

**LP n° 04 Titre :** Précession dans les domaines macroscopique et microscopique

**Présentée par :** Léa CHIBANI

**Rapport écrit par :** Gloria ROBERT

**Correcteur :** Robin ZEGERS

**Date :** 24/09/2018

**Bibliographie de la leçon :**

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Mécanique Fondements et application	José-Philippe Perez	Dunod	
Physique	Hecht	De Boek	
Mécanique 2	BF Renault	Dunod	

**Plan détaillé**

Niveau choisi pour la leçon : L3

Pré-requis : Mécanique du solide

Notions de mécanique quantique

Plan :

Introduction : Observable dans le domaine macroscopique (toupie, gyroscope) mais peut-on aussi le rencontrer à plus petite échelle, dans le domaine microscopique.

## I. Précession de la toupie

Référentiel fixe supposé galiléen

### a. Angle d'Euler

*Définition des angles avec schéma*

*Angle solide de rotation (vitesse : de précession, de nutation, de rotation propre)*

### b. Approximation gyroscopique

*Enoncé de l'approximation gyroscopique : « Tout mouvement de révolution d'un solide autour d'un point fixe satisfait à l'approximation gyroscopique lorsque sa vitesse de rotation propre est très grande par rapport aux deux autres vitesses. »*

*Deux conséquences de l'approximation :*

*i. Réécriture de la vitesse de l'angle solide de rotation*

*j. Ecriture du moment cinétique d'un solide*

### c. Mouvement de précession

*Application pour résoudre le mouvement de précession de la toupie*

*Hypothèses : l'approximation gyroscopique et la liaison parfaite au point de contact.*

*Application du TMC*

*Conséquences :*

*i. Invariance de la norme du moment cinétique*

*j. La projection du moment cinétique sur la direction de la pesanteur est constante*

*k. Vitesse de précession de la toupie (en fonction de la vitesse de rotation propre)*

*Ordres de grandeur*

*Limites : forces de frottement qui font tomber la toupie*

Transition : existe-t-il un tel mouvement dans le domaine microscopique ?

## II. Précession dans le domaine microscopique

### a. Le moment magnétique

*Origine du moment magnétique dans un atome (H)*

*Ecriture de ce moment en fonction de la vitesse de l'électron*

*Expression du moment cinétique dû au mouvement de l'électron*

*Introduction du facteur gyromagnétique (de l'électron)*

### b. Interaction champ magnétique

*Mouvement de précession quand on rajoute un champ magnétique au voisinage de l'atome*

*Application du TMC*

*Similarité avec la formule trouvée dans la partie macroscopique : mêmes conséquences (cf I.c.)*

*Vitesse de précession = pulsation de Larmor*

*Ordre de grandeur et comparaison avec le cas macroscopique*

*Temps de relaxation*

### c. Application : la RMN

*But : déterminer la valeur des facteurs gyromagnétiques des atomes d'une molécule et en déduire leur environnement pour ensuite, déterminer la structure de la molécule.*

*Explications du principe de la RMN.*

*Application du TMC (dans le repère fixe et le repère tournant associé au champ magnétique tournant)*

*Nouvelle pulsation et condition de résonnance.*

Conclusion : Etude du mouvement de précession dans le domaine macroscopique, mise en évidence de ce phénomène aussi à l'échelle microscopique.

Questions posées par l'enseignant

- Pouvez-vous préciser ce que vous vouliez dire par « le » moment d'inertie du solide ? Le moment d'inertie est-il unique en général ?
- En quel point avez-vous calculé le moment cinétique ? Pourquoi à ce point-là et pas à n'importe quel autre ? Aurais-je pu l'appliquer à un autre point non fixe ? Comment fait-on si le point n'est pas fixe ?
- Le TMC est-il toujours vrai ?
- L'approximation gyroscopique est-elle vérifiée pour la toupie ?
- Est-ce uniquement la comparaison des vitesses de rotation qui compte ? Comment puis-je obtenir un bon gyroscope : est-ce qu'une longue tige que je fais tourner très vite autour de son axe est un bon gyroscope ? Avez-vous une idée de la forme de son tenseur d'inertie (ordre de grandeur des coefficients en fonction des paramètres de la tige) ?
- Que se passe-t-il dans le plan orthogonal à Oz ? (Cas de la toupie)
- D'où vient la valeur de la vitesse de précession de la toupie (il manque des données...) ?
- Où est l'approximation gyroscopique dans le cas de l'atome ?
- Qu'est-ce qu'apporte l'approximation gyroscopique dans le cas macroscopique ?
- Pouvez-vous m'en dire plus sur le temps de relaxation ? Qu'est-ce qui est responsable de l'alignement du moment magnétique avec le champ magnétique ?
- Ça veut dire quoi RMN ?
- Pourquoi dites-vous qu'on ne peut pas mesurer le facteur gyroscopique quand le moment magnétique est parallèle au champ magnétique ?
- Que fait-on dans une expérience de RMN en pratique ? Que mesure-t-on en pratique ?
- Quel est le protocole expérimental ? Comment mesure-t-on le moment magnétique ?
- Est-ce que l'équation  $\mu = \gamma_p S$  est correcte ?
- Origine du facteur « 2 » qu'on doit rajouter pour l'électron ?
- Le facteur est-il le même pour toutes les particules ?
- Que vous inspire le fait que le rapport gyromagnétique du neutron, une particule neutre, ne soit pas nul ?
- Pourquoi prend-on un champ magnétique très intense ? (10-20 Tesla)
- A quoi sert la RMN ?
- Applications de l'approximation gyroscopique à l'échelle macroscopique ?
- Comment est utilisé l'approximation gyroscopique dans les satellites, les avions... ?
- Les gyroscopes qu'on utilise pour la navigation ressemblent-ils à une toupie qui tournent ?
- Où se trouve la précession dans le traitement quantique ? (si le traitement quantique avait été fait)

Commentaires donnés par l'enseignant

### Sur la leçon :

- Manipulation de la toupie : attention à la vitesse à laquelle elle tourne (donner les ordres de grandeur pour justifier l'application de l'approximation gyroscopique).
- Les angles d'Euler : projeter un transparent
- Le vecteur vitesse angulaire de rotation du solide n'est pas un angle solide!
- Approximation gyroscopique : on compare plutôt la composante du moment cinétique sur l'axe de rotation propre à ses autres composantes  $|L_{Oz}| \gg |L_{Ox}| ; |L_{Oy}|$ .
- Le TMC n'est pas toujours applicable (que si calcul en un point fixe ou se déplaçant à la même vitesse que le barycentre du solide). On utilise alors le Théorème du Moment Dynamique.
- Le facteur de Landé de 2 pour l'électron a été compris théoriquement pour la première fois à partir de la description des électrons par l'équation de Dirac. (Attention il ne s'agit pas pour autant d'un effet relativiste). En réalité ce facteur vaut environ 2,002. L'écart à la valeur prédite par l'équation de Dirac fut expliquée pour la première fois comme l'effet de fluctuations quantiques dans le cadre de l'électrodynamique quantique. Sa valeur fut obtenue par Schwinger en 1948.
- Le moment magnétique du neutron est dû à ceux (orbitaux et intrinsèques) des quarks chargés le constituant. On explique de la même manière l'écart entre le moment magnétique du proton et la valeur qu'il aurait (le magnéton nucléaire) si c'était une particule élémentaire décrite par l'équation de Dirac.
- Attention à ne pas confondre moment cinétique orbitale et intrinsèque, moment magnétique de l'électron, du proton, de l'atome. En général en RMN, vous vous intéressez au moment magnétique des protons.
- Rajouter dans les prérequis : magnétostatique.
- L'approximation gyroscopique permet de rendre le moment cinétique solide du solide.
- Comparer la pulsation de Larmor (sans d'ailleurs préciser pour quelle valeur du champ magnétique) et la vitesse de précession de la toupie (sans non plus préciser sa vitesse de rotation propre) n'a pas beaucoup de sens.
- Attention, un vecteur n'est pas égal à un scalaire.
- A l'heure actuelle, les gyroscopes employés pour la navigation ne sont plus des gyroscopes mécaniques mais des gyroscopes interférentiel (LASER ou à fibre optique) reposant sur l'effet Sagnac (décalage des franges d'interférences en fonction de la vitesse de rotation) Les gyrolasers atteignent typiquement des sensibilités de l'ordre de  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  degrés par heure. [Ils sont particulièrement utiles dans les sous-marins en plongée qui ne captent alors pas les signaux GPS]
- Dans les téléphones → gyroscopes MEMS. Par exemple cristal de quartz piézo électrique en forme de diapason qu'on fait vibrer dans le plan du diapason. Quand on fait tourner le téléphone la force de Coriolis entraîne un mouvement hors plan initial de vibration qu'on détecte grâce à la tension piézoélectrique engendrée.
- RMN
  - On place l'échantillon dans un champ magnétique uniforme (à typiquement  $10^{-10}$ – $10^{-6}$  en valeur relative afin de ne pas affecter la résolution spectrale) typiquement de l'ordre de 10 à 20 T (champ intense pour augmenter la sensibilité) obtenu grâce à des bobines supraconductrices refroidies à l'hélium liquide. On corrige les éventuelles inhomogénéités résiduelles grâce à des bobines dites de calage.
  - Levée de dégénérescence entre les spins up et down
  - On impose sous la forme d'un pulse d'onde radiofréquence un deuxième champ magnétique tournant à la pulsation de Larmor. Ce pulse dit  $90^\circ$  a une durée calculée pour faire basculer les moments magnétiques initialement alignés sur  $B_0$  dans le plan orthogonal à  $B_0$
  - A la fin du pulse les moments magnétiques et donc l'aimantation de l'échantillon tournent autour de  $B_0$  à la pulsation de Larmor
  - On mesure la fem induite dans les bobines radiofréquences par le champ variable associé aux moments tournants
  - Le temps de relaxation  $T_2$  (transverse) = temps caractéristique pendant lequel l'aimantation transverse retourne à une valeur nulle du fait de la perte de cohérence des différents moments magnétiques dans l'échantillon
  - Augmenter le champ permet d'augmenter la sensibilité (on peut aussi diminuer la température).
  - On fait ensuite la transformée de Fourier du signal obtenu (Free Induction Decay : fem induite en fonction du temps = sinusoïde qui s'amortit sur la durée  $T_2$ ) : lorentzienne.
  - Deux choses en compétition :
    - Pour avoir une bonne résolution spectrale (pics plus étroits) : augmenter  $T_2$
    - Pour améliorer le rapport signal/bruit : diminuer  $T_2$  pour pouvoir augmenter les statistiques
  - L'environnement va modifier les fréquences de Larmor des différents protons qui vont se superposer sur le signal. Et la TTF va les séparer en pics.
  - Meilleur S/B quand la température diminue, que les phases sont condensées, que  $B_0$  est élevé.
- Equations pour l'aimantation : Equations de Bloch (avec  $T_1$ =temps de relaxation longitudinal et  $T_2$ ).
- Application en médecine : imagerie
  - C'est le même principe mais en plus, on veut localiser la source : on fait un gradient de champ. Le patient est « découpé » en tranche de 1mm et à la fin, on assemble tout.
- Attention, ne pas affirmer que la stabilité du vélo est due aux effets gyroscopiques. Les effets gyroscopiques sont souvent faibles, voire tout à fait négligeables à faible vitesse, pour un vélo. La stabilité est obtenue en courbant la trajectoire dans le sens de la chute pour compenser le moment du poids par celui de la force centrifuge. Les effets gyroscopiques peuvent être plus importants pour une moto roulant à vive allure (par exemple technique de contre-braquage pour relever la moto en fin de virage en poussant le guidon dans le sens de la courbe).

## Partie réservée au correcteur

### Avis sur le plan présenté

Plan raisonnable.

La première partie (macroscopique) aurait peut-être gagné à aborder un exemple plus riche que la toupie.

Manquait également une application concrète de l'approximation gyroscopique dans la première partie.

### Concepts clés de la leçon

S'il n'est pas question de les développer dans le cadre de la leçon, les notions de tenseur d'inertie et de moment d'inertie doivent être maîtrisées et manipulées convenablement lorsqu'elles sont utiles.

Moment cinétique et théorème du moment cinétique. Conditions d'application de ce dernier qui justifient (au moins en partie) le point choisi pour les calculs.

Approximation gyroscopique.

Moment magnétique et rapport gyromagnétique.

### Concepts secondaires mais intéressants

Notion de couple gyroscopique (qui s'illustre bien par des expériences et dont les effets se manifestent dans différentes situations : motos, dispositifs anti-roulis embarqués dans certains bateaux de plaisance etc).

### Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Nombreuses expériences possibles dans cette leçon (à condition d'avoir le temps de les mener et de les exploiter) : toutes les expériences avec le gyroscope, expériences sur un tabouret, toupies...

### Points délicats dans la leçon

Principe de la RMN. Ce qu'on mesure exactement et comment on remonte en pratique au spectre RMN. Les différentes contraintes portant sur la sensibilité de la mesure.

Distinction entre moments cinétiques orbital et intrinsèque.

Rapports gyromagnétiques, facteurs de Landé, (éventuellement moment magnétique anormal) qui doivent être amenés sans pouvoir réellement les justifier d'un point de vue théorique.

### Bibliographie conseillée

