

# Force entre deux aimants

EE 2350 11527



## Mode d'emploi



Centre technique et pédagogique  
de l'Enseignement de la Communauté française

# 1. But

Mesurer la force de répulsion entre deux aimants en fonction de la distance qui les sépare et, s'ils ont le même moment magnétique, estimer sa valeur.

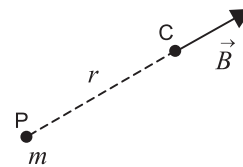
## 2. Rappel théorique

Si on transpose les formules de l'électrostatique au magnétisme, la charge électrique  $Q$  est remplacée par la masse magnétique  $m$ , le potentiel électrique  $V$  par le potentiel magnétique  $A$  et le champ électrique  $\vec{E}$  par le champ magnétique  $\vec{B}$ . Dans ce cas, on peut dire qu'une masse magnétique  $m$  placée en un point P produit, en un point C situé à une distance  $r$ , un potentiel magnétique  $A$  tel que:

$$A = \frac{\mu_0 m}{4\pi r}$$

Le champ magnétique  $\vec{B}$  vaut:

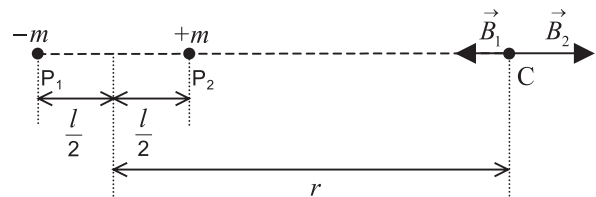
$$\vec{B} = -\text{grad} A$$



Ce champ est radial et vaut, au point C:

$$B_C = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^2} \tag{1}$$

Par analogie avec l'électrostatique, un dipôle magnétique (aimant permanent) est constitué de deux masses magnétiques voisines  $+m$  et  $-m$  séparées par une distance  $l$ . Déterminons la valeur  $B$  du champ magnétique produit en un point C sur l'axe  $P_1P_2$  des masses magnétiques,  $r$  étant la distance entre le point C et le milieu du dipôle (schéma ci-contre).



La masse magnétique placée en  $P_1$  produit un champ  $\vec{B}_1$  et celle en  $P_2$  un champ  $\vec{B}_2$ . Le champ magnétique  $\vec{B}$  en C est tel que:  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . On a, en tenant compte de (1):

$$B = B_2 - B_1 = \frac{\mu_0 m}{4\pi \left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{\mu_0 m}{4\pi \left(r + \frac{l}{2}\right)^2}$$

Après transformations, on en déduit que:

$$B = \frac{\mu_0 m r l}{2\pi \left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2}$$

Si  $l \ll r$ , on peut négliger  $l^2/4$  et on a:

$$B \simeq \frac{\mu_0 m l}{2\pi r^3} \tag{2}$$

Le produit  $ml$  est appelé moment magnétique  $M_1$  du dipôle. Dans ce cas, (2) s'écrit:

$$B \simeq \frac{\mu_0 M_1}{2\pi r^3}$$

Si on place au point C un second dipôle (aimant permanent) de moment magnétique  $M_2$  de manière telle que ses lignes de champ soient parallèles à celles de  $M_1$ , l'énergie potentielle  $U$  du système vaut:

$$U = \pm M_2 B \approx \pm \frac{\mu_0 M_1 M_2}{2\pi r^3}$$

Dans ce cas, la valeur de la force magnétique  $F$  entre les deux aimants vaut:

$$F = \left| \frac{dU}{dr} \right| \approx \frac{3\mu_0 M_1 M_2}{2\pi r^4} \quad (3)$$

Cette force est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la distance séparant les centres des deux aimants.

### 3. Principe des mesures

Deux aimants cylindriques magnétisés axialement sont placés de manière telle que leurs axes sont situés sur une même verticale. Ils sont orientés afin de se repousser. Un des aimants est placé sur le plateau d'une balance, l'autre est fixé sur un support pouvant se mouvoir verticalement à l'aide d'une tige filetée. À partir des indications lues sur la balance et du nombre de tours effectués par la tige filetée, on peut mesurer la force de répulsion en fonction de la distance entre les aimants.

Pour connaître à tout moment avec précision la distance entre les deux aimants, on rapproche d'abord le plus possible le support en plastique pouvant contenir l'aimant mobile<sup>1</sup> de l'aimant placé sur le plateau de la balance en vissant la tige filetée<sup>2</sup>. On dévisse ensuite celle-ci afin d'éloigner le support en plastique de l'aimant et on compte le nombre de tours effectués<sup>3</sup>. Lorsque la distance est suffisamment importante, on règle la balance pour qu'elle affiche zéro. On fixe ensuite l'aimant dans le support en plastique en veillant à ce que les deux aimants se repoussent. On peut alors procéder aux mesures.

#### Remarque

En approchant l'aimant mobile de l'aimant placé sur le plateau de la balance, ce dernier descend légèrement et s'éloigne donc de l'aimant mobile. Cet éloignement est nul pour une balance mécanique à plateau car on rétablit l'équilibre lors de la mesure de la force, il est en général inférieur à 0,5 mm pour une balance électronique et peut être négligé.

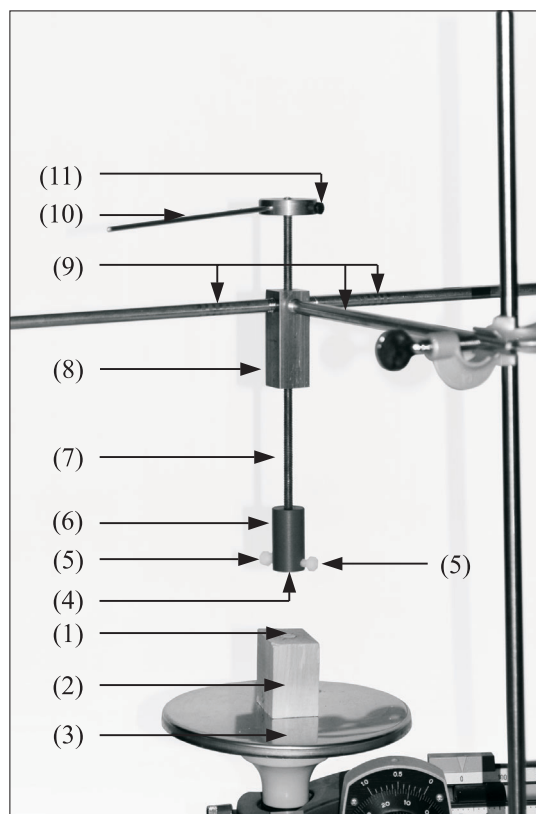
<sup>1</sup> Ce dernier ne doit pas être placé dans le support.

<sup>2</sup> La distance doit être la plus petite possible sans qu'il y ait contact avec l'aimant placé sur le plateau de la balance.

<sup>3</sup> Chaque tour correspond à un déplacement d'un millimètre (tige filetée en M6).

## 4. Description de l'appareil

Un des aimants (1) est enfoncé dans un support en bois (2) déposé sur le plateau (3) d'une balance. Les pôles de l'aimant sont placés verticalement. L'autre aimant (4) est placé à la verticale du premier de manière telle que les pôles se faisant face se repoussent. Cet aimant est fixé à l'aide de deux vis (5) dans un support (6) qui se déplace verticalement à l'aide d'une tige filetée (7) pouvant tourner dans un bloc métallique (8). Ce bloc est maintenu immobile grâce à trois tiges (9) que l'on fixe sur trois statifs à l'aide de trois noix. Chaque tour complet du support (6) de l'aimant correspond à un déplacement vertical de 1 mm. Une aiguille (10) montée sur la partie supérieure de la tige filetée permet de compter facilement le nombre de tours. L'orientation de l'aiguille sur la tige filetée peut être modifiée à l'aide de la vis (11).



## 5. Composition

L'ensemble est constitué de:

- 1 aimant au néodyme, fer, bore (d: 10 mm, l: 10 mm);
- 3 tiges en laiton;
- 1 tige filetée et ses accessoires;
- 1 support en bois avec aimant au néodyme, fer, bore (d: 10 mm, l: 10 mm).

## 6. Matériel supplémentaire

- 1 balance électronique ou mécanique (portée minimale 200 g, précision minimale 0,1 g).
- 3 statifs.
- 3 noix.

## 7. Manipulation

1. Brancher la balance si celle-ci est électronique. Placer le support en bois (2) contenant l'aimant (1) au milieu du plateau (3) de la balance, l'aimant étant vers le haut (voir photo).
2. Vérifier si le support (6) ne contient pas l'aimant (4). Au besoin, l'enlever en desserrant les vis (5).

3. Visser la tige filetée afin que le support (6) soit le plus éloigné possible du bloc métallique (8). Ne pas la visser à fond, réserver 4 ou 5 tours pour le réglage fin.
4. Visser les trois tiges (9) dans le bloc (8) et les fixer à l'aide des statifs et des noix de manière telle que la tige filetée soit à la verticale de l'aimant placé sur le plateau de la balance (voir photo). Régler avec les noix la hauteur de l'ensemble pour que le support (6) puisse être le plus près possible de l'aimant sur le plateau, sans appuyer sur ce dernier! Au besoin, utiliser les quelques tours de réglage de la tige filetée qui avaient été réservés.
5. Desserrer la vis (11), régler la position de l'aiguille (10) pour pouvoir compter facilement le nombre de tours de la tige filetée puis resserrer la vis.
6. Faire tourner l'aiguille (10) dans le sens trigonométrique et compter le nombre de tours afin de pouvoir mesurer la distance entre l'aimant et le support. Faire environ 90 ou 100 tours, soit un déplacement de 9 ou 10 cm, chaque tour correspondant à 1 mm. Noter la distance  $d$  correspondante dans la 2<sup>e</sup> colonne d'un tableau tel celui ci-dessous.

$N$	$d$ (mm)	$r$ (mm)	$m$ (g)	$F$ (N)
0				

7. Régler la balance pour qu'elle indique zéro.
8. Placer l'aimant (4) dans le support (6), l'enfoncer à fond et le fixer à l'aide des vis (5). L'aimant doit être à ras du support. Veiller à l'orientation des pôles, les aimants doivent se repousser. Noter l'indication de la balance dans la 4<sup>e</sup> colonne du tableau<sup>4</sup>.
9. Faire tourner l'aiguille de  $N$  tours<sup>5</sup> (sens des aiguilles d'une montre), noter ce nombre dans la 1<sup>re</sup> colonne du tableau, indiquer la distance  $d$  correspondante dans la 2<sup>e</sup> colonne et noter l'indication de la balance dans la 4<sup>e</sup> colonne.
10. Refaire le point 9 de la manipulation en augmentant le nombre  $N$  de tours, c'est-à-dire en diminuant la distance  $d$  entre les aimants<sup>6</sup>.

## 8. Exploitation

1. Compléter le tableau des mesures si  $r$  est la distance entre les centres des aimants (centre des dipôles magnétiques) et  $F$  la force de répulsion ( $F = mg$ ).
2. Tracer le graphique représentant la force  $F$  en fonction de la distance  $r$ . Que peut-on en déduire?

<sup>4</sup> Il se peut qu'elle n'indique plus zéro car, si elle est suffisamment sensible, on peut déterminer la force de répulsion à cette distance.

<sup>5</sup> Cela peut être 1, 5 ou 10 tours suivant la sensibilité de la balance utilisée.

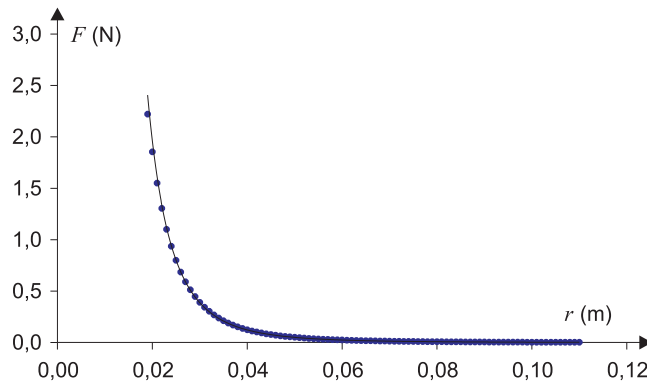
<sup>6</sup> Il est difficile de faire des mesures si la distance entre les aimants est inférieure à 15 mm.

## 9. Résultats

Le tableau ci-après donne les résultats obtenus avec une balance électronique (portée 200 g, précision 0,001 g et 0,01 g).

<i>N</i>	<i>d</i> (mm)	<i>r</i> (mm)	<i>m</i> (g)	<i>F</i> (N)	<i>N</i>	<i>d</i> (mm)	<i>r</i> (mm)	<i>m</i> (g)	<i>F</i> (N)
0	100	110	0,214	0,0021	46	54	64	1,913	0,0188
1	99	109	0,221	0,0022	47	53	63	2,039	0,0200
2	98	108	0,230	0,0023	48	52	62	2,175	0,0213
3	97	107	0,240	0,0024	49	51	61	2,322	0,0228
4	96	106	0,249	0,0024	50	50	60	2,481	0,0243
5	95	105	0,259	0,0025	51	49	59	2,654	0,0260
6	94	104	0,269	0,0026	52	48	58	2,841	0,0279
7	93	103	0,279	0,0027	53	47	57	3,049	0,0299
8	92	102	0,291	0,0029	54	46	56	3,273	0,0321
9	91	101	0,303	0,0030	55	45	55	3,518	0,0345
10	90	100	0,314	0,0031	56	44	54	3,788	0,0372
11	89	99	0,328	0,0032	57	43	53	4,084	0,0401
12	88	98	0,343	0,0034	58	42	52	4,409	0,0433
13	87	97	0,357	0,0035	59	41	51	4,767	0,0468
14	86	96	0,372	0,0036	60	40	50	5,162	0,0506
15	85	95	0,388	0,0038	61	39	49	5,599	0,0549
16	84	94	0,405	0,0040	62	38	48	6,085	0,0597
17	83	93	0,424	0,0042	63	37	47	6,623	0,0650
18	82	92	0,443	0,0043	64	36	46	7,222	0,0708
19	81	91	0,463	0,0045	65	35	45	7,884	0,0773
20	80	90	0,484	0,0047	66	34	44	8,627	0,0846
21	79	89	0,505	0,0050	67	33	43	9,459	0,0928
22	78	88	0,529	0,0052	68	32	42	10,393	0,1020
23	77	87	0,555	0,0054	69	31	41	11,45	0,1123
24	76	86	0,581	0,0057	70	30	40	12,65	0,1241
25	75	85	0,609	0,0060	71	29	39	14,00	0,1373
26	74	84	0,640	0,0063	72	28	38	15,53	0,1523
27	73	83	0,671	0,0066	73	27	37	17,27	0,1694
28	72	82	0,705	0,0069	74	26	36	19,30	0,1893
29	71	81	0,741	0,0073	75	25	35	21,62	0,2121
30	70	80	0,779	0,0076	76	24	34	24,26	0,2380
31	69	79	0,819	0,0080	77	23	33	27,33	0,2681
32	68	78	0,862	0,0085	78	22	32	30,92	0,3033
33	67	77	0,908	0,0089	79	21	31	34,93	0,3427
34	66	76	0,958	0,0094	80	20	30	39,82	0,3906
35	65	75	1,011	0,0099	81	19	29	45,55	0,4468
36	64	74	1,067	0,0105	82	18	28	52,24	0,5125
37	63	73	1,127	0,0111	83	17	27	60,15	0,5901
38	62	72	1,191	0,0117	84	16	26	69,82	0,6849
39	61	71	1,261	0,0124	85	15	25	81,47	0,7992
40	60	70	1,334	0,0131	86	14	24	95,41	0,9360
41	59	69	1,413	0,0139	87	13	23	112,19	1,1987
42	58	68	1,499	0,0147	88	12	22	133,05	1,3052
43	57	67	1,591	0,0156	89	11	21	158,10	1,5510
44	56	66	1,691	0,0166	90	10	20	189,03	1,8544
45	55	65	1,798	0,0176	91	9	19	226,46	2,2216

La représentation graphique se trouve ci-après.

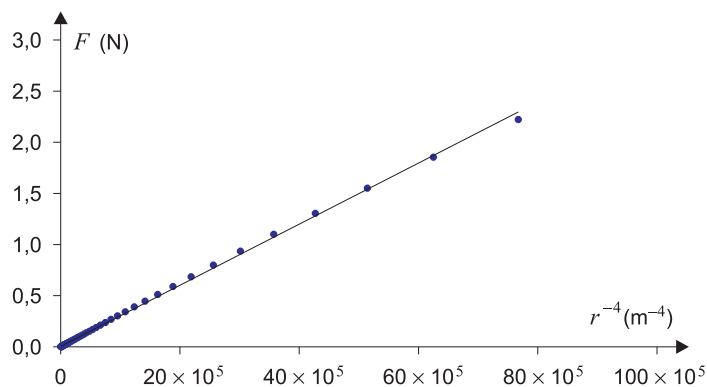


Un calcul de régression avec le programme *Excel* montre que l'équation de la courbe s'écrit:

$$F = 3,1 \times 10^{-7} \times r^{-4,002} \quad (4)$$

En tenant compte des incertitudes, on constate que la force est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la distance séparant les centres des dipôles magnétiques.

Si on suppose que l'exposant doit être exactement égal à  $-4$ , alors le graphique représentant  $F$  en fonction  $r^{-4}$  peut être représenté approximativement par une droite (voir ci-dessous).



La pente de la droite vaut  $3,0 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}^4$  soit une valeur proche de celle donnée par (4).

En tenant compte de cette valeur et de l'expression (3), on a:

$$3,0 \times 10^{-7} = \frac{3\mu_0 M_1 M_2}{2\pi}$$

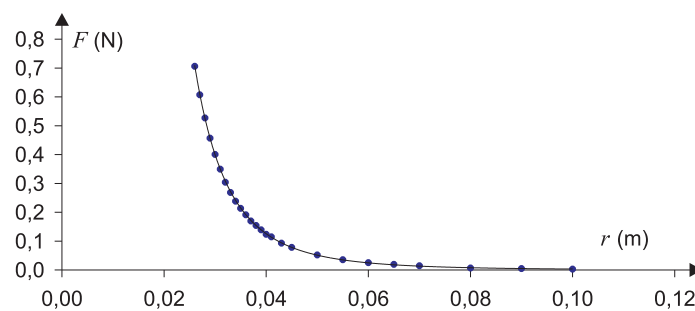
Si on suppose que les deux aimants ont le même moment magnétique, on peut déterminer sa valeur.

$$M_1 = M_2 = \sqrt{\frac{2\pi \times 3,0 \times 10^{-7}}{3\mu_0}} = 0,71 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus avec une balance mécanique à un plateau (portée 1600 g, précision 0,1 g).

$N$	$d$ (mm)	$r$ (mm)	$m$ (g)	$F$ (N)	$N$	$d$ (mm)	$r$ (mm)	$m$ (g)	$F$ (N)
0	90	110	0,3	0,0029	62	28	38	15,7	0,1540
10	80	90	0,5	0,0049	63	27	37	17,3	0,1697
20	70	80	0,7	0,0069	64	26	36	19,5	0,1913
30	60	70	1,5	0,0147	65	25	35	21,8	0,2139
35	55	65	2,0	0,0196	66	24	34	24,3	0,2384
40	50	60	2,6	0,0255	67	23	33	27,4	0,2688
45	45	55	3,6	0,0353	68	22	32	31,0	0,3041
50	40	50	5,3	0,0512	69	21	31	35,6	0,3492
55	35	45	8,0	0,0785	70	20	30	40,8	0,4002
57	33	43	9,5	0,0927	71	19	29	46,6	0,4571
59	31	41	11,7	0,1148	72	18	28	53,7	0,5268
60	30	40	12,6	0,1236	73	17	27	61,9	0,6072
61	29	39	14,2	0,1393	74	16	26	72,0	0,7063

La représentation graphique se trouve ci-dessous.

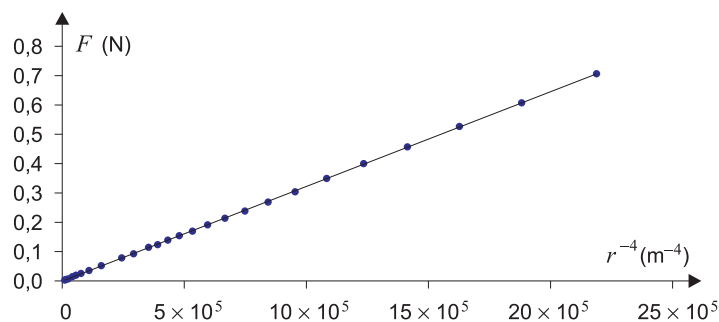


Un calcul de régression avec le programme *Excel* montre que l'équation de la courbe s'écrit :

$$F = 3,0 \times 10^{-7} \times r^{-4,02} \quad (5)$$

On en arrive à la même conclusion que précédemment: la force est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la distance séparant les centres des dipôles magnétiques.

Si on suppose que l'exposant doit être exactement égal à  $-4$ , alors le graphique représentant  $F$  en fonction  $r^{-4}$  peut être représenté approximativement par une droite (voir ci-dessous).



La pente de la droite vaut  $3,2 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}^4$  soit une valeur proche de celle donnée par (5).



En tenant compte de cette valeur et de l'expression (3), on a:

$$3,2 \times 10^{-7} = \frac{3\mu_0 M_1 M_2}{2\pi}$$

Si on suppose que les deux aimants ont le même moment magnétique, on peut déterminer sa valeur.

$$M_1 = M_2 = \sqrt{\frac{2\pi \times 3,2 \times 10^{-7}}{3\mu_0}} = 0,73 \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

Les résultats obtenus avec les deux balances sont assez proches. C'est cependant avec la balance qui a la meilleure précision que les résultats sont les meilleurs!