

TD 1

Les puces à atomes

Les champs magnétiques statiques peuvent être utilisés pour confiner des atomes froids ou ultra froids. En miniaturisant les fils électriques qui créent les champs, on peut créer des micro-pièges à atomes, au voisinage de puces électroniques. On les appelle les « puces à atomes » [1, 2]. Dans ce TD, on verra comment miniaturiser un piège quadrupolaire et un piège de Ioffe-Pritchard.

1 Pièges macroscopiques

On commence par étudier deux types de pièges très communs réalisés avec des bobines macroscopiques pour confiner des atomes, le piège quadrupolaire et le piège Ioffe-Pritchard.

On rappelle ici l'expression du champ créé par une bobine constituée d'une unique spire de rayon R parcourue par un courant I orienté positivement par rapport à l'axe y de la bobine. La bobine est placée en A à la distance a du centre O du repère cylindrique d'axe y , à la position $y = a$ (figure 1.a). Le champ produit au voisinage¹ du point O vaut :

$$\mathbf{B} = B_\rho \mathbf{e}_\rho + B_y \mathbf{e}_y, \quad \text{avec}$$

$$B_\rho = -\frac{b'}{2}\rho - \frac{b''}{2}\rho y \quad (1)$$

$$B_y = b_0 + b'y + \frac{b''}{2}(y^2 - \frac{\rho^2}{2}), \quad (2)$$

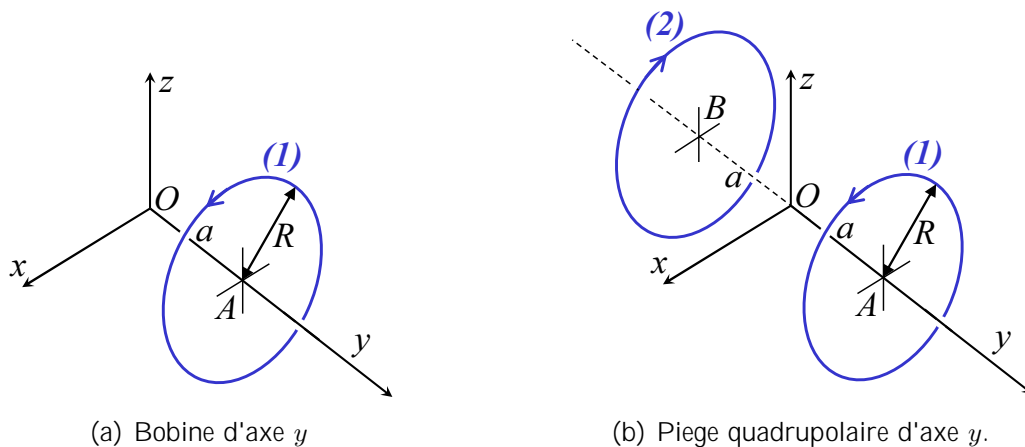


FIGURE 1 – Configuration à une bobine (a) et deux bobines (b).

\mathbf{e}_ρ désigne le vecteur unitaire radial du plan (xOz) . Les quantités b_0 , b' et b'' sont reliés à I , R et a par :

$$b_0 = \frac{\mu_0 I}{2R} \left(1 + \frac{a^2}{R^2}\right)^{-3/2} \quad b' = \frac{3a}{a^2 + R^2} b_0 \quad b'' = 3 \frac{4a^2 - R^2}{(a^2 + R^2)^2} b_0 \quad (3)$$

1. a une distance petite devant b_0/b' et $\sqrt{b_0/b''}$

1.1 Piège quadrupolaire

On considère un piège à deux bobines identiques (1) et (2) de même axe y , placées en $A(0, a, 0)$ et $B(0, -a, 0)$, parcourues par des courants en sens opposés et séparées d'une distance $2a$ (le courant de la bobine (1) de centre $y = a$ est orienté positivement par rapport à l'axe Oy , voir figure 1.b).

1. Que vaut le champ magnétique au centre O pour la configuration de la figure 1.b ?
2. Ecrire les coordonnées du champ magnétique et sa norme au voisinage du centre O à l'ordre le plus bas.
3. Ecrire le potentiel d'interaction entre un atome de moment magnétique μ et le champ magnétique. En déduire que des atomes possédant un moment magnétique correctement orienté sont ramenés vers O .
4. Pourquoi cette configuration peut-elle poser des problèmes pour confiner un nuage d'atomes froids relativement dense ?

1.2 Une réalisation du piège de Ioffe-Pritchard [3]

Pour éviter les limitations du piège précédent, on ajoute en $C(a, 0, 0)$ une troisième bobine d'axe x orthogonal à l'axe y du quadrupole, également éloignée de a du centre O et parcourue par le même courant I que les deux autres (voir figure 2). On cherche à déterminer le champ magnétique au voisinage de O .

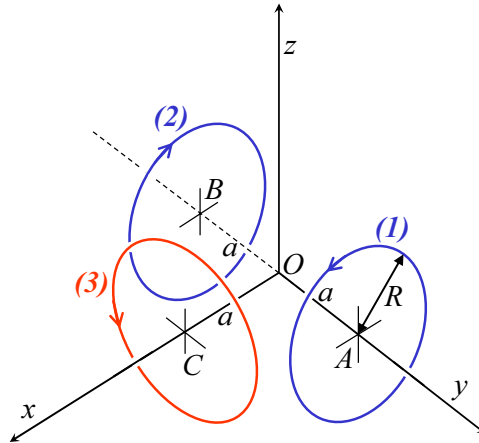


FIGURE 2 – Configuration des trois bobines du piège magnétique.

On se place au-delà de la position Helmholtz ($a > R/2$), b'' , b_0 , b' sont positifs.

1. Donner l'expression du champ magnétique \mathbf{B} créé par les trois bobines au voisinage de O à l'ordre 2.
2. Montrer que la norme vaut, à l'ordre 2 inclus en x, y, z :

$$B = b_0 + \frac{1}{2}b''x^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{9b'^2}{4b_0} - \frac{b''}{2}\right)(y^2 + z^2)$$

1.3 Caractéristiques du piège magnétique

1. Donner l'expression du potentiel auquel est soumis un atome de moment magnétique μ dans ce champ.

- Exprimer les fréquences d'oscillation ω_i ($i = x, y, z$) dans le piège magnétique en fonction de b_0, b', b'', μ et de la masse m des atomes.
- Application numérique : on piège des atomes de rubidium, de moment magnétique $\mu = \mu_B = 9,27 \times 10^{-24}$ J/T et de masse $m = 1,44 \times 10^{-25}$ kg. Pour des valeurs typiques $R = 2$ cm, $a = 4$ cm, $I = N_t I_0$ avec $N_t = 100$ tours et $I_0 = 100$ A, donner les fréquences d'oscillation.
- Eric Cornell et ses collaborateurs ont étudié le mode monopole (ou « mode de respiration ») d'un gaz thermique dans un piège magnétique isotrope [4]. À quelle condition obtient-on une telle géométrie de piège ?
- Montrer qu'en réduisant b_0 tout en gardant b' et b'' constants, on augmente certaines fréquences d'oscillations. Indiquer comment procéder expérimentalement. Quelles sont les nouvelles fréquences obtenues si b_0 est ramené à 10^{-4} T ?

2 Micro-pièges sur puces

Dans cette partie on étudie la transposition des deux pièges précédents au cas de micro-fils déposés sur une puce. On considérera pour simplifier que les fils sont d'épaisseur et de largeur nulles².

2.1 Un fil pour guider les atomes

- Rappeler le champ magnétique créé par un fil infini d'axe x .
- On ajoute à ce champ un champ magnétique homogène de la forme $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{e}_y$. Donner l'expression du champ dans la base $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$.
- Montrer que le champ s'annule sur une droite d'axe x . Cela constitue un piège pour des atomes thermiques [5]. Pourquoi ce type de piège ne convient pas pour des atomes très froids ?
- Comment le gradient de champ dépend-il de la distance au fil ? Commenter

2.2 Piège en U

On considère l'arrangement des trois fils (1, 2 et 3) représenté sur la figure 3. On note ε le signe du courant qui parcourt le fil 3 ($\varepsilon = -1$ pour la figure 3(a), $\varepsilon = +1$ pour la figure 3(b)).

- Donner en coordonnées cartésiennes les champs $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$ et \mathbf{B}_3 créés par les trois fils.
- On s'intéresse au cas (a) où $\varepsilon = -1$. Par des arguments de symétrie, montrer que la composante x du champ total est nulle dans le plan $x = 0$.
- Montrer par des arguments qualitatifs qu'en ajoutant un champ homogène $-B_0 \mathbf{e}_y$ selon la direction $-y$, on peut trouver une position $(0, y_0, z_0)$ où le champ s'annule (avec $y_0 > 0$ et $z_0 < 0$).
- Montrer, en utilisant les symétries et les équations de Maxwell, que le champ total au voisinage de cette position peut se mettre sous la forme

$$\mathbf{B}(x, y_0 + y, z_0 + z) \simeq b'_x \mathbf{e}_x + (b'_y y + b'_z z) \mathbf{e}_y + (b'_y y + b'_z z) \mathbf{e}_z$$

avec $b'_x = -(b'_y + b'_z)$.

- En déduire qu'au voisinage de ce point on a un champ de type quadrupolaire.

2. Ce n'est évidemment pas le cas et cela joue un rôle en raison de la faible distance entre les fils et les atomes.

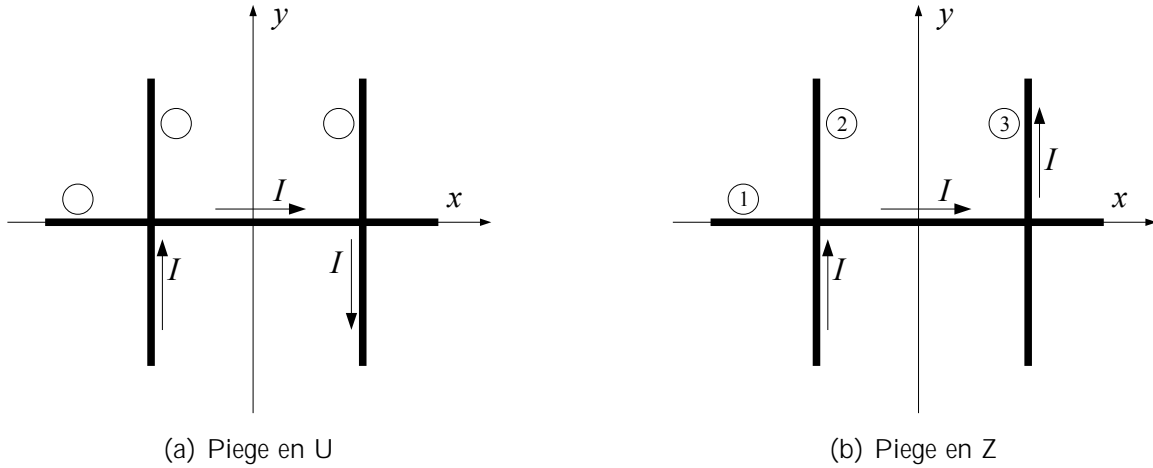


FIGURE 3 – (a) Configuration à trois fils pour piège quadrupolaire. (b) Configuration à trois fils pour piège Ioffe-Pritchard.

2.3 Piège en Z

On prend maintenant le cas (b) où $\varepsilon = +1$. On ajoute un champ homogène selon y comme précédemment.

1. Montrer que cette fois les fils 2 et 3 créent un champ selon x dans le plan $x = 0$.
2. Expliquer comment cette configuration équivaut à un piège de Ioffe-Pritchard.
3. Quel est l'intérêt de ce type de piège ?
4. Comment simplifier les deux configurations précédentes ?

Références

- [1] R. Folman, P. Krüger, J. Schmiedmayer, J. Denschlag, and C. Henkel. Microscopic atom optics : from wires to an atom chip. *Adv. At. Mol. Opt. Phys.*, 48 :263, 2002.
- [2] Jakob Reichel and Vladan Vuletic. *Atom chips*. Wiley, 2011.
- [3] D.E. Pritchard. Cooling neutral atoms in a magnetic trap for precision spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 51(15) :1336–1339, 1983.
- [4] D. S. Lobser, A. E. S. Barentine, E. A. Cornell, and H. J. Lewandowski. Observation of a persistent non-equilibrium state in cold atoms. *Nat Phys*, 11(12) :1009–1012, 12 2015.
- [5] Johannes Denschlag, Donatella Cassettari, and Jörg Schmiedmayer. Guiding neutral atoms with a wire. *Phys. Rev. Lett.*, 82 :2014–2017, Mar 1999.