc légèrement plus petit que  $\vec{M}_{Tm}$ .

de la matrice image, qui correspond, en fait, au *plan de Fourier*, comme nous le verrons au chapitre 7. Pour obtenir les lignes suivantes (un cycle complet correspond à une image de 128 ou 256 lignes), il va falloir répéter, pour chaque ligne, le cycle d'impulsions de  $90^\circ$  et  $180^\circ$  (fig. 4-6). Dans cette séquence d'événements, le *temps d'écho* correspond au *temps de mesure*, et le *temps de répétition* à l'intervalle séparant deux impulsions de  $90^\circ$  ou deux cycles élémentaires. Le TR correspond ainsi au «temps de passage» d'une ligne sur l'autre, mais également au *temps de repousse de l'aimantation longitudinale* (voir chapitre 5). C'est le plan de Fourier qui, par la suite, permettra de donner accès à l'image (voir fig. 4-6).

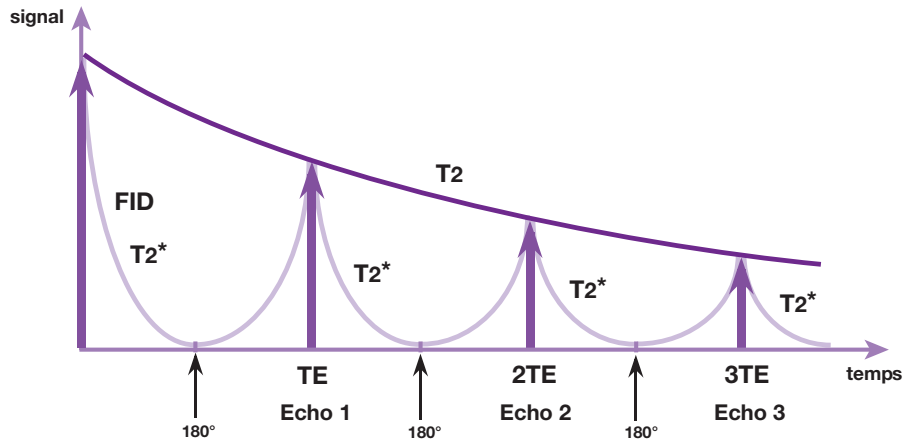
Au total, nous voyons que l'impulsion RF de  $180^\circ$  permet d'accéder à la décroissance du

signal en T2 vrai ou en quelque sorte de «remonter» sur la courbe en T2 à partir de la courbe T2\* (fig. 4-7). Il est possible d'appliquer une deuxième fois une impulsion de  $180^\circ$  pour obtenir un signal au deuxième écho, puis une troisième impulsion de  $180^\circ$  pour obtenir un signal au troisième écho, et ainsi de suite jusqu'à disparition totale du signal en T2. On obtient ainsi autant d'images que d'échos et la pondération en T2 des images augmente, nous le verrons, d'un écho sur l'autre. À chaque écho (impulsion de  $180^\circ$ ), le signal (qui a disparu en T2\*) «remonte» sur la courbe en T2 et redisparaît en T2\*. La courbe en T2 représente l'«enveloppe» qui joint les sommets des différents échos. Les échos peuvent être symétriques (les TE sont égaux) ou asymétriques (les TE sont différents).



**Fig. 4-6.** Chronologie des impulsions RF et paramètres de la séquence d'écho de spin.

Un cycle d'impulsions de  $90^\circ$  et  $180^\circ$  ne permet d'obtenir qu'une ligne de la matrice image (correspondant au *plan de Fourier*). Pour obtenir les lignes suivantes (un cycle complet correspond à une image de 128 ou 256 lignes), il va falloir répéter pour chaque ligne ce cycle. Le temps d'écho correspond au temps de mesure et le temps de répétition au «temps de passage» d'une ligne sur l'autre, c'est-à-dire à l'intervalle séparant deux impulsions de  $90^\circ$  ou deux cycles élémentaires. C'est le plan de Fourier qui permet de donner accès à l'image.

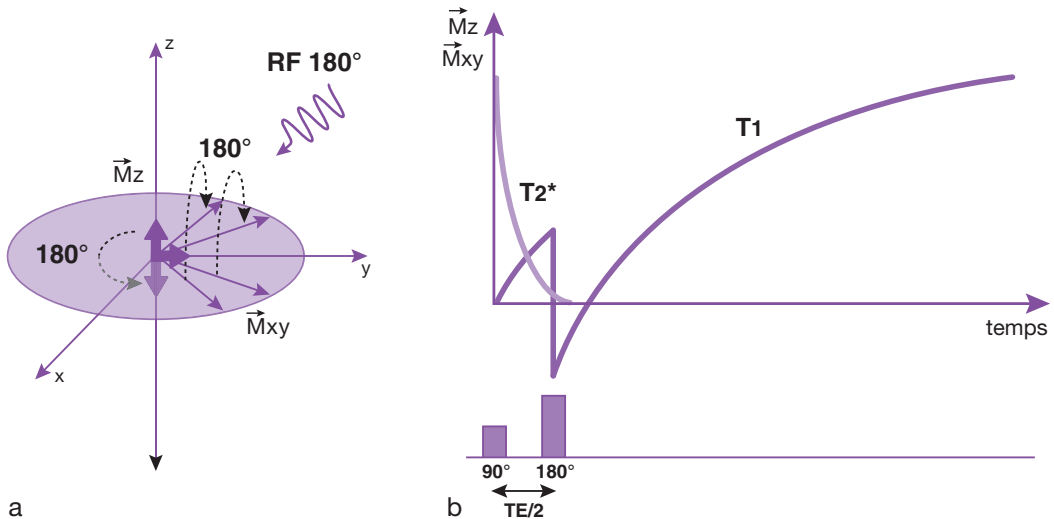


**Fig. 4-7.** Courbe en T2.

En appliquant une deuxième impulsion de 180°, on obtient un signal au deuxième écho, une troisième impulsion de 180° un signal au troisième écho, et ainsi de suite jusqu'à disparition totale du signal en T2 (on obtient ainsi autant d'images que d'échos). À chaque écho (impulsion de 180°), le signal (qui a disparu en T2\*) «remonte» sur la courbe en T2 et redisparaît en T2\*. Les impulsions RF de 180° successives (échos) permettent d'accéder à la décroissance du signal en T2 vrai. La courbe en T2 est représentée par l'«enveloppe» qui joint les sommets des différents échos.

On peut se poser une dernière question concernant le principe de l'écho de spin. En effet, nous avons vu que, dans le plan transversal, l'impulsion de 180° conduit à une inversion des déphasages des spins dans ce plan : les aimantations transversales élémentaires (qui sont à l'origine de  $\vec{M}_{xy}$ ) subissent bien une variation d'angle de 180°. Mais que

devient l'aimantation  $\vec{M}_z$  pendant ce temps ? L'ensemble du volume sélectionné recevant les impulsions RF, l'aimantation longitudinale, qui a commencé à repousser durant le temps TE/2, est également affectée par l'impulsion de 180° et, par conséquent, s'inverse dans l'axe Oz (fig. 4-8a). La représentation du phénomène par les courbes de relaxation montre



**Fig. 4-8.** Effet de l'impulsion de 180° sur l'aimantation transversale et l'aimantation longitudinale.

Comme l'aimantation transversale, l'aimantation longitudinale subit également l'impulsion de 180° et, par conséquent, s'inverse dans l'axe Oz, alors que sa repousse a débuté (a).

La repousse de  $\vec{M}_z$  est encore faible au temps TE/2 (la repousse en T1 est beaucoup plus lente que la décroissance en T2, voire T2\*) et se poursuit normalement après son inversion (b). Dans les représentations habituelles, le phénomène est négligé.



que la repousse de  $\vec{M}_z$  est encore faible au moment de l'application de l'impulsion de  $180^\circ$ , après le temps  $TE/2$ , dont la valeur est généralement négligeable par rapport au TR ( $TE/2 =$  environ  $1/40^\circ$  de TR – rappelons également que la repousse en T1 est beaucoup plus lente que la décroissance en T2, voire T2\*). Elle se poursuit normalement par la suite, après cette inversion [pendant le «reste du TR», soit  $39/40^\circ$  de TR (fig. 4-8 b)]. Ainsi, dans les schémas représentant les courbes de relaxation T1, cet effet est habituellement négligé<sup>2</sup>.

L'écho de spin est la séquence la plus utilisée en imagerie. Elle permet d'obtenir des images d'excellente qualité dont la pondération en T1 et T2, nous le verrons, peut être déterminée par un choix judicieux des paramètres TR

(temps de répétition ou de «repousse») et TE (temps d'écho ou de «mesure»). Cependant, un des désavantages de cette séquence est qu'elle est relativement longue (nécessitant au moins 128 ou 256 lignes  $\times$  TR). D'autres types de séquences sont utilisés en imagerie rapide. Il est également difficile d'obtenir des images avec des temps d'écho TE courts puisqu'il faut au bout d'un certain temps ( $TE/2$ ) appliquer une impulsion RF de  $180^\circ$  et attendre au moins deux fois ce temps ( $TE = 2 TE/2$ ) pour pouvoir mesurer le signal : si, par exemple, on applique l'impulsion de  $180^\circ$  après 7 à 10 ms (délai court), le TE minimum est de 15 à 20 ms (ce qui est «relativement long» pour une séquence pondérée en T1, nous le verrons).

### À retenir

- Une séquence d'écho de spin comprend une impulsion RF de  $90^\circ$  pour basculer l'aimantation dans le plan transversal et une impulsion RF de  $180^\circ$ .
- L'impulsion RF de  $180^\circ$  permet de s'affranchir des déphasages constants induits par  $\vec{B}_0$  (T2\*) («rephasage des déphasages» constants induits par  $\vec{B}_0$ ).
- L'impulsion RF de  $180^\circ$  est appliquée au temps  $TE/2$ .
- L'impulsion RF de  $180^\circ$  inverse les déphasages (image en miroir) sans modifier le sens de rotation.
- Au temps  $t = TE$  ( $2 TE/2$ ), les spins sont de nouveau («presque») en phase (alignés) :  $\vec{M}_T$  est de nouveau maximal, induisant un signal dit d'écho de spin que l'on mesure.
- Les spins ne sont pas parfaitement rephasés (alignés) : la relaxation spin-spin (irréversible) a lieu.
- L'impulsion RF de  $180^\circ$  permet d'accéder à la décroissance du signal en T2 vrai (de «remonter» sur la courbe en T2).
- La courbe en T2 représente l'enveloppe qui joint les sommets des différents échos.
- Le temps d'écho correspond au temps de mesure.
- Le temps de répétition correspond au «temps de passage» d'une ligne sur l'autre, c'est-à-dire à l'intervalle séparant deux impulsions de  $90^\circ$  ou deux cycles élémentaires.
- Le temps de répétition correspond également au temps de repousse de l'aimantation longitudinale.

 Ce chapitre comporte des compléments en ligne.

<sup>2</sup> Il n'en sera plus de même avec des TR beaucoup plus courts, comme en imagerie rapide ( $\ll 300$  ms) où, en plus des phénomènes de saturation de  $\vec{M}_z$  (repousse incomplète à cause du TR court),  $TE/2$  n'est plus négligeable par rapport à TR : c'est pour cela qu'il faudra supprimer l'impulsion de  $180^\circ$  (pour éviter l'aléa de l'inversion de  $\vec{M}_z$ ) et réduire l'angle de bascule (pour éviter la saturation de  $\vec{M}_z$ ). La séquence deviendra ainsi une séquence d'écho de gradient ! (voir chapitre 9)