

DM 7 de Physique à rendre le 29/11/25

Bien que l'ensemble obéisse à une logique interne, la partie II est indépendante de la partie I.

Les pages 7, 8 et 9 sont documentaires pour votre culture générale.

Le sujet complet comportait 14 pages et 71 questions.

Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire ou IRM

L'IRM, qui s'utilise dans des conditions quasi-naturelles et même *in vivo*, est une technique non destructive de visualisation en coupes des tissus organiques mous, en les laissant intacts. Elle utilise un champ magnétique intense permanent \vec{B}_0 combiné avec un faible champ perturbateur oscillant. L'interaction de ces champs avec le moment magnétique d'une particule élémentaire (électron ou proton) engendre un comportement dynamique qui fournit des renseignements sur l'environnement atomique de ces particules.

Dans ce sujet, nous étudierons quelques aspects de cette technique sans caractère exhaustif. Les questions ne font appel qu'à des éléments du programme MPSI/MP de physique. Les candidats peuvent à tout moment utiliser un résultat donné par l'énoncé pour répondre aux questions suivantes.

Données	
Constante de Boltzmann :	$k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
Facteur de Boltzmann associé à un système d'énergie E, en équilibre à la température T :	$\exp(-E/kT)$
Nombre d'Avogadro :	$N_A = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Vitesse de la lumière dans le vide :	$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
Perméabilité du vide:	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
Constante de Planck « réduite » :	$\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
Masse de l'électron:	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Charge de l'électron :	$-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Rayon de l'orbite 1s du modèle de Bohr :	$r_B = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
Moment magnétique du proton :	$\mu_p = 1,4 \cdot 10^{-26} \text{ J.T}^{-1}$
Conductivité du cuivre :	$\sigma = 6,0 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
Développement limité de la fonction exponentielle autour de $x = 0$:	$\exp(x) = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + o(x^2)$

Précession: la précession est le nom donné au changement graduel d'orientation d'un vecteur qui décrit un cône dont l'axe est la direction de précession. Ce cône est parcouru à vitesse constante dans un sens donné.

Partie II - Les champs magnétiques

II.1- Création d'un champ \vec{B}_1 « tournant »

On fait l'hypothèse d'être dans le cadre de l'ARQS : on calcule le champ magnétique créé par des courants variables $i(t)$, comme en magnétostatique. En particulier, on peut utiliser le théorème d'Ampère.

- Q31.** Énoncer les équations de Maxwell en présence de charges et courants dans un milieu ayant les propriétés électromagnétiques du vide. Que deviennent-elles en régime quasi-stationnaire ?
- Q32.** Énoncer le théorème d'Ampère.
- Q33.** Après avoir précisé les symétries du champ magnétique créé par un solénoïde unique infini d'axe Δ , qui contient n spires par unité de longueur parcourues par une intensité I , établir que celui-ci sépare l'espace en deux zones de champ uniforme.
- Q34.** On admet que le champ extérieur est nul : établir l'expression du champ intérieur créé par le solénoïde unique en fonction de μ_0 , n , I et le vecteur unitaire \vec{u}_Δ de Δ , l'orientation du courant étant celle qui correspond au sens direct autour de \vec{u}_Δ .

On considère un ensemble de deux solénoïdes infinis identiques d'axes Ox et Oy perpendiculaires concourants en O comme l'indique la **figure 5**. Les spires sont considérées comme circulaires car réalisées sur un cylindre de rayon R comportant n spires jointives par unité de longueur. Les spires du solénoïde d'axe Oy sont parcourues par une intensité $I_y = I_0 \cos(\Omega t + \alpha)$ et celles du solénoïde d'axe Ox par une intensité $I_x = I_0 \cos(\Omega t)$. L'orientation des courants correspond au sens direct autour des axes respectifs.

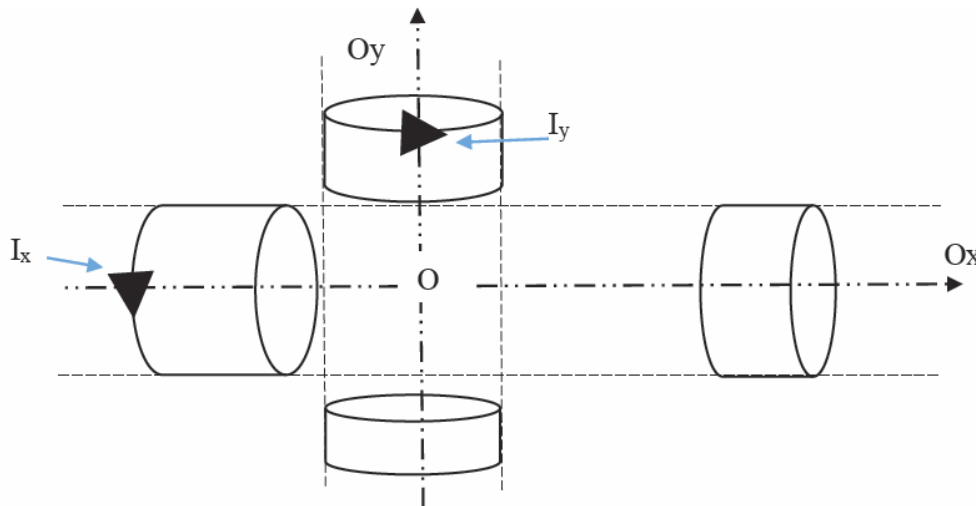


Figure 5 - Configuration des solénoïdes

Les solénoïdes sont infiniment longs, seules quelques spires ont été représentées.

- Q35.** Établir que le champ magnétique dans la zone commune aux deux circuits, pour un déphasage $\alpha = \pi/2$, est un champ « tournant » $\vec{B}_1 = B_1 \vec{u}$, c'est-à-dire un champ de norme constante B_1 porté par une direction de vecteur unitaire \vec{u} qui tourne à vitesse uniforme dans le plan xOy . On précisera sa norme B_1 et sa vitesse de rotation ω .

Il est en réalité difficile de produire des champs tournants autour des patients. On utilise donc un champ oscillant créé par une bobine unique d'axe Ox : $\vec{B}'_1 = 2B_1 \cos(\Omega t) \vec{e}_x$.

- Q36.** Montrer que ce champ est équivalent à la superposition de 2 champs de même amplitude (à préciser) qui tournent en sens opposé à la même vitesse.

II.2- Création d'un champ permanent intense \vec{B}_0

On utilise un solénoïde « épais » (épaisseur $e = R_2 - R_1$) considéré comme la superposition de solénoïdes infinis (en réalité de longueur $L \gg R_2$) de même axe Oz . Il est réalisé par un empilement jointif de spires de section carrée, de côté $a = 1,0$ mm, enroulées sur un cylindre de longueur $L = 4,0$ m, depuis un rayon

$R_1 = 20$ cm jusqu'à un rayon $R_2 = 25$ cm. Les spires sont des fils de cuivre parcourus par un courant continu I_0 uniformément réparti, orienté dans le sens direct autour de Oz. La situation est schématisée sur la **figure 6**. Les sections carrées sont dans les plans (\vec{e}_r, \vec{e}_z) c'est-à-dire en positionnement radial.

I_0 uniformément réparti sur un carré de côté a .

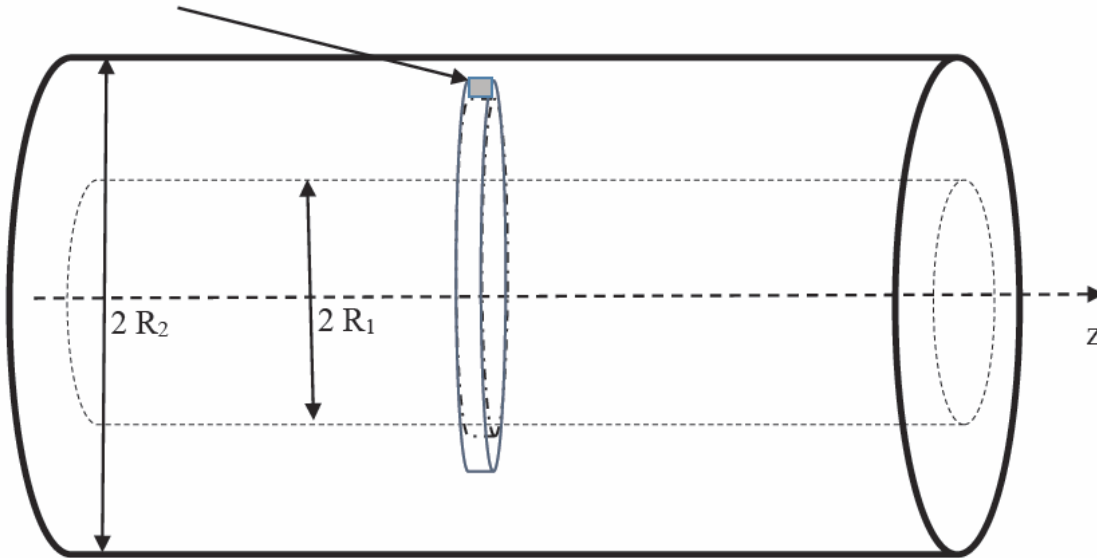


Figure 6 - Solénoïde épais

Q37. Calculer le vecteur densité volumique de courant \vec{j} pour $R_2 > r > R_1$.

Q38. Établir que l'expression du champ sur l'axe vaut $B = \mu_0 I (R_2 - R_1) / a^2$.

Q39. Quelle est l'intensité nécessaire pour engendrer un champ de 1 Tesla ?

Pour obtenir un champ intense, sans problème d'échauffement, on utilise des matériaux supraconducteurs qui perdent totalement leur résistivité en dessous d'une température critique T_c , qui dépend du champ magnétique. Ces matériaux ont des propriétés magnétiques intéressantes: en régime permanent, ils «expulsent» le champ magnétique (effet Meissner). Dans le cadre médical, on utilise des supraconducteurs durs, pour lesquels $T_c < 133$ K pour $B > 0,2$ T.

La loi constitutive de certains supraconducteurs est $\overline{\text{rot} \vec{j}} = -\Lambda \vec{B}$ avec $\Lambda > 0$.

Q40. Quelle est l'unité de cette constante Λ ?

Q41. En supposant qu'on peut appliquer les équations de Maxwell du vide dans le matériau supraconducteur de perméabilité μ_0 et de permittivité ϵ_0 , exprimer l'équation différentielle à laquelle obéit le champ magnétique $\vec{B}(M)$ en régime permanent (on rappelle que $\overline{\text{rot}(\text{rot}(\vec{U}))} = \overline{\text{grad}(\text{div}(\vec{U}))} - \Delta \vec{U}$).

Q42. Faire apparaître dans l'équation différentielle obtenue une grandeur homogène à une longueur notée δ .

On considère qu'un supraconducteur de ce type occupe un demi-espace $x < 0$ et que les sources du champ sont telles que règne dans l'espace extérieur un champ permanent uniforme $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. La modélisation des distributions est volumique et n'introduit donc pas de discontinuités spatiales du champ magnétique.

Q43. En utilisant les invariances du problème, montrer que le champ dans le supraconducteur s'écrit sous la forme $\vec{B}(M) = B_x(x) \vec{e}_x + B_y(x) \vec{e}_y + B_z(x) \vec{e}_z$.

Q44. Expliciter le champ permanent régnant dans le supraconducteur.

Q45. En déduire la densité de courant volumique.

Q46. L'ordre de grandeur du paramètre δ est de $5 \cdot 10^{-8}$ m. Commenter (c'est l'effet Meissner).

Q47. Tracer, sans faire de calculs, l'allure de $B_z(r)$ dans une symétrie cylindrique où le supraconducteur occupe le volume d'un cylindre creux d'épaisseur 100δ , de longueur L très grande devant son rayon R , lui-même très supérieur à 100δ . On suppose que le champ vaut $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ dans l'espace intérieur au cylindre creux.

Partie I - Comportement d'une population de dipôles dans un champ magnétique

1.1- Dipôles magnétiques

- Q1.** Définir le vecteur moment magnétique $\vec{\mu}$ associé à une boucle circulaire de courant de rayon R et d'axe de révolution Oz , parcourue par une intensité I , dans le cadre de l'approximation dipolaire (figure 1). On note \vec{e}_z le vecteur unitaire de l'axe Oz . Le sens de rotation directe autour de l'axe Oz est le sens d'orientation de l'intensité algébrique.
- Q2.** Expliquer pourquoi une sphère chargée, en rotation autour d'un axe passant par son centre, est, elle aussi, caractérisée par un moment magnétique dont on précisera la direction et le sens (on ne demande pas le calcul du moment mais seulement la justification de son existence).

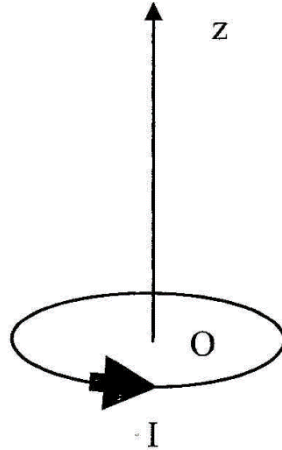


Figure 1 - Boucle de courant

Dans le cas du proton (noyau d'hydrogène) qui tourne sur lui-même (rotation propre de vecteur de rotation $\vec{\Omega}$ autour d'un axe Oz), on peut lui associer un moment magnétique $\vec{\mu}_p$; colinéaire $\vec{\Omega}$ à et de norme μ_p .

- Q3.** Justifier par analyse dimensionnelle l'unité écrite dans le tableau de données.

Soit un dipôle magnétique de moment $\vec{\mu}$ placé en O dans un champ magnétique extérieur uniforme permanent $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. On rappelle les expressions de l'énergie potentielle $E_{\text{pot}} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0$; et du couple (moment de force) d'interaction $\vec{\Gamma}(O) = \vec{\mu} \wedge \vec{B}_0$.

- Q4.** En déduire quelles sont les 2 positions d'équilibre d'un moment dipolaire magnétique, dans un champ magnétique extérieur uniforme \vec{B}_0 , en précisant les valeurs associées de l'énergie potentielle.
- Q5.** Évaluer la différence d'énergie en eV entre les deux configurations d'équilibre d'un noyau d'hydrogène soumis à un champ magnétique permanent de 1 tesla (ordre de grandeur typique en RMN).
- Q7.** L'ordre de grandeur de l'énergie de liaison covalente de OH dans l'eau est de 5 eV et celui d'une énergie d'ionisation est de 13,6 eV. Justifier l'utilisation de la RMN en imagerie médicale, en considérant que la méthode fait passer le proton d'un état d'équilibre à l'autre.

I.2- Rapports gyromagnétiques

Une boucle de courant est créée par un électron dans son mouvement orbital autour du noyau. On considère l'orbite circulaire, de rayon r_B et de centre O , contenue dans le plan xOy . Le vecteur vitesse de l'électron s'écrit $\vec{v} = v\vec{t}$ avec \vec{t} le vecteur unitaire tangent au cercle orienté dans le sens direct autour de O .

Q13. Exprimer le moment magnétique $\vec{\mu}_e = \mu_e \vec{e}_z$; associé à cette boucle de courant en fonction du rayon r_B , de la vitesse v , du vecteur \vec{e}_z ; et de constantes fondamentales.

Q14. Exprimer le moment cinétique de l'électron, par rapport au point O , $\vec{\sigma}_o = \sigma_e \vec{e}_z$ en fonction des mêmes paramètres.

Q15. Exprimer le rapport gyromagnétique correspondant $\gamma_e = \frac{\mu_e}{\sigma_e}$ en fonction des constantes fondamentales et calculer la valeur numérique du rapport gyromagnétique de l'électron.

Le corps humain est essentiellement constitué d'eau: l'hydrogène représente 10 % de la masse corporelle, c'est-à-dire 86 % de la composition chimique de notre organisme. On étudiera donc, par la suite, le comportement de ces protons soumis à un champ magnétique extérieur $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$.

On peut, comme dans l'exemple de l'électron, associer au proton un rapport gyromagnétique égal au rapport de son moment magnétique et de son moment cinétique. Pour l'hydrogène H isolé, le rapport gyromagnétique, qui vaut $\gamma_p = 2,67 \cdot 10^8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$, est associé à un moment cinétique quantifié qui ne peut prendre que les valeurs $\pm \hbar/2$.

Q16. Les valeurs ci-dessus sont-elles conformes à la valeur du moment magnétique μ_p ?

Q17. Exprimer en fonction de B_0 et γ_p la fréquence du photon qui permet le passage du niveau de plus basse énergie au niveau de plus haute énergie pour l'hydrogène.

Q18. Quelles sont la fréquence et la longueur d'onde λ correspondantes pour un champ permanent de 1 tesla ?

I.3- Précession d'un dipôle

On écarte un dipôle d'un angle α par rapport à la position d'équilibre stable dans un champ magnétique $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$.

Q19. Écrire l'équation différentielle caractéristique de l'évolution du vecteur moment dipolaire sous la forme $\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\omega}_0 \wedge \vec{\mu}$ en précisant ce que vaut $\vec{\omega}_0$.

Q20. Montrer que sa norme se conserve et que la projection du moment sur l'axe du champ magnétique se conserve aussi.

Q21. Décrire le mouvement de la projection du vecteur dans un plan orthogonal au champ magnétique, en précisant ce que représente $\|\vec{\omega}_0\| = \omega_0$.

Q22. Décrire le mouvement complet du dipôle en vous appuyant sur un dessin. Préciser le sens du mouvement de précession.

Lorsque les protons étudiés se trouvent dans une molécule (ou un cristal), les liaisons chimiques entre atomes modifient la fréquence de résonance précédente par modification du rapport gyromagnétique. Mais ces effets sont très petits (ils sont généralement mesurés en parties par million ou ppm). Il faut donc des instruments très sensibles pour distinguer entre protons libres et protons engagés dans une liaison chimique.

1.4- Précession de l'aimantation

À l'état naturel, les vecteurs moments dipolaires des noyaux d'hydrogène sont répartis dans toutes les directions et il n'y a pas d'effet magnétique global pour un échantillon. Par contre, en présence d'un champ magnétique extérieur, l'hydrogène aura des propriétés magnétiques caractérisées par un vecteur moment magnétique global volumique appelé aimantation $\vec{M} = \sum_i \vec{\mu}_i$, la somme étant réalisée sur tous les noyaux d'hydrogène composant l'unité de volume. En IRM, c'est ce vecteur aimantation \vec{M} , obtenu en présence d'un champ magnétique extérieur, qui permet d'obtenir des images des tissus du corps humain.

On considère l'état d'équilibre thermique d'un échantillon contenant des hydrogènes en présence d'un seul champ fort permanent $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$. On suppose, pour simplifier, que le système des dipôles magnétiques associés aux protons peut être décrit comme un système à 2 états ne pouvant occuper que les positions parallèles (vecteur moment dipolaire et champ magnétique de même sens) ou antiparallèles (vecteur moment dipolaire et champ magnétique de sens contraire), décrites à la question Q4.

Q23. Comment est orienté le vecteur aimantation de norme M_0 ?

Q24. Exprimer la valeur de M_0 en fonction du nombre N de noyaux d'hydrogène par unité de volume, de η et de μ_p avec $\eta = \frac{N_- - N_+}{N_- + N_+} = \frac{N_- - N_+}{N}$ où N_+ est la densité volumique de dipôles de plus grande énergie (position antiparallèle) et N_- est la densité volumique de dipôles de plus petite énergie (position parallèle). (Montrer que $M_0 = N\eta\mu_p$)

En mécanique quantique, le moment cinétique du noyau d'hydrogène est quantifié en projection sur l'axe Oz par $\vec{\sigma}_z = \pm \frac{\hbar}{2\pi} S = \pm \hbar S$, avec $S = 1/2$.

Q25. Exprimer M_0 à partir du nombre N de noyaux d'hydrogène par unité de volume, du rapport gyromagnétique γ_p du proton, du champ magnétique B_0 , de la température T et des constantes de Planck et de Boltzmann. On donne (Q11 non traitée) $\eta \approx \frac{\mu_p B_0}{kT}$.

Q26. Évaluer la concentration volumique des noyaux d'hydrogène N (exprimée en m^{-3}) en assimilant le corps humain à de l'eau (masse molaire de l'eau H_2O : $m = 18 \text{ g.mol}^{-1}$ et masse volumique de l'eau $\rho = 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$).

Q27. Comparer le champ créé par ce dipôle global à une distance de 1 m sur son axe au champ permanent $B_0 = 1 \text{ T}$. On rappelle qu'un moment magnétique $\vec{M} = M\vec{e}_z$, placé en 0 point origine des coordonnées, crée un champ égal à $\vec{B}(r, \theta, \varphi) = \frac{\mu_0 M (2 \cos \theta \vec{e}_r + \sin \theta \vec{e}_\theta)}{4\pi r^3}$ en un point P de coordonnées sphériques (r, θ, φ) . Calculer B/B_0 pour $T = 310 \text{ K}$.

Pour la RMN, on dévie l'aimantation de sa direction d'équilibre afin de lui donner une composante transversale. Le champ B_0 , très intense par rapport au champ créé par l'aimantation, ne permet pas l'étude sur Oz.

Il est particulièrement compliqué de décrire la RMN à une échelle microscopique individuelle. Une description macroscopique et semi-classique suffit pour en comprendre les concepts. On va donc étudier l'évolution dans le temps du vecteur aimantation \vec{M} qui caractérise l'ensemble des moments dipolaires des protons présents dans l'échantillon.

Si on provoque un changement de l'orientation des moments magnétiques, l'aimantation va tendre à retourner à sa valeur à l'équilibre thermique avec un temps de relaxation ou temps caractéristique.

Les notions introduites dans les deux documents suivants peuvent être utilisées par les candidats dans toute la suite du sujet.

Document 1

a) Temps de relaxation longitudinale T_1

Quand on applique un champ magnétique B_0 sur la direction Oz , l'aimantation n'atteint pas sa valeur d'équilibre instantanément, elle augmente alors de la valeur initiale $M_z = 0$ à la valeur d'équilibre $M_z = M_0$ en un certain temps. On observe que M_z croît exponentiellement avec le temps vers M_0 avec un temps caractéristique T_1 , appelé temps de relaxation longitudinale, comme l'indique la figure 2 :

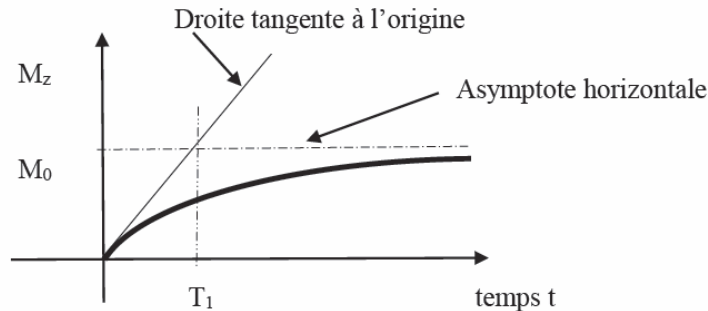


Figure 2 - Relaxation longitudinale

On va donc supposer que, dans toute situation hors d'équilibre, l'aimantation longitudinale M_z tend vers l'équilibre à une vitesse proportionnelle à l'écart par rapport à la valeur d'équilibre M_0 :

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z - M_0}{T_1}$$

b) Temps de relaxation transversale T_2

Supposons qu'à $t = 0$, l'échantillon présente une aimantation transversale, M_{\perp} dans le plan xOy orthogonal à Oz (on verra plus tard comment créer cette situation).

Alors M_{\perp} doit tendre vers 0, avec un temps caractéristique T_2 , car à l'équilibre thermique, les composantes transversales de l'aimantation sont nulles.

La situation est représentée sur la **figure 3** ci-dessous :

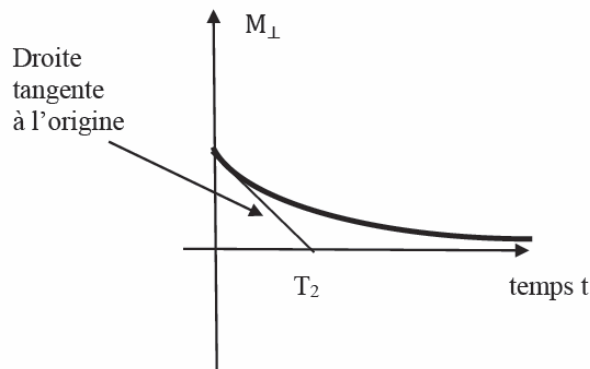


Figure 3 - Relaxation transversale

T_2 est appelé temps de relaxation transversale et est toujours inférieur à T_1 .

À $t = 0$, l'aimantation transversale se met à précesser autour de l'axe Oz à la pulsation $\omega_0 = \gamma_p B_0$ dans le sens rétrograde. Mais les inhomogénéités du champ magnétique d'une part et les interactions moléculaires d'autre part, font que chaque noyau ressent un champ magnétique différent (γ_p différent), ce qui entraîne une différence dans leur fréquence de précession. Si ces spins sont initialement en phase, leurs différences de phase deviennent aléatoires au cours du temps et les valeurs de M_x et M_y s'annulent. Le temps nécessaire au déphasage est de l'ordre de $3T_2$.

Remarque: les interactions moléculaires, responsables de valeurs de γ_p légèrement différentes d'un noyau à l'autre, entraînent l'élargissement de la raie d'absorption, centrée sur ω_0 , dans l'expérience RMN d'absorption réalisée en continu. Cet élargissement (**figure 4**) sera de l'ordre de $1/T_2$.

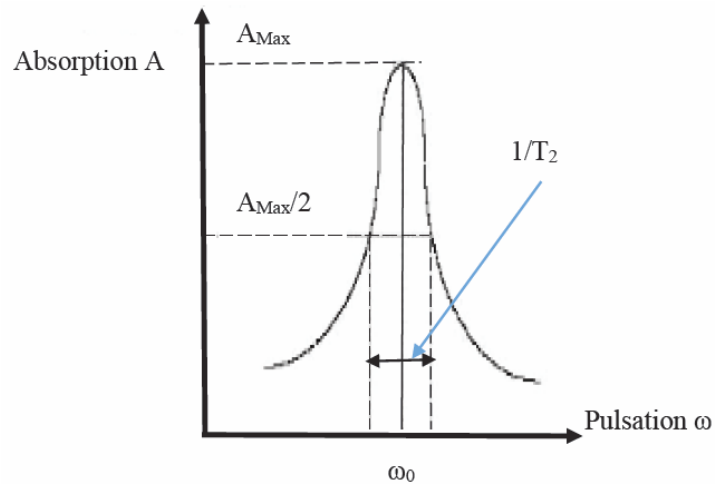


Figure 4 - Absorption de résonance des protons dans l'eau : élargissement de la raie autour de la pulsation ω_0 .

c) Équations de Bloch

Ces équations différentielles couplées sont appelées les équations de Bloch. Elles permettent de décrire le comportement de l'aimantation dans l'espace et en fonction du temps en présence d'un champ magnétique permanent $\vec{B} = B_0 \vec{e}_z$ $B = B_0 e_z$. Elles s'écrivent :

$$\begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} &= \gamma(\vec{M} \wedge \vec{B}_0)_x - \frac{M_x}{T_2} \\ \frac{dM_y}{dt} &= \gamma(\vec{M} \wedge \vec{B}_0)_y - \frac{M_y}{T_2} \\ \frac{dM_z}{dt} &= \gamma(\vec{M} \wedge \vec{B}_0)_z + \frac{M_0 - M_z}{T_1} \end{aligned}$$

d) Résonance Magnétique Nucléaire Pulsée

L'expérience de RMN d'absorption en continu permet de mesurer des fréquences de résonance et, à partir de là de déduire des valeurs de rapport gyromagnétique γ_p du proton en utilisant l'expression $\omega_0 = \gamma_p B_0$. La valeur de γ_p dépend de l'environnement du proton, mais l'effet de l'environnement sur la fréquence de résonance est très petit et il faut des appareils très sensibles. Beaucoup d'informations intéressantes et complémentaires sur l'environnement sont déductibles des temps T_1 et T_2 . De plus, l'effet de l'environnement est beaucoup plus grand sur T_2 que sur la fréquence de résonance: on s'attend à plus de sensibilité sur la mesure de T_2 que sur la mesure de ω_0 . On a donc intérêt à mesurer ces temps de relaxation. Mais la détermination des temps T_1 et T_2 à l'aide de l'expérience de RMN d'absorption en continu n'est pas très précise: T_2 est obtenu à partir de l'élargissement de la raie d'absorption et T_1 n'est obtenu qu'avec une mesure indirecte, source d'imprécisions.

Pour mesurer T_1 et T_2 , on préférera donc la méthode qui consiste à mettre le système de moments dipolaires hors d'équilibre et à déterminer les temps de relaxations longitudinale et transversale: c'est la RMN pulsée. Pour créer un système de moments dipolaires hors d'équilibre, on utilise des champs magnétiques perturbateurs pulsés oscillants dans le domaine des radiofréquences.

Source: partie d'un énoncé de TP sur un appareil de RMN dans un tutorat expérimental.

Document 2

Le temps de relaxation T_1 dépend de l'intensité du champ magnétique principal B_0 . Le temps T_2 en est indépendant. Ils dépendent de la nature des tissus comme l'indique le tableau de valeurs ci-dessous.

Champ magnétique B_0	1 Tesla		1,5 Tesla		
Tissus	T_1	en ms	T_1	en ms	T_2 en ms
Liquide céphalorachidien		2500		3000	200
Graisse		180		200	90
Substance blanche		500		750	90
Substance grise		350		500	75

Les tissus cancéreux ont une décroissance T_2 plus lente que celle des tissus sains.

Source: Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie, IP Dillenseger, E Moerschel, Masson, 2009.

Q29. Interpréter les équations de Bloch en précisant à quel couple supplémentaire $\overline{C_r(\vec{0})}$ est soumis le vecteur aimantation pour traduire le phénomène de relaxation.

Q30. Quel est le domaine des radiofréquences ?
Est-ce conforme au résultat de la question **Q18** ?