Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 3, Automne

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 contenu suit un cours semestriel de deuxième année d'analyse des circuits avec TP. Il s'inspire des thèmes et du niveau de MIT 6.002 Circuits and Electronics (gratuit sur MIT OpenCourseWare), de Georgia Tech ECE 2040 Circuit Analysis et de Purdue ECE 20001 Electrical Engineering Fundamentals I, ainsi que du manuel gratuit OpenStax University Physics Volume 2 et des simulations PhET, que nous citons quand ils sont utiles. Aucun de ces auteurs ou établissements ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque module est relié à un vrai travail dans l'énergie propre avec une source publique citée (éclairage LED, panneaux solaires et onduleurs, stockage par batteries, recharge des véhicules électriques, centres de données et réseau électrique), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque TP dispose d'une simulation PhET gratuite ou d'une version sûre à basse tension à faire chez soi.
>
> 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

Les circuits sont le moyen par lequel l'énergie propre atteint les gens. Les panneaux solaires produisent du courant continu que des onduleurs transforment en courant alternatif, les batteries le stockent, les transformateurs et les lignes électriques le transportent, et des éclairages, moteurs et chargeurs efficaces l'utilisent.

Chaque pour cent de pertes dans un fil, un transformateur ou un convertisseur est une énergie qu'il a fallu produire quelque part. L'analyse de ce cours est celle qu'utilisent les ingénieurs pour réduire

ces pertes. Chaque module 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 (ENGR 214 + ENGR 214L).
- 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 II : charge, champ électrique, potentiel, courant, résistance, capacité, inductance et loi de Faraday.
- Analyse I et II : dérivées et intégrales ; les modules 7 et 8 résolvent des équations différentielles du premier et du second ordre.
- Nombres complexes (revus au module 9) pour les phaseurs ; l'Algèbre linéaire aide pour les équations nodales et de mailles.
- Le cours d'Équations différentielles peut être suivi en parallèle de ce cours.

Comment étudier

- Dessinez et annotez d'abord le circuit : potentiels de nœuds, courants de branche avec des flèches et marques de polarité sur chaque élément.
- Utilisez la convention récepteur : un courant entrant par la borne + signifie que l'élément absorbe de la puissance.

- Écrivez la loi des nœuds aux nœuds ou la loi des mailles autour des mailles, comptez inconnues et équations, puis résolvez (à la main pour 2 × 2, par matrices au-delà).
- Vérifiez chaque réponse : la puissance absorbée doit égaler la puissance fournie, et les limites ($t = 0$, $t \to \infty$, $\omega \to 0$ ou ∞) doivent avoir un sens.
- Restez en unités SI : V, A, Ω, W, F, H, s, et attention aux préfixes (mA, kΩ, µF, mH).
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse, et refaites les quiz quelques jours plus tard.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations PhET gratuites (elles fonctionnent dans un navigateur).
- Un multimètre numérique (les modèles bon marché mesurent V, A et Ω).
- Une plaque d'essai sans soudure, des fils de liaison, un support pour 2 × AA piles (3 V) et des piles AA.
- Des résistances (100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ), un condensateur de 1000 µF prévu pour au moins 6.3 V, et des LED.
- Facultatif : un wattmètre enfichable pour comparer ampoules et appareils (il se branche sur la prise murale ; ne l'ouvrez pas).
- Des lunettes de sécurité, un chronomètre ou un téléphone, et un tableur.

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	Grandeurs et éléments des circuits : charge, courant, tension, puissance, énergie et loi d'Ohm	Charge, courant, tension, puissance, convention de signe, sources	MIT 6.002; OpenStax UP2 9.4
2	Grandeurs et éléments des circuits : charge, courant, tension, puissance, énergie et loi d'Ohm	Loi d'Ohm, résistivité, énergie en kWh ; TP A	UP2 9.4, 10.1
3	Lois de Kirchhoff, résistances en série et en parallèle, diviseurs de tension et de courant	Lois des nœuds et des mailles, série et parallèle, diviseurs, appareils de mesure ; TP B	UP2 10.2–10.3
4	Analyse systématique : méthodes des potentiels de nœuds et des courants de mailles	Méthode des potentiels de nœuds et supernœuds	MIT 6.002
5	Analyse systématique : méthodes des potentiels de nœuds et des courants de mailles	Méthode des courants de mailles, supermailles, sources commandées	MIT 6.002; UP2 10.3

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
6	Théorèmes des circuits : linéarité, superposition, transformation de sources, Thévenin, Norton et transfert maximal de puissance	Superposition, transformation de sources, Thévenin, Norton, puissance maximale ; TP C	MIT 6.002
7	Amplificateurs opérationnels	Amplificateurs opérationnels ; entraînement au partiel	MIT 6.002
8	Condensateurs et bobines	Condensateurs, bobines, énergie, intégrateurs	UP2 8.1, 14.2
9	Circuits du premier ordre : régimes transitoires RC et RL	Réponses libres et indicielles RC et RL	UP2 10.5, 14.4
10	Circuits du premier ordre : régimes transitoires RC et RL	Problèmes de commutation et énergie de commutation numérique ; TP D	MIT 6.002
11	Circuits du second ordre : réponses libre et indicielle des circuits RLC	RLC série et parallèle, amortissement, oscillation LC	UP2 14.5–14.6
12	Régime sinusoïdal permanent : phaseurs et impédance	Sinusoïdes, phaseurs, impédance	UP2 15.2–15.3
13	Régime sinusoïdal permanent : phaseurs et impédance	Analyse nodale, par mailles et de Thévenin en alternatif, filtres ; TP E	MIT 6.002; UP2 15.3, 15.5
14	Puissance en alternatif, facteur de puissance, résonance, transformateurs et systèmes triphasés	Puissance alternative, facteur de puissance, transformateurs, triphasé ; TP F	UP2 15.4–15.6
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

Grandeurs et éléments des circuits : charge, courant, tension, puissance, énergie et loi d’Ohm

Charge et courant, tension comme énergie par unité de charge, puissance et énergie, convention récepteur, sources idéales indépendantes et commandées, résistance et résistivité, loi d’Ohm et puissance dans les résistances.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Relier charge, courant, tension, puissance et énergie avec les bonnes unités.
- Appliquer la convention récepteur pour décider si un élément absorbe ou fournit de la puissance.
- Utiliser la loi d’Ohm et R = ρL/A.
- Calculer une consommation d’énergie en kWh et comparer des appareils.

Notions clés

- Le courant est le débit de charge, i = dq/dt, en ampères (1 A = 1 C/s). La tension est l’énergie par unité de charge entre deux points, en volts (1 V = 1 J/C).
- Puissance p = vi. Avec la convention récepteur (le courant entre par la borne +), p > 0 signifie que l’élément absorbe de la puissance et p < 0 qu’il en fournit. Dans tout circuit, puissance totale absorbée = puissance totale fournie.
- Une source de tension idéale maintient sa tension quel que soit le courant ; une source de courant idéale maintient son courant quelle que soit la tension. Les sources commandées dépendent d’une tension ou d’un courant ailleurs dans le circuit et modélisent transistors et amplificateurs.
- Loi d’Ohm v = iR. Une résistance absorbe toujours la puissance p = i²R = v²/R. La résistance d’un fil R = ρL/A croît avec la longueur et diminue avec la section ; la conductance G = 1/R s’exprime en siemens.
- Énergie w = ∫p dt ; à puissance constante w = Pt. Les fournisseurs facturent en kilowattheures : 1 kWh = 3.6 MJ.

Équations clés

$$i = \frac{dq}{dt}$$

```
i=dq/dt
```

Courant

$$p = vi$$

```
p=vi
```

Puissance

$$v = iR,\ \ p = i^2R = \frac{v^2}{R}$$

v=iR,\ \ p=i^2R=(v^2)/(R)

Loi d’Ohm et puissance dans une résistance

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

R=(ρ L)/(A)

Résistance d’un conducteur

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un radiateur de 4 Ω est branché sur 12 V. Trouvez le courant et la puissance.

1. i = v/R = 12/4 = 3 A.
2. p = vi = 12 × 3.

Réponse : i = 3 A, p = 36 W.

Exemple 1.2 Trouvez la résistance de 10 m de fil de cuivre de section 1 mm² (ρ = 1.68 × 10⁻⁸ Ω·m).

1. A = 1 mm² = 1 × 10⁻⁶ m².
2. R = ρL/A = 1.68 × 10⁻⁸ × 10/10⁻⁶.

Réponse : R = 0.168 Ω.

Exemple 1.3 Une ampoule à incandescence de 60 W est remplacée par une LED qui consomme 75 % d’énergie en moins. Les deux fonctionnent 3 heures par jour pendant un an. Trouvez l’énergie économisée.

1. Puissance de la LED = 0.25 × 60 = 15 W.
2. Incandescence : 60 × 3 × 365 = 65700 Wh = 65.7 kWh ; LED : 16.4 kWh.

Réponse : Environ 49.3 kWh économisés par ampoule et par an.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un courant de 2 A circule pendant 30 s. Quelle charge passe ?

   q = it = 60 C.

2. Une lampe absorbe 0.5 A sous 120 V. Trouvez sa puissance et sa résistance.

   p = 60 W, R = 240 Ω.

3. Un élément a v = 5 V et i = −2 A entrant par sa borne +. Absorbe-t-il ou fournit-il de la puissance ?

   p = −10 W : il fournit 10 W.

4. Combien de joules y a-t-il dans 2 kWh ?

   7.2×10^6 J.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le courant est consommé par une résistance.

En réalité : La charge se conserve ; le même courant sort qu’il entre. C’est l’énergie qui est convertie, pas le courant.

Idée reçue : Une tension existe en un point.

En réalité : Une tension est toujours entre deux points ; un « potentiel de nœud » se mesure par rapport à une masse choisie.

Idée reçue : La puissance vaut toujours vi avec un signe plus.

En réalité : Utilisez la convention récepteur pour obtenir le bon signe.

Cartes mémoire

Courant

i = dq/dt, en A.

Tension

Énergie par unité de charge, en V = J/C.

Puissance

p = vi.

Convention récepteur

Courant entrant par la borne + : p > 0, absorbe.

Loi d’Ohm

kWh

v = iR.

3.6 MJ.

Quiz d’autocontrôle

1. 1 A est égal à…

1 J/s

1 C/s

1 V/s

1 W/V²

1 C/s. Une charge par seconde.

2. Doubler la tension aux bornes d’une résistance multiplie sa puissance par…

1

2

4

½

4. $p = v^2/R$.

3. Doubler la longueur d’un fil (même section) change sa résistance d’un facteur…

½

1

2

4

2. $R = \rho L/A$.

4. 1 kWh est égal à…

1000 J

3600 J

3.6 MJ

60 kJ

3.6 MJ. 1000 W × 3600 s.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'éclairage est l'endroit le plus simple pour voir puissance et énergie à l'œuvre. Le guide de l'éclairage économe en énergie du Département de l'Énergie des États-Unis indique que les LED consomment au moins 75 pour cent d'énergie de moins que les ampoules à incandescence, n'émettent quasiment pas de chaleur et durent 25 fois plus longtemps.

Avec p = vi et w = Pt, l'exemple corrigé montre ce que cela signifie pour une ampoule : remplacer une incandescente de 60 W par une LED de 15 W, utilisée 3 heures par jour, économise environ 49.3 kWh par an. Multipliez par les dizaines d'ampoules d'un logement et les millions de logements d'un pays, et les centrales qui n'ont jamais besoin de tourner deviennent visibles.

Sur Saving Planets : Physique II · Solutions

Sources : U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur l'abstraction des circuits et la loi d'Ohm.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): Interactif.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): Sources et résistance interne.

Regarder le cours magistral

Lecture 22: Energy and Power (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-22/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Lois de Kirchhoff, résistances en série et en parallèle, diviseurs de tension et de courant

Nœuds, branches et boucles, lois de Kirchhoff des courants et des tensions, associations en série et en parallèle, résistance équivalente, diviseurs de tension et de courant, transformations triangle–étoile, et mesures au voltmètre et à l'ampèremètre.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Écrire la loi des nœuds et la loi des mailles pour n'importe quel circuit.
- Réduire des réseaux série–parallèle à une résistance équivalente.
- Utiliser les diviseurs de tension et de courant.
- Expliquer comment les appareils de mesure sont branchés et comment ils chargent un circuit.

Notions clés

- Loi des nœuds : la somme des courants sortant de tout nœud est nulle (la charge se conserve). Loi des mailles : la somme des tensions le long de toute boucle fermée est nulle (l'énergie se conserve).
- Des éléments en série sont traversés par le même courant ; les résistances s'additionnent : R_eq = $R_1 + R_2 + \dots$. Des éléments en parallèle ont la même tension ; les conductances s'additionnent : $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$; pour deux résistances $R_1R_2/(R_1 + R_2)$.
- Diviseur de tension : $v_2 = v \cdot R_2/(R_1 + R_2)$. Diviseur de courant (deux résistances) : $i_1 = i \cdot R_2/(R_1 + R_2)$; la plus grande part passe par la plus petite résistance.
- La transformation triangle–étoile (Δ–Y) traite les ponts qui ne sont ni en série ni en parallèle : R_Y = (produit des deux résistances Δ adjacentes)/(somme des trois).
- Un voltmètre se branche en parallèle et doit avoir une très grande résistance ; un ampèremètre se branche en série et doit avoir une très faible résistance.

Équations clés

$$\sum i_{\text{out}} = 0$$

```
i_out=0
```

KCL

$$\sum v = 0 \text{ around a loop}$$

```
v=0\ around a loop
```

KVL

$$R_s = R_1 + R_2, \;\; R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

R_s=R_1+R_2,\ \ R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)

Série et parallèle

$$v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}, \;\; i_1 = i\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

v_2=v(R_2)/(R_1+R_2),\ \ i_1=i(R_2)/(R_1+R_2)

Diviseurs de tension et de courant

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Des résistances de 100, 200 et 300 Ω sont en série sous 12 V. Trouvez le courant et la tension aux bornes de la résistance de 200 Ω.

1. R_eq = 600 Ω; i = 12/600 = 0.02 A.
2. v = 0.02 × 200.

Réponse : i = 20 mA, v_{200} = 4 V.

Exemple 2.2 Une source de 9 V alimente un diviseur avec R_1 = 10 kΩ en haut et R_2 = 5 kΩ en bas. Trouvez v_out aux bornes de R_2.

1. v_out = 9 × 5/(10 + 5).

Réponse : v_out = 3 V.

Exemple 2.3 Un courant de 6 A se partage entre 2 Ω et 4 Ω en parallèle. Trouvez chaque courant.

1. $i_{2\Omega}$ = 6 × 4/(2 + 4) = 4 A.
2. $i_{4\Omega}$ = 6 × 2/6 = 2 A ; vérification 4 + 2 = 6.

Réponse : 4 A dans 2 Ω et 2 A dans 4 Ω.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez 6 Ω ‖ 3 Ω.

   18/9 = 2 Ω.

2. Trois résistances de 30 Ω sont en parallèle. Trouvez R_eq.

   10 Ω.

3. Trouvez R_eq de 10 Ω en série avec (20 Ω ‖ 20 Ω).

   10 + 10 = 20 Ω.

4. Trois courants entrent dans un nœud : 2 A, 3 A et −1 A. Quel courant en sort ?

   4 A.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une résistance en parallèle est plus grande que la plus petite résistance.

En réalité : Elle est toujours plus petite que la plus petite.

Idée reçue : Un diviseur de tension fonctionne avec n’importe quelle charge.

En réalité : Une charge aux bornes de R_2 est en parallèle avec elle et abaisse v_out sauf si sa résistance est bien plus grande.

Idée reçue : Un ampèremètre se branche aux bornes de l’élément.

En réalité : Aux bornes, un ampèremètre de faible résistance est presque un court-circuit ; il se branche en série.

Cartes mémoire

KCL

La somme des courants sortant d’un nœud vaut 0.

KVL

La somme des tensions le long d’une boucle vaut 0.

Série

Les R s’additionnent ; même courant.

Parallèle

Les G s’additionnent ; même tension.

Diviseur de tension

Diviseur de courant

$v_2 = vR_2/(R_1 + R_2)$.

$i_1 = iR_2/(R_1 + R_2)$.

Quiz d’autocontrôle

1. La loi des nœuds exprime la conservation…

l’énergie

la charge

de la puissance

flux

la charge. La charge ne peut pas s’accumuler en un nœud.

2. Deux résistances égales R en parallèle donnent…

2R

R

R/2

R^2

R/2. R·R/(2R).

3. Des éléments en série ont en commun le même…

tension

courant

de la puissance

résistance

courant. Un seul chemin.

4. Un voltmètre idéal a une résistance…

zéro

infinie

1 Ω

égale à la charge

infinie. Il ne doit absorber aucun courant.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les panneaux solaires sont des circuits série et parallèle. L'Energy Information Administration des États-Unis explique qu'une cellule PV ne peut produire que 1 ou 2 watts ; les cellules sont donc reliées électriquement dans des panneaux étanches, les panneaux sont assemblés en champs de deux à plusieurs centaines de panneaux, et le nombre de panneaux fixe la quantité d'électricité qu'un champ peut produire. Les cellules produisent du courant continu, et des onduleurs le convertissent en courant alternatif utilisé sur le réseau.

Le branchement en série additionne les tensions et le branchement en parallèle additionne les courants. À titre d'exemple, des cellules de 0.5 V et 3 A (1.5 W, dans la fourchette de 1–2 W de l'EIA) donnent 30 V sous 3 A, soit 90 W, quand 60 sont câblées en série. Les lois de Kirchhoff expliquent aussi pourquoi une seule cellule ombragée dans une chaîne en série peut faire chuter toute la chaîne ; c'est pourquoi les panneaux comportent des diodes de dérivation.

Sur Saving Planets : Physique II · Parker Solar Probe

Sources : U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · 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)

Ressources d'apprentissage gratuites

- 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): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Lois des nœuds et des mailles.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur l'analyse de base des circuits.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Interactif.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Analyse systématique : méthodes des potentiels de nœuds et des courants de mailles

Choix d’un nœud de référence, écriture de la loi des nœuds en potentiels de nœuds, supernœuds, courants de mailles et loi des mailles, supermailles, circuits à sources commandées, et résolution à la main et par matrices des systèmes linéaires obtenus.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Écrire et résoudre les équations en potentiels de nœuds, supernœuds compris.
- Écrire et résoudre les équations en courants de mailles, supermailles comprises.
- Traiter les sources commandées dans les deux méthodes.
- Choisir la méthode qui donne le moins d’équations.

Notions clés

- Méthode des potentiels de nœuds : choisissez un nœud de masse, nommez les autres potentiels de nœuds, écrivez la loi des nœuds en chaque nœud hors référence avec la loi d’Ohm (le courant de a vers b à travers R vaut (v_a − v_b)/R), et résolvez.
- Une source de tension entre deux nœuds hors référence forme un supernœud : écrivez une loi des nœuds pour la région combinée plus l’équation de la source v_a − v_b = V_s.
- Méthode des courants de mailles (circuits plans) : attribuez un courant dans le sens horaire à chaque fenêtre, écrivez la loi des mailles autour de chaque maille ; une résistance commune est parcourue par la différence des deux courants de mailles.
- Une source de courant commune à deux mailles forme une supermaille : une loi des mailles autour de la boucle combinée plus l’équation de la source.
- Un circuit à N nœuds demande N − 1 équations de nœuds ; un circuit à M mailles demande M équations de mailles. Choisissez l’ensemble le plus petit. Les équations forment Gv = i ou Ri = v, un système linéaire.

Équations clés

$$\sum_{\text{branches}} \frac{v_n - v_k}{R_{nk}} = i_{\text{source into } n}$$

```
_branches_n-v_kR_nk=i_source into n
```

Loi des nœuds au nœud n

$$\sum_{\text{mesh}} R\,(i_m - i_{\text{adj}}) = \sum v_{\text{sources}}$$

```
_mesh R (i_m-i_adj)= v_sources
```

Loi des mailles autour de la maille m

$$G\mathbf{v} = \mathbf{i}$$

Forme matricielle nodale

$$R\mathbf{i} = \mathbf{v}$$

Forme matricielle des mailles

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Une source de 10 V alimente le nœud 1 à travers 2 Ω. Le nœud 1 a 4 Ω vers la masse et 2 Ω vers le nœud 2 ; le nœud 2 a 4 Ω vers la masse et une source de 1 A qui y entre. Trouvez v_1 et v_2.

1. Nœud 1 (×4) : $2(v_1 - 10) + v_1 + 2(v_1 - v_2) = 0$, donc $5v_1 - 2v_2 = 20$.
2. Nœud 2 (×4) : $2(v_2 - v_1) + v_2 - 4 = 0$, donc $-2v_1 + 3v_2 = 4$.
3. det = 15 − 4 = 11 ; $v_1 = (60 + 8)/11$, $v_2 = (20 + 40)/11$.

Réponse : $v_1 = 6.182$ V, $v_2 = 5.455$ V.

Exemple 3.2 La maille 1 contient une source de 10 V et 2 Ω ; la maille 2 contient 6 Ω ; les mailles partagent 4 Ω. Trouvez les courants de mailles et le courant dans la résistance commune.

1. Maille 1 : $6i_1 - 4i_2 = 10$. Maille 2 : $-4i_1 + 10i_2 = 0$.
2. det = 60 − 16 = 44 ; $i_1 = 100/44$, $i_2 = 40/44$.

Réponse : $i_1 = 2.273$ A, $i_2 = 0.909$ A ; la résistance commune est parcourue par 1.364 A.

Exemple 3.3 Une source de 5 V est placée entre les nœuds a et b (v_a − v_b = 5). Le nœud a a 1 Ω vers la masse, le nœud b a 4 Ω vers la masse, et 2 A sont injectés dans le supernœud. Trouvez v_a et v_b.

1. Loi des nœuds du supernœud : v_a/1 + v_b/4 = 2.
2. Substituez v_a = v_b + 5 : v_b + 5 + v_b/4 = 2, donc 1.25v_b = −3.

Réponse : v_b = −2.4 V, v_a = 2.6 V.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Combien d'équations de nœuds faut-il pour un circuit à 5 nœuds ?

   4.

2. Un nœud unique au potentiel v est relié par 2 Ω à 6 V et par 2 Ω à la masse. Trouvez v.

   $(v - 6)/2 + v/2 = 0$: $v = 3$ V.

3. Deux mailles partagent une résistance de 3 Ω ; $i_1 = 2$ A et $i_2 = 0.5$ A, tous deux dans le sens horaire. Trouvez le courant dans la résistance commune.

   1.5 A dans le sens de i_1.

4. Écrivez $5v_1 - 2v_2 = 20$, $-2v_1 + 3v_2 = 4$ sous la forme $Gv = i$.

   $G = [[5, -2], [-2, 3]]$, $i = (20, 4)$.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : On peut aussi écrire la loi des nœuds au nœud de référence.

En réalité : Elle donne une équation dépendante ; utilisez N − 1 nœuds.

Idée reçue : Les courants de mailles sont les courants de branche.

En réalité : Seulement sur les branches extérieures ; les branches communes sont parcourues par des différences.

Idée reçue : Le courant d'une source de tension est nul car elle n'a pas de résistance.

En réalité : Son courant est fixé par le reste du circuit ; c'est pourquoi on utilise des supernœuds.

Cartes mémoire

Nœud de référence

Masse, v = 0.

Méthode des potentiels de nœuds

Loi des nœuds en N − 1 nœuds.

Supernœud

Source de tension entre deux nœuds.

Méthode des courants de mailles

Loi des mailles autour de chaque fenêtre.

Supermaille

Gv = i

Source de courant commune à deux mailles.

Équations nodales sous forme matricielle.

Quiz d’autocontrôle

1. Un circuit à 4 nœuds demande combien d’équations en potentiels de nœuds ?

2

3

4

5

3. N − 1.

2. Une source de tension entre deux nœuds hors référence demande…

une supermaille

un supernœud

un court-circuit

la superposition

un supernœud. Réunissez les deux nœuds.

3. Le courant dans une résistance commune aux mailles 1 et 2 vaut…

$i_1 + i_2$

$i_1 - i_2$

$i_1 i_2$

zéro

$i_1 - i_2$. Les deux circulent dans le sens horaire dans leur propre maille.

4. Les équations de nœuds forment…

une équation différentielle

un système linéaire Gv = i

une équation du second degré

seulement un déterminant

un système linéaire Gv = i. Les circuits résistifs linéaires sont des systèmes linéaires.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le réseau électrique est un énorme problème d'analyse nodale. L'EIA explique que le réseau des États-Unis se compose de milliers de miles de lignes haute tension et de millions de miles de lignes basse tension reliant des milliers de centrales à des centaines de millions de clients. Au début du 20e siècle, plus de 4000 compagnies isolées fonctionnaient ; aujourd'hui, les 48 États contigus forment trois grandes interconnexions, Est, Ouest et ERCOT, reliées pour offrir plusieurs chemins à la circulation de l'électricité.

L'EIA note que l'offre doit égaler la demande à chaque instant et que des autorités d'équilibrage y veillent. Les gestionnaires de réseau le font avec des modèles de flux de puissance dont les équations sont la version alternative de la méthode des potentiels de nœuds de ce module, résolue pour des milliers de jeux de barres ; la même analyse indique aux planificateurs où de nouvelles lignes sont nécessaires pour raccorder l'éolien et le solaire loin des villes.

Sur Saving Planets : Algèbre linéaire · Solutions

Sources : U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur la méthode des nœuds et la superposition.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Circuits à plusieurs boucles.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Vérifiez vos potentiels de nœuds.
- Interactive Linear Algebra (Georgia Tech) (https://textbooks.math.gatech.edu/ila/): Résoudre les systèmes linéaires.

Regarder le cours magistral

Lecture 2: Basic Circuit Analysis Method (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-2/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Théorèmes des circuits : linéarité, superposition, transformation de sources, Thévenin, Norton et transfert maximal de puissance

Linéarité et superposition, transformations de sources, circuits équivalents de Thévenin et de Norton, calcul de R_Th en éteignant les sources ou avec une source de test, et théorème du transfert maximal de puissance.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser la superposition pour analyser des circuits à plusieurs sources.
- Convertir entre sources de tension et de courant.
- Trouver les équivalents de Thévenin et de Norton.
- Choisir une charge pour un transfert maximal de puissance et calculer cette puissance.

Notions clés

- Linéarité : dans un circuit de résistances et de sources, chaque tension et chaque courant est une combinaison linéaire des valeurs des sources. Superposition : trouvez la réponse à chaque source indépendante seule (autres sources de tension court-circuitées, sources de courant ouvertes) et additionnez.
- Transformation de sources : une source de tension V en série avec R équivaut, à ses bornes, à une source de courant V/R en parallèle avec R.
- Théorème de Thévenin : tout réseau linéaire à deux bornes se comporte comme une source V_Th en série avec R_Th. V_Th est la tension à vide ; R_Th est la résistance vue avec les sources indépendantes éteintes (ou V_oc/i_sc).
- Théorème de Norton : le même réseau est une source de courant I_N = i_sc en parallèle avec R_N = R_Th ; V_Th = I_N R_Th.
- Transfert maximal de puissance : une charge reçoit le plus de puissance quand R_L = R_Th, et alors P_max = V_Th²/(4R_Th). Le rendement en ce point n'est que de 50 %, c'est pourquoi les réseaux électriques sont plutôt conçus pour R_L ≫ R_source.

Équations clés

$$v = \sum_k v^{(k)}$$

v=_k v^(k)

Superposition

$$V_{Th} = v_{oc},\ \ R_{Th} = \frac{v_{oc}}{i_{sc}}$$

`V_Th=v_oc,\ \ R_Th=_oci_sc`

Équivalent de Thévenin

$$I_N = \frac{V_{Th}}{R_{Th}}$$

`I_N=_ThR_Th`

Courant de Norton

$$P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}} \text{ at } R_L = R_{Th}$$

`P_=_Th^24R_Th\ at\ R_L=R_Th`

Transfert maximal de puissance

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Une source de 12 V en série avec 4 Ω alimente les bornes a–b, avec 12 Ω entre a et b. Trouvez les équivalents de Thévenin et de Norton.

1. V_Th = 12 × 12/(4 + 12) = 9 V (diviseur).
2. R_Th = 4 ‖ 12 = 48/16 = 3 Ω (source court-circuitée).
3. I_N = 9/3.

Réponse : V_Th = 9 V, R_Th = 3 Ω; I_N = 3 A.

Exemple 4.2 Pour ce circuit, trouvez la puissance fournie à une charge de 6 Ω et la puissance de charge maximale possible.

1. i = 9/(3 + 6) = 1 A; P = 1² × 6 = 6 W.
2. Maximum pour R_L = 3 Ω : P_max = 9²/(4 × 3).

Réponse : 6 W ; P_max = 6.75 W pour 3 Ω.

Exemple 4.3 Un nœud est relié à une source de 10 V par 5 Ω, à la masse par 5 Ω, et reçoit une source de courant de 2 A. Trouvez le potentiel du nœud par superposition.

1. 10 V seule (2 A ouverte) : le diviseur donne 5 V.
2. 2 A seule (10 V court-circuitée) : 2 × (5 ‖ 5) = 5 V.
3. Additionnez les deux.

Réponse : v = 10 V. Vérification par la loi des nœuds : (10 − 10)/5 + 2 = 10/5.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Convertissez une source de 6 V en série avec 2 Ω en une forme de Norton.

   3 A en parallèle avec 2 Ω.

2. Un réseau a v_oc = 15 V et i_sc = 5 A. Trouvez R_Th.

   3 Ω.

3. Quelle charge reçoit la puissance maximale de V_Th = 20 V, R_Th = 5 Ω, et combien ?

   R_L = 5 Ω, P = 400/20 = 20 W.

4. Peut-on additionner des puissances par superposition ?

   Non : la puissance n'est pas linéaire ; additionnez tensions ou courants, puis calculez la puissance.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Éteindre une source de tension signifie la retirer.
En réalité : Remplacez-la par un court-circuit ; une source de courant devient un circuit ouvert.

Idée reçue : Transfert maximal de puissance signifie rendement maximal.
En réalité : Pour R_L = R_Th, la moitié de la puissance est perdue dans R_Th.

Idée reçue : Les sources commandées sont éteintes pour calculer R_Th.
En réalité : Gardez les sources commandées ; utilisez une source de test pour trouver R_Th.

Cartes mémoire

Superposition	Transformation de sources
Additionnez les réponses à chaque source seule.	V en série avec R ↔ V/R en parallèle avec R.

Thévenin

V_{Th} en série avec R_{Th}.

Norton

I_N en parallèle avec R_N.

R_{Th}

v_{oc}/i_{sc}.

Puissance maximale

$V_{Th}^2/(4R_{Th})$ pour $R_L = R_{Th}$.

Quiz d’autocontrôle

1. Pour trouver R_{Th}, les sources de tension indépendantes sont remplacées par…

des circuits ouverts

des courts-circuits

des résistances

des sources de courant

des courts-circuits. Zéro volt, c’est un court-circuit.

2. V_{Th} est…

le courant de court-circuit

la tension à vide

toujours la tension de la source

la tension de la charge

la tension à vide. Mesurée sans rien de branché.

3. Le transfert maximal de puissance a lieu quand…

$R_L = 0$

$R_L = R_{Th}$

$R_L \to \infty$

R_L = 2R_Th

R_L = R_Th. Charge adaptée.

4. Le rendement au transfert maximal de puissance est…

25%

50%

75%

100%

50%. Puissance égale dans R_Th et R_L.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les cellules solaires se comportent comme des sources dont le point de fonctionnement de type Thévenin varie avec l'ensoleillement et la température ; leur électronique cherche donc en permanence la charge qui absorbe le plus de puissance. La part de la lumière solaire convertie en électricité s'est améliorée régulièrement : l'EIA indique que les panneaux PV du commerce avaient en moyenne moins de 10 % de rendement au milieu des années 1980, environ 15 % en 2015, et approchent aujourd'hui 25 % pour les modules les plus avancés, tandis que des cellules expérimentales et spatiales ont atteint près de 50 %.

L'EIA indique aussi que les centrales PV de grande taille des États-Unis ont produit environ 292 milliards de kWh en 2025, contre 6 millions de kWh en 2004, et les petits systèmes en toiture environ 93 milliards de kWh. Adapter chaque chaîne de panneaux à son meilleur point de fonctionnement, l'idée derrière le transfert maximal de puissance, fait partie de la façon dont ces kilowattheures sont tirés de chaque mètre carré.

Sur Saving Planets : Physique II · Espace

Sources : U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur les équivalents de Thévenin et de Norton.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): Résistance interne et tension aux bornes.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Mesurez v_oc et i_sc.
- 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): Résistance équivalente.

Regarder le cours magistral

Lecture 3: Superposition, Thévenin and Norton (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-3/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Amplificateurs opérationnels

L’amplificateur opérationnel idéal et ses deux règles, amplificateurs inverseur et non inverseur, suiveurs de tension, amplificateurs sommateur et différentiel, saturation, étages en cascade, et amplificateurs opérationnels dans les capteurs et la mesure.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Appliquer les règles de l’amplificateur opérationnel idéal avec contre-réaction.
- Analyser les montages inverseur, non inverseur, suiveur, sommateur et différentiel.
- Reconnaître la saturation et ses limites.
- Concevoir un amplificateur simple pour un signal de capteur.

Notions clés

- Un amplificateur opérationnel amplifie la différence entre ses entrées avec un gain très élevé. Avec contre-réaction, les règles idéales sont : aucun courant n’entre dans les entrées, et les deux tensions d’entrée sont égales ($v_+ = v_-$).
- Amplificateur inverseur : v_o = −(R_f/R_in)v_in. Amplificateur non inverseur : v_o = (1 + R_f/R_g)v_in. Suiveur de tension (tampon) : v_o = v_in sans presque aucun courant prélevé sur la source.
- Amplificateur sommateur : v_o = −R_f(v_1/R_1 + v_2/R_2 + …). Amplificateur différentiel à rapports appariés : v_o = (R_2/R_1)(v_2 − v_1).
- La sortie ne peut pas dépasser les tensions d’alimentation ; au-delà, l’amplificateur sature et les règles linéaires ne s’appliquent plus.
- Des étages en cascade multiplient leurs gains, et comme la sortie d’un amplificateur opérationnel se comporte comme une source de tension idéale, un étage n’est pas chargé par le suivant.

Équations clés

$$v_+ = v_-,\ \ i_+ = i_- = 0$$

`v_+=v_-,\ \ i_+=i_-=0`

Règles de l’amplificateur opérationnel idéal (contre-réaction)

$$v_o = -\frac{R_f}{R_{in}} v_{in}$$

`v_o=-_fR_inv_in`

Amplificateur inverseur

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) v_{in}$$

`v_o=(1+(R_f)/(R_g))v_in`

Amplificateur non inverseur

$$v_o = -R_f \sum_k \frac{v_k}{R_k}$$

`v_o=-R_f_k(v_k)/(R_k)`

Amplificateur sommateur

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Un amplificateur inverseur a R_in = 10 kΩ et R_f = 100 kΩ. Trouvez le gain et v_o pour v_in = 0.2 V.

1. Gain = −100/10 = −10.
2. v_o = −10 × 0.2.

Réponse : Gain −10, v_o = −2 V.

Exemple 5.2 Concevez un amplificateur non inverseur de gain 10 avec R_g = 1 kΩ.

1. 1 + R_f/R_g = 10, donc R_f/R_g = 9.

Réponse : R_f = 9 kΩ.

Exemple 5.3 Un amplificateur sommateur a R_f = R_1 = R_2 = 10 kΩ, v_1 = 1 V et v_2 = 2 V. Trouvez v_o. Et si l'alimentation est de ±12 V et que le gain est augmenté pour que la réponse idéale soit −15 V ?

1. v_o = −10k(1/10k + 2/10k) = −3 V.
2. La sortie ne peut pas descendre sous la tension d'alimentation de −12 V.

Réponse : v_o = −3 V ; avec le gain plus élevé, il sature vers −12 V.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez le gain d’un amplificateur inverseur avec R_f = 47 kΩ et R_in = 4.7 kΩ.

   −10.

2. Un suiveur de tension a v_in = 1.5 V. Trouvez v_o.

   1.5 V.

3. Deux étages de gains −10 et 5 sont en cascade. Trouvez le gain total.

   −50.

4. Un amplificateur différentiel avec $R_2/R_1 = 4$ a $v_2 = 1.2$ V et $v_1 = 1.0$ V. Trouvez v_o.

   4 × 0.2 = 0.8 V.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les entrées de l’amplificateur opérationnel absorbent le courant du circuit.
En réalité : Idéalement aucun courant n’entre dans les entrées ; il passe par R_f.

Idée reçue : $v_+ = v_-$ toujours.
En réalité : Seulement avec contre-réaction et hors saturation.

Idée reçue : Le gain peut être aussi grand qu’on veut.
En réalité : La sortie est limitée par les tensions d’alimentation et la bande passante réelle de l’amplificateur.

Cartes mémoire

Amplificateur opérationnel idéal

$v_+ = v_-$, aucun courant d’entrée.

Inverseur

−R_f/R_in.

Non inverseur

1 + R_f/R_g.

Suiveur

Tampon de gain 1.

Sommateur

−R_f Σ v_k/R_k.

Saturation

Sortie limitée par l’alimentation.

Quiz d’autocontrôle

1. Avec contre-réaction, un amplificateur opérationnel idéal crée...

$v_+ = 0$

$v_+ = v_-$

$v_o = 0$

$i_o = 0$

$v_+ = v_-$. Court-circuit virtuel.

2. Un amplificateur inverseur avec R_f = 20 kΩ, R_in = 5 kΩ a un gain de...

4

−4

5

−5

−4. −R_f/R_in.

3. Un suiveur de tension sert à...

additionner des signaux

isoler une source

inverser

intégrer

isoler une source. Gain 1, pas de charge.

4. Le gain minimal d'un amplificateur non inverseur est...

0

1

−1

10

1. 1 + R_f/R_g ≥ 1.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Un réseau plus intelligent commence par la mesure, et mesurer de petits signaux est le travail de l'amplificateur opérationnel. L'EIA explique que le réseau intelligent combine la technologie numérique avec le système électrique traditionnel afin que fournisseurs et clients puissent envoyer et recevoir des informations, ce qui aide les fournisseurs à réduire les pertes d'électricité et à détecter et réparer les problèmes plus vite, et que des appareils intelligents sur les lignes et dans les postes permettent de gérer la tension plus efficacement et de localiser rapidement une panne.

Chaque compteur intelligent et chaque capteur de ligne amplifie le minuscule signal d'un capteur de courant ou d'un diviseur de tension jusqu'à une plage lisible par un convertisseur numérique, avec exactement les amplificateurs inverseur, non inverseur et différentiel de ce module. L'EIA ajoute que des appareils intelligents peuvent prévenir les clients quand les prix sont élevés afin qu'ils déplacent leur consommation hors des périodes de très forte demande.

Sur Saving Planets : Introduction à la programmation · Solutions

Sources : U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur l'abstraction de l'amplificateur opérationnel.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Réseaux de résistances pour régler le gain.
- 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): Diviseurs utilisés dans la contre-réaction.
- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): Révision.

Regarder le cours magistral

Lecture 19: The Operational Amplifier Abstraction (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-19/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Condensateurs et bobines

Capacité et inductance, leurs relations courant–tension, énergie stockée, continuité de la tension d'un condensateur et du courant d'une bobine, associations en série et en parallèle, comportement en régime continu permanent, et intégrateurs et dérivateurs à amplificateur opérationnel.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser i = C dv/dt et v = L di/dt.
- Calculer l'énergie stockée dans les condensateurs et les bobines.
- Associer condensateurs et bobines en série et en parallèle.
- Trouver les tensions et courants en régime continu permanent dans des circuits avec C et L.

Notions clés

- Un condensateur stocke de l'énergie dans un champ électrique : q = Cv, i = C dv/dt, w = ½Cv². Sa tension ne peut pas sauter instantanément ; en régime continu permanent il se comporte comme un circuit ouvert.
- Une bobine stocke de l'énergie dans un champ magnétique : v = L di/dt, w = ½Li². Son courant ne peut pas sauter instantanément ; en régime continu permanent elle se comporte comme un court-circuit.
- Les condensateurs en parallèle s'additionnent ; en série ils se combinent comme des résistances en parallèle. Les bobines se combinent comme des résistances : en série elles s'additionnent, en parallèle on combine les inverses.
- Un amplificateur opérationnel avec un condensateur en contre-réaction intègre : v_o = −(1/RC)∫v_in dt. Échanger R et C donne un dérivateur.
- Les condensateurs et bobines idéaux stockent et restituent l'énergie sans perte ; les réels ont une petite résistance et des fuites.

Équations clés

$$i = C\frac{dv}{dt},\ \ w = \tfrac{1}{2}Cv^2$$

`i=Cdv/dt,\ \ w=12Cv^2`

Condensateur

$$v = L\frac{di}{dt},\ \ w = \tfrac{1}{2}Li^2$$

`v=Ldi/dt,\ \ w=12Li^2`

Bobine

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

C_p=C_1+C_2,\ \ (1)/(C_s)=(1)/(C_1)+(1)/(C_2)

Associations de condensateurs

$$v_o = -\frac{1}{RC}\int v_{in}\, dt$$

v_o=-1/RC v_in dt

Intégrateur à amplificateur opérationnel

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 La tension d'un condensateur de 10 µF augmente de 2 V/ms. Trouvez son courant.

1. dv/dt = 2000 V/s.
2. i = 10 × 10⁻⁶ × 2000.

Réponse : i = 20 mA.

Exemple 6.2 Trouvez l'énergie dans un condensateur de 1000 µF sous 3 V et dans une bobine de 0.2 H parcourue par 3 A.

1. w_C = ½ × 10⁻³ × 3² = 4.5 × 10⁻³ J.
2. w_L = ½ × 0.2 × 3².

Réponse : 4.5 mJ et 0.9 J.

Exemple 6.3 Une source continue de 12 V alimente 2 Ω en série avec une bobine, avec une résistance de 4 Ω en parallèle avec un condensateur en sortie (régime permanent). Trouvez le courant de la bobine et la tension du condensateur.

1. En continu, la bobine est un court-circuit et le condensateur un circuit ouvert.
2. i = 12/(2 + 4) = 2 A; v_C = 2 × 4.

Réponse : i_L = 2 A, v_C = 8 V.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez 6 µF et 3 µF en série.

   2 µF.

2. Le courant d’une bobine de 50 mH varie de 100 A/s. Trouvez sa tension.

   5 V.

3. Trouvez 4 mH et 6 mH en série.

   10 mH.

4. Quelle charge un condensateur de 100 µF contient-il sous 9 V ?

   q = 0.9 mC.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un condensateur laisse passer le continu.
En réalité : En régime continu permanent, il bloque le courant (circuit ouvert).

Idée reçue : Le courant d’une bobine peut varier instantanément.
En réalité : Il faudrait une tension infinie ; le courant est continu.

Idée reçue : Les condensateurs s’associent comme les résistances.
En réalité : Ils s’associent à l’inverse : en parallèle ils s’additionnent.

Cartes mémoire

Condensateur

$i = C\,dv/dt$.

Bobine

$v = L\,di/dt$.

Énergie d’un condensateur

$\frac{1}{2}Cv^2$.

Énergie d’une bobine

$\frac{1}{2}Li^2$.

Régime continu permanent

Intégrateur

C ouvert, L en court-circuit. $v_o = -(1/RC)\int v_{in}\,dt$.

Quiz d’autocontrôle

1. En régime continu permanent, une bobine se comporte comme…

un circuit ouvert

un court-circuit

une résistance

une source

un court-circuit. di/dt = 0 donc v = 0.

2. Doubler la tension d’un condensateur multiplie son énergie par…

2

4

½

1

4. $w \propto v^2$.

3. Lequel ne peut pas varier instantanément ?

le courant du condensateur

la tension du condensateur

la tension de la bobine

le courant de la résistance

la tension du condensateur. Il faudrait un courant infini.

4. Deux condensateurs de 10 µF en parallèle donnent…

5 µF

10 µF

20 µF

100 µF

20 µF. Les condensateurs en parallèle s’additionnent.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Stocker l’énergie permet d’utiliser l’électricité solaire et éolienne après le coucher du soleil ou quand le vent tombe. L’EIA a indiqué en août 2026 que la capacité de stockage par batteries à grande échelle des États-Unis a crû en moyenne de 70 % par an sur les trois dernières années, atteignant 43.6 GW fin 2025, et que les exploitants ont ajouté 8.3 GW de plus au premier semestre 2026, pour atteindre près de 52 GW, avec environ 54 GW de plus prévus dans les deux ans et demi à venir.

L’EIA note que les centrales solaires accueillent les plus grosses unités de batteries et que le solaire couplé au stockage permet de stocker l’électricité quand les prix sont bas et de la restituer quand ils sont élevés. Les batteries stockent l’énergie chimiquement, mais les condensateurs et bobines de ce module se trouvent dans chaque onduleur et chargeur de batterie, lissant les courants et stockant l’énergie quelques microsecondes à la fois pendant la conversion entre continu et alternatif.

Sur Saving Planets : Physique II · Solutions

Sources : U.S. EIA: Battery storage capacity averaged 70% growth over the last three years (Aug. 7, 2026) (https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67925) · OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): Inductance.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): Interactif.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur les condensateurs et les systèmes du premier ordre.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Circuits du premier ordre : régimes transitoires RC et RL

Réponses libres et indicielles des circuits RC et RL, constante de temps, solution générale x(t) = x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ), problèmes de commutation et énergie de la commutation numérique.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver les valeurs initiales et finales lors d’une commutation.
- Calculer les constantes de temps τ = RC et τ = L/R.
- Écrire et utiliser la solution générale du premier ordre.
- Estimer l’énergie et la puissance de commutation dans les circuits numériques.

Notions clés

- Un circuit avec un seul condensateur ou une seule bobine (plus des résistances et des sources continues) obéit à une équation différentielle du premier ordre. Sa réponse passe exponentiellement d’une valeur initiale à une valeur finale.
- Constante de temps : τ = R_Th C pour un circuit RC et τ = L/R_Th pour un circuit RL, où R_Th est la résistance vue par C ou L.
- Solution générale : x(t) = x(∞) + [x(0⁺) − x(∞)] e^(−t/τ). Après un τ, la variation est accomplie à 63.2 % ; après 5τ, à 99.3 %.
- Utilisez la continuité : v_C(0⁺) = v_C(0⁻) et i_L(0⁺) = i_L(0⁻). Trouvez x(∞) à partir du régime continu permanent (C ouvert, L en court-circuit).
- Charger une capacité C jusqu’à V à travers une résistance prélève CV² sur la source : ½CV² est stocké et ½CV² est perdu en chaleur. Les puces numériques chargent de minuscules capacités des milliards de fois par seconde, si bien que leur puissance dynamique vaut environ P = αCV²f.

Équations clés

$$\tau = RC, \;\; \tau = \frac{L}{R}$$

τ=RC,\ \ τ=L/R

Constantes de temps

$$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$$

x(t)=x(∞)+[x(0^+)-x(∞)]e^-t/τ

Réponse générale du premier ordre

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

`v_C(t)=V(1-e^-t/RC)`

Charge RC à partir de zéro

$$P_{dyn} \approx \alpha C V^2 f$$

Puissance de commutation numérique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Un condensateur de 1000 µF se charge à travers 10 kΩ depuis une source de 3 V, en partant de 0 V. Trouvez τ, v_C à t = τ et le temps pour atteindre 99.3 % de 3 V.

1. τ = $10^4 \times 10^{-3}$ = 10 s.
2. v_C(τ) = 3(1 − e^{-1}) = 3 × 0.632.
3. 99.3 % demande 5τ.

Réponse : τ = 10 s, v_C(τ) = 1.90 V, environ 50 s.

Exemple 7.2 Une bobine de 0.5 H en série avec 10 Ω est branchée sur 20 V à t = 0. Trouvez τ, le courant final et i(0.1 s).

1. τ = 0.5/10 = 0.05 s; i(∞) = 20/10 = 2 A.
2. i(0.1) = 2(1 − e^(−0.1/0.05)) = 2(1 − e^{-2}).

Réponse : τ = 50 ms, i(∞) = 2 A, i(0.1 s) = 1.73 A.

Exemple 7.3 Un condensateur chargé se décharge à travers une résistance avec τ = 10 s. Quand sa tension atteint-elle la moitié de sa valeur initiale ?

1. $V_0 e^{(-t/\tau)} = V_0/2$ donne t = τ ln 2.

Réponse : t = 6.93 s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez τ pour 2 kΩ et 50 µF.

   0.1 s.

2. Après 3τ, quelle fraction de la variation est accomplie ?

   $1 - e^{-3} = 95.0\%$.

3. Trouvez τ pour 20 mH et 4 Ω.

   5 ms.

4. Puce d'exemple : C commutée effective = 1 nF, V = 1 V, f = 1 GHz, α = 1. Trouvez P, puis P sous 0.8 V.

   1 W ; 0.64 W, soit 36 % de moins.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La tension du condensateur saute à la fermeture de l'interrupteur.
En réalité : La tension du condensateur est continue ; son courant peut sauter.

Idée reçue : La réponse est terminée après une constante de temps.
En réalité : Un τ correspond à 63.2 % ; comptez environ 5τ pour « terminé ».

Idée reçue : τ n'utilise que la résistance de la source.
En réalité : Utilisez la résistance de Thévenin vue par le condensateur ou la bobine.

Cartes mémoire

Constante de temps RC

τ = RC.

Constante de temps RL

τ = L/R.

Solution générale

x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ).

Une τ

63.2 % de la variation.

Cinq τ

99.3%.

Puissance de commutation

$P \approx \alpha C V^2 f$.

Quiz d'autocontrôle

1. τ pour un circuit RC vaut…

R/C

RC

1/RC

√(RC)

RC. En secondes.

2. Après une constante de temps, un condensateur en charge atteint environ…

37%

50%

63%

99%

63%. $1 - e^{-1}$.

3. Baisser de 20 % la tension d'alimentation d'une puce réduit sa puissance dynamique d'environ…

20%

36%

50%

64%

36%. $0.8^2 = 0.64$.

4. Le courant de la bobine à $t = 0^+$ est égal à…

toujours zéro

sa valeur à 0^-

la valeur finale

V/R

sa valeur à 0^-. Continuité.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Chaque bit qu'un ordinateur bascule charge et décharge une minuscule capacité à travers une résistance ; c'est pourquoi l'informatique consomme autant d'électricité. Un rapport du Berkeley Lab pour le Département de l'Énergie des États-Unis a établi que les centres de données ont consommé environ 4.4 % de l'électricité totale des États-Unis en 2023, que leur consommation est passée de 58 TWh en 2014 à 176 TWh en 2023, et qu'ils devraient utiliser 325 à 580 TWh, soit 6.7 % à 12 % de l'électricité du pays, d'ici 2028, une croissance due en grande partie aux serveurs d'SI.

La formule de puissance de commutation de ce module montre le principal levier des concepteurs de puces : la puissance croît avec le carré de la tension d'alimentation, donc une tension 20 % plus basse réduit la puissance dynamique de 36 % (exemple). Le chercheur principal du rapport souligne que comprendre ce qui alimente la croissance aide à repérer des gisements d'efficacité.

Sur Saving Planets : Introduction à la programmation · Équations différentielles

Sources : Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/) · OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): Régimes transitoires des bobines.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur les régimes transitoires du premier ordre et l'énergie des circuits numériques.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Regardez des condensateurs se charger.

Regarder le cours magistral

Lecture 12: Capacitors and First-Order Systems (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-12/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Circuits du second ordre : réponses libre et indicielle des circuits RLC

Circuits RLC série et parallèle, équation caractéristique, fréquence néperienne α et pulsation de résonance ω_0, réponses apériodique, critique et pseudo-périodique, facteur de qualité, et échange d'énergie LC.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Écrire l'équation du second ordre des circuits RLC série et parallèle.
- Calculer α, ω_0 et ω_d et classer l'amortissement.
- Trouver la forme de la réponse et ses constantes à partir des conditions initiales.
- Relier Q aux oscillations et aux pertes d'énergie.

Notions clés

- Un circuit avec une bobine et un condensateur obéit à une équation du second ordre. Pour un RLC série : α = R/(2L), ω_0 = 1/√(LC). Pour un RLC parallèle : α = 1/(2RC), même ω_0.
- Racines s = −α ± √(α² − ω_0^2). Apériodique (α > ω_0) : deux racines réelles, pas d'oscillation. Critique (α = ω_0) : retour le plus rapide sans dépassement. Pseudo-périodique (α < ω_0) : oscillation amortie à ω_d = √(ω_0^2 − α²).
- Un circuit LC idéal (R = 0) échange indéfiniment l'énergie entre le champ électrique du condensateur et le champ magnétique de la bobine à ω_0.
- Facteur de qualité d'un RLC série : Q = ω_0L/R = (1/R)√(L/C). Un Q élevé signifie une résonance aiguë et des oscillations longues.
- Résistance critique d'un RLC série : R = 2√(L/C).

Équations clés

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \;\; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

α=R/2L,\ \ ω_0=1

Paramètres du RLC série

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

s_1,2=-αα^2-ω_0^2

Racines caractéristiques

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

`ω_d=ω_0^2-α^2`

Pseudo-pulsation

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$$

`Q=(ω_0L)/(R)`

Facteur de qualité (série)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Un RLC série a R = 10 Ω, L = 10 mH et C = 10 µF. Trouvez ω_0, f_0, α et le type d'amortissement.

1. $\omega_0 = 1/\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})} = 1/\sqrt{10^{-7}} = 3162$ rad/s ; $f_0 = \omega_0/2\pi$.
2. $\alpha = 10/(2 \times 0.01) = 500\ s^{-1} < \omega_0$.

Réponse : $\omega_0 = 3162$ rad/s, $f_0 = 503.3$ Hz, $\alpha = 500\ s^{-1}$: pseudo-périodique.

Exemple 8.2 Pour le même circuit, trouvez ω_d et Q.

1. $\omega_d = \sqrt{(3162^2 - 500^2)} = \sqrt{(10^7 - 2.5 \times 10^5)}$.
2. $Q = 3162 \times 0.01/10$.

Réponse : ω_d = 3122.5 rad/s, Q = 3.16.

Exemple 8.3 Quelle résistance rendrait ce circuit critique ?

1. $R = 2\sqrt{(L/C)} = 2\sqrt{(0.01/10^{-5})} = 2\sqrt{1000}$.

Réponse : R = 63.2 Ω.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un RLC série a $\alpha = 200\ s^{-1}$ et $\omega_0 = 100$ rad/s. Classez-le.

Apériodique.

2. Trouvez ω_0 pour L = 1 mH, C = 1 µF.

   31623 rad/s (5.03 kHz).

3. Un RLC parallèle a R = 1 kΩ et C = 1 µF. Trouvez α.

   $1/(2 \times 10^3 \times 10^{-6}) = 500\ s^{-1}$.

4. Doubler R dans un RLC série change Q d'un facteur…

   Un facteur ½.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : α a la même formule pour les RLC série et parallèle.
En réalité : Série α = R/2L ; parallèle α = 1/(2RC).

Idée reçue : Critique signifie oscillant.
En réalité : C'est la frontière : pas d'oscillation, stabilisation la plus rapide.

Idée reçue : ω_d est égal à ω_0.
En réalité : ω_d est plus faible dès qu'il y a amortissement.

Cartes mémoire

Fréquence néperienne

α = R/2L (série).

Pulsation de résonance

$\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

Apériodique

$\alpha > \omega_0$.

Sous-amorti

$\alpha < \omega_0$, oscille à ω_d.

R critique

$2\sqrt{(L/C)}$ (série).

Q

$\omega_0 L/R$.

Quiz d'autocontrôle

1. Pseudo-périodique signifie…

$\alpha > \omega_0$

$\alpha = \omega_0$

$\alpha < \omega_0$

R = 0 seulement

$\alpha < \omega_0$. Racines complexes.

2. ω_0 pour un circuit LC vaut...

LC

1/LC

1/√(LC)

√(L/C)

1/√(LC). Pulsation de résonance.

3. Augmenter R dans un RLC série rend la réponse...

plus oscillante

plus amortie

inchangée

instable

plus amortie. α augmente.

4. Dans un circuit LC idéal, l'énergie...

est perdue en chaleur

s'échange entre C et L

reste dans C

augmente

s’échange entre C et L. Pas de résistance.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les circuits résonants permettent aux véhicules électriques de se recharger sans câble. L’Alternative Fuels Data Center du Département de l’Énergie des États-Unis explique que la recharge par induction utilise un champ électromagnétique pour transférer l’électricité à un VE, que certaines bornes sans fil fonctionnent déjà à des puissances comparables au niveau 2, que cette technologie est plus courante pour les transports publics et les flottes à forte puissance, et que le DOE mène des recherches sur la recharge sans fil de forte puissance.

Les chargeurs sans fil accordent une bobine (L) et un condensateur (C) de chaque côté sur la même $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$ pour que l’énergie s’échange efficacement à travers l’entrefer, et un Q élevé limite les pertes. C’est le principe des chargeurs sans fil pour transports publics et flottes décrits par l’AFDC.

Sur Saving Planets : Physique II · Équations différentielles

Sources : U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits)

Ressources d’apprentissage gratuites

- 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): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits): Oscillations amorties.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur les systèmes du second ordre.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Construisez un circuit LC.

Regarder le cours magistral

Lecture 15: Second-Order Systems (part 1) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-15-part-1/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Régime sinusoïdal permanent : phaseurs et impédance

Sinusoïdes, amplitude, fréquence, phase et valeurs efficaces, nombres complexes, phaseurs, impédance et admittance de R, L et C, analyse des circuits en alternatif avec la loi d'Ohm, la loi des nœuds, la loi des mailles, les méthodes nodale et de Thévenin sous forme de phaseurs, et bases de la réponse en fréquence.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Passer des sinusoïdes temporelles aux phaseurs et inversement.
- Calculer les impédances de R, L et C à une fréquence donnée.
- Analyser des circuits en alternatif avec les versions en phaseurs des méthodes du continu.
- Décrire comment l'impédance varie avec la fréquence dans des filtres simples.

Notions clés

- Une sinusoïde v(t) = V_m cos(ωt + φ) a une amplitude V_m, une pulsation ω = 2πf et une phase φ. Sa valeur efficace est V_m/√2 ; le 120 V domestique des États-Unis est une valeur efficace à 60 Hz, soit une crête d'environ 170 V.
- Un phaseur est le nombre complexe V = V_m∠φ qui porte l'amplitude et la phase. En régime sinusoïdal établi, d/dt devient une multiplication par jω.
- Impédance Z = V/I : Z_R = R, Z_L = jωL, Z_C = 1/(jωC) = −j/(ωC). Les bobines se comportent comme des courts-circuits à basse fréquence et des circuits ouverts à haute fréquence ; les condensateurs font l'inverse.
- Tous les outils du continu (série/parallèle, diviseurs, analyse nodale et par mailles, Thévenin et Norton) fonctionnent avec les impédances et l'arithmétique complexe.
- Un filtre passe-bas RC laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes ; sa fréquence de coupure (à mi-puissance) est ω_c = 1/(RC).

Équations clés

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

```
V_rms=(V_m)/(2)
```

Valeur efficace d'une sinusoïde

$$Z_R = R,\ Z_L = j\omega L,\ Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

```
Z_R=R,\ Z_L=jω L,\ Z_C=(1)/(jω C)
```

Impédances

$$\mathbf{V} = \mathbf{I}Z$$

Loi d’Ohm en phaseurs

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

ω_c=1/RC

Coupure d’un filtre RC

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Exprimez v(t) = 170 cos(377t) V sous forme de phaseur et trouvez sa valeur efficace et sa fréquence.

1. V = 170∠0° V (crête).
2. V_eff = 170/√2 ; f = 377/(2π).

Réponse : V_eff = 120.2 V à f = 60.0 Hz.

Exemple 9.2 À 60 Hz, trouvez l’impédance d’une bobine de 0.1 H et d’un condensateur de 100 µF.

1. ω = 2π × 60 = 377.0 rad/s.
2. Z_L = j × 377.0 × 0.1; Z_C = −j/(377.0 × 10^{-4}).

Réponse : Z_L = j37.70 Ω, Z_C = −j26.53 Ω.

Exemple 9.3 Une source de 120 V (efficace), 60 Hz alimente 30 Ω en série avec 0.1 H. Trouvez le courant et sa phase.

1. Z = 30 + j37.70 Ω; |Z| = √(30² + 37.70²) = 48.18 Ω, ∠51.49°.
2. I = 120/48.18 à −51.49°.

Réponse : I = 2.491 A efficace, en retard de 51.49° sur la tension.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la valeur efficace d’une sinusoïde de 10 V crête.

   7.071 V.

2. Trouvez l’impédance de 1 µF à ω = 1000 rad/s.

   −j1000 Ω.

3. Trouvez la fréquence de coupure d’un filtre RC avec R = 1 kΩ et C = 1 µF.

   ω_c = 1000 rad/s (159.2 Hz).

4. Convertissez 3 + j4 en forme polaire.

   5∠53.13°.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : 120 V alternatif signifie 120 V crête.
En réalité : C’est la valeur efficace ; la crête vaut environ 170 V.

Idée reçue : Les impédances s’additionnent comme des modules.
En réalité : Additionnez des nombres complexes : 30 + j40 a un module de 50, pas 70.

Idée reçue : Les phaseurs fonctionnent pour toute forme d’onde.
En réalité : Ils s’appliquent au régime sinusoïdal établi à une seule fréquence.

Cartes mémoire

Phaseur

V_m∠φ.

RMS

V_m/√2.

Z_L

jωL.

Z_C

1/(jωC).

Loi d’Ohm en phaseurs

V = IZ.

Coupure RC

ω_c = 1/RC.

Quiz d’autocontrôle

1. L’impédance d’une bobine vaut…

jωL

1/(jωL)

ωL

L/ω

jωL. $v = L\, di/dt \rightarrow j\omega L$.

2. À très haute fréquence, un condensateur se comporte comme…

un circuit ouvert

un court-circuit

une résistance

une bobine

un court-circuit. $|Z_C| = 1/(\omega C) \rightarrow 0$.

3. La valeur efficace d’une sinusoïde est sa crête multipliée par…

0.5

0.637

0.707

1.414

0.707. $1/\sqrt{2}$.

4. Dans un circuit RL, le courant…

est en avance sur la tension

est en retard sur la tension

est en phase

est nul

est en retard sur la tension. Angle de phase inductif.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La recharge d'un VE à domicile est un problème de circuit en alternatif. L'Alternative Fuels Data Center explique que la recharge en alternatif de niveau 1 utilise une prise de 120 V, suppose environ 1.9 kW et ajoute environ 5 miles d'autonomie par heure, donc 8 heures peuvent restituer environ 40 miles pour un VE de taille moyenne. Le niveau 2 en alternatif utilise 240 V (domicile) ou 208 V (commercial) ; la plupart des chargeurs résidentiels de niveau 2 fonctionnent jusqu'à 30 A, délivrent 7.2 kW et environ 25 miles d'autonomie par heure, et exigent un circuit dédié de 40 A selon l'article 625 du National Electrical Code.

Ce sont des valeurs efficaces : 1.9 kW sous 120 V correspondent à environ 15.8 A, et 7.2 kW sous 240 V à 30 A. L'AFDC ajoute qu'en 2023 près de 80 % des points de recharge publics étaient de niveau 2, et que les bornes de niveau 2 vont de 2.9 à 19.2 kW. La plupart des propriétaires de VE font l'essentiel de leurs recharges à domicile.

Sur Saving Planets : Physique II · Solutions

Sources : U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits)

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): Section de manuel gratuite.
- 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 et phase.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Cours sur le régime sinusoïdal établi et l'impédance.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Interactif.

Regarder le cours magistral

Lecture 16: Sinusoidal Steady State (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-16/) (en anglais)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Puissance en alternatif, facteur de puissance, résonance, transformateurs et systèmes triphasés

Puissance instantanée et moyenne, puissances active, réactive et apparente, le triangle des puissances, le facteur de puissance et sa correction, la résonance série et la bande passante, les transformateurs idéaux, les systèmes triphasés équilibrés, et pourquoi le réseau transporte l'énergie en haute tension.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer les puissances active, réactive et apparente et le facteur de puissance.
- Dimensionner un condensateur de correction du facteur de puissance.
- Analyser des transformateurs idéaux et des charges triphasées équilibrées.
- Expliquer les pertes de transport avec I^2R.

Notions clés

- Puissance moyenne (active) P = V_eff I_eff cos θ en watts, où θ est l'angle entre tension et courant. Puissance réactive Q = V_eff I_eff sin θ en VAR. Puissance apparente S = V_eff I_eff en VA, et $S^2 = P^2 + Q^2$.
- Facteur de puissance pf = cos θ = P/S. Les moteurs sont inductifs (pf en retard). Un condensateur en parallèle fournit localement la puissance réactive, ce qui relève le pf et réduit le courant que le fournisseur doit délivrer : $C = Q/(\omega V^2)$ pour une correction complète.
- À la résonance série $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$, les réactances s'annulent, l'impédance se réduit à R et le courant est maximal ; la bande passante vaut ω_0/Q.
- Un transformateur idéal de rapport de spires $N_1{:}N_2$ a $V_2/V_1 = N_2/N_1$ et $I_2/I_1 = N_1/N_2$, donc la puissance d'entrée égale la puissance de sortie.
- Triphasé équilibré : trois sinusoïdes décalées de 120°. Puissance totale P = √3 V_L I_L cos θ, constante dans le temps. Les pertes en ligne valent I^2R, donc multiplier la tension par k à puissance égale divise le courant par k et les pertes par k^2.

Équations clés

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos\theta, \quad Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$$

`P=V_rmsI_rmsθ,\ \ Q=V_rmsI_rmsθ`

Puissance active et réactive

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \text{pf} = \frac{P}{S}$$

`S^2=P^2+Q^2,\ \ pf=P/S`

Triangle des puissances

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

`(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)=(I_1)/(I_2)`

Transformateur idéal

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\theta$$

`P_3=3 V_LI_Lθ`

Puissance triphasée équilibrée

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Un moteur absorbe 20 A efficaces sous 240 V efficaces avec un facteur de puissance de 0.8 en retard. Trouvez S, P et Q.

1. S = 240 × 20 = 4800 VA.
2. P = 4800 × 0.8 ; sin θ = 0.6, donc Q = 4800 × 0.6.

Réponse : S = 4.8 kVA, P = 3.84 kW, Q = 2.88 kVAR.

Exemple 10.2 Quel condensateur en parallèle corrigerait ce moteur à un facteur de puissance unitaire à 60 Hz ?

1. Le condensateur doit fournir Q = 2880 VAR.
2. C = Q/(ωV²) = 2880/(377.0 × 240²).

Réponse : C = 132.6 µF ; le courant de ligne passe de 20 A à 16 A.

Exemple 10.3 Une ligne de résistance 5 Ω transporte 10 MW. Comparez la perte I²R à 100 kV et à 20 kV (facteur de puissance unitaire, exemple monophasé).

1. À 100 kV : I = $10^7/10^5$ = 100 A, perte = 100^2 × 5 = 50 kW (0.5 %).
2. À 20 kV : I = 500 A, perte = 500^2 × 5 = 1.25 MW (12.5 %).

Réponse : Une tension 5 fois plus élevée divise les pertes par 25.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une charge a P = 6 kW et Q = 8 kVAR. Trouvez S et pf.

   S = 10 kVA, pf = 0.6.

2. Un transformateur abaisse 7200 V à 240 V. Trouvez N_1:N_2.

   30:1.

3. Trouvez la puissance d'une charge triphasée équilibrée de 480 V absorbant 100 A avec pf 0.9.

   $\sqrt{3} \times 480 \times 100 \times 0.9 = 74.8$ kW.

4. Un RLC série a $\omega_0 = 1000$ rad/s et Q = 20. Trouvez la bande passante.

   50 rad/s.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La puissance réactive ne produit pas de travail, donc elle n'a pas d'importance.

En réalité : Elle augmente quand même le courant, et le courant cause des pertes I^2R dans les câbles et les transformateurs.

Idée reçue : Un transformateur fonctionne en continu.

En réalité : Il lui faut un flux variable ; le continu n'en produit pas.

Idée reçue : La puissance triphasée vaut trois fois la puissance monophasée avec la tension composée.

En réalité : P = $\sqrt{3}$ V_L I_L cos θ.

Cartes mémoire

Puissance active

P = VI cos θ (W).

Puissance réactive

Q = VI sin θ (VAR).

Puissance apparente

S = VI (VA).

Facteur de puissance

P/S.

Transformateur

Triphasé

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

$P = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos\theta$.

Quiz d’autocontrôle

1. Le facteur de puissance est égal à…

Q/S

P/S

S/P

P/Q

P/S. cos θ.

2. Multiplier par 10 la tension de transport (à puissance égale) réduit les pertes I^2R de…

10×

100×

√10×

aucune

100×. Le courant est divisé par 10 ; perte $\propto I^2$.

3. Une charge inductive se corrige avec…

une résistance en série

un condensateur en parallèle

une bobine en parallèle

un transformateur

un condensateur en parallèle. Les condensateurs fournissent la puissance réactive.

4. Un transformateur abaisseur de rapport 10:1 rend le courant secondaire…

10× plus faible

10× plus fort

égaux

100× plus fort

10× plus fort. La puissance se conserve.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le réseau transporte l'énergie en haute tension pour limiter les pertes I^2R. L'EIA explique que les lignes à haute tension acheminent l'électricité sur de longues distances parce qu'une tension plus élevée rend le transport longue distance plus efficace et moins coûteux, que des lignes de distribution à plus basse tension la livrent aux clients, et que des transformateurs dans les postes élèvent et abaissent la tension entre les étapes. L'EIA estime que les pertes de transport et de distribution ont représenté en moyenne environ 5 % de l'électricité transportée et distribuée aux États-Unis de 2018 à 2022.

L'exemple traité montre la physique : une tension cinq fois plus élevée divise les pertes par vingt-cinq. La correction du facteur de puissance, des transformateurs efficaces et de nouvelles lignes longue distance vers les ressources éoliennes et solaires, que l'EIA cite parmi les défis du réseau, grignotent tous ces 5 %. L'AFDC note que les tensions triphasées courantes aux États-Unis sont 208/120 V et 480/277 V, fréquentes sur les sites commerciaux et industriels, et que les bornes de recharge rapide en continu prennent généralement une entrée alternative triphasée.

Sur Saving Planets : Solutions · Physique II

Sources : U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

Ressources d'apprentissage gratuites

- 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): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 15.5 Resonance in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-5-resonance-in-an-ac-circuit): Résonance et bande passante.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): Transformateurs et transport.

- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): L'induction derrière les transformateurs.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

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

1. Grandeurs et éléments des circuits : charge, courant, tension, puissance, énergie et loi d'Ohm
   4 exercices
2. Lois de Kirchhoff, résistances en série et en parallèle, diviseurs de tension et de courant
   4 exercices
3. Analyse systématique : méthodes des potentiels de nœuds et des courants de mailles
   4 exercices
4. Théorèmes des circuits : linéarité, superposition, transformation de sources, Thévenin, Norton et transfert maximal de puissance
   4 exercices
5. Amplificateurs opérationnels
   4 exercices
6. Condensateurs et bobines
   4 exercices
7. Circuits du premier ordre : régimes transitoires RC et RL
   4 exercices
8. Circuits du second ordre : réponses libre et indicielle des circuits RLC
   4 exercices
9. Régime sinusoïdal permanent : phaseurs et impédance
   4 exercices
10. Puissance en alternatif, facteur de puissance, résonance, transformateurs et systèmes triphasés
    4 exercices

Le laboratoire (Circuits lab)

Le labo est la partie pratique du cours. Ici, il est gratuit et sert uniquement à s'entraîner, sans crédits.

Chaque TP peut se faire dans une simulation PhET gratuite ou avec un bloc de piles de 3 V. Ne travaillez jamais sur le câblage domestique ni sur les prises murales : la tension du secteur peut tuer. Ne court-circuitez pas une pile, et branchez les condensateurs électrolytiques dans le bon sens.

Référence de sécurité : OpenStax University Physics Volume 2, 10.6 Household wiring and electrical safety (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-6-household-wiring-and-electrical-safety)

TP A : loi d’Ohm et multimètre

SEMAINE 2

Objectif : Mesurer correctement tension, courant et résistance, montrer que le courant est proportionnel à la tension pour une résistance, et déduire R de la pente.

$$v = iR, \quad p = vi$$

```
v=iR, p=vi
```

Loi d’Ohm et puissance

Mode opératoire

1. Ouvrez PhET Ohm’s Law et Circuit Construction Kit: DC ; montez une pile et une résistance et ajoutez un voltmètre (en parallèle) et un ampèremètre (en série).
2. À la maison : sur une plaque d’essai, reliez une résistance de 1 kΩ à une pile AA (1.5 V) puis à deux (3 V). Mesurez v aux bornes de la résistance et i en série avec le multimètre sur son calibre mA.
3. Mesurez la résistance seule avec le calibre Ω (alimentation débranchée) et comparez avec v/i.
4. Tracez i en fonction de v ; la pente vaut 1/R. Calculez la puissance dans chaque cas.

Tableau de données

v (V)	i (mA) pour 1 kΩ	p (mW)
1.5	1.5	2.25
3.0	3.0	9.0

Valeurs idéales pour une résistance de 1 kΩ ; des piles neuves affichent un peu plus de 1.5 V chacune et les résistances sont dans leur tolérance (souvent ±5 %).

Exemple de calcul

1. R = v/i = 3.0/0.003 = 1000 Ω.
2. p = vi = 3.0 × 0.003 = 9 mW, bien en dessous de la puissance nominale d’une résistance de ¼ W.

> **Sécurité**
>
> - N’utilisez que des blocs de piles de 1.5–3 V ; ne branchez jamais rien sur une prise murale.
> - Ne branchez jamais le multimètre sur son calibre courant directement aux bornes d’une pile : c’est un court-circuit.

Alternative à la maison ou virtuelle

- La version sur plaque d’essai est le TP à la maison.

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

Lien avec la planète : C’est la même mesure v·i qu’effectue un wattmètre à prise ou un compteur communicant pour montrer où va l’énergie ; selon le DOE, les LED consomment au moins 75 % de moins que les lampes à incandescence. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf)

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

TP B : lois de Kirchhoff, série et parallèle, et diviseurs

SEMAINE 3

Objectif : Vérifier la loi des mailles et la loi des nœuds par la mesure, contrôler les résistances équivalentes série et parallèle, et voir un diviseur de tension chuter sous charge.

$$\sum v = 0, \quad \sum i = 0, \quad v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

`v=0, i=0, v_2=v(R_2)/(R_1+R_2)`

Loi des mailles, loi des nœuds et diviseur

Mode opératoire

1. Montez 1 kΩ et 2 kΩ en série sous 3 V (PhET ou plaque d'essai). Mesurez le courant et chaque tension ; vérifiez que les tensions s'additionnent pour donner celle de la source.
2. Remontez deux résistances de 1 kΩ en parallèle sous 3 V. Mesurez le courant dans chaque branche et dans le fil de la source ; vérifiez la loi des nœuds.
3. Traitez la paire série comme un diviseur et mesurez v aux bornes de la résistance de 2 kΩ.
4. Branchez une « charge » de 2 kΩ aux bornes de la résistance de 2 kΩ et mesurez à nouveau ; expliquez la baisse par l'association en parallèle.

Tableau de données

Circuit	Courant	Tensions
1 kΩ + 2 kΩ en série	1.0 mA	1.0 V et 2.0 V
1 kΩ ‖ 1 kΩ	3.0 mA chacune, 6.0 mA au total	3.0 V
Diviseur chargé par 2 kΩ	1.5 mA fournis par la source	1.5 V en sortie

Valeurs idéales pour une source de 3 V.

Exemple de calcul

1. Série : i = 3/3000 = 1 mA ; 1 V + 2 V = 3 V (loi des mailles).
2. Diviseur chargé : 2 kΩ ‖ 2 kΩ = 1 kΩ, donc v_out = 3 × 1/(1 + 1) = 1.5 V au lieu de 2 V.

> **Sécurité**
>
> - Blocs de piles basse tension uniquement ; retirez la pile avant de recâbler.

Alternative à la maison ou virtuelle

- La version sur plaque d'essai est le TP à la maison.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Lien avec la planète : L'EIA explique que les cellules photovoltaïques sont câblées en panneaux et en champs ; les chaînes en série additionnent les tensions et les chaînes en parallèle additionnent les courants, comme ici. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

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

TP C : équivalent de Thévenin d’une pile et puissance maximale

SEMAINE 6

Objectif : Modéliser une pile réelle par V_Th en série avec R_Th en mesurant sa tension à vide et en charge, puis prédire la charge donnant la puissance maximale.

$$R_{Th} = \frac{v_{oc} - v_L}{i_L}, \quad P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}}$$

`R_Th=_oc-v_Li_L, P_=_Th^24R_Th`

Thévenin à partir de deux mesures

Mode opératoire

1. Dans PhET Circuit Construction Kit: DC, donnez à la pile une résistance interne et mesurez sa tension à vide et avec une résistance de charge.
2. À la maison : mesurez la tension à vide d’un bloc de 2 × AA. Puis branchez une résistance de 22 Ω d’au moins 1 W quelques secondes seulement et lisez la tension.
3. Calculez i_L = v_L/22 Ω et R_Th, et prédisez P_max.
4. Dans PhET, faites varier la résistance de charge et vérifiez que la puissance est maximale quand R_L = R_Th.

Tableau de données

Grandeur	Valeur d’exemple
v_oc	3.20 V
v_L (22 Ω)	3.10 V
i_L	0.141 A
R_Th	0.71 Ω

Valeurs d’exemple pour des piles alcalines neuves ; des piles usées présentent une R_Th bien plus grande.

Exemple de calcul

1. i_L = 3.10/22 = 0.1409 A; R_Th = 0.10/0.1409 = 0.71 Ω.
2. Puissance dans la charge = 3.10 × 0.1409 = 0.437 W, donc utilisez une résistance de 1 W. Une charge adaptée R_L = 0.71 Ω serait presque un court-circuit et ferait chauffer les piles : ne l’essayez pas à la maison, seulement dans PhET.

> **Sécurité**

- Ne branchez la charge de 22 Ω que quelques secondes ; la résistance et les piles chauffent.
- Ne court-circuitez jamais les bornes de la pile.

Alternative à la maison ou virtuelle

- L'étape des deux mesures est le TP à la maison ; le balayage de puissance se fait uniquement dans PhET.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force)

Lien avec la planète : L'EIA indique que le rendement des modules photovoltaïques est passé de moins de 10 % au milieu des années 1980 à près de 25 % aujourd'hui ; faire fonctionner chaque panneau à sa charge optimale fait partie de l'exploitation de cette production. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

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

TP D : charge d’un circuit RC et constante de temps

SEMAINE 10

Objectif : Observer un condensateur se charger à travers une résistance, mesurer la constante de temps et comparer avec τ = RC.

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

v_C(t)=V(1-e^-t/RC)

Charge RC

Mode opératoire

1. Dans PhET Circuit Construction Kit: AC, montez une pile, une résistance, un condensateur et un interrupteur ; utilisez le graphique de tension pour suivre v_C.
2. À la maison : placez un condensateur de 1000 µF (tension nominale de 6.3 V ou plus, patte négative vers le − de la pile) en série avec 10 kΩ sous 3 V. Relevez v_C au multimètre toutes les 10 s.
3. Trouvez l’instant où v_C atteint 63.2 % de la tension finale ; c’est τ.
4. Tracez ln(1 − v_C/V) en fonction de t ; la pente vaut −1/τ. Déchargez le condensateur à travers la résistance avant de le ranger.

Tableau de données

t (s)	0	10	20	30	50
v_C (V)	0	1.90	2.59	2.85	2.98

Valeurs idéales pour R = 10 kΩ, C = 1000 µF et V = 3 V. Les condensateurs électrolytiques sont souvent à ±20 %, et le multimètre lui-même charge légèrement le circuit.

Exemple de calcul

1. $\tau = 10^{4} \times 10^{-3} = 10$ s.
2. $v_C(10\text{ s}) = 3(1 - e^{-1}) = 1.90$ V; $v_C(50\text{ s}) = 3(1 - e^{-5}) = 2.98$ V.

> **Sécurité**
>
> - Branchez les condensateurs électrolytiques dans le bon sens et en dessous de leur tension nominale ; montés à l’envers, ils peuvent éclater. Portez des lunettes.

Alternative à la maison ou virtuelle

- La version sur plaque d’essai est le TP à la maison.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

Lien avec la planète : Le Berkeley Lab indique que les centres de données ont consommé environ 4.4 % de l'électricité des États-Unis en 2023 ; chaque commutation logique en leur sein est une minuscule charge RC comme celle-ci. Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/)

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

TP E : résonance RLC

SEMAINE 13

Objectif : Alimenter un circuit RLC série par une source alternative à différentes fréquences, trouver le pic de résonance et comparer avec $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

$$|I| = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

`|I|=^2+(ω L-1/ω C)^2`

Courant d'un RLC série

Mode opératoire

1. Dans PhET Circuit Construction Kit: AC (ou son Virtual Lab), montez une source alternative, une résistance, une bobine et un condensateur en série avec un ampèremètre.
2. Réglez R = 10 Ω, L = 10 mH et C = 10 µF si possible, ou notez les valeurs utilisées par PhET, et calculez f_0.
3. Faites varier la fréquence de la source autour de f_0 et relevez l'amplitude du courant.
4. Tracez |I| en fonction de f, trouvez le pic et les points à mi-puissance, et comparez la bande passante avec ω_0/Q.

Tableau de données

f (Hz)	400	503	600
|I| (A) pour 10 V	0.563	1.000	0.667

Valeurs calculées pour R = 10 Ω, L = 10 mH, C = 10 µF et une source d'amplitude 10 V.

Exemple de calcul

1. $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})}) = 503.3$ Hz ; à f_0, |Z| = R = 10 Ω, donc |I| = 1 A.
2. At 400 Hz: X_L = 25.13 Ω, X_C = 39.79 Ω, |Z| = 17.76 Ω, |I| = 0.563 A.

> **Sécurité**
>
> - Simulation uniquement : ne montez pas de circuits alternatifs alimentés par le secteur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Ce TP se fait uniquement dans PhET par sécurité ; aucun câblage à la maison.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Circuit Construction Kit: AC – Virtual Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtu

al-lab)

Lien avec la planète : L’AFDC indique que les chargeurs de VE par induction transfèrent l’énergie par un champ électromagnétique ; des circuits LC accordés comme celui-ci rendent ce transfert efficace. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations)

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

TP F : mesurer la puissance active à la maison et transformateurs dans PhET

SEMAINE 14

Objectif : Utiliser un wattmètre à prise pour comparer la puissance active d'ampoules et d'appareils, estimer l'énergie annuelle et explorer les rapports de tension des transformateurs dans PhET.

$$w = Pt, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

`w=Pt, (V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)`

Énergie et transformateur idéal

Mode opératoire

1. Branchez un wattmètre sur une prise murale et une lampe sur le wattmètre (n'ouvrez jamais le wattmètre ni la lampe). Relevez les watts avec une ampoule à incandescence ou halogène, puis avec une LED de luminosité similaire.
2. Si le wattmètre affiche les VA et le facteur de puissance, relevez-les aussi pour un chargeur de téléphone et un ventilateur.
3. Estimez les kWh annuels à raison de 3 heures par jour et comparez.
4. Dans PhET Faraday's Law, changez le nombre de spires et la vitesse de l'aimant, et reliez la tension induite à N et à la vitesse de variation du flux.

Tableau de données

Ampoule	P (W)	kWh/an à 3 h/jour
Incandescence	60	65.7
LED (lumière similaire)	9	9.9

Relevés d'exemple ; le guide du DOE indique que les LED consomment au moins 75 % d'énergie en moins que les ampoules à incandescence. Vos ampoules donneront vos propres chiffres.

Exemple de calcul

1. 60 W × 3 h × 365 = 65.7 kWh ; 9 W donnent 9.86 kWh.
2. Économie = 85 % pour cette LED d'exemple, cohérent avec « au moins 75 % ».

> **Sécurité**
>
> - N'utilisez qu'un wattmètre à prise du commerce et des appareils à prise ; ne touchez jamais les contacts d'une prise et n'ouvrez aucun appareil. Laissez refroidir les ampoules chaudes avant de les manipuler.

Alternative à la maison ou virtuelle

- L'étape du wattmètre à prise est le TP à la maison ; les transformateurs s'explorent dans PhET.

PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

Lien avec la planète : L'EIA estime les pertes de transport et de distribution à environ 5 % ; chaque watt économisé à l'ampoule évite aussi ces pertes en amont. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3)

☐ **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. Trouvez la résistance équivalente de 12 Ω en parallèle avec (4 Ω + 2 Ω).

    1. 12 × 6/(12 + 6).

    Réponse : 4 Ω.

2. Une source de 24 V alimente 3 kΩ et 1 kΩ en série. Trouvez la tension aux bornes de 1 kΩ.

    1. Diviseur : 24 × 1/4.

    Réponse : 6 V.

3. Un nœud est relié à 12 V par 4 Ω, à la masse par 12 Ω, et reçoit 2 A d'une source de courant. Trouvez sa tension.

    1. (v − 12)/4 + v/12 = 2, donc 4v = 60.

    Réponse : 15 V.

4. Un réseau a v_oc = 18 V et i_sc = 6 A. Trouvez R_Th et la puissance maximale qu'il peut fournir.

    1. R_Th = 3 Ω; P = $18^2/(4 \times 3)$.

    Réponse : 3 Ω et 27 W.

5. Un amplificateur inverseur a R_f = 33 kΩ et R_in = 3.3 kΩ. Trouvez v_o pour v_in = −0.4 V.

    1. Gain = −10.

Réponse : +4 V.

Série d’entraînement finale (toutes les unités)

1. Un condensateur de 20 µF se charge depuis 0 V à travers 5 kΩ vers 10 V. Trouvez τ et v_C à 0.2 s.

    1. τ = 0.1 s; $10(1 - e^{-2})$.

    Réponse : τ = 0.1 s, v_C = 8.65 V.

2. Un RLC série a R = 40 Ω, L = 0.1 H et C = 100 µF. Classez la réponse et trouvez ω_d si elle oscille.

    1. $\alpha = 200\ s^{-1}$; $\omega_0 = 316.2$ rad/s.

    Réponse : Pseudo-périodique, ω_d = 244.9 rad/s.

3. Trouvez l’impédance de 20 Ω en série avec 100 µF à 60 Hz.

    1. Z_C = −j26.53 Ω.

    Réponse : $Z = 20 - j26.53\ \Omega = 33.22\angle -52.99°\ \Omega$.

4. Une charge absorbe 12 A efficaces sous 120 V efficaces avec pf 0.85 en retard. Trouvez P et Q.

    1. S = 1440 VA ; sin θ = 0.5268.

    Réponse : P = 1224 W, Q = 758.6 VAR.

5. Un transformateur 20:1 a 2400 V au primaire et une charge de 10 A au secondaire. Trouvez V_2 et I_1.

    1. $V_2 = 2400/20$; $I_1 = 10/20$.

    Réponse : 120 V et 0.5 A.

6. Trouvez la puissance d’une charge triphasée équilibrée de 208 V absorbant 50 A avec un facteur de puissance unitaire.

    1. √3 × 208 × 50.

    Réponse : 18.01 kW.

Fiche de formules

$$i = dq/dt,\ p = vi,\ v = iR$$

$$R = \rho L/A,\ p = i^2R = v^2/R$$

$$\sum i = 0,\ \sum v = 0$$

$$R_s = \sum R,\ 1/R_p = \sum 1/R$$

$$v_2 = vR_2/(R_1+R_2) \qquad V_{Th} = v_{oc},\ R_{Th} = v_{oc}/i_{sc},\ P_{\max} = V_{Th}^2/(4R_{Th})$$

$$v_o = -(R_f/R_{in})v_{in},\ v_o = (1+R_f/R_g)v_{in} \qquad i = C\,dv/dt,\ v = L\,di/dt,\ w = \tfrac{1}{2}Cv^2,\ \tfrac{1}{2}Li^2$$

$$\tau = RC,\ L/R;\ x(t) = x(\infty) + [x(0) - x(\infty)]e^{-t/\tau} \qquad \alpha = R/2L,\ \omega_0 = 1/\sqrt{LC},\ \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$Z_L = j\omega L,\ Z_C = 1/(j\omega C),\ V_{rms} = V_m/\sqrt{2} \qquad P = VI\cos\theta,\ Q = VI\sin\theta,\ S^2 = P^2 + Q^2$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1,\ P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$$

Constantes

Constante	Valeur
1 kilowattheure (kWh)	3.6 × 10⁶ J
1 cheval-vapeur (électrique)	746 W
Charge élémentaire e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
Alimentation domestique aux États-Unis	120 V et 240 V à 60 Hz
Valeur efficace d’une sinusoïde	V_rms = V_peak/√2 ≈ 0.7071 V_peak
1 ampère-heure (Ah)	3600 C

Source : NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

Textes et simulations gratuits

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

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Vidéos de cours, notes, exercices et TP gratuits du MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, 10.3 Kirchhoff’s rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Chapitre de manuel gratuit sur les circuits en continu.
- OpenStax University Physics Volume 2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Chapitre de manuel gratuit sur les circuits en alternatif.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Construire et mesurer des circuits en continu.

- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Condensateurs, bobines et sources alternatives.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): V = IR de façon interactive.

Glossaire

Puissance apparente
S = V_rms I_rms, en VA.

Condensateur
Élément avec i = C dv/dt qui stocke l'énergie dans un champ électrique.

Impédance
Rapport complexe V/I en régime sinusoïdal établi.

Bobine
Élément avec v = L di/dt qui stocke l'énergie dans un champ magnétique.

KCL
La somme des courants sortant d'un nœud est nulle.

KVL
La somme des tensions le long d'une boucle est nulle.

Maille
Boucle qui ne contient aucune autre boucle.

Nœud
Point où deux éléments ou plus sont reliés.

Équivalent de Norton
Source de courant I_N en parallèle avec R_N.

Amplificateur opérationnel
Amplificateur différentiel à grand gain utilisé avec une contre-réaction.

Convention récepteur
Le courant entre par la borne + d'un élément qui absorbe de la puissance.

Phaseur
Nombre complexe donnant l'amplitude et la phase d'une sinusoïde.

Facteur de puissance
$\cos \theta = P/S$.

Facteur de qualité
$Q = \omega_0 L/R$, finesse de la résonance.

RMS
Valeur efficace (moyenne quadratique) ; $V_m/\sqrt{2}$ pour une sinusoïde.

Puissance réactive
$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \theta$, en VAR.

Supernœud
Deux nœuds reliés par une source de tension, traités ensemble dans la loi des nœuds.

Équivalent de Thévenin
Source de tension V_Th en série avec R_Th.

Constante de temps
τ = RC ou L/R.

Transformateur
Bobines couplées qui modifient une tension alternative selon le rapport de spires.

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	Annote entièrement les circuits, choisit une méthode efficace (diviseurs, nodale, mailles, Thévenin, phaseurs), vérifie le bilan de puissance et les cas limites, et travaille en sécurité en TP.
3 · Compétent	Résout les exercices avec quelques erreurs de signe ou d’unité.
2 · En progression	Suit les exemples traités mais confond série et parallèle, ou la convention de signe.
1 · Débutant	Injecte des nombres dans les formules sans schéma annoté ; doit revoir le module.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	20%
Travaux pratiques	25%
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

- Algèbre linéaire MATH 230
- Aérodynamique I AERO 310

- Analyse III MATH 210
- Tous les cours