

Ces corrigés accompagnent le chapitre **Magnétisme**. Après lecture d'une solution, reprenez la question sans regarder le corrigé. Repérez si votre difficulté concernait la lecture du schéma (sens du courant, sens du champ, points ou croix), le cas du courant parallèle au champ (force nulle), le placement de la main droite, le signe de la charge (inverser pour un électron), ou la confusion entre champ électrique (parabole) et champ magnétique (cercle). Les champs sont uniformes et le poids des particules est négligé sauf indication contraire ; on prend $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ uSI, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, $m_e = 9 \times 10^{-31}$ kg, $m_p = 1,7 \times 10^{-27}$ kg.

Vérifications flash

F1 — Pôles et matériaux

Nord contre nord : **répulsion** ; nord contre sud : **attraction** ; le clou en acier (alliage de fer) est **attiré** ; la pièce en cuivre ne l'est pas. L'aimant brisé donne **deux aimants complets**, soit quatre pôles : on ne sépare jamais un pôle.

F2 — Croix, aimant en U, ordre de grandeur

Une croix est l'empennage d'une flèche vue de derrière : le champ **entre dans la feuille**. Entre les branches d'un aimant en U, le champ va de la branche nord à la branche sud : l'aiguille pointe **vers le bas**, vers le sud de l'aimant. $0,3/(5 \times 10^{-5}) = 6000$: six mille fois le champ terrestre.

F3 — Le fil et le sens de rotation

Pouce vers le bas : les doigts repliés tournent dans le sens **horaire** vu de dessus (antihoraire vu de dessous). Le champ est proportionnel au courant : **doublé**. Il décroît avec la distance : à deux fois plus loin, **plus faible**.

F4 — La bobine

$N/L = 500/0,10 = 5000$ spires par mètre ; $B = 4\pi \times 10^{-7} \times 5000 \times 1 = 2\pi \times 10^{-3} \simeq 6 \times 10^{-3}$ T, soit **6 mT**. Avec 20 cm, N/L est divisé par deux : **3 mT**. Dix fois plus de champ sans changer la bobine : un courant **dix fois plus grand** (10 A), ou bien un noyau de fer.

F5 — Champ retourné, conducteur incliné

Le champ pointe vers la gauche : chaque force s'inverse. Panneau 1 : **sortante** ; panneau 2 : toujours **nulle** (courant toujours parallèle au champ) ; panneau 3 : **entrante**. Incliné de 30° par rapport au champ, le conducteur subit $F = BIL \sin 30^\circ = BIL/2$: la force est **deux fois plus petite** que lorsqu'il est perpendiculaire.

F6 — Fil horizontal dans un champ entrant

Pouce vers la droite (courant), index dans la feuille (champ entrant) : le majeur pointe vers le **haut de la page**. La force est dans le plan de la feuille, perpendiculaire au fil. Norme : $F = BIL = 0,2 \times 5 \times 0,20 = 0,2$ N. Avec 10 A sur 10 cm, $0,2 \times 10 \times 0,10 = 0,2$ N : le produit IL est le même.

F7 — Cadre dans un champ perpendiculaire

Champ sortant. Côté gauche, courant vers le haut : pouce en haut, index vers vous, majeur vers la **droite**. Côté droit, courant vers le bas : force vers la **gauche**. Côté haut, courant vers la droite : force vers le **bas**. Côté bas, courant vers la gauche : force vers le **haut**. Les quatre forces sont dans le plan du cadre et pointent vers son intérieur : résultante nulle, aucun couple autour d'un axe du plan ; le cadre **ne tourne pas**, il tend seulement à se **contracter**. Avec un champ entrant, les quatre forces pointeraient vers l'extérieur.

F8 — Proton, électron, immobile, parallèle

Proton vers la droite, champ entrant : pouce à droite, index dans la feuille, majeur vers le **haut** de la page. Électron : force opposée, vers le **bas**. Proton immobile : **aucune** force magnétique. Proton lancé le long du champ : **aucune** force, il va tout droit.

F9 — Proton et électron, champ doublé

$r = mv/(|q|B)$: même v , même $|q|$, même B , le rayon est proportionnel à la masse ; le **proton** décrit le plus grand cercle, 1836 **fois** plus grand. Charges de signes opposés, forces opposées : ils tournent en **sens contraires**. Champ doublé : rayon **divisé par deux**. La force magnétique, perpendiculaire à la vitesse, ne travaille pas : l'énergie cinétique **ne change pas**.

F10 — Le transformateur

$U_2 = U_1 N_2/N_1 = 230 \times 50/500 = 23$ V. Sous une tension continue, le champ du primaire ne varie pas : 0 V. Retourné, le rapport s'inverse : $230 \times 500/50 = 2300$ V.

Exercices d'apprentissage

E1 — Cartographier un aimant

1. À l'extérieur, les lignes sortent du pôle nord (à droite) et entrent par le pôle sud (à gauche), en arcs fermés au-dessus et au-dessous. B_1 , à droite du nord : aiguille vers la **droite** (elle s'éloigne de l'aimant). B_2 , à gauche du sud : aiguille vers la **droite** aussi (elle pointe vers l'aimant, vers le sud). B_3 et B_4 , au-dessus et au-dessous du milieu : les lignes y reviennent du nord vers le sud, aiguilles vers la **gauche**.
2. Toutes les lignes s'inversent : les quatre aiguilles se **retournent**.
3. Chaque morceau est un aimant complet : **quatre pôles**. La cassure crée un pôle sud sur le morceau qui porte le nord initial, et un pôle nord sur l'autre : ce sont un **sud et un nord** qui se font face, et les deux morceaux s'attirent.
4. Le **clou** (acier, alliage de fer) et la **pièce en nickel** ; le cuivre n'est pas attiré.

E2 — L'expérience d'Ersted

1. Pouce vers le nord ; les doigts repliés passent sous le fil en allant vers l'**ouest**. Sous le fil, le champ du courant est horizontal, vers l'ouest : le pôle nord de l'aiguille dévie vers l'**ouest**.
2. Courant inversé, champ inversé : déviation vers l'**est**.
3. Au-dessus du fil (la boussole est maintenant au-dessus), les doigts repliés vont vers l'est : déviation vers l'**est**, pour le courant initial.
4. Le champ du fil est proportionnel au courant : à 10 A, la déviation est **plus grande** (le champ du fil l'emporte davantage sur le champ terrestre). En éloignant le fil, le champ décroît : déviation **plus petite**.

E3 — La bobine et son noyau

1. $N/L = 500/0,25 = 2000$ spires par mètre ; $B = 4\pi \times 10^{-7} \times 2000 \times 4 = 32\pi \times 10^{-4} \simeq 96 \times 10^{-4} \text{ T}$ avec $\pi \simeq 3$, soit environ **10 mT**, deux cents fois le champ terrestre (50 μT).
2. Spires doublées à longueur égale : N/L doublé, **20 mT**. Longueur doublée à spires égales : N/L divisé par deux, **5 mT**. Diamètre doublé : le champ ne dépend pas du diamètre, **10 mT**.
3. Vu de la gauche, le courant tourne dans le sens horaire : les doigts repliés dans ce sens, le pouce pointe **loin de l'observateur**, vers la droite. La face nord est à **droite**.
4. $500 \times 10 \text{ mT} = 5 \text{ T}$. Sans noyau, il faudrait un courant 500 fois plus grand : **2000 A**, irréalisable dans un fil ordinaire ; c'est pourquoi les électro-aimants ont un noyau, et les IRM des bobines supraconductrices.

E4 — La barre sur les rails

1. Vue de dessus, champ vertical vers le haut : **points** (sortant). Courant vers le haut de la page : pouce en haut, index vers vous, majeur vers la **droite**. La force est dans le plan des rails, perpendiculaire à la barre, vers la droite ; la barre glisse vers la droite. $F = BIL = 0,2 \times 10 \times 0,05 = 0,1 \text{ N}$.
2. Courant inversé : force vers la **gauche**. Aimant retourné (champ vers le bas, croix) : force vers la **gauche** aussi. Les deux inversions ensemble ramèneraient la force vers la droite.
3. $I = F/(BL) = 0,3/(0,2 \times 0,05) = 30 \text{ A}$. Longueur doublée à 10 A : F doublée, **0,2 N**.
4. Champ horizontal parallèle aux **rails** : la barre, perpendiculaire aux rails, reste perpendiculaire au champ ; la force vaut toujours 0,1 N mais elle est maintenant **verticale** (pouce vers le haut de la page, index le long des rails vers la droite : majeur dans la feuille, c'est-à-dire vers le bas) : la barre est plaquée sur les rails et ne glisse plus. Champ horizontal parallèle à la **barre** : courant et champ parallèles, force **nulle**.

E5 — Le cadre dans le champ

1. Côtés horizontaux ($a = 4 \text{ cm}$) : parallèles au champ, force **nulle**. Côté gauche ($b = 10 \text{ cm}$, courant vers le haut) : pouce en haut, index à droite, majeur dans la feuille : force **entrante**, $F = 0,5 \times 2 \times 0,10 = 0,1 \text{ N}$. Côté droit (courant vers le bas) : force **sortante**, 0,1 N.
2. Les deux forces sont opposées : **résultante nulle**. Mais elles s'appliquent de part et d'autre de l'axe vertical central, à $a/2 = 2 \text{ cm}$ chacune, et tendent à faire tourner le cadre dans le même sens : c'est un couple, de moment $2 \times 0,1 \times 0,02 = 4 \times 10^{-3} \text{ N m}$ (soit $F \times a$). Le cadre **pivote** autour de l'axe vertical ; il n'est pas immobile.
3. Champ sortant, perpendiculaire au plan : les quatre forces sont dans le plan du cadre, perpendiculaires à chaque côté, dirigées vers l'intérieur (gauche : vers la droite ; droite : vers la gauche ; haut : vers le bas ; bas : vers le haut), de normes 0,1 N sur les côtés de 10 cm et 0,04 N sur les côtés de 4 cm. Résultante nulle, aucune rotation : le cadre **ne tourne pas**, il est comprimé.
4. Courant inversé, forces inversées : le cadre tourne dans l'**autre sens**. Dans un moteur, le courant est inversé à chaque demi-tour, au moment où le cadre passe par la position perpendiculaire au champ, de sorte que le couple le relance toujours dans le même sens.

E6 — Électron et proton dans un champ

1. Pour une charge positive allant vers la droite dans un champ sortant, la règle donne une force vers le bas ; l'électron est négatif : force vers le **haut** de la page, perpendiculaire à la vitesse et au champ. $F = evB = 1,6 \times 10^{-19} \times 10^7 \times 2 \times 10^{-3} = 3,2 \times 10^{-15} \text{ N}$.
2. La force reste perpendiculaire à la vitesse et de norme constante : mouvement **circulaire uniforme** dans le plan de la feuille (plan perpendiculaire au champ), l'électron tournant vers le haut. $r = m_e v / (eB) = 9 \times 10^{-31} \times 10^7 / (3,2 \times 10^{-22}) = 2,8 \times 10^{-2} \text{ m}$, environ **3 cm**.
3. Proton : force vers le **bas**, cercle parcouru dans l'autre sens ; $r = m_p v / (eB) = 1,7 \times 10^{-27} \times 10^7 / (3,2 \times 10^{-22}) = 5,3 \times 10^{-2} \text{ m}$, environ **50 m** : 1836 fois plus grand, le proton n'est pratiquement pas dévié à l'échelle de

l'expérience.

4. Vitesse doublée : rayon **doublé** ($r \propto v$). Champ doublé : rayon **divisé par deux**. La force magnétique ne travaille pas : l'énergie cinétique **reste constante**, seule la direction de la vitesse change.
5. Vitesse parallèle au champ : force **nulle**, mouvement **rectiligne uniforme**.

E7 — Induire et transformer

1. Pendant l'approche, le voltmètre **dévie** ; aimant immobile, il revient à **zéro** (pas de variation, pas de tension) ; pendant le retrait, il dévie **en sens inverse**. Loi de Lenz : le courant induit s'oppose à l'approche du pôle nord, la bobine lui présente une face **nord** qui le repousse ; il faut pousser l'aimant, et ce travail devient l'énergie électrique du courant induit (conservation de l'énergie). Au retrait, la bobine présente une face sud qui retient l'aimant.
2. $U_2 = 230 \times 120/2300 = 12$ V. En continu, aucune variation de champ : 0 V.
3. $N_2 = N_1 U_2/U_1 = 500 \times 4600/230 = 500 \times 20 = 10\,000$ spires.
4. À puissance transportée $P = UI$ donnée, une tension plus élevée signifie un courant plus faible, donc des pertes par effet Joule RI^2 plus faibles dans les lignes (chapitre 8). Élever puis abaisser la tension exige des transformateurs, qui ne fonctionnent que par induction, c'est-à-dire avec une tension qui **varie** : en alternatif.

QCM d'automatismes

A1 — Réponse B

Un aimant attire le fer, le nickel, le cobalt et leurs alliages ; le cuivre et l'aluminium (A, C) ne sont pas attirés. Un corps non aimanté en fer est attiré (D).

A2 — Réponse C

L'IRM travaille entre 1,5 et 3 T. 50 μ T (A) est le champ terrestre ; 2 mT (B) est un petit électroaimant ; 2000 T (D) n'existe que dans les étoiles à neutrons.

A3 — Réponse B

Les lignes sortent du nord et entrent par le sud à l'extérieur, puis se referment à l'intérieur ; (A) est le sens intérieur, (C) décrit un champ électrique de charge isolée, (D) le champ d'un fil.

A4 — Réponse C

Le champ d'un fil rectiligne tourne autour du fil : lignes circulaires, champ tangent. Ni le long du fil (A), ni vers le fil (B).

A5 — Réponse C

Trois leviers : plus de courant, plus de spires, un noyau de fer. Le cuivre n'est pas ferromagnétique (A) ; diminuer le courant (B) ou ouvrir l'interrupteur (D) affaiblit ou annule le champ.

A6 — Réponse C

Courant parallèle au champ : force nulle, dans le même sens comme en sens opposé. Les propositions B et D décrivent des directions qu'une force magnétique n'a jamais : elle est toujours perpendiculaire au champ.

A7 — Réponse A

Pouce vers la droite, index dans la feuille : majeur vers le haut de la page. La force est dans le plan de la feuille (C et D sont exclues) et perpendiculaire au fil (D est exclue).

A8 — Réponse B

Force perpendiculaire au courant (x) et au champ : le champ est perpendiculaire à x et à la force (z), donc selon y . Un champ selon x (A) donnerait une force nulle ; selon z (C), une force selon y .

A9 — Réponse D

La force magnétique exige une vitesse : $F = |q|vB$ est nulle pour $v = 0$. Seul un champ électrique agit sur une charge immobile.

A10 — Réponse A

Pour une charge positive, pouce à droite, index vers vous, majeur vers le bas. L'électron est négatif : force inversée, vers le **haut** de la page. La réponse B oublie le signe ; C et D ne sont pas perpendiculaires à la vitesse et au champ.

A11 — Réponse D

Une batterie fournit une tension continue : le champ du primaire ne varie pas, rien n'est induit au secondaire. Le rapport des spires (A) ne vaut qu'en alternatif.

A12 — Réponse A

$U_2 = U_1 N_2/N_1 = 12 \times 10 = 120$ V : dix fois plus de spires au secondaire, tension dix fois plus grande (élevateur). 1,2 V (C) inverse le rapport.

QCM de niveau concours**C1 — Réponse B**

Pouce vers le bas (courant), index dans la feuille (croix) : le majeur pointe vers la **droite**. La force est dans le plan de la feuille parce que le champ est perpendiculaire à la feuille ; « vers le lecteur » (C) ou « dans la feuille » (D) seraient les réponses si le champ était dessiné dans le plan de la figure. A inverse le sens.

C2 — Réponse A

Les trois vecteurs sont deux à deux perpendiculaires : le courant est bien le long de y (C et D sont exclues, D placerait le courant le long de la force). Pour le sens : index selon $+z$, majeur selon $+x$; le pouce pointe selon $+y$ (vérification : pouce $+y$, index $+z$ donnent un majeur selon $+x$). B donnerait une force selon $-x$.

C3 — Réponse C

Champ perpendiculaire au plan du cadre : chaque côté est perpendiculaire au champ et subit une force (D est fausse), dirigée dans le plan du cadre, perpendiculaire au côté. Les forces de deux côtés opposés sont opposées et portées par la même droite d'action (perpendiculaire aux deux côtés par leur milieu) : résultante nulle, couple nul. Le cadre ne tourne pas (A), ne se déplace pas (B) ; il est seulement comprimé ou étiré. Le pivotement (A) est le cas d'un champ **dans** le plan du cadre.

C4 — Réponse A

$F = BIL : 0,5 \times 4 \times 0,10 = 0,2 \text{ N}$. Seconde barre : $0,5 \times 2 \times 0,20 = 0,2 \text{ N}$, la même force (le produit IL est conservé). Barre parallèle au champ : force **nulle**. B double à tort avec la longueur sans tenir compte du courant ; C oublie le cas parallèle.

C5 — Réponse B

Pouce vers le nord (vitesse), index vers le bas (champ) : pour une charge positive, le majeur pointe vers l'**ouest**. La force reste perpendiculaire à la vitesse, horizontale, de norme constante : cercle dans un plan **horizontal**. A inverse le sens (c'est la réponse pour des électrons) ; C décrit un champ électrique ou la pesanteur ; D confond « perpendiculaire à la vitesse » (force maximale) et « parallèle » (force nulle).

C6 — Réponse B

La force de Lorentz est perpendiculaire à la vitesse : elle ne travaille pas et ne change pas la norme de la vitesse (A est fausse) ; elle est perpendiculaire au champ (C est fausse) ; la trajectoire est un cercle (D est fausse).

C7 — Réponse B

Dans le champ électrique vertical, la force $q\vec{E}$ est verticale et constante : trajectoire **parabolique** dans le plan vertical contenant la vitesse initiale (comme un projectile). Dans le champ magnétique vertical, la force est perpendiculaire à la vitesse horizontale et au champ vertical, donc horizontale : **cercle dans un plan horizontal**. C place le cercle dans un plan contenant le champ, impossible ; A et D confondent les deux champs.

C8 — Réponse B

C'est l'expérience d'Ørsted. Pouce vers le nord : sous le fil, les doigts repliés vont vers l'**ouest** ; le champ du courant, horizontal et perpendiculaire au fil, fait dévier le pôle nord vers l'**ouest**. A est fausse : le champ du fil est perpendiculaire au fil, donc à l'aiguille, pas parallèle. C est la déviation pour un courant vers le sud, ou pour un fil placé au-dessous. D exigerait un champ opposé au champ terrestre et bien plus intense.

C9 — Réponse B

Une bobine parcourue par un courant est un aimant, avec une face nord et une face sud (C est fausse). Nord contre nord : **répulsion**. Le sens de la force ne dépend pas de l'intensité du courant, seulement sa grandeur (D est fausse).

C10 — Réponse B

Les lignes de champ magnétique sont fermées et il n'existe pas de pôle isolé : l'aimant brisé donne deux aimants complets. A invente des charges magnétiques ; C est fausse, le champ magnétique n'agit que sur des charges en mouvement ; D inverse le sens extérieur des lignes, qui vont du nord au sud.

C11 — Réponse B

$N_2 = N_1 U_2 / U_1 = 2000 \times 9 / 230 \simeq 2000 / 25,6 \simeq 78$, le plus proche de 80 spires. A (8) et C (800) se trompent d'un facteur dix ; D (50 000) inverse le rapport.

C12 — Réponse C

Les charges de l'électron et du proton sont de signes opposés : les forces de Lorentz, donc les courbures, sont de sens opposés. Pour une entrée perpendiculaire au champ, le rayon vérifie $r = mv/(|q|B)$. À même vitesse, même champ et même valeur absolue de charge, il est proportionnel à la masse : le rayon du proton est environ 1800 fois plus grand. B oublie la masse et A/D oublient le signe de la charge.