Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 2, Automne · 🧮 Calculateur intégré

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 10 unités et 6 travaux pratiques. Ce sont les vrais totaux, pas un programme plus long raccourci.

Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur une page de cours qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.

> Ceci est le plan d'un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n'est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n'y participe.
>
> Son programme suit le second semestre de physique universitaire avec calcul différentiel (électricité et magnétisme, avec une première approche de l'optique). Il s'inspire des thèmes et du niveau de MIT OpenCourseWare 8.02, des cours Ph1b et Ph1c de Caltech, de Georgia Tech PHYS 2212 et du manuel gratuit OpenStax University Physics Volume 2, auquel nous renvoyons partout. Aucun de ces auteurs ou établissements ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque unité est reliée à un travail réel d'énergie propre ou d'observation de la Terre avec une source publique citée (générateurs, panneaux solaires, voitures électriques, réseau électrique, champ magnétique terrestre, météo spatiale, capteurs satellitaires), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant publication, et chaque TP a une version PhET gratuite et une version maison sûre à basse tension.
>
> Suivez-le dans l'ordre. Chaque unité comporte des objectifs, des notions clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices corrigés en détail, des erreurs fréquentes, des cartes mémoire et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

Presque toute l'électricité propre est de l'électromagnétisme en action. Les turbines éoliennes et hydrauliques font tourner des générateurs régis par la loi de Faraday, les panneaux solaires poussent les charges grâce à des champs électriques internes, les voitures électriques transforment le courant en mouvement par des forces magnétiques, et le réseau utilise des transformateurs et la haute tension pour transporter l'énergie avec peu de pertes.

Les ondes électromagnétiques sont aussi notre moyen d'observer la planète : des satellites comme Landsat 9 et GOES-19 lisent la lumière visible, infrarouge et micro-onde pour cartographier cultures, forêts, eaux et tempêtes. Et le champ magnétique terrestre nous protège, tandis que la météo

spatiale venue du Soleil peut induire des courants dans les lignes électriques. Chaque unité se termine par une courte section sourcée. Les valeurs qui ne proviennent pas d'une source sont signalées comme valeurs d'exemple.

Pour les enseignants

Vous pouvez enseigner ce cours, ou laisser un élève le faire seul. Il est gratuit. Saving Planets ne donne ni note ni crédit scolaire.

- Cette page est le cours entier : 10 unités et 6 travaux pratiques (PHYS 210 + PHYS 210L).
- Prévoyez 15 semaines, environ 6 à 9 heures par semaine, y compris les semaines de travaux pratiques.
- Suivez le calendrier de 15 semaines. Lisez l'unité, faites les exercices sur papier, puis ouvrez la réponse. La semaine d'un TP, faites le TP ou la version à la maison.
- Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur la page qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.
- Utilisez Imprimer cette page, ou téléchargez le guide d'étude PDF. La feuille de formules est vers la fin.
- Demandez : en quoi cette unité aide-t-elle les gens et la planète ? Chaque unité a un encadré vert avec un fait sourcé.
- Copiez le modèle de guide enseignant et écrivez le nom de votre classe, le temps dont vous disposez et les questions que vous poserez. Ouvrir le modèle de guide enseignant

Avant de commencer

Prérequis

- Physique I : forces, énergie, quantité de mouvement, mouvement circulaire et oscillations.
- Calcul I et II : dérivées, intégrales, croissance et décroissance exponentielles.
- Vecteurs : composantes, produits scalaire et vectoriel (brièvement enseignés quand nécessaire).
- Le Calcul III aide pour les formes intégrales des lois de Gauss et d'Ampère, mais n'est pas requis.

Comment étudier

- Dessinez d'abord le champ ou le circuit. La plupart des erreurs en E&M sont des erreurs de signe ou de sens.
- Résolvez d'abord avec des symboles, puis remplacez par des nombres en unités SI, et vérifiez les unités du résultat.
- Utilisez la symétrie : avant d'appliquer la loi de Gauss ou d'Ampère, demandez-vous dans quelle direction le champ doit pointer et de quoi il peut dépendre.
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse.

- Prédisez, puis testez dans la simulation PhET. Une prédiction fausse que vous corrigez se retient mieux qu'une bonne intuition.
- Refaites les quiz quelques jours plus tard. La pratique espacée vaut mieux qu'une longue séance.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations PhET gratuites (elles fonctionnent dans un navigateur).
- Un multimètre numérique et quelques piles AA avec un support de piles (basse tension uniquement).
- Un petit assortiment de résistances (100 Ω à 10 kΩ), un condensateur électrolytique de 100 µF ou plus, de tension nominale supérieure à celle des piles, des fils de connexion ou une plaque d'essai.
- Un smartphone avec une application de magnétomètre (la plupart des téléphones ont le capteur), une petite boussole, quelques aimants de réfrigérateur.
- Une boîte transparente en verre ou en plastique remplie d'eau, un pointeur laser de classe 2 ou inférieure ou un faisceau étroit de lampe de poche, un rapporteur.
- Un tableur pour les graphiques et les ajustements.

Programme suggéré sur 15 semaines

Environ 6 à 9 heures par semaine : lecture, exercices et, les semaines de TP, le TP.

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
1	Charge, loi de Coulomb et champs électriques	Charge, loi de Coulomb, superposition	OpenStax UP2 5.1–5.3
2	Charge, loi de Coulomb et champs électriques	Champs électriques, charges continues, lignes de champ ; TP A	UP2 5.4–5.6
3	Théorème de Gauss	Flux et théorème de Gauss ; conducteurs	UP2 6.1–6.4
4	Potentiel électrique et capacité	Énergie potentielle, potentiel, équipotentielles	UP2 7.1–7.5
5	Potentiel électrique et capacité	Capacité, énergie, diélectriques ; TP B	UP2 8.1–8.4
6	Courant, résistance et circuits en courant continu	Courant, résistance, puissance	UP2 9.1–9.5
7	Courant, résistance et circuits en courant continu	Circuits continus, lois de Kirchhoff, circuits RC ; TP C	UP2 10.1–10.5

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
8	Champs et forces magnétiques	Force magnétique, orbites de particules, moteurs ; entraînement au partiel	UP2 11.1–11.5
9	Sources de champs magnétiques : Biot–Savart et Ampère	Biot–Savart, théorème d'Ampère, solénoïdes ; TP D	UP2 12.1–12.7
10	Induction électromagnétique : Faraday et Lenz	Lois de Faraday et de Lenz, générateurs ; TP E	UP2 13.1–13.7
11	Inductance, circuits RL et LC	Inductance, circuits RL et LC	UP2 14.1–14.6
12	Circuits en courant alternatif, transformateurs et réseau électrique	Circuits alternatifs, résonance, puissance, transformateurs	UP2 15.1–15.6
13	Équations de Maxwell, ondes électromagnétiques et optique	Équations de Maxwell, ondes EM, énergie et spectre	UP2 16.1–16.5
14	Équations de Maxwell, ondes électromagnétiques et optique	Optique : réflexion, réfraction, polarisation, lentilles ; TP F	UP3 1.1–1.7, 2.4
15	Révision	Révision et série d'exercices finale	Toutes les unités

Votre progression

Cochez les unités et les TP à mesure que vous les terminez, et faites les quiz. La progression et les scores sont enregistrés uniquement dans ce navigateur et ne nous sont jamais envoyés.

Unités

Charge, loi de Coulomb et champs électriques

Charge électrique, conducteurs et isolants, loi de Coulomb, champ électrique de charges ponctuelles et de distributions continues, lignes de champ, et charges en mouvement dans des champs.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser la loi de Coulomb avec des vecteurs et la superposition.
- Trouver le champ électrique de charges ponctuelles et de distributions de charge simples.
- Tracer des lignes de champ et les interpréter.
- Trouver la force et l'accélération d'une charge dans un champ.

Notions clés

- La charge existe sous deux signes, se conserve et est quantifiée en unités de e = 1.602 × 10^{-19} C.
- Loi de Coulomb : F = k|q_1q_2|/r^2, selon la droite reliant les charges ; les charges de même signe se repoussent.
- Le champ électrique E = F/q est la force par unité de charge. Une charge ponctuelle crée E = kq/r^2, dirigé à l'opposé d'une charge positive.
- Les champs s'additionnent comme des vecteurs (superposition). Pour une charge continue, on somme dE = k dq/r^2 par une intégrale.
- Une charge dans un champ subit F = qE, donc un électron accélère dans le sens opposé à E.

Équations clés

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

F=k(|q_1q_2|)/(r^2), k=1⁄4π_0

Loi de Coulomb

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad E = \frac{k|q|}{r^2}$$

E=(F)/(q), E=(k|q|)/(r^2)

Champ électrique d'une charge ponctuelle

$$\vec{E} = \int \frac{k\,dq}{r^2}\hat{r}$$

```
E=(k dq)/(r^2) r
```

Charge continue

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

```
F=q E
```

Force sur une charge

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Des charges de +3.0 µC et −5.0 µC sont distantes de 0.20 m. Trouvez la force entre elles.

1. $F = k|q_1 q_2|/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times (3.0 \times 10^{-6})(5.0 \times 10^{-6})/0.20^2$.
2. Des signes opposés s'attirent.

Réponse : 3.37 N, attractive.

Exemple 1.2 Trouvez le champ à 0.30 m d'une charge ponctuelle de 2.0 nC.

1. $E = kq/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times 2.0 \times 10^{-9}/0.09$.

Réponse : ≈ 200 N/C, dirigé à l'opposé de la charge.

Exemple 1.3 Des charges de +4.0 nC et −4.0 nC sont distantes de 0.10 m. Trouvez le champ au milieu.

1. Chaque charge est à 0.05 m et donne $E = kq/r^2 = 14380$ N/C.
2. Les deux champs pointent vers la charge négative, donc ils s'additionnent.

Réponse : 28760 N/C (2.88×10^4 N/C) vers la charge négative.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la force électrique entre le proton et l'électron de l'hydrogène ($r = 5.29 \times 10^{-11}$ m).

   $F = ke^2/r^2 \approx 8.24 \times 10^{-8}$ N.

2. Combien de fois la répulsion électrique entre deux protons est-elle plus forte que leur attraction gravitationnelle ?

   $ke^2/(Gm_p^2) \approx 1.23 \times 10^{36}$, indépendamment de la distance.

3. Un électron se trouve dans un champ de 200 N/C. Trouvez la force et l'accélération.

   $F = eE = 3.20 \times 10^{-17}$ N ; $a = F/m_e \approx 3.52 \times 10^{13}$ m/s², opposée à E.

4. Où le champ est-il nul entre +q et +4q distantes de d ?

   $kq/x^2 = 4kq/(d - x)^2$ donne $x = d/3$ depuis +q.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une charge plus grande subit une force plus grande de la part d'une plus petite.
En réalité : Troisième loi de Newton : les forces sont égales et opposées.

Idée reçue : Les lignes de champ sont les trajectoires suivies par les charges.
En réalité : Elles montrent la direction de la force ; une charge en mouvement peut quitter une ligne courbe.

Idée reçue : Le champ est nul partout où il n'y a pas de charge.
En réalité : L'espace vide peut contenir un champ intense ; seule la densité de charge y est nulle.

Cartes mémoire

Charge élémentaire

$e = 1.602 \times 10^{-19}$ C.

Loi de Coulomb

$F = k|q_1q_2|/r^2$.

Champ électrique

$E = F/q$.

Champ d'une charge ponctuelle

$E = kq/r^2$.

Superposition

Les champs de plusieurs charges s'additionnent comme des vecteurs.

Lignes de champ

Partent d'une charge +, finissent sur une charge − ; plus denses signifie plus intense.

Quiz d'autocontrôle

1. Doubler la distance entre deux charges modifie la force de…

×2

×½

×¼

×4

×¼. Inverse du carré.

2. Le champ d’une charge ponctuelle positive pointe…

vers elle

à l’opposé d’elle

en cercles

nulle part

à l’opposé d’elle. Direction de la force sur une charge test positive.

3. Un électron dans un champ dirigé vers l’est accélère vers…

l’est

l’ouest

le nord

pas du tout

l’ouest. F = qE avec q < 0.

4. L’unité SI du champ électrique est…

N/C

C/N

J

T

N/C. Force par charge (aussi V/m).

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Une cellule solaire fonctionne parce que la lumière libère des charges qu'un champ électrique interne sépare ensuite. Le département de l'Énergie des États-Unis explique que la lumière absorbée dans une cellule PV crée des charges électriques qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique interne, d'où un courant. Chaque panneau solaire est une feuille de champs électriques soigneusement conçus.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work) · OpenStax UP2, 5.3 Coulomb's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 5.3 Coulomb's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 5.4 Electric field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-4-electric-field): Champs et superposition.
- OpenStax UP2, 5.5 Fields of charge distributions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-5-calculating-electric-fields-of-charge-distributions): Intégrales pour E.
- PhET: Coulomb's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law): Interactif.

Regarder le cours magistral

Electric Fields (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-2) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d'utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Théorème de Gauss

Flux électrique, théorème de Gauss et utilisation de la symétrie pour trouver les champs de sphères, de fils et de plans ; conducteurs en équilibre électrostatique.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le flux électrique à travers une surface.
- Énoncer le théorème de Gauss et choisir une surface de Gauss adaptée à la symétrie.
- Trouver les champs de distributions sphériques, cylindriques et planes.
- Expliquer pourquoi le champ est nul dans un conducteur et pourquoi la charge se trouve à sa surface.

Notions clés

- Le flux Φ = ∮E·dA compte les lignes de champ traversant une surface.
- Théorème de Gauss : le flux net sortant de toute surface fermée est égal à la charge intérieure divisée par ε_0.
- Le théorème de Gauss est toujours vrai mais n'est utile que si la symétrie rend E constant sur la surface : sphères, longs fils, grands plans.
- À l'extérieur d'une sphère uniformément chargée, le champ est le même que celui d'une charge ponctuelle placée au centre.
- Dans un conducteur à l'équilibre, E = 0 à l'intérieur, la charge excédentaire se trouve en surface, et E juste à l'extérieur est perpendiculaire à la surface.

Équations clés

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\varepsilon_0}$$

```
_E= E· d A=_enc_0
```

Théorème de Gauss

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

```
E=()/(2π_0 r)
```

Fil infini chargé

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

E=(σ)/(2_0)

Grand plan chargé

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Juste à l’extérieur d’un conducteur

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Une surface fermée entoure une charge de 1.0 nC. Trouvez le flux net.

1. $\Phi = Q/\varepsilon_0 = 1.0 \times 10^{-9}/8.854 \times 10^{-12}$; la forme n’a pas d’importance.

Réponse : ≈ 113 N·m²/C.

Exemple 2.2 Un long fil porte 2.0 nC par mètre. Trouvez E à 0.10 m.

1. Utilisez un cylindre : $E(2\pi rL) = \lambda L/\varepsilon_0$, donc $E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r) = 2k\lambda/r$.
2. $E = 2 \times 8.988 \times 10^{9} \times 2.0 \times 10^{-9}/0.10$.

Réponse : ≈ 360 N/C, dirigé radialement vers l’extérieur.

Exemple 2.3 Un grand plan porte $\sigma = 5.0$ μC/m². Trouvez E près de lui.

1. Une boîte cylindrique traversant le plan : $2EA = \sigma A/\varepsilon_0$.

Réponse : $E = \sigma/(2\varepsilon_0) \approx 2.82 \times 10^{5}$ N/C, identique à toute distance près du plan.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une charge de 1.0 μC se trouve sur une sphère métallique de 0.10 m. Trouvez E à 0.50 m du centre et à 0.05 m.

   À l’extérieur : $kQ/r^2 = 3.60 \times 10^{4}$ N/C. Dans le conducteur : 0.

2. Pourquoi une voiture vous protège-t-elle de la foudre ?

   La charge reste sur la surface métallique extérieure, donc le champ intérieur est faible (une cage de Faraday).

3. Un cube entoure un dipôle. Quel est le flux net ?

   Zéro : la charge intérieure est nulle.

4. Comment E créé par un fil chargé décroît-il avec la distance ?

   Comme 1/r, plus lentement que le $1/r^2$ d'une charge ponctuelle.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un flux nul signifie un champ nul partout sur la surface.
En réalité : Seul le total est nul ; le champ peut entrer d'un côté et sortir de l'autre.

Idée reçue : Le théorème de Gauss ne marche que pour des charges symétriques.
En réalité : Il est toujours vrai ; la symétrie le rend simplement facile à utiliser.

Idée reçue : Les charges extérieures à la surface modifient le flux.
En réalité : Elles modifient E sur la surface mais n'ajoutent aucun flux net.

Cartes mémoire

Flux électrique

$\Phi = \oint E \cdot dA$.

Théorème de Gauss

$\Phi = Q_enc/\varepsilon_0$.

Fil chargé

$E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r)$.

Plan chargé

$E = \sigma/(2\varepsilon_0)$.

Conducteur

E = 0 à l'intérieur ; charge en surface.

Cage de Faraday

Un conducteur fermé protège son intérieur.

Quiz d'autocontrôle

1. Le flux net à travers une surface fermée dépend…

de sa forme

de la charge intérieure

de son aire

des charges extérieures

de la charge intérieure. Q_enc/ε_0.

2. Dans un conducteur à l'équilibre, E est…

maximal

zéro

kQ/r^2

σ/ε_0

zéro. Les charges libres se réarrangent jusqu'à E = 0.

3. Près d'un grand plan chargé, E varie avec la distance comme…

$1/r^2$

$1/r$

constant

r

constant. $\sigma/(2\varepsilon_0)$.

4. La meilleure surface de Gauss pour un long fil est…

une sphère

un cube

un cylindre coaxial

un disque plat

un cylindre coaxial. Elle épouse la symétrie.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le théorème de Gauss a un jumeau magnétique : le flux magnétique net à travers toute surface fermée est nul, car il n'existe pas de monopôles magnétiques. Le champ terrestre en est un bon exemple. Selon les National Centers for Environmental Information de la NOAA, plus de 90 % du champ mesuré en surface est engendré dans le noyau externe de la Terre. Chaque ligne de champ qui quitte la planète y revient.

Sur Saving Planets : Météo spatiale

Sources : NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gauss-law)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 6.2 Explaining Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-2-explaining-gausss-law): Le flux et la loi.
- OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law): Sphères, fils, plans.
- OpenStax UP2, 6.4 Conductors in equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-4-conductors-in-electrostatic-equilibrium): Conducteurs.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Cours et séries de problèmes.

Regarder le cours magistral

Gauss's Law I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-3) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d'utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Potentiel électrique et capacité

Énergie potentielle et potentiel, équipotentielles, E à partir de V, condensateurs en série et en parallèle, énergie stockée et diélectriques.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le potentiel et l’énergie potentielle de charges ponctuelles.
- Relier E et V : E = −dV/dx.
- Trouver une capacité et associer des condensateurs.
- Calculer l’énergie stockée et l’effet d’un diélectrique.

Notions clés

- Le potentiel V est l’énergie potentielle par charge (volts = joules par coulomb). Seules les différences comptent.
- Une charge ponctuelle donne V = kq/r ; les potentiels s’additionnent comme des nombres, pas comme des vecteurs.
- Le champ pointe vers les potentiels décroissants : E = −dV/dx. Les équipotentielles sont perpendiculaires aux lignes de champ.
- Un condensateur stocke la charge Q = CV. Un condensateur plan a C = $\varepsilon_0 A/d$.
- Énergie stockée U = ½CV². Un diélectrique de constante κ multiplie C par κ.
- Les capacités en parallèle s’additionnent ; en série, ce sont les inverses qui s’additionnent.

Équations clés

$$V = \frac{kq}{r}, \quad \Delta U = q\,\Delta V$$

V=kq/r, Δ U=q Δ V

Potentiel d’une charge ponctuelle

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$

E_x=-dV/dx

Champ à partir du potentiel

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\kappa \varepsilon_0 A}{d}$$

C=Q/V=(_0A)/(d)

Condensateur plan

$$U = \tfrac{1}{2}CV^2$$

U=12CV^2

Énergie stockée

$$C_{\parallel} = C_1 + C_2, \quad \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

C_=C_1+C_2, 1C_s=1C_1+1C_2

Associations

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Trouvez le potentiel à 0.30 m d'une charge de 2.0 nC.

1. V = kq/r = 8.988 × 10⁹ × 2.0 × 10⁻⁹/0.30.

Réponse : ≈ 59.9 V.

Exemple 3.2 Un électron part du repos et traverse une différence de potentiel de 100 V. Trouvez sa vitesse.

1. eΔV = ½mv².
2. v = √(2 × 1.602 × 10⁻¹⁹ × 100/9.109 × 10⁻³¹).

Réponse : ≈ 5.93 × 10⁶ m/s.

Exemple 3.3 Des armatures de 0.010 m² distantes de 1.0 mm sont reliées à 12 V. Trouvez C, Q et U.

1. C = ε_0A/d = 8.854 × 10⁻¹² × 0.010/0.001 = 88.5 pF.
2. Q = CV = 1.06 nC.
3. U = ½CV² = 6.37 nJ.

Réponse : 88.5 pF, 1.06 nC, 6.37 nJ.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Associez 2 µF et 3 µF en série et en parallèle.

   Série 1.2 µF ; parallèle 5 µF.

2. Remplissez le condensateur de 88.5 pF d’un diélectrique de $\kappa = 3.4$.

   $C = 301$ pF.

3. Un grand supercondensateur de 3000 F est chargé à 2.7 V (valeurs d’exemple). Quelle énergie contient-il ?

   $U = \frac{1}{2}CV^2 \approx 10.9$ kJ, une infime fraction d’une batterie de VE, mais délivrée en quelques secondes.

4. $V = 4x^2$ volts. Trouvez E en $x = 2$ m.

   $E = -dV/dx = -16$ V/m (dirigé vers $-x$).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le potentiel et l’énergie potentielle sont la même chose.
En réalité : $U = qV$; V est par unité de charge.

Idée reçue : Seule une haute tension rend un choc électrique dangereux.
En réalité : C’est le courant dans le corps qui compte ; la tension le pousse à travers la résistance du corps.

Idée reçue : Là où $V = 0$, $E = 0$.
En réalité : À mi-chemin entre $+q$ et $-q$, $V = 0$ mais E est grand.

Cartes mémoire

Potentiel électrique

$V = U/q$, en volts.

Potentiel d’une charge ponctuelle

$V = kq/r$.

Champ à partir du potentiel

$E = -dV/dx$.

Capacité

$C = Q/V$; farads.

Armatures parallèles

$C = \kappa\varepsilon_0 A/d$.

Énergie d’un condensateur

$U = \frac{1}{2}CV^2$.

Électronvolt

1 eV = 1.602×10^{-19} J.

Quiz d’autocontrôle

1. 1 volt équivaut à…

1 J/C

1 C/J

1 N/C

1 W/A²

1 J/C. Énergie par charge.

2. Diviser par deux l’écart entre les armatures rend C…

moitié

double

quatre fois plus grande

inchangée

double. $C = \varepsilon_0 A/d$.

3. Doubler la tension d’un condensateur multiplie l’énergie stockée par…

2

4

½

1

4. $U \propto V^2$.

4. Les équipotentielles coupent les lignes de champ à…

0°

45°

90°

n’importe quel angle

90°. Aucun travail le long d’une équipotentielle.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les voitures électriques stockent l’énergie dans des batteries, pas des condensateurs, car un condensateur contient bien moins d’énergie par kilogramme. Le supercondensateur de l’exercice contient environ 10.9 kJ, soit environ 3.04 wattheures. Les condensateurs sont utiles là où la puissance doit entrer ou sortir en quelques secondes, par exemple pour lisser la sortie de l’électronique de puissance des VE, des onduleurs solaires et des éoliennes.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · OpenStax UP2, 8.3 Energy stored in a capacitor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-3-energy-stored-in-a-capacitor)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 7.2 Electric potential and potential difference (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-2-electric-potential-and-potential-difference): Potentiel.
- OpenStax UP2, 7.3 Calculations of electric potential (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-3-calculations-of-electric-potential): Potentiel de distributions de charge.
- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): Condensateurs.
- OpenStax UP2, 8.4 Capacitor with a dielectric (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-4-capacitor-with-a-dielectric): Diélectriques.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): Interactif.

Regarder le cours magistral

The Electric Potential and Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-5) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d’utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Courant, résistance et circuits en courant continu

Courant et vitesse de dérive, résistivité et loi d'Ohm, puissance, f.é.m. et résistance interne, résistances en série et en parallèle, lois de Kirchhoff et circuits RC.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Relier le courant à la vitesse de dérive et la résistance à la résistivité.
- Utiliser la loi d'Ohm et P = IV.
- Réduire des réseaux série-parallèle et appliquer les lois de Kirchhoff.
- Analyser la charge et la décharge de circuits RC.

Notions clés

- Courant I = dQ/dt ; dans un fil I = nqv_dA, et la vitesse de dérive est minuscule même si les signaux se propagent presque à la vitesse de la lumière.
- Résistance R = ρL/A. La loi d'Ohm V = IR vaut pour les matériaux ohmiques.
- Puissance P = IV = I²R = V²/R.
- Les résistances en série s'additionnent ; en parallèle, ce sont les inverses.
- Kirchhoff : la somme des courants entrant dans un nœud est nulle ; la somme des variations de tension le long d'une maille est nulle.
- Un circuit RC se charge selon V = V_0(1 − e^(−t/RC)) ; la constante de temps est τ = RC.

Équations clés

$$I = \frac{dQ}{dt} = nqv_dA$$

I=dQ/dt=nqv_dA

Courant et vitesse de dérive

$$R = \rho\frac{L}{A}, \quad V = IR$$

R=ρL/A, V=IR

Résistance et loi d'Ohm

$$P = IV = I^2R$$

P=IV=I^2R

Puissance électrique

$$\sum I = 0, \quad \sum \Delta V = 0$$

I=0, Δ V=0

Lois de Kirchhoff

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

V_C=V_0(1-e^-t/RC)

Charge d'un condensateur

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Trouvez la résistance de 100 m de fil de cuivre de 1.0 mm de diamètre ($\rho = 1.68 \times 10^{-8}$ Ω·m).

1. $A = \pi(0.5 \times 10^{-3})^2 = 7.85 \times 10^{-7}$ m².
2. $R = \rho L/A = 1.68 \times 10^{-8} \times 100/7.85 \times 10^{-7}$.

Réponse : ≈ 2.14 Ω.

Exemple 4.2 Deux piles (12 V et 6 V) et trois résistances : la maille 1 contient 12 V, R_1 = 2 Ω et la résistance commune R_3 = 6 Ω ; la maille 2 contient 6 V, R_2 = 3 Ω et R_3. Trouvez les courants.

1. Nœud : $I_3 = I_1 + I_2$.
2. Maille 1 : $12 = 2I_1 + 6I_3$. Maille 2 : $6 = 3I_2 + 6I_3$.
3. Résolution : I_1 = 2 A, I_2 = −0.667 A, I_3 = 1.33 A.

Réponse : I_1 = 2 A ; I_2 = −0.667 A (le signe moins signifie que la pile de 12 V pousse le courant à rebours dans celle de 6 V et la recharge) ; I_3 = 1.33 A.

Exemple 4.3 Un condensateur de 100 µF se charge sur une pile de 9 V à travers 10 kΩ. Trouvez τ et la tension après 1 s et 3 s.

1. $\tau = RC = 10^4 \times 10^{-4} = 1.0$ s.
2. V(1) = 9(1 − e^(−1)); V(3) = 9(1 − e^(−3)).

Réponse : 1.0 s; 5.69 V; 8.55 V.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une ampoule de 60 W fonctionne sous 120 V. Trouvez son courant et sa résistance.

   I = 0.5 A; R = 240 Ω.

2. Trouvez l'équivalent de 6 Ω et 3 Ω en parallèle, puis le courant fourni par 12 V à cette paire en série avec 4 Ω.

   2 Ω; I = 12/6 = 2 A.

3. Trouvez la vitesse de dérive pour 1 A dans le fil de cuivre de 1.0 mm ($n = 8.5 \times 10^{28}$ m^{-3}).

   $v_d = I/(neA) \approx 9.4 \times 10^{-5}$ m/s, environ un tiers de mètre par heure.

4. Un panneau solaire a 60 cellules en série, chacune donnant 0.6 V (valeurs d'exemple). Quelle est la tension du panneau ? Comment doubler plutôt le courant ?

   36 V ; mettre deux panneaux en parallèle.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le courant est consommé dans une résistance.
En réalité : La charge se conserve ; c'est l'énergie qui est convertie, pas le courant.

Idée reçue : Les électrons filent dans les fils presque à la vitesse de la lumière.
En réalité : Le signal oui ; les électrons dérivent à des fractions de millimètre par seconde.

Idée reçue : Une pile fournit un courant constant.
En réalité : Elle fournit une f.é.m. à peu près constante ; le courant dépend du circuit.

Cartes mémoire

Courant

$I = dQ/dt$; ampères.

Loi d'Ohm

$V = IR$.

Résistivité

$R = \rho L/A$.

Puissance

$P = IV = I^2R = V^2/R$.

Loi des nœuds

Loi des mailles

$\Sigma I = 0$.

$\Sigma \Delta V = 0$.

Constante de temps RC

$\tau = RC$.

Quiz d’autocontrôle

1. Doubler la longueur d’un fil double sa…

résistivité

résistance

courant

section

résistance. $R = \rho L/A$.

2. Deux résistances égales R en parallèle donnent…

2R

R

R/2

R^2

R/2. 1/R + 1/R.

3. Après une constante de temps, un condensateur en charge est à…

37%

50%

63%

100%

63%. 1 − e^(−1).

4. La loi des mailles de Kirchhoff découle de la conservation de…

la charge

l’énergie

la quantité de mouvement

la masse

l’énergie. Le potentiel est une énergie par charge.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Un panneau solaire est un circuit à courant continu. Les cellules sont câblées en série pour augmenter la tension et les panneaux en parallèle pour augmenter le courant, exactement comme dans les exercices. Une cellule ne pousse les charges que dans un sens, donc la sortie d’un panneau est un courant continu ; il doit être converti en courant alternatif avant de rejoindre le réseau (unité 9). Le département de l’Énergie des États-Unis explique le fonctionnement des cellules elles-mêmes.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre

Sources : U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff’s rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 9.1 Electrical current (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-1-electrical-current): Courant.
- OpenStax UP2, 9.3 Resistivity and resistance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-3-resistivity-and-resistance): Résistance.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): Associations.
- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): Circuits RC.
- PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): Interactif.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Champs et forces magnétiques

La force magnétique sur les charges en mouvement et les courants, le mouvement circulaire des particules chargées, le couple sur une spire de courant et le fonctionnement des moteurs électriques.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser F = qv × B avec la règle de la main droite.
- Trouver le rayon et la fréquence de l'orbite circulaire d'une particule chargée.
- Trouver la force sur un fil parcouru par un courant et le couple sur une spire.
- Expliquer comment un moteur à courant continu transforme le courant en rotation.

Notions clés

- Un champ magnétique agit sur une charge en mouvement : F = qv × B, perpendiculaire à v et à B. Il ne travaille pas, donc il change la direction, pas la vitesse.
- Une charge se déplaçant perpendiculairement à un champ uniforme décrit un cercle de rayon r = mv/(|q|B) à la fréquence cyclotron f = |q|B/(2πm), indépendante de la vitesse.
- Un fil parcouru par un courant I dans un champ B subit F = IL × B.
- Une spire de courant a un moment magnétique μ = NIA et subit un couple τ = μB sin θ. C'est ce couple qui fait tourner un moteur électrique.
- Des champs E et B croisés ne laissent passer que les particules de vitesse v = E/B (un filtre de vitesse).

Équations clés

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

F=q v× B

Force magnétique sur une charge

$$r = \frac{mv}{|q|B}, \quad f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

r=(mv)/(|q|B), f=(|q|B)/(2π m)

Mouvement circulaire dans un champ

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$$

F=I L× B

Force sur un courant

$$\tau = NIAB\sin\theta$$

τ=NIABθ

Couple sur une spire

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Un proton du vent solaire se déplace à 400 km/s perpendiculairement à un champ de 50 μT (valeurs d'exemple). Trouvez le rayon de son cercle.

1. r = mv/(eB) = 1.673 × 10^{-27} × 4 × 10^{5}/(1.602 × 10^{-19} × 5 × 10^{-5}).

Réponse : ≈ 83.5 m. Les particules chargées s'enroulent étroitement autour des lignes de champ au lieu de les traverser.

Exemple 5.2 Un fil de 0.20 m parcouru par 200 A est perpendiculaire à un champ de 0.50 T. Trouvez la force.

1. F = ILB = 200 × 0.20 × 0.50.

Réponse : 20 N.

Exemple 5.3 Une bobine de moteur a 100 spires d'aire 0.01 m^2 parcourues par 2 A dans un champ de 0.5 T. Trouvez le couple maximal.

1. τ = NIAB = 100 × 2 × 0.01 × 0.5.

Réponse : 1.0 N·m, lorsque le plan de la bobine est parallèle au champ.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la fréquence cyclotron d'un proton dans un champ de 1 T.

   f = eB/(2πm_p) ≈ 15.2 MHz.

2. Un électron se déplace à 1 × 10^{5} m/s perpendiculairement à un champ de 50 μT. Trouvez r.

$r = m_e v/(eB) \approx 1.14$ cm.

3. Quelle vitesse traverse sans déviation $E = 10^4$ V/m et $B = 0.1$ T ?

   $v = E/B = 10^5$ m/s.

4. Un champ magnétique statique peut-il accélérer une charge ?

   Non : $F \perp v$, donc il ne travaille pas.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La force magnétique est dirigée selon le champ.
En réalité : Elle est perpendiculaire à B et à v.

Idée reçue : Une charge au repos subit une force magnétique.
En réalité : Seules les charges en mouvement en subissent.

Idée reçue : Une plus grande vitesse donne une fréquence cyclotron plus élevée.
En réalité : Le rayon augmente avec la vitesse, mais pas la fréquence.

Cartes mémoire

Force de Lorentz

$F = q(E + v \times B)$.

Règle de la main droite

Doigts selon v, les replier vers B, pouce selon F pour q positive.

Rayon cyclotron

$r = mv/(qB)$.

Force sur un fil

$F = ILB \sin \theta$.

Moment magnétique

$\mu = NIA$.

Couple moteur

$\tau = NIAB \sin \theta$.

Quiz d’autocontrôle

1. La force magnétique sur une charge se déplaçant parallèlement à B est…

maximal

zéro

qvB

qE

zéro. sin 0 = 0.

2. L’unité SI du champ magnétique est le…

gauss

tesla

weber

henry

tesla. 1 T = 1 N/(A·m); 1 G = 10^{-4} T.

3. Doubler la vitesse d’une particule chargée dans un B uniforme modifie son rayon de…

×½

×1

×2

×4

×2. r = mv/(qB).

4. Le couple sur une bobine de moteur est maximal quand son plan est…

perpendiculaire à B

parallèle à B

à 30°

n’importe quel angle

parallèle à B. μ est alors perpendiculaire à B.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les voitures électriques fonctionnent grâce au couple magnétique : le courant dans les bobines du moteur se trouve dans un champ magnétique, et $\tau = NIAB \sin\theta$ fait tourner les roues. Selon FuelEconomy.gov, les VE convertissent plus de 77 % de l'énergie électrique du réseau en puissance aux roues, alors que les voitures à essence ne convertissent qu'environ 12 % à 30 % de l'énergie de leur carburant.

Le champ terrestre, compris entre environ 25 et 65 µT en surface selon la NOAA, courbe les particules chargées du vent solaire en spirales serrées, comme dans le premier exemple résolu. Les particules ainsi piégées sont guidées le long des lignes de champ vers les pôles, où elles illuminent les aurores.

Sur Saving Planets : Météo spatiale

Sources : FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 11.3 Motion of a charged particle in a magnetic field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-3-motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field): Mouvement circulaire.
- OpenStax UP2, 11.4 Magnetic force on a current-carrying conductor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-4-magnetic-force-on-a-current-carrying-conductor): Force sur les fils.
- OpenStax UP2, 11.5 Force and torque on a current loop (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-5-force-and-torque-on-a-current-loop): Moteurs.
- PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets): Interactif.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Sources de champs magnétiques : Biot–Savart et Ampère

Comment les courants créent des champs magnétiques : loi de Biot–Savart, champs de fils, de spires et de solénoïdes, forces entre courants parallèles et théorème d'Ampère.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser la loi de Biot–Savart pour un fil et une spire.
- Appliquer le théorème d'Ampère aux fils et aux solénoïdes.
- Trouver la force entre des courants parallèles.
- Comparer les champs artificiels au champ terrestre.

Notions clés

- Biot–Savart : chaque élément de courant I dl crée dB = ($\mu_0/4\pi$) I dl × r̂/r². Les lignes de champ entourent le courant (règle de la main droite : pouce selon I, les doigts s'enroulent avec B).
- Un long fil rectiligne : B = $\mu_0 I/(2\pi r)$. Au centre d'une spire de rayon R : B = $\mu_0 I/(2R)$.
- Théorème d'Ampère : $\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$. Comme le théorème de Gauss, il est plus simple avec de la symétrie.
- Dans un long solénoïde, B = $\mu_0 nI$, uniforme, où n est le nombre de spires par mètre.
- Des courants parallèles s'attirent ; des courants opposés se repoussent, avec une force par longueur $\mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$.

Équations clés

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,d\vec{l}\times\hat{r}}{r^2}$$

```
d B=(μ_0)/(4π)(I d l× r)/(r^2)
```

Loi de Biot–Savart

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

```
B=(μ_0I)/(2π r)
```

Long fil rectiligne

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

```
B· d l=μ_0I_enc
```

Théorème d’Ampère

$$B = \mu_0 n I$$

B=μ_0nI

Long solénoïde

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

FL=(μ_0I_1I_2)/(2π d)

Fils parallèles

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Une ligne de transport porte 1000 A (valeur d’exemple). Trouvez B à 20 m et comparez-le au champ terrestre.

1. B = $\mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000/(2\pi \times 20)$.

Réponse : 10 μT, moins que le champ terrestre de 25–65 μT en surface.

Exemple 6.2 Un solénoïde a 1000 spires par mètre et porte 2 A. Trouvez B à l’intérieur.

1. B = $\mu_0 nI = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000 \times 2$.

Réponse : ≈ 2.51 mT, environ 50 fois le champ terrestre.

Exemple 6.3 Deux fils parallèles distants de 1 cm portent chacun 10 A dans le même sens. Trouvez la force par mètre.

1. F/L = $\mu_0 I_1 I_2/(2\pi d) = 4\pi \times 10^{-7} \times 100/(2\pi \times 0.01)$.

Réponse : 2.0 mN/m, attractive.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez B au centre d’une spire de 5 cm de rayon parcourue par 5 A.

$B = \mu_0 I/(2R) \approx 62.8\ \mu T$.

2. Un fil porte 2 A. Trouvez B à 1, 2 et 4 cm.

   40, 20 et 10 µT : divisé par deux à chaque doublement de la distance.

3. Utilisez le théorème d'Ampère pour trouver B dans un fil épais de rayon a, en r < a (courant uniforme).

   $B(2\pi r) = \mu_0 I\, r^2/a^2$, donc $B = \mu_0 I r/(2\pi a^2)$, croissant linéairement depuis le centre.

4. Que vaut B à l'extérieur d'un tore idéal ?

   Zéro : le contour n'enlace aucun courant net.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les lignes de champ magnétique commencent et finissent sur des pôles.
En réalité : Elles forment des boucles fermées ; il n'y a pas de monopôles.

Idée reçue : Le théorème d'Ampère donne B pour n'importe quel courant.
En réalité : Il est toujours vrai, mais ne donne B directement qu'avec de la symétrie.

Idée reçue : Le champ d'un fil est dirigé le long du fil.
En réalité : Il tourne autour du fil.

Cartes mémoire

Biot–Savart

$dB = (\mu_0/4\pi)\, I\, dl \times \hat{r}/r^2$.

Champ d'un fil

$B = \mu_0 I/(2\pi r)$.

Centre d'une spire

$B = \mu_0 I/(2R)$.

Théorème d'Ampère

$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$.

Solénoïde

$B = \mu_0 n I$.

Courants parallèles

Même sens : attraction.

Quiz d'autocontrôle

1. Le B d'un long fil décroît avec la distance comme…

$1/r^2$

$1/r$

constant

r

$1/r$. $\mu_0 I/(2\pi r)$.

2. Dans un long solénoïde, B dépend…

du rayon

du nombre de spires par mètre et du courant

de la longueur seulement

de la distance à l'axe

du nombre de spires par mètre et du courant. $B = \mu_0 nI$.

3. Deux fils parcourus par des courants de sens opposés…

s'attirent

se repoussent

ne subissent aucune force

se tordent

se repoussent. Des courants opposés se repoussent.

4. μ_0 vaut environ…

8.85×10^{-12}

1.26×10^{-6}

9×10^{9}

3×10^{8}

1.26×10^{-6}. $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le champ propre de la Terre est créé par des courants : la NOAA explique que plus de 90 % de ce champ est engendré dans le noyau externe par ce qu'elle appelle la dynamo interne de la Terre, une matière conductrice en mouvement qui porte des courants. La loi de Biot–Savart fait le lien entre ces courants et le champ que lit une boussole. Le World Magnetic Model de la NOAA décrit ce champ principal.

Sur Saving Planets : Météo spatiale

Sources : NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law): Biot–Savart.
- OpenStax UP2, 12.5 Ampère's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-5-amperes-law): Théorème d'Ampère.
- PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass): Interactif.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Cours et séries de problèmes.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Induction électromagnétique : Faraday et Lenz

Flux magnétique, loi de Faraday, loi de Lenz, f.é.m. de mouvement, champs électriques induits, courants de Foucault et les générateurs des centrales éoliennes et hydrauliques.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le flux magnétique et la f.é.m. due à un flux variable.
- Utiliser la loi de Lenz pour trouver le sens du courant induit.
- Trouver la f.é.m. de mouvement d’une tige mobile.
- Calculer la sortie d’un alternateur et la puissance d’une centrale hydraulique.

Notions clés

- Flux magnétique Φ_B = ∫B·dA, en webers.
- Loi de Faraday : un flux variable à travers une bobine de N spires induit une f.é.m. ε = −N dΦ_B/dt.
- Loi de Lenz (le signe moins) : le courant induit s’oppose à la variation de flux qui l’a créé, ce qui traduit la conservation de l’énergie.
- Une tige de longueur L se déplaçant à v à travers B a une f.é.m. de mouvement ε = BLv.
- Une bobine tournant à la vitesse angulaire ω dans B donne ε = NBAω sin ωt : un courant alternatif. La faire tourner demande un travail mécanique, et c’est ainsi que les générateurs convertissent le mouvement en énergie électrique.

Équations clés

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

_B= B· d A

Flux magnétique

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

=-N(d_B)/(dt)

Loi de Faraday

$$\varepsilon = BLv$$

=BLv

F.é.m. de mouvement

$$\varepsilon(t) = NBA\omega \sin \omega t$$

(t)=NBAωω t

Alternateur

$$P = \eta \rho g Q h$$

P=ρ gQh

Hydroélectricité

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 La bobine d’un alternateur a 100 spires d’aire 0.04 m² et tourne à 60 tr/s dans un champ de 0.5 T. Trouvez la f.é.m. crête.

1. ω = 2π × 60 = 377 rad/s.
2. ε_max = NBAω = 100 × 0.5 × 0.04 × 377.

Réponse : ≈ 754 V.

Exemple 7.2 Une bobine de 200 spires d’aire 0.01 m² voit B passer de 0 à 0.3 T en 0.5 s. Trouvez la f.é.m. moyenne.

1. ΔΦ = BA = 0.003 Wb par spire.
2. ε = NΔΦ/Δt = 200 × 0.003/0.5.

Réponse : 1.2 V.

Exemple 7.3 Une centrale hydraulique turbine 100 m³/s sous une chute de 50 m avec un rendement de 90 % (valeurs d’exemple). Trouvez sa puissance.

1. P = ηρgQh = 0.9 × 1,000 × 9.81 × 100 × 50.

Réponse : ≈ 44.1 MW.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une tige de 0.2 m se déplace à 3 m/s à travers un champ de 0.5 T. Trouvez la f.é.m.

   BLv = 0.3 V.

2. Le pôle nord d'un aimant s'approche d'une spire. Dans quel sens circule le courant induit, vu depuis l'aimant ?

   Sens antihoraire, créant une face nord qui repousse l'aimant qui approche.

3. Pourquoi est-il plus difficile de faire tourner un générateur quand des lampes sont allumées ?

   Le courant dans la bobine subit un couple magnétique qui s'oppose au mouvement (Lenz) ; c'est de là que vient l'énergie électrique.

4. Doubler la vitesse de rotation d'un générateur modifie sa f.é.m. crête de… ?

   ×2 : ε_max = NBAω.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un champ intense mais constant induit un courant.
En réalité : Seul un flux variable induit une f.é.m.

Idée reçue : La loi de Lenz s'oppose au champ.
En réalité : Elle s'oppose à la variation du flux.

Idée reçue : Les générateurs créent de l'énergie.
En réalité : Ils convertissent un travail mécanique en énergie électrique.

Cartes mémoire

Flux magnétique

$\Phi = BA \cos\theta$; webers.

Loi de Faraday

$\varepsilon = -N \, d\Phi/dt$.

Loi de Lenz

Le courant induit s'oppose à la variation.

F.é.m. de mouvement

$\varepsilon = BLv$.

Générateur

$\varepsilon = NBA\omega \sin \omega t$.

Courants de Foucault

Boucles induites dans un métal massif ; utilisées pour le freinage.

Quiz d’autocontrôle

1. La loi de Faraday relie la f.é.m. au…

- flux
- taux de variation du flux
- courant
- résistance

taux de variation du flux. $\varepsilon = -N\, d\Phi/dt$.

2. Le signe moins dans la loi de Faraday est…

- Loi d’Ohm
- Loi de Lenz
- Théorème de Gauss
- une simple convention

Loi de Lenz. S’oppose à la variation.

3. Une bobine tournant dans un champ constant produit…

- DC
- AC
- aucune f.é.m.
- une charge statique

AC. $\varepsilon \propto \sin \omega t$.

4. L’unité SI du flux magnétique est le…

- tesla
- weber

henry

farad

weber. 1 Wb = 1 T·m².

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'éolien et l'hydraulique, c'est la loi de Faraday. Le département de l'Énergie des États-Unis explique que le vent fait tourner les pales d'une turbine autour d'un rotor, qui entraîne un générateur produisant de l'électricité, et que les centrales hydroélectriques utilisent des turbines et des générateurs pour convertir l'énergie cinétique de l'eau courante en électricité pour le réseau.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : DOE des États-Unis : comment fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 13.1 Faraday's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-1-faradays-law): Faraday.
- OpenStax UP2, 13.2 Lenz's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-2-lenzs-law): Lenz.
- OpenStax UP2, 13.3 Motional EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-3-motional-emf): Conducteurs en mouvement.
- OpenStax UP2, 13.6 Electric generators and back EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-6-electric-generators-and-back-emf): Générateurs.
- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): Interactif.

Regarder le cours magistral

Lenz's and Faraday's Laws (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-11) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d'utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

J'ai terminé cette unité

Inductance, circuits RL et LC

Inductance mutuelle et auto-inductance, énergie stockée dans les champs magnétiques, circuits RL et leur constante de temps, et oscillations LC.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver l'auto-inductance d'un solénoïde et la f.é.m. d'une bobine.
- Analyser la croissance et la décroissance du courant dans les circuits RL.
- Calculer l'énergie d'une bobine et la densité d'énergie magnétique.
- Trouver la fréquence d'un oscillateur LC.

Notions clés

- Un courant variable dans une bobine induit une f.é.m. dans une autre : $\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$ (inductance mutuelle).
- Une bobine s'oppose aux variations de son propre courant : $\varepsilon = -L\, dI/dt$. Un long solénoïde a $L = \mu_0 N^2 A/l$.
- Dans un circuit RL, le courant croît selon $I = (\varepsilon/R)(1 - e^{\wedge}(-t/\tau))$ avec $\tau = L/R$.
- Une bobine stocke $U = \tfrac{1}{2}LI^2$; tout champ magnétique stocke une densité d'énergie $u = B^2/(2\mu_0)$.
- Un circuit LC échange l'énergie entre condensateur et bobine à $\omega = 1/\sqrt{(LC)}$, le jumeau électrique d'une masse au bout d'un ressort.

Équations clés

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

=-LdI/dt, L=(μ_0N^2A)/(l)

Auto-inductance

$$I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right),\ \tau = \frac{L}{R}$$

I=()/(R)(1-e^-t/τ),\ τ= LR

Circuit RL

$$U = \tfrac{1}{2}LI^2, \quad u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

U=12LI^2, u_B=(B^2)/(2μ_0)

Énergie magnétique

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Oscillation LC

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Un solénoïde a 500 spires, une section de 1.0×10^{-3} m² et une longueur de 0.25 m. Trouvez L, puis τ avec une résistance de 10 Ω.

1. $L = \mu_0 N^2 A/l = 4\pi \times 10^{-7} \times 250{,}000 \times 10^{-3}/0.25 = 1.26$ mH.
2. $\tau = L/R = 0.126$ ms.

Réponse : 1.26 mH; 0.126 ms.

Exemple 8.2 Quelle énergie cette bobine stocke-t-elle à 2 A ?

1. $U = \tfrac{1}{2}LI^2 = \tfrac{1}{2} \times 1.257 \times 10^{-3} \times 4$.

Réponse : ≈ 2.51 mJ.

Exemple 8.3 Trouvez la fréquence d'oscillation d'une bobine de 10 mH avec un condensateur de 1 µF.

1. $f = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-8})})$.

Réponse : ≈ 1.59 kHz.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Deux bobines ont M = 0.01 H. Le courant dans l'une varie de 100 A/s. Trouvez la f.é.m. dans l'autre.

   1 V.

2. Quelle fraction de son courant final un circuit RL atteint-il après 1τ et 3τ ?

   63 % et 95 %.

3. Trouvez la densité d’énergie magnétique du champ terrestre de 50 μT.

   $B^2/(2\mu_0) \approx 9.9 \times 10^{-4}$ J/m³.

4. Pourquoi couper une charge inductive peut-il provoquer une étincelle ?

   Arrêter I rapidement rend L dI/dt énorme.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une bobine s’oppose au courant.
En réalité : Elle s’oppose aux variations du courant ; en continu permanent, c’est juste un fil.

Idée reçue : Les bobines stockent l’énergie dans la charge.
En réalité : Dans le champ magnétique.

Idée reçue : Les oscillations LC durent éternellement.
En réalité : La résistance réelle les amortit (un circuit RLC, unité 9).

Cartes mémoire

Auto-inductance

$\varepsilon = -L\, dI/dt$.

Inductance mutuelle

$\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$.

Inductance d’un solénoïde

$L = \mu_0 N^2 A/l$.

Constante de temps RL

$\tau = L/R$.

Énergie d’une bobine

$U = \frac{1}{2} L I^2$.

Fréquence LC

$\omega = 1/\sqrt{(LC)}$.

Quiz d’autocontrôle

1. L’unité SI de l’inductance est le…

farad

henry

tesla

ohm

henry. 1 H = 1 V·s/A.

2. Doubler le nombre de spires d'un solénoïde multiplie L par…

2

4

½

1

4. $L \propto N^2$.

3. La constante de temps RL est…

RL

L/R

R/L

√(LC)

L/R. $\tau = L/R$.

4. Un circuit LC est l'analogue électrique…

le frottement

d'une masse au bout d'un ressort

d'un corps en chute

d'un levier

d'une masse au bout d'un ressort. L'énergie fait des allers-retours.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La météo spatiale, c'est de l'induction à l'échelle planétaire. Le Space Weather Prediction Center de la NOAA explique que les orages géomagnétiques créent des courants géomagnétiquement induits nuisibles dans le réseau électrique et les pipelines, ainsi que de magnifiques aurores. Ces orages sont provoqués par des éjections de masse coronale qui, selon la NOAA, quittent le Soleil à des vitesses allant de moins de 250 km/s à près de 3000 km/s ; les plus rapides dirigées vers la Terre arrivent en à peine 15 à 18 heures.

Sur Saving Planets : Météo spatiale · Solar Orbiter

Sources : NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms) · NOAA Space Weather Prediction Center: Coronal mass ejections (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 14.1 Mutual inductance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-1-mutual-inductance): Inductance mutuelle.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): Bobines.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): Circuits RL.
- OpenStax UP2, 14.5 Oscillations in an LC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-5-oscillations-in-an-lc-circuit): Circuits LC.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Circuits en courant alternatif, transformateurs et réseau électrique

Courant alternatif, valeurs efficaces, réactance et impédance, phaseurs, résonance RLC, facteur de puissance, transformateurs, et pourquoi le réseau transporte l'énergie à haute tension.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Passer des valeurs crêtes aux valeurs efficaces et inversement.
- Trouver la réactance, l'impédance, le déphasage et le courant d'un circuit RLC série.
- Calculer la puissance moyenne et le facteur de puissance.
- Utiliser les rapports de transformation et expliquer le transport à haute tension.

Notions clés

- Le courant alternatif domestique est sinusoïdal ; les appareils de mesure lisent des valeurs efficaces, avec $V_{rms} = V_0/\sqrt{2}$.
- Les bobines ont une réactance $X_L = \omega L$ et les condensateurs $X_C = 1/(\omega C)$. Dans un circuit RLC série, $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.
- Le courant est en avance ou en retard sur la tension de φ avec $\tan\varphi = (X_L - X_C)/R$. La puissance moyenne est $P = I_{rms} V_{rms} \cos\varphi$; $\cos\varphi$ est le facteur de puissance.
- À la résonance $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, $X_L = X_C$ et le courant est maximal.
- Un transformateur idéal conserve la puissance : $V_2/V_1 = N_2/N_1$ et $I_2/I_1 = N_1/N_2$. Il ne fonctionne qu'en alternatif, par induction mutuelle.
- Les pertes en ligne valent I^2R. Transporter la même puissance à une tension 10 fois plus grande divise le courant par 10 et les pertes par 100.

Équations clés

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

V_rms=(V_0)/(2)

Valeur efficace

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

X_L=ω L, X_C=1ω C

Réactance

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},\ \tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

`Z=^2+(X_L-X_C)^2,\ =(X_L-X_C)/(R)`

Impédance et déphasage

$$P = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos\varphi$$

`P=I_rmsV_rms`

Puissance moyenne

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

`(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)`

Transformateur

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R$$

`P_loss=I^2R=(P/V)^2R`

Pertes en ligne

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Un circuit série a R = 20 Ω, L = 0.1 H et C = 100 µF sous 120 V efficaces à 60 Hz. Trouvez l'impédance, le courant, le déphasage et la puissance.

1. $X_L = 2\pi \times 60 \times 0.1 = 37.7\ \Omega$; $X_C = 1/(2\pi \times 60 \times 10^{-4}) = 26.5\ \Omega$.
2. $Z = \sqrt{(20^2 + 11.2^2)} = 22.9\ \Omega$; $I = 120/22.9 = 5.24$ A.
3. $\tan\varphi = 11.2/20$, $\varphi = 29.2°$; $P = I^2R = 549$ W.

Réponse : 22.9 Ω, 5.24 A, le courant est en retard de 29.2° (facteur de puissance 0.873), 549 W.

Exemple 9.2 Transportez 100 MW sur une ligne de 10 Ω de résistance à 345 kV puis à 34.5 kV. Comparez les pertes.

1. 345 kV : I = 290 A, pertes = I^2R = 0.84 MW (0.84 %).
2. 34.5 kV : I = 2899 A, pertes = 84 MW.

Réponse : 0.84 MW contre 84 MW. Une tension dix fois plus grande donne cent fois moins de pertes, c’est pourquoi les longues lignes fonctionnent à des centaines de kilovolts.

Exemple 9.3 Un transformateur de poteau abaisse 7200 V à 240 V (valeurs d’exemple). Trouvez le rapport de spires et le courant primaire quand le secondaire fournit 30 A.

1. $N_1/N_2 = 7{,}200/240 = 30$.
2. $I_1 = I_2/30$.

Réponse : 30:1; 1.0 A.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la tension crête de 120 V efficaces.

   169.7 V.

2. Trouvez la fréquence de résonance du circuit RLC ci-dessus.

   $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) \approx 50.3$ Hz.

3. Pourquoi un transformateur ne peut-il pas élever une tension continue ?

   Un courant constant crée un flux constant, qui n’induit aucune f.é.m.

4. Que devient X_C quand la fréquence augmente ?

   Elle diminue : les condensateurs laissent passer les hautes fréquences.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La valeur efficace est la tension moyenne.
En réalité : La moyenne d’une sinusoïde est nulle ; la valeur efficace est la racine de la moyenne du carré.

Idée reçue : Un transformateur crée de la puissance.
En réalité : Il échange tension contre courant ; puissance de sortie ≤ puissance d’entrée.

Idée reçue : Les impédances s’additionnent comme des résistances.
En réalité : Elles s’additionnent comme des vecteurs (phaseurs), pas comme de simples nombres.

Cartes mémoire

RMS

$V_{rms} = V_0/\sqrt{2}$.

Réactance inductive

$X_L = \omega L$.

Réactance capacitive

$X_C = 1/(\omega C)$.

Impédance

$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}$.

Facteur de puissance

$\cos \varphi = R/Z$.

Transformateur

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

Pertes en ligne

$I^2R = (P/V)^2R$.

Quiz d’autocontrôle

1. À la résonance d’un circuit RLC série…

$X_L = X_C$

$Z = 0$

$I = 0$

$R = 0$

$X_L = X_C$. Les réactances s’annulent, $Z = R$.

2. Multiplier la tension de transport par 10 modifie les pertes en ligne de…

×10

×1/10

×1/100

×100

×1/100. Pertes ∝ I^2 ∝ $1/V^2$.

3. Un transformateur élévateur a…

$N_2 > N_1$

$N_2 < N_1$

$N_2 = N_1$

pas de secondaire

$N_2 > N_1$. $V_2/V_1 = N_2/N_1$.

4. Un facteur de puissance de 1 signifie…

courant et tension en phase

aucun courant

bobine pure

condensateur pur

courant et tension en phase. cos 0 = 1.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'Energy Information Administration des États-Unis estime que les pertes de transport et de distribution ont représenté en moyenne environ 5 % de l'électricité acheminée par le réseau américain de 2018 à 2022. L'EIA décrit le réseau comme des milliers de miles de lignes à haute tension et des millions de miles de lignes à basse tension. La haute tension pour la distance, puis des transformateurs pour abaisser à des niveaux sûrs près des clients : c'est l'exemple résolu ci-dessus à l'échelle nationale. Chaque point de pourcentage économisé signifie moins de combustible brûlé ou plus d'énergie propre livrée.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · U.S. EIA: Delivery to consumers (the power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-t

o-consumers.php)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits): Bases du courant alternatif.
- OpenStax UP2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Impédance.
- OpenStax UP2, 15.4 Power in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-4-power-in-an-ac-circuit): Facteur de puissance.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): Transformateurs.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Interactif.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Équations de Maxwell, ondes électromagnétiques et optique

Le courant de déplacement et les quatre équations de Maxwell, la lumière comme onde électromagnétique, l'énergie et la quantité de mouvement de la lumière, le spectre, et une introduction à l'optique : réflexion, réfraction, réflexion totale interne, polarisation et lentilles minces.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Énoncer les équations de Maxwell et le rôle du courant de déplacement.
- Établir $c = 1/\sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)}$ et relier f, λ et l'énergie du photon.
- Calculer l'intensité, les amplitudes des champs et la pression de radiation.
- Utiliser la loi de Snell-Descartes, l'angle critique, la loi de Malus et la relation de conjugaison des lentilles minces.

Notions clés

- Maxwell a ajouté le courant de déplacement $\varepsilon_0 \, d\Phi_E/dt$ au théorème d'Ampère. Avec lui, les quatre équations (Gauss pour E et B, Faraday, Ampère–Maxwell) prédisent des ondes.
- Ces ondes se propagent à $c = 1/\sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)} = 3.00 \times 10^8$ m/s, avec E ⊥ B ⊥ direction de propagation et E = cB. La lumière est l'une de ces ondes.
- Les ondes transportent de l'énergie, intensité $I = \tfrac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2$, et de la quantité de mouvement, pression I/c sur un absorbeur.
- Le spectre va des ondes radio aux micro-ondes, à l'infrarouge, au visible, à l'ultraviolet et aux rayons X jusqu'aux gamma ; $c = f\lambda$ et l'énergie du photon est $E = hf$.
- À une interface, la lumière se réfléchit avec des angles égaux et se réfracte selon la loi de Snell-Descartes $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. En sortant d'un milieu plus dense, au-delà de l'angle critique, toute la lumière est réfléchie.
- Un polariseur transmet $I = I_0 \cos^2\theta$ (Malus). Une lentille mince obéit à 1/f = 1/d_o + 1/d_i.

Équations clés

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}, \; \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

```
E· d A=(Q)/(_0),\ B· d A=0
```

Théorèmes de Gauss

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \; \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

E· d l=-(d_B)/(dt),\ B· d l=μ_0I+μ_0_0(d_E)/(dt)

Faraday et Ampère–Maxwell

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = f\lambda, \quad E = cB$$

c=1μ_0_0=f, E=cB

Ondes électromagnétiques

$$I = \tfrac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2, \quad p = \frac{I}{c}$$

I=12c_0E_0^2, p= Ic

Intensité et pression de radiation

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

n_1θ_1=n_2θ_2

Loi de Snell-Descartes

$$I = I_0 \cos^2\theta, \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

I=I_0^2θ, 1f=1d_o+1d_i

Malus et lentille mince

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Calculez c à partir de μ_0 et ε_0.

1. $c = 1/\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \times 8.854 \times 10^{-12})}$.

Réponse : 2.998×10^8 m/s, la vitesse mesurée de la lumière, ce qui a révélé à Maxwell que la lumière est électromagnétique.

Exemple 10.2 La bande proche infrarouge de Landsat 9 couvre 0.85–0.88 µm et sa bande rouge 0.64–0.67 µm (NASA). Trouvez la fréquence au centre de chaque bande (0.865 et 0.655 µm) et l'énergie du photon dans le rouge.

1. $f = c/\lambda$: 3.47×10^{14} Hz et 4.58×10^{14} Hz.
2. $E = hc/\lambda = 3.03 \times 10^{-19}$ J = 1.89 eV.

Réponse : PIR 3.47×10^{14} Hz ; rouge 4.58×10^{14} Hz ; 1.89 eV.

Exemple 10.3 Un soleil éclatant de 1000 W/m² (valeur d'exemple) frappe un panneau. Trouvez E_0, B_0 et la pression sur une surface absorbante.

1. $E_0 = \sqrt{(2I/(c\varepsilon_0))} = 868$ V/m.
2. $B_0 = E_0/c = 2.90$ µT.
3. $p = I/c = 3.34$ µPa.

Réponse : 868 V/m, 2.90 µT, 3.34 µPa.

Exemple 10.4 La lumière entre dans l'eau (n = 1.33) à 30° de la normale. Trouvez l'angle de réfraction et l'angle critique pour la lumière sortant de l'eau.

1. $\sin \theta_2 = \sin 30°/1.33$, $\theta_2 = 22.1°$.
2. sin θ_c = 1/1.33, θ_c = 48.8°.

Réponse : 22.1°; 48.8°.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la longueur d'onde du Wi-Fi à 2.4 GHz.

   12.5 cm.

2. Combien de temps environ la lumière du Soleil met-elle pour parcourir 1.5×10^{11} m ?

   ≈ 8.3 minutes.

3. Trouvez l'angle critique du verre (n = 1.5) vers l'air.

   41.8°.

4. Une lumière non polarisée traverse deux polariseurs à 60°. Quelle fraction de la lumière sortant du premier traverse le second ?

   $\cos^2 60° = 0.25$.

5. Un objet est à 30 cm d'une lentille de distance focale 10 cm. Où est l'image ?

   1/d_i = 1/10 − 1/30, d_i = 15 cm, réelle et renversée.

6. La bande thermique 10 de Landsat 9 est vers 11 µm. Trouvez l'énergie du photon.

   ≈ 0.113 eV, bien moins que les photons visibles : les capteurs thermiques lisent la chaleur, pas la couleur.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La lumière a besoin d'un milieu.

En réalité : Les ondes EM se propagent dans le vide.

Idée reçue : La radio et la lumière sont des choses différentes.

En réalité : Mêmes ondes, longueurs d'onde différentes.

Idée reçue : La lumière s'écarte de la normale en entrant dans l'eau.

En réalité : Elle se rapproche de la normale : elle ralentit.

Cartes mémoire

Équations de Maxwell

Gauss (E, B), Faraday, Ampère–Maxwell.

Courant de déplacement

ε_0 dΦ_E/dt.

Vitesse de la lumière

$c = 1/\sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)}$.

Relation d'onde

$c = f\lambda$.

Énergie du photon

$E = hf$.

Loi de Snell-Descartes

$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Angle critique

sin θ_c = n_2/n_1.

Loi de Malus

$I = I_0 \cos^2\theta$.

Lentille mince

1/f = 1/d_o + 1/d_i.

Quiz d'autocontrôle

1. Le terme de courant de déplacement a été ajouté par…

Faraday

Ampère

Maxwell

Gauss

Maxwell. Loi d’Ampère–Maxwell.

2. Dans une onde EM, E et B sont…

parallèles

perpendiculaires entre eux et à la propagation

selon la propagation

sans rapport

perpendiculaires entre eux et à la propagation. Ondes transversales.

3. Une fréquence plus élevée signifie…

λ plus grande, moins d’énergie par photon

λ plus petite, plus d’énergie par photon

des ondes plus lentes

aucun changement

λ plus petite, plus d’énergie par photon. $c = f\lambda$; $E = hf$.

4. La réflexion totale interne se produit quand la lumière passe…

de l’air à l’eau

de l’eau à l’air au-delà de θ_c

dans n’importe quel milieu

du vide au verre

de l’eau à l’air au-delà de θ_c. Du plus dense au moins dense.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les satellites observent la planète en mesurant des ondes électromagnétiques. La NASA répertorie les bandes de Landsat 9, de la bande côtière/aérosols à 0.43 µm jusqu’à l’infrarouge thermique à 10.60–12.51 µm, en passant par le visible, le proche infrarouge et l’infrarouge à ondes courtes. Selon la NASA, ces observations servent aux alertes de déforestation tropicale, au suivi de la qualité de l’eau et aux bulletins sur l’état des cultures, et le capteur thermique mesure la température de surface des terres pour aider à gérer l’eau dans les régions sujettes à la sécheresse. Chaque bande est une tranche du spectre choisie parce que les sols, l’eau et les plantes la réfléchissent ou l’émettent différemment.

La visite du spectre électromagnétique de la NASA montre comment chaque bande, des ondes radio aux rayons gamma, sert à étudier la Terre et l’espace.

Sur Saving Planets : Landsat 9 · GOES-19 · Observation de la Terre

Sources : NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/) · NASA Science: Tour of the electromagnetic spectrum (https://science.nasa.gov/ems/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 16.1 Maxwell’s equations and electromagnetic waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-1-maxwells-equations-and-electromagnetic-waves): Maxwell.
- OpenStax UP2, 16.3 Energy carried by EM waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-3-energy-carried-by-electromagnetic-waves): Intensité.
- OpenStax UP2, 16.5 The electromagnetic spectrum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-5-the-electromagnetic-spectrum): Spectre.
- OpenStax UP3, 1.3 Refraction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-3-refraction): Loi de Snell-Descartes.
- OpenStax UP3, 1.7 Polarization (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-7-polarization): Polarisation.
- OpenStax UP3, 2.4 Thin lenses (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-4-thin-lenses): Lentilles.
- PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light): Interactif.

Regarder le cours magistral

Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-14) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d'utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

Ces exercices sont dans chaque unité. Faites-les sur papier, puis ouvrez la réponse.

1. Charge, loi de Coulomb et champs électriques
   4 exercices
2. Théorème de Gauss
   4 exercices
3. Potentiel électrique et capacité
   4 exercices
4. Courant, résistance et circuits en courant continu
   4 exercices
5. Champs et forces magnétiques
   4 exercices
6. Sources de champs magnétiques : Biot–Savart et Ampère
   4 exercices
7. Induction électromagnétique : Faraday et Lenz
   4 exercices
8. Inductance, circuits RL et LC
   4 exercices
9. Circuits en courant alternatif, transformateurs et réseau électrique
   4 exercices
10. Équations de Maxwell, ondes électromagnétiques et optique
    6 exercices

Le laboratoire (PHYS 210L)

Les TP sont la partie pratique du cours, qui vaut 1 crédit dans un cursus universitaire typique. Ici, ils sont gratuits et uniquement pour s'entraîner.

Chaque TP peut se faire entièrement dans une simulation PhET gratuite, et la plupart ont aussi une version maison qui n'utilise que des piles de 9 V ou moins. N'utilisez jamais le secteur, n'ouvrez jamais un appareil qui se branche au mur et ne court-circuitez jamais une pile.

Référence de sécurité : OSHA: Electrical safety (https://www.osha.gov/electrical)

TP A : cartographier champs électriques et équipotentielles

SEMAINE 2

Objectif : Mesurer comment le champ d'une charge ponctuelle décroît avec la distance, confirmer la loi en inverse du carré par un ajustement log-log, et cartographier les équipotentielles autour d'un dipôle.

$$E = \frac{kq}{r^2} \;\Rightarrow\; \log E = \log(kq) - 2\log r$$

E=(kq)/(r^2)\ \ E=(kq)-2 r

Une droite de pente −2 sur un graphique log-log

Mode opératoire

1. Ouvrez PhET Charges and Fields. Placez une seule charge de +1 nC et activez les valeurs et la grille.
2. Utilisez le capteur de champ E à 0.5, 1.0, 1.5 et 2.0 m et notez E.
3. Tracez log E en fonction de log r et ajustez une droite ; comparez la pente à −2 et l'ordonnée à l'origine à log(kq).
4. Ajoutez une charge de −1 nC à 1 m, utilisez le voltmètre pour tracer les équipotentielles 0 V et ±10 V, et esquissez les lignes de champ perpendiculaires à celles-ci.

Tableau de données

r (m)	E (V/m)
0.5	35.95
1.0	8.99
1.5	3.99
2.0	2.25

Valeurs calculées à partir de E = kq/r² pour q = 1 nC ; vos lectures dans la simulation devraient concorder aux arrondis près.

Exemple de calcul

1. De 0.5 m à 2.0 m (×4 en r), E passe de 35.95 à 2.25 V/m (×1/16), donc la pente log-log vaut −2.
2. L'équipotentielle 0 V du dipôle est la médiatrice des deux charges, et pourtant le champ n'y est pas nul.

> **Sécurité**

- Aucune, au-delà d’un usage normal de l’ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Frottez un ballon sur vos cheveux et regardez-le soulever des bouts de papier à différentes distances : un aperçu qualitatif d’un champ qui décroît vite avec la distance.

PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields) · PhET: Coulomb’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law)

Lien avec la planète : C’est avec des cartes de champ comme celles-ci que les ingénieurs conçoivent les champs électriques dans les cellules solaires et les équipements haute tension. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP B : capacité et écartement des armatures

SEMAINE 5

Objectif : Mesurer comment la capacité d'un condensateur plan dépend de l'écartement des armatures, et en déduire ε_0.

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

```
C=(_0A)/(d)
```

Tracer C en fonction de 1/d ; la pente vaut $\varepsilon_0 A$

Mode opératoire

1. Ouvrez PhET Capacitor Lab: Basics. Réglez l'aire des armatures à 400 mm² et branchez la pile à 1.5 V.
2. Lisez C pour des écartements de 2, 4, 6, 8 et 10 mm.
3. Tracez C en fonction de 1/d et ajustez une droite passant par l'origine ; divisez la pente par A pour obtenir ε_0.
4. Pour d = 5 mm, notez l'énergie stockée et comparez-la à $\frac{1}{2}CV^2$.

Tableau de données

d (mm)	C (pF)
2	1.77
4	0.885
6	0.590
8	0.443
10	0.354

Valeurs calculées à partir de $C = \varepsilon_0 A/d$; la simulation les arrondit.

Exemple de calcul

1. C × d est constant : 1.77 pF × 2 mm = 0.354 pF × 10 mm, donc $C \propto 1/d$.
2. Pente $\varepsilon_0 A = 3.54 \times 10^{-15}$ F·m, donc $\varepsilon_0 = 3.54 \times 10^{-15}/(4 \times 10^{-4}) = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.
3. À 5 mm, C = 0.708 pF et $U = \frac{1}{2}CV^2 = 0.797$ pJ sous 1.5 V.

> **Sécurité**
>
> - Aucune, au-delà d'un usage normal de l'ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Facultatif : avec un multimètre capacimètre, mesurez deux feuilles d'aluminium séparées par une, deux puis trois feuilles de papier. C doit diminuer quand la pile s'épaissit.

PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

Lien avec la planète : Les condensateurs lissent la puissance dans les voitures électriques, les onduleurs solaires et le réseau ; la même formule $C = \kappa\varepsilon_0 A/d$ fixe leur taille. FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml)

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP C : loi d’Ohm, lois de Kirchhoff et constante de temps RC

SEMAINE 7

Objectif : Vérifier la loi d’Ohm, contrôler les lois de Kirchhoff dans un circuit à deux mailles, et mesurer la constante de temps d’un condensateur en charge.

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`V_C=V_0(1-e^-t/RC)`

Courbe de charge ; ln(1 − V_C/V_0) = −t/RC est une droite

Mode opératoire

1. Loi d’Ohm : placez une résistance de 1 kΩ sous 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 et 9.0 V (piles AA en série, ou la pile PhET) et notez le courant ; tracez I en fonction de V.
2. Kirchhoff : dans PhET Circuit Construction Kit: DC, construisez le circuit de l’unité 4 (12 V, 6 V, 2 Ω, 3 Ω, 6 Ω) et mesurez les trois courants ; vérifiez les sommes aux nœuds et dans les mailles.
3. RC : chargez un condensateur de 100 µF sur 9 V à travers 10 kΩ, en lisant V_C chaque seconde ; tracez ln(1 − V_C/9) en fonction de t et déduisez RC de la pente.

Tableau de données

t (s)	V_C (V), 10 kΩ et 100 µF depuis 9 V
0	0.00
1	5.69
2	7.78
3	8.55
5	8.94

Valeurs calculées pour des composants idéaux ; les condensateurs réels s’écartent souvent de ±20 % de leur valeur nominale, donc votre τ peut différer.

Exemple de calcul

1. Loi d’Ohm : la pente de I en fonction de V vaut 1 mA/V, donc R = 1.00 kΩ ; à 9 V la résistance ne dissipe que 81 mW.
2. Kirchhoff : 2 A − 0.667 A = 1.33 A au nœud, et 12 − 2(2) − 6(1.33) = 0 dans la maille 1.
3. RC : la droite de ln(1 − V_C/9) a une pente de −1.0 s^{-1}, donc τ = 1.0 s = (10 kΩ)(100 µF).

> **Sécurité**

- N’utilisez que des piles de 9 V ou moins ; jamais le secteur.
- Ne reliez jamais un fil directement aux bornes d’une pile : il chauffe vite et peut brûler.
- Les condensateurs électrolytiques ont une patte + ; reliez-la côté + de la pile, et choisissez-en un de tension nominale supérieure à 9 V.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Tout fonctionne avec un multimètre, des piles AA, une pile de 9 V, des résistances et un condensateur sur une plaque d’essai ; chronométrez les lectures RC en filmant le multimètre avec un téléphone.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Resistance in a Wire (https://phet.colorado.edu/en/simulations/resistance-in-a-wire)

Lien avec la planète : Les champs de panneaux solaires sont câblés selon les mêmes règles : les chaînes en série augmentent la tension et les chaînes en parallèle le courant. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP D : mesurer des champs magnétiques, dont celui de la Terre

SEMAINE 9

Objectif : Mesurer le champ magnétique terrestre avec le magnétomètre d'un téléphone, cartographier le champ d'un fil en simulation, et comparer les deux à la théorie.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

B=(μ_0I)/(2π r)

Champ d'un long fil

Mode opératoire

1. Ouvrez une application de magnétomètre loin du métal et de l'électronique. Notez l'intensité totale du champ en cinq endroits et faites la moyenne.
2. Comparez avec la plage indiquée par la NOAA, environ 25000–65000 nT à la surface de la Terre.
3. Dans PhET Magnets and Electromagnets, voyez comment le champ varie avec le courant et le nombre de spires ; puis calculez B pour un long fil avec I = 2 A à r = 1, 2 et 4 cm et tracez B en fonction de 1/r.
4. Approchez un aimant de réfrigérateur du téléphone et notez la distance à laquelle son champ égale celui de la Terre.

Tableau de données

r (cm)	B pour un fil de 2 A (μT)
1	40
2	20
4	10

Valeurs du fil calculées avec $\mu_0 I/(2\pi r)$. Les lectures du champ terrestre dépendent de votre position ; le calculateur de la NOAA donne le total attendu pour votre lieu.

Exemple de calcul

1. B ∝ 1/r : doubler la distance divise le champ par deux, donc le graphe de B en fonction de 1/r est une droite passant par l'origine de pente $\mu_0 I/(2\pi) = 0.4$ μT·m.
2. Un fil de 2 A égale le champ terrestre de 50 μT à $r = \mu_0 I/(2\pi \times 50\ \mu T) = 0.8$ cm.

> **Sécurité**

- Tenez les aimants puissants loin des emplacements de carte des téléphones, des stimulateurs cardiaques et des cartes bancaires.
- Ne faites pas passer de fort courant dans un fil nu chez vous ; la partie fil de ce TP se fait en simulation.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Les étapes magnétomètre et aimant de réfrigérateur constituent la version maison.

PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets) · PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass) · NOAA magnetic field calculators (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml)

Lien avec la planète : Connaître le champ normal sert de référence pour repérer les orages géomagnétiques, qui selon la NOAA peuvent induire des courants nuisibles dans les réseaux électriques. NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP E : induction et maquette de générateur

SEMAINE 10

Objectif : Montrer que la f.é.m. induite dépend du taux de variation du flux, et que la f.é.m. crête d'un générateur croît proportionnellement à sa vitesse de rotation.

$$\varepsilon_{\max} = NBA\omega$$

_=NBAω

F.é.m. crête d'une bobine en rotation

Mode opératoire

1. Dans PhET Faraday's Law, faites passer l'aimant dans la bobine lentement puis rapidement ; notez à chaque fois la tension crête et le changement de signe quand il ressort.
2. Dans PhET Faraday's Electromagnetic Lab (onglet Generator), modifiez la vitesse de la turbine et notez la réponse crête de l'ampoule ou du voltmètre.
3. Calculez ε_max pour une bobine modèle avec N = 200, A = 0.01 m² et B = 0.05 T à 1, 2 et 3 tours par seconde.
4. À la maison : enroulez 100 spires de fil fin isolé autour d'un rouleau de papier toilette, branchez un multimètre sur mV et laissez tomber un aimant puissant à travers.

Tableau de données

Vitesse de rotation (tr/s)	F.é.m. crête (V)
1	0.628
2	1.26
3	1.88

Valeurs calculées pour la bobine modèle (valeurs d'exemple).

Exemple de calcul

1. ε_max = NBA(2πf) = 200 × 0.05 × 0.01 × 2π f = 0.628 V par tr/s, donc doubler la vitesse double la f.é.m.
2. Un aimant plus rapide donne une impulsion plus haute et plus brève ; l'aire sous la courbe f.é.m.-temps (variation totale de flux × N) reste la même.

> **Sécurité**
>
> - Les aimants puissants au néodyme se collent violemment et peuvent pincer la peau ou se briser ; manipulez-les un par un.

- Tenez les aimants loin des stimulateurs cardiaques et de l’électronique.

Alternative à la maison ou virtuelle

- L’étape bobine-aimant est la version maison ; n’importe quel multimètre sur son calibre millivolt convient.

PhET: Faraday’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · PhET: Faraday’s Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab) · PhET: Generator (https://phet.colorado.edu/en/simulations/generator)

Lien avec la planète : Chaque éolienne et chaque centrale hydraulique réalise ce TP à l’échelle du mégawatt : la turbine fait tourner un générateur pour produire de l’électricité. DOE des États-Unis : comment fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP F : réfraction et loi de Snell-Descartes

SEMAINE 14

Objectif : Mesurer les angles de réfraction de l'air vers l'eau, trouver l'indice de réfraction et observer la réflexion totale interne.

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

`n=(θ_1)/(θ_2)`

Pente de sin θ_1 en fonction de sin θ_2

Mode opératoire

1. Dans PhET Bending Light, choisissez l'eau comme milieu inférieur et dirigez le laser de 10° à 60° de la normale par pas de 10° ; lisez l'angle de réfraction avec le rapporteur.
2. Tracez sin θ_1 en fonction de sin θ_2 et ajustez une droite passant par l'origine ; la pente est n.
3. Placez le laser dans l'eau et augmentez l'angle jusqu'à ce que le faisceau réfracté disparaisse ; notez l'angle critique.
4. À la maison : dirigez un laser de faible puissance ou un faisceau étroit de lampe de poche dans une boîte transparente d'eau additionnée d'une goutte de lait, et mesurez les angles sur un rapporteur imprimé.

Tableau de données

θ_1 dans l'air (°)	θ_2 dans l'eau (°)
10	7.5
20	14.9
30	22.1
40	28.9
50	35.2
60	40.6

Valeurs calculées par la loi de Snell-Descartes avec n = 1.33.

Exemple de calcul

1. sin 30°/sin 22.1° = 0.500/0.376 = 1.33, et chaque ligne donne le même rapport.
2. Angle critique de l'eau vers l'air : $\sin^{-1}(1/1.33) = 48.8°$.

> **Sécurité**

- N’utilisez qu’un pointeur laser de classe 2 (moins de 1 mW), ne regardez jamais dans le faisceau et ne le dirigez jamais vers les yeux de quelqu’un ; attention aux reflets sur l’eau et le verre.

Alternative à la maison ou virtuelle

- L’étape de la boîte d’eau est la version maison.

PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light)

Lien avec la planète : Les capteurs satellitaires sont faits de lentilles, de miroirs et de filtres conçus selon ces mêmes lois de réfraction et de réflexion. NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

Séries d’entraînement aux examens

Chronométrez-vous : environ 10 minutes par problème. Comparez ensuite avec les solutions complètes.

Série d’exercices de mi-parcours (unités 1–5)

1. Des charges de +2.0 μC et +8.0 μC sont distantes de 0.30 m. Trouvez la force entre elles et le point entre elles où E = 0.

    1. $F = k(2 \times 10^{-6})(8 \times 10^{-6})/0.09$.
    2. $k(2)/x^2 = k(8)/(0.3 - x)^2$ donne $x = 0.10$ m.

    Réponse : 1.60 N, répulsive ; à 0.10 m de la charge de 2.0 μC.

2. Une surface fermée entoure une charge de 3.0 nC. Trouvez le flux net.

    1. $\Phi = Q/\varepsilon_0$.

    Réponse : ≈ 339 N·m²/C.

3. Un condensateur de 10 μF est chargé à 12 V. Trouvez Q et U.

    1. $Q = CV$; $U = \frac{1}{2}CV^2$.

    Réponse : 120 μC; 0.72 mJ.

4. Une pile de 9 V alimente 3 Ω en série avec une paire en parallèle de 6 Ω et 3 Ω. Trouvez le courant et la puissance totale.

    1. Paire en parallèle = 2 Ω ; total 5 Ω.
    2. $I = 9/5$; $P = IV$.

Réponse : 1.8 A; 16.2 W.

5. Un proton se déplace à 1.0×10^6 m/s perpendiculairement à un champ de 0.20 T. Trouvez le rayon de l'orbite.

    1. $r = mv/(eB)$.

    Réponse : ≈ 5.22 cm.

Série d'entraînement finale (toutes les unités)

1. Trouvez B à 0.10 m d'un long fil parcouru par 50 A.

    1. $B = \mu_0 I/(2\pi r)$.

    Réponse : 100 µT, environ le double du champ terrestre.

2. Une bobine de 50 spires d'aire 0.05 m^2 tourne à 50 tr/s dans un champ de 0.20 T. Trouvez la f.é.m. crête.

    1. $\varepsilon = NBA\omega$, $\omega = 2\pi \times 50$.

    Réponse : ≈ 157 V.

3. Un circuit RL a L = 0.5 H et R = 100 Ω. Trouvez τ et la fraction du courant final après 5 ms.

    1. $\tau = L/R$.

    Réponse : 5 ms; 63%.

4. Transportez 50 MW à 230 kV sur une ligne de 5 Ω de résistance. Trouvez le courant et les pertes.

    1. $I = P/V$; pertes $= I^2R$.

    Réponse : 217 A; 0.236 MW (0.47%).

5. Trouvez la fréquence et l'énergie du photon d'une lumière de 500 nm.

    1. $f = c/\lambda$; $E = hf$.

    Réponse : 6.00×10^{14} Hz; 2.48 eV.

6. La lumière entre dans du verre (n = 1.5) à 45°. Trouvez l'angle de réfraction.

    1. $\sin \theta_2 = \sin 45°/1.5$.

    Réponse : 28.1°.

Fiche de formules

$$F = k|q_1 q_2|/r^2$$

$$\vec{E} = \vec{F}/q$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q_{\text{enc}}/\varepsilon_0$$

$$V = kq/r,\ E_x = -dV/dx$$

$$C = \kappa\varepsilon_0 A/d,\ U = \tfrac{1}{2}CV^2$$

$$V = IR,\ R = \rho L/A,\ P = IV$$

$$\tau = RC,\ \tau = L/R$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},\ r = mv/(qB)$$

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B},\ \tau = NIAB\sin\theta$$

$$B = \mu_0 I/(2\pi r),\ B = \mu_0 nI$$

$$\varepsilon = -N\, d\Phi_B/dt,\ \varepsilon = BLv$$

$$L = \mu_0 N^2 A/l,\ U = \tfrac{1}{2}LI^2$$

$$X_L = \omega L,\ X_C = 1/(\omega C),\ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C}$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = f\lambda,\ E = hf$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2,\ 1/f = 1/d_o + 1/d_i$$

Constantes

Constante	**Valeur**
Charge élémentaire, e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
Constante de Coulomb, k = 1/(4πε₀)	8.988 × 10⁹ N·m²/C²
Permittivité du vide, ε₀	8.854 × 10⁻¹² F/m
Perméabilité du vide, μ₀	1.257 × 10⁻⁶ T·m/A (≈ 4π × 10⁻⁷)
Vitesse de la lumière, c	2.998 × 10⁸ m/s
Masse de l’électron, mₑ	9.109 × 10⁻³¹ kg
Masse du proton, mₚ	1.673 × 10⁻²⁷ kg
Constante de Planck, h	6.626 × 10⁻³⁴ J·s

Source : NIST : constantes physiques fondamentales (en anglais) (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/)

Textes et simulations gratuits

Utilisez ces manuels, cours et simulations gratuits en parallèle du cours.

- OpenStax University Physics Volume 2 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-introduction): Manuel gratuit et complet pour ce cours.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Cours, séries de problèmes et examens du MIT, gratuits.
- OpenStax University Physics Volume 3 (optics) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-2-the-law-of-reflection): Chapitres d'optique gratuits pour l'unité 10.
- PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields): Placer des charges et cartographier champs et équipotentielles.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Construire et mesurer des circuits.
- PhET: Faraday's Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab): Aimants, bobines, générateurs et transformateurs.

Glossaire

Théorème d'Ampère
$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_enc.$

Capacité
Charge stockée par volt, $C = Q/V$.

Loi de Coulomb
Force entre charges ponctuelles, $F = k|q_1 q_2|/r^2$.

Angle critique
Angle au-delà duquel la lumière est totalement réfléchie à l'intérieur d'un milieu plus dense.

Courant de déplacement
$\varepsilon_0 \, d\Phi_E/dt$, l'ajout de Maxwell au théorème d'Ampère.

EMF
Énergie par charge fournie par une source comme une pile ou un générateur.

Champ électrique
Force par unité de charge.

Potentiel électrique
Énergie potentielle par unité de charge, en volts.

Loi de Faraday
Un flux magnétique variable induit une f.é.m.

Théorème de Gauss
Le flux électrique net sortant d'une surface fermée est égal à Q_enc/ε_0.

Courant géomagnétiquement induit
Courant engendré dans les réseaux et les pipelines par les orages géomagnétiques.

Impédance

Opposition totale au courant alternatif, Z.

Inductance
F.é.m. par taux de variation du courant, en henrys.

Loi de Lenz
Le courant induit s'oppose à la variation du flux.

Flux magnétique
$\Phi_B = \int B \cdot dA$, en webers.

Équations de Maxwell
Quatre lois qui unifient électricité, magnétisme et lumière.

Facteur de puissance
cos φ, la fraction de la puissance apparente qui produit un travail.

Valeur efficace
Valeur efficace (moyenne quadratique), $V_0/\sqrt{2}$ pour une sinusoïde.

Résistivité
Propriété du matériau ρ dans $R = \rho L/A$.

Loi de Snell-Descartes
$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Transformateur
Deux bobines couplées qui modifient une tension alternative.

Grille d'autoévaluation

Aucune note ni aucun crédit ne sont attribués. Utilisez cette grille pour juger honnêtement où vous en êtes dans chaque unité.

Niveau	À quoi cela ressemble
4 · Maîtrise	Pose champs et circuits à partir d'une description, choisit la bonne loi, gère signes et sens, et vérifie unités et cas limites.
3 · Compétent	Résout les exercices avec quelques erreurs de signe ou d'unité.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais peine à choisir une surface de Gauss, un contour ou la règle de la main droite.
1 · Débutant	Remplace les nombres dans les formules sans faire de schéma ; doit revoir l'unité.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	25%

Partie	Poids
TP (PHYS 210L)	20%
Série d’entraînement de mi-parcours	25%
Série d’entraînement finale	30%

Visez le niveau 3 ou mieux dans chaque unité avant de passer au cours suivant.

Cours associés

- Équations différentielles MATH 220
- Statique ENGR 211
- Analyse III MATH 210
- Tous les cours