

RMN macroscopique...

par **Julien BARTHES** et **Pascal LANGLOIS**

Lycée Gustave Eiffel - 21000 Dijon

barthes_j@yahoo.fr

langloispas@hotmail.com

RÉSUMÉ

En récupérant des aimants issus de jouets commerciaux et en utilisant le matériel disponible au lycée, nous proposons de réaliser une expérience de cours illustrant le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Par analogie entre un spin et un aimant, le dispositif utilisé permet d'éclairer aussi bien le phénomène de blindage que le couplage entre spins.

INTRODUCTION

La RMN (Résonance magnétique nucléaire) est désormais présente dans les programmes de terminales scientifiques. S'il est aisé de se procurer des spectres RMN sur Internet, un dispositif réel est assez onéreux. Nous proposons dans cet article une introduction un peu naïve à la RMN en utilisant des concepts classiques puis nous exposons une expérience permettant l'illustration du principe de la RMN à l'aide d'aimants commerciaux et de matériels (généralement...) présents dans un lycée. Cette réalisation a été effectuée avec l'aide de trois élèves de terminales qui ont participé aux XIX^{es} Olympiades de physique France et gagné un premier prix [6].

1. INTRODUCTION À LA RMN

1.1. Représentation classique du spin

Le moment magnétique du proton peut être appréhendé de façon classique en considérant que le proton est une sphère chargée en rotation. Chaque portion de la sphère en rotation peut être assimilée à une « spire » et permet d'expliquer une aimantation propre du proton [1]. Tout atome possédant un nombre impair de nucléons peut alors être étudié par RMN. Nous avons la chance que le noyau ^1H , très présent naturellement soit un des atomes les plus « sensibles » à un champ magnétique (dix mille fois plus que le ^{13}C).

Cette description classique ne permet pas de comprendre les effets quantiques où la rotation du proton serait « bloquée » dans des directions particulières.

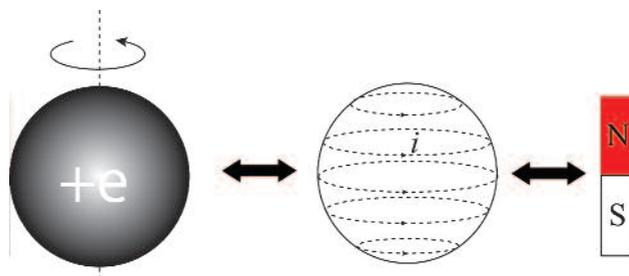


Figure 1 : Représentation classique du spin du proton.

1.2. Effet d'un champ magnétique statique

Comme une boussole s'oriente spontanément dans le champ magnétique terrestre, le spin du proton s'oriente dans le champ magnétique qui lui est imposé. On obtient alors un oscillateur : la boussole, comme le proton, va présenter des oscillations si elle est écartée de sa position d'équilibre. La fréquence propre de l'oscillateur est alors fonction du champ magnétique exercé sur celui-ci. La RMN s'occupe donc de repérer cette fréquence propre pour en déduire l'environnement de notre oscillateur. La mesure de cette fréquence s'effectue aujourd'hui de plus en plus de façon impulsionnelle [2-3] : un champ magnétique perpendiculaire au champ magnétique statique est imposé et oriente différemment les spins. Sa coupure brutale entraîne des oscillations des spins jusqu'à leur réorientation dans le champ magnétique statique.

1.3. Blindage

Le champ ressenti par l'oscillateur est légèrement différent du champ magnétique statique imposé. En effet, les atomes voisins, les « mouvements » des électrons dans les liaisons modifient ce champ et par la même occasion la fréquence de résonance [3].

Prenons l'exemple du méthanol CH_3OH , cette molécule possède trois protons équivalents portés par un atome de carbone sur CH_3 - et un hydrogène porté sur l'oxygène. L'environnement de ces deux sortes d'hydrogène étant différent, le champ magnétique ressenti par ces atomes est différent et on observe deux pics distincts sur le spectre (cf. figure 2, page ci-contre) [3].

Le pic le plus à gauche correspond à des traces de CHCl_3 dans le solvant CDCl_3 . Les chiffres rouges en bas de l'axe correspondent à l'aire de la courbe qui correspond au rapport du nombre de protons pour chaque groupement.

1.4. Couplage

Deux atomes d'hydrogène voisins peuvent être couplés c'est-à-dire que l'oscillation

5 microL de MeOH dans 600 microL de CDCl₃
T = 300 K

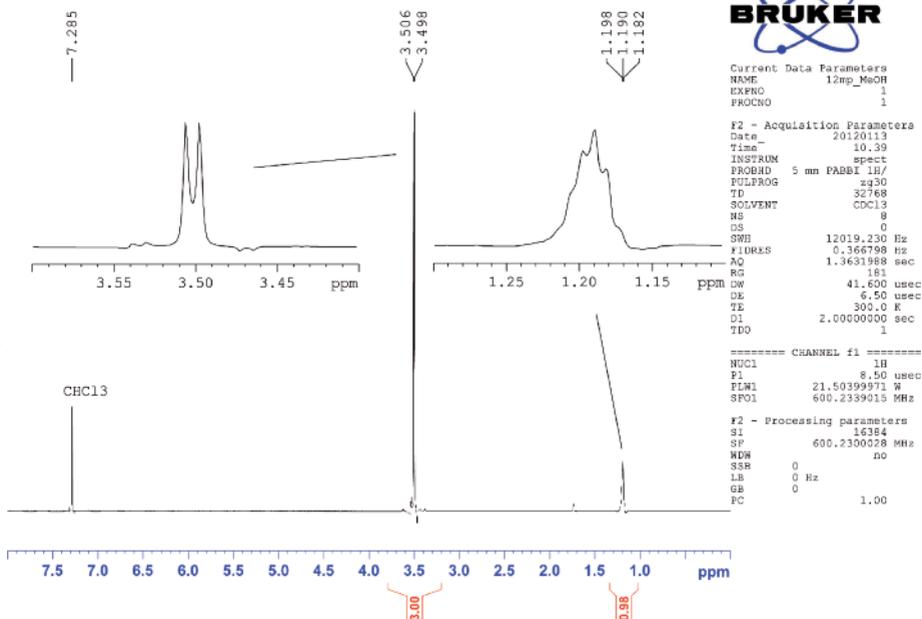


Figure 2 : Spectre du méthanol.

de l'un va agir sur l'oscillation de l'autre en modifiant le champ ressenti. On parle alors de couplage spin-spin [3]. La fréquence d'oscillation du spin va alors être dédoublée puisque deux modes d'oscillations de notre système vont apparaître : l'un où le champ magnétique créée par l'autre atome d'hydrogène s'ajoutera au champ magnétique principal, les deux spins oscillent « en phase ». L'autre mode est caractérisé par le fait que le champ magnétique de l'autre atome sera retranché au champ principal, les deux spins oscillent « en opposition de phase ».

Dans le spectre du méthanol ci-dessus, on voit apparaître en encadré à gauche, un double pic pour le groupement CH₃ - dû au fait que le champ magnétique créée par l'atome d'hydrogène du groupe -OH s'ajoute ou se retranche au champ magnétique statique imposé.

2. PRÉSENTATION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

2.1. Matériel utilisé

Le « spin » de l'atome d'hydrogène est modélisé ici par deux aimants commerciaux (disponible dans tout magasin de jouets) qui aimantent une bille d'acier et se lient à elle. Cette dernière est libre de tourner sur un troisième aimant vertical qui n'a pour but que

de maintenir la bille. L'avantage d'une telle disposition est que les frottements sphère / aimant porteur sont très faibles et on obtient ainsi un oscillateur de facteur de qualité élevé.

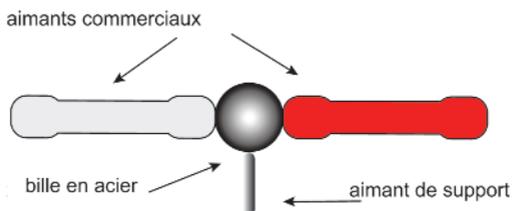


Figure 3 : Modélisation d'un spin.

Afin de produire un champ magnétique suffisamment uniforme sur la taille de notre « atome », nous avons utilisé des bobines de Helmholtz récupérées sur une expérience de déviation de faisceau d'électrons. Une autre possibilité consiste à bobiner avec patience des roues de vélo d'enfant.

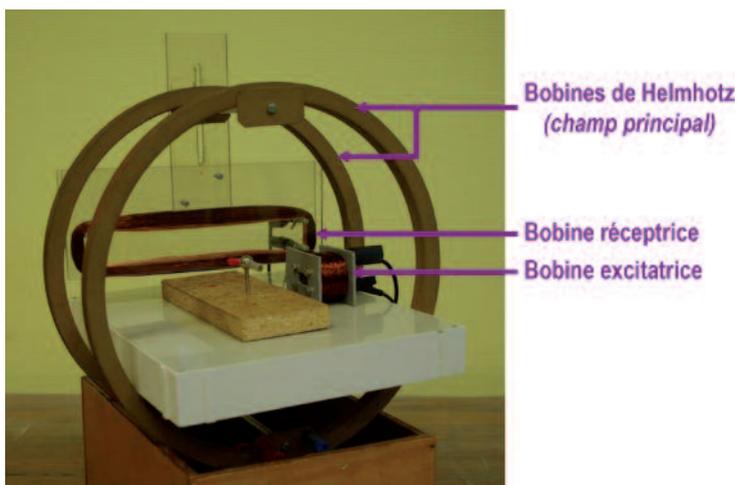


Figure 4 : Dispositif expérimental.

Pour une étude fréquentielle et une acquisition, nous avons disposé perpendiculairement, une bobine excitatrice directement reliée à un générateur basse fréquence (GBF) et une bobine réceptrice qui par induction recueille les mouvements de notre « spin ».

2.2. Mesure de la fréquence de résonance

2.2.1. Justification de la présence d'une résonance

Nous avons opté pour une réponse fréquentielle de notre « spin » : grâce à un champ

oscillant superposé au champ statique par la bobine excitatrice. Ainsi le système s'oriente dans le champ résultant et il est possible d'étudier la résonance de cet oscillateur.

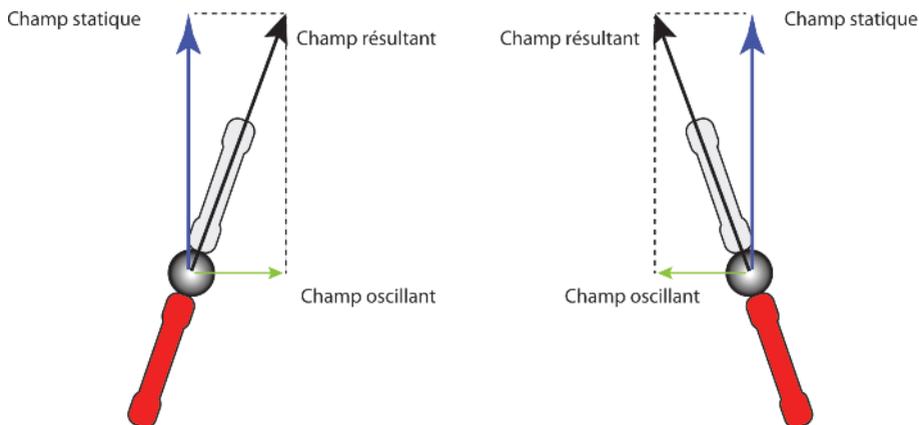


Figure 5 : Mise en oscillation d'un aimant.

Pour une simple démonstration en classe, la projection du mouvement du « spin » par une webcam permet de montrer le phénomène de résonance en faisant varier la fréquence du champ magnétique excitateur.

2.2.2. Chaîne d'acquisition

Pour mesurer l'amplitude de l'oscillation forcée en fonction de la fréquence, nous avons utilisé une chaîne d'acquisition constituée d'un amplificateur et d'un détecteur de crête.

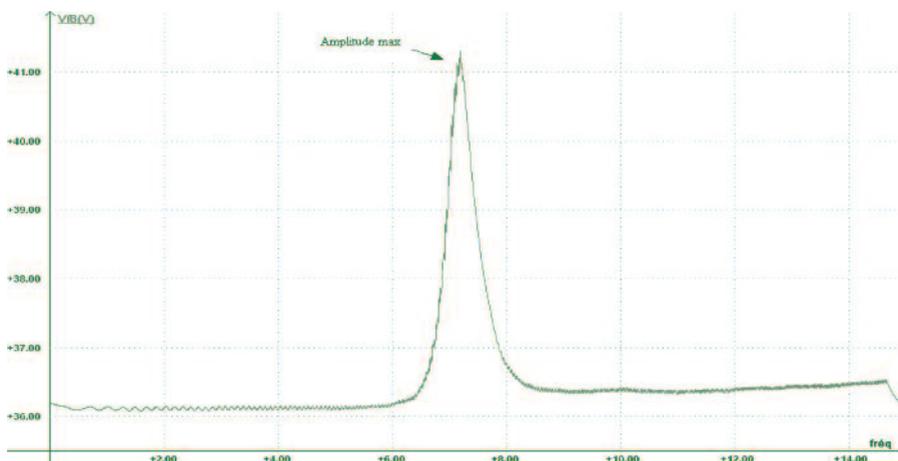


Figure 6 : Acquisition de l'amplitude d'oscillation.

2.3. Exploitation

2.3.1. Déplacement de la fréquence de résonance

Grâce à ce dispositif, nous pouvons mesurer la fréquence de résonance en fonction du champ magnétique imposé. On montre ainsi que le champ magnétique statique imposé au « spin » influence sur la fréquence.

Il est également possible de montrer visuellement, la variation de fréquence de l'oscillateur en approchant un aimant supplémentaire. Les oscillations augmentent en fréquence avec l'augmentation du champ magnétique.

2.3.2. Système couplé

L'illustration de la présence de pics multiples dans un spectre RMN due au couplage entre spins peut être effectuée grâce à deux paires d'aimants mis à proximité l'un de l'autre. En excitant un des « spins », on mesure la fréquence de résonance d'un tel système et on voit apparaître deux pics de résonance correspondant à deux modes de vibrations : en phase et en opposition de phase. En opposition de phase, le champ magnétique apparent est plus intense et en phase, le champ ressenti est plus faible.

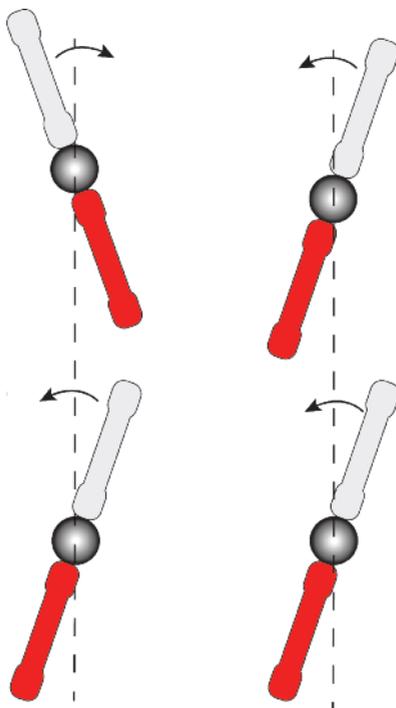


Figure 7 : Modes d'oscillations.

Par ailleurs, on peut illustrer le fait que les spins voisins se coupleront davantage que les spins plus éloignés. En effet, sur la figure 8, le décalage en fréquence est plus important (courbe rouge) pour des « spins » plus proches que lorsqu'ils sont plus éloignés (courbe bleue).

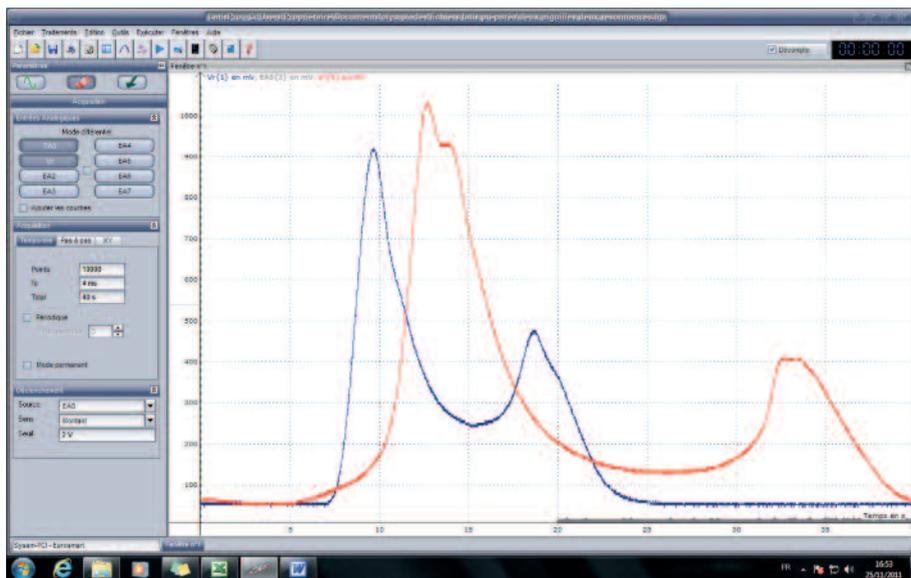


Figure 8 : Fréquences des modes couplés.

3. QUELQUES LIMITES DE L'ANALOGIE PRÉSENTÉE

Les explications quelque peu naïves fournies dans cet article avec de nombreux guillemets ne reflètent évidemment pas la véritable nature du phénomène de RMN. Tout d'abord, la conservation du moment cinétique et de sa composante longitudinale impose un mouvement de précession du proton autour de l'axe du champ [4] tandis que l'aimant s'oriente le long du champ magnétique imposé.

Par ailleurs, la nature quantique du spin impose à la direction de suivre uniquement des orientations particulières de son « axe de rotation ». Cet axe « saute » donc d'une orientation à l'autre sans passer par des valeurs intermédiaires [5]. Le spin est une notion purement quantique, les ersatz classiques utilisés ici ne sont que des images permettant d'appréhender un peu plus facilement cette nouvelle notion. En effet, pour un électron, l'approche classique conduit à des vitesses de rotation supraluminique pour les portions équatoriales de cet électron [1].

Enfin, la principale difficulté que l'on rencontre pour réaliser un appareil RMN est l'agitation thermique [3]. Ce phénomène « casse » l'orientation spontanée des spins dans

un champ magnétique statique ainsi que le couplage entre les spins. À température ambiante, seule une infime partie des protons d'un échantillon résonnent. Pour obtenir un signal mesurable, il faut donc utiliser des électroaimants puissants (quelques teslas) pour augmenter la proportion des spins utilisés. L'amplitude du signal RMN est alors plus importante, en contrepartie, l'électronique de détection doit pouvoir mesurer des fréquences élevées (plusieurs centaines de mégahertz).

CONCLUSION

Pour une démonstration de cours, sans acquisition, la visualisation de la fréquence de résonance est rapide à mettre en œuvre. La dépendance de la fréquence de résonance en fonction du champ magnétique permet aux élèves de se rendre un peu mieux compte de la signification d'un déplacement chimique. Pour une démonstration plus poussée avec acquisition, un peu d'huile de coude est nécessaire. Mais l'affichage des courbes de résonance accompagnée de la projection par visioprojecteur du mouvement de l'aimant rend l'expérience encore plus impressionnante.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] GARING C. *Magnétisme : statique, induction et milieux*. Paris : Ellipses, 1999.
- [2] DILLENSEGER J.-P., MOERSCHEL E., DIETERMANN J.-L. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie : quand la théorie éclaire la pratique*. Paris : Masson, 2009.
- [3] ROUESSAC F. et A. *Analyse chimique*, 6^e édition. Paris : Dunod, 2004.
- [4] CHAQUIN P. « Le principe de la résonance magnétique nucléaire illustré par une expérience de cours ». *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, février 2012, vol. 106, n° 941, p. 139-146.
- [5] PÉREZ J.-P. *Mécanique quantique, fondements et applications*. Paris : Masson, 2005.
- [6] <http://www.odpf.org/anterieures/xix/les-memoires.php>



Julien BARTHES
Enseignant en classe préparatoire
Lycée Gustave Eiffel
Dijon (Côte d'Or)



Pascal LANGLOIS
Technicien
Lycée Gustave Eiffel
Dijon (Côte d'Or)